مکان‌یابی محل استقرار لوکوموتیوهای مسافریِ امداد (زیمنس) به‌منظور رفع اختلال شبکه ریلی ناشی از مسدودی خط در شرایط کمبود این لوکوموتیوها

مقاله علمی – پژوهشی

امین کریمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
*سید حسام الدین ذگردی، استاد، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
بختیار استادی، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
احسان نیکبخش، استادیار، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zegordi@modares.ac.ir

دریافت: ۱٤۰۳/۱۰/۱۵– پذیرش: ۱٤۰٤/۰۳/۰۱
صفحه ۱۶۰-۱۳۵

چکیده

این نوشتار در مورد لوکوموتیوهای مسافری به عنوان یکی از ارزشمندترین دارایی‌های شرکت راه‌آهن بحث می‌کند و سعی دارد تا با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی در این شرکت، راه حلی برای کاهش تأثیر خرابی این لوکوموتیوها در هنگام حرکت در شرایط فعلی ناشی از تحریم‌ها بر کشور ارائه دهد. در این زمان که بخش اعظمی از این تجهیزات به دلیل نبود قطعه و بعضاً نداشتن برنامه تخصصی تعمیراتی به صورت بلااستفاده در دپو شرکت راه‌آهن قرار گرفته‌اند، نیاز است تا از حداکثر پتانسیل آن‌ها جهت انجام عملیات روزانه‌ی جابجایی مسافر استفاده کرد. از سوی دیگر خلأ برنامه‌ی تعمیراتی مناسب برای این تجهیزات سبب شده است تا تواتر خرابی این تجهیزات در هنگام حرکت بالا رود و باعث انسداد خط و اختلال در شبکه ریلی شود که برای رفع این اختلال نیز نیاز است تعدادی از این لوکوموتیوهای مسافری به صورت مستقر در ایستگاه‌های منتخب برای امداد قطارهای مانده در مسیر بشتابند. روش انجام کار در این تحقیق، ایجاد راه حلی به صورت استفاده‌ی هم‌زمان از این تجهیزات و سایر لوکوموتیوها در بخش‌های دیگر مانند بار و مانور است تا در هنگام بروز خرابی لوکوموتیو مسافری در مسیر و مسدودی خط، برای برطرف نمودن آن اعزام گردند تا قدری از بار عملیاتی لوکوموتیوهای مسافری کاسته شود. بدین منظور این تحقیق سعی دارد تا این مسئله را از طریق حل یک مدل برنامه ریزی تصادفی سناریو محور با تصحیح ساده و با بررسی سابقه‌ی خرابی لوکوموتیوهای مسافری و همچنین شناسایی مسیرهای پر تردد لوکوموتیوهای باری و مانوری جهت تعیین بهترین ایستگاه‌ها برای استقرار این لوکوموتیوها به صورت ذخیره انجام دهد. این مسئله از با استفاده از نرم افزار CPLEX برای ۱۳۱ عدد سناریو حل شد و نتیجتاً با بدست آوردن یک استقرار بهینه برای لوکوموتیوهای امداد نشان داده شد که استقرار فعلی مورد استفاده در شبکه ریلی ایران از نظر بهره وری بهینه نیست.

واژه‌های کلیدی: اختلال، بهره‌وری، تخصیص، برنامه ریزی تصادفی سناریو محور، شبکه ریلی، ناوگان کشش

۱- مقدمه

در راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران لوکوموتیوها نقش بسیار حیاتی و مهمی در صنعت ریلی دارند. به‌گونه‌ای که با تغییرات کوچکی در وضعیت عملیاتی این تجهیزات ممکن است که کل صنعت ریلی با مشکل مواجه شود و عملاً کار انتقال مسافر و بار مختل شود. از این رو همواره وضعیت لوکوموتیوها به عنوان یک موضوع چالشی برای تصمیم‌گیری مدیران مطرح بوده است. ناوگان کشش در شرکت ملی راه‌آهن شامل انواع مختلفی از لوکوموتیوها با نام‌های تجاری گوناگون است. از لوکوموتیوهای

جنرال موتورز و جنرال الکتریک ساخت ایالات متحده‌ی آمریکا گرفته تا لوکوموتیوهای آلستوم فرانسه و هیتاچی ساخت کشور ژاپن که در حال حاضر خدمات مربوط به جابجایی کالا و بار و یا انجام عملیات مانور برای تشکیل قطار در داخل ایستگاه‌ها را انجام می‌دهند. در سال‌های اخیر شرکت مپنا با همکاری شرکت زیمنس آلمان تعداد ۱۵۰ لوکوموتیو را که مخصوص جابجایی واگن‌های مسافری بودند، تحت لیسانس این شرکت آلمانی مونتاژ نمود و در اختیار خدمات جابجایی مسافر قرار داد. طراحی مناسب این لوکوموتیوها برای جابجایی واگن‌های مسافری باعث شد تا تمام خدمات مربوط به جابجایی مسافر توسط این تجهیزات انجام گیرد. با توجه به اینکه بخش اعظمی از این تجهیزات تحت لیسانس شرکت زیمنس در ایران مونتاژ شده‌اند، خدمات مربوط به نگهداری و تعمیرات آن‌ها نیز توسط نمایندگان خود شرکت زیمنس انجام می‌شده است که با اعمال تحریم‌های بین‌المللی عملاً این قرارداد بدون اثر شده است و خدمات نگهداری و تعمیرات آن‌ها دیگر توسط این شرکت انجام نمی‌شود که این موضوع باعث شد تا به مرور زمان، تعداد قابل توجهی از لوکوموتیوهای مسافری زیمنس به دلیل خرابی و نداشتن قطعات مصرفیِ قابل تولید در داخل ایران در دپو اداره کشش شرکت راه‌آهن متوقف باشند. بر طبق اخبار غیر رسمی تا نیمه دوم سال ۱۴۰۰ از تعداد ۱۵۰ لوکوموتیو زیمنس، ۶۰ عدد آن‌ها به علل متفاوت غیر عملیاتی هستند و تنها تعداد ۹۰ مورد در حال انجام عملیات هستند که این موضوع نشان‌دهنده‌ی کاهش توان عملیاتی شرکت راه‌آهن در جابجایی مسافر و همین‌طور کمتر شدن توان پاسخگویی در هنگام بروز رخداد برای این لوکوموتیوها و متعاقباً افزایش تاخیرات قطارهای مسافری را دارد. موضوع تحقیق که در ادامه مطرح می‌شود در حوزه‌ی مباحث مربوط به بحث بهره‌وری است و تماماً سعی بر این است تا از طریق ارائه‌ی مدلی که بر پایه‌ی مفاهیم برنامه‌ریزی تصادفی نگاشته شده است و با ایجاد افزونگی در لوکوموتیوهای مسافریِ زیمنس مستقر در طول شبکه ریلی، انعطاف‌پذیری شبکه ریلی در برابر اختلالات را افزایش داده و میزان تأخیر قطارها مسافریِ دچار اختلال شده را کاهش دهد و هرچه سریع‌تر سیستم دچار اختلال شده به حالت اولیه باز گردد و در طول این مسیر، دیدگاه کاهش هزینه‌های عملیات رفع اختلال مشهود است. مسئله‌ی اصلی این تحقیق، تخصیص لوکوموتیوهای مسافریِ امداد زیمنس به جهت مدیریت اختلال ناشی از وقوع خرابی در دیگر لوکوموتیوهای مسافری در حین انجام عملیات جابجایی قطارهای مسافری است که این امر به وسیله‌ی شناسایی مکان‌های پرتردد لوکوموتیوهای برندهای دیگر مانند جنرال موتورز و یا هیتاچی به منظور کمک گرفتن از آن‌ها در هنگام وقوع اختلال انجام می‌پذیرد. به طور کلی منظور از اختلال در این تحقیق، خرابی و عدم تأمین نیروی کشش توسط لوکوموتیوهای مسافری زیمنس و متوقف شدن قطار مسافری متصل به آن در مسیر و مسدود شدن مسیر است که مدیریت این اختلال نیز شامل دو مرحله است. ۱) برطرف نمودن مسدودی بلاک به وسیله‌ی نزدیک‌ترین لوکوموتیو موجود در اطراف قطار مسافریِ متوقف و جابجایی آن به خط فرعی نزدیک‌ترین ایستگاه. ۲) ارسال لوکوموتیوِ امداد برای اتصال به قطار مسافری به منظور ادامه‌ی حرکت قطار تا مقصد. تا قبل از سال ۱۳۹۸ به دلیل اینکه تمامی لوکوموتیوهای مسافری زیمنس دارای برنامه‌ی نگهداری و تعمیرات مشخص بوده‌اند، اکثر این لوکوموتیوها در حالت پایدار عملیاتی قرار داشتند. تعدادی از این لوکوموتیوهای مسافری به صورت آماده به کار در ایستگاه‌های مهم کشور مستقر بودند تا بلافاصله بعد از بروز اختلال ناشی از خرابی لوکوموتیو مسافری، به محل توقف قطار مسافری اعزام گردیده و عملیات رفع اختلال را انجام دهند. در شرایط فعلی دیگر به مانند قبل نمی‌توان تعدادی از این تجهیزات را در ایستگاه‌های طول مسیر به صورت آماده به کار قرار داد. لذا در زمان رخداد اختلال ناشی از خرابی لوکوموتیو مسافری، عملیات مدیریت و رفع اختلال به دلیل دور بودن و بعضاً محیا نبودن این لوکوموتیوهای مسافریِ امداد زیمنس به صورت کندتر و با صرف زمان بیشتری انجام می‌گیرد که باعث پرداخت خسارتِ تأخیر به مسافران و متحمل شدن هزینه برای شرکت ملی راه‌آهن می‌شود. حال در چنین شرایطی باید از تمام ظرفیت شبکه ریلی استفاده کرد و به جای اینکه تمامی مراحل رفع اختلال توسط یک نوع لوکوموتیو که همان لوکوموتیوهای شرکت زیمنس است انجام گیرد، می‌توان بخشی از آن را به سایر لوکوموتیوها که در نزدیک‌ترین نقطه به اختلال حضور دارند محول نمود. در واقع در اینجا سؤال اصلی تحقیق به این صورت مطرح می‌شود که چگونه می‌توان در شرایط تحریم و کمبود لوکوموتیوهای مسافریِ امداد زیمنس و نبود امکان اینکه تعداد نسبتاً زیادی از این لوکوموتیوها به صورت آماده به کار در ایستگاه‌های مختلف خط قرار گیرند، از دیگر ظرفیت‌های موجود

در شبکه ریلی مانند لوکوموتیوهای باری و مانوری استفاده نمود تا با کمک آن‌ها بتوان حداقل تعداد لوکوموتیوهای مسافریِ امداد زیمنس را به صورت ذخیره به ایستگاه‌های طول خط تخصیص داد و در هنگام بروز اختلال با صرف کمترین هزینه و زمان بتوان این اختلالات را مدیریت نمود. به این سؤال به این صورت می‌توان پاسخ داد که باید به نحوی از ظرفیت‌های سایر بخش‌های شبکه ریلی در هر دو مرحله‌ی مدیریت اختلال استفاده کرد. بدین شکل که در مرحله‌ی اول مدیریت اختلال در هنگام مسدودی بلاک توسط قطار مسافری متوقف، ممکن است از لوکوموتیوهای قطارهای باری که در اطراف آن مشغول حرکت هستند استفاده نمود و یا خرابی لوکوموتیو مسافری در اطراف ایستگاه‌های تشکیلاتی اتفاق بیفتد که در آن‌ها عملیات مانور انجام می‌گیرد و به طور حتم لوکوموتیوهای مانوری مانند هیتاچی در دسترس هستند.

لذا با در نظر گرفتن شرایط جدید و احتمال دور بودن و یا در دسترس نبودن لوکوموتیوهای مسافریِ امداد زیمنس در ایستگاه‌های نزدیک به قطار متوقف، می‌توان از لوکوموتیوهای متصل به قطارهای باری که در نزدیکی در حال حرکت هستند استفاده کرد و یا در صورت نزدیک بودن به ایستگاه‌های تشکیلاتی، از لوکوموتیوهای مانوری موجود در آن‌ها برای رفع مسدودی بلاک و انتقال قطار متوقف به خط فرعی نزدیک‌ترین ایستگاه استفاده نمود و مرحله‌ی اول مدیریت اختلال را با سرعت بیشتری انجام داد.

در مرحله‌ی دوم مدیریت اختلال با توجه به قدرت بالای لوکوموتیوهای باری و توانایی تأمین نیروی کشش برای ادامه‌ی سیر قطارهای مسافری متوقف، می‌توان به جای اینکه در انتظار لوکوموتیو مسافریِ امداد زیمنس بود، از این لوکوموتیوها برای ارسال قطارهای متوقف به مقصدشان استفاده کرد. به بیان دیگر هدف از مطرح کردن این مسئله، کمینه کردن مدت زمان اختلال به تبع آن هزینه‌ی به وجود آمده در هر دو مرحله‌ی اختلال در شرایط کمبود لوکوموتیوهای مسافریِ امداد زیمنس است. در واقع در این تحقیق سعی می‌شود تا با تخصیص حداقل تعداد لوکوموتیوهای مسافریِ امداد زیمنس در ایستگاه‌های شبکه ریلی علاوه بر صرفه جویی در به کارگیری این لوکوموتیوها، بیشترین استفاده از سایر ظرفیت‌های شبکه ریلی به عمل آید.

۲-پیشینه تحقیق

این بخش به مرور ادبیات موضوع می‌پردازد. موضوعات متفاوتی در مسئله‌ی این تحقیق وجود دارند که باید نیاز تحقیقاتی مسئله‌ی موجود در آن‌ها بررسی شود. یکی از این موضوعات، مدیریت اختلال در صنعت ریلی است و کل تحقیقات حاضر به دلیل به وجود آمدن اختلالاتی است که به موجب آن مسئله‌ی حاضر تعریف شده است. سپس به مرور ادبیات تخصیص لوکوموتیو پرداخته می‌شود و تمامی مسائل مطرح شده در مورد تخصیص لوکوموتیو بررسی خواهند شد.

۲-۱-مدیریت اختلال در صنعت ریلی

شبکه‌های ریلی دارای وابستگی‌های متقابل متعددی است که می‌تواند باعث شروع خرابی‌های شبکه با پیامدهای جدی برای حرکت قطارها و مسافران شود. گستردگی ارتباطات موجود در این زمینه باعث می‌شود که مباحثی مانند تاب آوری زنجیره تامین در ارتباط با مدیریت اختلال شبکه ریلی مطرح شود که در ادامه به این مباحث اشاره می‌شود.

