مجله تحقیق در عملیات در کاربردهای آن، سال بیست و دوم، شماره اول (پیاپی ۸۴)،بهار ۰۴، ص ص ۱۴۷-۱۲۵
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

طراحی مدل زمان‌بندی قطار با استفاده از بهینه‌سازی استوار و رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها

شیرین رمضان قنبری[۱]، بهروز افشار نجفی[۲*]، مجید سبزه‌پرور[۳]
۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
۳- استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

رسید مقاله: ۱۲ اسفند ۱۴۰۲
پذیرش مقاله: ۱۱ تیر ۱۴۰۳

چکیده

امروزه با پیشرفت سریع سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی، تقاضای مسافر و احتمال رخداد ریسک‌ها در این صنعت افزایش یافته است. این شرایط منجر به عدم‌قطعیت در تقاضای مسافر و ایجاد اثرات نامطلوب در نتیجه رخداد ریسک‌ها شده و برنامه‌ریزی دقیق را با مشکل مواجه می‌کند. از این‌رو، به‌منظور مقابله با عدم‌قطعیت و کاهش اثرات منفی، بهینه‌سازی استوار مساله زمان‌بندی قطار در حضور ریسک‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد. در این مطالعه، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط دو مرحله‌ای پیشنهاد می‌شود. در مرحله اول، هدف از مساله اسمی کمینه‌سازی زمان کل سفر قطار می‌باشد. در مرحله دوم، به‌منظور کمینه‌سازی تقاضای برآورده‌نشده مسافران یک مدل بهینه‌سازی استوار توسعه داده می‌شود. همچنین، برای حضور ریسک‌های اولیه و ثانویه در هر دو مرحله، برنامه‌ریزی صورت می‌گیرد. سپس، به‌منظور تایید اثربخشی و مقایسه مدل‌های پیشنهادی رویکرد حل تحلیل پوششی داده‌ها به‌کار گرفته شده و یک مثال کاربردی ارایه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد در شرایط عدم‌قطعیت، با افزایش ناچیز در زمان سفر قطار و همچنین تعداد توقف‌های قطار در مساله اسمی، راه‌حل‌های استوار می‌توانند تقاضای برآورده نشده مسافران را به‌طور چشم‌گیر و موثری کاهش دهند. علاوه بر این، مشخص می‌شود که ریسک ثانویه نقش مهمی در انتخاب اقدامات پاسخ اولیه بازی می‌کند.

کلمات کلیدی: زمان‌بندی اسمی قطار، بهینه‌سازی استوار، ریسک اولیه و ثانویه، اقدامات پاسخ، تحلیل پوششی داده‌ها.

۱ مقدمه

صنعت حمل‌ونقل ریلی یک سیستم بسیار پیچیده است که می‌تواند با ریسک‌های فاجعه‌باری روبرو شود. به عنوان مثال حوادث ریلی بریتانیا در سال ۱۹۹۹، استرالیا در سال ۲۰۰۳، ایالات متحده در سال ۲۰۰۸ و اسپانیا در سال ۲۰۱۳ مهم‌ترین موارد در سال‌های اخیر هستند که در مجموع منجر به مرگ ۱۱۴۲ نفر شدند [۱]. اگرچه این

* عهده‌دار مکاتبات
آدرس الکترونیکی: afsharnb@alum.sharif.edu

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]
[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

حوادث در مقایسه با دیگر حوادث صنعت حمل‌ونقل به‌ندرت رخ می‌دهند، اما زیان‌ها، صدمات و تاخیرات زیادی را به همراه دارند. با این حال رویکردهای سنتی دیگر نمی‌توانند با پیچیدگی روزافزون چنین سیستم‌های فنی‌اجتماعی مدرن مقابله کنند. بنابراین یک رویکرد مبتنی بر کنترل و کاهش ریسک نیاز است که بررسی را بر عملکرد نرمال سیستم متمرکز کند نه این‌که در انتظار رخداد حوادث فاجعه‌بار باشد [۲]. در صنعت حمل‌ونقل ریلی، مدیریت ریسک به دلیل اشتراکات فراوانی که با الزامات ایمنی دارد می‌تواند بسیار کارآمد باشد. تقریباً در همه جای جهان، انواع خطرات و تاخیر با اثرات متفاوت در این صنعت رایج است. بررسی عوامل و تشخیص موارد حادثه‌خیز برای پیشگیری از بروز حوادث از اهمیت ویژه‌ای برخودار است. بسیاری از عواملی که باعث ایجاد ریسک و تاخیر در حرکت قطارها می‌شوند قابل پیشگیری بوده و یا می‌توان از شدت آسیب آنها کاست. از اینرو، توجه به رویکرد مدیریت ریسک ضروری به‌نظر می‌رسد چون کاهش ریسک مرگ‌ومیر، کاهش هزینه‌ها و افزایش رضایت مسافران از اهداف اصلی این رویکرد است [۳].

مدیریت ریسک یک رویکرد سازمان‌یافته و نظام‌مند به منظور شناسایی و برآورد ریسک می‌باشد که تلاش می‌کند ریسک را تا سطح قابل‌قبولی به حداقل برساند. علاه بر این، در انتخاب اقدامات پاسخ مناسب به‌منظور مدیریت و کنترل متغیر ریسک شناسایی‌شده و دستیابی به نتایج مطلوب بسیار مفید است [۴]. اکثر روش‌های انتخاب اقدامات پاسخ به ریسک بر کاهش ریسک‌های اولیه تمرکز دارند. اما باید توجه داشت که در طول اجرای استراتژی‌های پاسخ به ریسک، ممکن است که ریسک‌های ثانویه نیز ایجاد شوند که مشابه با ریسک‌های اولیه می‌توانند آثار مخربی را به‌جای بگذارند [۵]. بنابراین، بسیار پراهمیت است که مشخص شود به‌منظور جلوگیری از رخداد ریسک‌های ثانویه، کدام اقدامات پاسخ به ریسک اولیه بکار گرفته نشوند و در صورت رخداد ریسک‌های ثانویه اقدامات پاسخ به آنها نیز چگونه باشند.

از طرف دیگر، مساله زمان‌بندی به عنوان یک مساله بهینه‌سازی در صنعت حمل‌ونقل ریلی این امکان را ایجاد می‌کند که به‌منظور ورود و خروج قطارها به ایستگاه‌ها بهترین برنامه زمانی تعیین شود، به‌طوریکه حداکثر بهره‌وری و حداقل هزینه برای مسافران و شرکت‌ها فراهم گردد. تهیه برنامه زمان‌بندی قطارها از مهم‌ترین و دشوارترین فعالیت‌ها محسوب می‌شود و این دشواری به دلیل ابعاد بزرگ و روبه‌رشد مسایل واقعی و همچنین وجود محدودیت‌های عملیاتی مختلف است. علاوه بر دشواری برنامه‌ریزی سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی، انتظارات مسافران برای دریافت خدمت مناسب‌تر افزایش یافته است. از این‌رو، با افزایش تقاضای مسافران و توسعه خطوط ریلی، اهمیت مساله زمان‌بندی قطار دو چندان شده است [۶].

مسایل بهینه‌سازی دنیای واقعی اغلب در معرض عدم‌قطعیت هستند. خطاهای اندازه‌گیری، خطاهای پیاده‌سازی، خطاهای اختلالات سیستمی و یا داده‌های موجود ناقص در لحظه عواملی هستند که می‌توانند راه‌حل‌های قطعی را از دیدگاه علمی بی‌معنی کنند و به ندرت زمینه‌ای وجود دارد که از این عوامل مصون باشند. به همین دلیل رویکردهای بسیاری برای رویارویی با چنین عدم‌قطعیت‌هایی ایجاد شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به رویکردهای برنامه‌ریزی احتمالی، فازی، پویای احتمالی و استوار اشاره کرد [۷]. در میان این رویکردها،

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

بهینه‌سازی استوار اخیرا توجه زیادی را به خود جلب کرده است که هدف اصلی آن پیدا کردن راه‌حل‌هایی است که توانایی مقابله با داده‌های نامطمئن و احتمالی را داشته باشند [۸].

تا آنجا که در طول اجرای این مطالعه ادبیات مربوط به‌طور دقیق مورد بررسی قرار گرفت فضای پژوهشی در رابطه با مطالعه بهینه‌سازی استوار زمان‌بندی قطار با در نظر گرفتن اقدامات پاسخ به ریسک‌های اولیه و ثانویه خالی به‌نظر می‌رسید. البته در حوزه سیستم حمل‌ونقل ریلی و موضوع حضور ریسک‌های احتمالی مطالعاتی انجام شده است که می‌توان به پژوهش‌های بابیکو و همکاران [۹]، سات و بارکان [۱۰] و تیان و وانگ [۱۱] اشاره داشت. اما به‌طور خاص در رابطه با موضوع بهینه‌سازی استوار مساله زمان‌بندی قطار در حضور رخداد ریسک‌های اولیه و ثانویه و همچنین در نظر گرفتن اقدامات پاسخ به ریسک‌ها خلأ تحقیقاتی احساس شد. تنها در مطالعه رمضان قنبری و همکاران [۱۲] می‌توان مشاهده کرد که به‌طور هم‌زمان بهینه‌سازی استوار و اقدامات پاسخ به ریسک‌ها در مسایل زمان‌بندی قطار مورد بررسی قرار می‌گیرد که پژوهش حاضر در راستای توسعه این مطالعه انجام گرفته است. بنابراین، مطالعه حاضر در تلاش است یک مساله اسمی زمان‌بندی قطار را در حضور رخداد ریسک‌های اولیه و ثانویه تعریف کند تا علاوه بر حداقل نمودن زمان کل سفر قطارها و تعداد کل توقفات قطارها، مجموعه اقدامات بهینه پاسخ به ریسک‌ها را مشخص کند. در مرحله بعد، به‌منظور غلبه بر عدم‌قطعیت در تقاضای مسافران بین ایستگاه‌ها، مدل بهینه‌سازی استوار مساله اسمی زمان‌بندی قطار توسعه داده می‌شود و تقاضای برآورده‌نشده مسافران به دلیل تقاضای اضافی، با ایجاد یک سطح حفاظتی مطلوب مدیریت می‌گردد و به حداقل مقدار ممکن می‌رسد. از آنجا که در پایان این مرحله با راه‌حل‌های استوار متعددی سروکار داریم، رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها بکار گرفته می‌شود تا از میان راه‌حل‌های استوار، راه‌حل استوار کارا انتخاب گردد. دیگر بخش‌های مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده است:

در بخش دوم، پیشینه تحقیق ریسک در حوزه صنعت حمل‌ونقل ریلی، زمان‌بندی قطار و بهینه‌سازی استوار بررسی می‌شود. بخش سوم به تشریح مساله می‌پردازد. در بخش چهارم، ابتدا مساله اسمی زمان‌بندی قطار در حضور ریسک‌های اولیه و ثانویه فرموله می‌گردد و سپس مدل بهینه‌سازی استوار توسعه داده می‌شود. در بخش پنجم، رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها به‌منظور سنجش کارایی سناریوهای مختلف معرفی خواهد شد. بخش ششم، یک مطالعه واقعی را به‌کار گرفته و تحت سناریوهای مختلف تقاضای مسافران استواری مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش هفتم ارایه می‌شود.

