

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

راه آهن از ارکان حیاتی حمل و نقل است که وقوع زلزله می تواند منجر به اختلال طولانی مدت و بروز خسارات سنگین در زیر ساخت های ریلی شود؛ از این رو، ارتقای ایمنی و مقاوم سازی لرزه ای زیرساخت های ریلی شامل ایستگاه ها، پل ها، تونل ها و خطوط اهمیت بسزایی دارد. استان خراسان رضوی به دلیل لرزه خیزی بالا و نقش استراتژیک مسیر ریلی آن در جابه جایی انبوه مسافر (در محور مشهد- تهران) و ترانزیت بین المللی کالا (محور سرخس- بندرعباس)، نیازمند توجه ویژه است. با توجه به محدودیت منابع اقتصادی و اجرایی، این پژوهش با هدف ارزیابی و اولویت بندی مقاوم سازی لرزه ای زیرساخت های اداره کل راه آهن خراسان انجام شده است. در این مطالعه، ابتدا با بهره گیری از نظرات گروه خبرگان و رویکرد غربالگری فازی، معیارهای کلیدی شامل شدت لرزه خیزی، فاصله از گسل، نوع کاربری و وضعیت فعلی مقاومت زیرساخت ها شناسایی شدند. سپس با انطباق اطلاعات مکانی گسل ها و شدت لرزه خیزی بر شبکه ریلی، وضعیت زیرساخت ها ارزیابی گردید و نهایتاً اولویت بندی با استفاده از تکنیک تاپسیس فازی انجام پذیرفت. یافته ها نشان می دهد که در میان بلاک ها، محورهای تربت- ابومسلم و ابومسلم- کاشمر با ضرایب نزدیکی ۰/۲۵ و ۰/۲۸ بالاترین اولویت مقاوم سازی را دارند. نیاز به مقاوم سازی هر سه تونل این ناحیه با ضریب ۰/۵۴۴ در سطح متوسط ارزیابی شد. همچنین، پل های عطار (۰/۳۲۲) و شهید مطهری (۰/۴۴۷) و ایستگاه های نیشابور و شهید مطهری (هر دو با ضریب ۰/۳۲۲) نیازمند توجه فوری تر هستند. به طور کلی، محورهای ریلی مطهری- مشهد و مشهد- نقاب، به ویژه محدوده فریمان تا کاشمر، در اولویت نخست برنامه های مقاوم سازی لرزه ای قرار می گیرند.

واژگان کلیدی: اولویت بندی مقاوم سازی لرزه ای، زیرساخت های راه آهن، روش تاپسیس فازی، روش غربالگری فازی، اداره کل راه آهن خراسان.

ارزیابی و اولویت بندی مقاوم سازی لرزه ای زیرساخت های راه آهن با روش ادغامی غربالگری و تاپسیس فازی (مطالعه موردی: محدوده اداره کل راه آهن خراسان)

امیر حاجی میرزاجان (نویسنده مسئول)

دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، a.hajimirzajan@khaayam.ac.ir

ابراهیم هادیزاده

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله امینی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

مؤید نوروزی

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی خطوط راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

میلااد کاظمیان

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران گرایش راه ترابری، دانشگاه آزاد واحد شاهرود، شاهرود، ایران

۱- مقدمه

از جمله تهدیدات مهم برای زیرساخت های شبکه حمل و نقل ریلی محسوب می گردد که با ایجاد مسدودی های بلندمدت می تواند خسارات اقتصادی، اجتماعی، امنیتی و... در پی داشته باشد. ایران از جمله کشورهای با لرزه خیزی زیاد محسوب می شود و استان خراسان رضوی نیز از جمله استان های ایران است که بیشتر مناطق آن در پهنه هایی با خطر لرزه خیزی متوسط، زیاد و خیلی زیاد واقع شده است. از سوی دیگر راه آهن ها از دو

با توجه به توسعه شهرنشینی و رشد جمعیت، نیاز به حمل و نقل عمومی و جابه جایی بار افزایش یافته است. شبکه حمل و نقل ریلی به عنوان یکی از راه های کارآمد و پایدار، توانایی پاسخگویی به این نیازها را دارد؛ بنابراین، توسعه و بهبود شبکه حمل و نقل ریلی به عنوان یکی از اولویت های اساسی هر کشور در جهت توسعه پایدار و بهبود کیفیت زندگی شهروندان مطرح است. زمین لرزه به عنوان یکی از پدیده های طبیعی پرخطر،

مسافران و کالاها و از سوی دیگر محدودیت منابع جهت تقویت سازه‌ها و لزوم اولویت‌بندی مقام سازی در برابر مخاطرات زلزله تبیین می‌شود (Amouzadeh Omrani et al., 2024). نیاز مبرم به ارتقاء و ایجاد زیرساخت‌های مقاوم در برابر مخاطرات زلزله، به‌خوبی مشخص است (Hadizadeh Raisi et al., 2024). بی‌توجه به مقاوم‌سازی ایستگاه و تونل‌ها و پل‌ها به‌عنوان حساس‌ترین زیرساخت‌ها در هنگام وقوع زلزله می‌تواند آثار جبران‌ناپذیر جانی و مالی مانند آنچه در کشور ترکیه رخ داد ایجاد نماید (Abbas et al., 2021). در هنگام زلزله نه تنها خطوط ریلی بلکه پل‌ها، تونل‌ها و ایستگاه‌ها نیز در معرض تخریب و آسیب هستند (Yehia, 2024). به‌عنوان نمونه زلزله اخیر ترکیه در انتهای سال ۲۰۲۳ آثار مخربی مانند ریزش سنگ بر روی چهار لوکوموتیو و ۳۰ واگن باری در زمان زلزله گزارش شد و آثار مخرب آن بر روی زیرساخت ریلی ترکیه برابر با ۱۹/۶ میلیون لیر برآورد شد (Var et al., 2023).

در نمونه دیگر در سال‌های اخیر، در سال ۲۰۲۲ زلزله ۶/۹ ریشتری در عمق ۱۰ کیلومتری زمین در استان مینوان چین، موجب آسیب جدی به پل و گروه تونل شماره ۱ کوه کیلیان بین هاومن و منطقه جونماچانگک در راه آهن سریع‌السیر لانژو-سین کیانگک چین شد وارد کرد (Sztamári & Leitner, 2021) و علاوه بر توقف سیر زیان مالی بسیار بالایی را در شبکه ریلی چین ایجاد نمود (Wujian et al., 2023). در این شرایط امکان وقوع حوادث مشابه در کشور ما نیز بسیار محتمل است. لذا هدف اصلی این مقاله، در برابر این مخاطرات، ارزیابی و اولویت‌بندی زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی (بلاک‌ها، پل‌ها، تونل‌ها، ایستگاه‌ها و...) است که در ادامه مطالعات گذشته در این محدوده اداره کل راه آهن خراسان و با در نظر گرفتن تکنیک غربالگری فازی توسط نویسندگان توسعه یافته است (Hadizadeh Raisi et al., 2024). این تحقیق به‌عنوان یک گام مهم در جهت افزایش ایمنی، استحکام و پایداری زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی در مواجهه با وقوع زلزله و اثرات آن، دارای اهمیت بسیاری است و می‌تواند به بهبود عملکرد، کاهش

جنبه جابه‌جایی مسافر و حمل بار مورد توجه قرار می‌گیرند و شبکه ریلی ناحیه استحفاظی اداره کل راه آهن خراسان به دلیل وجود شهر زیارتی مشهد و پایانه مرزی سرخس در آن، از هر دو جنبه حائز اهمیت است.

منطق فازی به‌عنوان یک روش پرکاربرد در تصمیم‌گیری‌هایی که با ابهام و عدم قطعیت روبرو هستند، اهمیت بسیاری در اولویت‌بندی و سنجش مسائل نسبی و انتزاعی مختلف دارد. امروزه این روش‌ها در ارزیابی بسیاری از متغیرهای غیرقطعی و یا با ابهام توسعه یافته‌اند. این روش‌ها با کمک تخصیص درجه عضویت به هر شاخص غیرقطعی و به‌ویژه با ایجاد امکان کمی‌سازی بسیاری از مفاهیم مبهم در قالب متغیرهای زبانی، به‌خوبی امکان مدل‌سازی و تحلیل تصمیم‌گیری‌های پیچیده را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها فراهم می‌کند. با توجه به این ویژگی‌ها اهمیت منطق فازی با توجه به انطباق آن با بسیاری از پدیده‌های دنیای واقعی در بسیاری از مطالعات مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه ما به دنبال به‌کارگیری این منطق در ارزیابی و اولویت‌بندی مقاوم‌سازی لرزه‌ای زیرساخت‌های راه آهن هستیم. در این مسیر، بدیهی است که عوامل گوناگونی باید در نظر گرفته شوند که این عوامل معمولاً با درجه‌ای از عدم قطعیت همراه هستند؛ بنابراین، استفاده از منطق فازی به‌عنوان یک روش سامانمند و قابل‌اعتماد برای تحلیل و اولویت‌بندی این عوامل به نحوی است که توانایی مدل‌سازی این عدم قطعیت‌ها را دارد و زمینه تصمیم‌گیری بر پایه داده‌های دقیق‌تر را فراهم می‌نماید. با توجه به این پیش‌زمینه ما در این مطالعه از دو روش غربالگری فازی و تکنیک تاپسیس فازی به ترتیب برای شناسایی کلیدی‌ترین معیارهای ارزیابی و اولویت‌بندی مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها بر اساس نظرات گروه خبره استفاده خواهیم کرد که در ادامه به تشریح هر یک از رویکردهای اشاره شده خواهیم پرداخت.

ضرورت تحقیق در این زمینه از زوایای مختلف مشهود است. از یک سو، در اهمیت و نقش حمل‌ونقل ریلی ایمن به‌عنوان یکی از ارکان اصلی زیرساخت‌های حمل‌ونقل در جابه‌جایی

خطرات و اثرات بالقوه زلزله سازه‌های در محدوده خطر کمک‌کند (Jena et al., 2020). در مطالعه ای دیگر کاظمیان و همکاران (Kazemian et al., 2026)، چارچوبی یکپارچه برای ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک تونل‌های راه‌آهن ارائه کردند که در آن از ترکیب روش‌های Fuzzy FMEA، CRITIC و Fuzzy MARCOS استفاده شده است. نتایج نشان داد مخاطراتی مانند خطرات لرزه‌ای، نفوذ آب و تغییر شکل سازه‌ای از مهم‌ترین ریسک‌ها هستند و برخی تونل‌های مسیر تهران-شمال به دلیل سابقه حوادث و آسیب‌پذیری در برابر سیلاب و زمین‌لغزش در اولویت اقدامات کاهش‌ی قرار دارند

از مهم‌ترین مطالعات داخلی در این حوزه گذشته می‌توان به مطالعه احسانی و بهمن‌پور (Bahmanpour & Ehsani, 2018) اشاره کرد. آنها در حوزه زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی مترو در سطح کشور با تمرکز بر شهر تهران به بررسی آسیب‌پذیری مترو تهران در برابر خطرات زلزله پرداختند. محققان از روش ترکیبی شامل مطالعات کتابخانه‌ای، تکنیک دلفی و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای ارزیابی آسیب‌پذیری سه ایستگاه متروی منتخب در تهران استفاده کردند. همچنین در مطالعه دیگری، اقدسی و همکاران (Aghdasi et al., 2022) با هدف شناسایی و اولویت‌بندی خطرات شبکه‌های حمل‌ونقل ریلی شهری در شهر تهران از روش AHP برای اولویت‌بندی مخاطرات استفاده کردند و زلزله را به‌عنوان یکی از مخاطرات با اولویت مهم در شبکه حمل‌ونقل ریلی شهر تهران معرفی کردند. اگرچه مطالعه خاصی در مورد منطقه خراسان رضوی وجود ندارد، اما این مطالعات بینش‌هایی را در مورد اهمیت ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌ها در زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی در برابر خطرات زلزله ارائه می‌دهد.

