

## افزایش تاب آوری شبکه حمل و نقل ریلی با تکیه بر مکانیابی بهینه سازمان قطار نجات

مقاله علمی - پژوهشی

مصطفی باباییک\*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران، ایران

کامبیز بهنیا، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

نوید خادمی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mostafa.ba@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵

صفحه ۲۳۲-۲۱۷

### چکیده

یک سیستم ریلی تاب آور قابلیت آن را دارد که در صورت افت عملکرد آن در اثر سانحه، طی زمان معقولی به حالت عملکرد عادی خود بازگردد. در این مقاله روشی برای افزایش تاب آوری شبکه ریلی از طریق مکانیابی بهینه سازمان قطار امداد و نجات به منظور بازگشایی سریع محور ریلی مسدود شده در اثر سانحه و نیز تخصیص آن به بلاک‌های ریلی آسیب‌پذیر شبکه ارائه شده است. بدین منظور، شاخص در معرض آسیب بودن برای تعیین آسیب‌پذیری هر بلاک ریلی بر حسب میزان اهمیت آن در عملکرد شبکه و سطح دسترسی آن به جاده به عنوان یک سیستم پشتیبان در امداد رسانی معرفی می‌گردد. با توجه به شرایط عملیاتی ویژه مساله، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح دوهدفه به منظور حداکثر کردن پوشش مشارکتی بلاک‌های آسیب‌پذیر شبکه و نیز حداقل نمودن زمان سفر امداد پیشنهاد شده است. برای حل این مدل از روش اپسیلون-محدودیت تقویت شده (AUGMECON) برای تعیین جواب‌های بهینه پارتو استفاده شده است. برای نشان دادن کاربرد واقعی متدولوژی ارائه شده در این مقاله، شبکه ریلی ایران به عنوان مطالعه موردی انتخاب و نتایج آن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری، تاب آوری، شبکه ریلی، مکانیابی قطار نجات

### ۱- مقدمه

اقدامات خرابکارانه این سیستم حمل و نقلی را تهدید می‌نماید. هرچند بروز این سوانح غیرقابل اجتناب است ولی زمانی سبب فجایای مصیبت بار می‌شوند که در موقعیت‌های آسیب‌پذیر آن وارد شوند. یک سیستم ریلی تاب آور قابلیت آن را دارد که در مواجهه با سانحه به اندازه کافی مقاوم بوده و در صورت افت عملکرد بخشی از آن در اثر وقوع سانحه، طی زمان معقولی به حالت عملکرد عادی پیش از سانحه بازگردد. اقدامات انجام شده برای افزایش تاب آوری دامنه وسیعی از اقدامات (پس از پیشگیرانه (قبل از وقوع سانحه) و اقدامات تطبیقی (پس از

سیستم‌های حمل و نقل یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های یک جامعه هستند که جابجایی انسان و کالا را فراهم نموده، کسب و کارهای مختلف را بهم متصل کرده و از زنجیره تأمین و خدمات آن جامعه پشتیبانی می‌نمایند. در میان زیرساخت‌های عمده حمل و نقل، سیستم حمل و نقل ریلی به دلیل قابلیت اطمینان زیاد، بهره‌وری بسیار بالای انرژی و عدم تاثیر پذیری از شرایط نامساعد آب و هوایی دارای اهمیت فراوانی است. با این حال آسیب‌های مختلفی اعم از حوادث طبیعی مانند سیل، زلزله و ماسه روانی، حوادث ناشی از تصادفات ریلی و یا

## ۲- پیشینه تحقیق

مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه برگشت پذیری سیستم‌های حمل‌ونقل، بر اهمیت این مفهوم در ارزیابی زیرساخت‌های یک جامعه در مواجهه با دامنه وسیعی از مخاطرات و آسیب‌ها تأکید می‌نماید. با این وجود، در میان متون فنی توافق بر سر موضوعات مهمی از قبیل آنکه چطور تاب آوری تعریف، ارزیابی و اندازه‌گیری شود، وجود ندارد. در برخی مطالعات، برگشت‌پذیری بصورت توانایی یا قابلیت یک موجود برای احیا یا برگشتن به وضعیت اولیه خود در اثر تغییر حالت ناشی از یک پیامد طبیعی یا انسانی تعریف شده است. با چنین دیدگاهی، نخستین بار هولینگ [Holling, 1973]. برگشت‌پذیری را توانایی یک سیستم در جذب تغییرات و تداوم عملکرد خود پس از تغییرات ایجاد شده تعریف نمود. نوریس و همکاران [Norris et al., 2008] تاب آوری را فرآیندی توصیف کرده‌اند که در آن ظرفیت‌های سازگاری توسط سیستم مورد نظر برای فراهم نمودن مسیر مثبتی از عملکرد و سازگاری پس از سانحه ایجاد می‌شود. لانگ‌استاف و همکاران [Longstaff et al., 2010] تاب آوری را بصورت ظرفیت یک سیستم برای جذب اختلالات، تحمل تغییرات، و حفظ عملکرد، ساختار و هویت آن تعریف کرده‌اند. در این گروه از مطالعات بر اقدامات پیش از سانحه به عنوان ابزاری که منجر به افزایش مقاومت درونی سیستم و یا پیش‌بینی سانحه و آمادگی در برابر آن می‌شود، تأکید شده است. در گروه دیگری از مطالعات، علاوه بر مقاومت سیستم در برابر آسیب، به سرعت آن در بازگشت به شرایط پایدار اولیه و یا جدید در تعریف برگشت‌پذیری تأکید شده است.

کانسیل [Council, 2009] برگشت‌پذیری را قابلیت یک سیستم زیرساختی در جذب اثرات یک رویداد، انطباق با آن و یا بازگشت سریع از وضعیت نامطلوب رخ داده برمی‌شمارد. گیلبرت [Gilbert, 2016] در مطالعه خود توانایی یک سیستم در حداقل نمودن هزینه‌های ناشی از یک سانحه و بازگشت به وضعیت اولیه و یا شرایط بهتر از آن در کوتاه‌ترین زمان ممکن را برگشت‌پذیری آن سیستم تلقی می‌نماید. آنچه که در هر دو گروه از تعاریف فوق برمی‌آید این است که بر قابلیت بازگردانی یک سیستم به حالت پیشین یا حالت پایدار جدید به عنوان یکی از اجزای اصلی تاب آوری تأکید شده

سانحه) را دربرمی‌گیرد. سرعت در ارائه امداد و نجات برای مکان‌های آسیب پذیر شبکه یکی از اقداماتی است که سبب افزایش تاب آوری سیستم حمل و نقلی مورد نظر خواهد شد. یک سیستم ریلی کارا، سیستمی است که خدمات امداد رسانی را برای تمام نقاط شبکه به ویژه نقاط آسیب‌پذیر آن فراهم کرده و بازسازی خط را جهت برقراری سریعتر ترافیک مسیر مهیا سازد. آنچه در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد، ارائه راهکاری برای افزایش تاب آوری شبکه راه‌آهن از منظر افزایش سرعت پاسخ (عکس العمل) سیستم در برابر سانحه از طریق مکانیابی تجهیزات امداد ریلی موسوم به سازمان قطار نجات می‌باشد.

در حال حاضر، موقعیت سازمان قطار نجات در راه‌آهن به روش تجربی و با در نظرگیری امکانات موجود تعیین می‌شود و تاکنون هیچ دستورالعمل یا راهکار علمی که برای استقرار چنین تجهیزاتی در راه‌آهن پیشنهاد شود، وجود نداشته است. در چنین شرایطی و در صورت عدم پیش‌بینی وسایل امدادی برای مکان‌های آسیب پذیر شبکه، تاخیرهای طولانی در اثر مسدودی خط بر آن تحمیل خواهد شد. برای مثال در یک مورد می‌توان به حادثه خروج از خط قطار در تونل شماره ۴۶ بلاک تنگ پنج- تنگ هفت در محور جنوب اشاره نمود که بعلت کشیده شدن واگن بر روی ریل، ۲۵۰ متر از طول خط بطور کامل تخریب گردید؛ در اثر این سانحه، محور جنوب به مدت ۴۱ ساعت مسدود بوده است. از علل طولانی شدن زمان جمع آوری سانحه، عدم وجود تجهیزات امداد ریلی و عدم دسترسی بلاک مورد نظر به جاده جهت پشتیبانی از امداد تشخیص داده شده است. در ادامه این مقاله، مطالب به شرح زیر بیان شده است. فصل دوم به بیان مروری بر ادبیات برگشت‌پذیری در سیستم‌های حمل‌ونقل می‌پردازد. در فصل سوم، روش اندازه‌گیری برگشت‌پذیری به همراه شیوه پیشنهادی برای استقرار سازمان قطار نجات بیان خواهد شد. همچنین در این فصل، روش حل مدل پیشنهادی ارائه می‌شود. تحلیل و بررسی نتایج بدست آمده از پیاده‌سازی روش پیشنهادی این مقاله برای شبکه ریلی ایران در فصل چهارم ارائه شده است. در پایان، فصل پنجم به بیان دستاوردها و نتایج بدست آمده از این مقاله می‌پردازد.