۲-۱-۱-تاب آوری شبکه ریلی

در سال ۲۰۲۲ ایلالوخوین و همکارانش مقاله‌ای ارائه کردند که مربوط به ارائه‌ی مدلی برای ارزیابی تاب‌آوری در تجهیزات شبکه ریلی است. آن‌ها بیان نمودند که تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری شبکه‌های حمل و نقل و ارتباطات و انرژی، مورد نیاز برای عملکرد روانِ جامعه مدرن است. (Ilalokhoin, Pant, Hall, 2022). در حالی که عدم وجود مشمولیت جهانی در تعریف تاب‌آوری در ادبیات پژوهشی مورد تائید قرار گرفته است، تعریفی که به طور گسترده پذیرفته شده این است که توسط برونو و همکارانش ارائه شد که تاب‌آوری را تابعی از عملکرد سیستم و ظرفیت تطبیقی شامل چهار بعد استحکام، افزونگی، تدبیر و سرعت توصیف کرد. (Bruneau, Chang, Eguchi 2003). ایلالوخوین و همکارانش در مطالعه‌ی خود یک مدلِ سیستم زیرساخت ریلی را ارائه کردند که می‌تواند برای شبیه‌سازی اختلالات در عملیات شبکه ریلی استفاده شود و همچنین می‌تواند به عنوان یک معیار عملکرد بر اساس دقایق تأخیر قطار و مسافر در شبکه ریلی به کار گیرد. نتایج این مطالعه، حساسیت شبکه ریلی را به تعداد کمی از تجهیزات کششی متمرکز در منطقه لندن نشان می‌دهد، جایی که آن‌ها متوجه شدند

که خرابی یکی از حیاتی‌ترین تجهیزات کشش در شبکه برق می‌تواند ۷۵ درصد تمام قطارها در منطقه جنوبی و ۲۵ درصد تمام قطارها در سطح کشور را مختل کند. تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که چگونه تاب‌آوری شبکه ریلی تحت تأثیر سرعت بازسازی تجهیزات پشتیبان پس از یک رویداد خرابی قرار دارد. (Ilalokhoin, Pant, Hall, 2022). به نوعی در این تحقیق اثر افزونگی بر روی تاب آوری شبکه ریلی بررسی شده است و نشان می‌دهد که با افزایش تعداد کمی در افزونگی، می‌توان تا درجات بالایی از گسستگی شبکه ریلی کاست. (Ilalokhoin, Pant, Hall, 2022)

۲-۲- مسئله تخصیص لوکوموتیو

به طور کلی در ادبیات کمتر به بحث‌های تخصیص برای لوکوموتیوهای امداد پرداخته شده است و به نظر می‌رسد که مرتبط ترین بحث با این موضوع، بحث تخصیص لوکوموتیوها به قطارهای باری و مسافری باشد. در ادامه، تحقیقات انجام شده‌ی پیشین مربوط به مسئله‌ی تخصیص لوکوموتیو بررسی می‌شود. در ابتدا حاله و همکارانش با بررسی ادبیات تخصیص لوکوموتیو به این نتیجه رسیدند که مواردی مانند قدرت متفاوت لوکوموتیوها، امکان ترکیب لوکوموتیوهای غیر همنوع و جایگزینی استفاده لوکوموتیوهای باری و مسافری در تحقیقات قبلی در نظر گرفته نشده است. آن‌ها سعی کردند تا با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی خطی و حل آن در نرم‌افزار گمز، تخصیص لوکوموتیوها را انجام دهند. (Hale, Bakhshi, Hoseini, 1390). در ادامه یقینی و همکارانش سعی کرند تا با حل هم‌زمان دو مسئله تخصیص لوکوموتیو باری و زمان‌بندی آن از طریق الگوریتم ژنتیک، مدل تخصیص مناسبت‌تری را ایجاد نمایند. مدل آن‌ها به دلیل اینکه هر دو مسئله را به صورت جداگانه در نظر می‌گیرد، کارایی کافی را برای تخصیص ارائه نمی‌دهد که این موضوع باعث می‌شود تا مدل دیگری را ه منظور بهینه‌سازی دو هدفه زمان‌بندی حرکت قطارها و تخصیص لوکوموتیو با استفاده از رویکرد کارگاهی برای کاهش دامنه‌ی عملیات یا طول افق زمانی برای زمان‌بندی استفاده کنند. (Yaghini, Ahmad poor, 1396)

در سال ۲۰۰۷ چنک کو و همکارانش نیز از طریق حل یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح سعی کردند تا بهره‌برداری بهتری از ناوگان لوکوموتیوها داشته باشند. مدل ایشان به نسبت مدل‌های قبلی دارای محدودیت‌های متفاوتی بود و تابع هدف بیان شده سعی در کمینه‌سازی تعداد لوکوموتیوهای مورد نیز در عملیات را داشت. (Chung kuo, Nicholls , 2007)

در سال ۲۰۲۰ شفر یک راه حل اکتشافی مبتنی بر برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح برای مسئله تخصیص لوکوموتیو با تمرکز بر فرآیندهای قطع و اتصال ارائه دادند. این تحقیق که برخاسته از یک مشکل عملی در حمل و نقل ریلی در اروپا است، بر اساس یک فرمول مسئله عدد صحیح مختلط تعمیم‌یافته جدید برای مسئله تخصیص لوکوموتیو است. تمرکز اصلی از یک سو بر فرآیندهای قطع و اتصال بین واگن‌ها و لوکوموتیوها و از طرف دیگر بر ترکیب دو یا چند لوکوموتیو است به عبارتی فرآیند ساخت و تشکیل لوکوموتیوها است. علاوه بر این محدودیت‌های منطقه‌ای برای اجرای انواع خاصی از لوکوموتیوها و شرایط فنی برای ترکیب لوکوموتیوها در نظر گرفته شده است. (Scheffler, 2020). با توجه به مطرح بودن موضوعات مختلف در این تحقیق مانند مدیریت اختلال در شبکه ریلی و مسئله تخصیص، نیاز است تا مرور ادبیات در هر دوی این مباحث انجام گیرد و در نهایت با توجه به نتایج به دست آمده، شکاف تحقیقاتی موجود در ادبیات شناخته شود و مسیر رسیدن به موضوع تحقیق مشخص شود. براساس بررسی نویسندگان این مقاله، تمامی مدل‌های ارائه شده در ادبیات برای تخصیص لوکوموتیو به صورت معین بوده و چه در مقالات خارجی و چه در مقالات داخلی، تا زمان ارائه‌ی این مقاله مدلی برای تخصیص لوکوموتیو در حالت غیرقطعی و تصادفی ارائه نشده است. همچنین این مدل‌های تخصیص لوکوموتیو برای انجام عملیات روزانه و عادی در شبکه ریلی طراحی شده است و حالت اختلال در شبکه ریلی را در نظر نمی‌گیرند و مشخص است که ملاحظات در حالت عادی عملیات با حالت اختلال یکی نیست. چراکه منابع موجود در حالت عادی ممکن است دیگر در حالت اختلال موجود نباشند. ادامه‌ی بررسی ادبیات در موضوع اختلال در شبکه ریلی نکاتی را در این قسمت مشخص می‌کند. به طور کلی اختلال در شبکه ریلی می‌تواند به دلایل مختلفی ایجاد شود که اختلال در نیروی کشش یکی از این دلایل است که در این مورد تحقیقاتی انجام شده است. در این تحقیقات به نقش ضروری نیروی کشش در ایجاد یک عملیات انتقال مطلوب اشاره شده است و سعی نموده تا راهکارهایی را برای بالا بردن ضریب اطمینان کارکرد

آن در نظر بگیرد ولی تاکنون به راهکاری که این تحقیق سعی در توسعه‌ی آن دارد اشاره نشده است. این تحقیق سعی دارد از طریق ایجاد مدل تخصیص تصادفی به ایجاد افزونگی در طول شبکه ریلی برای افزایش تاب‌آوری سیستم بپردازد.

۳- مدلسازی مسئله تحقیق

این بخش شامل دو قسمت اصلی است و بر روی مدل مفهومی مسئله تحقیق و سپس مدل ریاضی مسئله و همچنین اطلاعات مورد نیاز آن تمرکز دارد.

۳-۱- مدل مفهومی مسئله

در این تحقیق سعی بر آن است تا یک مدل بهینه‌سازی تصادفی ارائه شود تا با تخصیص حداقل تعداد لوکوموتیوهای آماده به کار و به وسیله‌ی شناسایی مکان‌های پرتردد لوکوموتیوهای باری و مانوری، میزان هزینه‌ی ناشی از مدیریت اختلالِ توقف قطارهای مسافری کمینه شود. متغیرهای تصمیم مرحله‌ی اول در این مدل، انتخاب مکان لوکوموتیوهای مسافریِ امداد زیمنس در ایستگاه‌های طول شبکه است. این متغیرها از نوع تصمیمات استراتژیک هستند که پس از تحقق عدم قطعیت در مدل، بر روی تصمیمات تاکتیکی مدل تأثیر می‌گذارند. عدم قطعیتی که در این مدل وجود دارد، وقوع خرابی برای یک لوکوموتیو مسافری متصل به واگن‌های مسافری، میزان دوری و یا نزدیکی لوکوموتیوهای باری به محل خرابی لوکوموتیو مسافری و همین طور مهیا بودن لوکوموتیوهای مانوری در ایستگاه‌های تشکیلاتی است. بعد از این قسمت تا انتهای این مقاله، به جای ترکیب لوکوموتیو امداد مسافریِ زیمنس، از ترکیب کوتاه‌تر آن که لوکوموتیو امداد مسافری است، استفاده می‌شود. پس از محقق شدن عدم قطعیت بسته به مکانی که قطار مسافری در آن متوقف است، دو تصمیم تاکتیکی زیر اخذ می‌شود.

کدام راهکار برای رفع مسدودی بلاک در مرحله اول مدیریت اختلال انتخاب شود؟

-راهکار اول - ارسال لوکوموتیو مانوری از ایستگاه‌های تشکیلاتی در صورتی که محل خرابی قطار در نزدیکی یک ایستگاه تشکیلاتی باشد.

-راهکار دوم - انفصال لوکوموتیو باری از قطار باری نزدیک به محل رخداد اختلال و متصل شدن به قطار مسافری.

-راهکار سوم - ارسال لوکوموتیو مسافریِ امداد زیمنس در صورتی که از دو گزینه‌ی قبلی در دسترس‌تر باشد.

در شرایط مساوی، اولویت با راهکار سوم است و بعد از آن با راهکار دوم و در نهایت راهکار اول کمترین اولویت را دارد.

- پس از رفع مسدودی بلاک، چه لوکوموتیوی باید قطار مسافری را تا مقصد هدایت کند؟ که همان مرحله دوم مدیریت اختلال است. در این قسمت تنها می‌توان از لوکوموتیوهای باری و مسافری استفاده کرد و از لوکوموتیوهای مانوری به دلیل توان انتقالِ پایین در مسافت‌های بالا استفاده نمی‌شود در حالی که در مرحله اول مدیریت اختلال می‌توان از هر سه نوع لوکوموتیوهای مسافری، باری و مانوری استفاده کرد. در صورتی که در مرحله‌ی اول مدیریت اختلال از راهکار اول استفاده شود، در مرحله‌ی دوم مدیریت اختلال میتوان از لوکوموتیو باری و یا از لوکوموتیو مسافریِ امداد برای انتقال قطار به مقصد استفاده کرد. در واقعیت از لوکوموتیو باری در صورتی استفاده می‌شود که قطار مسافری نیازمند برق نباشد و یا واگن‌ها خود انرژی باشند و برق خود را تأمین کنند. در صورتی که راهکار دوم انتخاب شود، قطار می‌تواند با همان لوکوموتیو باری به سیر خود ادامه دهد و یا اینکه با لوکوموتیو مسافریِ امداد به مقصد خود گسیل شود. لازم به ذکر است که شرط عدم نیاز به تأمین برق از لوکوموتیو که در مورد حالت قبل بیان شد همچنان برقرار است. در صورتی که راهکار سوم انتخاب شود، قطار با لوکوموتیو مسافریِ امداد به سیر خود ادامه می‌دهد. نکته‌ای که در اینجا لازم به ذکر است شباهت مسئله این تحقیق به مسئله پوشش مجموعه‌ها است. در مسئله‌ی پوشش مجموعه‌ها سعی می‌شود از طریق تعیین نقاط مهم جهت تخصیص یا به عبارتی تعیین ایستگاه‌های مهمی که خرابی ها در اطراف آنها بیشتر اتفاق می‌افتد، تخصیص لوکوموتیو مسافریِ امداد انجام گیرد در حالیکه در مسئله‌ی تحقیق حاضر که به نوعی یک مسئله تخصیص نامتوازن است، سعی می‌شود ۱۰ وظیفه به ٤ سرویس دهنده تخصیص یابد. در هر دو مسئله هدف نهایی که تخصیص لوکوموتیو مسافریِ امداد است انجام می‌پذیرد ولی تفاوت عمده‌ی مسئله‌ی تحقیق با مسئله‌ی پوشش مجموعه‌ها این است که در مسئله پوشش به سایر سرویس دهنده‌ها که لوکوموتیوهای باری و مانوری و عدم تخصیص آنها است توجهی نمی‌شود و تمامی وظایف به یک سرویس دهنده که همان لوکوموتیو مسافریِ امداد است

تخصیص می‌یابد. در واقع یکی از نتایج مسئله‌ی تحقیق فعلی شناسایی مسیرهایی است که بتوان با سایر لوکوموتیوهای باری و مانوری مدیریت اختلال آنها را انجام داد که این موضوع در مسئله پوشش تعیین نمی‌شود و در آنجا تنها به تعیین مکان لوکوموتیوهای مسافریِ امداد پرداخته می‌شود و در مورد تصمیم‌هایی نظیر اینکه در کدام نواحی بهتر است از دیگر سرویس دهنده‌ها استفاده کرد صحبتی نمی‌شود.

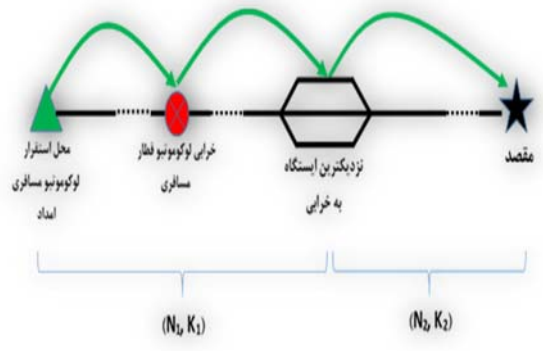
۳-۲-حالات اصلی ترکیب لوکوموتیوها در دو مرحله‌ی مدیریت اختلال خرابی قطارهای مسافری

در این قسمت به بررسی انواع حالات ترکیب لوکوموتیوها به یکدیگر برای مدیریت اختلال خرابی قطارهای مسافری پرداخته می‌شود. این قسمت، پایه و اساس کارکرد مدل است و از اهمیت بالایی برخوردار است. چرا که در هر کدام از حالات ترکیب لوکوموتیوها در دو مرحله‌ی مدیریت اختلال، نحوه‌ی محاسبه‌ی دو پارامتر زیر که در قسمت‌های مختلف مدل از آن استفاده می‌شود متفاوت است. ۱) هزینه‌های انتقال که در تابع هدف محاسبه می‌گردد. ۲) میزان زمان صرف شده جهت انتقال که در محدودیت حداکثر زمان انتقال محاسبه می‌گردد. با در نظر گرفتن اینکه سه نوع لوکوموتیو مسافریِ امداد، باری و مانوری برای مدیریت اختلال در مرحله‌ی اول خرابی قطارهای مسافری وجود دارد و همین‌طور برای مدیریت اختلال در مرحله‌ی دوم نیز تنها دو لوکوموتیو مسافریِ امداد و باری موجود است و با توجه به این موضوع که اگر در مرحله‌ی اول مدیریت اختلال از لوکوموتیو مسافریِ امداد استفاده شود، در مرحله‌ی دوم نیز باید از همان لوکوموتیو مسافریِ امداد استفاده نمود، در مجموع پنج حالت برای ترکیب لوکوموتیوها برای رفع اختلال خرابی قطارهای مسافری وجود دارد. با توجه به در نظر گرفتن بحث تصحیح ساده، علاوه بر این پنج حالت، حالت ششم نیز در مدل در نظر گرفته شده است که مربوط به این است که در هیچ کدام از دو مرحله مدیریت اختلال هیچ گونه تخصیص لوکوموتیوی صورت نگرفته است و در واقع حالت ششم حالت عدم تخصیص در ازای جریمه به تابع هدف است. هر کدام از این پنج حالت در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

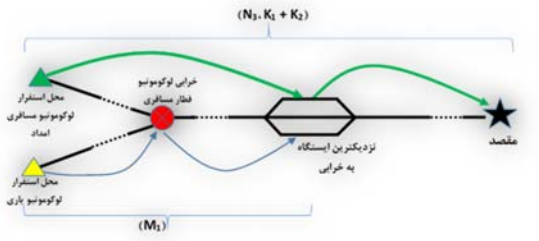
استفاده از لوکوموتیو مسافریِ امداد در هر دو مرحله مدیریت اختلال

در این حالت ابتدا در مرحله‌ی اول مدیریت اختلال از لوکوموتیو مسافریِ امداد استفاده شده است. در واقع این گزینه بین سه گزینه‌ی موجود در دسترس بوده است و از آن برای انتقال قطار مسافری متوقف به خط فرعی نزدیک ترین ایستگاه استفاده شده است. سپس با توجه به شرطی که بیان می‌کند هرگاه در مرحله‌ی اول مدیریت اختلال از لوکوموتیو مسافریِ امداد استفاده شود آنگاه باید در مرحله‌ی دوم نیز از همان لوکوموتیو برای انتقال قطار مسافری متوقف تا مقصد استفاده شود، در مرحله‌ی دوم نیز از همان لوکوموتیو مسافریِ امداد استفاده می‌شود. همان‌طور که اشاره شد در هر کدام از پنج حالت ترکیب لوکوموتیوها، میزان هزینه‌ی انتقال قطار مسافری متوقف متفاوت می‌شود. به علاوه زمان صرف شده جهت جابجایی قطار مسافری متوقف تا مقصد نیز متفاوت می‌شود. برای حالت اول، میزان هزینه‌ی انتقال قطار مسافری متوقف برابر است با مجموع هزینه‌ی ارسال لوکوموتیو مسافریِ امداد تا محل قطار مسافری متوقف و انتقال آن تا خط فرعی نزدیک‌ترین ایستگاه (N_1) و هزینه‌ی انتقال قطار مسافری به وسیله همان لوکوموتیو مسافریِ امداد تا مقصد (N_2).