فراهانی و همکاران (Farahani et al., 2023)، یک مدل احتمالاتی یکپارچه برای ارزیابی ریسک لرزه‌ای چند خطر و ارزیابی سیستم‌های راه‌آهن با در نظر گرفتن اثرات انتشار امواج لرزه‌ای، روان‌گرایی و لغزش به‌عنوان پدیده‌های اصلی مؤثر بر یکپارچگی زیرساخت شبکه‌ای توزیع شده از طریق یک رابط

خسارات و افزایش توانمندی‌های حمل‌ونقل ریلی در مواجهه با مخاطرات زلزله کمک‌شایانی نماید. علاوه بر این، با توجه به تأثیرات گسترده‌ای که زلزله بر زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی دارد، اهداف این مقاله شامل ارزیابی و تحلیل دقیق زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی در محدوده اداره کل راه‌آهن خراسان، و در نهایت، اولویت‌بندی اقدامات تقویتی و پیشگیرانه با کمک روش‌های غربالگری و تاپسیس فازی به‌منظور ایجاد یک زیرساخت مقاوم ریلی در برابر مخاطرات زلزله می‌باشد.

۲- مروری بر مطالعات گذشته

در این بخش به‌منظور آشنایی با ادبیات پژوهش و مرور به مطالعات گذشته به بررسی مطالعات داخلی و خارجی‌ای می‌پردازیم که مخاطرات زلزله را در حوزه زیرساخت‌های کلیدی و به‌طور خاص حمل‌ونقل ریلی را ارزیابی و اولویت‌بندی نموده‌اند (Joshi et al., 2024; Szatmári & Leitner, 2021). این مطالعات معمولاً از یک الگوی ارزیابی اثرات و مخاطرات بهره می‌برند و درعین‌حال با بهره‌گیری از نقشه‌های فنی مخاطرات زلزله و گسل‌ها به دنبال شناسایی الگوهای مخاطرات آینده هستند. در بین مطالعات از روش‌های مختلفی برای ارزیابی خطرات زلزله در زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی استفاده می‌شود (Tyagi et al., 2023).

به‌طور کلی این رویکردها شامل ترکیب مدل‌های گسل سه‌بعدی با کاتالوگ‌های لرزه‌ای با کیفیت، می‌تواند یک مدل ارزیابی خطر لرزه‌ای قابل اعتماد ایجاد کنند که اطلاعات ضروری در مورد مقاوم‌سازی سازه‌ها را ارائه می‌دهد (Pandolfi et al., 2024). علاوه بر این، روش نقشه‌برداری گسل‌ها بر اساس معیارهای زمین‌لرزه‌ای و تحلیل سلسله‌مراتبی می‌تواند به شناسایی خطرات بالقوه برای سازه‌ها، به‌ویژه تأسیسات حیاتی کمک کند (Sharon et al., 2020). ادغام اطلاعات از گسل‌های شناخته شده و پتانسیل لرزه‌ای آنها در ارزیابی ریسک لرزه‌ای در یک محدوده جغرافیایی می‌تواند داده‌های ارزشمندی را در مورد ریسک لرزه‌خیزی مناطق ارائه دهد و به درک بهتر

از جمله مطالعه نکراسوا و همکاران (Nekrasova et al., 2023) که به مطالعه ارزیابی ریسک لرزه‌ای زیرساخت‌های راه‌آهن دریاچه بایکال در اوکراین می‌پردازند. آنها از دو عامل هم‌افزایی و انتشار ناهمسان‌گرد اثر لرزه‌ای برای ارزیابی زیرساخت‌های راه‌آهن در منطقه دریاچه بایکال استفاده کردند. مطالعه آنها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد نگهداری و تعمیرات زیرساخت‌های ریلی در منطقه مورد مطالعه در اختیار قرار دهد. سور و همکارانش (Sur et al., 2020) در مطالعه خود یک مدل ارزیابی فازی با ادغام نقشه‌های ریسک لرزه‌ای و داده‌های گسل‌های منطقه برای ارزیابی اثرات و خطرات زلزله را ارائه دادند. آنها با استفاده از الگوریتم‌های فازی تحلیل سلسله‌مراتبی^۱ و ارزیابی احتمالی مخاطرات لرزه‌ای، مدلی ارائه دادند که می‌توانست اثرات زمین‌شناسی، زاویه شیب و فاصله از گسل‌ها و میزان دسترسی به جاده‌ها را برای ارزیابی مخاطرات زلزله در نظر بگیرد.

به علاوه وحید و همکارانش (Vahid et al., 2021) در مطالعه‌ای ترکیب ساختارهای زمین‌شناسی و انواع خاک مناطق مختلف و ساختار ساختمان و طبقات را در مدل ارزیابی کردند. آنها بررسی رابطه بین نوع خاک و ساختار زمین‌شناسی در انتقال نیرو به ساختمان‌ها با استفاده از مدل مبتنی بر قانون فازی برای تحلیل آسیب‌پذیری زلزله استفاده نمودند. مطالعه آنها نشان داد که نزدیکی به محل خط گسل، ساختار خاک، شیب زمین و تعداد طبقات می‌تواند به تخمین نیروهای منتقل شده به سازه‌های ساختمان در طول زلزله کمک کند و به تحلیل ارزشمند آسیب‌پذیری و کاهش خطر زلزله را در اختیار قرار دهد.

در مطالعه‌ای دیگر یک مدل ارزیابی فازی مسادک و همکارانش (Msaddek et al., 2021)، ارائه دادند که بر اساس پارامترهای پیچیدگی گسل می‌تواند ایده‌هایی را درباره ویژگی‌های زمین‌شناسی یک منطقه، مانند تراکم و شدت گسل جهت ارزیابی‌های خطر را ارائه دهد. آنها در مطالعه خود از پنج پارامتر مانند بعد فراکتال، طول شکست و چگالی برای ارزیابی آسیب‌پذیری و کاهش خطر زلزله در منطقه اطلس جنوبی کشور

کاربری مبتنی بر GIS ارائه نمودند. جوانبخت و حسینی (Javanbakht & Hoseini, 2019) به ارائه چارچوبی برای شناسایی ویژگی‌های آسیب‌پذیری خطوط انتقال برق استان خراسان رضوی در برابر زلزله می‌پردازد. آنها بر اساس مطالعه خود، در نظر گرفتن برخی ملاحظات را در زیرساخت خطوط انتقال برق پیشنهاد کرده‌اند. آنها با تهیه نقشه میزان آسیب‌پذیری از روش گام‌افزایی استفاده کردند. پارامترهای مؤثر برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری شامل نزدیکی به خط گسل، ساختار زمین‌شناسی، شیب زمین، تراکم جمعیت مناطق شهری و روستایی، فاصله از خطوط ارتباطی بود.

مهدوی‌نژاد و جوانرودی (Mahdavinejad & Javanrudi, 2012) در مطالعه خود به بررسی ارزیابی کاهش خسارات زلزله در شبکه‌های حمل‌ونقل تهران بزرگ و مطالعه موردی خیابان ولیعصر شمالی تهران می‌پردازند. تمرکز آنها بر ارزیابی شبکه‌های مواصلاتی شهر تهران بوده و راه‌های کاهش خسارات ناشی از زلزله در خیابان ولیعصر شمالی و امکان امدادسانی از طریق آن پس از وقوع زلزله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و استراتژی‌های کاهش آسیب ارائه شده است. مطالعه آنها به روش شبیه‌سازی و مدل‌سازی ریاضی انجام پذیرفت. همچنین مطالعه آنها شامل مشاهده‌ی شبکه‌ی ارتباطی و تحلیل نقشه‌های موجود بوده که مناطق بحرانی با تعریف شاخص ریسک‌پذیری ناشی از بیشینه‌ی ارتفاع و کمینه‌ی عرض خیابان‌ها در شرایط امداد مشخص شدند. بنی‌مهد و اربابی (Banimahd & Arbabi, 2013) در مطالعه دیگری به بررسی ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای و توسعه منحنی‌های شکنندگی تحلیلی برای راه‌آهن پرداختند. آنها از فرم‌های غیرخطی برای نشان دادن بالاست و زیرسازی یک مسیر راه‌آهن و جاده‌های منطقه استفاده کردند و تأثیر انواع مختلف اتصالات و ویژگی‌های بستر جاده و ریل را تحلیل نمودند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که بندهای سبک‌تر از جنس چوب نسبت به اتصالات سنگین بتنی نیروهای لرزه‌ای بسیار کمتری را در سیستم ایجاد می‌کنند.

در مقالات خارجی نیز مطالعاتی در این حوزه انجام شده است،

مطالعات قبلی کمک گرفته شده است و با مطالعه مقالاتی که از روش منطق فازی در ارزیابی و تحلیل‌هایشان استفاده کرده‌اند، ایده به کارگیری از این روش برای تحقیقی با موضوع متفاوت در این مقاله مورد استفاده قرار گرفت.

همان‌طور که ملاحظه شد، ارزیابی مخاطرات زلزله با بهره‌گیری از اطلاعات گسل‌ها و اطلاعات لرزه‌شناسی در مطالعات گذشته متداول است؛ اما امکان ادغام این ارزیابی‌ها با ارزیابی مقاوم‌سازی زیرساخت‌های موجود به‌ویژه در حوزه زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی و اولویت‌بندی تقویت و مقاوم‌سازی این زیرساخت‌ها در مطالعات زیادی صورت پذیرفته است. از سویی با توجه به این‌که ارزیابی و اولویت‌بندی با کمک گروه خبره و نظرات همراه با عدم قطعیت خبرگان صورت می‌پذیرد؛ استفاده از منطق فازی یک راه‌حل بسیار مطلوب برای مواجهه علمی با مسئله ارزیابی و اولویت‌بندی مقاوم‌سازی زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی اداره کل راه‌آهن خراسان است (شکل ۱). حال با اشاره به این شکاف تحقیقاتی این مطالعه طرح پژوهشی ذیل را پیشنهاد می‌دهد.

بر اساس این طرح، با تشکیل یک گروه خبره و با تجربه در حوزه زیرساخت حمل‌ونقل ریلی، نسبت به تحلیل مخاطرات

تونس استفاده کردند. در نهایت دوینین و کوکسوا (Dubinin & Kuksova, 2022) در مطالعه خود با استفاده از روش‌های منطق فازی به ارزیابی ایمنی در سیستم‌های مهندسی با در نظر گرفتن عوامل مبهم پرداختند. آنها در مدل فازی خود تأثیر عوامل مختلف بر سطح ایمنی و ریسک در زیرساخت‌ها را ارزیابی و تحلیل کردند و رویکردی جامع برای ارزیابی خطرات ارائه دادند. روش ارزیابی فازی آنها شامل در نظر گرفتن ارتباطات متقابل عوامل، و ترکیب مجموعه‌های فازی در یک مدل ریسک شناختی سلسله‌مراتبی در غالب یک مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی بود.

