طراحی مدل مکان‌یابی و تخصیص مراکز تعمیر تجهیزات سیگنالینگ در ایستگاه‌های اولویت‌دار شبکه ریلی

مقاله علمی – پژوهشی

علیرضا حمیدیه*، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
محمدرضا پیله‌ور شهری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hamidieh@pnu.ac.ir

دریافت: ۱٤۰۳/۰٤/۰۷– پذیرش: ۱٤۰۳/۱۱/۰۱
صفحه ۳۸٤-۳٦۱

چکیده

مسائل مکان‌یابی مراکز تعمیر در شبکه ریلی در جهت رفع سریع و کم هزینه خرابی تجهیزات سیگنالینگ توسعه یافته است. سیستم سیگنالینگ در ایستگاه‌های راه‌آهن ضامن ایمنی و سیر روان قطارهای مسافری و باری است. خرابی تجهیزات سیگنالینگ اجتناب‌ناپذیر بوده که اختلال در حرکت قطارها و بروز نارضایتی در جامعه مشتریان (مسافرین و صاحبان کالا) را به دنبال دارد. از این رو رفع سریع خرابی تجهیزات در ایستگاه‌های اولویت‌دار حائز اهمیت است. تجهیزات سیگنالینگ هر ایستگاه شامل اینترلاکینگ، مدار تراک، ماشین‌سوزن، چراغ سیگنال و محورشمار است. این تجهیزات دارای میانگین فراوانی خرابی ماهیانه، متوسط زمان تعمیر و آستانه مجاز رفع خرابی متفاوتی هستند. در این مطالعه اختلال ناشی از خرابی تجهیزات سیگنالینگ با میزان اهمیت ایستگاه‌ها و میانگین فراوانی خرابی تجهیزات، بررسی می‌شود. شاخص‌های اهمیت به منظور اولویت‌بندی کردن ایستگاه‌ها استخراج شدند. وزن‌دهی شاخص‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی انجام گرفت. سپس از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس، ایستگاه‌ها بر اساس میزان اهمیت‌شان اولویت‌بندی گردیدند. در ادامه یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه مکان‌یابی و تخصیص برای به حداکثر رساندن پوشش کل شبکه تعمیر و نگهداری، کاهش زمان و هزینه رفع خرابی توسعه می‌یابد. برای حل مدل از روش الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب استفاده شده است. داده‌های خرابی تجهیزات سیگنالینگ در ایستگاه‌های راه‌آهن مشهد-تهران به عنوان مطالعه موردی بررسی می‌شود و اهمیت ایستگاه‌ها و نقاط تقاضا محاسبه می‌گردد. مقایسه نتایج خروجی با وضعیت فعلی مراکز تعمیر در این مطالعه نشان می‌دهد مکان‌یابی جدید مراکز تعمیر و نحوه تخصیص ایستگاه‌ها، عدد پوشش ایستگاه‌های اولویت‌دار را بهبود می‌بخشد.

واژه‌های کلیدی: مکان‌یابی، پوشش، سیگنالینگ، الویت بندی، راه‌آهن، الگوریتم ژنتیک

۱- مقدمه

سیستم‌های ریلی بخشی از زیرساخت‌های حیاتی و ستون فقرات اصلی توسعه اقتصادی در هر کشور هستند. (Bababeik, Khademi and Chen, 2018). در سال ۱٤۰۱ حدود ۳۰ میلیون مسافر و ٤٤ میلیون تن بار از طریق ۱۵ هزار و ۳۷ کیلومتر مسیر ریلی در کشور ایران جابه‌جا شده است. (مجله الکترونیکی سال‌نامه آمار حمل‌ونقل ریلی کشور در سال ۱٤۰۱). تریپاتی، تانکسل و ورما معتقدند با توجه به رشد روزافزون متقاضیان استفاده از سیستم‌های ریلی، شبکه‌های حمل‌ونقل همواره در جهت دستیابی به یک راهکار حمل‌ونقل سریع و کارآمد برای رفت و آمد ایمن مردم و ارسال اقتصادی کالاها توسعه یافته‌اند (Tripathi, Tanksale and Verma, 2022). یکی از این راهکارها استفاده از سیستم سیگنالینگ در

حمل و نقل ریلی است. چرا که با افزایش تعداد و سرعت قطارها، وجود یک سیستم هوشمند جهت کنترل ترافیک قطارها، کاهش خطاهای انسانی و ضمانت ایمنی مسیر، الزامی است. در زمان وقوع اختلال در بخشی از زیرساخت حیاتی حمل و نقل ریلی، تسریع در بازیابی آن بخش با اعزام تجهیزات یا نیروهای امدادی، به ویژه آنهایی که در مناطق صعب الوصول قرار دارند، حیاتی است، (Bababeik, Khademi and Chen, 2018) بطور مشابه در صورت اختلال در سیستم سیگنالینگ، تسریع در رفع خرابی و راه‌اندازی مجدد تجهیزات به ویژه در ایستگاه‌هایی که اولویت بالاتری دارند، اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا در صورت خرابی هر یک از تجهیزات سیستم سیگنالینگ، کنترل ترافیک قطارها بصورت دستی با رعایت دستورالعمل‌ها و حضور فیزیکی مأمورین بهره‌برداری در محل، انجام می‌شود. زمان لازم برای اجرای دستورالعمل‌های کنترل دستی، سیر روان و بی‌وقفه قطارها را با مشکل مواجه می‌کند و تأخیرهای به وجود آمده جامعه مشتریان را به ستوه می‌آورد. این اختلال همراه جریان بار و مسافر در کل شبکه ریلی پخش می‌شود. مطابق نظر جینی، کیان و ژنگانگ، انتقال به موقع تأسیسات امداد و نجات به محل خرابی، به ویژه به محل خرابی با اهمیت لینک بالا، اقدام مهمی برای تسریع بازیابی لینک و کمک به عملکرد عادی شبکه است و برای سرکوب گسترش ریسک در شبکه حیاتی است. (Jingni, Qian and Zhenggang, 2021). با وجود اهمیت خدمات تعمیر و نگهداری تجهیزات زیرساختی هنوز کار کمی در حوزه تحقیقات عملیاتی در مورد نگهداری زیرساخت ریلی در مقایسه با عملیات سیر و ترافیک قطارها انجام شده است.

جینی، کیان و ژنگانگ معتقد تحقیقات در مورد مکان‌یابی تأسیسات نجات اضطراری عمدتاً شامل دو دسته هستند. الف) مکان‌یابی مراکزی که برای رفع خرابی زیرساخت‌ها ناشی از بروز رخداد طبیعی (مانند زلزله، باران‌های شدید، طوفان و غیره)، حملات مخرب با عامل انسانی یا تصادفات مختل شده است. ب) مکان‌یابی مراکزی که برای انتقال تجهیزات امداد و نجات مصدومان پس از وقوع حادثه در شبکه حمل و نقل استفاده می‌شود. بدیهی است که دو دسته مسائل فوق دارای اهداف کاملاً متفاوتی هستند. اولی برای احیای زیرساخت در شبکه اعمال می‌شود و دومی برای کاهش تلفات در شبکه. با این حال، اگرچه این دو نوع تأسیسات امدادی نقش‌های متفاوتی دارند، اما اهداف یکسانی برای انتخاب مکان دارند، یعنی امکان انجام به موقع تمام مأموریت‌های امداد و نجات را به مراکز امدادی می‌دهند. بنابراین روش‌ها و مدل‌های مورد استفاده در آن‌ها مشابه هستند. (Jingni, Qian and Zhenggang, 2021).

هدف از طراحی یک شبکه تعمیر و نگهداری اصلاحی در این مطالعه، تعیین مکان و تعداد مراکز تعمیر، منطقه تحت پوشش و کیفیت پوشش نقاط تقاضا که شامل زمان پاسخگویی و میانگین زمان تعمیر می‌شود، است. هزینه احداث و تجهیز مراکز تعمیر و دستمزد پرسنل تعمیرکار به همراه دیگر هزینه‌های سربار، باعث می‌شود سازمان‌ها قادر نباشند مراکز تعمیر را در تمامی ایستگاه‌ها احداث کنند. بنابراین مجبورند تا ضمن کاهش تعداد مراکز تعمیر، با مکان‌یابی صحیح، مراکز تعمیر را در ایستگاهی احداث نمایند که ضمن تأمین پوشش حداکثری و کاهش هزینه، زمان رفع خرابی تجهیزات در ایستگاه‌های اولویت‌دار را کاهش دهند. در این مطالعه اولویت ایستگاه‌ها به عنوان نقاط تقاضا توسط شاخص‌هایی کمی‌سازی می‌شود که برای تعیین آن‌ها از نظرسنجی مبتنی بر پرسش‌نامه استفاده شده است. شاخص‌ها به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که اهمیت ایستگاه را از نظر لزوم آماده‌به‌کاری تجهیزات سیگنالینگ نشان دهند. هر چه اولویت ایستگاه در شبکه ریلی بالاتر باشد میزان خسارت در اثر خرابی تجهیزات سیگنالینگ در آن بیشتر است. برای حل مسئله چالش برانگیز تعیین مکان بهینه مراکز تعمیر در این مطالعه از یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شود. مدل ریاضی برای مکان‌یابی مراکز تعمیر معرفی و توسعه می‌یابد و در صدد است با استفاده از حداقل مراکز تعمیر، حداکثر پوشش مورد انتظار را حاصل شود. مدل با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) حل می‌شود. کاربرد این تحقیق در عمل و اثربخشی الگوریتم پیشنهادی از طریق مطالعه موردی شبکه ریلی ناحیه خراسان در منطقه شمال شرق راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران نشان داده شده است.

۲- پیشینه تحقیق

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت و تقاضا برای دریافت خدمات اضطراری، موضوع راه‌اندازی مراکز پاسخ اضطراری اهمیت ویژه‌ای دارد. اهمیت مکان‌یابی صحیح تسهیلات و

تخصیص بهینه منابع برای پوشش تقاضا در طراحی سیستم‌های پاسخ اضطراری باعث شده است تا بسیاری از محققان در سنوات گذشته به این موضوع بپردازند. مرور این مطالعات نشان می‌دهد بیشتر تمرکز محققان در سال‌های گذشته در حوزه واکنش اضطراری پایگاهای اورژانس، بیمارستان‌ها، آتش‌نشانی، واحدهای خدمات‌رسانی به مصدومان در بلایای طبیعی، تصادفات جاده‌ای و ریلی و اهدای خون اضطراری است که در ٤ دسته کلی قرار می‌گیرد (Jingni, Qian and Zhenggang, 2021). اول مسائلی که در آن از کمترین تعداد مراکز خدمت‌رسان برای برآورده کردن تقاضای کل شبکه استفاده می‌شود. این مسائل به مسائل پوشش کامل با حداقل امکانات یا پوشش مجموعه (LSCP) مشهور است. دوم تحقیقاتی که در آن محقق به دنبال به حداکثر رساندن نقاط تقاضایی است که مراکز می‌توانند تحت پوشش خود قرار دهند. این مسائل مکان‌یابی پوشش حداکثر (MCLP) نامیده می‌شود. در اینگونه مسائل اگر فاصله بین مراکز و نقطه تقاضا کمتر یا مساوی با شعاع پوشش مرکز باشد، نقطه تقاضا تحت پوشش قرار می‌گیرد. در غیر این صورت می‌توان نتیجه گرفت که مراکز قادر به پوشش نقطه تقاضا نیستند. دسته سوم مسائلی هستند که به منظور گسترش فرض فوق با عنوان مسائل مکان‌یابی پوشش تدریجی (GCLP) مطرح می‌شوند. در این دسته از مسائل پوشش کامل و پوشش جزئی تعریف می‌شود و از تابع تضعیف برای تعیین عدد پوشش نقطه تقاضا استفاده می‌شود. نقاط تقاضا در این دسته از مسائل تنها می‌توانند توسط یک مرکز پوشش داده شوند و به همین دلیل نتایج نمی‌توانند پوشش بهینه را حاصل شوند. دسته چهارم از مسائل مکان‌یابی به مسائل پوشش تعاونی (CCLP) اختصاص دارد. در این دسته، هر نقطه تقاضا تحت پوشش چندین مرکز و یک مرکز مجاز به پوشش چندین نقطه تقاضا است. تحقیقات موجود در زمینه پوشش تعاونی عمدتاً بر روی مکان‌یابی و استقرار منابع متمرکز است. محدودیت مورد توجه محققان در این دسته از مسائل، فاصله نقطه تقاضا تا محل استقرار مرکز است. با توجه به روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی که توسط محققان در این حوزه در سنوات اخیر مورد استفاده قرار گرفته است، مطالعات مروری متعددی نیز ارائه شده است که مدل‌های بهینه‌سازی مورد استفاده در مطالعات این حوزه و روش‌های حل را بررسی می‌کنند. در ادامه به مرور برخی مطالعات در زمینه تأسیسات پاسخ اضطراری پرداخته شده است. در مقاله‌ای از یانگ و همکاران (Yang et al., 2021) با مرور تحقیقات پیشین یک چارچوب کلی برای مسائل مکان‌یابی مراکز پاسخ اضطراری در شبکه‌های حمل‌ونقل ارائه شده است. این مقاله شاخه‌ها، مسائل و اهداف مختلف تحقیقاتی مرتبط با موضوع واکنش اضطراری را بررسی می‌کند. در این مقاله چهار عامل تأثیرگذار فاصله، مسیریابی، دسترسی و زمان سفر در پیاده‌سازی مدل‌های مکان‌یابی در شبکه‌های حمل‌ونقل معرفی شده است. چان و همکاران (Chan et al., 2021) در مقاله خود یک بررسی جامع از پیشرفت قابل توجهی را که از زمان معرفی مسائل مکان‌یابی تسهیلات حاصل شده است ارائه می‌دهند. دومز و همکاران (Dönmez et al.,2021) مروری جامع بر تحقیقات انجام شده در مورد مسائل مکان‌یابی تسهیلات در شرایط عدم قطعیت در زمینه خدمات بشردوستانه ارائه می‌دهند. چاو بوجبن (Kchaou-Boujelben, 2021) مروری جامع بر ادبیات مربوط به مسائل مکان‌یابی جایگاه‌های شارژ را با تمرکز ویژه بر مدل‌سازی و حل مسئله ارائه می‌کند. او مطالعات پیشین را از دیدگاه‌های مختلف از جمله محاسبه تقاضا، رویکردهای پوشش تقاضا، توابع هدف، محدودیت‌های جانبی، متغیرهای تصمیم‌گیری، ساختار مدل و همچنین وابستگی زمانی و عدم قطعیت در پارامترهای مسئله تحلیل می‌کند. در مقاله‌ای از چرچ و درزنر (Church and Drezner, 2022) مدل‌های مکان‌یابی مراکز مضر که ساکنین بر خلاف مراکز خدمت‌رسان ترجیح می‌دهند از آن‌ها دور باشند بررسی می‌شوند.