۲ مروری بر پیشینه تحقیق

۲-۱ صنعت حمل‌ونقل ریلی و ریسک

افزایش عرضه در صنعت حمل‌ونقل ریلی در چند سال اخیر با افزایش نرخ سوانح و کشته‌شدگان این سیستم حمل‌ونقل همراه بوده است که با توجه به تعدد ریسک‌های موجود در سیستم، ضرورت بررسی سیستماتیک ریسک‌ها و برنامه‌ریزی جهت کاهش پیامدهای حاصل از آنها، جهت رسیدن به سیستم مدیریت ایمنی را بیش از پیش می‌کند. رویکرد مدیریت ریسک به عنوان پیشتاز و مهم‌ترین بخش مدیریت ایمنی پاسخگوی تمامی این

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

نیازها است. مدیریت ریسک در واقع یک نظام پویا است که مجموعه‌ای از مسایلی نظیر شناسایی موارد، برآورد مقادیر، برنامه‌ریزی، پیگیری چگونگی کاهش و اصول کنترل ریسک را در بر می‌گیرد. همچنین، توسعه روزافزون و کاربرد مدیریت ریسک در صنایع مختلف سبب گردیده که ریسک به عنوان یک مؤلفه عمومی تعریف و حدود و کنترل‌هایی برای آن تعیین گردد. ریسک یکی از عوامل مهم ایجاد تاخیرات زمانی و زیان‌های مالی است و در ادبیات، به عنوان ریسک اولیه شناخته می‌شود که حتما باید شناسایی شده تا به‌درستی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد [۵]. با شناسایی ریسک اولیه می‌توان احتمال وقوع و شدت آن را مشخص نمود تا اقدامات پاسخ به ریسک اولیه اتخاذ شوند و با اجرای یک اقدام مناسب پاسخ، ریسک اولیه به‌خوبی کنترل شود. دسته‌ای دیگر از ریسک‌ها با عنوان ریسک ثانویه شناخته شده که از اجرای اقدامات پاسخ به ریسک اولیه ایجاد می‌شود که به‌منظور کنترل این نوع ریسک نیز باید اقدامات مناسب پاسخ برنامه‌ریزی شود. تأثیر ریسک ثانویه نباید از تأثیر ریسک اولیه بیشتر باشد در غیر اینصورت اقدام پاسخ به ریسک اولیه، که ریسک ثانویه از آن ناشی شده نباید اجرا گردد و یا باید اقدام پاسخ به ریسک اولیه دیگری انتخاب شود.

صنعت حمل‌ونقل ریلی از اجزای مختلف تشکیل شده که یک جزء آن می‌تواند بر دیگر اجزا تاثیرگذار باشد. تمام این اجزا دارای ریسک هستند که بعضی از این ریسک‌ها مستقل و برخی دیگر وابسته‌اند. مدیریت حمل‌ونقل ریلی، باید اجزای ریسک‌های مربوطه را بشناسد و آنها را مدیریت نماید. با توجه به فقدان یک الگوی جامع برای شناسایی ریسک‌ها و برآورد میزان ریسک در بخش حمل‌ونقل به عنوان یکی از پرحادثه‌ترین بخش‌ها و همچنین صنعت حمل‌ونقل ریلی، به عنوان بخشی که تاکنون کمترین دیدگاه سیستمی به ایمنی در آن صورت پذیرفته است می‌توان ادعا نمود که این صنعت به دلیل حساسیت‌های بالا و هزینه‌های غیرقابل‌جبران، شایسته پیاده‌سازی رویکرد مدیریت ریسک می‌باشد [۳].

امروزه دانش مدیریت ریسک و به‌کارگیری آن در صنعت حمل‌ونقل و ایمنی از اولویت‌های بالای شرکت‌های حمل‌ونقل بین‌المللی است. در اکثر کشورهای پیشرفته دنیا به‌منظور تامین ایمنی و کاهش مخاطرات در صنعت حمل‌ونقل ریلی از مدیریت ریسک به عنوان یک فرایند پویا و سیستماتیک جهت ارزیابی سطح ایمنی در زیربخش‌ها و حوزه‌های مختلف، و بررسی تطابق سطح ایمنی با یک چارچوب استاندارد استفاده می‌گردد. بابیکو و همکاران [۹] در حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی مواد خطرناک رویکردی را براساس سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی ارایه دادند که امکان انجام سریع ارزیابی ریسک را برای مواد، سفرها و برنامه‌های سفر متعدد فراهم می‌کرد. سات و بارکان [۱۰] یک مدل بهینه‌سازی را براساس مدل طراحی ایمنی خودروی تانک توسعه دادند که ارزیابی تمامی گزینه‌های بهبود طراحی ایمنی را امکان‌پذیر کرده و خروجی آن باعث کاهش مقرون‌به‌صرفه ریسک حمل‌ونقل مواد خطرناک در راه‌آهن می‌شد. تیان و وانگ [۱۱] زمان‌بندی نگهداری پیشگیرانه اجزای قطار مترو را بررسی کردند که چشم‌انداز خرابی ریسک را با استفاده از یک مدل بازی بهینه می‌کرد.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

۲-۲ زمان‌بندی قطار و بهینه‌سازی استوار

استفاده از خطوط ریلی از مهم‌ترین و ارزان‌ترین گزینه‌های حمل‌ونقل مسافر و بار شمرده می‌شود. استفاده بهینه و بیشینه از زیرساخت‌های موجود در صنعت حمل‌ونقل ریلی، باتوجه به زیاد بودن هزینه‌های لازم برای گسترش خطوط دارای اهمیت بسیار است. بهینه‌سازی مساله زمان‌بندی در خطوط ریلی از جمله مهم‌ترین مواردی است که به استفاده بیشینه از زیرساخت‌های موجود کمک می‌کند. زمان‌بندی مشخص می‌کند که هر قطار چه زمانی به هر ایستگاه وارد شود، چه زمانی از آن خارج شود و در کدام ایستگاه‌ها متوقف شود. از اینرو، به دلیل اهمیت بالا در بهره‌برداری از سیستم‌های ریلی، مساله زمان‌بندی قطار توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. به‌طور کلی، در مرور ادبیات دو رویکرد به نام رویکردهای اسمی و استوار به‌منظور پرداختن به این دسته از مسایل وجود دارد. رویکرد اسمی به بهینه سازی اهدافی از قبیل به حداقل رساندن زمان سفر و به حداکثر رساندن رضایت مسافر کمک می‌کند، درحالی‌که هدف رویکرد بهینه‌سازی استوار یافتن راه‌حل‌هایی است که نسبت به عدم‌قطعیت‌ها تقریباً غیرحساس باشند. به بیان دیگر، با بهینه‌سازی استوار برنامه‌ریزی‌ها دقیق‌تر انجام می‌شود و برخی بی‌نظمی‌ها، انحرافات زمانی و بسیاری از هزینه‌های اضافی به میزان قابل توجهی کاهش پیدا خواهند کرد [۸].

در سال‌های اخیر، مطالعات بسیاری در زمینه مساله زمان‌بندی اسمی انجام شده است. یالچینکایا و بایهان [۱۳] با هدف دستیابی به یک جدول زمان‌بندی امکان‌پذیر حرکت قطار، یک مساله زمان‌بندی را با رویکرد مدل‌سازی شبیه‌سازی توسعه دادند که توانایی زمان‌بندی مجدد قطار را داشت. لی و لو [۱۴] یک چارچوب کنترل و زمان‌بندی پویای قطار را براساس رویکرد کوهن-تاکر به‌منظور بهبود عملکرد و کاهش مصرف انرژی خالص خط ریلی پیشنهاد دادند. مو و همکاران [۱۵] به‌منظور برآورده کردن تقاضای مسافران یک مدل زمان‌بندی قطار انعطاف‌پذیر را همراه با الگوریتم حل جستجوی ممنوع اصلاح شده پیشنهاد دادند که اهداف آن به حداقل رساندن هزینه انرژی و زمان انتظار مسافران بود. رخ‌فروز و فینک [۱۶] زمان‌بندی قطار و تعمیرات قابل پیش‌بینی را به‌صورت یک مساله برنامه‌ریزی پیشنهاد دادند که برای حل این مساله، الگوریتم یادگیری توزیع‌شده سلسله‌مراتبی توسط تجزیه دوگان و طراحی مکانیزم توسعه داده شد و اثربخشی مدل پیشنهادی در بررسی یک شبکه راه‌آهن تایید شد. فنگ و همکاران [۶] به‌منظور مدیریت عملیاتی تقاضای نوسانی روزانه، با تمرکز بر جدول زمان‌بندی حرکت و اتصال‌دهنده قطار یک رویکرد بهینه‌سازی یکپارچه را پیشنهاد دادند. ژوو و همکاران [۱۷] مساله یکپارچه زمان‌بندی قطار با کارآمدی انرژی و برنامه‌ریزی گردش قطار برای راه‌آهن شهری را بررسی کردند که باعث کاهش هزینه‌های عملیاتی سهام نورد از جمله مصرف انرژی شد.

علاوه بر این، در سال‌های اخیر رویکرد بهینه‌سازی استوار در زمان‌بندی قطار توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. بهینه‌سازی استوار یکی از روش‌های جدید در برنامه‌ریزی ریاضی بوده که هدف اصلی آن انتخاب راه‌حل‌هایی است که توانایی مقابله با داده‌های نامطمئن را داشته باشند. در این رویکرد فرض بر این است که داده‌ها نامطمئن، محدود و ناشناخته هستند و در اکثر تحقیقات فضای عدم‌قطعیت، محدب در نظر گرفته می‌شود. همچنین، برخلاف برنامه‌ریزی‌های دیگر، بهینه‌سازی استوار به هیچ اطلاعاتی در مورد توزیع احتمال داده‌های نامطمئن نیاز ندارد [۱۸]. در زمان‌بندی قطار انحرافات رخ‌داده‌شده در سطح عملیاتی، یک جدول زمان‌بندی

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

حرکت ناشدنی را ایجاد می‌کند، با این وجود به‌کارگیری بهینه‌سازی استوار می‌تواند درجه انحرافات نسبت به طرح پایه را کاهش دهد.

جمیلی و پورسیدآقایی [۱۹] مدل غیرخطی استوار را به‌منظور پیدا کردن الگوی توقف بهینه در سیستم‌های ترانزیت شهری ریلی توسعه دادند تا تقاضای ورودی و خروجی نامطمئن مسافران را مدیریت کنند. ژو و همکاران [۲۰] با هدف کاهش تعداد مسافران منتظر در سیستم‌های مترو یک رویکرد بهینه‌سازی زمان‌بندی استوار را براساس دو الگوریتم ابتکاری توسعه دادند. کاچیانی و همکاران [۲۱] به‌منظور برنامه‌ریزی برای طرح توقف قطار و زمان‌بندی براساس تقاضای نامطمئن، بهینه‌سازی استوار را توسعه دادند که به‌طور هم‌زمان، باعث کاهش عدم-قطعیت در تقاضا و کاهش بدتر شدن مقادیر تابع هدف مساله اسمی شد. پو و ژان [۲۲] یک رویکرد دومرحله‌ای برنامه‌ریزی خط ریلی استوار را پیشنهاد دادند که با کنترل عدم‌قطعیت در تقاضای مسافران منجر به تعادل ظرفیت حمل‌ونقل و کاهش نوسان در تقاضای مسافران می‌گشت. نصری و خوش‌الحان [۲۳] زمان‌بندی دوهدفه استوار خطوط مترو در حالت رد-توقف را ایجاد کردند که نتیجه آن کاهش زمان سفر مسافران و کاهش مصرف انرژی بود. هو و همکاران [۲۴] یک زمان‌بندی استوار قطار را در شرایط عدم‌قطعیت مسافران ارایه دادند که جدول زمانی بهینه‌شده در این مطالعه با مدیریت الگوی توقف و اجرای استراتژی کنترل جریان مسافر به‌طور موثری ازدحام ایستگاه‌ها را کاهش می‌داد.

۲-۳ تحلیل پوششی داده‌ها در صنعت ریلی

تحلیل پوششی داده‌ها یک رویکرد ناپارامتری و مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی بوده که نخستین بار توسط چارنز و همکاران بر پایه تعمیم ایده یک نهاده و ستاده به نهاده‌ها و ستاده‌های چندگانه، به‌منظور ارزیابی عملکرد و کارایی مجموعه‌ای از واحدهای تصمیم‌گیری نامتجانس ارایه شده است [۲۵]. این رویکرد یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین روش‌های حوزه ارزیابی عملکرد و کارایی بوده، به‌طوری‌که برای آن تاکنون مطالعات گسترده و قابل توجه‌ای چه در از نظر توسعه و گسترش مدل‌ها و چه از نظر کاربرد در مسایل و حوزه‌های مختلف از جمله صنعت حمل‌ونقل ریلی، توسط پژوهشگران انجام پذیرفته است.