مطالعات پیشین نقش مهمی در شکل‌دهی به چارچوب روش شناختی و توسعه مدل ارزیابی به کار رفته در این مقاله داشته‌اند. به‌طور مثال، از تحقیقات گذشته برای شناسایی زیرساخت‌های ریلی که در اثر زلزله بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند (سازه خطوط ریلی در بلاک‌ها، پل‌ها، تونل‌ها و ساختمان ایستگاه‌ها) و همچنین پارامترهای مؤثر بر آسیب‌پذیری این زیرساخت‌های ریلی در برابر زلزله (شدت لرزه‌خیزی، فاصله از گسل‌ها و...) بهره‌برداری شده است. همچنین برای تهیه نقشه لرزه‌خیزی و گسل‌های موجود در استان خراسان رضوی نیز از

تحلیل مخاطرات لرزه‌ای در حوزه زیرساخت‌های ریلی

• تیم خبره با کمک بررسی مطالعات مربوط به مخاطرات لرزه‌ای در واقع مشابه در سایر کشورها و داده‌های گذشته ناحیه و طوفان فکری مهم‌ترین مخاطرات و معیارهای ارزیابی مخاطرات با هدف اولویت‌بندی مقام‌سازی را احصا می‌نماید.



انتخاب مهم‌ترین معیارها برای ارزیابی مخاطرات و مقاوم‌سازی لرزه‌ای با روش غربالگری فازی

• تیم خبره با بررسی معیارهای حاصل از مرحله قبل با کمک منطق فازی و ارزیابی غربالگری نسبت به ارزیابی مخاطرات و مقاوم‌سازی لرزه‌ای اقدام می‌نماید. با این اقدام معیارهای کم‌اهمیت حذف می‌شوند.



تصمیم‌گیری در مورد اولویت‌بندی مقاوم‌سازی زیرساخت‌های ریلی با کمک تکنیک تاپسیس فازی

• تیم خبره با توجه به معیارهای مرحله قبل و با بهره‌گیری از ارزیابی با متغیرهای زبانی فازی اولویت‌بندی مقاوم‌سازی زیرساخت‌های ریلی با کمک تکنیک تاپسیس فازی تعیین می‌کند.



تحلیل و اعتبارسنجی نتایج حاصل از اولویت‌بندی زیرساخت‌ها

• تیم خبره با بررسی اولویت‌ها بر اساس ضرایب خروجی مدل در مرحله قبل و سوابق به تحلیل نتایج اعتبارسنجی اولویت‌ها می‌پردازد.

شکل (۱): طرح کلی مراحل پژوهش به‌منظور ارزیابی مخاطرات لرزه‌ای و مقاوم‌سازی زیرساخت ریلی اداره کل راه‌آهن خراسان.

برای این منظور ابتدا به تعریف این زیرساخت‌ها و سپس معیارهای کلیدی برای سنجش و اولویت‌بندی مقاوم‌سازی لرزه‌ای هر یک از زیرساخت‌های حیاتی شبکه حمل‌ونقل ریلی در محدوده اداره کل راه‌آهن خراسان می‌پردازیم. در اثر وقوع زلزله، معمولاً چهار دسته از سازه‌های ریلی تحت تأثیر قرار می‌گیرند که شامل ساختمان‌ها به‌ویژه ایستگاه مسافری، پل‌ها و تونل‌های راه‌آهن و در نهایت سازه خطوط ریلی شامل روسازی و زیرسازی در بلاک‌ها (حداقل دو ایستگاه متوالی) می‌شود که در ادامه به تعریف هر کدام و اثراتی که زلزله بر آنها می‌تواند داشته باشد، می‌پردازیم.

۳-۱- ساختمان ایستگاه

ساختمان ایستگاه به فضایی گفته می‌شود که میان خطوط ریلی و فضای شهری قرار دارد و تمامی امکانات و خدمات را به مسافران و شهروندان عرضه می‌کند و دارای اجزای مختلفی نظیر محوطه‌های ورودی، سالن انتظار، گیت ورودی و... است. آسیب به این ساختمان ایستگاه می‌تواند موجب آسیب دیدن افراد، خسارات مالی و تجهیزاتی، اختلال در شبکه مواصلاتی و اعزام و قبول قطار و ایجاد ترافیک در خطوط دیگر گردد. از طرفی ایستگاه به‌عنوان محل تجمع مسافران و کارکنان می‌باشد و هرگونه آسیب به آن علاوه بر مخاطرات جدی جانی و مالی ممکن امنیت روانی جامعه را تحت تأثیر قرار دهد.

۳-۲- پل راه‌آهن

پل راه‌آهن به سازه‌ای گفته می‌شود که با اتصال دو خط شبکه ریلی به یکدیگر و عبور از یک عارضه جغرافیایی، امکان احداث خطوط ریلی و عبور قطارها از روی موانع را فراهم می‌کند. زلزله با تخریب و ریزش سازه پل‌ها می‌تواند موجب مسدود شدن مسیر ریلی شده که این امر می‌تواند خسارات اقتصادی، اجتماعی، امنیتی و... ایجاد نماید. از این جهت پل‌های ریلی یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی هستند (Hadizadeh Raisi et al., 2024b).

لرزه‌ای در حوزه زیرساخت‌های ریلی و انتخاب مهم‌ترین معیارها برای ارزیابی مخاطرات و مقاوم‌سازی لرزه‌ای با روش غربالگری فازی^۲ اقدام می‌کنیم. سپس این گروه با کمک تکنیک تاپسیس فازی جهت تصمیم‌گیری در مورد اولویت‌بندی مقاوم‌سازی زیرساخت‌های ریلی اقدام می‌کند و در نهایت تحلیل و اعتبارسنجی نتایج حاصل از اولویت‌بندی زیرساخت‌ها انجام می‌شود. این مطالعه دارای نوآوری‌هایی است که آن را از مطالعات پیشین متمایز می‌کند.

اولاً، این پژوهش برای اولین بار به‌طور جامع به ترکیب ارزیابی مخاطرات لرزه‌ای با اولویت‌بندی مقاوم‌سازی زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی در اداره کل راه‌آهن خراسان پرداخته است. برخلاف مطالعات قبلی که بیشتر بر ارزیابی مخاطرات لرزه‌ای مبتنی بر داده‌های گسل و ویژگی‌های زمین‌شناسی تمرکز داشتند، این تحقیق به‌صورت ویژه بر اولویت‌بندی مقاوم‌سازی لرزه‌ای برای بهبود ایمنی و کاهش ریسک زیرساخت‌های ریلی تمرکز دارد. ثانیاً، این مطالعه از یک مدل ترکیبی مبتنی بر منطق فازی شامل غربالگری فازی و تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس فازی^۳ استفاده نموده است. این رویکرد به‌طور هم‌زمان امکان تحلیل معیارهای کیفی و کمی را با لحاظ نمودن عدم قطعیت‌ها و ابهامات در داده‌ها فراهم می‌آورد. برخلاف روش‌های سنتی که فاقد نگاه جامع به کلیه جنبه‌های مرتبط با مقاوم‌سازی زیرساخت‌های ریلی می‌پردازند، مدل پیشنهادی به ارزیابی چندمعیاره و جامع‌تری از ملاحظات لرزه‌ای و گسل‌ها و بحرانی بودن زیرساخت‌ها می‌پردازد.

در ادامه به بررسی مهم‌ترین معیارهای ارزیابی مخاطرات زلزله و رویکردهای انتخاب مهم‌ترین معیارها (غربالگری فازی) و سپس نحوه اولویت‌بندی آنها با منطق فازی (تاپسیس فازی) می‌پردازیم.

۳-۳- زیرساخت‌های ریلی مورد ارزیابی لرزه‌ای

هدف از این مقاله، سنجش و اولویت‌بندی مقاوم‌سازی لرزه‌ای زیرساخت‌های راه‌آهن در برابر مخاطرات زلزله است و

۳-۳- تونل راه‌آهن

جنوب ترکیه و شمال غرب سوریه را لرزاند که خسارات زیادی به خطوط ریلی وارد کرد.

در شکل (۳)، تأثیرات زلزله اخیر ترکیه بر خطوط ریلی این کشور نشان داده شده است (Khan, 2024). از عوامل مهم آسیب‌پذیری خطوط ریلی در برابر زلزله می‌توان به سقوط سنگ، رانش زمین و شعاع قوس اشاره کرد که در ادامه به توضیح مختصر هر کدام پرداخته شده است.



شکل (۲): کمانش خط در اثر زلزله نیوزیلند در سال ۲۰۱۶.



شکل (۳): خروج از خط قطار و ریزش‌های متعدد سنگ بر روی خطوط در اثر زلزله ترکیه در سال ۲۰۲۳.

ریزش سنگ در هنگام زلزله می‌تواند تشدید شود و آثار مخرب و ویرانگری به سازه‌های مسیر (پل‌ها، آبروها، بدنه خطوط

تونل راه‌آهن یک سازه مهندسی است که در دل کوه، زیر زمین، زیر آب و حتی سطح زمین ساخته می‌شود و مسیر مناسب برای احداث خطوط ریلی و عبور قطارها را فراهم می‌سازد. گسلش، زمین‌لغزش و روانگرایی از جمله پدیده‌های طبیعی ناشی از زلزله می‌باشند که می‌توانند آثار مخربی بر روی این زیرساخت حمل‌ونقل ریلی بگذارند. زمین‌لغزش‌ها که معمولاً توسط زلزله تحریک می‌گردند، به‌خصوص در ورودی و خروجی تونل‌ها می‌توانند صدمات زیادی را به فضاهای زیرزمینی وارد نمایند. بسیاری از گزارش‌های مربوط به آسیب فضاهای زیرزمینی در اثر زلزله، به‌واسطه ایجاد لغزش در مدخل‌های تونل‌ها بوده‌اند. روانگرایی نیز به‌خصوص چنانچه فضای زیرزمینی در رسوبات سست دارای درصد بالای ماسه و سیلت احداث شده باشد، می‌تواند صدمات زیادی را به فضای زیرزمینی وارد نماید. در این شرایط این پدیده‌ها در تونل‌های کوهستانی عمومی ریلی در ایران می‌تواند باعث ریزش و یا فرونشست و یا ایجاد آب‌گرفتگی و آب‌شستگی خطوط ناشی از نفوذ آب‌های زیرزمینی شود.

۳-۴- سازه خطوط ریلی

سازه خطوط ریلی شامل دو بخش روسازی و زیرسازی است که زلزله اثرات مخربی بر آن دارد. از جمله آنها می‌توان به کمانش خط، روان‌گرایی، ریزش سنگ بر خط، فرونشست خط، خالی‌شدن زیر خط و خروج از خط قطار اشاره کرد. به‌عنوان نمونه در سال ۲۰۱۶ زلزله‌ای ۷/۴ ریشتری در نیوزیلند با بیش از ۲۵۰ پس‌لرزه موجب خسارت به خطوط ریلی گردید که در شکل (۲) نشان داده شده است (Priyadi et al., 2021).

در سال ۲۰۲۲ زلزله‌ای ۷/۳ ریشتری در شمال شرق ژاپن در منطقه اقیانوس آرام و نزدیک فوکوشیما اتفاق افتاد. قطار سریع‌السیر شینکانسن در اثر این زلزله از ریل خارج شد. حدود ۱۰۰ مسافر در این قطار بودند که از قطار خارج شدند و کسی آسیب ندید. در سال ۲۰۲۳ زمین‌لرزه‌ای به بزرگی ۷/۸ ریشتری،

شهید مطهری، آزادگان، رباط‌ماهی، مختوم‌قلی، مرزداران، رباط‌شرف، گنبدلی و سرخس است. ایستگاه‌های مشهد، نیشابور، نقاب، شهید مطهری و سرخس، ایستگاه‌های تشکیلاتی و مهم راه آهن خراسان هستند. راه آهن خراسان دارای سه تونل می‌باشد که یکی از این تونل‌ها در بلاک مختوم‌قلی - مرزداران و دو تونل دیگر آن در بلاک مرزداران - رباط‌شرف واقع شده‌اند. همچنین تعداد قابل توجهی پل و آبرو در این خطوط قرار گرفته است. در این مقاله به منظور سنجش و اولویت‌بندی ریسک لرزه‌ای در زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی راه آهن خراسان ابتدا از روش غربالگری فازی برای شناسایی و اولویت‌بندی معیارهای مورد ارزیابی استفاده می‌کنیم.