Ip and Bruneau, 2007] معرفی گردید. آی‌پی و ونگ [Ip and Wang, 2011] تاب آوری را در یک شبکه حمل و نقل شهری از طریق تعداد متوسط مسیرهای قابل اطمینانی که یک گره را به سایر گره‌های شبکه متصل میکند مورد بررسی قرار داده‌اند. چن و میلر هوک [Chen and Miller-Hooks, 2012] تاب آوری را در شبکه‌های حمل و نقل چندوجهی کالا مورد بررسی قرار دادند. آنها برای تعیین میزان برگشت-پذیری، بخش مورد انتظاری از تقاضا را که می‌توان با هزینه‌های مشخصی پس از وقوع سانحه پاسخ داد، برآورد نموده‌اند. باهان و همکاران [Adjety-Bahun et al., 2016] در مطالعه خود از مشخصه‌های هندسی شبکه که در تئوری گراف مطرح می‌شوند، مانند میانی مرکزی<sup>۲</sup> هر گره و متوسط کوتاهترین مسیر، برای تعیین میزان تاب آوری شبکه استفاده کرده‌اند. باواتراتان و پاتیل [Bhavathrathan and Patil, 2015] تاب آوری شبکه راه‌های شهری را با استفاده از معیار زمان سفر مورد انتظار سیستم برای سطوح مختلف ظرفیت کمان تعیین کرده‌اند. بررسی مطالعات فوق نشان می‌دهد نیاز به رویکردی که بتوان میزان برگشت‌پذیری یک شبکه ریلی را با تکیه بر قابلیت سرعت بازگشت آن به حالت پایدار سنجید، وجود دارد، چراکه اغلب مطالعات موجود با تکیه بر تغییرات تقاضا قبل و بعد از سانحه به اندازه‌گیری آن پرداخته‌اند. از سویی شاخص‌های هندسی شبکه بدون در نظرگیری ویژگی‌های عملکردی آن نیز به تنهایی قادر به تعیین میزان تاب آوری در یک شبکه ریلی نمی‌باشد. در این مطالعه، روشی پیشنهاد شده است معیاری برای اندازه‌گیری بهبود عملکرد شبکه ریلی در اثر یک اقدام بهینه برای امدادسانی توسعه یافته است. همچنین روشی نوین برای جانمایی تجهیزات امداد ریلی با در نظرگیری میزان آسیب‌پذیری کمان‌های یک شبکه ریلی پیشنهاد شده است.

### ۳- مدل‌سازی

#### ۳-۱ بیان مسأله

در این مطالعه، شبکه ریلی براساس تئوری گراف بصورت مجموعه‌ای از گره‌ها و کمان‌ها که به ترتیب نشان دهنده ایستگاه‌ها و بلاک‌های ریلی می‌باشد، نشان داده می‌شود. منظور از سازمان قطار نجات در نظر گرفته شده در این پژوهش، تجهیزات سخت افزاری آن شامل لوکوموتیو، جرثقیل ریلی و

است. در عین حال، بر اقداماتی که مربوط به قبل از رخداد سانحه می‌باشند (اقداماتی که نوعاً مربوط به پیش‌بینی، آمادگی، مراقبت یا مقاومت آن سیستم در برابر سانحه اشاره دارند) نیز بطور صریح یا ضمنی اشاره شده است.

تاکنون متدولوژی‌های مختلفی در متون فنی برای ارزیابی برگشت‌پذیری سیستم‌های حمل و نقل پیشنهاد شده است که برخی بصورت کیفی، برخی بصورت کمی، و برخی رویکردها بصورت کیفی-کمی ارائه شده‌اند. از جمله این تحقیقات می‌توان به کارهای انجام شده توسط کوکس و پراگر و رز [Cox, Prager and Rose, 2011]، دوربریتس [Dorbritz, 2011]، لئو، عباس و کورتیس [Leu, Abbass and Curtis, 2010]، رنچلر و همکاران [Renschler et al., 2010]، چانگ و میلز [Chang and Miles, 2004]، میلز و چانگ [Miles and Chang, 2003] و برونو و همکاران [Bruneau et al., 2003] اشاره کرد. با اینحال هولانجل، نمث و دکر [Hollnagel, Nemeth and Dekker, 2008] در تحقیق خود به این نکته تاکید می‌نمایند که اتخاذ یک رویکرد واحد و جامع در ارزیابی تاب آوری یک سیستم حمل و نقل بسیار مشکل است. عملکرد واقعی یا بالقوه هر سیستم را در هر لحظه از زمان می‌توان به عنوان یک نقطه در یک فضای چند بعدی از شاخص‌های عملکرد آن اندازه‌گیری نمود. با گذشت زمان، این عملکرد ممکن است بصورت تدریجی یا ناگهانی تغییر کند. برای مثال در مورد سوانح سهمگین مانند یک زلزله بزرگ، افت عملکرد سیستم بصورت ناگهانی خواهد بود. در اینگونه موارد، سیستم ممکن است دچار نقص کامل عملکرد یا کاهش شدید در خدمت‌رسانی شود. با توجه به بحث فوق، برونو و همکاران [Bruneau et al., 2003] میزان کاهش برگشت‌پذیری برای یک سیستم خاص در اثر سانحه را از طریق اندازه‌گیری افت عملکرد سیستم از لحظه وقوع سانحه تا زمان بازیابی کامل عملکرد سیستم محاسبه نمود. شانگان و همکاران [ShangGuan et al., 2016] در مطالعه خود اندازه‌گیری تاب آوری در سیستم راه‌آهن را مورد توجه قرار داده است. مدل آنها برای برآورد تاب آوری برپایه برآورد قابلیت اطمینان سیستم ریلی در مواجهه با آسیب‌های پرتکرار بوده است. فرمول پایه آنها برای محاسبه برگشت‌پذیری بر اساس مفهوم مثلث برگشت‌پذیری می‌باشد که توسط برونو و تیرنی [Tierney

شبکه ریلی است و هم سطح دسترسی کمتری به شبکه جاده‌ای برای انتقال وسایل نقلیه امدادی دارد.

### ۳-۲- ارائه روش اندازه‌گیری برگشت‌پذیری شبکه

#### ریلی

همانطور که پیش‌تر اشاره گردید، متون فنی دو ویژگی اصلی را برای یک سیستم تاب آور برشمرده‌اند. نخستین ویژگی عبارت است از میزان توانایی یا قابلیت آن سیستم در مقاومت در برابر سانحه یا تغییر در تقاضا که از آن به استواری یا پایایی نیز یاد می‌شود. دیگر ویژگی، میزان توانایی آن سیستم در جذب آثار شوک وارده به دلیل سانحه و نیز سرعت بازگشت آن به شرایط پایدار (و یا حداقل شرایط مطلوب قبل از سانحه) می‌باشد. شکل ۱ نمای کلی از ویژگی‌های برگشت‌پذیری یک سیستم را نشان می‌دهد. این شکل براساس مثلث برگشت‌پذیری می‌باشد که توسط برونو و تیرنی [Tierney and Bruneau, 2007] پیشنهاد گردید که بطور گسترده‌ای در مطالعات اندازه‌گیری برگشت‌پذیری مورد استفاده قرار گرفته است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود وقوع یک سانحه مانند تصادف ریلی منجر به کاهش شدید عملکرد آن می‌شود. سطحی از عملکرد سیستم که حفظ می‌شود و یا به دیگر عبارت ظرفیت عملکرد باقی‌مانده سیستم حاکی از میزان استواری (پایایی) آن دارد. پس از رخداد سانحه، با اعزام تیم نجات اقدامات امدادی برای جمع‌آوری سانحه و بازگشایی خط آغاز شده و پس از مدتی عملکرد شبکه به حالت نرمال پیشین خود بازمی‌گردد. سرعت بازگشت سیستم به حالت طبیعی خود (و یا یک حالت پایدار دیگر) را تندی (سرعت) می‌گویند. کاهش برگشت‌پذیری را می‌توان بصورت سطح محصور میان خط افقی نقطه‌چین و منحنی عملکرد کاهش یافته دانست. بنابراین هر قدر میزان کاهش عملکرد سیستم در اثر وقوع سانحه شدیدتر باشد، افت برگشت‌پذیری سیستم نیز بیشتر خواهد بود.