زمان انتقال نیز برابر است با مجموع زمان انتقال لوکوموتیو مسافریِ امداد تا ایستگاهی که قطار مسافری در آن متوقف است (K_1) و بعد از آن از این ایستگاه تا مقصد(K_2). شکل ۱ به جهت روشن‌تر شدن مطالب بالا ترسیم شده است.



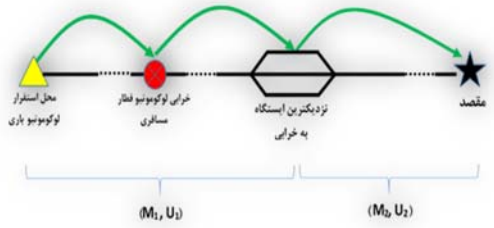
شکل ۱. حالت اول از ترکیب لوکوموتیوها برای مدیریت اختلال



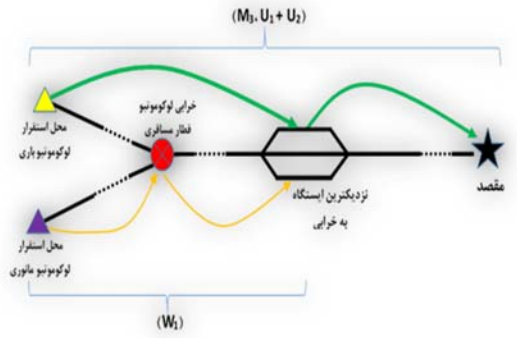
شکل ۲. حالت دوم از ترکیب لوکوموتیوها برای مدیریت اختلال

-استفاده از لوکوموتیو باری در مرحله‌ی اول و لوکوموتیو مسافریِ امداد در مرحله‌ی دوم مدیریت اختلال در این حالت فرض می‌شود که لوکوموتیو باری نسبت به سایر لوکوموتیوها در دسترس‌تر و نزدیک‌تر است. پس از آن جهت مرحله‌ی اول مدیریت اختلال استفاده می‌شود ولی با توجه به این که استفاده از این لوکوموتیو در مرحله‌ی دوم مستلزم پرداخت هزینه‌ی بیشتری است، سعی می‌شود در مرحله‌ی دوم از لوکوموتیو مسافریِ امداد که هزینه‌ی کمتری دارد استفاده شود که این موضوع در صورتی امکان پذیر است که این لوکوموتیو پس از لوکوموتیو باری، به قطار مسافری متوقف نزدیک تر باشد. در این حالت هزینه‌ی انتقال قطار مسافری متوقف برابر است با مجموع هزینه‌ی ارسال لوکوموتیو باری تا محل قطار مسافری متوقف و انتقال آن تا خط فرعی نزدیک‌ترین ایستگاه (M_1) و هزینه‌ی ارسال لوکوموتیو مسافریِ امداد تا ایستگاهی که قطار مسافری به آنجا منتقل شده است و همچنین انتقال قطار مسافری به وسیله‌ی این لوکوموتیو مسافریِ امداد تا مقصد (N_3). در این حالت مشخص است که در نهایت کار انتقال قطار مسافریِ متوقف توسط لوکوموتیو مسافریِ امداد انجام می‌شود پس زمان انتقال آن نیز برابر است با مجموع زمان انتقال لوکوموتیو مسافریِ امداد تا ایستگاهی که قطار مسافری در آن متوقف است (K_1) و بعد از آن از این ایستگاه تا مقصد (K_2). شکل ۲ به جهت روشن‌تر شدن مطالب بالا ترسیم شده است.

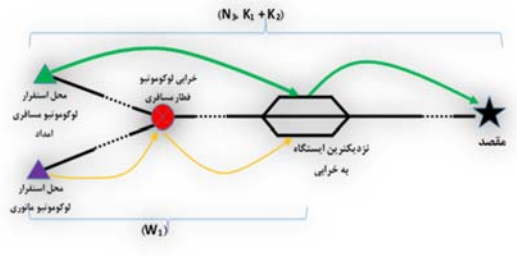
-استفاده از لوکوموتیو باری در هر دو مرحله‌ی مدیریت اختلال در این حالت فرض می‌شود که لوکوموتیو باری نسبت به سایر لوکوموتیوها در دسترس‌تر و نزدیک‌تر است. پس از آن به جهت مرحله‌ی اول مدیریت اختلال استفاده می‌شود و با توجه به این‌که هیچ گزینه‌ی بهتری برای انتقال قطار مسافریِ متوقف تا مقصد وجود ندارد، از همان لوکوموتیو باری در مرحله‌ی دوم مدیریت اختلال استفاده می‌شود. در این حالت هزینه‌ی انتقال قطار مسافریِ متوقف برابر است با مجموع هزینه‌ی ارسال لوکوموتیو باری تا محل قطار مسافریِ متوقف و انتقال آن تا خط فرعی نزدیک‌ترین ایستگاه (M_1) و هزینه‌ی انتقال قطار مسافریِ متوقف به وسیله‌ی این لوکوموتیو باری تا مقصد (M_2). در این حالت زمان انتقال آن نیز برابر است با مجموع زمان انتقال لوکوموتیو باری تا ایستگاهی که قطار مسافری در آن متوقف است (U_1) و بعد از آن از این ایستگاه تا مقصد (U_2). شکل ۳ به جهت روشن‌تر شدن مطالب بالا ترسیم شده است.



شکل ۳. حالت سوم از ترکیب لوکوموتیوها برای مدیریت اختلال



شکل ٤. حالت چهارم از ترکیب لوکوموتیوها برای رفع اختلال



شکل ۵. حالت پنجم از ترکیب لوکوموتیوها برای مدیریت اختلال

استفاده از لوکوموتیو مانوری در مرحله‌ی اول و لوکوموتیو باری در مرحله‌ی دوم مدیریت اختلال در این حالت فرض می‌شود که لوکوموتیو مانوری نسبت به سایر لوکوموتیوها در دسترس‌تر و نزدیک‌تر است. پس از آن به جهت مرحله‌ی اول مدیریت اختلال استفاده می‌شود ولی با توجه به این‌که استفاده از این لوکوموتیو در مرحله‌ی دوم مستلزم پرداخت هزینه‌ی بسیار زیادی است و عملا امکانپذیر نیست، سعی می‌شود در مرحله‌ی دوم از لوکوموتیوهای دیگر که هزینه‌ی کمتری دارد استفاده شود. در این حالت فرض می‌شود که از لوکوموتیو باری استفاده می‌شود. این موضوع در صورتی امکان‌پذیر است که این لوکوموتیو پس از لوکوموتیو مانوری، به قطار مسافریِ متوقف نزدیک‌تر باشد. در این حالت هزینه‌ی انتقال قطار مسافریِ متوقف برابر است با مجموع هزینه‌ی ارسال لوکوموتیو مانوری تا محل قطار مسافریِ متوقف و انتقال آن تا خط فرعی نزدیک‌ترین ایستگاه (W_1) و هزینه‌ی ارسال لوکوموتیو باری تا ایستگاهی که قطار مسافری به آنجا منتقل شده است و همچنین انتقال قطار مسافری به وسیله‌ی این لوکوموتیو باری تا مقصد (M_3). در این حالت مشخص است که در نهایت کار انتقال قطار مسافریِ متوقف توسط لوکوموتیو باری انجام می‌شود پس زمان انتقال آن نیز برابر است با مجموع زمان انتقال لوکوموتیو باری تا ایستگاهی که قطار مسافری در آن متوقف است (U_1) و بعد از آن از این ایستگاه تا مقصد (U_2). شکل شماره ٤ به جهت روشن‌تر شدن مطالب بالا ترسیم شده است.

استفاده از لوکوموتیو مانوری در مرحله‌ی اول و لوکوموتیو مسافریِ امداد در مرحله‌ی دوم مدیریت اختلال در این حالت فرض می‌شود که لوکوموتیو مانوری نسبت به سایر لوکوموتیوها در دسترس‌تر و نزدیک‌تر است. پس از آن به جهت مرحله‌ی اول مدیریت اختلال استفاده می‌شود ولی با توجه به این‌که استفاده از این لوکوموتیو در مرحله‌ی دوم امکانپذیر نیست، سعی می‌شود در مرحله‌ی دوم از لوکوموتیوهای دیگر که هزینه‌ی کمتری دارد استفاده شود. این موضوع در صورتی امکان پذیر است که این لوکوموتیو پس از لوکوموتیو مانوری، به قطار مسافریِ متوقف نزدیک‌تر باشد. در این حالت هزینه‌ی انتقال قطار مسافریِ متوقف برابر است با مجموع هزینه‌ی ارسال لوکوموتیو مانوری تا محل قطار مسافریِ متوقف و انتقال آن تا خط فرعی نزدیک‌ترین ایستگاه (W_1) و هزینه‌ی ارسال لوکوموتیو مسافریِ امداد تا ایستگاهی که قطار مسافری به آنجا منتقل شده است و همچنین انتقال قطار مسافری به وسیله‌ی این لوکوموتیو مسافریِ امداد تا مقصد (N_3). در این حالت مشخص است که در نهایت کار انتقال قطار مسافریِ متوقف توسط لوکوموتیو مسافریِ امداد انجام می‌شود پس زمان انتقال آن نیز برابر است با مجموع زمان انتقال لوکوموتیو مسافریِ امداد تا ایستگاهی که قطار مسافری در آن متوقف است (K_1) و بعد از آن از این ایستگاه تا مقصد (K_2). شکل ۵ به جهت روشن‌تر شدن مطالب بالا ترسیم شده است.

استفاده از هیچ کدام از انواع لوکوموتیوها در هر دو مرحله از مدیریت اختلال این حالت با در نظر گرفتن بحث تصحیح ساده برای مدل به آن اضافه شد و در واقع امکان عدم تخصیص لوکوموتیو مسافریِ امداد به یک خرابی را به مدل ریاضی اضافه می‌کند. در واقع در این حالت به هیچ کدام از مراحل مدیریت اختلال لوکوموتیو تخصیص داده نمی‌شود و عملاً سعی می‌کند در ازای یک اعمال جریمه‌ی عدم تخصیص به تابع هدف، برای برخی از خرابی‌ها هیچ تخصیص اعمال نشود. در ادامه در زمان معرفی نمادهای مدل ریاضی اشاره می‌شود که برای این قسمت بر خلاف پنج قسمت قبلی هیچ متغیر نمایشگری در نظر گرفته نمی‌شود.

۳-۲-۱- مفروضات مدل مسئله

در این تحقیق به برنامه‌ی زمان‌بندی حرکت قطارهای مسافری و باری و همچنین سابقه‌ی خرابی لوکوموتیوهای مسافری نیاز است و مدل مسئله دارای مباحث تخصیص، زمان‌بندی حرکت قطارهای باری و مسافری، مدیریت اختلال در شبکه ریلی و شبیه‌سازی است. حیطه‌ی بررسی آن کل شبکه ریلی کشور است. موارد زیر به عنوان مفروضات مدل ارائه شده در نظر گرفته می‌شود.

-با توجه به اینکه به کارگیری سایر لوکوموتیوها به جای لوکوموتیوهای مسافری باعث مختل شدن فعالیت‌های اصلی آن‌ها خواهد شد، لذا این تخصیص با در نظر گرفتن یک جریمه در تابع هدف در مدل منظور خواهد شد.

-برای ایستگاه‌های کاندید جهت استقرار لوکوموتیو مسافریِ امداد، یک مجموعه‌ی از پیش تعیین شده با نام مجموعه‌ی I در نظر گرفته می‌شود. تعریف این مجموعه به این جهت است

که تنها ایستگاه‌هایی که از نظر امکانات دارای پتانسیل کافی باشند انتخاب شوند.

-جهت سیر لوکوموتیوهای باری و مانوری و همین‌طور مسافری در این مدل در نظر گرفته نشده است.

-هزینه ایجاد امکانات برای لوکوموتیو مسافریِ امداد برای شهرهای مختلف متفاوت است.

-تعداد حداکثر لوکوموتیوهای مسافریِ امداد که می‌توانند به صورت ذخیره در ایستگاه‌های مجموعه‌ی I مستقر گردند به صورت یک پارامتر به مدل وارد می‌شود و این پارامتر با b نمایش داده می‌شود. ضمن اینکه این پارامتر پس از حل مسئله، برای مقادیر مختلف تحلیل حساسیت خواهد شد.

-فرض شده است که از لوکوموتیوهای باری می‌توان در طول ساعات شب استفاده نمود و این مورد با اعمال یک جریمه به مدل امکان پذیر می‌شود.

-فرض شده است که از لوکوموتیوهای مسافری زینمس که در لحظه‌ی بروز اختلال به قطارهای مسافری دیگر متصل است در هیچ کدام از مراحل مدیریت اختلال استفاده نمی‌شود.

-فرض می‌شود که قطار مسافری تا قبل از خرابی منجر به توقف در بلاک، هیچ گونه تأخیری نداشته است و بر طبق برنامه حرکت کرده است.

۳-۳- مدل ریاضی مسئله

مدل ریاضی این مسئله یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی سه اندیسیِ دو مرحله‌ایِ تحت تأثیر عدم قطعیت با تصحیح ساده است که در آن سعی در کمینه کردن هزینه‌های موجود است. برای تعریف این مدل، ابتدا اندیس‌های موجود در مدل تعریف می‌گردند.