مهم‌ترین معیارهای اولیه احصا شده توسط گروه خبره در این مطالعه جهت ارزیابی و اولویت‌بندی مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها، شامل شدت لرزه‌خیزی، پهنه آسیب‌پذیری برحسب فاصله از گسل، میزان بحرانی بودن زیرساخت در صورت بروز زلزله برحسب نوع کاربری، دسترسی‌ها برای بازیابی در شرایط بحران، وضعیت فعلی زیرساخت از نظر مقاوم‌سازی و فاصله از نزدیک‌ترین ایستگاه تشکیلاتی می‌شوند. این شاخص‌ها بایستی بر اساس نظرات خبره به لحاظ اهمیت ارزیابی و غربال می‌شوند. برای تجمیع تصمیم گروه خبره ما در این بخش با بهره‌گیری از روش غربالگری فازی به انتخاب مهم‌ترین معیارها می‌پردازیم.

۴-۱- انتخاب مهم‌ترین معیارهای اولویت‌بندی مقاوم‌سازی

با رویکرد غربالگری فازی

یکی از مشکلات پیش رو در خصوص انتخاب معیارها تعداد زیاد شاخص‌ها هستند؛ بنابراین، هر انتخاب بین معیارهای متفاوت، نتایج ارزیابی متفاوتی ایجاد می‌کند. در نتیجه، مسئله انتخاب مناسب معیارها یک موضوع مهم است. به منظور کاهش تعداد معیارها و انتخاب معیارها با مطلوبیت بیشتر که سبب افزوده شدن به غنای پژوهش می‌گردد، از روش غربالگری فازی استفاده می‌شود. این روش شبیه تکنیک دلفی است که فقط در یک دور انجام می‌شود و هدف اصلی آن غربال نمودن معیارها یا شاخص

و... وارد نماید. همچنین سقوط این سنگ‌ها از ارتفاع زیاد و برخورد آنها با قطارها نیز ممکن است منجر به تلفات جانی گردد. بلاک‌هایی که مستعد بیشترین میزان سقوط سنگ در طول مسیر باشند، بیشتر در معرض آسیب‌پذیری قرار دارند (Alvioli et al., 2023). در صورت انجام ارزیابی مخاطرات می‌توان با مقاوم‌سازی ایستگاه‌ها و در بلاک‌ها با اصلاح ترانше‌های حاشیه خطوط ریلی، در پل‌ها و تونل‌ها با ارزیابی دوره‌ای مقاومت و تقویت سازه می‌توان مخاطرات زمین‌لرزه را کاهش داد.

رانش زمین که با وقوع زلزله ممکن است به وجود آید می‌تواند خسارات قابل توجهی به سازه خط و حمل‌ونقل ریلی وارد نماید. در شاخص رانش، هرچه طول محل مستعد رانش در هر بلاک بیشتر باشد، میزان آسیب‌پذیری آن بلاک در برابر زلزله بیشتر خواهد بود. همچنین قوس‌های با شعاع کم نیز از جمله نقاط بحرانی هر بلاک محسوب می‌شوند. هنگام وقوع زلزله، نیروی جانبی قابل ملاحظه‌ای به خط و قطارها وارد می‌شود که این پدیده در قوس‌ها، خصوصاً قوس‌های با شعاع کوچک می‌تواند باعث خروج از خط قطارها شود. هر بلاک که دارای بیشترین قوس، خصوصاً قوس‌های با شعاع کم باشد، امکان آسیب‌پذیری بیشتری را دارا است.

۴- سنجش و اولویت‌بندی مقاوم‌سازی لرزه‌ای زیرساخت‌های ریلی اداره کل راه آهن خراسان

اداره کل راه آهن خراسان یکی از نواحی راه آهن جمهوری اسلامی ایران است که حوزه استحفاظی آن از ایستگاه مشهد تا ایستگاه نقاب به صورت دوخطه رفت و برگشت و بلاک سلام - مطهری و از ایستگاه فریمان تا ایستگاه سرخس و به صورت یک‌خطه است که تا مرز ترکمنستان ادامه می‌یابد و به ارائه خدمات ریلی مسافری و باری می‌پردازد.

خطوط اصلی اداره کل راه آهن خراسان دارای ۲۳ ایستگاه به نام‌های مشهد، سلام، فریمان، تربت، ابومسلم، کاشمر، خیام، نیشابور، فولاد، عطار، فردوس، سبزوار، بیهق، اسفراین، نقاب،

گزینه‌های تصمیم چه مقدار شاخص‌های مختلف را تأمین می‌نماید. این بررسی از اقناع شاخص‌ها توسط گزینه‌های تصمیم با استفاده از متغیرهای زبانی هفت‌گانه شامل (خیلی کم، کم، نسبتاً کم، متوسط، نسبتاً زیاد، زیاد و خیلی زیاد) معادل S1 تا S7 امتیازدهی انجام می‌شود (Amirteimoori et al., 2023).

کاربرد چنین مقیاسی یک ترتیب طبیعی از S_i ها ایجاد

می‌کند، به نحوی که برای هر $i < j$ داریم $S_i < S_j$

$$\text{Max}(S_i, S_j) = S_j \quad S_i < S_j \quad (4)$$

$$\text{Min}(S_i, S_j) = S_i \quad S_i \geq S_j \quad (5)$$

بر این اساس مجموعه‌ای از ارزش‌ها به ازای هر گزینه ارائه نموده که میزان یا درجه اقناع گزینه مورد نظر را در ارتباط با معیار زام نمایش می‌دهد.

$$\{\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n\} \quad (6)$$

گام بعدی در این فرایند، پیدا کردن ارزیابی واحد هر فرد خبره از هر گزینه است. بدین منظور باید اندازه منفی اهمیت به صورت زیر تعیین شود.

$$\text{Neg}(s_i) = S_{q-i+1} \quad (7)$$

که در رابطه فوق q بیانگر تعداد نقاط در مقیاس انتخاب شده است یا همان متغیرهای زبانی (بسیار مهم، مهم، نسبتاً مهم، متوسط، نسبتاً بی‌اهمیت، بی‌اهمیت و بسیار بی‌اهمیت) که در مقیاس (S1, S2, S3, ..., S7) تعداد نقاط هفت است (Torkamani et al., 2024). آنگاه نمره واحد گزینه‌ها توسط هر فرد خبره (U) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$U_{ik} = \min \{ \text{Neg}(I_{kj}) \vee p_{ijk} \} \quad (8)$$

$i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, r$

که در آن U_{ik} نمره واحد فرد خبره k در ارتباط با گزینه i ام، I_{kj} درجه اهمیت معیار زام از نظر فرد خبره k ام و p_{ijk} بیانگر میزان امکان اقناع معیار زام توسط گزینه i ام از نظر فرد k ام است. نتیجه مرحله اول فرایند غربالگری به دست آوردن نمرات واحد افراد خبره به گزینه‌های مختلف است.

$$U_{ik} = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{ir}\} \quad (9)$$

از منظر گروه خبره در یک موضوع تخصصی است. به عبارت بهتر، روش غربالگری، رویکردی برای ایجاد اجماع نظر در مسائلی است که اهداف و مؤلفه‌های آن به صراحت مشخص نیستند و با توجه به اینکه ارزیابی‌های متخصصان مبتنی بر تجربه و تخصص بوده و انتزاعی هستند، استفاده از اعداد فازی در ارزیابی به جای اعداد قطعی بسیار بهتر است (Izadikhah et al., 2021). روش غربالگری فازی با ادغام روش غربالگری سنتی و تئوری فازی از عملکرد بهتری برخوردار است که در ادامه به معرفی آن می‌پردازیم. غربالگری فازی دارای دو مرحله فرایند است و از سه جزء تشکیل شده است: اول، گزینه‌هایی که می‌خواهیم از بین آنها زیرمجموعه انتخاب کنیم که در این مطالعه این مجموعه شامل شش معیار ارزیابی زیرساخت‌ها شامل گزینه‌های شدت لرزه‌خیزی، پهنه آسیب‌پذیری برحسب فاصله از گسل، میزان بحرانی بودن زیرساخت در صورت بروز زلزله برحسب نوع کاربری، دسترسی‌ها برای بازیابی در شرایط بحران، وضعیت فعلی زیرساخت از نظر مقاوم‌سازی و فاصله از نزدیک‌ترین ایستگاه‌های تشکیلاتی هستند.

$$A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_m\} \quad (1)$$

دوم شاخص‌هایی که انتخاب گزینه‌های تصمیم بر اساس آنها انجام می‌شود که در این مطالعه تنها شاخص مد نظر اندازه اهمیت در مقاوم‌سازی زیرساخت‌های ریلی راه‌آهن ناحیه خراسان با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی است.

$$C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_n\} \quad (2)$$

و در نهایت سومین جزء نیز خبرگانی هستند که غربالگری با استفاده از نظرات آنها انجام می‌شود که این گروه شامل پنج نفر خبره شامل معاون فنی و زیربنایی مدیرکل، رئیس گروه خط و سازه‌های فنی، رئیس گروه ساختمان و تأسیسات و دو تن کارشناسان باتجربه خط و ساختمان در اداره کل راه‌آهن خراسان بوده‌اند.

$$E = \{E_1, E_2, E_3, \dots, E_r\} \quad (3)$$

هر کدام از خبرگان می‌بایست اعلام نماید که هر کدام از

مجموعه یک تا r قرار دارد؛ ارائه شده است. حال برای هر یک از گزینه‌ها، ارزیابی واحد افراد خبره باید به صورت نزولی مرتب گردد. B_{ij} بیانگر زامین بالاترین نمره راهکار i است که بر اساس آن می‌توان ارزیابی کلی از راهکار i را به صورت رابطه (۱۴) محاسبه نمود.

$$u_i = \max_j Q(j)_i^B \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

که در این رابطه، B_{ij} بیانگر ارزش زامین نمره خوب راهکار i است. $Q(j)$ بیانگر آن است که تصمیم گیرنده چقدر احساس می‌کند که حمایت حداقل ز فرد خبره لازم است. B_{ij} را می‌توان به عنوان وزن دهی به زامین نمره خوب گزینه (B_{ij}) بر اساس خواست تصمیم گیرنده (که حمایت ز فرد خبره $Q(j)$ را لازم می‌داند) در نظر گرفت. عملگر \max نقش جمع را در روش میانگین گیری عددی معمولی ایفا می‌کند. همان‌طور که اشاره شد، در این مطالعه گزینه‌های انتخاب شدت لرزه خیزی، پهنه آسیب پذیری بر حسب فاصله از گسل، میزان بحرانی بودن زیرساخت در صورت بروز زلزله بر حسب نوع کاربری، دسترسی‌ها برای بازیابی در شرایط بحران، وضعیت فعلی زیرساخت از نظر مقاوم سازی و فاصله از نزدیک ترین ایستگاه تشکیلاتی هستند و ملاک اظهار نظر گروه خبره اهمیت هر یک از این گزینه‌ها در مقاوم سازی زیرساخت‌های ریلی در شرایط محدودیت منابع است. به منظور جلوگیری از اطاله مطالعه بدون تشریح اجرای گام‌های روش معرفی شده صرفاً به ارائه آخرین جداول محاسبات شامل جدول (۱) که مبین امتیاز معیارها و امتیاز نهایی غربالگری معیارهای اشاره شده در جدول (۲) بسنده می‌کنیم.