اقدامات مختلفی که برای مقاومت در برابر سانحه و یا کاهش اثرات آن انجام می‌شود، مانند مقاوم سازی پل‌ها و تونل‌ها و یا راه‌اندازی سیستم‌های کنترل هوشمند مسیر، نقش موثری در بهبود (و یا افزایش) برگشت‌پذیری شبکه خواهد داشت. همچنین برخی اقدامات سبب می‌شوند تا سرعت بازگشت سیستم به عملکرد طبیعی خود را بهبود می‌بخشد به

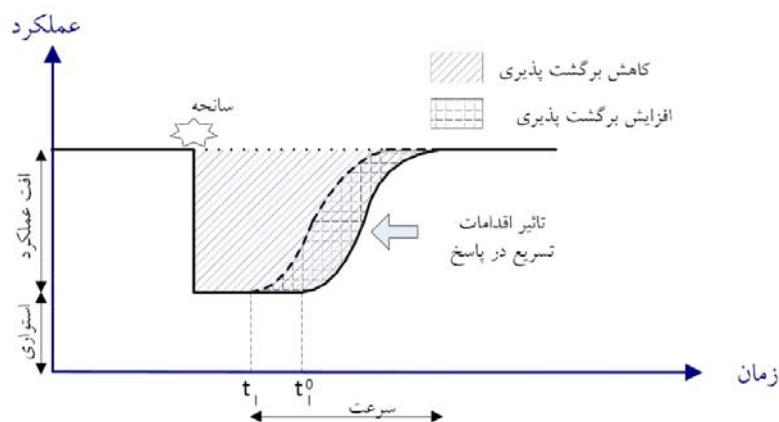
تعدادی واگن بارگیری شده با ماشین آلات، تجهیزات واگنی، ادوات و ملزومات بازسازی خط به علاوه یک یا چند سالن مسافری یا واگن کابوس مجهز به تجهیزات است که محل استقرار مأمورین جمع‌آوری سوانح نیز می‌باشد. با توجه به اینکه سازمان قطار نجات شامل پرسنلی است که می‌بایست در محل ایستگاه مستقر باشند، لذا ضروری است امکان استقرار این پرسنل در ایستگاه‌های منتخب وجود داشته باشد. در این مطالعه، این ایستگاه‌ها به صورت ایستگاه‌های بالقوه مشخص می‌شوند. وظیفه اصلی قطار نجات، آزادسازی مسیر مسدود شده در نظر گرفته شده است. این امر با توجه به سیاست‌گذاری راه آهن است که در آن وظیفه اصلی قطار نجات در راستای آزادسازی محور مسدود شده در اثر سانحه در کوتاه‌ترین زمان ممکن می‌باشد. از آنجایی که سوانح ریلی پرتکرار نبوده و گهگاه در شبکه راه‌آهن رخ می‌دهند، محل رخداد آنها قابل پیش‌بینی نبوده و حتی برآورد موقعیت آنها به شیوه احتمالاتی نیز امری نادقیق است چراکه استخراج یک تابع توزیع احتمالاتی برای آن عملاً امکان‌پذیر نیست. لذا در این مطالعه احتمال رخداد سوانح در همه بلاک‌ها با شدت یکسان فرض می‌شود. در مقابل، بجای برآورد احتمال خرابی کمان‌ها به پیامدهای ناشی از خرابی آنها با استفاده از رویکرد تحلیل آسیب‌پذیری پرداخته شده است. برای تعیین سطح آسیب‌پذیری هریک از بلاک‌های مسیر ریلی از مفهوم «در معرض آسیب بودن» استفاده شده است. این مفهوم بدان معناست که اولاً یک کمان از شبکه تا چه اندازه در شبکه موردنظر به لحاظ عملیاتی حائز اهمیت است و دیگر آنکه چنانچه این کمان دچار اختلال (یا انسداد) می‌گردد تا چه میزان به امدادسانی از طریق شبکه ریلی وابسته می‌باشد. در واقع از آنجاییکه در برخی بلاک‌های شبکه به علت صعوبت دسترسی به جاده، امدادسانی تنها از طریق شبکه ریلی امکان پذیر است، سطح دسترسی به شبکه جاده‌ای به عنوان یک سیستم پشتیبان برای امدادسانی حائز اهمیت می‌باشد. مفهوم در معرض آسیب بودن نشان‌دهنده آن است که در صورت بروز سانحه در یک کمان با اهمیت در شبکه به لحاظ عملکردی و نیز با توجه به سطح دسترسی آن به سیستم جاده‌ای، میزان آسیب‌پذیری آن چقدر است؟ به بیانی دیگر، یک کمان شبکه که سطح آسیب‌پذیری آن زیاد است و یا به عبارتی در سطح بالایی از در معرض آسیب بودن قرار دارد، هم جزء مهمی از

تمام مبدأ-مقصدهای آن، میزان بهبود حاصل شده در برگشت‌پذیری شبکه ریلی بصورت رابطه ۱ پیشنهاد می‌شود:

$$R_{imp} = R_0 - R_l = \sum_{OD} \int_{t_l^0}^{t_l} P_{OD} dt \quad (1)$$

در رابطه فوق  $R_0$  و  $R_l$  به ترتیب عبارتند از افت برگشت‌پذیری شبکه قبل و بعد از اقدام جانمایی بهینه تجهیزات امدد ریلی (سازمان قطار نجات). همچنین  $P_{OD}$  سطح عملکرد شبکه ریلی برحسب تعداد مسافر و یا تناژ بار جابجا شده در هر ساعت از مسیر ریلی مورد نظر در نظر گرفته شده است. در رابطه ۱ میزان بهبود در عملکرد سیستم به ازای همه مبدأ-مقصدهای شبکه (OD) محاسبه شده است.

نحویکه عکس العمل سیستم موردنظر را در پاسخ به سانحه رخ داده سریعتر می‌نمایند. برخی از این اقدامات عبارتند از طرح‌های مناسب برای جانمایی تجهیزات امداد رسانی باتوجه به نقاط آسیب‌پذیر شبکه و یا آمادگی پرسنل تیم امداد و نجات در مواجهه با سوانح. همانطور که شکل ۱ نشان می‌دهد، این اقدامات سبب می‌شود تا سرعت بازگشت عملکرد سیستم به حالت اولیه خود تسریع یابد. یک طرح بهینه برای استقرار تجهیزات ریلی منجر به کاهش زمان بازگشایی خط از  $t_l^0$  به  $t_l$  خواهد شد که در آن زمان پاسخ‌دهی به تقاضای امداد در کمان  $l$  از شبکه برای حالت اولیه استقرار تجهیزات ریلی و  $t_l$  زمان پاسخ‌دهی در حالت بهینه جانمایی و تخصیص این تجهیزات می‌باشد. با این تفسیر و با در نظرگیری زمان پاسخ‌دهی به تقاضای امداد برای کل کمان‌های شبکه و به ازای



شکل ۱. نمودار برگشت‌پذیری و تأثیر اقدامات تسریع در پاسخ به سانحه

### ۳-۳ معرفی شاخص آسیب‌پذیری

در میان مطالعات آسیب‌پذیری، ناگرانی و کیانگ [Nagurney and Qiang, 2012] شاخص متوسط کارایی شبکه با بردار تقاضای معلوم را برای تعیین سطح عملکرد شبکه در تحلیل خود معرفی نمودند. به کمک این شاخص، آنها اهمیت هر جزء شبکه را با حذف آن و تأثیرش بر شاخص مذکور ارزیابی نمودند. بعنوان یک مطالعه آسیب‌پذیری دیگر، خادمی و همکاران [Khademi et al., 2015] آسیب‌پذیری شبکه حمل و نقل اضطراری را برای شهر تهران در برابر خطر زلزله مورد بررسی قرار دادند. باباییک و همکاران

رویکرد این مقاله برای جانمایی و تخصیص تجهیزات امداد ریلی (سازمان قطار نجات) بر مبنای تحلیل آسیب‌پذیری بلاک‌های ریلی به منظور شناسایی اولویت آنها در امداد رسانی می‌باشد. بطور کلی هدف از تحلیل آسیب‌پذیری، یافتن جزء یا اجزایی از شبکه است که در صورت آسیب و یا حذف اثرات منفی بیشتری بر عملکرد شبکه داشته و عدم مطلوبیت بیشتری را به دنبال خواهد داشت. چنین پیامدهای منفی معمولاً بصورت هزینه‌های چرخه عمر، هزینه‌های افت عملکرد و یا اثرات آن بر تقاضای سفر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

خواهد بود. بنابراین محلی از شبکه که هم دارای اهمیت بالایی باشد (بر اساس شاخص اهمیت کمان) و هم دسترسی جاده‌ای نداشته و یا با صعوبت همراه باشد، در معرض آسیب بالاتری واقع است. از این رو، شاخص در معرض آسیب بودن را با تکیه بر سطح دسترسی کمان‌های شبکه به جاده بعنوان یک سیستم پشتیبان در امداد رسانی تعیین می‌شود. برای این منظور لازم است نحوه اندازه‌گیری دسترسی به بلاک‌ها در شبکه ریلی روشن شود. طبق تعریف نیمر [Niemeier, 1997] دسترسی عبارت است از سهولت در رسیدن به مقصد مورد نظر. در برخی مطالعات دیگر نیز دسترسی بصورت سهولت دستیابی (رسیدن) به خدمات، مقصد و یا فعالیت‌های مختلف در یک نقطه از محل مورد نظر تعریف می‌شود [Kwan and Weber, 2008; Litman, 2007]. ذکر این نکته ضروری است که در این تعریف برای اندازه‌گیری سطح دسترسی، دیدگاه کاربر بسیار مهم می‌باشد. گاس و وانوی [Geurs and Van Wee, 2004] مطالعه مروری وسیعی را در مورد معیارهای دسترسی از دیدگاه کاربری زمین و استراتژی‌های مختلف حمل و نقل داشته‌اند. مطالعاتی که به اندازه‌گیری سطح دسترسی محورهای ریلی به سیستم جاده‌ای پرداخته‌اند، اندک می‌باشد. با اینحال بورگتی و مالاواسی [Borghetti and Malavasi, 2016] در مطالعه خود با در نظرگیری برخی معیارها مانند وجود تقاطع همسطح در طول محور ریلی، طول جاده در امتداد محور ریلی و فاصله آن از محور، زمان رسیدن ماشین آتش‌نشانی و کاربری زمین مجاور شاخص دسترسی جاده به محور ریلی مورد نظر را بر مبنای بافتی که آن محور در آن قرار دارد، بصورت رابطه ۲ پیشنهاد داده‌اند.