در زمینه مکان‌یابی مراکز پاسخ اضطراری درزنر، درزنر و کالزینسکی (Drezner, Drezner and Kalczynski, 2019)، از روش مکان‌یابی پوشش تدریجی برای استقرار دکل‌های سیگنال تلفن همراه در شهر اورنج کانتی ایالت کالیفرنیا آمریکا استفاده کردند. آنها یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی تعریف کردند و از الگوریتم ابتکاری هوشمند شاخه و کران برای حل آن استفاده کردند. در مطالعه‌ای از عیدی و ترابی (Eydi and Torabi, 2019)، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط دو هدفه برای تعیین تعداد، مکان و ظرفیت بهینه کارخانه‌ها، مراکز توزیع و خرده‌فروشان، انتخاب حالت‌های حمل‌ونقل بین عناصر زنجیره و ارزیابی شعاع پوشش خرده‌فروشان ارائه شده است تا هزینه‌های کل حمل‌ونقل را کاهش دهد، تقاضاهای تحت پوشش را به حداکثر

برساند و به پوشش تدریجی در یک طرح کلی دست یابد. آنها از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب برای حل مدل استفاده کردند. سایتپو و همکاران (Sitepu et al.,2019) در مقاله خود به بهینه‌سازی انتخاب محل استقرار مراکز امداد و خدمات بهداشتی در شهر پالمبانگ کشور اندونزی پرداخته‌اند. در این مطالعه از هر دو مسئله پوشش کامل با حداقل امکانات و پوشش حداکثر استفاده شده است. رودریگز، دلافونته و آگایو (Rodriguez, De la Fuente and Aguayo, 2020) در مقاله خود به مسئله مکان‌یابی و استقرار تجهیزات آتش‌نشانی با پوشش مورد انتظار پرداخته‌اند. آنها از مدل مکان‌یابی پوشش حداکثر استفاده کرده‌اند. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی با عدد صحیح مختلط ارائه می‌شود که میانگین موارد استفاده خودروهای آتش‌نشانی را برای محاسبه پوشش تقاضای مورد انتظار در نظر می‌گیرد. در مقاله‌ای از علیزاده و نیشی (Alizadeh and Nishi, 2020) نیز مفهوم پوشش کامل با حداقل امکانات و پوشش حداکثر با هم تلفیق شده است. در این مطالعه به مکان‌یابی مراکز کمک‌های اولیه در خدمات لجستیک بشردوستانه با مطالعه موردی تهدید در کشور ژاپن پرداخته شده است. در مقاله‌ای از مهری و همکاران (۲۰۲۰) مدل مکان‌یابی تأسیسات (اورژانس و بیمارستان) با هدف افزایش پوشش تقاضای اضطراری در تصادفات جاده‌ای در سطح شهر مطرح می‌شود. در این مطالعه، تجزیه و تحلیل پوششی داده‌ها و مسئله مکانیابی پوشش حداکثر در یک مدل واحد ترکیب شده‌اند. در مقاله‌ای از گازانی، نیاکی و نیاکی (Gazani, Niaki and Niaki, 2021) یک مسئله مکان‌یابی پوشش حداکثر با محدودیت‌های دنیای واقعی مانند انواع مختلف امکانات و وسایل نقلیه با هزینه‌های راه‌اندازی مختلف در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله از یک رویکرد فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل مدل برنامه‌ریزی غیرخطی استفاده شده است. پوررضایی خلیق و همکاران (Pourrezaie-Khaligh et al., 2021) با در نظر گرفتن برابری و قابلیت دسترسی، مسئله مکان‌یابی و طراحی شبکه مراکز مراقبت‌های بهداشتی را مورد بررسی قرار می‌دهند. مکان‌یابی مراکز مراقبت‌های بهداشتی، برنامه‌ریزی ظرفیت مراکز و طراحی شبکه انتقال از اهداف اولیه این مقاله است. مدل پیشنهادی در این مقاله با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های سیستم، حداکثر کردن دسترسی گره‌ها و به حداقل رساندن نابرابری بین تمام گره‌های تقاضا ارائه شده است. در مقاله‌ای از یوتینگ، شاینگ و پووی (Yu-Ting, Shangyao and Powei, 2021) یک مدل بهینه‌سازی برای مکان‌یابی سیستماتیک انبارها و تأسیسات مربوطه برای استقرار انواع خودروها ارائه می‌شود. در این مقاله یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر تجزیه برای افزایش کارایی محاسبات پیشنهاد شده است. یک مطالعه موردی نیز با استفاده از داده‌های یک شرکت اتوبوسرانی در تایوان انجام می‌شود. به دلیل دشوار بودن مسئله، برای حل آن در این مقاله از یک الگوریتم ابتکاری دو مرحله‌ای استفاده می‌شود. در مرحله اول، محدودیت‌های عدد صحیح در متغیرهای تصمیم‌گیری کاهش می‌یابد و در مرحله دوم مقادیر این مجموعه از متغیرهای تصمیم‌گیری با ثابت نمودن راه حل جزئی از مرحله اول تعیین می‌شود. هاشمی، جباری و یعقوبی (Hashemi, Jabbari and Yaghoubi, 2022) در تحقیق خود به بررسی مکان‌یابی بهینه مراکز فوریت‌های پزشکی به منظور ارائه مراقبت‌های سریع‌تر و کارآمدتر می‌پردازند. هدف آنها از این مطالعه ارائه یک مدل ریاضی برای مکان‌یابی مراکز فوریت‌های پزشکی با هدف افزایش کمیت و کیفیت پوشش تقاضا می‌باشد. این مدل ابتدا در ابعاد کوچک با استفاده از نرم‌افزار گمز حل می‌شود و سپس با استفاده از یک الگوریتم فراابتکاری ژنتیک در ابعاد بزرگ مورد مطالعه قرار می‌گیرد. هدف اصلی حبیبی و پنجاتان (Habibi and Panjaitan, 2023) مدل‌سازی و حل مسئله مکان‌یابی مراکز بانک خون موقت پس از حادثه است که انتظار می‌رود در خدمت بیمارستان‌های موقتی باشند که باید به گونه‌ای با حداقل زمان پاسخگویی مستقر شوند تا بتوانند به بیمارستان‌های اصلی کمک کنند. در این مقاله جستجوی اکتشافی تابو به عنوان راه‌حلی برای حل مسئله فوق پیشنهاد شده است.

مطالعات بالا همگی در زمینه مکان‌یابی مراکز پاسخ اضطراری در شبکه شهری و جاده‌ای است. در زمینه مکان‌یابی مراکز در شبکه ریلی نیز مطالعات محدودی انجام شده است. در مقاله‌ای از بابابیک، خادمی و چن (Bababeik, Khademi and Chen, 2018) مکان‌یابی و تخصیص بهینه قطارهای امدادی برای افزایش سطح انعطاف‌پذیری شبکه ریلی بررسی می‌شود. مدل پیشنهادی در این مطالعه با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه فرموله شده و با استفاده از یک روش محدودیت اپسیلون تقویت‌شده همراه با یک رویکرد منطق

فـازی حـل می‌شـــود. اهمیت پیوند در این مقاله بر حســـب مجموعه‌ای از شاخص‌ها اندازه‌گیری می‌شود که نقش حیاتی آن پیونـد را در عملکرد شـــبکـه منعکس می‌کنـد. در مقـاله‌ای از ســـانـارین و اموری (Sunarin and Ornurai, 2021) با اسـتفاده از مدل بهینه‌سـازی دو مرحله‌ای، مسئله مکان‌یابی و تخصـیص ایستگاه‌های قطار سریع‌السیر بررسی شده است. آنها در مرحلـه اول، بـا در نظر گرفتن پوشـــش جزئی، مکـان‌هـای ایســـتگـاه‌هـای نـامزد را انتخـاب می‌کنند تا تقاضـــا را تحت محدودیت تعداد ایستگاه‌ها به حداکثر برسانند. در مرحله دوم، تعداد بهینه مکان‌های ایستگاه را تعیین می کنند تا صرفه‌جویی در هزینه حمل‌ونقل مسـافر را به حداکثر برسـانند. راه‌حل‌های بهینه در مرحله اول به عنوان ایستگاه‌های کاندید در مرحله دوم استفاده می‌شوند. در مقاله‌ای از زومر و همکاران (Zomer et al.,2021) مسـئله مکان‌یابی مراکز نگهداری و تعمیر واگن‌ها بررســی می‌شـــود. در این مقاله یک مدل مکان‌یابی بهینه برای تسهیل عملیات تعمیر و نگهداری منظم و به موقع تمام واگن‌ها، بدون تغییر در برنامه سـیر واگن‌ها معرفی می‌شـــود. هدف این مـدل افزایش عملیـات نگهـداری روزانـه و کاهش میزان کاری اسـت که باید در طول شب انجام شود. استراتژی انتخاب مکان تأسیسات نجات اضطراری در شبکه حمل‌ونقل چندوجهی برای بهبود انعطـاف‌پـذیری شـــبکه توســـط جینی، کیان و ژنگانگ (Jingni, Qian and Zhenggang, 2021) مطرح می‌شود. تقـاضـــای نجـات در این مطـالعـه بـا اهمیـت پیونـدها/گره‌ها کمی‌سـازی می‌شود. اهمیت لینک‌ها با روش تصمیم‌گیری چند معیاره بر اســـاس تکنیک مجموعه فازی شـــهودی مردد برای ترجیح ســفارش با شـــباهت به یک راه‌حل ایده‌آل (تاپســـیس) محاسـبه می‌شـود. سـپس، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی چند هـدفـه ایجـاد می‌شـــود و الگوریتم ژنتیک اتوماتای ســـلولی مرتب‌سـازی سـریع نامغلوب برای حل مدل طراحی می‌شـود. تریپـاتی، تـانکســـال و ورمـا (Tripathi, Tanksale and Verma, 2022) مســئله اســـتراتژیک مکان‌یابی بهینه انواع مختلف امکانات امدادی در سراسر شبکه راه‌آهن را که می‌تواند به یک حادثه اضـطراری پاسخ دهد، مورد مطالعه قرار می‌دهند. یک مدل بهینه‌ســـازی چندهدفه با هدف به حداکثر رســـاندن پوشـش شـبکه، اولویت‌بندی مسـیرهای ریلی مهم، بهینه‌سـازی فرآوانی و به حداقل رســـاندن زمان پاســـخ کلی در این مقاله پیشـــنهاد می‌شـــود. مدل در این مقاله با اســـتفاده از یک روش افزوده تعاملی محدویت اپسـیلون حل شـده اسـت. وانگ و ژو (Wang and Zhou, 2023) بـه مکـان‌یـابی نقـاط امداد و نجـات اضـــطراری راه‌آهن بـا ســـنـاریوهای مختلفی از جمله مکان‌یابی تأســـیســـات جدید و بهینه‌ســـازی طرح‌های موجود پرداخته‌اند. آنها در این مقاله ابتدا یک مدل پوشـــش نزدیک به کامل را برای تخمین تعداد مراکز و بدسـت آوردن نرخ پوشش واقعی پیشـــنهـاد کردنـد و این مدل را در مکان‌یابی بهینه نقاط تقاضـای اضـطراری راه‌آهن تحت سـناریوهای مختلف به کار بردند. در مقاله‌ای از وانگ و همکاران (Wang et al.,2023) یک مدل مکان‌یابی تسـهیلات اضطراری برای مسئله حمل‌ونقل کـالاهای خطرناک راه‌آهن ارائه می‌شـــود. مدل با اســـتفاده از الگوریتم ژنتیـک و داده‌هـای واقعی حـل می‌شـــود. تروییـان، ســـانـتـوس و کـامـپـوس (Troian, Tessari Santos and Alexandre Celestino Campos, 2023) به توسعه و حـل یک مدل بهینه‌ســـازی برای مکان‌یابی تیم‌های تعمیر و نگهداری لکوموتیوها برای شـرایط اضطراری در راه‌آهن برزیل می‌پردازند. موضـوع اولی که در تحقیقات گذشـته مشهود است این است که در فرآیند تحقیقات معمولاً این فرضیه وجود دارد که هر نقطه از شـبکه می‌تواند به عنوان یک نقطه نقاضـا مورد بررسـی قرار گیرد و همه نقاط تقاضـا دارای اولویت یکسـانی هسـتند. به عنوان مثال در مباحث مکان‌یابی مراکز خرده‌فروشی، مراکز اورژانس، آتش‌نشـانی و امداد جاده‌ای متقاضـیان دارای اولویـت یکســـانی هســـتند. در حالی که این موضـــوع برای تقاضاهای مربوط به تعمیر زیرساخت‌ها صادق نیست. به عنوان مثـال، در تحقیق حـاضـــر یک شـــبکه حمل‌ونقل ریلی دارای ۱۵ ایســـتگاه در نظر گرفته می‌شـــود که رفع خرابی تجهیزات ســـیگنالینگ در ایســـتگاه‌ها اولویت یکســـانی ندارند. یکی از ایستگاه‌ها در مسیر پر تردد مسافری و باری قرار دارد و دیگری ایسـتگاه فرعی است که ظرفیت جابجایی بار در آن بسیار کمتر از ایســتگاه اول اســت. زمانی که تجهیزات ســیگنالینگ هر دو ایسـتگاه دچار اختلال شـود، ارزش احیای آن‌ها متفاوت است. اعزام تعمیرکـار و احیـای ایســـتگاه اول اولویت بالاتری دارد. موضوعی که توسط برخی محققان مانند بابابیک، خادمی و چن (Bababeik, Khademi and Chen, 2018)، جـینـیف کیان و ژنگانگ (Jingni, Qian and Zhenggang, 2021) و تریپـاتی، تانکســـال و ورما (Tripathi, Tanksale and Verma, 2022) در مسـائل مکان‌یابی مراکز امداد راه‌آهن در