در ادامه فرآیند غربالگری فازی به ترکیب ارزیابی‌های انجام شده توسط افراد خبره می‌پردازیم تا یک ارزیابی کلی از هر گزینه به دست آوریم. اولین گام در این مرحله آن است که یک تابع اجماع نظر (Q) برای بدنه تصمیم گیری تعیین نماییم. این تابع بیان می‌دارد که توافق چه تعداد از افراد خبره لازم است تا یک گزینه مورد قبول قرار گرفته و از فرآیند غربالگری عبور نماید. بر این اساس، برای هر $i (k = 1, 2, \dots, r)$ فرد خبره، بدنه تصمیم گیری یک ارزش $QA(k)$ فراهم می‌نماید. $QA(k)$ بیان می‌دارد که اگر k فرد خبره از گزینه‌ای راضی باشند، آنگاه چگونگی پذیرش یک گزینه چه خواهد بود. حال اگر q بیانگر تعداد نقاط در مقیاس انتخاب شده و r بیانگر تعداد افراد خبره مشارکت کننده در تصمیم گیری باشد، آنگاه تابع اجماع نظر به صورت توابع (۱۰ و ۱۱) در قسمت ذیل تعریف می‌شوند.

$$Q_A(k) = S_{b(k)} \quad K = 1, 2, \dots, r \quad (10)$$

$$Q(k) = \text{Int} \left[1 + \left(\frac{k^*(q-1)}{r} \right) \right] \quad K = 1, 2, \dots, r \quad (11)$$

که در آن int بیانگر تابع عدد صحیح است و روشن است که در تابع فوق q و r هر چه باشند، مطابق روابط (۱۲) و (۱۳) داریم.

$$Q_A(0) = S_1 \quad (12)$$

$$Q_A(r) = S_q \quad (13)$$

بعد از انتخاب مناسب تابع اجماع نظر، می‌توانیم از عملگر OWA برای اجماع نظر خبرگان استفاده کنیم. در اینجا برای هر یک از m گزینه، یک نمره واحد توسط فرد خبره k ام که در

جدول (۱): نمره واحد معیارها.

فاصله از نزدیک ترین ایستگاه تشکیلاتی	وضعیت فعلی زیرساخت	دسترسی‌ها برای بازیابی	میزان بحرانی بودن زیرساخت	پهنه آسیب پذیری بر حسب فاصله از گسل	شدت لرزه خیزی	$U_{ik} = \min \{ \text{Neg}(I_{kj}) \vee p_{ijk} \}$
۴	۷	۴	۷	۷	۷	داور ۱
۶	۶	۴	۶	۷	۷	داور ۲
۳	۶	۵	۷	۶	۷	داور ۳
۵	۵	۴	۵	۷	۷	داور ۴
۲	۵	۳	۵	۶	۶	داور ۵

اساس، فاصله کمتر از ۱ کیلومتر تا خطوط گسل به‌عنوان پهنه با آسیب‌پذیری خیلی زیاد، فاصله ۱ تا ۳۰ کیلومتر، پهنه با آسیب‌پذیری زیاد، فاصله ۳۰ تا ۵۰ کیلومتر، پهنه با آسیب‌پذیری متوسط و فاصله بیش از ۵۰ کیلومتر پهنه با آسیب‌پذیری کم در نظر گرفته می‌شود. پهنه‌بندی فاصله از خطوط گسل در محدوده اداره کل راه آهن خراسان در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، زیرساخت‌های ریلی در حوالی ایستگاه‌های تربت، ابومسلم، فریمان و همچنین نیشابور، عطار، فردوس، بیهق، اسفراین و نقاب قرابت زیادی به گسل‌های فعال در محدوده مورد مطالعه این پژوهش دارند. این موضوع در اولویت‌بندی مقاوم‌سازی که در ادامه تشریح می‌شود توسط گروه خبره، لحاظ خواهد شد.

۴-۲-۳- میزان بحرانی بودن زیرساخت در صورت بروز زلزله برحسب نوع کاربری

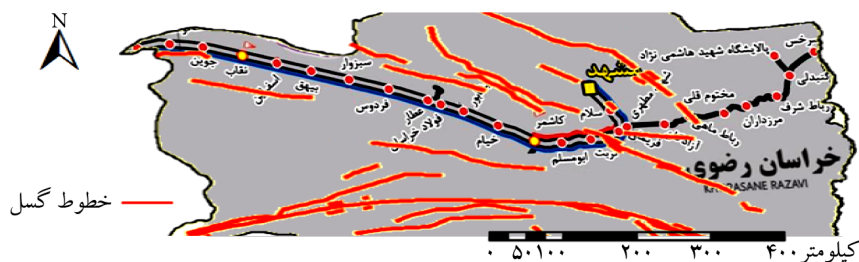
این شاخص برای بلاک سلام- شهید مطهری و بلاک‌های بین ایستگاه شهید مطهری تا ایستگاه سرخس که اغلب قطارها باری هستند، کم، برای بلاک‌های مشهد- سلام و سلام- فریمان و بلاک‌های بین ایستگاه کاشمر تا ایستگاه نقاب به دلیل وجود قطارهای مسافری، متوسط و برای بلاک‌های بین ایستگاه فریمان تا ایستگاه کاشمر به دلیل وجود قطارهای مسافری و باری، زیاد در نظر گرفته شده است. در واقع با توجه به اهمیت حفظ جان مسافران، در این مطالعه ملاک بحرانی بودن هر یک از زیرساخت‌ها بر اساس میزان اثرگذاری بر سیر ایمن قطارهای مسافری چه در زمان سیر و چه در زمان مسافرگیری تبیین شده است و لذا بر این اساس زیرساخت‌های محور ریلی سرخس که

پارامترهای لرزه‌خیزی مرتبط و با استفاده از روابط کاهندگی که بهترین تطابق را با داده‌های زمین‌لرزه‌های ایران دارند، نقشه خطر زمین‌لرزه ایران در شرایط سنگ‌بستر در دوره بازگشت ۴۷۵ ساله با روش احتمالاتی به‌روزرسانی شده است. عدم قطعیت مربوط به هر مرحله از مطالعه نیز با کمک درخت منطقی در محاسبه خطر لرزه‌ای وارد گردیده است (Karimiparidari, 2014).

برای ارزیابی این شاخص در محدوده مورد مطالعه از پیشینه شتاب زمین (PGA) استفاده شده است که برابر است با حداکثر شتاب زمین که در هنگام لرزش زمین‌لرزه در یک مکان رخ داده است. این پارامتر بسیار مهم است زیرا اساس طراحی حرکت زمین‌لرزه اغلب بر پایه اوج شتاب جنبش زمین تعریف می‌شود (Danciu et al., 2021). خطر لرزه‌خیزی PGA برای مقادیر بین ۰/۰۵ تا ۰/۱۴ خیلی کم، بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۲ کم، بین ۰/۲۳ تا ۰/۲۸ متوسط رو به کم، بین ۰/۲۹ تا ۰/۳۴ متوسط، بین ۰/۳۵ تا ۰/۳۹ متوسط رو به زیاد، بین ۰/۴۰ تا ۰/۴۵ زیاد و بین ۰/۴۶ تا ۰/۵۰ خیلی زیاد در نظر گرفته شده است. اثر این شاخص بر اولویت‌بندی مقاوم‌سازی زیرساخت‌های ریلی در بخش‌های بعد بررسی می‌گردد. طبیعتاً هر چه مقدار این شاخص در ارزیابی هر یک از زیرساخت‌ها بیشتر باشد، پتانسیل وقوع خطر و اولویت مقاوم‌سازی بیشتر خواهد بود (Sinha et al., 2016).

۴-۲-۲- پهنه آسیب‌پذیری برحسب فاصله از گسل

فاصله از خطوط گسل یکی از شاخص‌های بسیار مهم در آسیب‌پذیری زلزله است. در این مطالعه ما با توجه به اهمیت این معیار در شناسایی پتانسیل وقوع خطر، فاصله هر یک از زیرساخت‌ها تا نزدیک‌ترین گسل ملاک ارزیابی گروه خبره قرار داده‌ایم. بر این



شکل (۵): پهنه‌بندی خطوط گسل در محدوده اداره کل راه آهن خراسان.

۳-۴- اولویت‌بندی مقاومت‌سازی زیرساخت‌های ریلی ناحیه خراسان با کمک روش تاپسیس فازی

در این بخش با کمک تکنیک تاپسیس فازی و بهره‌گیری از متغیرهای زبانی فازی از نظرات گروه خبره به‌منظور ارزیابی هر یک از بلاک‌ها، ایستگاه‌ها، پل‌ها و تونل‌ها بهره‌می‌بریم. در این مرحله ما برای هر یک از این چهار گروه زیرساخت با توجه به حیطه جغرافیایی کلیه زیرساخت‌های در اختیار را مطابق جدول (۳) جهت ارزیابی و اولویت‌بندی بر اساس معیارهای غربال شده در بخش قبل در اختیار خبرگان قرار می‌دهیم.

همان‌طور که مشاهده می‌شود این زیرساخت‌ها شامل ۲۴ بلاک، ۳ تونل، ۵ پل و ۵ ایستگاه می‌شوند. ارزیابی از گروه خبره با کمک متغیرهای زبانی مطابق جدول (۳) در مقیاس لیکرت به‌صورت خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف انجام شده است که نتیجه یک نمونه از نظرات گروه خبره در جدول (۳) نشان داده شده است.

به‌طور کلی غالباً کاربری حمل‌ونقل بار دارد در این شاخص چندان بحرانی تلقی نمی‌گردد. با در نظر گرفتن این فرضیات هر یک از اعضای گروه خبره اقدام به ارزیابی هر یک از زیرساخت‌های حمل‌ونقل ریلی در حوزه اداره کل راه‌آهن خراسان پرداخت که در ادامه انجام اولویت‌بندی مورد استفاده قرار گرفت.

۴-۲-۴- وضعیت فعلی زیرساخت از نظر مقاومت‌سازی

در این بخش توسط گروه خبره با توجه به بازدیدهای میدانی و نظارت گروه خبره به ارزیابی وضعیت فعلی مقاومت (پیش از زلزله) هر کدام از بلاک‌ها، ایستگاه‌ها، پل‌ها و تونل‌ها در برابر مخاطرات زلزله می‌پردازیم. این معیار به‌عنوان یکی از پارامترهای اثرگذار در آسیب‌پذیری ناشی از زلزله مورد مطالعه با دقت و وسواس زیاد توسط گروه خبره مورد ارزیابی قرار گرفته و خروجی به‌صورت متغیرهای زبانی برای انجام اولویت‌بندی در طی مراحل بعد توسط پرسش‌نامه جمع‌آوری گردید.

جدول (۳): نمونه از نظرات گروه خبره جهت ارزیابی زیرساخت‌ها ریلی از نظر مؤلفه‌های ریسک مخاطرات زلزله.