$$IAS(i) = \sum_j \alpha_j UF_j(i) \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $IAS(i)$  شاخص دسترسی منفرد برای کمان  $i$ ،  $UF_j(i)$  تابع مطلوبیت معیار  $j$  و  $\alpha_j$  ضریب اهمیت آن معیار می‌باشد. در نهایت با ترکیب شاخص دسترسی همه بلاک‌ها در یک مسیر ریلی، شاخص دسترسی کل آن مسیر تعیین می‌شود. در مقاله حاضر، شاخص دسترسی برای هر کمان را می‌توان با استفاده از روش پیشنهادی بورگتی و مالاواسی [Borghetti and Malavasi, 2016] در فوق بدست آورد. با اینحال چنانچه برآورد معیارهای این شاخص

[Bababeik et al., 2017] نیز در مطالعه خود آسیب پذیری شبکه حمل و نقل ریلی را با در نظر گرفتن هزینه‌های مسیریابی و زمانبندی مجدد انجام دادند. در این مطالعه از یک رویکرد جایگزین که در آن پس از شناسایی نقاط آسیب پذیر شبکه توسط تجهیزات امداد رسانی ریلی پوشش می‌یابند، استفاده شده است. بدین منظور دو مشخصه کلیدی «اهمیت کمان» و «در معرض آسیب بودن» برای تعیین میزان آسیب‌پذیری بلاک‌های ریلی و نیاز آنها به امداد ریلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دو مفهوم نخستین بار توسط جنلیوس و همکاران [Jenelius, Petersen and Mattsson, 2006] در بررسی آسیب‌پذیری شبکه حمل و نقل جاده‌ای سوئد مطرح گردید. آنها با تکیه بر رویکرد کارایی اجتماعی<sup>۴</sup> اهمیت کمان را مطرح نمودند. طبق روش پیشنهادی آنها، هر مسیری که بیشتر مورد استفاده قرار گیرد، مهم‌تر است چراکه خدمت رسانی بیشتری را برای افراد و مشاغل فراهم می‌کند و بنابراین آورده اقتصادی-اجتماعی بیشتری خواهد داشت. همچنین در مطالعه جنلیوس و همکاران، از پیامدهای یک سانحه در یک محل خاص به عنوان در معرض آسیب بودن یاد شده است. به عبارت دیگر، در معرض آسیب بودن همان آسیب‌پذیری مشروط<sup>۵</sup> است و در مواردیکه برآورد احتمال وقوع سانحه دشوار یا غیرممکن باشد، استفاده می‌شود. با عنایت به مطالب بالا، در این پژوهش مفهوم «اهمیت کمان» بصورت نقش عملکردی هر کمان از شبکه ریلی در خدمت‌دهی به آن شبکه، تعریف می‌شود و برحسب پارامترهایی که نشان‌دهنده این عملکرد باشد، قابل اندازه‌گیری خواهد بود. شاخص دیگر، در معرض آسیب بودن، بیانگر آن است که اولاً یک کمان شبکه تا چه اندازه بر اساس شاخص «اهمیت کمان» مهم می‌باشد و دیگر آنکه در اثر وقوع سانحه تا چه میزان به امداد رسانی ریلی وابسته است. به کمک این شاخص می‌توان اولویت تخصیص منابع امداد رسانی ریلی را به کمان‌های شبکه با توجه به میزان اهمیت عملکردی آن تعیین نمود. چنین اولویتی را می‌توان با اندازه‌گیری میزان دسترسی کمان‌های شبکه به جاده به عنوان یک سیستم جایگزین در امداد رسانی مشخص نمود، چراکه در صورت فراهم بودن چنین دسترسی، سهولت بیشتری برای امداد رسانی و آزادسازی خط وجود خواهد داشت. در مقابل، در مناطقی که دسترسی به محور سانحه دیده تنها از طریق همان مسیر ریلی امکان پذیر باشد، امداد رسانی فقط از طریق تجهیزات ریلی امکان پذیر

امداد<sup>۶</sup>، جانمایی تسهیلات<sup>۷</sup> و یا مدیریت امداد رسانی سوانح<sup>۸</sup> مطرح می‌شود. مدل‌هایی که در این حوزه‌ها تاکنون مطرح شده است، بسیار وسیع و بیان همه آنها خارج از حوصله این مقاله است. بطور کلی مدل‌هایی که برای جانمایی خدمات امداد رسانی توسعه یافته‌اند، در سه شاخه کلی زیر قابل دسته‌بندی می‌باشند. اغلب این مدل‌ها بر پایه دریافت تقاضای امداد از تعدادی نقاط مشخص در شبکه می‌باشند:

الف) مدل‌های پوششی<sup>۹</sup>؛ مبنای این مدل‌ها، پوشش نقاط تقاضای امداد در محدوده مشخص و از پیش تعیین شده می‌باشد. ب) مدل‌های P-میان<sup>۱۰</sup>؛ هدف این مدل‌ها بطور کلی حداقل نمودن فاصله کل یا متوسط خدمات برای همه نقاط تقاضا است. ج) مدل‌های P-مرکز<sup>۱۱</sup>؛ هدف این مدل‌ها حداقل نمودن حداکثر فاصله خدمات میان تمام نقاط تقاضا در شبکه می‌باشد. به بیان کلی، در مدل‌های پوششی تقاضا زمانی پوشش یافته تلقی می‌شود که در دامنه مشخصی از حداقل یک مرکز امداد رسانی قرار گیرد درحالی‌که در مدل‌های P-میان و P-مرکز، تاکید بر فاصله میان نقاط تقاضا و نزدیکترین مرکز امداد می‌باشد. در این مقاله مساله جانمایی سازمان قطار نجات در شبکه ریلی از ایده پوشش مشارکتی استفاده شده است. ایده پوشش مشارکتی نخستین بار توسط برمن و همکاران [Berman, Drezner and Krass, 2011] درحالی مطرح گردید که ضرورت وجود نزدیکترین مکان عرضه برای پوشش تقاضا در مدل‌های پیشین سبب شده بود حجم عرضه بیشتری برای تعداد یکسان از نقاط تقاضا در نظر گرفته شود. در مقابل، فرض نماییم هر مکان عرضه سیگنالی از خود ساطع می‌نماید که قدرت آن با افزایش فاصله از آن مرکز عرضه کاهش می‌یابد و در عین حال توسط مکان‌های تقاضا دریافت می‌شود. چارچوب پوشش مشارکتی بیان می‌کند که هر محل تقاضا در صورتی پوشش یافته محسوب می‌شود که مجموع سیگنال‌های دریافتی آن از تمام نقاط عرضه از حد مشخصی بیشتر باشد. به بیان ریاضی، اگر فاصله میان محل تقاضای  $i$  و مکان عرضه  $j$  ( $W_j$  مجموعه نقاط عرضه موجود می‌باشد) با  $d_{ij}$  نشان داده شود، قدرت سیگنال ساطع شده از هر مکان عرضه تابعی نامنفی و غیر صعودی از این فاصله خواهد بود و با  $\phi(d)$  نشان داده می‌شود. برای آنکه تقاضای محل  $i$  پوشش یابد، باید مجموع سیگنال‌های دریافتی از سطح آستانه  $T$  بزرگتر باشد. بیان ریاضی این موضوع در رابطه ۴ آورده شده است.

در طول بلاک‌های ریلی دشوار بوده و یا داده‌های آن موجود نباشد، پیشنهاد می‌شود بطور جایگزین از نسبت طول جاده قابل دسترسی در امتداد بلاک به طول کل بلاک به عنوان شاخص دسترسی استفاده کرد. با توجه به مفهوم ارائه شده از شاخص در معرض آسیب بودن، می‌توان فهمید این شاخص با اهمیت کمان نسبت مستقیم و با معیار دسترسی نسبت عکس دارد، زیرا هر اندازه سطح دسترسی به یک کمان از طریق جاده کمتر شود، میزان در معرض آسیب بودن آن بیشتر خواهد بود. بنابراین شاخص در معرض آسیب بودن به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود.

$$ex_i = \frac{p_i}{ac_i} \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $ex_i$  شاخص در معرض آسیب بودن کمان  $i$ ،  $p_i$  شاخص اهمیت این کمان و  $ac_i$  معیار دسترسی آن می‌باشد.