-مجموعه ایستگاه‌هایی که لوکوموتیو امداد می‌تواند در آن‌ها مستقر شود. $i \in I$

-مجموعه‌ی سناریوهای موجود در مدل $s \in S$

-مجموعه‌ی خرابی‌های موجود در هر سناریو $e \in E$

متغیرهای تصادفی این مدل شامل چهار سری متغیر باینری است که سری اول مستقل از عدم قطعیت است و باقی متغیرهای این مدل تحت تأثیر عدم قطعیت است. سری اول متغیرهای تصادفی که مستقل از عدم قطعیت است و جواب اصلی مسئله به حساب می‌آیند، به این صورت تعریف می‌گردند که $X_i \in \{0,1\}$ متغیر صفر و یک برای در نظر گرفتن لوکوموتیو مسافریِ امداد برای ایستگاه i به صورت ذخیره است. این متغیرها، متغیرهای اولیه نام دارند و در اصل جواب اصلی مدل، مقادیر این متغیرها است که بیان می‌کند که در کدام یک از ایستگاه‌های مجموعه‌ی I می‌تواند لوکوموتیو مسافریِ امداد مستقر شود.

سری دوم، متغیرهای تصادفی باینریِ تحت تأثیر عدم قطعیت به تخصیص انواع لوکوموتیوهای مسافری و باری و مانوری به هر یک از دو مرحله‌ی مدیریت اختلال مربوط هستند و با نماد Z_1 و Z_2 و G_1 و G_2 و H_1 نمایش داده می‌شوند.

سری سوم، متغیرهای باینری ثانویه در این مدل مربوط است به پنج متغیر نمایشگر که هر کدام متناظر است با یکی از پنج حالت اصلی بیان شده برای ترکیب لوکوموتیوها در دو مرحله‌ی مدیریت اختلال که در قسمت مدل مفهومی ذکر گردید. این متغیرها به منظور اصلاح تابع هدف برای انتخاب درست پارامترهای هزینه‌ای و همچنین محاسبه‌ی صحیح فاصله طی شده توسط لوکوموتیوها در هر کدام از پنج حالت اصلی ترکیب لوکوموتیوها به تابع هدف مدل اضافه شده‌اند و ادامه‌ی متغیرهای ثانویه‌ی مدل هستند. این متغیرها به دلیل اینکه در صورت تابع هدف در یک متغیر باینری دیگر ضرب می‌گردند، مدل را از حالت خطی خارج کرده و به حالت برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی تبدیل می‌کنند. لازم به ذکر است که این پنج متغیر، جز مجموعه‌های ترتیبی خاص نوع اول (SOS) هستند و به عبارتی هیچ یک از دو متغیر از این متغیرها نباید هم‌زمان مقدار یک بگیرند. ضمن اینکه در هر خرابی از یک سناریو، حتماً یکی و فقط یکی از این متغیرها مقدار یک دارند و بقیه باید صفر باشند و یا اینکه در هر خرابی از یک سناریو تمامی آنها می‌توانند صفر باشند و هیچ تخصیصی صورت نگیرد. این موضوع از طریق معادلات بیان شده در مدل ریاضی که در ادامه مطرح خواهد شد تضمین می‌شود. لازم به ذکر است که برای حالت ششم ترکیب لوکوموتیوها برای مدیریت اختلال هیچ متغیر نمایشگری در نظر گرفته نمی‌شود و زمانی که هیچ گونه لوکوموتیوی در هیچ کدام از دو مرحله ی مدیریت اختلال تخصیص داده نشد، به صورت خودکار هیچ کدام از پنج متغیرهای نمایشگر دیگر هم مقدار نمی‌گیرند. این متغیرها با نماد SOS_1 و SOS_2 و SOS_3 و SOS_4 و SOS_5 نمایش داده می‌شوند.

سری چهارم متغیرهای باینریِ ثانویه مربوط است به متغیرهای حالت تصحیح ساده‌ی مدل ریاضی که مجموعاً این امکان را در مدل ریاضی فراهم می‌کنند که به برخی از خرابی‌ها در یک سناریو هیچ نوع لوکوموتیوی چه از نوع مسافریِ امداد و چه از نوع باری و مانوری در هیچ کدام از دو مرحله‌ی مدیریت اختلالِ یک خرابی تخصیص داده نشود. این متغیرها بایستی به محدودیت‌های تخصیص اضافه شوند و عدم تخصیص در این محدودیت‌ها اتفاق می‌افتد و از آنجایی که دو محدودیت برای تخصیص لوکوموتیو متناسب با دو مرحله‌ی مدیریت اختلال برای هر خرابی وجود دارد، لذا دو متغیر عدم تخصیص نیز برای هر کدام از این محدودیت‌ها تعریف می‌شود. این متغیرها با نماد SL_1 و SL_2 تعریف می‌شوند. پارامترها و مقادیر ثابت مدل نیز در جدول زیر بیان شده است.

جدول ۱. خلاصه‌ی نمادگذاری مدل ریاضی

مجموعه‌ها	
مجموعه‌ی ایستگاه‌هایی که لوکوموتیو امداد می‌تواند در آن‌ها مستقر شود.	I
مجموعه‌ی سناریوهای موجود در مدل	S
مجموعه‌ی خرابی‌های موجود در هر سناریو	E
پارامترها	
حداکثر تعداد لوکوموتیوهای مسافریِ امداد قابل دسترس برای تخصیص به ایستگاه‌های مجموعه‌ی I	b
حد بالای محدودیت حداقل زمانی (شماره ۳) که مربوط به متغیر SOS_1 است.	Upp_1
حد بالای محدودیت حداقل زمانی (شماره ٤) که مربوط به متغیر SOS_2 است.	Upp_2
حد بالای محدودیت حداقل زمانی (شماره ٥) که مربوط به متغیر SOS_3 است.	Upp_3
حد بالای محدودیت حداقل زمانی (شماره ٦) که مربوط به متغیر SOS_4 است.	Upp_4
حد بالای محدودیت حداقل زمانی (شماره ۷) که مربوط به متغیر SOS_5 است.	Upp_5
میزان جریمه برای هر بار عدم تخصیص لوکوموتیو برای هر خرابی در هر دو مرحله مدیریت اختلال	Pen
میزان هزینه‌ی مورد نیاز برای استقرار لوکوموتیو مسافریِ امداد در ایستگاه	C_i
احتمال رخداد هر سناریو در مدل	P_s
میزان هزینه به کارگیری لوکوموتیو مسافریِ امداد مستقر در ایستگاه i برای مدیریت اختلال در مرحله اول خرابی e مربوط به سناریو s	N_{1e}^{is}
میزان هزینه‌ی به کارگیری لوکوموتیو مسافریِ امداد مستقر در ایستگاه i برای مدیریت اختلال در مرحله دوم خرابی e مربوط به سناریو s زمانی که درمرحله اول نیز از همین لوکوموتیو مسافریِ اَمداد استفاده شود	N_{2e}^{is}
میزان هزینه‌ی به کارگیری لوکوموتیو مسافریِ امداد مستقر در ایستگاه i برای مدیریت اختلال در مرحله دوم خرابی e مربوط به سناریو s زمانی که در مرحله اول از دیزل مانوری و یا باری استفاده شَود	N_{3e}^{is}
میزان هزینه‌ی به کارگیری لوکوموتیو باری برای مدیریت اختلال در مرحله اول خرابی e در اطراف ایستگاه i مربوط به سناریو s	M_{1e}^{is}
میزان هزینه‌ی به کارگیری لوکوموتیو باری برای مدیریت اختلال در مرحله دوم خرابی e در اطراف ایستگاه i مربوط به سناریو s زمانی که در مرحله اول نیز از همین لوکوموتیو باری استفاده شود	M_{2e}^{is}
میزان هزینه‌ی به کارگیری لوکوموتیو باری برای مدیریت اختلال در مرحله دوم خرابی e در اطراف ایستگاه i مربوط به سناریو s زمانی که در مرحله اول از لوکوموتیو مانوری استفاده شود	M_{3e}^{is}
میزان هزینه‌ی به کارگیری لوکوموتیو مانوری برای مدیریت اختلال در مرحله اول خرابی e در اطراف ایستگاه i مربوط به سناریو s	W_{1e}^{is}
میزان زمان مورد نیاز به کارگیری لوکوموتیو مسافریِ امداد مستقر در ایستگاه i برای خرابی e در سناریو s در مرحله اول مدیریت اختلال	K_{1e}^{is}
میزان زمان مورد نیاز به کارگیری لوکوموتیو مسافریِ امداد مستقر در ایستگاه i برای خرابی e در سناریو s در مرحله دوم مدیریت اختلال	K_{2e}^{is}

$U_{1\,e}^{i\,s}$	میزان زمان مورد نیاز برای به کارگیری لوکوموتیو باری برای خرابی e در اطراف ایستگاه i در سناریو s در مرحله اول مدیریت اختلال
$U_{2\,e}^{i\,s}$	میزان زمان مورد نیاز برای به کارگیری لوکوموتیو باری برای خرابی e در اطراف ایستگاه i در سناریو s در مرحله دوم مدیریت اختلال
$U_{3\,e}^{i\,s}$	میزان زمان مورد نیاز برای به کارگیری لوکوموتیو باری برای خرابی e در اطراف ایستگاه i در سناریو s در مرحله دوم مدیریت اختلال زمانی که در مرحله‌ی اول از لوکوموتیو باری استفاده شده است که این مقدار برابر با حاصل جمع دو مقدار $U_{1\,e}^{i\,s}$ و $U_{2\,e}^{i\,s}$ است
$F_{1\,e}^{i\,s}$	میزان زمان مورد نیاز برای به کارگیری لوکوموتیو مانوری برای خرابی e در اطراف ایستگاه i در سناریو s در مرحله اول مدیریت اختلال
D_e^s	میزان زمان خسارتی شدن قطار مسافری که به علت خرابی e در سناریو s متوقف است.

ادامه جدول ۱. خلاصه‌ی نمادگذاری مدل ریاضی

متغیرها

$X_i \in \{0,1\}$	متغیر صفر و یک برای در نظر گرفتن لوکوموتیو مسافریِ امداد برای ایستگاه
$Z_{1\,e}^{i\,s} \in \{0,1\}$	متغیر صفر و یک برای استفاده از لوکوموتیو مسافریِ امداد در ایستگاه i برای خرابی e در سناریوی s در مرحله اول مدیریت اختلال
$Z_{2\,e}^{i\,s} \in \{0,1\}$	متغیر صفر و یک برای استفاده از لوکوموتیو مسافریِ امداد در ایستگاه i برای خرابی e در سناریوی s در مرحله دوم مدیریت اختلال
$G_{1\,e}^{i\,s} \in \{0,1\}$	متغیر صفر و یک برای استفاده از لوکوموتیو باری برای خرابی e در اطراف ایستگاه i در سناریوی s در مرحله اول مدیریت اختلال
$G_{2\,e}^{i\,s} \in \{0,1\}$	متغیر صفر و یک برای استفاده از لوکوموتیو باری برای خرابی e در اطراف ایستگاه i در سناریوی s در مرحله دوم مدیریت اختلال
$H_{1\,e}^{i\,s} \in \{0,1\}$	متغیر صفر و یک برای استفاده از لوکوموتیو مانوری برای خرابی e در اطراف ایستگاه i در سناریوی s در مرحله اول مدیریت اختلال
$SOS_{1\,e}^{s} \in \{0,1\}$	متغیر نمایشگرِ صفر و یک برای استفاده از لوکوموتیو مسافریِ امداد در مرحله اول و لوکوموتیو مسافریِ امداد در مرحله دوم مدیریت اختلال برای خرابی e در سناریوی s
$SOS_{2\,e}^{s} \in \{0,1\}$	متغیر نمایشگرِ صفر و یک برای استفاده از لوکوموتیو باری در مرحله اول و لوکوموتیو مسافریِ امداد در مرحله دوم مدیریت اختلال برای خرابی e در سناریوی s
$SOS_{3\,e}^{s} \in \{0,1\}$	متغیر نمایشگرِ صفر و یک برای استفاده از لوکوموتیو باری در مرحله اول و لوکوموتیو باری در مرحله دوم مدیریت اختلال برای خرابی e در سناریوی s
$SOS_{4\,e}^{s} \in \{0,1\}$	متغیر نمایشگرِ صفر و یک برای استفاده از لوکوموتیو مانوری در مرحله اول و لوکوموتیو باری در مرحله دوم مدیریت اختلال برای خرابی e در سناریوی s
$SOS_{5\,e}^{s} \in \{0,1\}$	متغیر نمایشگرِ صفر و یک برای استفاده از لوکوموتیو مانوری در مرحله اول و لوکوموتیو مسافریِ امداد در مرحله دوم مدیریت اختلال برای خرابی e در سناریوی s
$SL_{1\,e}^{s} \in \{0,1\}$	متغیر نمایشگر صفر و یک برای عدم تخصیص لوکوموتیو در مرحله اول مدیریت اختلال برای خرابی e در سناریوی s
$SL_{2\,e}^{s} \in \{0,1\}$	متغیر نمایشگر صفر و یک برای عدم تخصیص لوکوموتیو در مرحله دوم مدیریت اختلال برای خرابی e در سناریوی s

در ادامه به معرفی معادلات مدل پرداخته می‌شود. تابع هدف این مدل شامل دو ترم هزینه‌ای است که ترم اول آن مربوط به هزینه تجهیزات جهت استقرار لوکوموتیو مسافریِ امداد در ایستگاه‌های منتخب است که این قسمت از هزینه‌ها مستقل از عدم قطعیت است و تحت تاثیر آن نیست. ترم دومِ هزینه‌ی مدل مربوط به هزینه‌ی به کارگیریِ ترکیب لوکوموتیوهای موجود برای مدیریت اختلال و در صورت عدم تخصیص، اعمال جریمه به تابع هدف است که این ترم هزینه‌ای تماماً تحت تأثیر عدم قطعیت موجود در مدل است و به واسطه‌ی سناریوهای موجود تعیین می‌شود. این قسمت از مدل به دلیل ضرب شدنِ دو متغیر باینری در یکدیگر، به صورت غیرخطی است.

$$Min\ C = \sum_{i\epsilon I} C_i \times X_i \quad + \sum_{s\epsilon S}\sum_{e\epsilon E}\sum_{i\epsilon I} P_s \times \begin{pmatrix} SOS_{1e}^{s} \times \left(N_{1e}^{is} \times Z_{1e}^{is} + N_{2e}^{is} \times Z_{2e}^{is}\right) + \\ SOS_{2e}^{s} \times \left(M_{1e}^{is} \times G_{1e}^{is} + N_{3e}^{is} \times Z_{2e}^{is}\right) + \\ SOS_{3e}^{s} \times \left(M_{1e}^{is} \times G_{1e}^{is} + M_{2e}^{is} \times G_{2e}^{is}\right) + \\ SOS_{4e}^{s} \times \left(W_{1e}^{is} \times H_{1e}^{is} + M_{3e}^{is} \times G_{2e}^{is}\right) + \\ SOS_{5e}^{s} \times \left(W_{1e}^{is} \times H_{1e}^{is} + N_{3e}^{is} \times Z_{2e}^{is}\right) + \\ SL_{1e}^{s} \times Pen \end{pmatrix} \quad (۱)$$

در هر خرابی از یک سناریو از بین پنج متغیر نمایشگرِ SOSو متغیر SL_{1e}^{s} که مربوط تصحیح ساده مدل می‌شود، فقط و فقط یکی مقدار یک می‌گیرد و باقی متغیرها صفر هستند و این موضوع از طریق ده معادله‌ی بیان شده در این مدل ریاضی تضمین می‌شود. در ادامه محدودیت‌های این مدل ریاضی بیان خواهد شد. معادله شماره ۲ مربوط به متغیرهای مرحله اول است که بیان کننده حداکثر تعداد لوکوموتیوهای مسافریِ امداد قابل تخصیص در مدل است.