وضعیت مقاومت‌سازی	بحرانی بودن	آسیب‌پذیری بر اساس فاصله از گسل	لرزه‌خیزی	زیرساخت مورد ارزیابی / معیار ارزیابی و اولویت‌بندی
خیلی خوب	متوسط	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط	مشهد - سلام
خیلی خوب	متوسط	آسیب‌پذیری خیلی زیاد	متوسط	سلام - فریمان
خوب (قوس)	زیاد	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط	فریمان - تربت
خوب (قوس)	زیاد	آسیب‌پذیری خیلی زیاد	متوسط رو به زیاد	تربت - ابومسلم
خوب (قوس)	زیاد	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط رو به زیاد	ابومسلم - کاشمر
خوب (پل‌ها)	متوسط	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط رو به زیاد	کاشمر - خیام
خوب (پل‌ها)	متوسط	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط رو به زیاد	خیام - نیشابور
خوب (پل‌ها)	متوسط	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط رو به زیاد	نیشابور - فولاد
خوب (پل‌ها)	متوسط	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط رو به زیاد	فولاد - عطار
خوب (پل‌ها)	متوسط	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط رو به زیاد	عطار - فردوس
خوب (پل‌ها)	متوسط	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط رو به زیاد	فردوس - سبزوار
خوب (پل‌ها)	متوسط	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط رو به زیاد	سبزوار - بیهق
خوب (پل‌ها)	متوسط	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط رو به زیاد	بیهق - اسفراین
خوب (پل‌ها)	متوسط	آسیب‌پذیری متوسط	متوسط	اسفراین - نقاب
خیلی خوب	کم	آسیب‌پذیری خیلی زیاد	متوسط	سلام - شهید مطهری
خیلی خوب	کم	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط	فریمان - شهید مطهری
متوسط (فرونشست و قوس)	کم	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط	شهید مطهری - آزادگان

بلاک‌ها

ادامه جدول (۳).

وضعیت مقاوم‌سازی	بحرانی بودن	آسیب‌پذیری بر اساس فاصله از گسل	لرزه‌خیزی	زیرساخت مورد ارزیابی / معیار ارزیابی و اولویت‌بندی
خوب (قوس)	کم	آسیب‌پذیری خیلی زیاد	متوسط رو به کم	آزادگان - رباط ماهی
خوب (قوس)	کم	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط رو به کم	رباط ماهی - مختم قلی
متوسط (قوس و ترانشه)	کم	آسیب‌پذیری زیاد	کم	مختم قلی - مرزداران
متوسط (قوس و ترانشه)	کم	آسیب‌پذیری متوسط	کم	مرزداران - رباط شرف
خوب (قوس)	کم	آسیب‌پذیری کم	کم	رباط شرف - گنبدلی
خیلی خوب	کم	آسیب‌پذیری کم	خیلی کم	گنبدلی - سرخس
خیلی خوب	کم	آسیب‌پذیری کم	خیلی کم	سرخس - تجن
خیلی خوب	کم	آسیب‌پذیری متوسط	کم	کیلومتر ۹۷۳+۷۴۰ تا ۹۷۱+۴۶۰
خیلی خوب	کم	آسیب‌پذیری متوسط	کم	کیلومتر ۹۸۴+۹۲۰ تا ۹۸۲+۳۲۰
خیلی خوب	کم	آسیب‌پذیری متوسط	کم	کیلومتر ۹۸۶+۷۸۰ تا ۹۸۵+۷۴۰
متوسط	متوسط	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط	پل یازده چشمه (کیلومتر ۹۱۱+۰۱۶)
خوب	کم	آسیب‌پذیری کم	خیلی کم	پل تجن (۱۰۵۲+۸۳۷)
متوسط	کم	آسیب‌پذیری متوسط	کم	پل کانپو (کیلومتر ۹۹۴+۳۰۸)
خوب	متوسط	آسیب‌پذیری زیاد	زیاد	پل عطار (کیلومتر ۷۶۱+۹۲۸)
خوب	کم	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط	پل شهید مطهری (کیلومتر ۸۹۰+۶۸۷)
متوسط	زیاد	آسیب‌پذیری زیاد	زیاد	ایستگاه مشهد
متوسط	زیاد	آسیب‌پذیری زیاد	زیاد	ایستگاه نیشابور
متوسط	زیاد	آسیب‌پذیری متوسط	متوسط	ایستگاه نقاب
خوب	زیاد	آسیب‌پذیری زیاد	متوسط	ایستگاه شهید مطهری
خوب	زیاد	آسیب‌پذیری کم	خیلی کم	ایستگاه سرخس

است. گزینه ایده‌آل مثبت، معیارهای با مطلوبیت نزولی را حداکثر و معیارهای با مطلوبیت صعودی را حداقل می‌نماید. گزینه ایده‌آل منفی، معیارهای با مطلوبیت صعودی را حداکثر و معیارهای با مطلوبیت نزولی را حداقل می‌کند. گزینه بهینه، نزدیک‌ترین گزینه به راه‌حل ایده‌آل مثبت و دورترین گزینه از راه‌حل ایده‌آل منفی است. برای به‌کارگیری این روش ابتدا گزینه‌های ایده‌آل فازی در قالب ماتریس تصمیم‌گیری که شامل مجموعه‌ای از m گزینه و n معیار که یک ماتریس مربعی شامل وزن شاخص‌ها ($w_{n \times n}$) است به صورت زیر تشکیل می‌گردد.

$$V = w_{n \times n} = \begin{bmatrix} v_{12} & \dots & v_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

مطابق ماتریس فوق، A_1, A_2, \dots, A_m گزینه‌ها

در بخش بعد با استفاده از رویکرد مدل‌سازی فازی می‌توان نسبت به اولویت‌بندی فازی زیرساخت‌های کلیدی برای ارزیابی و اولویت‌بندی اقدام نمود. در مدل‌های فازی تکنیک‌های متنوعی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها وجود دارد که مدل تاپسیس یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است. روش تاپسیس یکی از پرستفاده‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است که بر اساس یک منطق ساده توسط هوانگ و یون (Hwang & Yoon, 1981) در سال ۱۹۸۱ ارائه شد. منطق این روش بدین صورت است که یک گزینه ایده‌آل و یک گزینه ضد ایده‌آل تشکیل می‌دهد و گزینه‌ها را بر اساس کمترین فاصله از گزینه ایده‌آل و بیشترین فاصله از گزینه ضد ایده‌آل اولویت‌بندی می‌کند.

منطق این مدل شامل ارزیابی گزینه ایده‌آل مثبت و منفی

انجام می‌گیرد. پس از تعیین مقدار CI_i^* برای هر یک از گزینه‌ها، گزینه‌ای که بیشترین مقدار CI_i^* را کسب کند، بیشترین فاصله را با گزینه ضد ایده‌آل و نزدیک‌ترین گزینه به گزینه ایده‌آل می‌باشد.

$$CI_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (20)$$

به منظور جلوگیری از طولانی شدن مطالعه از بیان جزئیات محاسبات خودداری کرده و نتایج نهایی اولویت‌بندی نتایج به صورت جدول (۴) ارائه می‌شود.

۵- نتایج

نتایج به دست آمده که خلاصه آن در جدول (۴) ارائه شده است، نشان می‌دهد که بحرانی‌ترین بلاک‌ها حدفاصل فریمان تا کاشمر واقع شده‌اند که شامل بلاک‌های تربت-ابومسلم، ابومسلم-کاشمر و فریمان-تربت می‌شود. در واقع خطوط ریلی این بلاک‌ها باید در اولویت مقاوم‌سازی لرزه‌ای قرار گیرند. همچنین توصیه می‌شود محور ریلی از ایستگاه مطهری تا مشهد از مشهد تا نقاب در اولویت بعدی مقاوم‌سازی لرزه‌ای باشد. از طرف دیگر، بلاک‌های بین ایستگاه مطهری تا سرخس به‌ویژه مرزداران-رباط شرف و رباط شرف-گنبدلی، اولویت کمتری جهت مقاوم‌سازی لرزه‌ای دارند. در بین تونل‌ها، از آنجایی که هر سه در فاصله نزدیکی به هم واقع شده‌اند منطقی است که سطح خطر لرزه‌ای و تبع آن اولویت مقاوم‌سازی لرزه‌ای برابر و در حد متوسط ارزیابی گردیده است. در میان پل‌های مورد بررسی، پل عطار و مطهری اولویت بیش‌تری جهت مقاوم‌سازی در برابر زلزله دارند. در میان ایستگاه‌های تشکیلاتی نیز مقاوم‌سازی ایستگاه‌های راه‌آهن نیشابور و شهید مطهری و پس از آن مشهد و نقاب باید در اولویت مقاوم‌سازی لرزه‌ای قرار گیرند. همچنین می‌توان نتیجه گرفت با توجه به تحلیل صورت گرفته محور ریلی مطهری به سرخس با توجه به ریسک پایین‌تر زلزله، نیاز به مقاوم‌سازی کمتری در زیرساخت‌ها دارد. به‌علاوه این محور عموماً مورد بهره‌برداری حمل بار بوده و بحرانی نیز تلقی نمی‌شود. اجرای

زیرساخت‌های مورد ارزیابی) هستند و $C1, C2, \dots, Cn$ معیارها (معیارهای ارزیابی و اولویت‌بندی شامل شدت لرزه‌خیزی، پهنه آسیب‌پذیری برحسب فاصله از گسل، میزان بحرانی بودن زیرساخت در صورت بروز زلزله برحسب نوع کاربری و نهایتاً وضعیت فعلی زیرساخت از نظر مقاوم‌سازی) هستند. V_{ij} ارزیابی گزینه A_i در برابر معیار C_j است. در ابتدا ماتریس تصمیم‌گیری (V_{ij}) را تشکیل داده و با توجه به اینکه شاخص‌ها دارای مقیاس‌های متفاوتی هستند، ماتریس تصمیم‌گیری با استفاده از روش نرم اقلیدسی بی‌مقیاس شده و ماتریس V_{ijD} ایجاد می‌گردد. در گام بعد، ماتریس تصمیم‌گیری بی‌مقیاس موزون (V) محاسبه می‌شود. در ادامه به وسیله ضرب ماتریس وزن‌ها در ماتریس تصمیم‌گیری بی‌مقیاس، ماتریس تصمیم‌گیری بی‌مقیاس موزون به دست می‌آید. سپس مشخص کردن گزینه ایده‌آل و گزینه ضد ایده‌آل بر اساس الگوی روابط (۱۶) و (۱۷) انجام می‌شود.

$$(16) \text{ [بردار بهترین مقدار هر شاخص در ماتریس } V = [V_{ij}^+ | V] \text{]} = \text{گزینه ایده‌آل } (A_j^+)$$

$$(17) \text{ [بردار بهترین مقدار هر شاخص در ماتریس } V = [V_{ij}^- | V] \text{]} = \text{گزینه ایده‌آل } (A_j^-)$$

برای به دست آوردن فاصله هر گزینه از گزینه ایده‌آل و گزینه ضد ایده‌آل صورت می‌گیرد. برای به دست آوردن فاصله هر گزینه از گزینه ایده‌آل و ضد ایده‌آل از روابط زیر استفاده می‌شود. S_i^+ برابر با فاصله هر گزینه تا گزینه ایده‌آل می‌باشد و S_i^- برابر با فاصله هر گزینه تا گزینه ضد ایده‌آل است. راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی و اندازه فاصله گزینه i با راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی به روش اقلیدسی طبق فرمول‌های (۱۸) و (۱۹) محاسبه شده است و در مرحله آخر به محاسبه نزدیکی نسبی گزینه i پرداخته و محاسبه خواهد شد.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

شاخص نزدیکی نسبی هر گزینه (CI_i^*) با استفاده از رابطه (۲۰) به دست می‌آید و در انتها بر اساس مقدار CI_i^* رتبه‌بندی

سیستم راه آهن فراهم نماید. همان‌طور که قبلاً در این مطالعه به آن اشاره شد، در این پژوهش به سنجش و اولویت‌بندی مقاوم‌سازی لرزه‌ای زیرساخت‌های راه آهن با روش منطق فازی (دو رویکرد غربالگری و تاپسیس با بهره‌گیری از متغیرهای زبانی فازی) در محدوده اداره کل راه آهن خراسان پرداخته شد.