خصوص راه‌های ارتباطی مابین ایستگاه‌ها در نظر گرفته شده است. موضوع دیگری نیز وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرد. همانطور که پیشتر اشاره شد خرابی در یک شبکه حمل‌ونقل، غیرقابل پیش‌بینی است و ممکن است در هر نقطه از شبکه رخ دهد. بنابراین، تعیین میزان تقاضا در هر نقطه از شبکه دشوار است. در تحقیقات موجود، محققان عمدتاً از روش‌های پیش‌بینی برای تعیین مقدار این تقاضای نامطمئن استفاده می‌کنند. در مقاله‌ای از تسای و همکاران (Tsai et al., 2018) مسئله تخصیص آمبولانس در نظر گرفته می‌شود که شامل پیش‌بینی توزیع تقاضای درخواست‌کنندگان خدمات فوریت‌های پزشکی و تخصیص آمبولانس‌ها با توجه به این تقاضای پیش‌بینی شده است. در این مقاله یک مدل تخصیص آمبولانس چند هدفه با مکانیزم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پرش با توجه به توزیع پیش‌بینی‌شده تقاضاها حل می‌شود. در مقاله‌ای از جیانگ، لیو و ژنگ (Jiang, Liu and Zheng, 2019) پیش‌بینی تقاضای خون اضطراری یک روزه پس از وقوع زلزله بررسی شده است. آنها یک مدل رگرسیون بردار پشتیبانی تکاملی تطبیقی برای پیش‌بینی تقاضای خون روزانه ایجاد کرده‌اند. سارما، داس و برا (Sarma, Das and Bera, 2020) از تابع بازرسی ایمنی نرم‌افزار فیس‌بوک برای جمع‌آوری تقاضای امداد ساکنان پس از فاجعه استفاده کرد و از ضریب شدت تقاضا برای توصیف نیازهای امدادی ساکنان در مناطق مختلف استفاده کرد که به طور موثر درجه تداخل عوامل مختلف تأثیرگذار را کاهش داد. شائو و همکاران (Shao et al.,2021) پیش‌بینی تقاضای امداد را شرط اساسی عملیات امدادرسانی در بلایا و پیش‌فرض تخصیص بهینه منابع اضطراری دانسته‌اند. آنها یک روش برای پیش‌بینی تقاضا به نام استدلال موردی فازی شهودی پیشنهاد کرده‌اند که این روش ترکیبی از نظریه فازی شهودی و استدلال موردی است. به عقیده جینی، کیان و ژنگانگ (Jingni, Qian and Zhenggang, 2021) این روش پیش‌بینی عمدتاً دارای معایبی است. از یک طرف، زمانی که داده‌ها از دست رفته یا مقدار داده‌ها کافی نیست، پیش‌بینی دشوار می‌شود. پیش‌بینی را نمی‌توان برای برخی از شبکه‌های تازه تأسیس انجام داد. در واقع مطالعات مربوط به مکان‌یابی مراکز در مراحل اولیه ساخت شبکه انجام می‌شود و آن زمان داده‌های کافی در خصوص میزان تقاضا در نقاط مختلف در دسترس و قابل اعتماد نیست. از سوی دیگر، نظارت‌های خاصی در پیش‌بینی وجود خواهد داشت، زیرا برخی از بلایای طبیعی یا سایر اختلالات تصادفی هستند، بنابراین انتخاب مکان مراکز نجات اضطراری بر اساس نتایج پیش‌بینی ممکن است برای مقابله با این اختلالات تصادفی دشوار باشد. جدول ۱ خلاصه مطالعات گذشته را نشان می‌دهد.

۳- مسئله

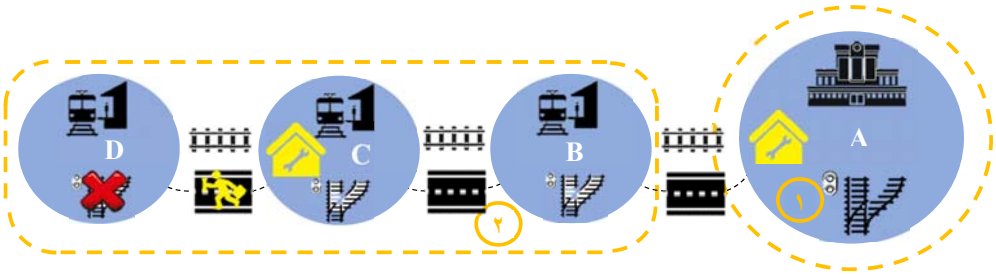
۳-۱- تعریف مسئله

در شبکه ریلی مورد مطالعه، ایستگاه‌ها از طریق دو مسیر ریلی و جاده‌ای با یکدیگر ارتباط دارند. در صورت وقوع خرابی تجهیزات سیگنالینگ در یک ایستگاه، مأمورین مستقر در نزدیکترین مرکز تعمیر موظفند تنها از طریق مسیر جاده‌ای خود را به ایستگاه محل خرابی برسانند. شکل ۱ یک شبکه ریلی نمادین شامل ٤ ایستگاه را نشان می‌دهد. تجهیزات سیگنالینگ تنها در محدوده ایستگاه وجود دارد و بنابراین ایستگاه‌ها به عنوان نقاط تقاضا در نظر گرفته می‌شوند. تخمین تقاضاها بر اساس میانگین فراوانی خرابی تجهیزات انجام می‌شود. اهمیت هر ایستگاه از منظر شاخص‌های آسیب‌پذیری شامل جریان ترافیک مسافر و بار، شیوه کنترل ترافیک و غیره دارای اهمیت متفاوتی در شبکه است. این شاخص‌ها در بخش ۳،۳،۱ از طریق یک نظرسنجی مبتنی بر پرسش‌نامه تعیین می‌شوند. همانطور که در شکل نشان داده شده است فرض می‌شود مرکز تعمیر در ایستگاه‌های A و C احداث شده است و ایستگاه A به مرکز تعمیر احداث شده در همان ایستگاه و ایستگاه B، C و D به مرکز تعمیر احداث شده در ایستگاه C اختصاص داده می‌شود. خطوط منقطع رسم شده دور ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان‌دهنده تخصیص ایستگاه‌ها به مراکز تعمیر است که با توجه به اهمیت ایستگاه و میانگین تعداد خرابی تجهیزات بر اساس مدل پیشنهادی برای کمینه کردن زمان و هزینه تعمیر انتخاب می‌شوند. ماکزیمم زمان مجاز برای رفع خرابی تجهیزات سیگنالینگ به عنوان زمان آستانه برای تعیین عدد پوشش ایستگاه‌ها استفاده می‌شود. این زمان آستانه بر اساس دستورالعمل‌های تدوین شده تعیین شده است و در مدل قرار می‌گیرد. بنابراین یک ایستگاه پوشش داده می‌شود اگر و تنها اگر زمان لازم برای رسیدن مأمورین به محل خرابی به اضافه زمان لازم برای رفع خرابی از زمان آستانه تجاوز نکند. در این

مسئله هر ایستگاه تنها توسط یک مرکز تعمیر پوشش داده می‌شود. اهمیت ایستگاه‌ها با استفاده از روش توضیح داده شده در بخش ۳،۳ بدست می‌آید و در مدل ریاضی استفاده می‌شود. هدف این مسئله مکان‌یابی مراکز تعمیر به گونه‌ای است که ایستگاه‌ها بر اساس اهمیت آنها پوشش داده شوند، پوشش کلی شبکه به حداکثر برسد و زمان پاسخ کلی و هزینه رفت و آمد مأمورین به حداقل برسد. این مسئله به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه در بخش بعدی مدل‌سازی می‌شود.

جدول ۱. خلاصه مرور ادبیات

نویسنده	حوزه واکنش	نوع مسئله	الگوریتم حل مسئله	شبکه
بابابیک و همکاران (۲۰۱۸)	امداد سوانح	CCLP	محدودیت اپسیلون	ریلی
درزنر و همکاران (۲۰۱۹)	دکل‌های رادیویی	GCLP	شاخه و کران	جاده
عیدی و همکاران (۲۰۱۹)	عناصر زنجیره تأمین	GCLP	NSGA-II	جاده
سایتپو و همکاران (۲۰۱۹)	امداد و خدمات بهداشتی	MCLP/LSCP	شاخه و کران	جاده
رودریگز و همکاران (۲۰۲۰)	آتش‌نشانی	MCLP	روش تکراری ابتکاری	جاده
علیزاده و نیشی (۲۰۲۰)	کمک‌های اولیه	MCLP/LSCP	مروری بر روش‌ها	جاده
مهری و همکاران (۲۰۲۰)	اورژانس	MCLP	DEA	جاده
سانارین و اموری (۲۰۲۱)	ایستگاه قطار	GCLP	الگوریتم دو مرحله‌ای	ریلی
گازانی و همکاران (۲۰۲۱)	حمل و نقل	MCLP	ژنتیک	جاده
پوررضایی و همکاران (۲۰۲۱)	مراقبت‌های بهداشتی	MCLP	Fix & Optimize	جاده
یوتینگ و همکاران (۲۰۲۱)	اتوبوسرانی	GCLP	ابتکاری دو مرحله‌ای	جاده
زومر و همکاران (۲۰۲۱)	تعمیر و نگهداری	MCLP	مدل‌سازی ریاضی	ریلی
جینی و همکاران (۲۰۲۱)	نجات اضطراری	CCLP	NSGA-II-CA	ریلی/جاده
تریپاتی و همکاران (۲۰۲۲)	امداد سوانح	MCLP	محدودیت اپسیلون	ریلی
هاشمی و همکاران (۲۰۲۲)	فوریت‌های پزشکی	MCLP	ژنتیک	جاده
حبیبی و پنجاتان (۲۰۲۳)	زنجیره تأمین خون	MCLP/LSCP	تابو	جاده
وانگ و ژو (۲۰۲۳)	امداد سوانح	GCLP	مدل‌سازی ریاضی	ریلی
وانگ و همکاران (۲۰۲۳)	حمل کالای خطرناک	MCLP	ژنتیک	ریلی
ترویان و همکاران (۲۰۲۳)	تعمیر و نگهداری	MCLP/LSCP	مدل ابر مکعب	ریلی



شکل ۱. تخصیص ٤ ایستگاه به دو مرکز تعمیر

۳-۲- مدل‌سازی مسئله

مجموعه‌ها و اندیس‌ها	
S	مجموعه تمام ایستگاه‌ها که با اندیس s نمایش داده می‌شوند.
R	مجموعه تمام مراکز تعمیر که با اندیس r نمایش داده می‌شوند.
E	مجموعه تمام تجهیزات سیگنالینگ که با اندیس e نمایش داده می‌شوند.

پارامترها	
Imp_s	اهمیت ایستگاه s
Tt_{sr}	زمان سفر از مرکز تعمیر r به ایستگاه s
Nr	تعداد مراکز تعمیر
$Mttr_s^e$	میانگین زمان مورد نیاز برای تعمیر تجهیز e در ایستگاه s
Rt_{sr}^e	زمان مورد نیاز برای تعمیر تجهیز معیوب e در ایستگاه s با فرض اینکه مأمور از مرکز تعمیر r به محل اعزام شده باشد که از فرمول زیر محاسبه می‌شود: $Rt_{sr}^e = Tt_{sr} + Mttr_s^e$
Ff_s^e	میانگین فراوانی خرابی تجهیز معیوب e در ایستگاه s
Tc_{sr}	هزینه سفر از مرکز تعمیر r به ایستگاه s
Tst^e	زمان آستانه برای رفع خرابی تجهیز معیوب e
Co_{sr}^e	تابع عدد پوشش ایستگاه که بصورت زیر محاسبه می‌شود: $Co_{sr}^e = \begin{cases} \frac{Tst^e - Rt_{sr}^e}{Tst^e} & , \quad if\ Rt_{sr}^e < Tst^e \\ 0 & , \quad otherwise \end{cases}$
a_{sr}^e	عدد باینری که نشان می‌دهد مرکز تعمیر r تجهیز معیوب e در ایستگاه s را پوشش می‌دهد یا خیر. $a_{sr}^e = \begin{cases} 1 & , \quad if\ Co_{sr}^e > 0 \\ 0 & , \quad otherwise \end{cases}$

متغیرها	
X_r	$X_r = \begin{cases} 1 & , \quad \text{اگر مرکز تعمیر در مکان } r \text{ احداث شده باشد} \\ 0 & , \quad \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$

W_{es} اگر تجهیز e در ایستگاه s پوشش داده شده باشد $W_{es} = \begin{cases} 1 & , \\ 0 & , \end{cases}$ در غیر اینصورت

Y_s اگر ایستگاه s پوشش داده شود $Y_s = \begin{cases} 1 & , \\ 0 & , \end{cases}$ در غیر اینصورت