مهاجری و همکاران [۲۶] تحلیل پوششی داده‌ها را در حوزه صنعت ریلی به‌کار گرفتند تا بتوانند مکان بهینه ایستگاه راه‌آهن در شهر مشهد را پیدا کنند. کلینوا [۲۷] با هدف برآورد عملکرد راه‌آهن از دیدگاه تقاضا، تعداد مسافران و حجم کالای جابه‌جاشده به عنوان شاخص‌های موفقیت در این فرایند، بکارگیری تحلیل پوششی داده‌ها را پیشنهاد داد. ثامنی و همکاران [۲۸] برای ارزیابی کارایی ایستگاه‌های مسافربری راه‌آهن یک رویکرد مبتنی بر تحلیل پوششی داده‌ها را توسعه دادند که توانست به سیاست‌گذاران و متخصصان کمک نماید تا ایستگاه‌ها را از نظر کارایی رتبه‌بندی کنند و تصمیمات مطلوبی اخذ نمایند. کاوون و همکاران [۲۹] به‌منظور بهینه‌سازی استوار مساله زمان‌بندی مجدد قطار یک رویکرد تصمیم‌گیری را براساس برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و تحلیل پوششی داده‌ها به‌کار گرفتند. ژانگ و همکاران [۳۰] با هدف انتخاب کاراترین عملیات باری چین-اروپا رویکرد

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

تحلیل پوششی داده‌های کارایی متقاطع خاکستری را پیشنهاد کردند. فروتن و بامداد [۳۱] با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌های شبکه‌ای کارایی ایستگاه‌های مسافربری راه‌آهن را اندازه‌گیری کردند و نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی می‌تواند در دنیای واقعی کارایی را بهتر محاسبه کند.

۳ تشریح مساله

یک شبکه ریلی با مجموعه‌ای از ایستگاه‌ها S در امتداد خطوط ریلی و مجموعه‌ای از قطارها K که در جهت یکسان حرکت می‌کنند، در نظر گرفته می‌شود. مجموعه ایستگاه‌ها با توجه به هر قطار k به زیرمجموعه‌ای از ایستگاه‌ها S_k تقسیم می‌شود و هر زیرمجموعه S_k برای قطار k دارای ایستگاه مبدأ ثابت O_k و ایستگاه مقصد ثابت D_k می‌باشد. مسافران با تقاضای Q_{ij} قصد دارند بین ایستگاه‌های i و j $(i, j \in S, i \neq j)$ جابه‌جا شوند. به‌منظور برآورده شدن تقاضا، تعداد توقف قطار و زمان‌های ترک و رسیدن قطار در هر ایستگاه بازدیده شده، باید به‌طور مناسبی مشخص شود. بنابراین، باید تصمیم گرفته شود که آیا قطار در ایستگاه s $(s \in S_k \setminus \{O_k, D_k\})$ متوقف شود یا خیر. با توقف قطار در زیرمجموعه کوچکی از ایستگاه‌ها، رضایت مسافران در رسیدن به مقصد بیشتر می‌شود، اما کیفیت خدمت‌رسانی قطار حداقل می‌گردد. به‌منظور جلب رضایت مسافران از زمان سفر و افزایش کیفیت خدمت‌رسانی، برای هر قطار k حداکثر تعداد توقف‌های N_k که می‌تواند در طول سفر داشته باشد و برای هر ایستگاه i حداقل تعداد قطارهایی که باید در ایستگاه توقف کنند num_i از قبل مشخص می‌شود. یکی دیگر از راه‌های افزایش کیفیت، وجود تعداد صندلی در قطار به اندازه تعداد مسافران است. بنابراین زمان برآورده شدن تقاضای مسافران باید ظرفیت قطار C_k رعایت شود.

قطار k در زمان ترک T_k از ایستگاه مبدأ خود O_k حرکت می‌کند و یک حداکثر زمان تاخیر مجاز ΔT_k برای اصلاح زمان ترک قطار مشخص می‌شود. پس از ترک قطار k، به‌منظور جابجایی از ایستگاه i به ایستگاه $i+1$ زمان سفر t_{ki}^{tr} در نظر گرفته می‌شود. اگر قطار k ایستگاه i را برای توقف انتخاب کند به اندازه زمان t_{ki}^{dwell} در آن ایستگاه اقامت دارد. سبقت قطارها تنها در ایستگاه‌ها امکان‌پذیر می‌باشد. همچنین، به‌منظور جلوگیری از برخورد قطارها با یکدیگر در یک ایستگاه، نیاز است تا زمان پیشروی ترک h_{dep} و زمان پیشروی رسیدن h_{arr} تعریف شود.

در شبکه ریلی یک مجموعه اصلی از ریسک‌ها R شناسایی شده که به دنبال آن، برای هر ایستگاه i به نمایندگی از مسیر ایستگاه i تا ایستگاه $i+1$، یک زیرمجموعه از ریسک‌ها R^i براساس مجموعه ریسک اصلی تخصیص داده می‌شود. در ایستگاه i هر ریسک اولیه r از زیرمجموعه R^i که رخ می‌دهد تاخیرات زمانی انتظاری D_{ir}^{time} و زیان پولی انتظاری L_{ir}^{co} را به ایستگاه مربوطه تحمیل می‌کند که مقادیر آنها بر اثر اهمیت ایستگاه i و اثر ریسک r توسط متخصصان تعیین می‌شود. برای غلبه بر اثرات منفی ناشی از ریسک‌ها، باید اقدامات پاسخ به ریسک امکان‌پذیر انتخاب شوند. بنابراین، یک مجموعه از اقدامات پاسخ به ریسک A شناسایی خواهد شد. برای هر ایستگاه i یک زیرمجموعه از اقدامات پاسخ به ریسک اولیه A^i براساس مجموعه اقدامات پاسخ به ریسک اصلی تخصیص داده می‌شود. اقدام پاسخ a به‌منظور کاهش اثر ریسک اولیه r در ایستگاه i، هزینه c_{ira}^{act} را ایجاد

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

می‌کند. پس از به‌کارگیری اقدام a مقدار زمان تخمینی و هزینه تخمینی که کاهش می‌یابد به‌ترتیب با e_{ira}^{time} و e_{ira}^{co} نشان داده می‌شوند.

با انتخاب اقدامات پاسخ به ریسک اولیه، زیرمجموعه‌ای از ریسک‌های ثانویه احتمالی ناشی از اجرای اقدامات ایجاد و شناسایی می‌گردند. فرض می‌شود که ریسک ثانویه r ناشی از بکارگیری اقدام a در ایستگاه i تاخیرات زمانی انتظاری D_{ira}^{stime} و زیان پولی انتظاری L_{ira}^{sco} را به ایستگاه تحمیل می‌کند. همچنین، به‌منظور پاسخ به ریسک‌های ثانویه اقداماتی از قبل برنامه‌ریزی شده است که اجرای اقدام پاسخ a به‌منظور کاهش اثر ریسک ثانویه r در ایستگاه i با هزینه اجرایی c_{ira}^{sact} می‌تواند با کاهش مقدار زمان تخمینی e_{ira}^{stime} و هزینه تخمینی e_{ira}^{sco}، اثر ریسک ثانویه را به حداقل برساند. علاوه بر این، به منظور مدیریت مطلوب تاخیرات زمانی و هزینه ناشی از ریسک، برای هر ایستگاه i ارزش‌های از پیش تعیین‌شده حداکثر میزان تاخیرات مجاز t_i^* و هزینه B_i در نظر گرفته شده است.

با توجه به این شرح مساله، هدف مساله اسمی پوشش تقاضای مسافر همراه با حداقل رساندن مجموع زمان سفر قطار T_T در حضور رخداد ریسک‌های اولیه و ثانویه است. این هدف یکی از مهم‌ترین اهداف در مساله زمان‌بندی قطار بوده و یکی از کلیدی‌ترین عناصر مورد توجه مسافران می‌باشد. از اینرو، جدول زمان‌بندی حرکت قطارها و تعداد توقف‌ها به منظور برآورده کردن تقاضای مسافران، همراه با انتخاب استراتژی‌های پاسخ به ریسک باید به‌گونه‌ای تعیین شوند که زمان سفر حداقل مقدار را به خود اختصاص دهد. با این حال، ممکن است تقاضای مسافران بیشتر از خدمت ارایه‌شده باشد که منجر به کیفیت ضعیف در خدمت‌رسانی و یا ایجاد راه‌حل غیرممکن در مساله اسمی می‌شود. بنابراین، در تعیین جداول زمان‌بندی حرکت و تعداد توقف‌های قطار، علاوه بر دستیابی به کوتاه‌ترین زمان سفر، رسیدگی به تقاضای اضافی پیش‌بینی‌نشده مسافر باید در نظر گرفته شود.

با توسعه مساله اسمی به مساله استوار می‌توان یک سطح حفاظتی مطلوب را برای تعداد مسافران اضافی که می‌خواهند از ایستگاه i به ایستگاه j سفر کنند در نظر گرفت. به‌منظور نگه‌داشتن مساله در شرایط امکان‌پذیری در زمان برآورده نشدن سطح حفاظتی، متغیر کمکی عدد صحیح تعریف می‌شود که نشان‌دهنده تعداد مسافرانی است که نمی‌توانند بین ایستگاه i به ایستگاه j سفر کنند. بنابراین، هدف مساله استوار حداقل کردن این تعداد مسافران می‌باشد. بدیهی است حمل‌ونقل مسافران اضافی، منجر به زمان‌های سفر طولانی و توقفات بیشتر قطار می‌گردد. از اینرو با راه‌حل استواری سروکار داریم که کارایی پایینی دارد. برای غلبه بر این مشکل، هدف مساله اسمی باید در مساله استوار قرار گیرد که راه‌حلی استوار و مؤثر را ارایه دهد. برای این منظور، محدودیت‌هایی بر روی کل زمان سفر قطار و کل تعداد توقف‌ها در مساله اسمی اعمال شده و به مدل بهینه‌سازی استوار اضافه می‌شود تا از افزایش نامطلوب ارزش آنها جلوگیری نماید.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

٤ مدل‌های ریاضی

٤-١ مساله اسمی زمان‌بندی قطار با در نظر گرفتن ریسک‌های اولیه و ثانویه

در این مقاله، به منظور پیشنهاد مساله زمان‌بندی قطار در حضور ریسک‌های اولیه و ثانویه، مدل ارایه‌شده در مطالعه کیوی و همکاران [۳۲] به‌کار گرفته می‌شود و با گسترش آن، مساله اسمی زمان‌بندی قطار فرموله می‌گردد. این مساله شامل پنج دسته از متغیرهای تصمیم‌گیری می‌باشد یعنی زمان‌های ترک از ایستگاه و رسیدن به ایستگاه، ترتیب قطارها به‌منظور جلوگیری از برخورد آنها با یکدیگر، تعداد ایستگاه‌هایی که قطار در آنها توقف می‌کند، تعداد مسافران در هر قطار و تعداد اقدامات پاسخ به ریسک‌های اولیه و ثانویه. به‌منظور تعریف مساله زمان‌بندی اسمی، فرض می‌شود که متغیرهای عدد صحیح غیرمنفی t_{ki}^{dep} $(k \in K, i \in S_k \setminus \{D_k\})$ و t_{ki}^{arr} $(k \in K, i \in S_k \setminus \{O_k\})$ به‌ترتیب نشان‌دهنده زمان ترک قطار k از ایستگاه i و زمان رسیدن قطار k به ایستگاه i هستند. متغیر عدد صحیح غیرمنفی q_{ij}^k نشان‌دهنده تعداد مسافرانی هستند که قصد دارند از ایستگاه i به ایستگاه j با قطار k سفر کنند. متغیر باینری y_{kli} نشان‌دهنده ترتیب قطارها بین ایستگاه‌های متوالی است و ارزش آن یک است اگر قطار k زودتر از قطار l ایستگاه i را ترک کند یا قطار k زودتر از قطار l به ایستگاه $i+1$ برسد، در غیر این‌صورت صفر است $(k,l \in K, k<l, i \in S_k \setminus \{D_k\} \cap S_l \setminus \{D_l\})$. متغیر باینری x_{ki} نیز نشان‌دهنده تعداد توقف‌های قطار است و ارزش آن یک است اگر قطار k در ایستگاه i توقف کند، در غیر اینصورت صفر است. در نهایت، متغیرهای باینری z_{ira} و z'_{ira} به‌ترتیب نشان‌دهنده تعداد اقدامات پاسخ به ریسک اولیه و ثانویه می‌باشند. ارزش z_{ira} برابر یک است اگر اقدام پاسخ به ریسک اولیه a به‌منظور کاهش ریسک r در ایستگاه i انتخاب شود، در غیر اینصورت صفر است. همچنین، ارزش z'_{ira} برابر یک است اگر اقدام پاسخ به ریسک ثانویه a برای کاهش ریسک r در ایستگاه i انتخاب شود، در غیر اینصورت صفر است. برنامه‌ریزی ریاضی برای مساله اسمی زمان‌بندی قطار به‌صورت زیر فرموله می‌شود:

$$Min\ T_T = \sum_{k \in K} (t_{kD_k}^{arr} - t_{kO_k}^{dep}) \quad (۱)$$

s.t.