اقداماتی برای افزایش مقاومت لرزه‌ای زیرساخت‌های راه آهن از اهمیت زیادی برخوردار است. مقاوم‌سازی لرزه‌ای با استفاده از روش‌های مختلف از جمله تقویت سازه‌ها، ارتقا سیستم‌های ایمنی و به‌کارگیری مواد و فناوری‌های مقاوم به لرزه، می‌تواند به بهبود امنیت و پایداری زیرساخت‌های راه آهن کمک نماید و در نتیجه، از تأثیرات منفی زلزله‌ها کاسته و عملکرد بهتر و پایداری را برای

جدول (۴): جدول نهایی رتبه‌بندی ریسک مخاطرات زلزله در زیرساخت ریلی اداره کل راه آهن خراسان.

ضریب نزدیکی (CI_1^*)	فاصله بردار ایده آل منفی (S_1^-)	فاصله بردار ایده آل مثبت (S_1^+)	زیرساخت مورد ارزیابی/ معیار ارزیابی اولویت‌بندی	ضریب نزدیکی (CI_1^*)	فاصله بردار ایده آل منفی (S_1^-)	فاصله بردار ایده آل مثبت (S_1^+)	زیرساخت مورد ارزیابی/ معیار ارزیابی اولویت‌بندی
۰/۵۵۳	۰/۹۵۹	۰/۷۷۵	مختوم قلی - مرزداران	۰/۳۸	۰/۶۳	۱/۰۲	مشهد - سلام
۰/۶۱۷	۱/۰۲۰	۰/۶۳۲	مرزداران - رباط شرف	۰/۳۴	۰/۶۰	۱/۱۵	سلام - فریمان
۰/۶۰۴	۱/۰۵۸	۰/۶۹۳	رباط شرف - گنبدلی	۰/۳۲	۰/۵۳	۱/۱۱	فریمان - تربت
۰/۵۷۹	۱/۱۶۶	۰/۸۴۹	گنبدلی - سرخس	۰/۲۵	۰/۴۱	۱/۲۷	تربت - ابومسلم
۰/۵۷۹	۱/۱۶۶	۰/۸۴۹	سرخس - تجن	۰/۲۸	۰/۴۶	۱/۱۵	ابومسلم - کاشمر
۰/۵۴۴	۱/۰۳۹	۰/۸۷۲	کیلومتر ۴۶۰+۹۷۱ تا ۷۴۰+۹۷۳	۰/۳۵	۰/۵۷	۱/۰۶	کاشمر - خیام
۰/۵۴۴	۱/۰۳۹	۰/۸۷۲	کیلومتر ۳۲۰+۹۸۲ تا ۹۲۰+۹۸۴	۰/۳۵	۰/۵۷	۱/۰۶	خیام - نیشابور
۰/۵۴۴	۱/۰۳۹	۰/۸۷۲	کیلومتر ۷۴۰+۹۸۵ تا ۷۸۰+۹۸۶	۰/۳۵	۰/۵۷	۱/۰۶	نیشابور - فولاد
۰/۵۴۸	۱/۰۰۰	۰/۸۲۵	پل یازده چشمه (کیلومتر ۰۱۶+۹۱۱)	۰/۳۵	۰/۵۷	۱/۰۶	فولاد - عطار
۰/۶۴۱	۰/۱۸۳	۰/۶۶۳	پل تجن (۱۰۵۲+۸۳۷)	۰/۳۵	۰/۵۷	۱/۰۶	عطار - فردوس
۰/۶۱۷	۱/۰۲۰	۰/۶۳۲	پل کانپو (کیلومتر ۳۰۸+۹۹۴)	۰/۳۵	۰/۵۷	۱/۰۶	فردوس - سبزوار
۰/۳۲۲	۰/۵۲۹	۱/۱۱۴	پل عطار (کیلومتر ۷۶۱+۹۲۸)	۰/۳۵	۰/۵۷	۱/۰۶	سبزوار - بیهق
۰/۴۴۷	۰/۷۷۵	۰/۹۵۹	پل شهید مطهری (کیلومتر ۶۸۷+۸۹۰)	۰/۴۴	۰/۷۲	۰/۹۲	بیهق - اسفراین
۰/۴۱۵	۰/۷۰۰	۰/۹۸۵	ایستگاه مشهد	۰/۳۷	۰/۷۲	۱/۲۲	اسفراین - نقاب
۰/۳۲۲	۰/۵۲۹	۱/۱۱۴	ایستگاه نیشابور	۰/۴۱	۰/۷۵	۱/۱۰	سلام - شهید مطهری
۰/۴۴۰	۰/۷۲۱	۰/۹۱۷	ایستگاه نقاب	۰/۵۰	۰/۸۵	۰/۸۵	فریمان - شهید مطهری
۰/۳۲۲	۰/۵۲۹	۱/۱۱۴	ایستگاه شهید مطهری	۰/۴۳	۰/۸۱	۱/۰۶	شهید مطهری - آزادگان
۰/۵۴۴	۱/۰۳۹	۰/۸۷۲	ایستگاه سرخس	۰/۴۷	۰/۸۳	۰/۹۲	آزادگان - رباط ماهی
							رباط ماهی - مختوم قلی

ریلی با در نظر گرفتن شرایط خاص منطقه اداره کل راه‌آهن خراسان و استفاده از ابزارهای تصمیم‌گیری قابل اعتماد فازی ارائه می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان یک الگوی ارزیابی و اولویت‌بندی مخاطرات در سایر مناطق شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران به‌ویژه مسیرهای پرتردد مسافری و باری به کار گرفته شود. به کمک چارچوب ارائه شده در این مقاله، با وجود محدودیت‌های منابع مالی و تجهیزاتی، تصمیم‌گیران صنعت ریلی می‌توانند برنامه‌های اثربخش مقاومت‌سازی لرزه‌ای زیرساخت‌ها از جمله پل‌ها، تونل‌ها، ساختمان ایستگاه‌ها و خطوط ریلی را بهینه‌سازی کنند و تبعات اقتصادی، اجتماعی و... ناشی از خسارت‌های زلزله را به حداقل برسانند. استفاده از روش‌های فازی در ارزیابی و تصمیم‌گیری، دقت و کارایی برنامه‌های مقاومت‌سازی را افزایش داده و به بهبود عملکرد و ایمنی شبکه ریلی کشور در شرایط بحران منجر خواهد شد.

References

مراجع

- Abbas, M., Elbaz, K., Shen, S.-L., & Chen, J. (2021). Earthquake effects on civil engineering structures and perspective mitigation solutions: A review. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19), 1-17.
- Aghdasi, A., Abbaspour, M., & Ahmadi, A. (2022). Identifying and prioritizing the risks of urban rail transportation networks with emphasis on resilience (Case study: Tehran Metro). *Journal of Health*, 13(1), 110-122.
- Alvioli, M., Falcone, G., Mendicelli, A., Mori, F., Fiorucci, F., Ardizzone, F., & Moscatelli, M. (2023). Seismically induced rockfall hazard from a physically based model and ground motion scenarios in Italy. *Geomorphology*, 429, 108652.
- Amirteimoori, A., Allahviranloo, T., Zadmiraee, M., & Hasanzadeh, F. (2023). On the environmental performance analysis: A combined fuzzy data envelopment analysis and artificial intelligence algorithms. *Expert Systems with Applications*, 224, 119953.
- Amouzadeh Omrani, M., Hadizadeh, E., & Hajimirzajan, A. (2024). Investigating the causes and factors of railway accidents caused by the escape of a

رویکرد منطق فازی به دلیل قابلیت بالای آن در مدیریت عدم قطعیت‌ها و پیچیدگی‌های موجود در فرایند ارزیابی و تصمیم‌گیری انتخاب شد. این روش با ترکیب داده‌های کمی و کیفی و تبدیل آنها به مقادیر فازی، امکان تحلیل دقیق‌تر و واقع‌گرایانه‌تری را فراهم می‌آورد.

اعتبارسنجی نتایج این مطالعه در زمینه ارزیابی و اولویت‌بندی مقاومت‌سازی لرزه‌ای زیرساخت‌های ریلی که تبعات آن با اثرات اقتصادی و اجتماعی زیادی توأم است؛ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به منظور افزایش دقت و اعتمادپذیری نتایج این مطالعه، می‌توان از اعتباربخشی گروه خبره بهره برد. در این مطالعه، نظرات و ارزیابی‌های کارشناسان صنعت ریلی به‌عنوان معیارهای اعتبارسنجی به کار گرفته شد. به کارگیری نظرات خبرگان در چارچوب منطق فازی، روشی اثبات‌شده در ادبیات بین‌المللی است که امکان لحاظ عدم قطعیت‌ها و دانش کیفی را در اعتبارسنجی فراهم می‌آورد. گروه خبره، با توجه به مقادیر حاصل از پارامترهای فاصله بردار ایده‌آل مثبت (S_i^+) و فاصله بردار ایده‌آل منفی (S_i^-) و ضریب نزدیکی (CI_i^*) در مدل تاپسیس فازی و تحلیل تأثیر آنها بر نتایج اولویت‌بندی، می‌توانند میزان حساسیت و پایداری نتایج را ارزیابی نمایند. در این مطالعه گروه خبره این نتایج را مورد تأیید قرارداد. ضمن اینکه این نتایج با داده‌های میدانی در مورد هر یک از معیارهای ارزیابی مثل سوابق خسارت ناشی از زلزله‌های گذشته منطبق است. بنابراین، اعتبارسنجی نتایج این مطالعه با استفاده از نظرات گروه خبره و تطابق با داده‌های میدانی انجام گردیده که موجب افزایش دقت، پایداری و اعتمادپذیری نتایج چارچوب ارائه شده می‌شود.