$$\sum_{i\epsilon I} X_i \leq b \quad (۲)$$

معادله شماره ۳ تا معادله شماره ۷ مربوط به محدودیت‌های حداقل زمانی است که هر کدام از این پنج معادله متناسب است با یکی از متغیرهای نمایشگر SOS و به طور کلی برای هر خرابی e در سناریوی s فقط و فقط یکی از این پنج معادله برقرار است و حتی در صورت عدم تخصیص، ممکن است که هیچکدام مقدار نگیرند. در واقع این معادلات بیان کننده این موضوع است که مجموع زمان های استفاده از ترکیب لوکوموتیوهای موجود باید کمتر از میزان زمان خسارتی شدن قطار برای خرابی e در اطراف ایستگاه i در سناریوی s شود. زمانی که در مدل ریاضی مقدار اولین متغیر از پنج متغیرِ نمایشگر صفر و یک SOS مساوی با یک شود، آنگاه باید محدودیت زمانی متناظر با آن برقرار باشد. این گزاره به صورت زیر بیان می‌شود.

$$SOS_{1e}^{s} = 1 \quad \rightarrow \quad \sum_{i\epsilon I} K_{1e}^{is} \times Z_{1e}^{is} + \sum_{i\epsilon I} K_{2e}^{is} \times Z_{2e}^{is} \leq D_e^s$$

عبارت بالا در واقع بیان می‌کند که اگر حالت اول از پنج حالت ترکیب لوکوموتیوها که در قسمت مدل مفهومی توضیح داده شد اتفاق بیفتد، آنگاه مقدار متغیر SOS_{1e}^{s} برابر مقدار یک می‌شود و معادله‌ی مربوط به آن فعال می‌شود. در این حالت باقی متغیرهای SOS برابر صفر خواهند بود و مقدار تابع هدف مدل تنها در سطر اول معادله شماره ۱ فعال می‌شود و باقی سطرها مساوی با صفر خواهند بود. محدودیت بیان کننده این گزاره که به صورت یک طرفه برقرار است، به شکل زیر بیان می‌شود.

$$\delta = 1 \ \rightarrow \ \sum_{j\epsilon J} a_j x_j \leq \mathrm{b} \quad \equiv \quad \sum_{j\epsilon J} a_j x_j + \mathrm{M}\delta \leq \mathrm{M} + \mathrm{b}$$

که در این رابطهM کوچک‌ترین حد بالای عبارت $\sum_{j\epsilon J} a_j x_j$ است. حال با توجه به رابطه‌ی بالا، محدودیت حداقل زمانی متناسب با متغیر SOS_{1e}^{s} به این صورت تعریف می‌شود.

$$\sum_{i\epsilon I} K_{1e}^{is} \times Z_{1e}^{is} + \sum_{i\epsilon I} K_{2e}^{is} \times Z_{2e}^{is} + Upp_1 \times SOS_{1e}^{s} \leq Upp_1 + D_e^s \qquad \forall\, s\epsilon S, e\epsilon E \quad (۳)$$

که در رابطه ی بالا Upp_1 حد بالای عبارت $\sum_{i\epsilon I} K_{1e}^{is} \times Z_{1e}^{is} + \sum_{i\epsilon I} K_{2e}^{is} \times Z_{2e}^{is}$ است. حال با توجه به منطق بالا زمانی که هر کدام از چهار متغیرِ نمایشگرِ دیگر مقدار یک گرفتند، محدودیت‌های زیر نتیجه می‌شود. زمانی که متغیر SOS_{2e}^{s} مقدار یک بگیرد، محدودیت رابطه ٤ برقرار است.

$$\sum_{i\epsilon I}\left(K_{1\,e}^{i\,s}+K_{2\,e}^{i\,s}\right)\times Z_{2\,e}^{i\,s} \;+\; Upp_2 \times SOS_{2\,e}^{s} \;\leq\; Upp_2 \;+\; D_e^s \qquad \forall\, s\epsilon S\,, e\epsilon E \tag{٤}$$

که در رابطه‌ی بالا Upp_2 حد بالای عبارت $\sum_{i\epsilon I}\left(K_{1\,e}^{i\,s}+K_{2\,e}^{i\,s}\right)\times Z_{2\,e}^{i\,s}$ است.

زمانی که متغیر $\mathrm{SOS}_3{}^{\mathrm{s}}{}_{\mathrm{e}}$ مقدار یک بگیرد، محدودیت زیر برقرار است.

$$\sum_{i\epsilon I}U_{1\,e}^{i\,s}\times G_{1\,e}^{i\,s}+\sum_{i\epsilon I}U_{3\,e}^{i\,s}\times G_{2\,e}^{i\,s}+\;Upp_3\;\times\;SOS_{3\,e}^{s} \;\leq\; Upp_3 \;+\; D_e^s \qquad \forall\, s\epsilon S\,, e\epsilon E \tag{٥}$$

که در رابطه‌ی بالا Upp_3 حد بالای عبارت $\sum_{i\epsilon I}U_{1\,e}^{i\,s}\times G_{1\,e}^{i\,s}+\sum_{i\epsilon I}U_{3\,e}^{i\,s}\times G_{2\,e}^{i\,s}$ است و $U_{3\,e}^{i\,s}$ حاصل جمع دو پارامتر $U_{1\,e}^{i\,s}$ و $U_{2\,e}^{i\,s}$ است.

زمانی که متغیر $\mathrm{SOS}_4{}^{\mathrm{s}}{}_{\mathrm{e}}$ مقدار یک بگیرد، محدودیت زیر برقرار است.

$$\sum_{i\epsilon I}\left(U_{1\,e}^{i\,s}+U_{2\,e}^{i\,s}\right)\times G_{2\,e}^{i\,s} \;+\; Upp_4 \times SOS_{4\,e}^{s} \;\leq\; Upp_4 \;+\; D_e^s \qquad \forall\, s\epsilon S\,, e\epsilon E \tag{٦}$$

که در رابطه‌ی بالا Upp_4 حد بالای عبارت $\sum_{i\epsilon I}\left(U_{1\,e}^{i\,s}+U_{2\,e}^{i\,s}\right)\times G_{2\,e}^{i\,s}$ است.

زمانی که متغیر $\mathrm{SOS}_5{}^{\mathrm{s}}{}_{\mathrm{e}}$ مقدار یک بگیرد، محدودیت زیر برقرار است.

$$\sum_{i\epsilon I}\left(K_{1\,e}^{i\,s}+K_{2\,e}^{i\,s}\right)\times Z_{2\,e}^{i\,s} \;+\; Upp_5 \times SOS_{5\,e}^{s} \;\leq\; Upp_5 \;+\; D_e^s \qquad \forall\, s\epsilon S\,, e\epsilon E \tag{٧}$$

که در رابطه‌ی بالا Upp_5 حد بالای عبارت $\sum_{i\epsilon I}\left(K_{1\,e}^{i\,s}+K_{2\,e}^{i\,s}\right)\times Z_{2\,e}^{i\,s}$ است.

معادله شماره ۸ و ۹ بیان کننده این موضوع است که در هر مرحله از مدیریت اختلال فقط و فقط یک متغیر می‌تواند مقدار بگیرد. بدین صورت که در مرحله‌ی اول از بین چهار متغیر مربوط به حمل با لوکوموتیو مسافریِ امداد و باری و مانوری و عدم تخصیص هیچ کدام از آنها، فقط و فقط یک متغیر می‌تواند مقدار بگیرد.

$$\sum_{i\epsilon I}Z_{1\,e}^{i\,s}+\sum_{i\epsilon I}G_{1\,e}^{i\,s}+\sum_{i\epsilon I}H_{1\,e}^{i\,s}+\;SL_{1\,e}^{s}=1 \qquad \forall\, s\epsilon S, e\epsilon E \tag{٨}$$

در مرحله‌ی دوم نیز از بین دو متغیر باری و مسافریِ امداد، فقط و فقط باید یک متغیر مقدار یک بگیرد.

$$\sum_{i\epsilon I}Z_{2\,e}^{i\,s}+\sum_{i\epsilon I}G_{2\,e}^{i\,s}+\;SL_{2\,e}^{s}=1 \qquad \forall\, s\epsilon S, e\epsilon E \tag{٩}$$

حالت تصحیح ساده در مسائل برنامه ریزی تصادفی که امکان عدمِ تخصیصِ لوکوموتیو به برخی از خرابی‌های یک سناریو را برای مدل فراهم می‌کند، از طریق محدودیت شماره ۸ و ۹ ایجاد می‌شود. علاوه بر این دو محدودیت، یک محدودیت دیگر هم نیاز است تا عدم تخصیص به صورت درست اعمال گردد که در زیر نشان داده می‌شود.

$$SL_{1\,e}^{s}=SL_{2\,e}^{s} \qquad \forall\, s\epsilon S, e\epsilon E \tag{١٠}$$

معادله شماره ۱۰ بیان می‌کند که هرگاه در یکی از دو مرحله‌ی مدیریت اختلال عدمِ تخصیصِ لوکوموتیو اتفاق بیوفتد، در مرحله‌ی دیگر نیز این موضوع صادق باشد و در کل عدم تخصیص در هر دو مرحله اتفاق بیوفتد. معادله شماره ۱۱ بیان کننده این مطلب است که اگر در مرحله اول مدیریت اختلال از خرابی e در اطراف ایستگاه i از لوکوموتیو مسافریِ امداد استفاده شود، در مرحله دومِ مدیریت اختلال نیز بایستی حتماً از همان لوکوموتیو مسافریِ امداد استفاده شود.

$$Z_{1e}^{is} \le Z_{2e}^{is} \qquad \forall\, i\epsilon I, s\epsilon S, e\epsilon E \qquad (۱۱)$$

معادله شماره ۱۲ به جهت جلوگیری از بعضی حالات غیر واقعی به مدل اضافه شده است. دقت شود که این محدودیت الزاماً دربردارنده‌ی محدودیت شماره ۱۱ نیست. نکته‌ی جالب در مورد این محدودیت این است که جواب مدل در عدم حضور این محدودیت متفاوت نخواهد شد و به عبارتی یک محدودیت زائد است ولی در حضور این محدودیت، مدل عملکرد بهتری را از نظر زمان حل و میزان درگیری حافظه ارائه می‌دهد و به نوعی از پیچیدگی مدل می‌کاهد.

$$\sum_{i\epsilon I} Z_{1e}^{is} \le \sum_{i\epsilon I} Z_{2e}^{is} \qquad \forall\, s\epsilon S, e\epsilon E \qquad (۱۲)$$

در این قسمت محدودیت‌های ارتباط متغیرهای مرحله اول به متغیرهای مرحله دوم بیان شده است. معادله شماره ۱۳ و ۱۴ بیان می‌کند که حتی اگر فقط در یک خرابی e و در سناریو s برای مدیریت اختلال ناشی از توقف قطار از یک لوکوموتیو مسافریِ امداد مستقر در ایستگاه i استفاده شود، آنگاه حتماً بایستی قبلاً این لوکوموتیو به ایستگاه i تخصیص داده شود.

$$\sum_{e\epsilon E}\sum_{s\epsilon S} Z_{1e}^{is} \le S\, E\, X_i \qquad \forall\, i\epsilon I \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{e\epsilon E}\sum_{s\epsilon S} Z_{2e}^{is} \le S\, E\, X_i \qquad \forall\, i\epsilon I \qquad (۱۴)$$

که در معادلات بالا منظور از S و E به ترتیب اندازه‌ی مجموعه‌های s و e است که در متغیر X_i ضرب می‌شود. در ادامه ده معادله‌ی مربوط به تضمین صفر بودنِ هم‌زمان چهار متغیر از پنج متغیر نمایشگرِ SOS و هم‌زمان مقدار گرفتن یکی از آن‌ها بیان می‌شود. مجموعه‌ی این ده محدودیت برای انتخاب درست پارامترهای هزینه‌ای تابع هدف که در متغیرهای مربوطه ضرب می‌شوند استفاده می‌شود و برای جواب نهایی مدل کاملاً ضروری هستند. به گونه‌ای که در نبود این محدودیت‌ها، هزینه‌ها به درستی محاسبه نمی‌شود. مبنای این محدودیت‌ها گزاره‌ی زیر است که به صورت رفت و برگشتی برقرار است. فرض می‌شود که Z_1 و Z_2 و δ سه متغیر باینری هستند که نیاز است برای آن‌ها رابطه‌ی زیر برقرار باشد.

$$Z_1 \times Z_2 = 1 \quad \rightarrow \quad \delta = 1$$

برای برقراری رابطه‌ی بالا نیاز است معادله‌ی زیر برقرار باشد. دقت شود که خلف این رابطه نیز برقرار است و رابطه معتبر است.

$$Z_1 + Z_2 - \delta \le 1$$

و اگر نیاز باشد که رابطه در حالت معکوس برقرار باشد، باید معادله‌ی دیگری برقرار باشد.

$$Z_1 \times Z_2 = 1 \leftarrow \delta = 1 \qquad \equiv \qquad Z_1 + Z_2 \ge 2 \times \delta$$

که خلف این رابطه نیز برقرار است و رابطه معتبر است و اینکه رابطه دوم، تضمین صفر بودن δ در هر کدام از سه حالتی‌که مقدار Z_2 و Z_1 هر دو هم‌زمان برابر با عدد یک نبود را بر عهده دارد. حال بر اساس دو رابطه‌ی بالا محدودیت‌های جدید به صورت زیر به مدل افزوده می‌شود.

$$\sum_{i\epsilon I} Z_{1e}^{is} + \sum_{i\epsilon I} Z_{2e}^{is} - SOS_{1e}^{s} \leq 1 \qquad \forall s\epsilon S, e\epsilon E \qquad (۱۵)$$

معادله شماره ۱۵ بیان می‌کند که اگر برای خرابی e در سناریو s در مرحله‌ی اول و دوم مدیریت اختلال از لوکوموتیو مسافری امداد استفاده شود، آنگاه متغیر نمایشگر مربوط به آن‌ها حتماً برابر با یک می‌شود و همین‌طور به دلیل اینکه نیاز است تا عکس این رابطه نیز برقرار باشد، آنگاه رابطه‌ی زیر نیز برقرار است.

$$\sum_{i\epsilon I} Z_{1e}^{is} + \sum_{i\epsilon I} Z_{2e}^{is} \geq 2 \times SOS_{1e}^{s} \qquad \forall s\epsilon S, e\epsilon E \qquad (۱۶)$$

برقراری معادله شماره ۱۶ و ۱۵ باعث می‌شود که متغیر نمایشگر مربوط به این قسمت که همان $SOS_1^s{}_e$ است برابر با یک شود و درنتیجه ترم هزینه‌ی مربوط به آن در تابع هدف فعال شود و به محاسبه‌ی هزینه‌ها بپردازد. حال به دلیل اینکه نیاز است تا هم‌زمان تنها یکی از متغیرهای نمایشگر مساوی یک گردند، لذا ۸ معادله دیگر نیز به مدل اضافه می‌شود تا مفهوم مورد نظر تکمیل شود و برای هر خرابی e در هر سناریو s تنها یک متغیر نمایشگر فعال باشد و مقدار یک داشته باشد. این معادلات به صورت زیر هستند.