$$x_{kO_k} = x_{kD_k} = ۱,\ k \in K \quad (۲)$$

$$\sum_{k \in K: i,j \in S_k} q_{ij}^k = Q_{ij},\ i,j \in S, i<j \quad (۳)$$

$$\sum_{j \in S_k, i<j} q_{ij}^k \le \sum_{j \in S_k, i<j} Q_{ij} x_{ki},\ k \in K, i \in S_k \setminus \{D_k\} \quad (۴)$$

$$\sum_{j \in S_k, i>j} q_{ji}^k \le \sum_{j \in S_k, i>j} Q_{ji} x_{ki},\ k \in K, i \in S_k \setminus \{O_k\} \quad (۵)$$

$$\sum_{i' \in S_k, i' \le i} \sum_{j \in S_k, i<j} q_{ij}^k \le C_k,\ \ k \in K, i \in S_k \setminus \{D_k\} \quad (۶)$$

$$\sum_{i \in S_k} x_{ki} \le N_k, k \in K \quad (۷)$$

$$\sum_{k \in k: i \in S_k} x_{ki} \ge num_i,\ i \in S \quad (۸)$$

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

$$\sum_{r\in R^i} L_{ir}^{co} - \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} e_{ira}^{co} z_{ira} + \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} c_{ira}^{act} z_{ira} + \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} L_{ira}^{sco} z_{ira} - \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} e_{ira}^{sco} z'_{ira} + \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} c_{ira}^{sact} z'_{ira} \le B_i,\ i \in S \quad (۹)$$

$$\sum_{l\in R^i} L_{ir}^{co} - \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} e_{ira}^{co} z_{ira} + \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} c_{ira}^{act} z_{ira} \ge \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} L_{ira}^{sco} z_{ira} - \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} e_{ira}^{sco} z'_{ira} + \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} c_{ira}^{sact} z'_{ira},\ i \in S \quad (۱۰)$$

$$\sum_{r\in R^i} D_{ir}^{time} - \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} e_{ira}^{time} z_{ira} \ge \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} D_{ira}^{stime} z_{ira} - \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} e_{ira}^{stime} z'_{ira},\ i \in S \quad (۱۱)$$

$$\sum_{r\in R^i} D_{ir}^{time} - \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} e_{ira}^{time} z_{ira} + \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} D_{ira}^{stime} z_{ira} - \sum_{r\in R^i}\sum_{a\in A^i} e_{ira}^{stime} z'_{ira} = t_i^{risk},\ i \in S \quad (۱۲)$$

$$0 \le t_i^{risk} \le t_i^{*},\ i \in S \quad (۱۳)$$

$$z_{ira} \ge z'_{ira},\ \forall i \in S, \forall r \in R^i, \forall a \in A^i \quad (۱۴)$$

$$t_{ki+1}^{arr} - t_{ki}^{dep} = t_{ki}^{tr} + t_i^{risk},\ k \in K, i \in S_k \setminus \{D_k\} \quad (۱۵)$$

$$T_k \le t_{kO_k}^{dep} \le T_k + \Delta T_k,\ k \in K \quad (۱۶)$$

$$t_{ki}^{dep} - t_{ki}^{arr} \ge t_{ki}^{dwell} x_{ki},\ k \in K, i \in S_k \setminus \{O_k, D_k\} \quad (۱۷)$$

$$t_{ki}^{dep} + h_{dep} \le t_{li}^{dep} + M(1 - y_{kli}),\ i \in (S_k \setminus \{D_k\}) \cap (S_l \setminus \{D_l\}), k,l \in K, k < l \quad (۱۸)$$

$$t_{li}^{dep} + h_{dep} \le t_{ki}^{dep} + M y_{kli},\ i \in (S_k \setminus \{D_k\}) \cap (S_l \setminus \{D_l\}), k,l \in K, k < l \quad (۱۹)$$

$$t_{ki+1}^{arr} + h_{arr} \le t_{li+1}^{arr} + M(1 - y_{kli}),\ i \in (S_k \setminus \{D_k\}) \cap (S_l \setminus \{D_l\}), k,l \in K, k < l \quad (۲۰)$$

$$t_{li+1}^{arr} + h_{arr} \le t_{ki+1}^{arr} + M y_{kli},\ i \in (S_k \setminus \{D_k\}) \cap (S_l \setminus \{D_l\}), k,l \in K, k < l \quad (۲۱)$$

$$t_{ki}^{dep} \ge 0,\ integer,\ k \in K,\ i \in S_k \setminus \{D_k\} \quad (۲۲)$$

$$t_{ki}^{arr} \ge 0,\ integer,\ k \in K,\ i \in S_k \setminus \{O_k\} \quad (۲۳)$$

$$q_{ij}^{k} \ge 0,\ integer,\ k \in K,\ i,j \in S_k, i < j \quad (۲۴)$$

$$y_{kli} \in \{0,1\},\ i \in (S_k \setminus \{D_k\}) \cap (S_l \setminus \{D_l\}), k,l \in K, k < l \quad (۲۵)$$

$$x_{ki} \in \{0,1\},\ k \in K, i \in S_k \quad (۲۶)$$

$$z_{ira}, z'_{ira} \in \{0,1\},\ \forall i \in S, \forall r \in R^i, \forall a \in A^i. \quad (۲۷)$$

در مساله اسمی زمان‌بندی قطار تابع هدف (۱) به دنبال به حداقل رساندن کل زمان سفر قطارها می‌باشد که با T_T تعریف می‌شود. محدودیت (۲) تضمین می‌کند که هر قطار با توجه به ناحیه عملیاتی خود از ایستگاه مبدا خود شروع به حرکت کرده و در ایستگاه مقصد خود متوقف می‌شود. اعمال محدودیت (۳) به‌منظور حصول اطمینان از جابجایی کل تقاضای مسافر بین ایستگاه‌های i و j می باشد. محدویت (۴) بیان می‌کند که اگر قطار k در ایستگاه i توقف نکند هیچ مسافری جابجا نخواهد شد و در صورت توقف قطار k در ایستگاه i حداکثر به میزان تقاضای مسافر حرکت به سمت ایستگاه j صورت می‌گیرد. محدودیت (۵) با تعاریفی مشابه به (۴)، الزامات را برای ورود قطار k و جابجایی مسافران به ایستگاه i در نظر می‌گیرد. محدودیت (۶) برای رعایت ظرفیت هر قطار k اعمال شده است که این ظرفیت در ایستگاه i بین ایستگاه‌های i' ($i' \le i$) و j ($i < j$)، باید حداکثر C_k باشد.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

این محدودیت مسافرانی که در ایستگاه i یا قبل از آن به قطار سوار شده و بعد از ایستگاه i پیاده می‌شوند را در نظر می‌گیرد. محدودیت (۷) برای قطار k حداکثر تعداد توقف‌ها در طول سفر را به N_k، و محدودیت (۸) حداقل تعداد قطارهایی که در ایستگاه i توقف کرده را به num_i محدود می‌کند.

محدودیت (۹) هزینه‌های شناسایی ریسک‌های اولیه و ثانویه و هزینه‌های اجرای اقدامات پاسخ به آنها را به منظور اجرای موفقیت‌آمیز فرایند ارزیابی ریسک در ایستگاه i حداکثر B_i در نظر می‌گیرد. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که در ایستگاه i هزینه‌های ریسک ثانویه باید کمتر از هزینه‌های ریسک اولیه باشد. همچنین، محدودیت (۱۱) نشان می‌دهد که تاخیرات زمانی ناشی از ریسک‌های ثانویه باید کمتر از تاخیرات زمانی ناشی از ریسک‌های اولیه باشد. در صورت عدم رعایت محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱)، نباید اقداماتی به‌منظور پاسخ به ریسک‌های اولیه اجرا شود تا از ایجاد ریسک‌های ثانویه جلوگیری شود. تاخیرات زمانی باقیمانده پس از اجرای اقدامات پاسخ به ریسک‌ها در ایستگاه i در محدودیت (۱۲) نشان داده شده است که مقدار t_i^{risk} به زمان سفر قطار در مساله اضافه می‌شود. محدودیت (۱۳) یک مقدار تاخیرات زمانی از پیش تعیین‌شده مطلوب را برای هر ایستگاه i معرفی می‌کند تا تاخیرات زمانی محاسبه‌شده در محدودیت (۱۲) کنترل شود. محدودیت (۱۴) بیان می‌کند که زمانی اجرای اقدامات پاسخ به ریسک‌های ثانویه معنی‌دار است که اقدامات پاسخ به ریسک‌های اولیه اجرا شود، زیرا ریسک‌های ثانویه ناشی از اجرای اقدامات پاسخ به ریسک‌های اولیه هستند.

محدودیت‌های (۱۵) تا (۱۷) مربوط به اطلاعات زمانی قطار هستند. محدودیت (۱۵) بیانگر زمان سفر قطار k از ایستگاه i تا ایستگاه متوالی $i+1$ به میزان مجموع t_{ki}^{tr} و t_i^{risk} است. محدودیت (۱۶) بازه زمانی خروج قطار k از ایستگاه مبدأش را حداکثر به ΔT_k محدود می‌کند. محدودیت (۱۷) نشان می‌دهد که اگر قطار k در ایستگاه i توقف کند زمان اقامت آن به اندازه t_{ki}^{dwell} است. محدودیت‌های (۱۸) تا (۲۱) به‌منظور جلوگیری از برخورد قطارها به‌کارگرفته می‌شوند. با فعال شدن تنها یکی از محدودیت‌های (۱۸) و (۱۹) زمان ترک قطارهای k و l از ایستگاه i را با زمان h_{dep} نسبت به یکدیگر در نظر می‌گیرد. به‌طور مشابه، با فعال شدن تنها یکی از محدودیت‌های (۲۰) و (۲۱) زمان رسیدن قطارهای k و l به ایستگاه $i+1$ را با زمان h_{arr} نسبت به یکدیگر در نظر می‌گیرد. در پایان مساله اسمی زمان‌بندی قطار، محدودیت‌های (۲۲) تا (۲۷) دامنه متغیرهای تصمیم را تعریف می‌کنند.