### ۳-۴- مدل ریاضی جانمایی و تخصیص سازمان قطار

#### نجات

تاکنون مدل‌های مختلفی برای جانمایی تجهیزات امداد رسانی در شبکه‌های حمل و نقل پیشنهاد شده است. مساله جانمایی سازمان قطار نجات در شبکه ریلی، مورد ویژه‌ای است که باید با توجه به شرایط خاصی که دارد مدل مناسبی برای آن پیشنهاد گردد. سوانح ریلی اغلب از شدت بالایی برخوردار هستند، باینحال برآورد موقعیت آنها در شبکه مقدور نیست چراکه برآورد تابع توزیع عینی این سوانح به واسطه عدم تکرارپذیری آنها عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد و لذا استفاده از شیوه‌های احتمالاتی مانند تحلیل ریسک برای تعیین مکان آنها عملاً از دقت مناسبی برخوردار نمی‌باشد؛ بنابراین در این پژوهش، بطور جایگزین رویکرد تحلیل آسیب پذیری برای شناخت نقاط آسیب پذیر شبکه و پوشش تقاضای امداد آن پیشنهاد گردیده است. در بخش قبل، مفهوم در معرض آسیب بودن و نیز روش اندازه‌گیری آن معرفی تشریح شد. در ادامه قصد بر آن است تا با استفاده از شاخص یاد شده، مدل ریاضی مناسبی برای جانمایی سازمان قطار نجات در شبکه ریلی پیشنهاد شود. مساله جانمایی سازمان قطار نجات و تخصیص آن به کمان‌های شبکه ریلی در حوزه ادبیات فنی مسائل پشتیبانی

این مقدار کمتر شود، پوشش کامل توسط آن ایستگاه برای کمان مربوطه لحاظ خواهد شد. زمان  $t_b$  نیز حداکثر مدت زمانی است که با فراتر رفتن زمان سفر امداد از آن، پوشش تقاضای امداد توسط آن ایستگاه صورت نمی‌پذیرد. هریک از مقادیر  $t_a$  و  $t_b$  با توجه به استانداردهای محلی و شرایط بهره برداری در شبکه مورد مطالعه، تعیین خواهند شد.

$$\phi(t_{kl}) = \begin{cases} 1 & \text{اگر } t_{kl} \leq t_a \\ \frac{t_{kl} - t_b}{t_a - t_b} & \text{اگر } t_a < t_{kl} < t_b \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (5)$$

مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح دو هدفه با نام مساله مکانیابی و تخصیص قطار نجات و یا به اختصار  $LART^{12}$  در این مقاله به شرح زیر پیشنهاد می‌گردد. نمادهای بکار رفته در مدل برنامه‌ریزی به شرح جدول ۱ می‌باشد.

*LART model:*

$$\max f_1 = \sum_{l \in L} ex_l Y_l \quad (6)$$

$$\min f_2 = \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} t_{kl} U_{kl} \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in K} \phi(t_{kl}) W_k \geq a \times Y_l \quad \forall l \in L \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} c_k W_k \leq P \quad (9)$$

$$U_{kl} \leq W_k \quad \forall l \in L, \forall k \in K \quad (10)$$

$$W_k \leq \sum_{l \in L} U_{kl} \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} U_{kl} = 1 \quad \forall l \in L \quad (12)$$

$$Y_l, W_k, U_{kl} \in \{0,1\} \quad (13)$$

$$\sum_{j \in W} \phi(d_{ij}) \geq T \quad (4)$$

مسئله جانمایی و تخصیص سازمان قطار نجات با بهره‌گیری از مدل پوشش مشارکتی حداکثر با دو هدف زیر در نظر گرفته شده است:

- موقعیت استقرار سازمان قطار نجات به نحوی در شبکه ریلی مشخص شود که بیشترین پوشش مشارکتی میان همه بلاک‌ها فراهم آید. در این خصوص، پوشش تقاضای امداد برای کمان‌هایی که سطح بالاتری از شاخص در معرض آسیب بودن را دارند، در اولویت می‌باشند. به عبارت دیگر، هدف آن است که بیشترین پوشش مشارکتی از شاخص در معرض آسیب بودن برای همه کمان‌های شبکه حاصل شود.

- اگر زمان رسیدن قطار نجات از محل استقرار خود در شبکه را تا بلاک ریلی سانحه دیده، زمان سفر امداد بنامیم، یکی دیگر از اهداف اصلی آن است که موقعیت سازمان قطار نجات به نحوی در شبکه استقرار یافته و به بلاک‌های شبکه اعزام شود که زمان سفر امداد در کل شبکه حداقل شود.

در این مطالعه فرض شده است که تقاضای امداد برای همه بلاک‌های ریلی وجود دارد. به عبارت دیگر، احتمال رخداد سانحه در همه نقاط شبکه برابر است و لذا برای هر کمان آن، می‌بایست تقاضای امداد در نظر گرفته شود. برای نشان دادن تاثیر افزایش فاصله قطار نجات در پوشش کمان سانحه دیده از یک تابع آفت تدریجی در مدل برنامه‌ریزی ریاضی استفاده شده است. مقدار این تابع آفت در صورتیکه زمان اعزام قطار نجات از ایستگاه محل استقرار آن تا کمان سانحه دیده (محل تقاضای امداد) کمتر از مقدار مجاز استاندارد آن باشد، برابر یک و در صورتیکه این زمان از مقدار مجاز در نظر گرفته شده برای آن تعدی نماید، کمتر از یک خواهد شد. همچنین، در صورتیکه زمان اعزام بیش از حد مجاز عملیاتی باشد، برابر صفر خواهد بود؛ بدین معنی که عملاً از آن ایستگاه قطاری به کمان سانحه دیده اعزام نمی‌شود. تابع آفت در نظر گرفته شده بصورت رابطه ۵ می‌باشد که در آن  $t_a$  زمان امداد استاندارد در اعزام قطار نجات می‌باشد و چنانچه زمان سفر قطار نجات از ایستگاه محل استقرار آن تا کمان  $l \in L$  کمتر از

جدول ۱. نمادهای بکار رفته در مدل برنامه‌ریزی ریاضی

مجموعه‌ها	
$N$	مجموعه گره‌ها در شبکه.
$L$	مجموعه کمان‌های شبکه
$K$	مجموعه ایستگاه‌های بالقوه که با اندیس $k$ نشان داده می‌شوند؛ $K \subset N$
پارامترها	
$ex_l$	شاخص در معرض آسیب بودن کمان $l \in L$
$c_k$	هزینه استقرار سازمان قطار نجات در ایستگاه $k$
$a$	سطح آستانه پوشش مشارکتی
$\emptyset(t_{kl})$	تابع آفت برحسب زمان سفر امداد از ایستگاه $k \in K$ به کمان $l \in L$
$P$	بودجه موجود برای تجهیز سازمان قطار نجات در شبکه
$p_l$	شاخص اهمیت کمان $l \in L$
متغیرها	
$Y_l$	متغیر باینری، اگر کمان $l \in L$ پوشش یابد، برابر یک و در غیر اینصورت صفر.
$W_k$	متغیر باینری، اگر سازمان قطار نجات در ایستگاه بالقوه $k \in K$ واقع شود، برابر یک و در غیر اینصورت صفر.
$U_{kl}$	متغیر باینری، اگر سازمان قطار نجات در ایستگاه بالقوه $k \in K$ به کمان $l \in L$ تخصیص یابد، برابر یک و در غیر اینصورت صفر.

اختصاص یابد و این موضوع در محدودیت رابطه ۱۱ وارد شده است. بنابر فرض مساله، تقاضای امداد برای هر کمان از شبکه در نظر گرفته شده است. بنابراین محدودیت ۱۲ سبب می‌شود تا هر کمان از شبکه ریلی به یک ایستگاه قطار نجات اختصاص یابد. در نهایت، رابطه ۱۳ شرط مربوط به عدد صحیح بودن متغیرهای مساله می‌باشد.

### ۳-۵- روش حل

مدل ارائه شده برای مساله مکانیابی و تخصیص قطار نجات (LART) یک مساله برنامه ریزی عدد صحیح دو هدفه بوده و لذا در رده مسائل بهینه سازی چند هدفه قرار می‌گیرد. یکی از ویژگی‌های مسائل برنامه‌ریزی چندهدفه این است که در آن یک جواب بهینه منحصر به فرد به نحویکه بتواند بطور همزمان همه توابع هدف را بهینه نماید، وجود ندارد. در این دسته مسائل، جواب بهینه جای خود را به «جبهه پارتو» یا «بهینه پارتو» می‌دهد. یکی از مفاهیم اصلی که در بهینه سازی چندهدفه استفاده می‌شود، مفهوم غلبه می‌باشد. برای مثال، برای تمامی جواب‌ها در فضای جواب مساله دوهدفه LART این امکان وجود دارد که بفهمیم کدام جواب بر دیگری غالب نیست. بنابراین این انتظار وجود دارد که مجموعه ای از جواب‌ها وجود داشته باشد که هر دو عضو این مجموعه نتوانند برهم غلبه داشته باشند. به این جواب‌ها یک اسم خاص