در تحقیقات آتی می‌توان با اضافه نمودن سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و با اضافه نمودن معیارهای کمی به‌ویژه در مورد معیارهای شدت لرزه‌خیزی و آسیب‌پذیری بر اساس فاصله از گسل در فرآیند تصمیم‌گیری، دقت اولویت‌بندی را بهبود داد. همچنین می‌توان برای افزایش غنای اخذ نظرات گروه خبره از روش دلفی فازی بهره برد. این مطالعه، چارچوب مناسبی برای ارزیابی و اولویت‌بندی مقاومت‌سازی لرزه‌ای زیرساخت‌های

- and data envelopment analysis for clustering sustainable suppliers? A case study in Iran. *Journal of Enterprise Information Management*, 34(1), 199-229.
- Javanbakht, M., & Hoseini, H. (2019). Analytical study on the network of transmission lines vulnerability in Khorasan Razavi province against earthquake. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 6(3), 15-26. doi: 10.29252/jsaeh.6.3.15
- Jena, R., Pradhan, B., Beydoun, G., Sofyan, H., & Affan, M. (2020). Integrated model for earthquake risk assessment using neural network and analytic hierarchy process: Aceh province, Indonesia. *Geoscience Frontiers*, 11(2), 613-634.
- Joshi, D., Takeuchi, W., Kumar, N., & Avtar, R. (2024). Multi-hazard risk assessment of rail infrastructure in India under local vulnerabilities towards adaptive pathways for disaster resilient infrastructure planning. *Progress in Disaster Science*, 21, 100308.
- Karimiparidari, S. (2014). *Seismic Hazard Analysis in Iran (475 Years Return Period)* [PhD Thesis]. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology.
- Karimiparidari, S., Zaré, M., & Memarian, H. (2011). New seismotectonic zoning map of Iran. *Proc. 6th Int. Conf. on Seismology and Earthquake Engineering (SEE6)*.
- Karimiparidari, S., Zaré, M., Memarian, H., & Kijko, A. (2013). Iranian earthquakes, a uniform catalog with moment magnitudes. *Journal of Seismology*, 17, 897-911.
- Kazemian, M., Hajimirzajan, A., Davari, A., Ghezelsesar, E. H. R., & Fischer, S. (2026). Risk Assessment and Response Prioritization for Railway Tunnels Using Integrated Fuzzy FMEA, CRITIC, and Fuzzy MARCOS Methods. *Acta Polytechnica Hungarica*, 23(1).
- Khan, A. A. (2024). Earthquake geology of the East Anatolian Fault and its participation in a devastating earthquake. *Arabian Journal of Geosciences*, 17(1), 48.
- Mahdavinejad, M. J., & Javanrudi, K. (2012). Assessment of reducing earthquake damage in transportation networks of Greater Tehran case study: The northern Vali-Asr Street. *Emergency Management*, 1(1), 13-21.
- Msaddek, M. H., Mourni, Y., Haji, T. A., Chenini, I., train carrying dangerous goods and its role in the Khayyam station accident. *Road*, 32(118), 75-90. doi: 10.22034/road.2023.359722.2082
- Bahmanpour, H., & Ehsani, M. (2018). Underground transportation system risk assessment to mitigate vulnerability against natural disasters through intelligent urban management. *International Journal of Human Capital in Urban Management*, 3(3), 179-192. doi: 10.22034/ijhcum.2018.03.02
- Banimahd, A., & Arbabi, F. (2013). Seismic vulnerability assessment and development of analytical fragility curves for railroads. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 14(4), 251-262.
- Danciu, L., Nandan, S., Reyes, C., Basili, R., Weatherill, G., Beauval, C., Rovida, A., Vilanova, S., Şeşetyan, K., & Bard, P.-Y. (2021). *The 2020 update of the European Seismic Hazard Model: Model overview* (EFEHR Technical Report 001, v1.0.0).
- Dubinina, E., & Kuksova, V. (2022). Safety assessment of technical objects and systems using fuzzy logic methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Farahani, S., Shojaeian, A., Behnam, B., & Roohi, M. (2023). Probabilistic seismic multi-hazard risk and restoration modeling for resilience-informed decision making in railway networks. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 1-22.
- Hadizadeh Raisi, E., Esmacilnia Amiri, M., Hajimirzajan, A., & Taherian, M. (2024a). Hydrological and static analysis of reinforcing water bridges on Motahari-Kashmer railroad track with precast concrete pipes. *Journal of Transportation Research*, 21(3), 415-430. doi: 10.22034/tri.2023.393632.3147
- Hadizadeh Raisi, E., Hajimirzajan, A., & Norouzi, M. (2024b). Investigating and prioritizing the strengthening of rail transport infrastructure within the scope of the Khorasan Railway general administration against seismic hazards with a fuzzy logic approach. *9th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran.
- Hwang, C., & Yoon, K. (1981). *Multi-Objective Decision Making—Methods and Application: A state-of-the-art study*. Springer-Verlag.
- Izadikhah, M., Farzipoor Saen, R., Ahmadi, K., & Shamsi, M. (2021). How to use fuzzy screening system

- Torkamani, M., Kazemi, M., & Hajimirzajan, A. (2024). Evaluating the competencies of managers with a 360-degree model and examining the relationship between organizational performance and the manager's citizenship behaviour with different stakeholders. *Road*, 32(121), 425-446. doi: 10.22034/road.2024.429407. 2227
- Tyagi, A., Nath, R. R., & Chaurasia, S. (2023). Application of fuzzy algorithm for assessing seismically induced landslide hazard for an important road corridor in the lower Indian Himalayas. *EGU General Assembly Conference Abstracts*.
- Vahid, R., Farnood Ahmadi, F., & Mohammadi, N. (2021). Earthquake damage modeling using cellular automata and fuzzy rule-based models. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(22), 1-14.
- Var, S., Kartal, S. B., & Abut, Y. (2023). On the effects of earthquakes for Türkiye's railways. *AS-Proceedings*.
- Wujian, Y., Xinxin, T., Zhijian, W., Ping, W., & Lin, K. (2023). Seismic response of concrete bridge of Lanzhou-Xinjiang high-speed railway under the near-fault strong earthquake. *Structures*.
- Yehia, H. M. A. a.-S. (2024). The effect of domes produced through octa-h on absorbing harmful waves and reducing the risk of earthquakes. *Journal of Geosciences*, 12(1), 1-5.
- Zare, M. (2017). Seismic hazard zoning in Iran: A state-of-the-art on the studies during four decades. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 19(2), 71-101. http://www.jsee.ir/article_240762_087b6fe5462b61c5ff5c62fe3eb70f09.pdf
- Zarrineghbal, A., Zafarani, H., & Rahimian, M. (2021). Towards an Iranian national risk-targeted model for seismic hazard mapping. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141, 106495.
- & Dlala, M. (2021). A fuzzy mathematical model for evaluation of rock-fracture and structural complexity: Application for southern Atlas in Tunisia. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 56(3), 579-604.
- Nekrasova, A., Kossobokov, V., & Podolskaia, E. (2023). Seismic risk assessment of the Lake Baikal railway infrastructure based on unified scaling law for earthquakes and anisotropic seismic impact.
- Pandolfi, C., Taroni, M., de Nardis, R., Lavecchia, G., & Akinci, A. (2024). Combining seismotectonic and catalog-based 3D models for advanced smoothed seismicity computations. *Seismological Research Letters*, 95(1), 10-20.
- Pribadi, K., Abduh, M., Wirahadikusumah, R., Hanifa, N., Irsyam, M., Kusumaningrum, P., & Puri, E. (2021). Learning from past earthquake disasters: The need for knowledge management system to enhance infrastructure resilience in Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 64, 102424.
- Sharon, M., Sagy, A., Kurzon, I., Marco, S., & Rosensaft, M. (2020). Assessment of seismic sources and capable faults through hierarchic tectonic criteria: Implications for seismic hazard in the Levant. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(1), 125-148.
- Sinha, N., Priyanka, N., & Joshi, P. (2016). Using spatial multi-criteria analysis and ranking tool (SMART) in earthquake risk assessment: A case study of Delhi region, India. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2), 680-701.
- Sur, U., Singh, P., & Meena, S. R. (2020). Landslide susceptibility assessment in a lesser Himalayan road corridor (India) applying fuzzy AHP technique and earth-observation data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 2176-2209.
- Szatmári, M., & Leitner, B. (2021). Vulnerability assessment and risk prioritization with HRVA method for railway stations. *Transportation Research Procedia*, 55, 1649-1656.
- Taherian, A. R., & Kalantari, A. (2019). Risk-targeted seismic design maps for Iran. *Journal of Seismology*, 23(6), 1299-1311.
- Talebi, M., Zare, M., Farsangi, E. N., Soghrat, M. R., Maleki, V., & Esmaeili, S. (2021). Development of risk-targeted seismic hazard maps for the Iranian plateau. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141, 106506.

واژه‌نامه

- ۱- الگوریتم‌های فازی تحلیل
Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP) سلسله مراتبی
- ۲- غربالگری فازی
Fuzzy Screening
- ۳- تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره
Fuzzy Topsis Technique تاپسیس فازی
- ۴- بیشینه شتاب زمین
Peak Ground Acceleration (PGA)

Evaluation and Prioritization of Seismic Retrofitting of Railway Infrastructures with Screening and Fuzzy TOPSIS Method (Case Study: Scope of Khorasan Railway Directorate)

Amir Hajimirzajan^{1*}, Ebrahim Hadizadeh², Moayyad Norouzi³ and Milad Kazemian⁴

1. Ph.D., Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran,
*Corresponding Author, email: a.hajimirzajan@khayyam.ac.ir

2. Ph.D. Graduate, Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran

3. M.Sc., School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

4. M.Sc., Department of Civil Engineering, Transportation Highway, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

Introduction

Railways serve as the lifelines of any nation's transportation network, playing a fundamental role in the socioeconomic development of a country by facilitating the mass movement of passengers and freight. Given their vast geographical span, these networks are inherently exposed to unpredictable natural hazards, with earthquakes posing the most severe threat. A major seismic event can lead to prolonged blockages in the railway network, causing catastrophic financial losses, operational disruptions, and potential casualties. Consequently, preserving the structural integrity and enhancing the seismic resilience of vital infrastructures such as stations, bridges, tunnels, and railway blocks is of paramount importance. Khorasan Razavi province, characterized by high seismic vulnerability, is one of Iran's most strategic logistical hubs. The rail network under the jurisdiction of the Khorasan Railway General Directorate manages an immense volume of passenger traffic heading to the metropolis of Mashhad, alongside critical international freight transit via the Sarakhs border terminal. Thus, proactively retrofitting these infrastructures against seismic forces is a vital necessity.

Methodology

Due to strict budgetary limitations and executive constraints, simultaneous retrofitting of the entire network is practically impossible. This necessitates a robust decision-making framework to evaluate and prioritize vulnerable assets. To address this, the present study proposes an integrated Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) approach under uncertainty. Initially, a panel of experts was convened to identify the most critical variables affecting structural vulnerability. Utilizing a Fuzzy Screening approach, the vast array of potential criteria was refined to pinpoint the most influential factors: seismic intensity of the region, proximity to active fault lines, infrastructural usage type (dedicated passenger, freight, or mixed-use), and the current structural resistance of the assets. Following criteria selection, the current state of each infrastructure category (stations, bridges, tunnels, and railway blocks) was linguistically evaluated by the expert panel using fuzzy logic to account for inherent human ambiguities. Furthermore, geospatial data mapping was employed to superimpose the province's active faults and seismic intensity maps onto the Khorasan railway network topology. Finally, the Fuzzy Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (Fuzzy TOPSIS) was applied to calculate the relative closeness coefficients and establish the final retrofitting priority matrix.

Results and Discussion

The computational findings derived from the Fuzzy TOPSIS analysis provided a clear hierarchical roadmap for structural interventions. Among the railway blocks, the Torbat-Abumoslem and Abumoslem-Kashmar segments exhibited the highest urgency for seismic retrofitting, registering closeness coefficients (CC) of 0.25 and 0.28, respectively.

In terms of underground structures, the assessment indicated that all three tunnels located within the Khorasan district require moderate retrofitting interventions, yielding a uniform closeness coefficient of 0.544. For the critical bridge infrastructures, the Attar Bridge (CC = 0.322) and the Shahid Motahari Bridge (CC = 0.447) were identified as highly vulnerable points demanding immediate engineering attention. Similarly, the structural evaluation of passenger hubs revealed that both Neyshabur and Shahid Motahari stations share an identical closeness coefficient of 0.322, placing them at the forefront of the station retrofitting queue.

Conclusion

Overall, the synthesized results indicate that the railway axes stretching from Motahari Station to Mashhad, and from Mashhad toward Neghab, represent the most critical zones. Specifically, the intermediate blocks spanning from Fariman to Kashmar, alongside the Attar and Motahari bridges and the Neyshabur and Motahari stations, must be prioritized in the primary phases of the national seismic retrofitting budget allocation to ensure operational continuity and post-earthquake resilience.

Keywords: Seismic Retrofitting Prioritization, Railway Infrastructure, Fuzzy TOPSIS Method, Fuzzy Screening Method, Khorasan General Directorate of I.IR. Railways.