٤-۲ مدل بهینه‌سازی استوار

در این زیربخش، مدل معرفی‌شده در زیربخش ۴-۱، به یک مدل بهینه‌سازی استوار توسعه داده می‌شود. برای این منظور از تکنیک استواری سبک استفاده می‌شود که بر پایه تشکیل یک سطح حفاظتی مطلوب در شرایط عدم-قطعیت و استفاده از متغیرهای کمکی در زمان تامین نشدن سطح حفاظتی می‌باشد [۱۲]. هدف این تکنیک اینست که حداکثر استواری در برابر عدم‌قطعیت را با حداقل کردن مجموع متغیرهای کمکی حاصل کند، به‌طوری‌که با در نظر گرفتن محدودیتی اضافی، بدتر شدن ارزش تابع هدف مساله اسمی را کنترل می‌کند. در این مقاله یک سطح حفاظتی مطلوب Δ_{ij} برای تعداد مسافران اضافی که می‌خواهند از ایستگاه i به ایستگاه j سفر کنند در نظر

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

گرفته می‌شود. در زمانیکه سطح حفاظتی مطلوب به‌طور کامل برآورده نشود، متغیر کمکی عدد صحیح γ_{ij} تعریف می‌شود که بیانگر ارزش تعداد مسافرانی است که نمی‌توانند از ایستگاه i به ایستگاه j سفر کنند یا همان تقاضای برآورده‌نشده می‌باشد. در نتیجه هدف مدل بهینه‌سازی استوار به حداقل رساندن تعداد مسافرانی است که تقاضای آنها برآورده نشده است. علاوه بر این، دو محدودیت بر روی افزایش نامطلوب ارزش کل زمان سفر قطار در مساله اسمی T_T^* و ارزش کل تعداد توقف‌ها در مساله اسمی N_S^* اعمال می‌شود تا منجر به ارایه راه‌حل-های استوار مؤثر گردد. لازم به ذکر است که α و β درصدهایی هستند که به‌منظور کنترل افزایش نامطلوب ارزش‌های مذکور انتخاب می‌گردند. مدل بهینه‌سازی استوار پیشنهادی به‌صورت زیر توسعه داده می‌شود:

$$Min \sum_{i,j\in S, i<j} \gamma_{ij} \quad (۲۸)$$

s.t.

محدودیت‌های (۲)، (۴) تا (۲۷)

$$\sum_{k\in K: i,j\in S_k} q_{ij}^k \geq Q_{ij},\ i,j\in S, i<j \quad (۲۹)$$

$$\sum_{k\in K: i,j\in S_k} q_{ij}^k + \gamma_{ij} = Q_{ij} + \Delta_{ij},\ i,j\in S, i<j \quad (۳۰)$$

$$\sum_{k\in K} (t_{kD_k}^{arr} - t_{kO_k}^{dep}) \leq (1+\alpha) T_T^* \quad (۳۱)$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{i\in S_k} x_{ki} \leq (1+\beta) N_S^* \quad (۳۲)$$

$$\gamma_{ij} \geq 0,\ integer,\ k\in K,\ i,j\in S, i<j. \quad (۳۳)$$

در مدل بهینه‌سازی استوار تابع هدف (۲۸) به دنبال به حداقل رساندن تعداد مسافرانی است که قادر نیستند بین ایستگاه i و j سفر کنند، یعنی مجموع متغیرهای γ_{ij} که با اضافه کردن محدودیت (۳۰) به مدل فعال می‌شوند. محدودیت‌های (۲) و (۴) تا (۲۷) از مساله اسمی زمان‌بندی قطار منتقل شده و در این مدل جای گرفته‌اند. محدودیت (۲۹) جایگزین محدودیت (۳) در مساله اسمی می‌شود که علاوه بر برآورده کردن تقاضای مسافر اسمی، امکان جابجایی مسافر اضافی را نیز در نظر می‌گیرد. محدودیت (۳۰) علاوه بر Q_{ij}، یک سطح حفاظتی مطلوب Δ_{ij} برای تعداد مسافران اضافی که می‌خواهند از ایستگاه i به ایستگاه j سفر کنند را معرفی می‌کند. همچنین، برای زمانیکه سطح حفاظتی برآورده نمی‌شود در این محدودیت متغیرهای تصمیم γ_{ij} مورد استفاده قرار می‌گیرند. محدودیت‌های (۳۱) و (۳۲) به‌منظور اطمینان از موثر بودن راه‌حل‌های استوار اعمال می‌شوند. محدودیت (۳۱) برای کنترل حداکثر افزایش نامطلوب کل زمان سفر قطار در مساله اسمی و محدودیت (۳۲) برای کنترل حداکثر افزایش نامطلوب کل تعداد توقف‌ها در مساله اسمی ایجاد می‌شوند. در نهایت، محدودیت (۳۳) دامنه متغیر کمکی را تعریف می‌کند.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

۵ رویکرد تحلیل پوششی داده‌ها

تحلیل پوششی داده‌ها رویکردی مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی است که کارایی نسبی واحدهای تصمیم‌گیری مشابه با نهاده‌ها و ستاده‌های متعدد را اندازه‌گیری می‌کند [۳۳]. در این مقاله برای سنجش کارایی خروجی‌های بدست‌آمده از مساله اسمی زمان‌بندی قطار و مدل بهینه‌سازی استوار آن، تحلیل پوششی داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای رسیدن به این هدف، نتایج حاصل از سناریوهای مختلف به عنوان واحدهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شوند [۳۴]. همچنین، تقاضای برآورده‌نشده مسافران و کل زمان سفر قطارها معرف نهاده‌ها خواهند بود که حداقل کردن آنها مورد نظر است و کل تعداد توقف‌ها به عنوان تنها ستاده تعیین می‌گردد که هدف حداکثر نمودن این ستاده می‌باشد. سپس، عملکرد هر سناریو با بکارگیری مدل جمعی سنجیده می‌شود و در نهایت، سناریوی کارا با استفاده از این مدل شناسایی می‌شود.

- **مدل جمعی**

مدل جمعی یکی از پرکاربردترین ابزارها به منظور سنجش کارایی در تحلیل پوششی داده‌ها بوده که اصلی‌ترین دلیل اهمیت آن، قابلیت سنجش کارایی به‌طور کامل است، زیرا مستقیماً تلاش می‌کند متغیرهای کمکی را به حداقل مقدار برساند. اما در مدل‌های دیگر تشخیص حضور متغیرهای کمکی در کارایی، معمولاً با استفاده از مدلی اضافی مانند مدل جمعی و با عنوان فاز دوم سنجش کارایی صورت می‌پذیرد. در نتیجه، برتری مدل جمعی به این دلیل است که در سنجش کارایی نیازی به فاز دوم نداشته و کارایی با حل یک مدل واحد محاسبه می‌شود. در نظر بگیرید که n واحد تصمیم‌گیری وجود دارد که شامل ϕ نهاده و θ ستاده هستند. ارزش‌های نهاده و ستاده برای واحد تصمیم‌گیری f $(f = 1,\dots,m)$ با Φ_{bf} $(b = 1,\dots,\phi)$ و Θ_{df} $(d = 1,\dots,\theta)$ نمایش داده می‌شوند. برنامه‌ریزی ریاضی مدل جمعی برای سنجش کارایی واحد تصمیم‌گیری f به‌صورت زیر می‌باشد [۳۳]:

$$Max\ E_f = \sum_{d=1}^{\theta} u_d \Theta_{df} - \sum_{b=1}^{\phi} v_b \Phi_{bf} - \varpi \qquad (۳۴)$$

$$s.t.$$

$$\sum_{d=1}^{\theta} u_d \Theta_{df} - \sum_{b=1}^{\phi} v_b \Phi_{bf} - \varpi \le 0 \qquad (۳۵)$$

$$u_d, v_b \ge 1, \qquad (۳۶)$$

$$\varpi \ \ is \ \ free. \qquad (۳۷)$$

در روابط بالا E_f بیانگر امتیاز کارایی واحد تصمیم‌گیری f می باشد. همچنین، v_b و u_d وزن‌های مربوط به نهاده‌ها و ستاده‌ها هستند و ϖ بیانگر نوع بازده به مقیاس می‌باشد. مدل جمعی باید برای هر سناریو در مساله اسمی زمان‌بندی قطار و مدل بهینه‌سازی استوار آن فرموله شود تا مجموعه‌ای از وزن‌ها به‌منظور حداکثر شدن کارایی سناریو در نظر گرفته‌شده، به‌دست آید. در صورتیکه E_f برابر با ۱ باشد، سناریو f کارای نسبی نامیده می‌شود.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

٦ مطالعه موردی در خط قطار سبک شهری

به‌منظور نشان دادن اثربخشی مدل‌های اسمی زمان‌بندی قطار و بهینه‌سازی استوار آن، در این بخش خط قطار سبک شهری کرمانشاه واقع در غرب ایران به عنوان یک نمونه در دنیای واقعی در نظر گرفته می‌شود. این خط شامل ۱۳ ایستگاه، ۱۲ مسیر، نواحی عملیاتی الف و ب و ۶ قطار می‌باشد. ناحیه الف از ایستگاه ۱ شروع شده و تا ایستگاه ۱۳ ادامه پیدا می‌کند که بر روی آن قطارهای ۱ تا ۴ با سرعت ۸۰ کیلومتر در ساعت سفر می‌کنند و ناحیه ب شامل ایستگاه‌های ۶ تا ۱۳، و قطارهای ۵ و ۶ با سرعت ۱۰۰ کیلومتر در ساعت است. در ابتدا نیاز است برخی از داده‌های ورودی اولیه مشخص شوند. زمان ترک انتظاری قطارهای ۱ تا ۶ از ایستگاه مبدأ خود به ترتیب ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۲۵ و ۳۵ دقیقه تعیین شده و حداکثر زمان تاخیر مجاز نسبت به زمان ترک از ایستگاه مبدا برای هر قطار ۱۰ دقیقه در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، زمان سفر هر یک از قطارها در هر مسیر خط قطار سبک شهری در امتداد جهت خروجی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. زمان سفر هر قطار بر روی مسیرها.

مسیر	زمان سفر		مسیر	زمان سفر	
ایستگاه‌ها	قطارهای ۱، ۲، ۳ و ۴	قطارهای ۵ و ۶	ایستگاه‌ها	قطارهای ۱، ۲، ۳ و ۴	قطارهای ۵ و ۶
۱ تا ۲	۹	–	۷ تا ۸	۸	۶
۲ تا ۳	۶	–	۸ تا ۹	۸	۶
۳ تا ۴	۱۰	–	۹ تا ۱۰	۱۰	۷
۴ تا ۵	۷	–	۱۰ تا ۱۱	۸	۶
۵ تا ۶	۵	–	۱۱ تا ۱۲	۷	۵
۶ تا ۷	۷	۵	۱۲ تا ۱۳	۷	۵

به‌منظور انتقال موفقیت‌آمیز مسافران از مبدأ به مقصد ظرفیت هر قطار ۸۵۰ نفر در نظر گرفته شده است و میزان تقاضای مسافران بین هر یک از ایستگاه‌ها در امتداد مسیر خروجی در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲. تقاضای مسافران برای هر زوج از ایستگاه‌های مبدأ و مقصد انتخابی.

مبدأ / مقصد	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
۱	–	۱۰۵	۱۳۸	۱۲۰	۵۷	۶۱	۷۰	۱۸	۸۴	۳۴	۱۱۷	۷۳	۳۸۱
۲	–	–	۱۰۹	۹۱	۱۲۹	۶۳	۸	۵۲	۸۰	۱۲	۶۲	۲۸	۱۳۷
۳	–	–	–	۱۴۵	۱۴۶	۱۷۶	۵۶	۶۰	۱۱	۵۵	۱۱۱	۱۰۷	۳۸
۴	–	–	–	–	۷۲	۴۴	۲۹	۵۴	۱۹	۱۷	۷۵	۷۸	۱۴۱
۵	–	–	–	–	–	۱۱۷	۱۶	۶۰	۴۵	۸۸	۴۶	۱۶۰	۲۳۸
۶	–	–	–	–	–	–	۳۲۴	۱۶۱	۳۰۰	۳۰۰	۳۰	۱۴۶	۳۴۵
۷	–	–	–	–	–	–	–	۱۴۱	۱۲۱	۱۷۶	۱۲۲	۹۸	۲۳۲
۸	–	–	–	–	–	–	–	–	۸۸	۱۱	۱۱۵	۲۴۷	۲۱۴
۹	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۳۴۳	۶۴	۲۷۹	۲۳۳
۱۰	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۷۶	۳۰۰	۲۴۳
۱۱	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۱۷۲	۲۹۴
۱۲	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۱۲۰
۱۳	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

علاوه بر این، برای افزایش کیفیت خدمت‌رسانی و جلب رضایت مسافران، هر قطار در ناحیه الف می‌تواند حداکثر ده توقف، و هر قطار در ناحیه ب مجاز است حداکثر پنج توقف داشته باشد و در هر ایستگاه حداقل یک قطار اجازه توقف را دارد. همچنین، زمان پیشروی ترک و زمان پیشروی رسیدن سه دقیقه تعیین‌شده تا از برخورد قطارها با یکدیگر در یک ایستگاه جلوگیری شود. برای هر قطار، انجام عملیات بارگیری و تخلیه مسافران، تعویض خدمه و غیره در ایستگاه‌های توقف برنامه‌ریزی‌شده، نیازمند زمان اقامت چهار دقیقه است. در ادامه از کارشناسان دعوت شد که با استفاده از چک‌لیست ریسک‌های اولیه در هر ایستگاه را شناسایی کرده و اقدامات مناسب پاسخ به هر یک از آنها را برنامه‌ریزی کنند. ریسک‌های ثانویه احتمالی که به دلیل انتخاب اقدامات پاسخ به ریسک اولیه ایجاد می‌شوند نیز شناسایی شدند که تمامی این اطلاعات در جدول **۳** فهرست شده است.