در مدل پیشنهادی LART دو هدف اصلی در نظر گرفته شده است. هدف نخست که با رابطه ۶ بیان شده است، بیشترین پوشش آسیب‌پذیری را برحسب شاخص در معرض آسیب بودن در کل شبکه فراهم می‌نماید. با این هدف، پوشش تقاضای امداد توسط قطار نجات برای آن دسته از کمان‌های شبکه که دارای آسیب‌پذیری بیشتری هستند در اولویت قرار خواهد گرفت. رابطه ۷ بیانگر هدف دوم می‌باشد که سعی دارد قطار نجات به نحوی به هریک از کمان‌های شبکه تخصیص یابد تا مجموع زمان سفر امداد از ایستگاه‌های قطار نجات به کمان‌ها حداقل شود. قیدهای این مساله برنامه ریزی ریاضی طی روابط ۸ تا ۱۳ بیان شده است. رابطه ۸ تصریح می‌نماید کمان  $l \in L$  در صورتی پوشش یافته خواهد بود که سطح پوشش دریافتی آن از تمام ایستگاه‌های بالقوه بیش از سطح آستانه مشخصی باشد. سطح پوشش دریافتی هر کمان از ایستگاه‌های بالقوه برحسب زمان سفر امداد آن و با استفاده از تابع آفت تعریف شده در رابطه ۵ بدست می‌آید. تجهیز شبکه به سازمان قطار نجات محدود به بودجه مشخصی است و این محدودیت در رابطه ۹ نشان داده شده است. رابطه ۱۰ موجب می‌شود تا کمان‌های شبکه تنها به آن دسته از ایستگاه‌های بالقوه اختصاص یابد که به عنوان محل استقرار سازمان قطار نجات انتخاب شده‌اند. همچنین به هر ایستگاه منتخب برای استقرار قطار نجات باید حداقل یک کمان جهت پوشش تقاضای امداد

نماید. در واقع این عبارت سبب می‌شود تا جستجو برای یافتن  $\max f_1(x)$  در میان جواب‌هایی باشد که این مجموع را حداکثر می‌نماید:

$$\max(f_1(x) + \delta \times (s_2 + s_3 + \dots + s_p)) \quad (14)$$

s.t.

$$f_2(x) - s_2 = \varepsilon_2 \quad (15)$$

$$f_3(x) - s_3 = \varepsilon_3 \quad (16)$$

...

$$f_p(x) - s_p = \varepsilon_p \quad (17)$$

$$x \in S \text{ and } s_i \in R^+ \quad (18)$$

در مساله فوق  $s_i$  متغیر سربر یا کمبود،  $\varepsilon_i$  عبارت سمت راست (RHS) در روش اپسیلون محدودیت و  $S$  فضای شدنی جواب‌های مساله است.

#### ۴- تحلیل نتایج

مدل پیشنهادی برای مساله مکانیابی و تخصیص قطار نجات (LART) به همراه روش حل پیشنهادی آن در محیط برنامه GAMS کدنویسی شده است و نتایج حاصل از کاربرد شیوه پیشنهادی برای شبکه راه‌آهن ایران ارائه می‌شود تا قابلیت کاربرد این روش برای یک شبکه واقعی و اعتبارسنجی نتایج بدست آمده مورد ارزیابی قرار گیرد.

شبکه راه‌آهن جمهوری اسلامی، یک شبکه حمل و نقل ملی است که براساس آمار فعلی موجود، سالانه ۳۵ میلیون تُن بار و ۲۵ میلیون مسافر توسط آن جابجا می‌شود. سهم راه‌آهن از حمل و نقل در کل کشور به ترتیب ۱۰ و ۱۲/۵ درصد در بخش‌های مسافری و کالا می‌باشد [سالنامه آماری حمل و نقل ریلی کشور، ۱۳۹۷]. سازمان امداد و نجات و آزادسازی خط در راه‌آهن جمهوری اسلامی از گذشته تا به حال همانند بسیاری از شئون اجرایی دیگر در راه‌آهن (شامل پروژه‌های زیربنایی، امور بهره برداری، ترافیک و ...) به صورت منطقه محور برنامه ریزی، هدایت، اجرا و کنترل می‌شود. در حال حاضر، تمرکز سازمان امداد و نجات و جمع آوری سوانح در ادارات کل راه آهن مناطق بر انجام عملیات مرتبط با جمع آوری سوانح و آزادسازی خط می‌باشد و سازمان قطار نجات نیز در یک یا دو ایستگاه تشکیلاتی راه‌آهن این مناطق (دراکثر موارد مرکز ناحیه) مستقر هستند. شاخص «در معرض آسیب بودن» یک

تعلق می‌گیرد به نام مجموعه نامغلوب. به بیان ریاضی، اگر  $Z$  را فضای نظیر بردار توابع هدف جواب‌های ممکن مساله بنامیم، یک بردار توابع هدف،  $f(x^*) \in Z$ ، را جواب نامغلوب می‌گویند به نحویکه نتوان هیچ بردار تابع هدف دیگری یافت که  $f(x) \leq f(x^*)$  و حداقل به ازای یکی از توابع هدف آن  $f_i(x) < f_i(x^*)$ . تصویر مجموعه جواب‌های کارا را بر فضای توابع هدف ( $Z$ ) را مجموعه بهینه پارتو یا جبهه پارتو می‌گویند. در واقع، برای مقاصد کاربردی مجموعه نامغلوب همان مجموعه کاراست با این تفاوت که مجموعه نامغلوب در فضای توابع هدف بیان می‌شود ( $Z$ ) ولی مجموعه کارا در فضای جواب‌های مساله ( $x$ ).

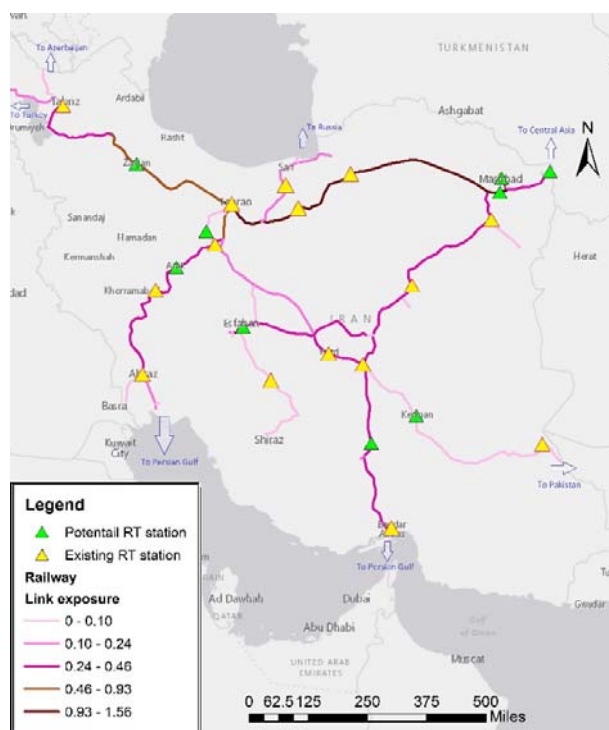
یکی از تکنیک‌های رایج برای حل مسائل بهینه سازی چند هدفه، روش اپسیلون محدودیت است که در آن تصمیم گیرنده، یک تابع هدف را برای حداقل (حداکثر) نمودن برمی‌گزیند و سایر توابع هدف را به عنوان محدودیت‌های مساله به نحویکه از یک مقدار معلومی کوچکتر مساوی (بزرگتر مساوی) باشند، در نظر می‌گیرد. این روش، علی‌رغم داشتن مزایای قابل توجه نسبت به برخی تکنیک‌های عددی سازی که در حل مسائل بهینه سازی چندهدفه استفاده می‌شود، دارای برخی معایب نیز می‌باشد. به عنوان مثال محاسبه دامنه توابع بر روی مجموعه جواب‌های کارا که به عنوان قید در مساله وارد می‌شود، نیازمند محاسبه نقاط ایده‌آل و ضد ایده‌آل<sup>۱۳</sup> (نقطه نادیر) می‌باشد، که کار چندان ساده‌ای نیست. همچنین در روش اپسیلون محدودیت تنها زمانی جواب کارا بدست می‌آید که مجموعه محدودیت‌های متناظر با توابع هدف از نوع قیده‌های محصور باشند (بدین معنی که جواب بهینه بر روی این مرز این محدودیت‌ها واقع شود). در این مطالعه به منظور رفع معایب فوق از روش اپسیلون-محدودیت تقویت شده<sup>۱۴</sup> (AUGMECON) که توسط ماورتاس و فلوریس [Mavrotas and Florios, 2013] پیشنهاد گردید، استفاده شده است. از جمله برخی بهبودهای حاصل شده از این شیوه در مقایسه با روش متداول اپسیلون-محدودیت می‌توان به تضمین بهینگی پارتو در جواب‌های بدست آمده از جدول مبادله و افزایش سرعت زمان حل اشاره کرد.