$$\sum_{i\epsilon I} G_{1e}^{is} + \sum_{i\epsilon I} Z_{2e}^{is} - SOS_{2e}^{s} \leq 1 \qquad \forall s\epsilon S, e\epsilon E \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{i\epsilon I} G_{1e}^{is} + \sum_{i\epsilon I} Z_{2e}^{is} \geq 2 \times SOS_{2e}^{s} \qquad \forall s\epsilon S, e\epsilon E \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{i\epsilon I} G_{1e}^{is} + \sum_{i\epsilon I} G_{2e}^{is} - SOS_{3e}^{s} \leq 1 \qquad \forall s\epsilon S, e\epsilon E \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{i\epsilon I} G_{1e}^{is} + \sum_{i\epsilon I} G_{2e}^{is} \geq 2 \times SOS_{3e}^{s} \qquad \forall s\epsilon S, e\epsilon E \qquad (۲۰)$$

$$\sum_{i\epsilon I} H_{1e}^{is} + \sum_{i\epsilon I} G_{2e}^{is} - SOS_{4e}^{s} \leq 1 \qquad \forall s\epsilon S, e\epsilon E \qquad (۲۱)$$

$$\sum_{i\epsilon I} H_{1e}^{is} + \sum_{i\epsilon I} G_{2e}^{is} \geq 2 \times SOS_{4e}^{s} \qquad \forall s\epsilon S, e\epsilon E \qquad (۲۲)$$

$$\sum_{i\epsilon I} H_{1e}^{is} + \sum_{i\epsilon I} Z_{2e}^{is} - SOS_{5e}^{s} \leq 1 \qquad \forall s\epsilon S, e\epsilon E \qquad (۲۳)$$

$$\sum_{i\epsilon I} H_{1e}^{is} + \sum_{i\epsilon I} Z_{2e}^{is} \geq 2 \times SOS_{5e}^{s} \qquad \forall s\epsilon S, e\epsilon E \qquad (۲۴)$$

مدل ریاضی ارائه شده در قسمت قبل در تابع هدف به دلیل ضرب متغیرهای باینری در یکدیگر، خطی نیست. به گونه‌ای که متغیرهای باینری SOS با دو متغیر باینری دیگر ضرب شده‌اند و در مجموع ۱۰ عبارتِ حاصل ضربِ دو متغیر باینری ایجاد شده است. از آنجایی که مدل ریاضی خطی نیست، لذا نمی‌توان از بهینه‌ساز CPLEX برای حل مسائل عدد صحیح استفاده کرد و با توجه به این‌که بهینه‌سازهای دیگر برای این نوع مسائل کارا نیستند و جواب‌های دقیقی را ارائه نمی‌دهند، لذا نیاز است تا مدل خطی سازی شود. خطی سازی مدل در اینجا بیان نمی‌شود و در صورت نیاز به این قسمت می‌توان به پایان نامه‌ای که این مقاله از آن استخراج شده است مراجعه شود. (Karimi, Zegordi, 2022)

۳-۳-۱- بدست آوردن سناریوهای خرابی

همان‌طور که در قسمت قبل توضیح داده شد مدل ریاضی به کار رفته در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی تصادفی سناریو محور است که اساس کار محاسبات آن، سناریوهایی است که در اختیار آن قرار داده می‌شود. اندیس S به کار رفته در پارامترها و متغیرهای آن بیان کننده این مطلب است. از سوی دیگر سناریوهای به کار رفته در این مدل‌سازی، سناریوهای خرابی محورِ زمان محور هستند. اساس این سناریوها بر گزارش خرابی‌های لوکوموتیوهایی است که نیازمند امداد تشخیص داده شده‌اند و این خرابی‌ها به ترتیب زمانی رخداد در یک سناریو قرار گرفته‌اند. تعداد خرابی‌های گنجانده شده در هر سناریو به گونه‌ای انتخاب شده است که بتوان با استفاده‌ی معمول و متوسط از منابع در دسترس جوابگوی سرویس دهی به آن‌ها بود. در واقع هر سناریو خرابی در نظر گرفته شده در این تحقیق، ۱۰ خرابی لوکوموتیو نیازمند امدادی بوده‌اند که در کل شبکه ریلی به ترتیب اتفاق افتاده‌اند. خرابی‌های لوکوموتیو از لحاظ زمانی مستقل از یکدیگر اتفاق می‌افتند. علاوه بر این موضوع، در داده‌های ارائه شده از سوی شرکت راه‌آهن مشاهده می‌شود که خرابی‌ها با فاصله‌ی زمانی کافی از یکدیگر اتفاق افتاده‌اند و در صورتی که در حوالی یک ایستگاه خاص دو خرابی لوکوموتیو پشت سر هم اتفاق بیفتد و فرضاً یک لوکوموتیو مسافری در آن ایستگاه مستقر باشد، آنگاه این لوکوموتیو می‌تواند هر دو خرابی لوکوموتیو رخ داده در اطراف آن ایستگاه را سرویس‌دهی کند. به طور کلی دو نوع داده‌ی ورودی به مدل ریاضی تعریف شده است. داده‌های مستقل از سناریوها و داده‌های وابسته به سناریوها. داده‌های مستقل از سناریوها از پیچیدگی خاصی برخوردار نیستند و جمع آوری آن‌ها نیز به سهولت انجام می‌پذیرد. در مقابل داده‌های وابسته به سناریوها که با تغییر سناریوها تغییر می‌کند، به نسبت پیچیده‌تر هستند و در اینجا نیاز است تا ساختار کلی آن‌ها توضیح داده شود. همان‌طور که اشاره شد هر سناریو از ۱۰ خرابی لوکوموتیو مسافری در تاریخ‌های مختلف تشکیل شده است. برای هر کدام از این ۱۰ خرابی باید اطلاعات مسافت محل خرابیِ قطار مسافری تا هر یک از لوکوموتیوهایی که در زمان خرابی در اطراف آن وجود داشتند به همراه سایر داده‌های ورودی محاسبه شود. در مجموع در هر سناریو تعداد ۱٤ ماتریس محاسبه خواهد شد که ۷ ماتریس مربوط به ضرایب فواصل بر حسب دقیقه در محدودیت‌های حداکثر زمانی هستند و ۷ ماتریس دیگر نیز مربوط به ضرایب هزینه‌ای در تابع هدف مدل هستند. ماتریس‌های مربوط به تابع هدف به راحتی با استفاده از ماتریس‌های محدودیت‌های حداکثر زمانی به دست می‌آید و معمولاً مضربی از این ماتریس‌ها هستند و تنها نیاز است تا ماتریس‌های محدودیت‌های حداکثر زمانی محاسبه شود. در میان این ۷ ماتریس، ٤ ماتریس مربوط است به فواصل لوکوموتیوها تا محل خرابی قطار مسافری، ۳ ماتریس مربوط است به فاصله قطار مسافری تا مقصد و ۱ ماتریس نیز مربوط است به حد بالای میزان تأخیر قابل قبول برای هر قطار مسافری که در اینجا داده‌های مربوط به یکی از این ماتریس‌ها در ادامه نمایش داده می‌شود. این ماتریس مربوط است به میزان فاصله‌ی لوکوموتیو مسافریِ امداد تا قطار مسافری متوقف در سناریوی اول که این مقادیر به صورت تک به تک برای هر خرابی محاسبه شده است. سطر اول این ماتریس مربوط است به ایستگاه‌های مبدأ که از طریق آنها خرابی لوکومومتیو قطار مسافری گزارش شده است. در واقع خرابی لوکوموتیو در اطراف این ایستگاه‌ها اتفاق افتاده است. تعداد این ایستگاه‌ها ۱۰ عدد است. ستون اول نیز همان ایستگاه‌های کاندید جهت استقرار لوکوموتیو مسافریِ امداد یا مقادیر مجموعه I است و تعداد این ایستگاه‌ها ۳۲ عدد است.

جدول ۲. اطلاعات میزان فاصله‌ی لوکوموتیو مسافریِ امداد تا خرابی در سناریوی شماره ۱ (برحسب دقیقه)

سناریوی ۱		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		شهبازان	میاندره	فریمان	اندیمشک	ابریشم	سیاه باغ	گرمسار	بی سیم	پل دختر	ورتون
1	garmsar	739	100	530	823	312	249	0	475	460	494
2	maraghe	1251	787	1217	1335	999	438	687	987	227	1006
3	zanjan	904	440	870	988	652	91	340	640	120	659
4	miyane	1016	552	982	1100	764	203	452	752	8	771
5	ghom	532	312	742	616	524	301	212	338	512	357
6	arak	384	460	890	468	672	449	360	484	660	503
7	tange7	64	780	1210	148	992	769	680	804	980	823
8	dorud	194	650	1080	278	862	639	550	674	850	693
9	andimeshk	84	928	1358	0	1140	917	828	952	1128	971
10	ahwaz	226	1070	1500	142	1282	1059	970	1094	1270	1113
11	kashan	712	360	790	796	572	349	260	220	560	239
12	sistan	982	630	1060	1066	842	619	530	349	830	31
13	yazd	1007	684	1085	1091	867	644	555	75	855	379
14	bafgh	1162	810	1240	1246	1022	799	710	230	1010	535
15	ardakan	927	612	1005	1011	787	564	475	9	775	314
16	jandagh	1107	755	620	1191	838	744	1150	189	955	494
17	zarand	1362	985	950	1446	1168	974	1480	430	1185	735
18	sirjan	1406	1054	990	1490	1208	1043	1520	474	1254	779
19	tabas	1297	870	430	1381	648	1209	960	379	1420	684
20	torbateheydar	1479	645	205	1563	423	984	735	604	1195	909
21	bajestan	1569	735	295	1653	513	1074	825	514	1285	819
22	neghab	1114	270	160	1198	58	619	370	969	830	1274
23	fulad	1204	360	70	1288	148	709	460	879	920	1184
24	neyshabour	1214	370	60	1298	158	719	470	869	930	1174
25	kashmar	1247	403	27	1331	191	752	503	836	963	1141
26	azadvar	1084	240	190	1168	28	589	340	999	800	1304
27	semnan	809	25	465	893	247	314	65	1274	525	1579
28	damghan	915	71	359	999	141	420	171	1168	631	1473
29	shahroud	964	120	310	1048	92	469	220	1119	680	1424
30	firuzkuh	904	340	770	988	552	409	240	640	620	659
31	sari	1134	570	1000	1218	782	639	470	870	850	889
32	ghazvin	771	307	737	855	519	42	207	507	253	526

٤-حل مدل ریاضی و تحلیل نتایج

برای حل مدل از نرم‌افزار گمز استفاده شده است. در این بخش ابتدا با استفاده از بهینه‌ساز CPLEX، به تصدیق مدل ریاضی برنامه‌ریزی تصادفی پرداخته می‌شود و سپس جواب مدل با تمامی سناریوهای موجود بدست می‌اید. در ادامه نشان داده خواهد شد که از یک تعداد سناریو به بالا، بهینه‌ساز CPLEX دیگر توانایی حل مدل را نخواهد داشت و الزاماً باید الگوریتم‌ها و روش‌های حل دیگری توسعه داده شود. در انتهای بخش نیز شاخص‌های مربوط به اندازه‌گیری عملکرد مدل برنامه‌ریزی تصادفی مسئله بیان و محاسبه خواهد شد.

٤-١- تصدیق مدل ریاضی مسئله

برای تصدیق مدل و مشخص کردن این موضوع که آیا مدل به درستی کار می‌کند، از اطلاعات اولین سناریوی به دست آمده از داده‌های شرکت راه‌آهن استفاده شده است. بدین صورت که اولین سناریو دارای ۱۰ خرابی لوکوموتیو در نواحی مختلف است و با هزینه‌های معرفی شده به مدل معین مسئله، جواب این تک سناریو به دست می‌آید. حال جواب این تک سناریو که از مدل معین به دست آمده است با جواب مدل تصادفی مسئله که دارای ۵ سناریو است که ٤ سناریوی آن با شبیه‌سازی سناریو اول به دست آمده است مقایسه می‌شود. حال جواب اولیه‌ی مسئله‌ی معین با اطلاعات اولین سناریو به صورت ایستگاه‌های میانه، اندیمشک، اردکان، نغاب و سمنان است. مشخص است که مدل معین، ایستگاه‌های بالا را به عنوان جواب اصلی مدل جهت استقرار لوکوموتیو مسافریِ امداد انتخاب کرده است. در دو جدول شماره ۳ و ٤ اطلاعات سناریوی اول به همراه جواب‌های ثانویه‌ی مدل معین برای اولین و دومین مرحله مدیریت اختلال دیده می‌شود. محور افقی، بیان کننده ایستگاه‌هایی است که خرابی لوکوموتیو قطارهای مسافری در اطراف آنها گزارش شده است. ایستگاه‌های مبدأ که رنگ سلولشان در جدول یکی است، در یک محور قرار دارند. برای مثال ایستگاه‌های میاندره، فریمان، ابریشم و گرمسار همگی در محور خراسان قرار دارند. محور عمودی شامل ایستگاه‌هایی است که انواع لوکوموتیوهای امداد از اطراف آنها فرستاده می‌شوند. جواب‌های ثانویه‌ی مدل معین مسئله برای مرحله‌ی اول مدیریت اختلال که شامل متغیرهای

Z_1و G_1 است برای اولین سناریو در جدول شماره ۳ مشخص شده است. مقادیر Z_1 بیان کننده‌ی این است که در اولین مرحله‌ی مدیریت اختلال از لوکوموتیو مسافریِ امداد مستقر در ایستگاه مربوطه استفاده شده است و مقادیر G_1 نیز بیان کننده این است که در اولین مرحله‌ی مدیریت اختلال از لوکوموتیو باری اطراف ایستگاه مربوطه استفاده شده است. لوکوموتیوهای مسافریِ امداد که از ایستگاه‌های میانه، اندیمشک، نغاب، اردکان و سمنان فرستاده می‌شوند و همچنین لوکوموتیو باری که از اطراف ایستگاه سیستان برای خرابی اتفاق افتاده در اطراف ایستگاه ورتون ارسال می‌شود، جواب‌های ثانویه‌ی مدل هستند. برای مثال برای خرابی دوم که ایستگاه میاندره به عنوان ایستگاه مبدأ آن بیان شده است، از لوکوموتیو مسافریِ امداد مستقر در ایستگاه سمنان استفاده شده است و مقدار Z_1 برای سمنان تعیین شده است و همین‌طور برای خرابی دهم که ایستگاه ورتون به عنوان ایستگاه مبدأ آن ذکر شده است، از لوکوموتیو باری که در اطراف ایستگاه سیستان در حرکت بوده است استفاده شده است و مقدار G_1 برای سیستان معین گشته است.