جدول ۳. فهرست ریسک‌های اولیه، اقدامات پاسخ به آنها و ریسک‌های ثانویه.

ریسک اولیه	اقدام پاسخ به ریسک اولیه	ریسک ثانویه
شرح (شماره)	شرح (شماره)	شرح (شماره)
آسیب به آثار باستانی (۱)	استفاده از مسیرهای جایگزین در اطراف محوطه‌های باستانی (۱)	
مزاحمت برای ساکنین (۲)	به حداقل رساندن اثرات ازدحام آلودگی و صدا (۲)	
غیرمنطقی بودن طرح سازمانی ساخت‌وساز (۳)	استفاده از کارشناسان برای طراحی مجدد طرح (۳)	
نشت گازهای سمی (۴)	اعزام نیروهای متخصص آب‌بندی نشتی (۴)	سقوط (۱)
انفجار خط لوله (۵)	اعزام نیروهای متخصص آب‌بندی نشتی (۴)	سقوط (۱)
سطح بالای آب‌های زیرزمینی (۶)	قرار دادن چندین چاه یا استفاده از پمپ (۵)	نشست زمین (۲)
سقوط (۷)	حذف قطعات آسیب‌دیده با دستگاه‌های حفاری و برش (۶)	از دست دادن زمین (۳)
ناپایداری سازه نگهدارنده (۸)	استفاده از سیستم اسکلت پیشرفته (۷)	
ناپایداری سازه نگهدارنده (۸)	تکنولوژی تزریق سه‌گانه (۸)	مشکلات تأثیرگذار در استحکام آرماتور فونداسیون (۴)
تغییر شکل دیوار حائل (۹)	تخریب دیوار تغییر شکل‌یافته و بازسازی با سیمان با کیفیت بهتر (۹)	رانش زمین (۵)
عدم‌تقویت فونداسیون (۱۰)	تکنولوژی تزریق سه‌گانه (۸)	مشکلات تأثیرگذار در استحکام آرماتور فونداسیون (۴)
شکست مکانیکی (۱۱)	نگهداری و تعمیرات مکانیکی (۱۰)	

پس از شناسایی ریسک‌های اولیه امکان‌پذیر، احتمال و تاثیر هر یک بر حسب تاخیرات زمانی و زیان پولی ارزیابی شد و با ضرب این دو عامل در یکدیگر، تاخیرات زمانی انتظاری و زیان پولی انتظاری تحمیل‌شده در هر ایستگاه محاسبه گشت. همچنین، به‌منظور کاهش اثرات منفی ریسک‌ها اقدامات مناسب پاسخ به ریسک اولیه بکار گرفته شد. این اقدامات شامل هزینه به‌کارگیری بوده و در هر ایستگاه به میزان مشخصی منجر به کاهش

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

تاخیرات زمانی انتظاری و زیان پولی انتظاری می‌گردند. علاوه بر این، توجه به این موضوع که ریسک‌های ثانویه در زمان اجرای برخی اقدامات پاسخ به ریسک اولیه رخ می‌دهند، مشابه با اطلاعات ریسک‌های اولیه، اطلاعات مربوط به ریسک‌های ثانویه باید تهیه شود. تمام داده‌های مربوط به موارد مذکور در جدول ۴ گزارش شده است. در این جدول واحدهای مربوط به هزینه و زمان به‌ترتیب معادل میلیارد ریال و دقیقه می‌باشد و ریسک‌های امکان‌پذیر با توجه به شماره آنها در جدول ۳، ارایه شده است.

جدول ٤. داده‌های ریسک‌های اولیه و ثانویه و اقدامات پاسخ به آنها.

ایستگاه	شماره ریسک‌های امکان‌پذیر		زیان پولی انتظاری		تاخیرات زمانی انتظاری		هزینه بکارگیری اقدام پاسخ		هزینه تخمینی کاهش‌یافته		زمان تخمینی کاهش‌یافته	
	اولیه	ثانویه	اولیه	ثانویه	اولیه	ثانویه	اولیه	ثانویه	اولیه	ثانویه	اولیه	ثانویه
۱	۱	–	۱۴/۶۳	–	۳۵	–	۲/۴	–	۱۴/۰۱	–	۳۱	–
۲	۲و۳	–	۳۵/۶۶	–	۴۰	–	۲/۷	–	۳۲/۱۶	–	۳۶	–
۳	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
۴	۴و۵	۱	۳۵/۶۶	۱۳/۶۴	۴۰	۲۰	۲/۷	۲/۸	۳۲/۱۶	۱۳	۳۶	۲۶
۵	۶	۲	۰/۱۳	۴/۵	۴	۱۰	۰/۰۵	۲/۴	۰/۱۰	۳/۹	۲	۷
۶	۷و۸	۳و۴	۱۱/۸۲	۸/۵	۲۶	۱۳	۲/۸	۳/۶	۹/۴۸	۸/۳	۲۲	۱۲
۷	۷و۸	۳و۴	۱۱/۸۲	۸/۴	۲۶	۱۳	۲/۱۹	۳/۵	۹/۹۸	۸/۳	۲۲	۱۱
۸	۷و۸	۲و۴	۹/۹۲	۴/۳	۲۵	۱۷	۲/۰۲	۲/۰۸	۸/۶۴	۴	۲۳	۱۷
۹	۹	۵	۰/۰۵	۳/۸	۵	۱۳	۰/۰۲	۱/۶	۰/۰۳	۳/۵	۳	۱۰
۱۰	۱۰و۱۱	۲،۳و۵	۱۵/۱۱	۹/۱۵	۴۵	۱۶	۲/۷	۳/۲۲	۱۴/۳۲	۹/۰۲	۴۱	۱۴
۱۱	۹و۱۹	۵	۱۱/۰۵	۷/۲۲	۲۰	۱۴	۱/۷۵	۲/۳۸	۱۰/۲۸	۷/۰۹	۱۸	۱۳
۱۲	۶و۹	۲و۵	۱۱/۸	۷/۸۱	۲۲	۱۴	۳	۴/۱۱	۱۰/۲۸	۷/۶۲	۱۸	۱۴
۱۳	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

پس از آماده‌سازی داده‌های اولیه، مساله اسمی زمان‌بندی قطار در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS توسعه داده شد و توسط حل‌گر CPLEX حل شد تا در خط قطار سبک شهری کرمانشاه جدول زمان‌بندی قطار، تعداد توقف‌های قطار و اقدامات بهینه پاسخ به ریسک‌ها تعیین شود و زمان کل سفر قطارها حداقل گردد. برای این منظور نیز دو شرط پایانی در نظر گرفته شد: توقف زمانیکه شکاف بهینگی به کمتر از ۵٪ برسد یا زمان محاسباتی بیش از دو ساعت شود. علاوه بر این، OPTCR به عنوان شاخصی برای ارزیابی کیفیت راه‌حل نهایی، بر روی ۰/۰۵ تنظیم شد تا راه‌حل بهینه با کیفیت بالا حاصل شود. با حل مساله اسمی مشخص شد که مقدار تابع هدف ۸۰۶ دقیقه است که مربوط به حداقل زمان کل سفر قطارها بوده و در این مساله به منظور جابجایی ۹۵۲۸ مسافر قطارها در ۴۰ ایستگاه متوقف می‌شوند.

در ادامه، به‌منظور مقابله با عدم‌قطعیت در تقاضای مسافران، مدل بهینه‌سازی استوار با همان ویژگی‌ها و شرایط مساله اسمی در نرم‌افزار GAMS توسعه داده شد. برای این منظور سطح حفاظتی مطلوب برای تعداد

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

مسافران اضافی برابر با ٪۵ ارزش Q_{ij} تعیین شد تا تقاضای مسافران مساله اسمی به میزان ۵٪ افزایش یابد. همچنین، برای ایجاد راه‌حل استوار و مؤثر، پارامترهای α و β هر دو روی ۵٪ تنظیم شدند. نتایج نشان داد که در مدل بهینه-سازی استوار زمان کل سفر قطارها به ۸۴۶ دقیقه افزایش یافته که در این مدت، با توقف قطارها در ۴۲ ایستگاه ۹۸۸۷ مسافر جابجا می‌شوند. مقایسه مدل بهینه‌سازی استوار با مساله اسمی به لحاظ استواری در مقابل تقاضای نامطمئن مسافر، نشان می‌دهد راه‌حل استوار در مقابله با تقاضای مسافر اضافی، نسبت به راه‌حل مساله اسمی بسیار بهتر عمل می‌کند. تقاضای برآورده‌نشده در مساله اسمی بر اساس رابطه (۲۹)، ۳۵۵ نفر است درحالیکه در مدل استوار و با توجه به رابطه (۳۰) به ۸۲ نفر کاهش یافته است. این بدان معناست که راه‌حل استوار تقاضای مسافر برآورده‌نشده را حدود ۴/۵ برابر کوچکتر می‌کند.

جدای از بحث عدم‌قطعیت، موضوع مهم بعدی در اجرای موفقیت‌آمیز مساله زمان‌بندی قطار، انتخاب مجموعه اقدامات مناسب پاسخ به ریسک برای مقابله با ریسک‌های اولیه و ثانویه ممکن در خط قطار سبک شهری است که برای این منظور روابط (۹) تا (۱۴) تعریف شدند. از این‌رو، با رعایت محدودیت‌های هزینه‌ها و تاخیرات زمانی ناشی از ریسک های اولیه و ثانویه، مجموعه اقدامات بهینه پاسخ به آنها انتخاب شدند. بر این اساس و با توجه به خروجی‌های مدل بهینه‌سازی استوار، هزینه‌ها و تاخیرات زمانی بهینه ناشی از حضور ریسک‌ها در هر یک از ایستگاه‌ها در جدول ۵ ارایه شده است.

جدول ۵. هزینه‌ها و تاخیرات زمانی ناشی از حضور ریسک‌ها.