در این روش، هر محدودیت با استفاده از یک متغیر سربر<sup>۱۵</sup> یا کمبود<sup>۱۶</sup> به تساوی تبدیل شده است. همچنین مجموع متغیرهای سربر یا کمبود به صورت یک عبارت در تابع هدف وارد شده است تا تنها جواب‌های کارا را تولید

بهینه پارتو مطابق جدول ۲ بدست آمده است. در این تحلیل، هزینه استقرار قطار نجات در هر ایستگاه معادل ۱۰۰۰ واحد در نظر گرفته شده است. هزینه واقعی ساخت، تجهیز و استقرار قطار نجات در یک ایستگاه باتوجه به هزینه‌های لازم برای احداث خط، احداث آشیانه، تهیه و نصب علائم، و خریداری تجهیزات قطار نجات قابل محاسبه خواهد بود. تعداد ایستگاه‌های مورد نیاز در این مرحله از اجرای مدل، ۱۸ ایستگاه قرار داده شده است تا نتایج آن قابل مقایسه با موقعیت‌های فعلی قطار نجات در شبکه ریلی کشور باشد. مقایسه مقادیر تابع هدف در هریک از ستون‌های دوم و سوم این جدول نشان می‌دهد هیچ یک از این جواب‌ها بر دیگری غالب نیست. به عنوان مثال، مقایسه جواب های ۲ و ۳ نشان می‌دهد جواب ۲ در تابع هدف اول بر جواب ۳ غلبه دارد؛ لیکن جواب ۳ در تابع هدف دوم بر جواب ۲ غالب است. بنابراین، هیچیک از این دو عضو مجموعه بر یکدیگر غالب نیست و لذا مجموعه جواب‌های بدست آمده همان جواب‌های بهینه پارتو خواهد بود.

کمان براساس میزان اهمیت آن کمان و نیز سطح دسترسی آن به سیستم جاده‌ای به عنوان یک سیستم پشتیبان در امداد رسانی مطابق رابطه ۳ محاسبه گردیده است. برای اندازه‌گیری میزان دسترسی به جاده، درصد طولی از بلاک که امکان دسترسی به جاده را دارد، ملاک عمل قرار گرفته است. نظر به اینکه در جانمایی سازمان قطار نجات می‌بایست ملزومات مورد نیاز برای استقرار تجهیزات فیزیکی و نیروی انسانی آن مورد توجه قرار گیرد، ایستگاه‌های گار، تشکیلاتی و درجه یک به عنوان موقعیت‌های بالقوه برای جانمایی قطار نجات در نظر گرفته شده است. شکل ۲ شاخص «در معرض آسیب بودن» را برای هریک از بلاک‌های ریلی شبکه به همراه این موقعیت‌های بالقوه نشان می‌دهد. در این شکل موقعیت فعلی و موقعیت‌های بالقوه برای استقرار قطار نجات به ترتیب با مثلث‌های زرد و سبز رنگ نشان داده شده است.

شبکه مورد مطالعه با استفاده از مدل پیشنهادی LART مورد تحلیل قرار گرفت و بر اساس روش اپسیلون محدودیت تقویت شده (AUGMECON) چهارده جواب در فضای



شکل ۲. شاخص در معرض آسیب بودن بلاک‌های ریلی و موقعیت بالقوه سازمان قطار نجات

جدول ۲. جواب‌های بهینه پارتو برای شبکه ریلی کشور

شماره جواب بهینه پارتو	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم	شماره جواب بهینه پارتو	مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم
۱	۱۲۷/۴	۹۲۸۷۲/۲	۸	۱۲۲/۶	۷۲۴۴۱/۴
۲	۱۲۶/۴	۹۰۴۳۳/۸	۹	۱۲۱/۳	۷۰۱۰۱/۸
۳	۱۲۵/۴	۸۸۳۲۲/۱	۱۰	۱۱۸/۸	۶۷۵۰۵/۲
۴	۱۲۴/۷	۷۹۸۷۷/۸	۱۱	۱۱۵/۸	۶۵۶۸۸/۱
۵	۱۲۴/۵	۷۹۳۲۵/۹	۱۲	۱۱۳/۷	۶۳۶۵۵/۴
۶	۱۲۳/۸	۷۵۱۰۵/۱	۱۳	۱۰۶/۴	۶۱۳۱۳/۱
۷	۱۲۳/۶	۷۴۵۵۳/۱	۱۴	۸۶/۰	۵۹۲۳۴/۲

### ۵- نتیجه گیری

در میان زیرساخت‌های عمده حمل و نقل، سیستم حمل و نقل ریلی به دلیل قابلیت اطمینان بالای آن، بهره‌وری بسیار بالای انرژی و عدم تاثیر پذیری آن از شرایط نامساعد آب و هوایی مورد توجه قرار گرفته است. با این حال آسیب با دلایل مختلفی ممکن است این سیستم را تهدید نماید. آنچه که در این مقاله مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است، ارائه رویکردی برای اندازه‌گیری برگشت‌پذیری یک زیرساخت ریلی و نیز ارائه راهکاری برای بازگردانی سریع سیستم ریلی به حالت قبلی خود در اثر وقوع یک سانحه با استفاده از جانمایی و تخصیص مناسب منابع امداد ریلی بوده است.

روش ارائه شده در این تحقیق بر مبنای تحلیل آسیب پذیری بلاک‌های ریلی شبکه می‌باشد که باتوجه به شاخص «در معرض آسیب بودن» و نیز سطح دسترسی آن به جاده به عنوان یک سیستم پشتیبان در امداد رسانی بدست می‌آید. مساله جانمایی سازمان قطار نجات در شبکه ریلی، مستلزم مدلسازی ویژه‌ای است که باید به شرایط خاص آن مانند عدم تکرار پذیری سوانح ریلی و نیز پراکنندگی نقاط آسیب پذیر در شبکه‌ای وسیع و تنگ به هنگام جانمایی تجهیزات امدادی توجه شود. مدل پیشنهادی این مقاله بر مبنای یک مساله برنامه‌ریزی عدد صحیح دوهدفه است که به منظور حداکثر کردن پوشش مشارکتی بلاک (کمان) های آسیب‌پذیر شبکه و نیز حداقل نمودن زمان سفر امداد توسعه یافته است. برای حل این مساله از روش اپسیلون-محدودیت تقویت شده استفاده شده است که در آن برخی بهبودها در مقایسه با روش متداول

انتخاب هریک از این جواب‌های ارجح به قضاوت مهندسی تصمیم‌گیرنده، اولویت‌های تأمین بودجه در ناحیه مورد نظر و تصمیمات مدیریتی وابسته است.

به عنوان مثال میزان بهبود ایجاد شده در تاب آوری سیستم باتوجه به جواب بهینه شماره ۱۲ با محاسبه عملکرد سیستم برحسب تقاضای تقاضای بار و مسافر طبق رابطه ۱ معادل  $7/3$  درصد بدست آمده است. شکل ۳، نتایج استقرار قطار نجات را باتوجه به جواب شماره ۱۲ از تحلیل فوق نشان می‌دهد. در این شکل، دایره‌های سبز تیره نشان‌دهنده موقعیت ایستگاه‌های قطار نجات است که در حال حاضر نیز محل استقرار قطار نجات می‌باشند. همچنین، دایره‌های سبز روشن، موقعیت‌های جدید برای استقرار قطار نجات می‌باشد.

به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، مدل LART که در آن دو هدف عمده پوشش مشارکتی کمان‌های آسیب‌پذیر شبکه و نیز کاهش زمان سفر امداد در شبکه ریلی مورد تأکید قرار گرفته است، با نتایج بدست آمده از مدل مکان‌یابی پوششی حداکثر (MCLP) که به عنوان یکی از شیوه‌های متداول در مسائل مکان‌یابی تجهیزات امدادی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقایسه شده است. نتیجه این مقایسه در شکل ۴ نشان می‌دهد مدل پیشنهادی LART میزان پوشش بیشتری از کمان‌های آسیب‌پذیر شبکه و نیز زمان سفر امداد کوتاه‌تری را نسبت به مدل مکان‌یابی پوششی حداکثر در سطح بودجه یکسان فراهم آورده است.

آمده از این مطالعه منجر به افزایش سرعت بهبود افت عملکرد سیستم در اثر سانحه خواهد شد. از دستاوردهای دیگر این مطالعه، تعیین بلاک‌های بحرانی شبکه با توجه به میزان اهمیت بلاک مورد نظر برحسب سطح عملکرد آن در شبکه و نیز میزان دسترسی آن به جاده به عنوان یک سیستم پشتیبان در امدادسانی می‌باشد.

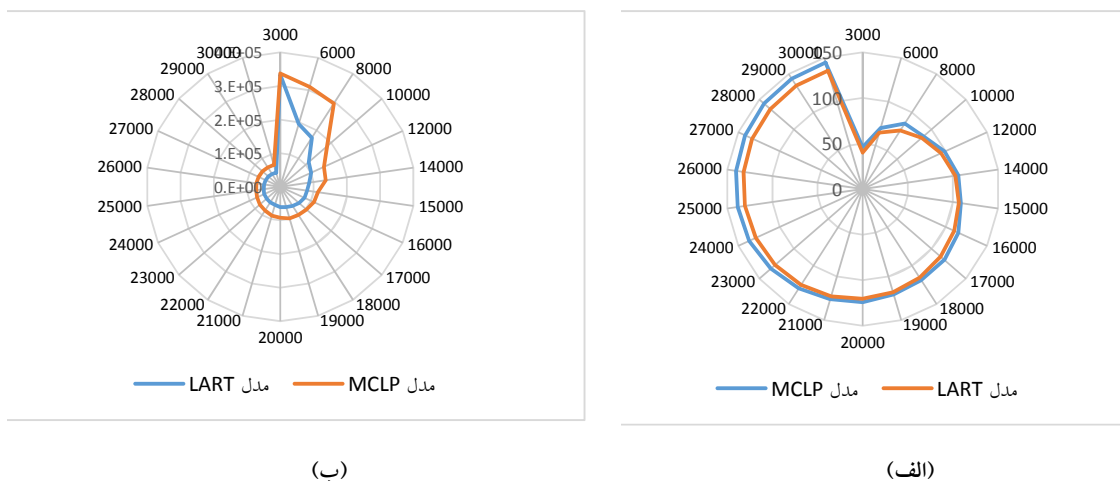
در جهت ادامه تحقیق این مطالعه پیشنهاد می‌گردد تا جانمایی تجهیزات امدادریلی و جاده‌ای بطور مشترک مورد بررسی قرار گیرد. همینطور موضوع جانمایی لکوموتیوهای امداد در شبکه برای امدادسانی در مواقعی که لکوموتیوها دچار خرابی می‌شوند، موضوع ارزشمند دیگری است که باتوجه به هزینه‌های بالای تأمین و نگهداری آنها نیازمند پژوهش می‌باشد.