U_{sr}^{e} اگر ایستگاه s بابت تجهیز e به مرکز تعمیر r تخصیص داده شده باشد $\mathrm{U}_{sr}^{e} = \begin{cases} 1 & , \\ 0 & , \end{cases}$ در غیر اینصورت

V_{sr}^{e} اگر تجهیز e در ایستگاه s بتواند توسط مرکز تعمیر r پاسخ داده شود $\mathrm{V}_{sr}^{e} = \begin{cases} 1 & , \\ 0 & , \end{cases}$ در غیر اینصورت

مدل و توابع هدف

$$max \sum_{s\in S}\sum_{r\in R}\sum_{e\in E} Imp_s \mathrm{U}_{sr}^{e}\, Co_{sr}^{e} \quad (۱)$$

$$max \sum_{r\in R}\sum_{s\in S}\sum_{e\in E} X_r\, Co_{sr}^{e} \quad (۲)$$

$$max \sum_{r\in R}\sum_{s\in S}\sum_{e\in E} \mathrm{V}_{sr}^{e} \quad (۳)$$

$$min \sum_{s\in S}\sum_{r\in R}\sum_{e\in E} Ff_s^{e}\, \mathrm{U}_{sr}^{e} Tc_{sr} \quad (٤)$$

محدودیت‌ها

$$\sum_{r\in R} Co_{sr}^{e} X_r \geq 0 \quad ,\forall (s,e) \in (S,E) \quad (٥)$$

$$Y_s \leq W_{es} \quad ,\forall e \in E \quad (٦)$$

$$\sum_{r\in R} X_r \leq Nr \quad (٧)$$

$$\mathrm{U}_{sr}^{e} \leq a_{sr}^{e} X_r \quad ,\forall (s,r,e) \in (S,R,E) \quad (٨)$$

$$\mathrm{V}_{sr}^{e} \leq X_r \quad ,\forall (s,r,e) \in (S,R,E) \quad (٩)$$

$$X_r \in \{0,1\} \quad ,\forall\, r \in R \quad (١٠)$$

$$W_{es} \in \{0,1\} \quad ,\forall (s,e) \in (S,E) \quad (١١)$$

$$\mathrm{U}_{sr}^{e} \in \{0,1\} \quad ,\forall (s,r,e) \in (S,R,E) \quad (١٢)$$

$$V_{sr}^{e} \in \{0,1\} \quad ,\forall (s,r,e) \in (S,R,E) \quad (١٣)$$

تابع هدف (۱) پوشش تجهیزات سیگنالینگ ایستگاه‌های اولویت‌دار را بیشینه می‌کند. تابع هدف رابطه (۲) به بیشینه کردن عدد پوشش کل شبکه کمک می‌کند. این رابطه برای هر مرکز تعمیر که بتواند یک تجهیز داخل ایستگاه‌های دیگر را پوشش دهد، عدد پوشش را محاسبه می‌کند. ممکن است یک تجهیز در یک ایستگاه توسط دو مرکز تعمیر پوشش داده شود. این امکان زمانی سودمند است که در زمان حضور مأمورین یک مرکز تعمیر در ایستگاه محل خرابی، خرابی دیگری در ایستگاه تحت پوشش همان مرکز اتفاق بیافتد. تابع هدف (۳) تعداد تجهیزات پوشش داده شده در ایستگاه‌ها را بیشینه می‌کند و تابع هدف (٤) هزینه رفت و آمد مأمورین را بر اساس فراوانی خرابی هر تجهیز و فاصله ایستگاه محل خرابی تا مرکز تعمیر

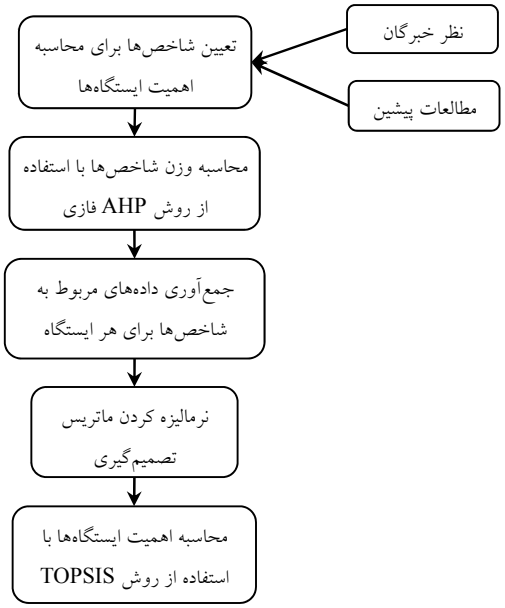
کمینه می‌کند. محدودیت (۵) تضمین می‌کند که هر تجهیز در هر ایستگاه حداقل توسط یک مرکز تعمیر پوشش داده شود. محدودیت (٦) به این نکته اشاره دارد که شرط لازم برای پوشش یک ایستگاه، پوشش کل تجهیزات داخل آن ایستگاه است و اگر یک گروه تجهیز داخل ایستگاه پوشش داده نشود، آن ایستگاه پوشش داده نخواهد شد. محدودیت (۷) به محدود بودن تعداد مراکز تعمیر قابل احداث و بازگشایی اشاره دارد. محدودیت (۸) تضمین می‌کند که اگر یک گروه تجهیز داخل ایستگاه به یک مرکز تعمیر اختصاص یابد، آن مرکز تعمیر باز و آماده ارائه خدمات است و توانایی پوشش آن تجهیز را دارا است. محدودیت (۹) به این نکته اشاره دارد که اگر یک گروه تجهیز داخل ایستگاه توسط یک مرکز تعمیر پاسخ داده شود، آن مرکز تعمیر باز و آماده ارائه خدمات است و محدودیت‌های (۱۰) الی (۱۳) ماهیت باینری متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

۳-۳- محاسبه اهمیت ایستگاه‌ها

برخی مطالعات پیشین به موضوع بررسی شاخص‌ها جهت تعیین اولویت راه‌های ارتباطی در شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای پرداخته‌اند. تامپر و همکاران (Tampère et al., 2007) و نوپ و همکاران (Knoop et al., 2012) سه ویژگی جریان ترافیک روی لینک، ظرفیت لینک و تعداد خطوط لینک را برای محاسبه آسیب‌پذیری لینک در شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای در نظر گرفتند. الرشیدی و مولر (El-Rashidy and Grant-Muller, 2014) ظرفیت پیوند را نسبت به حداکثر ظرفیت همه پیوندهای شبکه در نظر گرفتند تا اهمیت پیوند را منعکس کند. آنها همچنین از طول پیوند و تعداد دفعاتی که یک پیوند جزء کوتاه‌ترین مسیر بین جفت‌های مختلف مبدأ-مقصد است به عنوان دو ویژگی که سطح اهمیت پیوند را نشان می‌دهد استفاده کردند. بابابیک، خادمی و چن (Bababeik, Khademi and Chen, 2018) ٤ شاخص ترافیک ماهانه مسافر، ترافیک ماهانه بار، صادرات و قابلیت خدمات‌رسانی به صنعت را به عنوان ویژگی‌های اصلی برای محاسبه اهمیت لینک‌ها در شبکه ریلی معرفی کرده‌اند. تریپاتی، تانکسال و ورما (Tripathi, Tanksale and Verma, 2022) برای محاسبه اهمیت لینک‌ها و مکان‌یابی بهینه تأسیسات امدادی از تعداد کل قطارهای حامل مسافر فعال، تعداد کل قطارهای باری فعال، تعداد کل واگن‌های خالی که جابجا شده‌اند و سایر ترافیک‌های متفرقه مانند قطارهای حامل مواد سازمانی، محموله‌های با ابعاد بزرگ، اتوبوس‌های ریلی، جرثقیل و آلات ناقله موتور سبک استفاده کرده است. در این مقالات اهمیت هر پیوند سهم آن پیوند را در عملکرد خاص مورد مطالعه نشان می‌دهد. به عنوان مثال در مقاله بابابیک، خادمی و چن (Bababeik, Khademi and Chen, 2018) و تریپاتی، تانکسال و ورما (Tripathi, Tanksale and Verma, 2022) اهمیت پیوندها نشانگر آسیب‌پذیرتر بودن پیوندها در زمان بروز تصادفات است. پیوند با اهمیت بالاتر در این مقالات، نیاز بیشتری به تأسیسات امدادی دارد. در مطالعه پیش‌رو قصد داریم ایستگاه‌ها را از نظر اهمیت آماده‌به‌کاری تجهیزات سیگنالینگ بررسی کنیم. در این مطالعه ایستگاه با اهمیت بالاتر نیاز به رفع سریعتر خرابی تجهیزات سیگنالینگ دارد.

روش کلی برای رتبه‌بندی ایستگاه‌ها بر اساس اهمیت آماده‌به‌کاری تجهیزات سیگنالینگ در شکل ۲ نشان داده شده است. در مرحله اول شاخص‌هایی در نظر گرفته می‌شوند که بحرانی بودن ایستگاه را در شبکه ریلی منعکس می‌کنند. این شاخص‌ها با توجه به پیشینه مطالعات مرتبط و نظرسنجی از خبرگان صنعت ریلی ویژگی‌های مختلف ایستگاه‌ها که نشان‌دهنده اهمیت ایستگاه در شبکه ریلی بودند بدست آمدند. با توجه به هدف این مطالعه، شاخص‌هایی که با موضوع کاهش اختلالات ناشی از خرابی تجهیزات سیگنالینگ مرتبط بودند رتبه‌بندی و انتخاب شدند که در ادامه شرح داده شده است.

هر چه تعداد قطارهای مسافری عبوری از ایستگاه بیشتر باشد، خرابی سیستم سیگنالینگ باعث توقف قطارهای بیشتر و در نتیجه نارضایتی تعداد بیشتری از مسافران می‌شود. با توجه به اینکه تعداد مسافران قطارها متفاوت است بنابراین از شاخص تعداد مسافران عبوری از ایستگاه به جای تعداد قطارهای عبوری استفاده می‌شود.



شکل ۲. روش کلی محاسبه اهمیت ایستگاه‌ها

موقعیت قرارگیری برخی ایستگاه‌ها در نزدیکی صنایع، کارخانجات و شرکت‌های تولیدی و همچنین اقتصادی بودن حمل‌ونقل ریلی در مقایسه با حمل‌ونقل جاده‌ای، صاحبان بار را برای ارسال بار از مسیر ریلی ترغیب می‌کند. توقف و تأخیر قطارهای باری و انتظار صاحبان کالا موجب نارضایتی و از دست رفتن منبع بار می‌شود. هر چه تعداد قطارهای باری عبوری از ایستگاه بیشتر باشد، خرابی سیستم سیگنالینگ باعث توقف قطارهای بیشتر، تأخیر در ارسال بار و نارضایتی تعداد بیشتری از مشتریان می‌شود. بنابراین تناژ بار عبوری، یکی از عوامل تأثیرگذار در تخمین اهمیت ایستگاه از لحاظ آماده‌به‌کاری تجهیزات سیگنالینگ است. در مبحث بار دو موضوع تخلیه و بارگیری مطرح می‌شود. تناژ بارهایی که از ایستگاه‌های نواحی دیگر به مقصد ایستگاه‌های داخل ناحیه بارگیری می‌شوند در آمار تخلیه و تناژ بارهایی که از ایستگاه‌های داخلی به مقصد نواحی دیگر و یا کشورها بارگیری می‌شوند در آمار بارگیری لحاظ می‌شود. موضوع دیگری که در مبحث بار مطرح می‌شود بارهای صادراتی، وارداتی، ترانزیتی و داخلی است. بدلیل قوانین سخت‌گیرانه حمل‌ونقل بین‌الملل در اخذ جریمه تأخیرات، بارهای ترانزیت، صادرات و واردات نسبت به بارهای داخلی دارای اهمیت بیشتری هستند و باید به عنوان شاخص برای تخمین اهمیت ایستگاه‌ها در نظر گرفته شوند.

کنترل ترافیک قطارها در برخی ایستگاه‌ها به شرط سلامت سیستم سیگنالینگ، توسط کنترلر مرکزی ترافیک انجام می‌شود. در مابقی ایستگاه‌ها مأمور کنترل ترافیک در محل ایستگاه حاضر است و هدایت و کنترل ترافیک قطارها بصورت محلی انجام می‌شود. ایستگاه‌های تحت کنترل مرکزی فاقد مأمور کنترل محلی هستند و در صورت خرابی تجهیزات سیگنالینگ میبایست مأمور کنترل محلی از نزدیکترین ایستگاه تشکیلاتی به ایستگاه محل خرابی اعزام شود. تا رسیدن مأمور کنترل محلی به ایستگاه، قطارها متوقف خواهند شد. بنابراین در این مطالعه شیوه کنترل ترافیک بصورت محلی یا مرکزی در تعیین رتبه ایستگاه مؤثر است.

ترتیب قرارگیری دیزل (کشنده) و واگن‌ها در قطار، آرایش قطار نامیده می‌شود. در برخی از ایستگاه‌ها به دلیل نیاز به تغییر در آرایش قطار، عملیاتی موسوم به مانور انجام می‌شود. عملیات مانور با رفت و برگشت قطار یا دیزل مابین خطوط اصلی و فرعی صورت می‌گیرد. خرابی تجهیزات سیگنالینگ عملیات مانور را مختل کرده و در آماده‌سازی آرایش قطار و در نتیجه اعزام و ادامه سیر قطار تأخیر ایجاد می‌کند. بنابراین عامل تعیین کننده بعدی میزان مانور داخل ایستگاه است. اعزام بدون وقفه قطارها از مبدأ حرکت، مهم است. بنابراین ایستگاه‌هایی که مبدأ حرکت هستند در اولویت بالایی برای رفع سریعتر خرابی تجهیزات سیگنالینگ قرار دارند. جدول ۲ پنج شاخص اصلی در نظر گرفته شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. زیرشاخص‌های مربوط به نوع بار و تناژ بارگیری و تخلیه در جدول ۳ و ٤ نمایش داده شده است.