ایستگاه	ریسک اولیه		ریسک ثانویه		ایستگاه	ریسک اولیه		ریسک ثانویه	
	هزینه	تاخیر	هزینه	تاخیر		هزینه	تاخیر	هزینه	تاخیر
اول	۳/۰۲	۴	–	–	هشتم	۰/۳۰	۲	۲/۳۸	۰
دوم	۰/۴۹	۲	–	–	نهم	۰/۰۴	۲	۱/۹۰	۳
سوم	–	–	–	–	دهم	۳/۴۹	۴	۳/۳۵	۲
چهارم	۶/۲۰	۴	۳/۴۴	۱	یازدهم	۲/۵۲	۲	۲/۵۲	۱
پنجم	۰/۰۸	۲	۳/۰۰	۳	دوازدهم	۴/۵۲	۴	۴/۳۰	۰
ششم	۵/۱۴	۴	۳/۸۰	۱	سیزدهم	–	–	–	–
هفتم	۴/۰۳	۴	۳/۶۰	۲					

با توجه به نتایج جدول ۵ واضح است که در ایستگاه‌های اول و دوم بکارگیری اقدامات پاسخ به ریسک هیچ‌گونه ریسک دیگری را ایجاد نمی‌کنند و در محدوده هزینه و تاخیر مجاز از پیش تعیین‌شده، به‌صورت بهینه عمل می‌نمایند. اما در دیگر ایستگاه‌ها، بکارگیری اقدامات پاسخ به ریسک باعث ایجاد ریسک‌های ثانویه گشته که به دنبال آن اقدامات پاسخ به ریسک‌های ثانویه نیز باید به‌کار گرفته شوند. موضوعی که بسیار حایز اهمیت است مقایسه هزینه و تاخیرات زمانی ناشی از حضور ریسک‌های اولیه و ثانویه در هر یک از ایستگاه‌ها می‌باشد. به عنوان نمونه، در ایستگاه پنجم هزینه و تاخیر زمانی ناشی از ریسک‌های اولیه به ترتیب برابر با ۰/۰۸ میلیارد ریال و

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

۲ دقیقه می‌باشد که این مقادیر برای ریسک‌های ثانویه به ترتیب ۳ میلیارد ریال و ۳ دقیقه خواهد بود. بنابراین، چون اثرات منفی ریسک‌های ثانویه بیشتر از ریسک‌های اولیه بوده، اقدامات پاسخ به ریسک‌های اولیه نباید انجام شوند تا از اینگونه اثرات منفی تحمیلی جلوگیری شود. به‌طور مشابه، در ایستگاه نهم، اثرات منفی بیشتر ریسک‌های ثانویه، بر عدم انجام اقدامات پاسخ به ریسک اولیه تأکید دارد. در نتیجه، اثرات ریسک‌های ثانویه نقش مهمی را در انتخاب اقدامات بهینه پاسخ به ریسک‌های اولیه ایفا می‌کنند. جدول ۶ با توجه به اثر ریسک‌های ثانویه، فهرست ریسک‌های کاهش‌یافته و اقدامات بهینه پاسخ به آنها را نمایش می‌دهد.

جدول ٦. مجموعه اقدامات پاسخ بهینه به ریسک‌ها.

ایستگاه	ریسک اولیه		ریسک ثانویه	
	ریسک کاهش‌یافته (شماره)	اقدام پاسخ انتخابی (شماره)	ریسک کاهش‌یافته (شماره)	اقدام پاسخ
۱	۱	۱	–	–
۲	۲و۳	۳و۲	–	–
۴	۴و۵	۴	۱	دارد
۶	۷و۸	۶و۷و۸	۳و۴	دارد
۷	۷و۸	۶و۷و۸	۳و۴	دارد
۸	۶و۸	۵و۷و۸	۲و۴	دارد
۱۰	۱۰و۱۱	۸و۹و۱۰	۲و۳و۵	دارد
۱۱	۹و۱۰	۹و۱۰	۲	دارد
۱۲	۶و۹	۵و۹	۲و۵	دارد

در ادامه این مطالعه با هدف بررسی اثر تغییر برخی پارامترها بر راه‌حل‌های بهینه مدل بهینه‌سازی استوار پیشنهادی، تحلیل حساسیت اجرا شد. در ابتدا اثر تغییر پارامترهای α و β بررسی شدند که به‌ترتیب برای کنترل افزایش مجاز در زمان کل سفر در مساله اسمی و کنترل افزایش مجاز در تعداد توقف‌های قطارها در مساله اسمی در نظر گرفته شدند. جدول ۷ نتایج به‌دست‌آمده از تغییر این دو پارامتر در بازه ۱٪ تا ۲۵٪ را نمایش می‌دهد.

جدول ۷. تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مربوط به کنترل حداکثر افزایش مجاز.

	ارزش	$\sum_{i,j\in S, i<j} \gamma_{ij}$	زمان کل سفر	تعداد توقف‌ها	٪ شکاف	زمان محاسباتی (ثانیه)
A	٪۱	۸۲	۸۱۴/۰۶	۴۲	۰	۵
	٪۵	۸۲	۸۴۶/۳۰	۴۲	۰	۹
	٪۲۵	۸۲	۹۱۴/۰۰	۴۲	۰	۲
β	٪۱	۸۲	۸۴۶/۳۰	۴۰	۰	۶۰۰
	٪۵	۸۲	۸۴۶/۳۰	۴۲	۰	۸
	٪۲۵	۸۲	۸۴۶/۳۰	۵۰	۰	۲

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

با توجه به نتایج جدول ۷ می‌توان مشاهده نمود که تابع هدف استوار برای هر تغییری مقداری یکسان دارد. بنابراین افزایش زمان کل سفر و تعداد توقف‌ها تاثیری بر افزایش استواری ندارد. دلیل این است که قطارها به منظور برآوردن تقاضای اسمی مسافران تقریباً تکمیل هستند. شایان ذکر است که با افزایش پارامترها حتی به میزان ۱٪ به همان سطح استواری ممکن، یعنی ارزش تابع هدف استوار برابر با ۸۲ نیز می‌توان دست یافت. با این حال، کاهش اثر پارامترها، به ویژه اثر پارامتر β، زمان محاسباتی مورد نیاز به منظور دستیابی به یک راه‌حل استوار را افزایش می‌دهد. در نتیجه، به‌کارگیری محدودیت‌های (۳۱) و (۳۲) به‌منظور حصول اطمینان از کارایی راه‌حل استوار بسیار ضروری است. دیگر پارامتری که در تحلیل حساسیت مورد مطالعه قرار گرفت سطح حفاظتی مطلوب است که محدوده بررسی آن نیز ۱٪ تا ۲۵٪ انتخاب شد و نتایج آن در جدول ۸ ارایه شده است.

جدول ۸. تحلیل حساسیت بر روی پارامتر سطح حفاظتی مطلوب.

ارزش	تقاضای برآورده‌نشده		زمان کل سفر	تعداد توقف‌ها	٪ شکاف	زمان محاسباتی (ثانیه)
	راه‌حل استوار	راه‌حل اسمی				
٪۱	۰	۶۱	۸۴۶/۳۰	۴۲	۰	۱۲
٪۵	۸۲	۳۵۹	۸۴۶/۳۰	۴۲	۰	۸
٪۲۵	۱۰۷۷	۱۲۸۱	۸۴۶/۳۰	۴۲	۰	۱۲

از جدول ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش سطح حفاظتی مطلوب، تقاضای برآورده‌نشده مسافران در مساله بهینه‌سازی استوار در مقایسه با مساله اسمی، به‌طور نامطلوبی افزایش می‌یابد. همان‌گونه که قبلاً مطرح شد زمانی‌که سطح حفاظتی مطلوب برابر با ۵٪ پارامتر Q_{ij} باشد، راه‌حل استوار تقاضای برآورده‌نشده مسافران را تا حدود ۴/۵ برابر کاهش می‌دهد. با این حال، با افزایش و تنظیم سطح حفاظتی مطلوب برابر با ۲۵٪ پارامتر Q_{ij}، راه-حل استوار می‌تواند تقاضای برآورده‌نشده مسافران را ۱/۱۹ برابر نسبت به مساله اسمی کاهش دهد. در نتیجه، روند افزایشی سطح حفاظتی مطلوب منجر به کاهش برتری بهینه‌سازی استوار در مقایسه با مساله اسمی می‌گردد.

پس از اثبات برتری مدل بهینه‌سازی استوار در مقابله با تقاضای اضافی مسافران در مساله زمان‌بندی قطار و اجرای تحلیل حساسیت، به منظور ارزیابی کارایی راه‌حل‌های استوار به‌دست‌آمده، سناریوهای مختلف تقاضای برآورده‌نشده مسافران و مقادیر زمان کل سفر و کل تعداد توقف‌ها با به‌کارگیری مدل جمعی تحلیل پوششی داده‌ها مورد آزمایش قرار گرفت. برای این هدف، با در نظر گرفتن مقادیر ۵٪ و ۱۰٪ برای سطح حفاظتی مطلوب و همچنین، ۵٪، ۱۰٪ و ۲۵٪ برای هر دوی پارامترهای α و β، ده سناریو معرفی شدند. در تحلیل پوششی داده‌ها هر سناریو معرف یک واحد تصمیم‌گیری بود. از آنجاکه روش‌های تحلیل پوششی داده‌ها واحدی که دارای حداقل ارزش نهاده و حداکثر ارزش ستاده است را به عنوان کارا معرفی می‌کنند، تقاضای برآورده‌نشده مسافران و کل زمان سفر قطارها به عنوان نهاده‌های اول و دوم و کل تعداد توقف‌ها به عنوان تنها ستاده در نظر گرفته شدند. جدول ۹ ارزش‌های نهاده‌ها و ستاده هر سناریو را نشان می‌دهد:

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

جدول ۹. ارزش‌های نهاده‌ها و ستاده مربوط به هر سناریو.

واحد	سناریو			نهاده‌ها		ستاده	واحد	سناریو			نهاده‌ها		ستاده
	Δ_{ij}	A	β	اول	دوم			Δ_{ij}	α	β	اول	دوم	
۱	۵	۵	۵	۸۲	۸۴۶/۳	۴۲	۲	۵	۱۰	۵	۸۲	۸۸۶/۶	۴۲
۳	۵	۵	۱۰	۸۲	۸۴۶/۳	۴۴	۴	۵	۲۵	۵	۸۲	۹۱۴	۴۲
۵	۵	۵	۲۵	۸۲	۸۴۶/۳	۵۰	۶	۵	۱۰	۱۰	۸۲	۸۸۶/۶	۴۴
۷	۵	۲۵	۲۵	۸۲	۹۲۶	۵۰	۸	۱۰	۵	۲۵	۳۳۲	۸۴۶/۳	۵۰
۹	۱۰	۱۰	۲۵	۳۳۲	۸۸۶/۶	۵۰	۱۰	۱۰	۲۵	۲۵	۳۳۲	۹۳۹	۵۰

در ادامه به‌منظور تعیین سناریو کارا، مدل جمعی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از این مدل نشان داد که امتیاز کارایی سناریوهای ارایه‌شده در جدول ۹ به‌ترتیب برابر با مقادیر ۰/۸۴، ۰/۴۷، ۰/۸۸، ۰/۳۶، ۱/۰۰، ۰/۴۹، ۰/۹۲، ۰/۷۹، ۰/۷۶ و ۰/۷۳ هستند. از این‌رو، با توجه به خروجی‌های مدل جمعی، سناریوی پنجم با سطح حفاظتی مطلوب برابر با ۵٪، α برابر با ۵٪ و β برابر با ۲۵٪ امتیاز کارایی یک را کسب نمود و به عنوان راه‌حل استوار کارا برای مساله زمان‌بندی قطار انتخاب شد. در نتیجه، جدول زمان‌بندی بهینه قطار براساس این راه‌حل استوار کارا در جدول ۱۰ ارایه شده است.

جدول ۱۰. جدول زمان‌بندی استوار و کارای خط قطار سبک شهری کرمانشاه.