ایسیلون-محدودیت از جمله تضمین بهیجگی پارتو و افزایش سرعت زمان حل اشاره کرد.

نتایج بدست آمده از حل مدل پیشنهادی برای شبکه ریلی ایران ۱۴ ترکیب مختلف را برای در نظرگیری موقعیت استقرار بهینه تجهیزات امداد ریلی پیشنهاد داده است که انتخاب هریک از این ترکیب‌ها بستگی به اولویت‌های تأمین بودجه در ناحیه مورد نظر برای تجهیز ایستگاه مورد نظر به سازمان قطار نجات و تصمیمات مدیریتی خواهد داشت. نتایج بدست آمده از یکی از جواب‌های بهینه پارتو برای این شبکه در حالتیکه تعداد ایستگاه‌های استقرار تجهیزات ریلی به تعداد ایستگاه‌های موجود باشد، نشان می‌دهد تنها در ۷ ایستگاه، موقعیت استقرار قطار نجات با مکان‌های فعلی آن منطبق است در حالیکه با موقعیت پیشنهادی، برگشت‌پذیری سیستم به میزان حدود ۷ درصد افزایش یافته است. در واقع طرح پیشنهادی بدست



شکل ۳. محل استقرار سازمان قطار نجات بر اساس تحلیل مدل LART



شکل ۴. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل LART با مدل مکان‌یابی پوشش حداکثر (MCLP) و تخصیص به ازای سطوح مختلف بودجه، (الف) مقایسه شاخص در معرض آسیب بودن، (ب) مقایسه زمان سفر امداد

#### ۶- پی‌نوشت‌ها

10. P-Median
11. P-Center
12. Location and Allocation of Relief Trains
13. Nadir
14. Augmented Epsilon Constrained
15. Surplus
16. Slack
17. Maximal Covering Location Problem

1. Performance
2. Between Centrality
3. Rapidity
4. Social Efficiency
5. Conditional Vulnerability
6. Emergency Logistics
7. Facility Location
8. Disaster Operations Management
9. Covering Models

#### ۷- مراجع

- Bhavathrathan, B., and Patil, G. R. (2015). Quantifying resilience using a unique critical cost on road networks subject to recurring capacity disruptions. *Transportmetrica A: Transport Science*, 11(9), 836-855.
- Borghetti, F., and Malavasi, G. (2016). Road accessibility model to the rail network in emergency conditions. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 6(3), 237-254.
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Von Winterfeldt, D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake spectra*, 19(4), 733-752.
- Chang, S. E., and Miles, S. B. (2004). *The dynamics of recovery: a framework modeling spatial and economic impacts of disasters*, Springer, 181-204,

-معاونت برنامه‌ریزی و اقتصاد حمل‌ونقل، راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران، (شهریور ۱۳۹۷). سالنامه آماری حمل و نقل ریلی کشور سال ۱۳۹۶.

- Adjetej-Bahun, K., Planchet, J. L., Birregah, B., and Châtelet, E. (2016). Railway transportation system's resilience: Integration of operating conditions into topological indicators. *Paper presented at the Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, IEEE/IFIP.
- Bababeik, M., Khademi, N., Chen, A., and Nasiri, M. M. (2017). Vulnerability Analysis of Railway Networks in Case of Multi-Link Blockage. *Transportation Research Procedia*, 22, 275-284.
- Berman, O., Drezner, Z., and Krass, D. (2011). Discrete cooperative covering problems. *Journal of the Operational Research Society*, 62(11), 2002-2012.

- Leu, G., Abbass, H., and Curtis, N. (2010). Resilience of ground transportation networks: a case study on Melbourne.
- Litman, T. (2007). Evaluating accessibility for transportation planning.
- Longstaff, P. H., Armstrong, N. J., Perrin, K., Parker, W. M., and Hidek, M. (2010). Building resilient communities: A preliminary framework for assessment.
- Mavrotas, G., and Florios, K. (2013). An improved version of the augmented  $\epsilon$ -constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 219(18), 9652-9669 .
- Miles, S. B., and Chang, S. E. (2003). Urban disaster recovery: A framework and simulation model.
- Nagurney, A., and Qiang, Q. (2012). Fragile networks: identifying vulnerabilities and synergies in an uncertain age. *International Transactions in Operational Research*, 19(1-2), 123-160.
- Niemeier, D. A. (1997). Accessibility: an evaluation using consumer welfare. *Transportation*, 24(4), 377-396.
- Norris, F. H., Stevens, S. P., Pfefferbaum, B., Wyche, K. F., and Pfefferbaum, R. L. (2008). Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness. *American journal of community psychology*, 41(1-2), 127-150.
- Renschler, C. S., Frazier, A., Arendt, L., Cimellaro, G., Reinhorn, A., and Bruneau, M. (2010). Developing the 'PEOPLES' resilience framework for defining and measuring disaster resilience at the community scale. *Paper presented at the Proceedings of the 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*.
- ShangGuan, W., Hu, F., Yuan, M., Cai, B., and Wang, J. (2016). Resilience quantitative evaluation framework and performance improvement for train control system on-board equipment. Paper presented at the Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016 IEEE 19th International Conference on.
- Tierney, K., and Bruneau, M. (2007). Conceptualizing and measuring resilience: A key to disaster loss reduction. *TR news* (250).
- Chen, L., and Miller-Hooks, E. (2012). Resilience: an indicator of recovery capability in intermodal freight transport. *Transportation Science*, 46(1), 109-123 .
- Council, N. I. A. (2009). Critical infrastructure resilience: Final report and recommendations. *National Infrastructure Advisory Council*.
- Cox, A., Prager, F., and Rose, A. (2011). Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics. *Transport policy*, 18(2), 307-317 .
- Dorbritz, R. (2011). Assessing the resilience of transportation systems in case of large-scale disastrous events. Paper presented at the Environmental Engineering. *Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering. ICEE*.
- Geurs, K. T., and Van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography* 12(2), 127-140.
- Gilbert, S. W. (2016). Disaster resilience: A guide to the literature. *CreateSpace Independent Publishing Platform*.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, 4(1), 1-23.
- Hollnagel, E., Nemeth, C. P., and Dekker, S. (2008). Resilience engineering perspectives: remaining sensitive to the possibility of failure. Vol. 1, *Ashgate Publishing, Ltd*.
- Ip, W. H., and Wang, D. (2011). Resilience and friability of transportation networks: evaluation, analysis and optimization. *IEEE Systems Journal*, 5(2), 189-198.
- Jenelius, E., Petersen, T., and Mattsson, L.-G. (2006). Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(7), 537-560 .
- Khademi, N., Balaei, B., Shahri, M., Mirzaei, M., Sarrafi, B., Zahabiun, M., and Mohaymany, A. S. (2015). Transportation network vulnerability analysis for the case of a catastrophic earthquake. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 12, 234-254 .
- Kwan, M.-P., and Weber, J. (2008). Scale and accessibility: Implications for the analysis of land use-travel interaction. *Applied Geography*, 28(2), 110-123.

# Increasing the Resilience of Rail Network through the Optimal Location of Relief Trains

*Mostafa Bababeik, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,  
Islamic Azad University of Central Tehran Branch, Tehran, Iran.  
Kambiz Behnia, Associate Professor, Department of Civil Engineering,  
Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.  
Navid Khademi, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,  
Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.*

*E-mail: mostafa.ba@gmail.com*

Received: February 2024- Accepted: June 2024

## **ABSTRACT**

A resilient rail system has the ability to return to its normal operation quickly after losing its performance when an accident happens. In this paper, a method is proposed to increase the resilience of the rail network through the optimal location of the relief train in order to reopen the damaged railroad segment and to allocate it to the vulnerable rail segments of the network. To this end, the exposure of link index is proposed to determine the vulnerability of each rail link in terms of the importance of that link in the network and its accessibility to road as a support system in emergency. Considering the specific operating conditions of the problem, a bi-objective mathematical programming model is proposed to maximize the cooperative coverage of the vulnerable links of the network and minimize the total emergency travel time of relief travel. To solve this model, the Augmented Epsilon-Constrained Method (AUGMECON) has been used to determine the optimal Pareto solutions. In order to illustrate the true applicability of the proposed methodology and verify the obtained results, the rail network of Iran has been adopted as a case study and its results have been analyzed.

**Keywords:** Vulnerability, Resilience, Rail Network, Location Problem, Relief Train