۳-٤- تعیین وزن شاخص‌ها

هر یک از شاخص‌های انتخاب شده با وزن متفاوتی بر عملکرد شبکه تأثیر می‌گذارند. برای تعیین وزن شاخص‌ها از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده می‌کنیم. نمودار سلسله مراتبی جهت تعیین وزن شاخص‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است. ورودی مقایسات زوجی، قضاوت‌های کارشناسان صنعت ریلی است که از طریق یک نظرسنجی مبتنی بر پرسش‌نامه بدست می‌آید و یک ماتریس مقایسه گروهی ترسیم می‌شود.

جدول ۲. شاخص‌های اصلی انتخاب شده

شاخص	تعریف
NP	تعداد مسافر عبوری از ایستگاه در یک ماه
TC	تناژ بار عبوری از ایستگاه
CM	شیوه کنترل ترافیک
MR	میزان مانور در ایستگاه
MO	مبدأ حرکت بودن ایستگاه

جدول ۳. زیرشاخص‌های انتخاب شده برای نوع بار

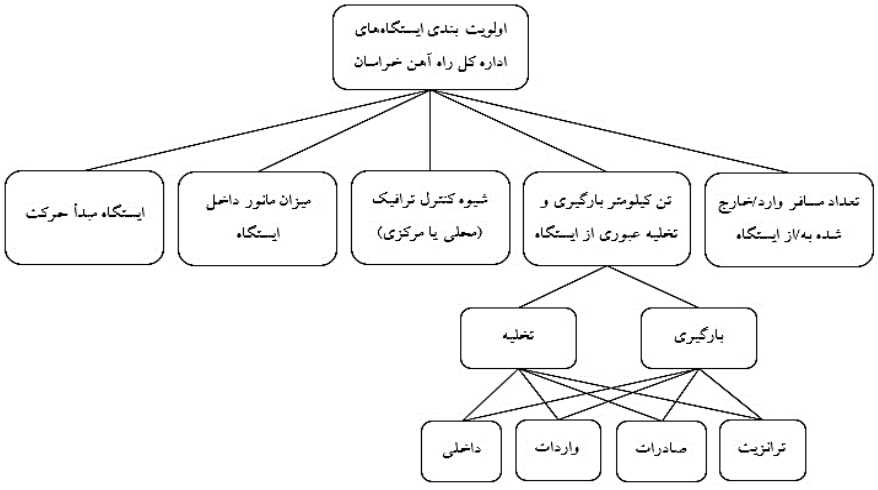
زیر	تعریف
LO	تناژ بار بارگیری شده عبوری
UL	تناژ بار تخلیه عبوری

جدول ٤. زیرشاخص‌های انتخاب شده برای تناژ بارگیری و تخلیه

زیر	تعریف
EX	صادرات
IM	واردات
TR	ترانزیت
IN	داخلی

برای اطمینان از قضاوت‌های شرکت‌کنندگان، شاخص سازگاری بررسی می‌شود که در صورت برقرار بودن این شاخص، ماتریس مقایسات در محاسبه وزن شاخص‌ها در نظر گرفته می‌شود و در غیر اینصورت از کارشناس درخواست می‌شود تا در قضاوت‌های خود تجدید نظر کند. با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی، وزن‌ها برای شاخص‌های NP، TC، CM، MR و MO به ترتیب ۰,۱۹٤، ۰,۰٤٥، ۰,۲۹٥، ۰,۰٦۲ و ۰,٤۰۳ بدست می‌آید. به روش مشابه وزن زیرشاخص‌های LO و UL به ترتیب ۰,٦۹۲ و ۰,۳۰۸ و زیرشاخص‌های EX، IM، TR و IN به ترتیب ۰,۳۳۲، ۰,۲۸۹، ۰,۲۳۱ و ۰,۱٤۸ بدست می‌آید.

در مرحله بعد داده‌های مربوط به هر شاخص در هر ایستگاه برای تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری جمع‌آوری می‌شود. در این ماتریس ردیف‌ها مقادیر شاخص‌های مختلف را برای یک ایستگاه نشان می‌دهد و ستون‌ها نشانگر مقادیر یک شاخص در ایستگاه‌ها است. این داده‌ها ممکن است دارای واحدهای متفاوتی باشند و بنابراین بایستی نرمال شوند. برای بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم‌گیری از روش نرم استفاده می‌شود. پس از نرمال‌سازی ماتریس تصمیم با استفاده از روش تاپسیس (TOPSIS) اهمیت هر ایستگاه محاسبه می‌شود.



شکل ۳. نمودار سلسله مراتبی

٤- روش حل- الگوریتم ژنتیک NSGA-II

مدل ارائه شده در بخش ۳ یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه با دو هدف متناقض یکی کمینه کردن اختلاف پوشش حداکثر با پوشش بدست آمده است و دیگری کمینه کردن هزینه. در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه یک جواب بهینه منحصر به فرد وجود ندارد. هدف یافتن مجموعه جواب‌ها شامل راه‌حل‌های غیر مسلط و تعیین مقدار مبادلات بین اهداف مسئله است. در این مسائل تصمیم‌گیرنده میزان مبادلات بین اهداف را بر اساس سیاست‌ها و منافع سازمان تعیین می‌کند. روش‌های متفاوتی برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه وجود دارد که در دو دسته کلی قرار می‌گیرد. دسته اول روش‌های تجزیه است. در این روش‌ها مسئله بهینه‌سازی چند هدفه با قرار دادن توابع هدف وزین در یک تابع هدف و بدست آوردن راه‌حل بهینه حل می‌شود. محدودیت این روش این است که همه توابع هدف را نمی‌توان در یک تابع هدف واحد ادغام کرد و یک راه‌حل بهینه نمی‌تواند منحصر به فرد باشد. دسته دوم روش‌های مستقیم است که مسائل چند هدفه را به همان صورت چند هدفه حل می‌کند. این روش‌ها به روش‌های اکتشافی معروفند که بدنبال یافتن راه‌حل‌های مرز پارتو هستند. در این روش‌ها ابتدا مسئله با بیان ریاضی مدل‌سازی و سپس به دلیل پیچیدگی با روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و الگوریتم‌های فراابتکاری حل می‌شوند. روش الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات، شبکه‌های عصبی مصنوعی و کلونی مورچه‌گان از این دسته هستند. الگوریتم ژنتیک از مدل‌سازی زیستی جمعیت جانداران بدست آمده است و از تکنیک‌های وراثت، جهش و نخبه‌گرایی بر اساس نظریه داروین برای یافتن نسل بهینه استفاده می‌کند. ما در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) که از حالت‌های چند هدفه الگوریتم ژنتیک می‌باشد با اعمال پاره‌ای تغییرات در جهت بهبود استراتژی نخبه‌گرا استفاده می‌کنیم. دلیل انتخاب الگوریتم فوق از بین سایر الگوریتم‌های تکاملی سرعت تحصیل جواب‌های پارتو، کاهش پیچیدگی‌های محاسباتی سایر الگوریتم‌ها و استفاده از مفهوم فاصله ازدحامی برای بدست آوردن جبهه جواب یکنواخت‌تر نسبت به سایر الگوریتم‌ها است. نحوه کار الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب بکار گرفته شده در این مسئله در شکل ٤ نشان داده شده است. برای مدل‌سازی و محاسبه توابع هدف مسئله و اجرای الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب از نرم‌افزار MATLAB R2015b استفاده شده است.

٤-١- کدگذاری و تعریف پارامترهای الگوریتم ژنتیک

روش کدگذاری کروموزوم در این روش باینری است. آرایش ژنی در این مسئله به عنوان یک متغیر صفر یا یک در نظر گرفته می‌شود که ژن "صفر" به معنای ایستگاه فاقد مرکز تعمیر و ژن "یک" به معنای ایستگاه دارای مرکز تعمیر است. با توجه به تعداد ایستگاه‌های شبکه ریلی طول کروموزوم تغییر می‌کند. در مطالعه ما رشته ژنی شامل ۱۵ عدد باینری صفر و یک است. پارامترهای الگوریتم ژنتیک مطابق جدول شماره ۵ تعریف می‌شود.

٤-١- ایجاد جمعیت اولیه

ما در این مسئله برای ایجاد جمعیت اولیه مراحل زیر را دنبال می‌کنیم.

۱- یک عضو با آرایش ژنی شامل ۱۵ عدد باینری صفر می‌سازیم. (عدد ۱۵ تعداد ایستگاه‌های ما در این مسئله است)

۲- به تعداد حداکثر مراکز تعمیر NR اعداد تصادفی بین ۱ تا ۱۵ (تعداد ایستگاه‌هایی که توانایی تبدیل به مرکز تعمیر را دارند) می‌سازیم. با این کار اندیس ایستگاه‌هایی که مرکز تعمیر در آنها وجود دارد را بصورت تصادفی بدست می‌آوریم.

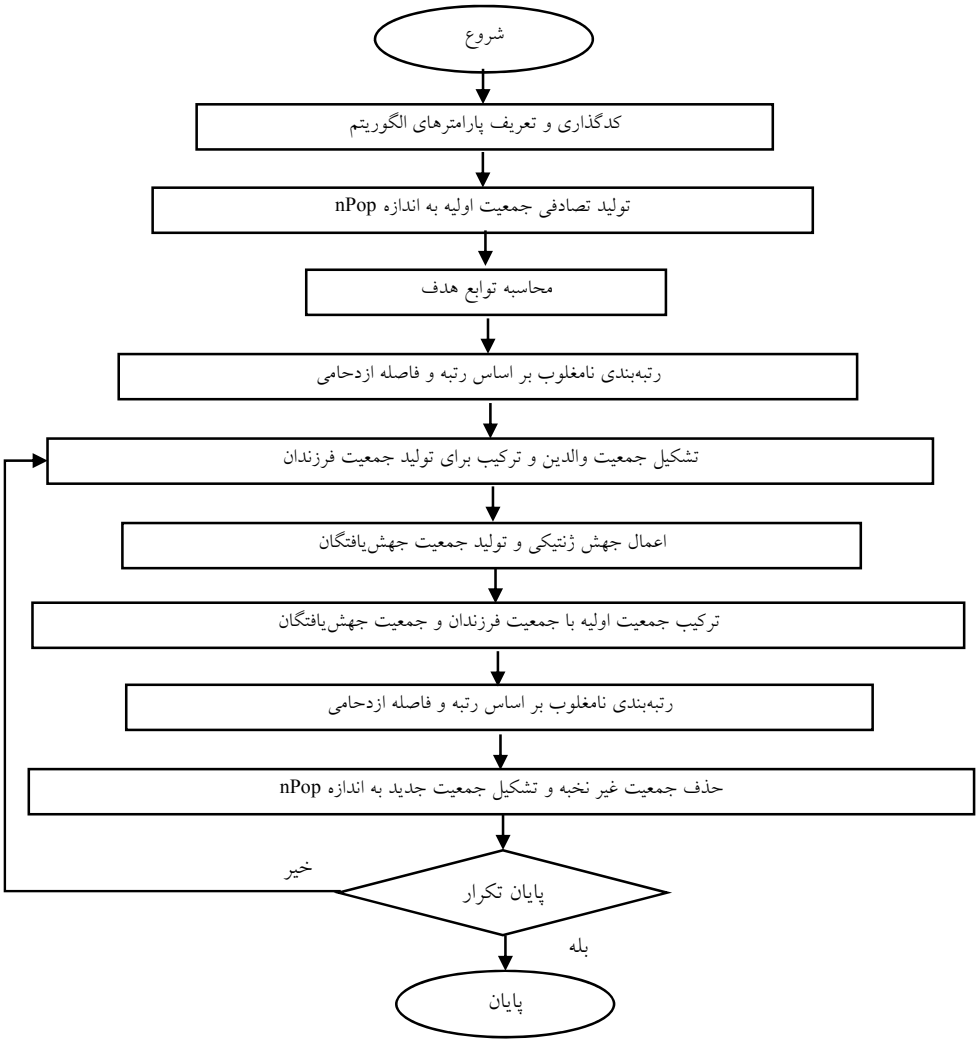
۳- در عضو تشکیل شده در مرحله ۱ سلول‌های مربوط به ایستگاه‌های بدست آمده در مرحله ۲ را یک می‌کنیم. سپس به عضوی دست پیدا می‌کنیم که به تعداد مورد نظر ما مرکز تعمیر دارد.

٤- مراحل ۱ تا ۳ را به تعداد اعضای جمعیت ($nPop$) تکرار می‌کنیم.

پس از انجام مراحل بالا تعداد $nPop$ عضو تصادفی اولیه داریم که در آنها تنها NR مرکز تعمیر وجود دارد.

٤-٢-محاسبه توابع هدف

مقدار توابع هدف در هر مرحله از تولید جمعیت اولیه در متغیری ماتریسی متشکل از یک سطر و چهار ستون شامل مقادیر توابع هدف اول تا چهارم (معادلات ۱ تا ٤) ذخیره می‌شود. با توجه به اینکه سه تابع هدف اول از نوع سود و تابع هدف چهارم از نوع هزینه هستند مقدار بیشینه برای توابع اول تا سوم و مقدار کمینه برای تابع هدف چهارم مطلوب در نظر گرفته می‌شود.