جدول ۳. جواب متغیرهای ثانویه برای مرحله‌ی اول مدیریت اختلال در سناریوی اول

S1	شهبازان	میاندره	فریمان	اندیمشک	ابریشم	سیاه باغ	گرمسار	بی سیم	پل دختر	ورتون
Miyane						Z_1			Z_1	
Andimeshk	Z_1			Z_1						
Neghab			Z_1		Z_1					
Ardakan								Z_1		
Semnan		Z_1					Z_1			
Sistan										G_1

جدول ٤. جواب متغیرهای ثانویه برای مرحله‌ی دوم مدیریت اختلال در سناریوی اول

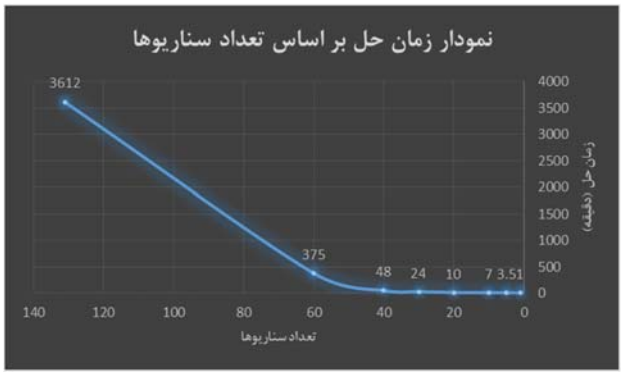
S1	شهبازان	میاندره	فریمان	اندیمشک	ابریشم	سیاه باغ	گرمسار	بی سیم	پل دختر	ورتون
Miyane						Z_2			Z_2	
Andimeshk	Z_2			Z_2						
Neghab			Z_2		Z_2					
Ardakan								Z_2		
Semnan		Z_2					Z_2			
Sistan										G_2

جواب مدل معین مسئله برای مرحله‌ی دوم مدیریت اختلال در جدول شماره ٤ بیان شده است. مقادیر Z_2 بیان کننده‌ی این است که در دومین مرحله از مدیریت اختلال از لوکوموتیو مسافریِ امداد مستقر در ایستگاه مربوطه استفاده شده است و مقادیر G_2 نیز بیان کننده‌ی این مطلب است که در دومین مرحله از مدیریت اختلال از لوکوموتیو باری اطراف ایستگاه ذکر شده استفاده شده است. مقدار تابع هدف مسئله برابر با ۷۵،۵۱۱،۰۱۷ واحد پولی است. حال در ادامه جواب مدل تصادفی مسئله برای ۵ سناریو که ٤ سناریوی آن از طریق شبیه‌سازیِ سناریوی اول به دست آمده‌اند با جواب مدل معین ذکر شده در بالا مقایسه می‌گردند. در واقع از جواب مدل معین به عنوان یک جواب بدیهی استفاده می‌شود و سعی می‌شود جواب مدل تصادفی با این جواب مقایسه شود. حال جواب مدل تصادفی ایستگاه‌های زنجان، اندیمشک، اردکان، نغاب و سمنان است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در جواب اولیه‌ی مدل تصادفی نیز از ۵ ایستگاه استفاده شده است و اینکه این جواب تنها در یک ایستگاه با جواب اولیه مدل معین متفاوت است و آن‌هم ایستگاه زنجان در جواب مدل تصادفی و ایستگاه میانه در مدل معین است که البته این ایستگاه‌ها از نظر جغرافیایی به یکدیگر نزدیک هستند و مشخص است که دو جواب تفاوت چندانی ندارند. مقدار تابع هدف مدل تصادفی

برابر با ۷۵،۰۸٤،٦۱۷ واحد پولی است که البته از مقدار تابع هدف مدل معین کمتر است. متغیرهای ثانویه مدل تصادفی در اینجا به دلیل گسترده بودن تعداد سناریوها ذکر نمی‌شود. در نهایت مشخص است که جواب مدل تصادفی با جواب مدل معین تفاوت اندکی دارد و با افزایش تعداد سناریوها، این جواب به سمت جواب مدل معین همگرا می‌شود و این موضوع عملکرد مدل تصادفی را تضمین می‌کند. در ادامه این بخش، تعداد سناریوها افزایش می‌یابد و مسئله با تمامی سناریوهای تعریف شده (۱۳۱ سناریو) توسط بهینه‌ساز CPLEX در نرم‌افزار گمز حل می‌شود. نکته‌ای که باید در این قسمت به آن پرداخت این است که با اضافه نمودن متغیرهای حالت تصحیح ساده به مدل ریاضی، دیگر نیازی نیست تا سناریوهایی که در یک مسئله‌ی تصادفی به کار می‌روند به صورت منفرد و در حالت معین امکان پذیر باشند. مسئله‌ی برنامه‌ریزی تصادفی با افزایش تعداد سناریوها توسط نرم‌افزار گمز حل خواهد شد و به مرور زمان تعداد سناریوها افزایش می‌یابد. جدول ۵ میزان زمان حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی تصادفی را با افزایش تعداد سناریوها نمایش می‌دهد.

جدول ۵. مدت زمان اجرای کد در بهینه‌ساز CPLEX

تعداد سناریوها	مدت زمان اجرای کد (دقیقه و ثانیه)
۱	٤۵ ثانیه
۵	۰۰:۰۳:۰۰
۱۰	۰۰:۰٦:۰۰
۲۰	۰۰:۱۰:۰۰
۳۰	۰۰:۲٤:۰۰
٤۰	۰۰:٤۸:۲۰
٦۰	۰٦:۱۵:۳۷
۱۳۱	٦۰:۱۲:۳۰

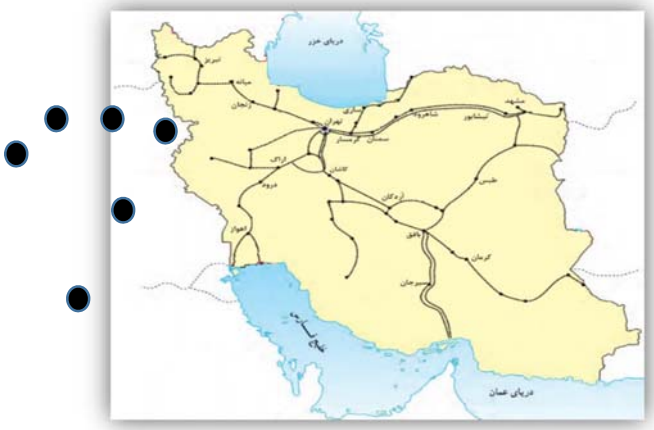


شکل ٦. نمودار زمان حل مدل بر اساس تعداد سناریوهای مدل

با توجه به جدول بالا مشخص است که هر چه تعداد سناریوها بیشتر می‌شود، زمان حل مدل افزایش می‌یابد. مدل با ۵ سناریو در ۳ دقیقه حل شده است و با افزایش تعداد سناریوها به عدد ۱۳۱، زمان حل به ٦۰ ساعت و ۱۲ دقیقه رسیده است. نمودار زیر روند افزایش زمان حل با افزایش تعداد سناریو را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است زمان حل با افزایش تعداد سناریوها به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد و رشد آن به صورت نمایی است. در واقع شیب خط مماس بر نمودار در طول محور افقی ثابت نیست و با افزایش تعداد سناریوها، شیب خط مماس هم افزایش می‌یابد. این موضوع مشخص می‌کند که زمان اجرای کد مدل ریاضی به منظور حل آن با اندازه‌ی اطلاعات ورودی به مسئله رابطه‌ای به صورت چند جمله‌ای

ندارد و در واقع حل نشدنی در زمان چند جمله‌ای بر حسب ورودی مسئله است. در این مدل نیز مشخص است که رابطه‌ی زمان حل با تعداد سناریوها به صورت چند جمله‌ای نیست و به صورت نمایی است. در واقع می‌توان بیان نمود که مدل ارائه شده در این تحقیق یک مسئله‌ی NP-hard است. حال سؤال مطرح شده در اینجا این است که آیا می‌شود زمان حل مدل را با بهبودهای بیشتر، به حالت چند جمله‌ای رساند؟ که برای پاسخ به این سؤال نیز لازم است که قید شود که این مسئله به نوعی یک مسئله‌ی تخصیص نامتوازن به شمار می‌آید که در هر سناریو دارای ۱۰ وظیفه و ٤ خدمت دهنده است و اثبات شده است که مسائل تخصیص نیز NP-hard هستند. پس در نتیجه رسیدن به زمان حلی که رابطه از نوع نمایی با ورودی مسئله دارد نیز می‌تواند اثبات کند که مدل ریاضی نگاشته شده برای این مسئله از کیفیت کافی در حل برخوردار است. جواب مدل برای ایستگاه‌هایی که لوکوموتیو مسافریِ امداد در آن‌ها مستقر می‌شود برای تمامی ۱۳۱ سناریو شامل ایستگاه‌های گرمسار، مراغه، سیستان، آباده، سیرجان و نغاب است. مقدار تابع هدف گزارش شده ۲٤۳،۰۲۲،٦۲٦ واحد پولی است. اگر جواب ارائه شده توسط مدل با جواب مدل معین سناریوی اول مقایسه شود، مشخص می‌شود که مدل با سناریوها مختلف جواب‌ها متفاوتی را ارائه می‌دهد و این بدین معنا است که مدل برای همگرا شدن به یک جواب مناسب باید اطلاعات تعداد بسیار بالایی از سناریوها را بررسی و این بهینه‌ساز توانسته است که با امکانات محاسباتی معقول به جواب قابل قبولی دست یابد. نکته‌ای که در اینجا بایستی بدان اشاره نمود تفاوت جواب مدل ریاضی با استقرار فعلی لوکوموتیوهای مسافری امداد و مورد استفاده در راه آهن است. در شکل‌های زیر هر کدام از این دو استقرار نشان داده می‌شود.

شکل ۷. جواب مدل ریاضی



شکل ۸. استقرار فعلی مورد استفاده در شبکه راه آهن

با توجه به اینکه رویکرد نگارش مدل ریاضی، بهره‌وری و کاهش میانگین هزینه‌های عملیاتی لوکوموتیوها و استفاده‌ی حداکثری از تمام منابع موجود بوده است، باید نشان داد که کدام یک از دو استقرار بالا از لحاظ بحث بهره‌وری بهتر عمل کرده است. برای این منظور به مقایسه‌ی هزینه‌های منتج شده از هر کدام از این دو مدل پرداخته می‌شود. هزینه‌ی عملیاتی استفاده از لوکوموتیوها که در واقع جواب بهینه مدل است قبلاً محاسبه شده است و برابر با مقدار ۲۴۳،۰۲۲،۶۲۶ واحد پولی است. برای بررسی اینکه استقرار فعلی لوکوموتیوهای مسافری امداد در شبکه ریلی تا چه میزانی بهره‌ور است نیز باید این استقرار را به صورت ثابت در مدل ریاضی مسئله تحقیق برای تمامی ۱۳۱ سناریو قرار داد و میزان هزینه‌ی آن را بدست آورد که این هزینه برابر با ۳۳۴،۷۶۶،۴۸۹ واحد پولی است. میزان تفاوت این مقدار با مقدار بهینه تابع هدف مشخص کننده بهره‌ور نبودن استقرار فعلی مورد استفاده است. همانطور که مشاهده می‌شود در جواب خروجی مدل ریاضی سعی شده است تا به گونه‌ای تمام شبکه ریلی تحت پوشش قرار گیرد و از متمرکز شدن حول یک شهر یا ایستگاه خاص جلوگیری شده است در حالیکه در استقرار فعلی لوکوموتیوهای مسافریِ امداد که هم اکنون در شبکه ریلی استفاده می‌شود یک تمرکزی حول شهر مشهد وجود دارد و به نوعی این ایستگاه نسبت به سایر ایستگاه‌های شبکه ریلی در اولویت بالاتری قرار گرفته است. حال سوالی که مطرح می‌گردد این است که دلیل این تفاوت بسیار زیاد در این دو استقرار چیست؟ جواب این سوال را می‌توان در رویکردی که هر کدام از این دو استقرار بر پایه‌ی آنها شکل گرفته است جستجو کرد. همان طور که قبلتر اشاره شد مدل ریاضی بر مبنای کمینه کردن میانگین هزینه‌ها نگاشته شده است و سعی کرده است تا به گونه‌ای یک حالت متعادل برای تمامی سناریوها ایجاد کند. در واقع رویکر مدل ریاضی این تحقیق رویکرد ریسک خنثی است که در آن به بحث ایجاد میانگینی بین هزینه‌های عملیات لوکوموتیوها پرداخته است و به نوعی بحث بهره‌وری را مد نظر قرار داده است. در حالیکه بررسی استقرار فعلی لوکوموتیوهای مسافری امداد در شبکه‌ریلی نشان می‌دهد که به جای کمینه کردن میانگین هزینه‌های عملیاتی لوکوموتیوها، سعی شده است تا تاخیرات قطارهای مسافری از یک میزانی بیشتر نشود و به نوعی تاخیرات قطارهای مسافری مقدم بر هزینه‌ها در نظر گرفته شده است. در واقع سعی شده است تا واریانس تاخیرات قطارهای مسافری کمینه گردد که این موضوع دلالت بر رویکرد ریسک گریزی دارد و شاید بتوان مبحث تاب‌آوری را در این رویکرد پر رنگتر دید. به نوعی تفاوت در رویکرد و نگاه به مسئله‌ی اختلال ناشی از خرابی قطارهای مسافری در طول مسیر و متعاقباً تفاوت در اولویت‌های این دو رویکرد باعث تفاوت در این دو استقرار شده است.

۴-۲-بررسی شاخص‌های EVPI و VSS

معمولاً پس از حل هر مسئله‌ی برنامه‌ریزی تصادفی، شاخص‌های EVPI و VSS مربوط به آن مسئله نیز بررسی می‌شود تا اطلاعات دیگری در مورد آن به دست آید. تعریف شاخص EVPI یا مقدار مورد انتظار ارزش اطلاعات کامل، حداکثر مقداری است که برنامه‌ریز حاضر به پرداخت آن است تا به اطلاعات کامل و دقیق در مورد آینده دست یابد. فرمول محاسبه‌ی آن نیز به صورت زیر است.

$$EVPI = RP - WS \qquad (۲۵)$$

در فرمول بالا مقدار RP همان مقدار تابع هدف مسئله‌ی تصادفی است که با حل کردن مدل تصادفی با تمامی سناریوها به دست می‌آید و مقدار WS نیز مقدار انتظار تا مشاهده است. شاخص VSS یا ارزش جواب تصادفی، همان ارزش حل کردن مدل برنامه‌ریزی تصادفی است. در واقع اینکه چه مقدار برنامه‌ریز ناشی از استفاده از مدل برنامه‌ریزی تصادفی سود کرده است. فرمول محاسبه‌ی این شاخص به صورت زیر است.

$$VSS = EEV - RP \qquad (۲۶)$$

برای به دست آوردن مقدار EEV باید ابتداً مقدار EVS یا جواب مقدار متوسط را به دست آورد که برای این کار نیز باید در مسئله‌ی حالت قطعیِ مدل مسئله، سناریو میانگین را قرار داد و جواب مرحله‌ی اول آن را به عنوان جواب مقدار متوسط در نظر گرفت. در این قسمت با روشی که در ادامه ذکر می‌شود سناریوی میانگین به دست می‌آید و سپس در مدل قطعی مسئله قرار داده می‌شود و جواب مقدار متوسط به دست می‌آید. هر دو شاخص EVPI و VSS غیر منفی هستند و در اغلب مسائل برنامه‌ریزی تصادفی، تمرکز بر روی مسائلی است که مقادیر بالایی از این شاخص‌ها را داشته باشند. برای شاخص EVPI محاسبات به این صورت انجام می‌گیرد که پس از حل نمودن مسئله‌ی معین به تعداد ۱۳۱ بار برای هر سناریو و معدل گیری بر روی مقادیر تابع هدف به دست آمده، مقدار WS برابر با

۱۵۳،۲٤۷،۲۳۹ واحد پولی است. مقدار RP نیز که از طریق حل مستقیم مدل معادل قطعی برای ۱۳۱ سناریو به دست آمد برابر است با ۲٤۳،۰۲۲،٦۲٦ واحد پولی که تفاوت این دو مقدار برابر است با ۸۹،۷۷۵،۳۸۷ واحد پولی که حدوداً ۳٦ درصدِ جواب مدل تصادفی (RP) است که مشخصاً مقدار بزرگی به حساب می‌آید. در زیر این مقادیر نمایش داده شده است.