ایستگاه	قطار ۱		قطار ۲		قطار ۳		قطار ۴		قطار ۵		قطار ۶	
	رسیدن	ترک	رسیدن	ترک	رسیدن	ترک	رسیدن	ترک	رسیدن	ترک	رسیدن	ترک
۱	–	۱۰	–	۲۱	–	۳۰	-	۴۰	–	–	–	–
۲	۲۳	۲۳	۳۴	۳۸	۴۳	۴۷	۵۳	۵۷	–	–	–	–
۳	۳۱	۳۵	۴۶	۵۰	۵۵	۵۵	۶۵	۶۹	–	–	–	–
۴	۴۵	۴۹	۶۰	۶۰	۶۵	۶۹	۷۹	۸۳	–	–	–	–
۵	۶۱	۶۵	۷۲	۷۶	۸۱	۸۵	۹۵	۹۹	–	–	–	–
۶	۷۴	۷۸	۸۵	۸۵	۹۴	۹۸	۱۰۸	۱۰۸	–	۲۵	–	۴۵
۷	۹۰	۹۴	۹۷	۹۷	۱۱۰	۱۱۴	۱۱۸	۱۱۸	۳۵	۳۹	۵۵	۶۱/۳
۸	۱۰۸	۱۱۲	۱۱۱	۱۱۵	۱۲۸	۱۲۸	۱۳۲	۱۳۲	۵۱	۵۱	۷۳/۳	۷۷/۳
۹	۱۲۲	۱۲۲	۱۲۵	۱۲۹	۱۳۸	۱۴۲	۱۴۲	۱۴۶	۵۹	۶۳	۸۵/۳	۸۵/۳
۱۰	۱۳۷	۱۳۷	۱۴۴	۱۴۸	۱۵۷	۱۶۱	۱۶۱	۱۶۵	۷۵	۷۵	۹۷/۳	۱۰۱/۳
۱۱	۱۵۱	۱۵۵	۱۶۲	۱۶۶	۱۷۵	۱۷۵	۱۷۹	۱۸۳	۸۷	۸۷	۱۱۳/۳	۱۱۳/۳
۱۲	۱۶۵	۱۶۹	۱۷۶	۱۸۰	۱۸۵	۱۸۹	۱۹۳	۱۹۷	۹۵	۹۹	۱۲۱/۳	۱۲۱/۳
۱۳	۱۸۰	–	۱۹۱	–	۲۰۰	–	۲۰۸	–	۱۰۸	–	۱۳۰/۳	–

۷ نتیجه‌گیری

در این مقاله مساله اسمی زمان‌بندی قطار و مدل بهینه‌سازی استوار آن در حضور ریسک‌های اولیه و ثانویه و اقدامات پاسخ به آنها مورد مطالعه قرار گرفت. خروجی‌های به‌دست‌آمده نشان داد مدل بهینه‌سازی استوار از نظر

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

استواری در مقابل تقاضای نامطمئن مسافر، عملکرد بهتری دارد، زیرا با افزایش مقدار ناچیزی در ارزش‌های زمان سفر و تعداد توقف‌های مساله اسمی، به میزان ۴/۵ برابر تقاضای مسافر برآورده‌نشده را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، برنامه‌ریزی های انجام شده در رابطه با ریسک نشان داد رخداد ریسک ثانویه تأثیر معنی‌داری درباره تصمیم‌گیری در مورد انتخاب اقدام پاسخ به ریسک اولیه دارد، یعنی در صورتی اقدامات پاسخ به ریسک‌های اولیه انتخاب و به‌کار گرفته می‌شوند که اثرات منفی ناشی از ریسک‌های ثانویه کمتر از نوع اولیه باشد. در پایان نیز، نتایج حاصل از مدل جمعی تایید کرد سناریویی که سطح حفاظتی مطلوب و زمان سفر را ۵٪ افزایش و تعداد توقف‌ها را ۲۵٪ کاهش می‌دهد راه‌حلی استوار است که از کارایی کامل برخوردار می‌باشد. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که مدل بهینه‌سازی استوار پیشنهادی را می‌توان به‌طور موثر در محیط‌هایی با تقاضای نامطمئن مسافر و تحت تاثیر ریسک‌های اولیه و ثانویه به‌کار برد. این پژوهش می‌تواند نقطه آغازینی باشد برای دیگر پژوهشگران، تا با در نظر گرفن فرض‌هایی واقع‌بینانه مدل‌سازی مساله را به واقعیت نزدیک‌تر کنند. لذا در همین راستا پیشنهاداتی به‌منظور توسعه این پژوهش و اجرای پژوهش‌های آتی ارایه می‌گردد:

۱) حوزه جالبی که ارزش تلاش‌های تحقیقاتی پیوسته را دارد شامل طراحی چندهدفه مساله زمان‌بندی قطار با در نظر گرفتن شاخص‌های ارزیابی و عوامل نامطمئن بیشتر از قبیل تقاضای مسافر هر قطار و زمان سفر هر مسیر است.

۲) توسعه روش‌های حل جدید مبتنی بر شبیه‌سازی‌بهینه‌سازی به‌منظور حل نمونه‌های بزرگتر و مسایل با پیچیدگی محاسباتی بالاتر در شرایط عدم‌قطعیت.

۳) عدم به‌کارگیری فرض مشخص بودن تعداد قطارها و توسعه مدل زمان‌بندی به شیوه‌ای به منظور تعیین تعداد بهینه قطارها.

۴) استفاده از روش‌های شناسایی ریسک از قبیل روش واکاوی حالات نقص و اثرات آن، روش واکاوی خطرات شغلی، روش واکاوی درخت خطا، روش واکاوی درخت واقعه و روش مطالعه خطر و عملیات.

۵) یک جهت احتمالی به‌منظور پژوهش‌های آتی مدل‌سازی رابطه وابستگی بین ریسک‌های اولیه و ثانویه و بررسی تعامل ریسک اولیه و تعامل ریسک ثانویه و انتخاب اقدامات پاسخ به ریسک‌ها می‌باشد که استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری دیمتل و مدل‌سازی ساختاری تفسیری در این راستا پرکاربرد است.

منابع

[1] Read, G.J., Naweed, A., & Salmon, P.M. (2019). Complexity on the rails: A systems-based approach to understanding safety management in rail transport. Reliability Engineering & System Safety, 188, 352-365.

[2] Zio, E. (2018). The future of risk assessment. Reliability Engineering & System Safety, 177, 176-190.

[3] Di Graziano, A., Marchetta, V., Grande, J., & Fiore, S. (2022). Application of a decision support tool for the risk management of a metro system. International Journal of Rail Transportation, 10(3), 352-374.

[4] Tummala, V.R., & Burchett, J.F. (1999). Applying a risk management process (RMP) to manage cost risk for an EHV transmission line project. International Journal of Project Management, 17(4), 223-235.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

[5] Malik, A., & Ullah, K. (2019). Risk and Its Mitigation Techniques. In A. Malik, & K. Ullah (Eds.), Introduction to Takaful, pp. 33-43, Palgrave Pivot, Singapore.
[6] Feng, Z., Cao, C., Mostafizi, A., Wang, H., & Chang, X. (2023). Uncertain demand based integrated optimisation for train timetabling and coupling on the high-speed rail network. International Journal of Production Research, 61(5), 1532-1555.
[7] Govindan, K., & Cheng, T.C.E. (2018). Advances in stochastic programming and robust optimization for supply chain planning. Computers & Operations Research, 100, 262-269.
[8] Singh, S., & Biswal, M.B. (2021). A robust optimization model under uncertain environment: An application in production planning. Computers & Industrial Engineering, 155, 107169.
[9] Bubbico, R., Di Cave, S., & Mazzarotta, B. (2004). Risk analysis for road and rail transport of hazardous materials: a GIS approach. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 17(6), 483-488.
[10] Saat, M.R., & Barkan, C.P. (2011). Generalized railway tank car safety design optimization for hazardous materials transport: Addressing the trade-off between transportation efficiency and safety. Journal of Hazardous Materials, 189(1-2), 62-68.
[11] Tian, Q., & Wang, H. (2022). Optimization of preventive maintenance schedule of subway train components based on a game model from the perspective of failure risk. Sustainable Cities and Society, 81, 103819.
[12] Ramezan Ghanbari, S., Afshar-Nafjafi, B., & Sabzehparvar, M. (2023). Robust optimization of train scheduling with consideration of response actions to primary and secondary risks. Mathematical Biosciences and Engineering, 20(7), 13015-13035.
[13] Yalçınkaya, Ö., & Bayhan, G.M. (2012). A feasible timetable generator simulation modelling framework for train scheduling problem. Simulation Modelling Practice and Theory, 20(1), 124-141.
[14] Li, X., & Lo, H.K. (2014). Energy minimization in dynamic train scheduling and control for metro rail operations. Transportation Research Part B: Methodological, 70, 269-284.
[15] Mo, P., Yang, L., Wang, Y., & Qi, J. (2019). A flexible metro train scheduling approach to minimize energy cost and passenger waiting time. Computers & Industrial Engineering, 132, 412-432.
[16] Rokhforoz, P., & Fink, O. (2021). Hierarchical multi-agent predictive maintenance scheduling for trains using price-based approach. Computers & Industrial Engineering, 159, 107475.
[17] Zhou, W., Huang, Y., Deng, L., & Qin, J. (2023). Collaborative optimization of energy-efficient train schedule and train circulation plan for urban rail. Energy, 263, 125599.
[18] Ghaderi A, & Khanzadeh C. (2019). A combined stochastic programming and robust optimization approach for location-routing problem and solving it via variable neighborhood search algorithm. Journal of Operational Research in its Applications, 16(4), 15-36. (In Persian)
[19] Jamili, A., & Aghaee, M.P. (2015). Robust stop-skipping patterns in urban railway operations under traffic alteration situation. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 61, 63-74.
[20] Zhou, L., Yang, X., Wang, H., Wu, J., Chen, L., Yin, H., & Qu, Y. (2020). A robust train timetable optimization approach for reducing the number of waiting passengers in metro systems. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 558, 124927.
[21] Cacchiani, V., Qi, J., & Yang, L. (2020). Robust optimization models for integrated train stop planning and timetabling with passenger demand uncertainty. Transportation Research Part B: Methodological, 136, 1-29.
[22] Pu, S., & Zhan, S. (2021). Two-stage robust railway line-planning approach with passenger demand uncertainty. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 152, 102372.
[23] Nasri, S.A., & Khoshalhan, F. (2023). A Bi objective robust possibilistic programming metro timetabling in skip-stop pattern. Journal of Transportation Research, In Press. (In Persian).
[24] Hu, Y., Li, S., Wang, Y., Zhang, H., Wei, Y., & Yang, L. (2023). Robust metro train scheduling integrated with skip-stop pattern and passenger flow control strategy under uncertain passenger demands. Computers & Operations Research, 151, 106116.
[25] Peykani, P., & Gheidar-Kheljani, J. (2022). Modeling Scenario-Based Robust Data Envelopment Analysis Approaches: An Application to Research and Development Projects. Journal of Operational Research in its Applications, 19(2), 23-37. (In Persian)
[26] Mohajeri, N., & Amin, G.R. (2010). Railway station site selection using analytical hierarchy process and data envelopment analysis. Computers & Industrial Engineering, 59(1), 107-114.
[27] Kleinová, E. (2016). Does liberalization of the railway industry lead to higher technical effectiveness?. Journal of Rail Transport Planning & Management, 6(1), 67-76.
[28] Sameni, M.K., Preston, J., & Sameni, M. K. (2016). Evaluating efficiency of passenger railway stations: A DEA approach. Research in transportation business & management, 20, 33-38.

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]

[29] Cavone, G., Dotoli, M., Epicoco, N., & Seatzu, C. (2017). A decision making procedure for robust train rescheduling based on mixed integer linear programming and Data Envelopment Analysis. Applied Mathematical Modelling, 52, 255-273.

[30] Zhang, J., Chang, J., Lin, P., Song, M., & Gong, Y. (2020). Operation Efficiency Evaluation of the China-Europe Freight Train Based on Grey Cross-Efficiency DEA. Scientific Programming, 2020, 8843733.

[31] Foroutan, S.L.F., & Bamdad, S. (2023). Efficiency measurement of railway passenger stations through network data envelopment analysis. Research in Transportation Business & Management, 46, 100767.

[32] Qi, J., Li, S., Gao, Y., Yang, K., & Liu, P. (2018). Joint optimization model for train scheduling and train stop planning with passengers distribution on railway corridors. Journal of the Operational Research Society, 69(4), 556-570.

[33] Rafiei, N., & Asadzadeh, S. (2022). Designing a risk-adjusted CUSUM control chart based on DEA and NSGA-II approaches A case study in healthcare: Cardiovascular patients. Scientia Iranica, 29(5), 2696-2709.

[34] Peykani P, & Gheidar-Kheljani J. (2022). Modeling scenario-based robust data envelopment analysis approaches: an application to research and development projects. Journal of Operational Research in its Applications, 19(2), 23-37. (In Persian)

[Downloaded from mail.jorlu.ir on 2026-11-29]

[DOI: 10.71773/jamlu-2025-1-2219]