شکل ٤. فلوچارت الگوریتم ژنتیک

جدول ٥. پارامترهای الگوریتم ژنتیک

پارامترهای الگوریتم	
$MaxIt$	حداکثر تعداد تکرار مراحل برای دستیابی به جواب بهینه
$nPop$	اندازه جمعیت
$pCrossover$	احتمال اعمال عملیات ژنتیکی ترکیب (تقاطع) بر روی جمعیت
$nCrossover$	تعداد والدین انتخاب شده برای اعمال عملیات تقاطع
	$nCrossover = 2 * round(pCrossover * \frac{nPop}{2})$
$pMutation$	احتمال اعمال عملیات جهش ژنتیکی بر روی جمعیت فرزندان
$nMutation$	تعداد جمعیت جهش یافتگان
	$nMutation = round(pMutation * nPop)$
mu	میزان جهش روی کروموزوم‌ها

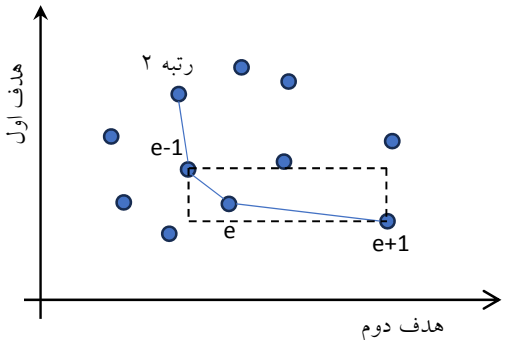
٤-٤- رتبه‌بندی نامغلوب و مفهوم فاصله ازدحامی

برای دستیابی سریع‌تر به مجموعه جواب‌های بهینه، در هر مرحله از تشکیل جمعیت، جواب‌ها را بر اساس ارجحیت مقادیر توابع هدف رتبه‌بندی می‌کنیم. با توجه به اینکه در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه امکان مرتب‌سازی جواب‌ها بصورت صعودی یا نزولی وجود ندارد بنابراین مفهوم رتبه‌بندی نامغلوب مطرح می‌شود. برای مثال اگر $X1$ و $X2$ دو جواب بهینه برای مسئله حداقل‌سازی n هدفه ما باشند و برای همه اهداف، $X1$ برتر از $X2$ باشد یعنی:

$$f_1(X1) < f_1(X2)$$
$$f_2(X1) < f_2(X2)$$
$$\vdots$$
$$f_n(X1) < f_n(X2)$$

آنگاه می‌گوییم $X1$ بر $X2$ مسلط است. اگر $X1$ بر همه جواب‌ها مسلط باشد و تحت سلطه هیچ جوابی نباشد، آنگاه $X1$ یک راه‌حل نامغلوب نامیده می‌شود و جزو مجموعه راه‌حل‌های پارتو است. در مسئله پیش‌رو جواب‌های نامغلوب در هر مرحله با رتبه ۱ برچسب خورده و از کل مجموعه حذف می‌شوند. سپس جواب‌های باقیمانده رتبه‌بندی شده و جواب‌های نامغلوب با برچسب رتبه ۲ از مجموعه حذف می‌شوند. این کار تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که همه جواب‌ها بر اساس مفهوم نامغلوب رتبه‌بندی شوند. پس از اتمام این مرحله جواب‌ها با اهمیت یکسان در رتبه نامغلوب یکسانی قرار می‌گیرند. پس از رتبه‌بندی نامغلوب تمام جواب‌ها چون تمام افراد که در یک رتبه قرار دارند توسط هیچ فردی مغلوب نشده‌اند، از این حیث بر یکدیگر برتری ندارند. اما با مفهوم فاصله ازدحامی که توزیع یکنواخت جواب‌ها را در مرز پارتو تضمین می‌کند می‌توان آن‌ها را بار دیگر رتبه‌بندی نمود. افرادی که در یک رتبه قرار دارند و فاصله ازدحامی آن‌ها بیشتر است، در محل خلوت‌تری قرار گرفته‌اند و اولویت بالاتری برای انتخاب دارند. اگر جواب‌ها همگی در منطقه خاصی از فضای جواب متمرکز شوند، توزیع راه‌حل مرزی پارتو ناهموار بوده و تضمین تنوع جمعیت، دشوار خواهد بود. با این مفهوم فاصله ازدحامی بزرگتر نشان‌دهنده ناحیه کم ازدحام‌تر است. شکل ۷ مفهوم فاصله ازدحامی را نشان می‌دهد. برای تضمین انتخاب شدن افراد در لبه، فاصله ازدحامی آن‌ها بینهایت در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه فاصله ازدحامی فرد e در رتبه r مقدار توابع هدف برای فرد $e+1$ و $e-1$ محاسبه شده و در رابطه زیر قرار می‌گیرد.

$$D_e = \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{\left|f_i^{e+1} - f_i^{e-1}\right|}{\left|f_i^{max} - f_i^{min}\right|}\right) \qquad (۵)$$



شکل ۷. مفهوم فاصله ازدحامی

٤-٥-انتخاب و تشکیل جمعیت والدین بر اساس استراتژی نخبه‌گرا

پس از رتبه‌بندی جمعیت اولیه بر اساس مفهوم غلبه و فاصله ازدحامی نوبت به انتخاب جمعیت والدین برای اعمال عملیات ترکیب و جهش ژنتیکی می‌رسد. همانطور که در شکل ٤ نشان داده شد، این مرحله اولین مرحله از پروسه تکرار در الگوریتم ژنتیک می‌باشد. برای حفظ استراتژی نخبه‌گرا و از دست ندادن جواب‌های مرز پارتو، والدین بصورت زیر انتخاب می‌شوند.

مرحله اول: یک والد بصورت تصادفی از نیمه بالایی افراد مرتب شده انتخاب می‌شود.

مرحله دوم: والد بعدی فردی است که در جمعیت رتبه‌بندی شده بعد از والد اول قرار می‌گیرد. یعنی اگر $parent(i)$ انتخاب شود، والد بعدی $parent(i+1)$ است.

مرحله سوم: مراحل ۱ و ۲ به تعداد $nCrossover/2$ تکرار می‌شود.

٤-٦- عملیات ژنتیک تقاطع و جهش

پس از انتخاب جمعیت والدین ترکیب ژنتیکی (تقاطع) و جهش انجام می‌شود. در این مطالعه از روش ترکیب چند نقطه‌ای استفاده شده است. در این روش ابتدا به تعداد متغیرها بصورت تصادفی صفر یا یک تولید می‌شود. اگر عدد تولید شده صفر باشد، جای کروموزوم بین دو والد جابجا می‌شود و اگر

یک باشد بدون تغییر باقی می‌ماند. حاصل فرزندی است که بخشی از اطلاعات ژنتیکی والدین را به همراه دارد. این عملیات به تعداد $nCrossover/2$ تکرار می‌شود. در هر مرحله در صورت افزایش تعداد یک‌ها و تجاوز از مقدار حداکثر مراکز تعمیر NR، عدد تصادفی تغییر و عملیات تقاطع مجدداً انجام می‌شود. این کار باعث می‌شود از تولید جواب‌های نامطلوب و طولانی شدن الگوریتم جلوگیری شود. پس از تشکیل جمعیت فرزندان نوبت به اعمال جهش ژنتیکی می‌رسد. در این مرحله به تعداد $nMutation$ فرد از بین افراد جمعیت انتخاب شده و عملیات جهش روی آن‌ها اعمال می‌شود. برای اعمال جهش ژنتیکی به تعداد $mu * nVar$ بیت از صفر به یک و برعکس تبدیل می‌شود. برای انتخاب بیت‌هایی که تغییر می‌کنند از تولید اعداد تصادفی استفاده می‌شود. مشابه روش تقاطع، در این روش نیز اگر در هر مرحله تعداد یک‌ها از تعداد حداکثر مراکز تعمیر تجاوز کند، عملیات تکرار می‌شود.

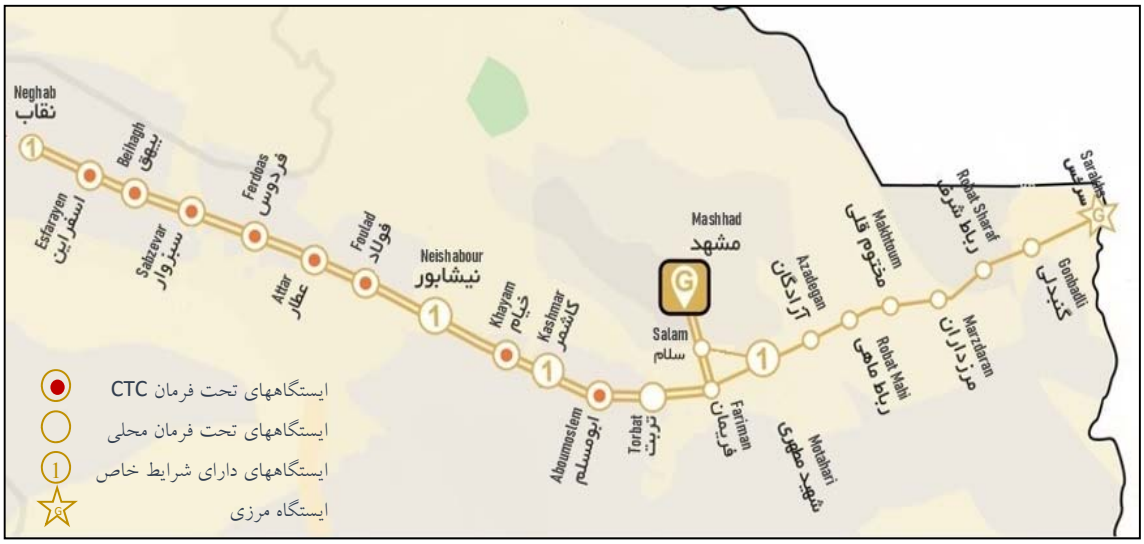
٤-۷- ترکیب جمعیت اولیه با جمعیت فرزندان و جمعیت جهش‌یافتگان، رتبه‌بندی و حذف جمعیت غیر نخبه

جمعیت اولیه، جمعیت فرزندان و جمعیت جهش‌یافتگان با هم ترکیب شده و الگوریتم مرتب‌سازی نامغلوب و فاصله ازدحامی روی آن اعمال می‌شود. حاصل جمعیتی مرتب‌شده به اندازه $nPop + \frac{nCrossover}{2} + nMutation$ است. تعداد $nPop$ فرد نخبه از جمعیت جدید انتخاب شده و مابقی حذف می‌شوند تا جمعیت جدید تولید شود.

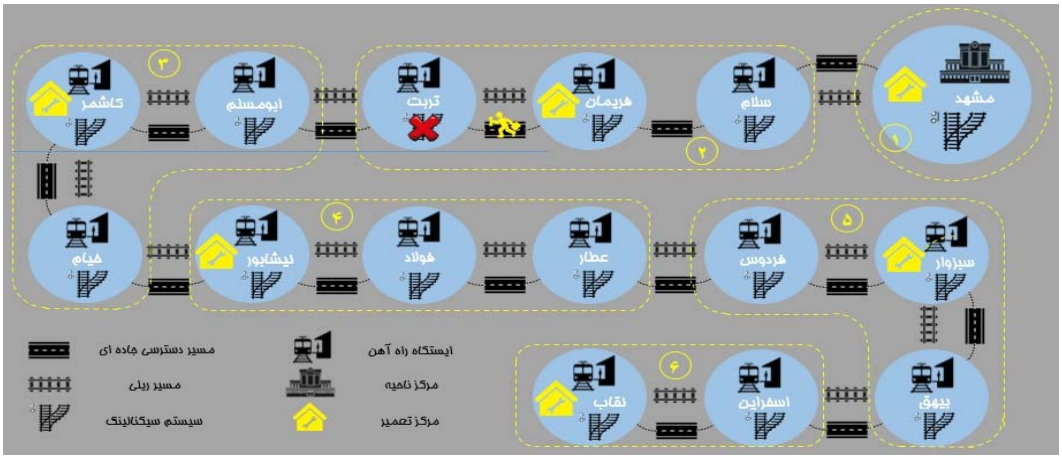
مطالعه موردی اداره کل راه‌آهن منطقه خراسان در ایران

برای آزمودن کاربرد و اثربخشی مدل پیشنهادی در دنیای واقعی، داده‌های آماری مربوط به خرابی تجهیزات سیگنالینگ در ایستگاه‌های راه‌آهن منطقه خراسان که بخش مهمی از شبکه ریلی کشور ایران است را مورد بررسی قرار می‌دهیم. اداره کل راه‌آهن خراسان یکی از نواحی ۲۲گانه راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران است که حوزه استحفاظی آن شامل دو محور مشهد-تهران به طول ۲۷۲ کیلومتر و مشهد-سرخس به طول ۱۵۹ کیلومتر می‌شود. با احتساب خطوط فرعی و مانوری ایستگاه‌ها و خطوط صنعتی، مجموع کل خطوط ریلی در حوزه استحفاظی این اداره کل ۱۲٤۵ کیلومتر می‌باشد. سیستم سیگنالینگ محور مشهد-تهران در سال ۱۳۸۵ تکمیل و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. طبق آمار اتخاذ شده از سالنامه آمار حمل‌ونقل ریلی کشور در سال ۱٤۰۱ این اداره کل با تعداد ٦۷٦ نفر پرسنل، سهم ۲۷ درصدی در جابجایی مسافر و ٤/۵ درصدی در جابجایی بار را در کل کشور داراست. شبکه ریلی مورد بحث در این مطالعه دارای ۲۳ ایستگاه است که نام و موقعیت ایستگاه‌ها در شکل ۸ آورده شده است. در این مطالعه با توجه به قرار گرفتن ایستگاه‌های محور نقاب در مسیر پرتردد مشهد-تهران و تفاوت قابل توجه مشتریان (مسافر و بار)، ۱۵ ایستگاه این محور مورد مطالعه قرار گرفته و از ایستگاه‌های محور سرخس صرفنظر شده است. هم‌اکنون تجهیزات سیگنالینگ ایستگاه‌های محور نقاب با تعداد ٦ مرکز تعمیر و ۳٦ مأمور رفع خرابی نگهداری می‌شوند. مکان فعلی مراکز تعمیر و نحوه تخصیص ایستگاه‌ها به مراکز تعمیر در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده است در زمان اعلام خرابی تجهیزات سیگنالینگ در ایستگاه تربت، مأمور موظف مستقر در مرکز تعمیر ایستگاه فریمان با استفاده از مسیر جاده‌ای خود را به محل خرابی می‌رساند و با صرف زمان مورد نیاز برای تعمیر تجهیز، خرابی را رفع می‌کند و مجدداً به مرکز تعمیر باز می‌گردد. زمان کل تعمیر تجهیز باید کمتر از زمان آستانه تعریف شده برای رفع خرابی تجهیزات باشد. هدف مسئله کمینه کردن زمان تعمیر تجهیز و هزینه سفر است به گونه‌ای که بیشترین پوشش ایستگاه‌های با اهمیت بالاتر حاصل شود.