EVPI = RP – WS

(۲٤۳،۰۲۲،٦۲٦) – (۱۵۳،۲٤۷،۲۳۹) = (۸۹،۷۷۵،۳۸۷)

برای محاسبه‌ی شاخص VSS نکته‌ای که باید در اینجا به آن توجه نمود این است که ابتدا باید سناریوی میانگین تعریف شود. برای تعریف این سناریو بدین صورت عمل می‌شود که ابتدا تعداد خرابی‌ها در کل نواحی شبکه ریلی محاسبه می‌شود و درصد آنها بدست می‌آید. سپس به هر ناحیه تعداد خرابی تخصیص داده می‌شود. بعد از آن برای ایستگاه‌های هر ناحیه نیز آن ایستگاه‌هایی که بیشترین خرابی را در کل خرابی‌ها داشتند انتخاب می‌گردد. در نهایت سناریوی میانگین به صورت زیر تعریف می‌شود. هر رنگی بیان کننده یک ناحیه است. برای مثال محور جنوب دارای دو ایستگاه اندیشمک و درود است.

جدول ٦. اطلاعات سناریوی میانگین برای محاسبه‌ی VSS

خرابی‌ها	۱	۲	۳	٤	۵	٦	۷	۸	۹	۱۰
ایستگاه‌های منتخب	درود	اندیمشک	نغاب	سمنان	نیشابور	میانه	کرمان	کاشان	طبس	سیستان

حال این سناریو باید در مدل قطعی مسئله حل شود و جواب آن بدست آید که نتیجه‌ی حل آن ایستگاه‌های میانه، سمنان، نغاب، کرمان، طبس و کاشان را شامل می‌شود. مرحله‌ی بعدی برای محاسبه‌ی شاخص VSS، فیکس کردن جواب بالا در مسئله‌ی معادل قطعی با تمامی ۱۳۱ سناریو است و جواب تابع هدف آن به عنوان مقدار مورد انتظارِ جواب مقدار متوسط یا همان EEV در نظر گرفته می‌شود که با انجام این کار مشخص می‌گردد که مقدار آن برابر است با ۲۹۷،٤٤۷،۰۹۹ که تفاوت آن با مقدار تابع هدف مسئله تصادفی برابر می‌شود با ۵٤،٤۲٤،٤۷۳ واحد پولی که مقدار آن حدوداً ۲۲ درصد جواب مسئله تصادفی است.

VSS = EEV – RP =

(۲۹۷،٤٤۷،۰۹۹) – (۲٤۳،۰۲۲،٦۲٦) = (۵٤،٤۲٤،٤۷۳)

در واقع برای جواب ارائه شده به این معنی است که اگر قرار بر این باشد که مسئله‌ی تصادفی حل نشود، آنگاه حتی پیدا کردن یک جواب شدنی که برای تمامی سناریوهای موجود شدنی باشد هم کار سخت و حتی نشدنی است که این موضوع لزوم حل کردن مسئله‌ی تصادفی را برای این تحقیق بیان می‌کند که البته این مورد از میزان بزرگی خود شاخص‌های EVPI و VSS هم مشخص است.

٤-۳-آنالیز حساسیت

منابع مسئله در این تحقیق مقادیر سمت راست در محدودیت‌های حداقل زمانی و حداکثر تعداد لوکوموتیوها برای تخصیص هستند. اصولاً در این تحقیق سعی شد تا کمترین مقدار سمت راست برای محدودیت‌های حداقل زمانی در نظر گرفته شود. افزایش این مقادیر بیش از این حد علاوه بر اینکه پیچیدگی مسئله را بیشتر می‌کند و زمان حل آن را افزایش می‌دهد، باعث به دست آمدن جواب‌های غیرمنطقی در مدل می‌شود. لذا در تحلیل حساسیت این مقادیر تغییر داده نخواهند شد. در مورد منبع دیگر مسئله که همان حداکثر تعداد لوکوموتیوهای قابل تخصیص هست نیز باید گفت که اصولاً سعی می‌شود که به سبب صرفه جویی‌های مالی و افزایش توان عملیاتی در سایر بخش‌ها، از تعداد این مقدار کاسته شود. برای مثال کاستن یک واحد از لوکوموتیوهای در دسترس باعث افزایش توان عملیاتی در بخش عملیات روزانه‌ی انتقال مسافرین می‌شود که البته این موضوع در قسمت هزینه‌های عملیاتی مدل تاثیر خود را نشان می‌دهد. در ادامه میزان هزینه به کارگیری ۵ لوکوموتیو در مدل

محاسبه خواهد شد و این هزینه با هزینه حالت ٦ لوکوموتیو مسافری امداد مقایسه خواهد شد. مقدار تابع هدف برای ۵ عدد لوکوموتیو برابر است با ۳۱۱،٤٥٤،۲۲۱ واحد پولی که تفاوت این مقدار با میزان تابع هدف با ٦ لوکوموتیو برابر است با ٦۸،٤۳۱،٥۹٥ واحد پولی که حدوداً ۲۸ درصد از جواب مدل تصادفی است که نشان دهنده افزایش بسیار زیاد هزینه‌ها با کاهش یک واحد لوکوموتیو است.

٤-٤- محدودیت‌های تحقیق

محدودیت اصلی مشاهده شده در زمان انجام تحقیق، تعداد محدود سناریوها با توجه به کمبود اطلاعات ثبت شده به دلیل تازگی مسئله در شرکت ملی راه‌آهن بوده است که این موضوع باعث شد تا برای افزایش تعداد سناریوها از شبیه سازی استفاده شود. با توجه به NP-hard بودن مسئله، حداکثر تعداد سناریوهای قابل حل به صورت مستقیم با بهینه‌ساز CPLEX تعداد ۲٦۰ سناریو در مدت زمان ۱۳۰ ساعت است. امکان حل مستقیم مدل ریاضی برای تعداد سناریوهای بالاتر از ۲٦۰ عدد حتی با سیستم‌های کامپیوتری با ظرفیت بالاتر نیز وجود ندارد. حل مدل تنها بر اساس بهینه‌ساز CPLEX و نامناسب بودن روش‌های حل دیگر نیز محدودیت دیگر این تحقیق است. مدل ریاضی این مسئله دارای تصحیح عمومی است و حل مدل ریاضی که از تصحیح عمومی برخوردار است با روشی غیر از حل مستقیمِ مدل معادل قطعی با بهینه‌ساز CPLEX امری چالش برانگیز است. به طور کلی مدل‌های ریاضی تصادفی که در آن‌ها از متغیرهای عدد صحیح در مرحله‌ی دوم استفاده می‌شود، روش‌های حل پیچیده‌تری را نیاز دارند.

۵- نتیجه‌گیری

موضوع تحقیق حاضر تخصیص لوکوموتیوهای مسافری به عنوان یکی از پر ارزش‌ترین تجهیزات و دارایی‌های شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران در شرایط فعلی کشور است. از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق، تخصیص درست لوکوموتیوهای مسافریِ امداد نسبت به روش فعلی با در نظر گرفتن رویکرد بهره‌وری و کمینه کردن هزینه‌ها است که در عمل در شرکت راه‌آهن اجرا می‌شود است. در واقعیت با توجه به دو خطه بودن محور خراسان و ترافیک بالای این مسیر، تعداد ٤ عدد از لوکوموتیوهای آماده به کار در ایستگاه‌های این مسیر مستقر هستند که این موضوع باعث می‌شود تا به سایر محورهای عبوری توجهی نشود. به طور کلی جواب نهایی این مدل، یک آرایش کلی برای استقرار لوکوموتیوهای آماده به کار را ارائه می‌کند و به همه‌ی محورها توجه کافی دارد. برای مثال، در عمل محور آذربایجان از هیچ لوکوموتیو مسافری امدادی تغذیه نمی‌شود و تمامی بار رفع اختلال در زمان خرابی لوکوموتیوهای مسافری بر عهده‌ی لوکوموتیوهای باری و مانوری آن است. در جواب نهایی به محور خراسان دو لوکوموتیو، به محور آذربایجان یک لوکوموتیو، به محور جنوب شرق- فارس- هرمزگان سه لوکوموتیو تخصیص داده شده است و به محور جنوب که به بندر امام خمینی ختم می‌شود و همین‌طور محور شرق هیچ لوکوموتیوی تخصیص داده نشده است که در این مورد مدل تمامی اختلالات ایجاد شده را با قطارهای باری برطرف می‌کند. از دیگر دستاورهای این تحقیق، مدل ریاضی این مسئله است که به صورت تصادفی و با در نظر گرفتن تعداد سناریوهای قابل قبول مدل ریاضی را در زمان مطلوب حل می‌کند. رسیدن به زمان حل نمایی برای حل مسائل با توجه به ورودی مسئله و با در نظر گرفتن NP-hard بودن مسائل تخصیص، از نقاط قوت این نوشتار است. در این تحقیق تنها بر روی خرابی‌های ایجاد شده در لوکوموتیوهای مسافری تمرکز شده است و خرابی خود این لوکوموتیوها ردیابی نشده است. با این حال در اطلاعات ورودی به این مدل نیز روندهای خرابی خاصی دیده می‌شود. برای مثال در زمان‌هایی از سال خرابی در بعضی نقاط شبکه ریلی بیشتر مشاهده می‌شود و یا خرابی‌ها به صورت متوالی در یک مسیر اتفاق افتاده‌اند. ممکن است که بررسی دقیق‌تر این سوابق، احتمال وجود همبستگی بین این خرابی‌ها با عواملی مانند آب و هوا، مکان جغرافیایی و اپراتور را مشخص کند که این موضوع می‌تواند دستمایه‌ی تحقیقات آتی در داده‌های خرابی به منظور استخراج روند خرابی از آن‌ها شود. پیشنهاد دوم برای تحقیقات آتی حل مسئله‌ی تحقیق با رویکرد ریسک گریزی است. در واقع با توجه به متفاوت بودن جواب مدل با استقرار فعلی لوکوموتیوهای مسافری امداد مورد استفاده در شبکه ریلی این فرض مطرح می‌گردد که گویا منطق ارائه‌ی استقرار فعلی لوکوموتیوهای مسافری امداد با در نظر گرفتن موضوع تاخیرات قطارهای مسافری بوده است و هزینه‌های عملیاتی و غیرعملیاتی این موضوع به هیچ عنوان برای ارائه دهنده‌ی این استقرار مطرح نبوده است که موضوع بحث بررسی مسئله‌ی تحقیق را با رویکرد کمینه کردن واریانس تاخیرات قطارهای مسافری مطرح می‌کند و در نهایت می‌توان به حل مدل ریاضی به وسیله‌ی یک روش حل دقیق و ابتکاری دیگر برای

تعداد سناریوهای بیشتر اشاره کرد. به دلیل ساختار خاص مدل ریاضی ارائه شده در این تحقیق، روش‌های حل متنوع ارائه شده در ادبیات برنامه‌ریزی تصادفی در اینجا کارا نخواهند بود و تنها به حل مدل معادل قطعی با بهینه‌ساز CPLEX اکتفا شده است که این روش برای تعداد سناریوهای بالا زمان و حافظه‌ی زیادی را طلب می‌کند.

٦- پی‌نوشت‌ها

1. Genaral Motors
2. Genaral Electric
3. Alstom
4. Hitachi
5. Productivity
6. Redundancy

۷. بلاک، فاصله‌ی بین دو ایستگاه را گویند.

۷-مراجع

-حاله، حسن. بخشی، حمیدرضا. حسینی، رسول (۱۳۹۰). تخصیص بهینه لوکوموتیوها به قطارهای برنامه‌ریزی شده در راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران، *مهندسی حمل و نقل*، سال سوم، (۱)، ٢٤-۲۲.

-یقینی، مسعود، غفرانی، فائزه. اسمی‌زاده، ماجده. میرباقری، ابراهیم (۱۳۹۱). تخصیص لکوموتیو و زمان‌بندی قطارهای باری در راه‌آهن ایران، *مهندسی حمل و نقل*، سال پنجم، (۱)، ۹۷-۱۰۳.

-یقینی، مسعود و احمد پور، عباس (۱۳۹٦). بهینه‌سازی دو هدفه زمان‌بندی حرکت قطارها و تخصیص لوکوموتیو، *پژوهشنامه حمل و نقل*، (۵۳)، ۷-۳.

-Bruneau M, Chang SE, Eguchi RT, Lee GC, O'Rourke TD, Reinhorn AM. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthq Spectra,* 19,733–52.

-Chung Kuo, C., Nicholls, G., (2007). A mathematical modeling approach to improving locomotive utilization at a freight railroad.

-Ghorashi Khalilabadi, M., Zegordi, H., Nikbakhsh, E., (2020). A multi stage stochastic programming approach for supply chain risk mitigation via product substitution, *Computer & Industrial Engineering 149(2020).*

-Hidalgo-Mompeán, F., Gómez Fernández, J., (2021). Dimensionality analysis in machine learning failure detection models. A case study with LNG compressorsFernando.

-Ochella, S., Shafiee, M., Sansom, C., (2021). Adopting machine learning and condition monitoring P-F curves inplastics from fiber and resin properties using data mining.

-Ilalokhoin, O., Pant, R., Hall, J., (2023). A model and methodology for resilience assessment of interdependent rail networks, Case study of Great Britain's rail network, *Reliability Engineering and System Safety 229*, 108895.

- Kang, L., Xiao, Y., Sun, H., Wu, J., Luo, S., Buhigiro, N., (2021), Decisions on train rescheduling and locomotive assignment during the COVID-19 outbreak, A case of the Beijing-Tianjin intercity railway.

-Rouky, N., Boukachour, J., Boudebous, D., Alaoui, A., (2018). A Robust Metaheuristic for the Rail Shuttle Routing Problem with Uncertainty: A Real Case Study in the Le Havre Port.

-Wang, Z., Li, S., (2020). Data-driven risk assessment on urban pipeline network based on a cluster Model.

-Yao, L., Shao, X., Feng, Q., (2020). Predicting the mechanical properties of unidirectional fiber reinforced.

Location of passenger relief locomotives (Siemens) to Eliminate the Network Disruption caused by the Line Blockage in the Context of a Shortage of these Locomotives

Amin Karimi, M.Sc., Grad., Faculty of Industrial & Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Seyed Hessameddin Zegordi, Professor, Faculty of Industrial & Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Ehsan Nikbakhsh, Associate Professor, Faculty of Industrial & Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Bakhtiar Ostadi, Assistant Professor, Faculty of Industrial & Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

E-mail: zegordi@modares.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

The following article discusses passenger locomotives as one of the most valuable assets of the Iran Railway Company and tries to find a solution to reduce the impact of the failure of these locomotives during movement, taking into account the operational conditions in this company. When most of these types of equipment are unused in the depot of the railway company due to the lack of parts and a specialized repair program, it is necessary to use their maximum potential to carry out the daily operations of passenger movement. On the other hand, the lack of a proper maintenance program for these equipment has caused the frequency of breakdowns of these equipment to increase during movement and cause line blockages and disruptions in the rail network, which also requires a number of these passenger locomotives individually to rush to help the trains left on the track. The problem presented in this research is to create a solution for the simultaneous use of this equipment and other locomotives in other departments, such as freight and shunting so that when a passenger locomotive breaks down on the track, they are dispatched to fix it to reduce the operating load of passenger locomotives. For this purpose, this research tries to solve this problem by solving a scenario-based stochastic Programming model with simple recourse by examining the breakdown history of passenger locomotives and also identifying the busy routes of freight and shunting locomotives to determine the best stations for the deployment of these locomotives as a reserve. This problem was solved through the CPLEX solver for 131 scenarios, and by obtaining an optimal deployment for relief locomotives, it was shown that the current deployment used in the Iranian railway network is not optimal in terms of productivity.

Keywords: Assignment, locomotive, Disruption, Scenario-based Stochastic Programming, Rail network, Productivity