داده‌های مربوط به فواصل جاده‌ای ایستگاه‌ها و میانگین زمان سفر در طول شبانه‌روز با استفاده از نرم‌افزار گوگل مپ بدست می‌آید. در محاسبات زمان مورد نیاز برای آماده‌سازی تجهیزات و خروج مأمورین از مرکز تعمیرات پس از اعلام خرابی صفر است. تخمین میانگین زمان مورد نیاز برای تعمیر تجهیزات و میانگین فرآوانی خرابی ماهیانه تجهیزات از پایش داده‌های مربوط به خرابی تجهیزات در ۵ سال گذشته (۱۳۹۷-۱٤۰۱) ذخیره شده در نرم‌افزار مدیریت خرابی تجهیزات سیگنالینگ محاسبه می‌شود.



شکل ۸. موقعیت ایستگاه‌های راه‌آهن اداره کل خراسان



شکل ۹. موقعیت فعلی مراکز تعمیر و تخصیص ایستگاه‌های راه‌آهن اداره کل خراسان

با توجه به اینکه مراکز تعمیر در داخل ایستگاه‌ها احداث می‌شود و عموماً ساختمان ایستگاه‌ها دارای اتاق خالی است بنابراین هزینه جابجایی مرکز تعمیر از ایستگاه فعلی به هر ایستگاه نامزد، صفر در نظر گرفته می‌شود. اما احداث مرکز تعمیر جدید با صرفنظر کردن از هزینه ساختمان، نیازمند به‌کارگیری ٦ نیروی تعمیرکار است.

محاسبه اهمیت ایستگاه‌ها

پس از جمع‌آوری داده‌های مربوط به هر شاخص در ایستگاه‌های راه‌آهن منطقه خراسان و بی‌مقیاس کردن مقادیر با استفاده از روش نرم، برای مشخص کردن راه‌حل ایده‌آل و ایده‌آل منفی، ماکزیمم و مینیمم مقادیر هر شاخص روی گزینه‌ها (در این مطالعه ایستگاه‌ها) را محاسبه می‌کنیم. فاصله هر نقطه از نقطه ایده‌آل و نقطه ایده‌آل منفی و همچنین شاخص نزدیکی نسبی را بدست می‌آوریم. هر چه گزینه انتخابی به راه‌حل ایده‌آل نزدیکتر باشد نزدیکی نسبی به عدد یک نزدیکتر خواهد بود. پس از محاسبه شاخص نزدیکی نسبی برای تمام گزینه‌ها، می‌توان گزینه‌ها را رتبه‌بندی نمود. جدول ۷ اهمیت ایستگاه‌های راه‌آهن را از منظر لزوم سلامت تجهیزات سیگنالینگ نشان می‌دهد.

پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب

برای حل مسئله مدل‌سازی شده در زیربخش ۳,۲ از یک کد کامپیوتری در محیط نرم‌افزار MATLAB R2015b استفاده شده است. مدل مسئله با تعریف تعداد ایستگاه‌ها، تعداد مراکز تعمیر و تعداد تجهیزات به همراه داده‌های مربوط به اهمیت هر

ایستگاه، زمان سفر بین ایستگاه‌ها، میانگین زمان رفع خرابی تجهیزات، میانگین فراوانی خرابی هر تجهیز، زمان آستانه رفع خرابی مجاز تجهیزات و فواصل جاده‌ای ایستگاه‌ها پیاده‌سازی شد. الگوریتم با پارامترهای طول کد افراد $nVar = 15$، اندازه جمعیت $nPop = 500$، حداکثر تعداد تکرار $MaxIt = 200$، احتمال تقاطع برابر با $pCrossover = 0.7$ و احتمال جهش $pMutation = 0.4$ و نرخ جهش $mu = 0.02$ راه‌اندازی اولیه شد. پس از اجرای کد الگوریتم مراحل الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب مطابق هفت مرحله عنوان شده در بخش ٤ اجرا شد. نتایج در ادامه شرح داده خواهد شد.

اجرای کد برای تعداد ٦ مرکز تعمیر با پارامترهای اولیه که در بخش قبل شرح داده شد پس از صرف زمان ٥٦ دقیقه و ٤٨ ثانیه نتایج جدول ۸ را در بر داشت. در راه‌حل‌های ارائه شده در جدول ۸ مشهود است که بهبود در یک هدف با تخریب برخی از اهداف دیگر همراه است. با محاسبه ضریب همبستگی پیرسون میزان همبستگی خطی بین توابع هدف بدست می‌آید که عددی بین منهای یک و یک است. نقشه حرارتی در شکل ۹ نشان‌دهنده ضرایب همبستگی برای راه‌حل‌های ارائه شده است.

همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است تابع هدف اول مربوط به پوشش ایستگاه‌های اولویت‌دار با اهداف سوم و چهارم با شدت بیشتر و با هدف دوم با شدت کمتری همبستگی منفی دارد که نشان می‌دهد تلاش برای افزایش پوشش ایستگاه‌های اولویت‌دار، تأثیر مخربی بر مقادیر پوشش تجهیزات و پوشش کل شبکه دارد. حال آنکه همبستگی منفی تابع هدف اول با تابع هدف چهارم که مینیمم‌سازی هزینه است، مطلوب خواهد بود. از طرف دیگر هدف دوم با هدف سوم همبستگی مثبت دارد که نشان می‌دهد به راحتی می‌توان مقدار این دو تابع هدف را بصورت همزمان افزایش یا کاهش داد. تابع هدف دوم با هزینه همبستگی بسیار ضعیفی دارد. تابع هدف سوم با هزینه همبستگی مثبت نسبتاً قوی دارد یعنی افزایش مقدار پوشش تجهیزات، افزایش هزینه را به دنبال خواهد داشت.

نتایج جدول ۸ به همراه نقشه حرارتی ضرایب همبستگی به تصمیم‌گیرنده که یکی از روسای راه‌آهن در اداره کل خراسان با ۲۵ سال تجربه است، داده می‌شود. در شکل ۱۰ مکان مراکز تعمیر و ایستگاه‌های تحت پوشش نشان داده شده است.

جدول ۷. اهمیت ایستگاه‌های راه‌آهن محور نقاب در منطقه خراسان

رتبه	ایستگاه	اهمیت	رتبه	ایستگاه	اهمیت	رتبه	ایستگاه	اهمیت
۱	مشهد	۰,٦۹۲	٦	فردوس	۰,۳۰۸	۱۱	اسفراین	۰,۳۰۸
۲	کاشمر	۰,٦۸۹	۷	عطار	۰,۳۰۸	۱۲	فریمان	۰,۰۲٦
۳	نقاب	۰,٦۸٥	۸	سبزوار	۰,۳۰۸	۱۳	تربت	۰,۰۲٦
٤	ابومسلم	۰,۳۰۸	۹	بیهق	۰,۳۰۸	۱٤	سلام	۰,۰۲۱
٥	خیام	۰,۳۰۸	۱۰	فولاد	۰,۳۰۸	۱٥	نیشابور	۰,۰۰٦

جدول ۸. نتایج اجرای الگوریتم

وضعیت مراکز تعمیر	تعداد مراکز	هزینه (م تومان)	پوشش تجهیزات	پوشش کل شبکه	پوشش ایستگاه‌های اولویت دار	راه حل
010001000101101	٦	٦,۰۹۱۰	۱۲۷	۳۷,۸۳۷٦	۱۰,۲۰۹٤	۱
010001001001101	٦	٦,۰۸۱۲	۱۲۸	۳۸,۲۱۰٦	۱۰,۱٥۹۳	۲
010001001010101	٦	٥,۸۹٥٥	۱۳۱	۳۹,۱۹۱٤	۱۰,۰۷۰٥	۳
010001000101110	٦	٦,۳۰۱۰	۱۳۲	۳۸,٥۸۱۸	۹,٦٥۸٤	٤
010001001001110	٦	٦,۲۹۱۲	۱۳۳	۳۸,۹٥٤۸	۹,٦۰۸۳	٥
010001001010110	٦	٦,۱۰٥٥	۱۳٦	۳۹,۹۳٥٦	۹,٥۱۹٥	٦

همانطور که در شکل نشان داده شده است جانمایی مراکز تعمیر و نحوه تخصیص ایستگاه‌ها از ایستگاه مشهد تا ایستگاه خیام و ایستگاه بیهق در تمامی جواب‌ها یکسان است. در ٤ جواب از ٦ جواب بدست آمده (جواب‌های ۲، ۳، ۵ و ٦) ایستگاه‌های نیشابور و عطار به مرکز تعمیر مستقر در ایستگاه فولاد اختصاص داده شده‌اند و در جواب‌های ۱ و ٤ ایستگاه‌های نیشابور، فولاد و فردوس به مرکز تعمیر مستقر در ایستگاه عطار تخصیص یافته‌اند. با توجه به اینکه مأمورین موظف مراکز تعمیر، از شهرهای اطراف ایستگاه‌های راه‌آهن بصورت شیفت‌های ۱۲ ساعته در محل کار حاضر می‌شوند نزدیک بودن مراکز تعمیر به شهر نقاب و نیشابور دارای اولویت است. با توجه به جدول ۸ کمترین هزینه عملیات نگهداری و تعمیر تجهیزات مربوط به راه‌حل ۳ است. این راه حل نسبت به راه‌حل‌های ۱ و ۲ دارای مقادیر بهتری در توابع هدف ۲، ۳ و ٤ است. مراکز تعمیر در این راه‌حل به شهر نیشابور و نقاب نزدیکتر است. بنابراین این راه‌حل مطلوب‌تر به نظر می‌رسد.

شکل ۱۱ و جدول ۹ مقایسه این راه‌حل با جانمایی و نحوه تخصیص فعلی را نشان می‌دهد. بر اساس خروجی الگوریتم، در طرح فعلی ایستگاه بیهق پوشش داده نمی‌شود. بنابراین راه حل موجود علی‌رغم نتایج خوبی که در مقادیر توابع هدف ایجاد می‌کند به دلیل محدودیت عدم پوشش ایستگاه بیهق قابل قبول نیست.

تحلیل حساسیت

پارامترهای ورودی در مدل‌سازی انجام شده شامل زمان سفر، میانگین زمان رفع خرابی، میانگین تعداد خرابی ماهیانه و زمان آستانه برای رفع خرابی تجهیزات است. هر کدام از این پارامترها تأثیر متفاوتی روی مقدار توابع هدف و مکان‌یابی مراکز تعمیر دارد. با تغییر پارامترهای ورودی مطابق جداول زیر می‌توان میزان تأثیر روی مقدار توابع هدف را سنجید.

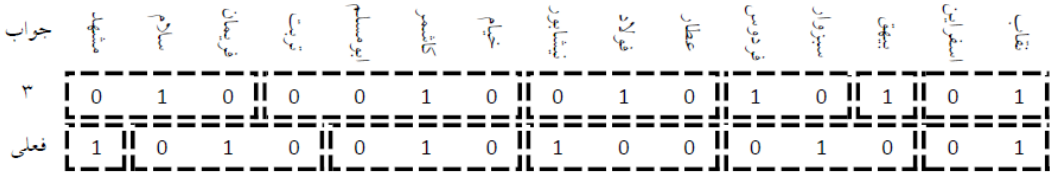
شکل ۹. نقشه حرارتی ضرایب همبستگی توابع هدف

جواب	مشهد	سلام	فریمان	تربت	ابومسلم	کاشمر	خیام	نیشابور	فولاد	عطار	فردوس	سبزوار	بیهق	اسفراین	نقاب
۱	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1
۲	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1
۳	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1
٤	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0
۵	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0
٦	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0

شکل ۱۰. جانمایی مراکز تعمیر و نحوه تخصیص ایستگاه‌ها

جدول ۹. مقایسه مقادیر توابع هدف

وضعیت مراکز تعمیر	تعداد مراکز	هزینه (م تومان)	پوشش تجهیزات	پوشش کل شبکه	پوشش ایستگاه‌های اولویت دار	راه حل
010001001010101	٦	٥,٨٩٥٥	۱۳۱	۳۹,۱۹۱٤	۱۰,۰۷۰٥	۳
101001010001001	٦	٤,٩٢١٤	۱٤۰	٤۰,٦۷۳۷	۹,۹٦۱۱	فعلی

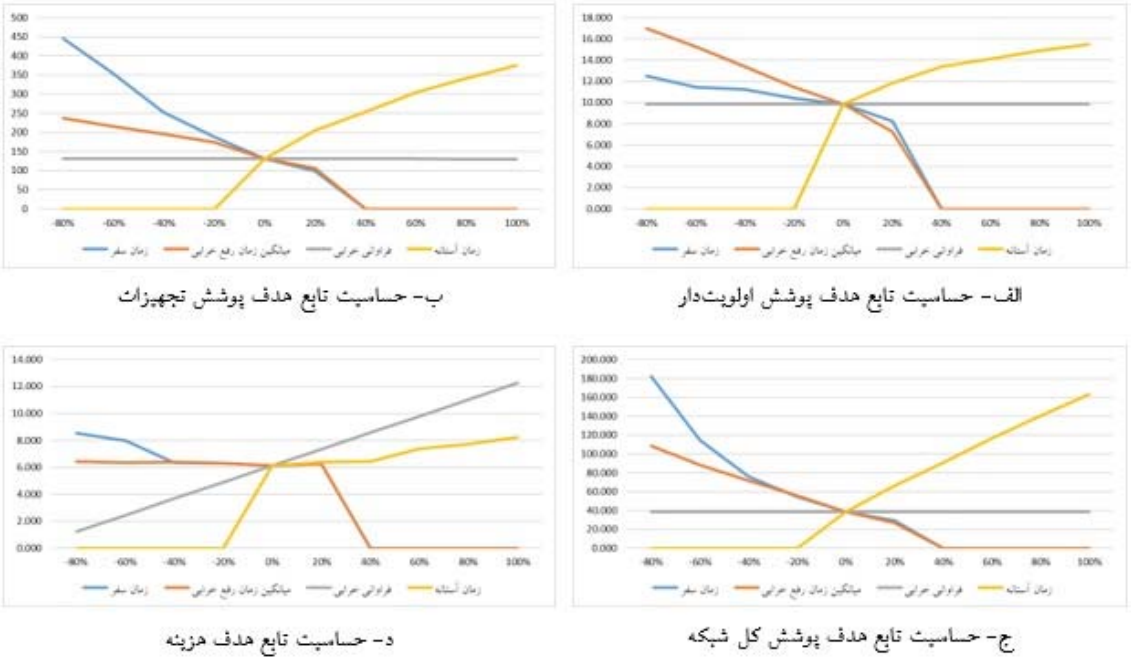


شکل ۱۱. مقایسه جانمایی مراکز تعمیر و نحوه تخصیص فعلی ایستگاه‌ها با جواب ۳

برای این منظور مقادیر پارامترهای ورودی مدل را از منفی ۸۰ درصد تا مثبت ۱۰۰ درصد تغییر می‌دهیم و مقادیر توابع هدف را بدست می‌آوریم. نمودار میزان تغییرات مقادیر توابع هدف نسبت به تغییرات مقادیر پارامترهای ورودی در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. آنچه در اشکال فوق مشهود است این است که تغییر کوچک روی پارامتر ورودی زمان آستانه تعمیر تجهیزات تغییر بسزایی روی توابع هدف دارد. به گونه‌ای که ۲۰ درصد کاهش زمان آستانه باعث می‌شود که مسئله جواب قابل قبول نداشته باشد. یعنی با کاهش زمان آستانه به میزان ۲۰ درصد، عدد پوشش ایستگاه‌ها و تجهیزات به عدد صفر متمایل می‌شود. افزایش زمان آستانه باعث بهبود توابع هدف خواهد شد. این بهبود با شیب بیشتری در مورد تابع هدف پوشش تجهیزات اتفاق می‌افتد و کمترین میزان بهبود را روی تابع هدف هزینه خواهد داشت. همانطور که در شکل ۱۱.د نشان داده شده است، پارامتر ورودی تعداد خرابی تجهیزات نسبت مستقیم با تابع هدف هزینه دارد. یعنی هر چه تعداد خرابی تجهیزات در ایستگاه‌ها بیشتر شود به دلیل بیشتر شدن رفت و آمد تعمیرکاران، هزینه بیشتر خواهد شد. تغییرات مثبت و منفی روی پارامتر فوق تأثیری روی مقادیر توابع هدف دیگر نخواهد داشت. این موضوع در اشکال ۱۱. الف تا ۱۱.ج مشهود است.

کاهش پارامتر زمان سفر باعث بهبود توابع هدف خواهد شد. این بهبود با شیب بیشتری در مورد توابع پوشش کل شبکه و پوشش تجهیزات اتفاق می‌افتد. افزایش زمان سفر به میزان ٤۰ درصد باعث می‌شود پوشش مورد انتظار برای ایستگاه‌ها بدست نیاید و مسئله بدون جواب خواهد شد. این موضوع در مورد پارامتر ورودی میانگین زمان رفع خرابی نیز صادق است.

با توجه به نکات مطرح شده چنانچه زمان سفر با مسیریابی درست و سرعت بیشتر وسیله نقلیه و همچنین میانگین زمان رفع خرابی تجهیزات با آموزش تعمیرکاران و تدوین دستورالعمل‌ها کاهش یابد، شاهد افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقادیر توابع هدف خواهیم بود.



شکل ۱۱. حساسیت توابع هدف به تغییر پارامترهای ورودی مسئله

٦- مراجع

-مجله الکترونیکی سالنامه آمار حمل‌ونقل ریلی کشور در سال ۱۴۰۱ به آدرس:https://www.rai.ir

-Alizadeh, R., Nishi, T., (2020). Hybrid Set Covering and Dynamic Modular Covering Location Problem: Application to an Emergency Humanitarian Logistics Problem. *Applied Sciences,* 10(20), 7110. **doi.org/10.3390/app10207110**

-Bababeik, M., Khademi, N., Chen, A., (2018). Increasing the resilience level of a vulnerable rail network: The strategy of location and allocation of emergency relief trains. Transp. Res. Part E Logist. *Transp. Rev. 119,* 110–128. **doi.org/10.1016/j.tre.2018.09.009**

-Chan, H., Filos-Ratsikas, A., Li, B., Li, M., Wang, C., (2021) "Mechanism Design for Facility Location Problems: A Survey . *arXiv:2106.03457.* **doi.org/10.48550/arXiv.2106.03457**

-Church, R., Drezner, Z., (2022). Review of obnoxious facilities location problems. *Computers & Operations Research.* **doi.org/10.1016/j.cor.2021.105468**

-Dönmez, Z., Y. Kara, B., Karsu, Ö., Saldanha-da-Gama, F., (2021). Humanitarian facility location under uncertainty: Critical review and future prospects. *Omega 102*, 102393. **doi.org/10.1016/j.omega.2021.102393**

-Drezner, T., Drezner, Z., Kalczynski, P., (2019). A directional approach to gradual cover. TOP, 27(1), 70–93. **doi.org/10.1007/s11750-018-00493-y**

-El-Rashidy, R.A., Grant-Muller, S., (2014). An assessment method for highway network vulnerability. *J. Transp. Geogr. 34*, 34–43. **doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.10.017**

-Eydi, A., Torabi, H., (2019). A Maximal Covering Problem in Supply Chain Considering Variable Radius and Gradual Coverage with the Choice of Transportation Mode. *Arabian Journal for Science and Engineering,* 44(8), 7219–7233. **doi.org/10.1007/s13369-018-3595-2**

- Mohri, S., Akbarzadeh, M., Sayed Matin, H., (2020). A Hybrid model for locating new emergency facilities to improve the coverage of the road crashes. *Socioecon. Plann. Sci. 69, 100683.*

doi.org/10.1016/j. seps.2019.01.005

- Pourrezaie-Khaligh, P., Bozorgi-Amiri, A., Yousefi-Babadi, A., Moon, I., (2022). Fix-and-optimize approach for a healthcare facility location/network design problem considering equity and accessibility: A case study. **doi.org/10.1016/j.apm.2021.09.022**

- Rodriguez, S.A., De la Fuente, R.A., Aguayo, M.M., (2020). A facility location and equipment emplacement technique model with expected coverage for the location of fire stations in the Concepción province, Chile .*Computers & Industrial Engineering*.

doi.org/10.1016/j.cie.2020.106522

-Sarma, D., Das, A., Bera, U. K., (2020). Uncertain demand estimation with optimization of time and cost using Facebook disaster map in emergency relief operation. *Applied Soft Computing, 87*, 105992. **doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105992**

-Shao, J., Liang, C., Liu, Y., Xu, J., Zhao, S., (2021). Relief demand forecasting based on intuitionistic fuzzy case-based reasoning . *Socio-Economic Planning Sciences*, 74,100932. **doi.org/10.1016/j.seps.2020.100932**

- Sipu, R., Puspita, F. M., Romelda, S., Fikri, A., Susanto, B., Kaban, H., (2019) "Set covering models in optimizing the emergency unit location of health facility in Palembang. *Journal of Physics. ConferenceS,* 1282, 012008.

doi.org/10.1088/1742-6596/1282/1/012008

-Sunarin, C., Ornurai, S., (2021). Optimal railway station locations for high-speed trains based on partial coverage and passenger cost savings. *International Journal of Rail Transportation.* **doi.org/10.1080/23248378.2020.1719372**

- Gazani, M. H., Niaki, S. A. A., Niaki, S. T. A., (2021). The capacitated maximal covering location problem with heterogeneous facilities and vehicles and different setup costs: An effective heuristic approach. *International Journal of Industrial Engineering Computations,* 79–90.

doi.org/10.5267/j.ijiec.2020.9.002

-Habibi, R., Panjaitan, A. C., (2022). A Model for Blood Bank Facility-Location Problem at Post Disaster Area. *ADI Journal on Recent* Innovation, 4(2), 128–137. **doi.org/10.34306/ajri.v4i2.849**

- Hashemi, S.E., Jabbari, M., Yaghoubi, P., (2022). A mathematical optimization model for location Emergency Medical Service (EMS) centers using contour lines. *Healthcare Analytics.* **doi.org/10.1016/j.health.2022.100026**

- Jiang, P., Liu, X., Zheng, M., (2019). Emergency Blood Demand Forecasting after Earthquakes. *IFAC-PapersonLine*, 52(13), *773–777.* **doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.209**

- Jingni G., Qian D., Zhenggang H., (2021). A method to improve the resilience of multimodal transport network: Location selection strategy of emergency rescue facilities. *Computers & Industrial Engineering 161 (2021) 107678.*

doi.org/10.1016/j.cie.2021.107678

-Kchaou-Boujelben, M., (2021). Charging station location problem: A comprehensive review on models and solution approaches. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies.* **doi.org/10.1016/j.trc.2021.103376**

-Knoop, V., Snelder, M., van Zuylen, H., Hoogendoorn, S., (2012). Link-level vulnerability indicators for real-world networks. *Transport. Res. A: Pol. Pract. 46 (5),* 843–854. **doi.org/10.1016/j.tra.2012.02.004**

-Wang, H., Zhou, J., (2023). Location of Railway Emergency Rescue Spots Based on a Near-Full Covering Problem: From a Perspective of Diverse Scenarios. *Sustainability 15,* 6833. **doi.org/10.3390/su15086833**

- Wang, Y., Wang, J., Chen, J., Liu, K., (2023). Optimal Location of Emergency Facility Sites for Railway Dangerous Goods Transportation under Uncertain Conditions. *Applied Sciences. 13, 6608.* **doi.org/10.3390/app13116608**

- Yang, L., Yun, Y., Jieyi, S., Wei, G., (2021). Emergency response facility location in transportation networks: A literature review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(2), 153-169. **doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.001**

- Yu-Ting, H., Shangyao, Y., Powei, H., (2021). The depot and charging facility location problem for electrifying urban bus services. *Transportation Research Part D: Transport and Environment.*
doi.org/10.1016/j.trd.2021.103053

- Zomer, J., Bešinović, N., d. Weerdt, M., M.P. Goverde, R., (2021). The Maintenance Location Choice Problem for railway rolling stock. *Journal of Rail Transport Planning & Management 20 (2021) 100268.* **doi.org/10.1016/j.jrtpm.2021.100268**

-Tampère, C., Stada, J., Immers, B., Peetermans, E., Organe, K., (2007). Methodology for identifying vulnerable sections in a national road network.*Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board 2012*, 1–10. **doi.org/10.3141/2012-01**

-Tripathi, G., N. Tanksale, A., Verma, M., (2022). Optimal location of accident relief facilities in a railway network. Safety Science 146 (2022) 105560.

doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105560

-Troian, R., Tessari Santos, G., Alexandre Celestino Campos, R., (2023). Analysis of the location problem of emergency attendance teams for a railroad through optimization. *International Transactions in Operational Research*. **doi.org/10.1111/itor.13279**

- Tsai, Y., Chang, K. W., Yiang, G.T., Lin, H.J., (2018). Demand Forecast and Multi- Objective Ambulance Allocation. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence,* 32(07), 1859011. **doi.org/10.1142/S0218001418590115**

Designing the Location Model and Allocation of Signaling Equipment Repair Centers in the Priority Stations of the Railway Network

Alireza Hamidieh, Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.
Mohammadreza Pilehvar Shahri, Department of Industrial Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

E-mail: hamidieh@pnu.ac.ir

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT

The location problems of repair centers in the railway network have been developed to quickly and cheaply solve the failure of signaling equipment. The signaling system in railway stations guarantees the safety and smooth running of passenger and freight trains. Failure of signaling equipment is inevitable, which leads to disruption of train movement and dissatisfaction in the customer community (passengers and goods owners). Hence, it is important to quickly fix equipment failure in priority stations. The signaling equipment of each station includes interlocking, track circuit, machine needle, signal light, and axle counter. This equipment has an average monthly failure frequency, average repair time, and different thresholds for fixing the failure. This study investigates the disturbance caused by the failure of signaling equipment with the importance of stations and the average frequency of equipment failure. Importance indices were extracted to prioritize the stations. The weighting of the indicators was done using the fuzzy hierarchical analysis method. Then, the stations were prioritized based on their importance using the TOPSIS multi-criteria decision-making method. In the following, a multi-objective optimization model of location and allocation is developed to maximize the coverage of the entire maintenance network and reduce the time and cost of troubleshooting. To solve the model, the method of genetic algorithm of non-dominant sorting is used. The data of signaling equipment failure in Mashhad-Tehran railway stations is analyzed as a case study and the importance of stations and demand points is calculated. Comparing the output results with the current status of the repair centers in this study shows that the new location of the repair centers and how the stations are allocated improves the coverage number of the priority stations.

Keywords: Location, Coverage, Signaling, Railway, Prioritization, Genetic Algorithm