توسعه‌ی مدل ریسک ایمنی شبکه‌ی ریلی مبتنی بر ریزش تونل به کمک شبکه بیزی

شاهین شعبانی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران
جبار علی‌ذاکری، استاد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
وحید رضایی تبار، استادیار، گروه آمار، دانشکده کامپیوتر و علوم ریاضی، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران
آزاده قنبرپور، دانش پژوه دکتری مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران

Email: shabani@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۲ – پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹

چکیده

بررسی ایمنی شبکه‌ی حمل و نقل ریلی، به عنوان بخش زیربنایی اقتصاد، بازتابی از سطح ایمنی کل شبکه حمل و نقل کشور می‌باشد. یکی از چالش‌های تهدیدکننده‌ی ایمنی در شبکه‌ی ریلی، وضعیت تونل‌های راه‌آهن کشور به لحاظ عملکرد در دوره‌ی بهره‌برداری و تحلیل عواقب خطرات آن است. امروزه، شبکهٔ بیزی، روش شناخته شده‌ای برای مدل‌سازی گرافیکی عوامل مؤثر در رخداد حوادث و تحلیل احتمالات شرطی مربوطه است. به منظور ارائه‌ی مدلی برای تحلیل ریسک و انطباق هرچه بیشتر آن با شرایط موجود تونل‌های ریلی کشور، مراحل مدل‌سازی اثر ریسک ریزش تونل در دو بخش انجام شده است. در بخش نخست، علل و عوامل اصلی و مورد اتفاق خبرگان در ریزش تونل شناسایی و بر اساس تواتر رخداد، امتیازدهی شده و شبکه‌ی مربوطه اجرا گردید. در بخش دوم، به تعیین سناریوهای مختلف پس از ریزش تونل، عواقب حادثه و برخی اقدامات اصلاحی پیشنهادی، تحلیل سناریوها و در نهایت ارائه مدل ریسک ایمنی بر اساس هر کدام از درجات شدت تعریف شده، پرداخته شده است. مدل‌سازی بر اساس آمار حوادث ریلی ده سال اخیر و با الگوریتم شبکهٔ بیزی در نرم‌افزار متلب انجام شده است. خروجی مدل نشان داد که نفوذ آب در تونل‌های بدون پوشش دائمی، به عنوان شدیدترین ریسک با بیشترین تواتر، که بر اساس تعاریف دستورالعمل‌های معتبر به عنوان علت و شدت "درجه اول" طبقه‌بندی می‌شود، قابل ذکر است.

واژه‌های کلیدی: ایمنی ریلی، تحلیل ریسک، تونل راه‌آهن، شبکه بیزی، مدل‌سازی

۱. مقدمه

جایگاه ویژهٔ حمل و نقل ریلی در توسعهٔ صنعت حمل و نقل و به تبع آن صنایع کشور، با توجه به برتری‌های این شیوه در کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری، بی‌بدیل و بلامنازع است. شبکه‌ی ریلی به عنوان بخش زیربنایی اقتصاد که فرآیند توسعه‌ی اقتصادی را تحت تأثیر قرار داده و اساس مبادلات بازرگانی در توسعه‌ی پایدار کشور است، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اهمیت این موضوع با توجه به نقش ایمنی به عنوان برتری اصلی این شیوه از حمل و نقل، زمانی مشخص می‌شود که عوامل تهدیدکنندهٔ ایمنی شبکه ریلی به همراه ریسک ایمنی هر عامل به طور دقیق ارزیابی شود.

امروزه، استفاده از آخرین فن‌آوری‌های تحلیل و محاسبه‌ی آماری داده‌ها، کمک قابل توجهی به تحلیل‌های نزدیک به واقعیت برای داده‌های بزرگ کرده است. از میان روش‌های نوین تحلیل احتمالات شرطی متغیرها، شبکه بیزی با تعیین همسایگی متغیرها بر اساس شباهت رفتاری داده‌ها و تعیین ماتریس امتیاز، به صورت هوشمند شبکه‌ای از علل و عوامل ایجاد می‌نماید که قابلیت به-روزآوری بر اساس هرگونه تغییر در داده‌های ورودی را داراست.

یکی از تهدیدهای اصلی ایمنی، شرایط خاص تونل‌های ریلی است که به عنوان یکی از سازه‌های فنی مهم به طور مستقیم در عملکرد ایمن شبکه مؤثر است. مطالعات متنوعی از تحلیل علل و عوامل دخیل در ریزش تونل‌ها انجام شده است که بیشتر به ملاحظات سازه‌ای و زمین‌شناسی با توجه به نوع و روش ساخت تونل پرداخته است و کمتر ملاحظات خاصی که با اجماع نظر خبرگان و متخصصان به‌دست آمده باشد با شیوه‌های نوین تحلیل احتمالات شرطی توأم شده است. پژوهش حاضر، که شرایط خاص تونل‌های راه‌آهن را مدنظر قرار داده است، برای ایجاد شبکه‌ای از علل و عوامل اصلی فروریختن تونل‌های ریلی از اجماع نظر متخصصان طراح، سازنده، بهره‌بردار و گروه‌های تعمیر و نگهداری استفاده نموده است تا با یافتن الگوریتمی از متغیرها و سناریوهای پیش روی طرح، به تحلیل ریسک هرچه واقعی‌تر دست یابد. این مهم، با انطباق تعاریف خاص صنایع ریلی از شدت وقوع حوادث بر سناریوهای تحلیل عواقب هر حادثه، قابل دستیابی بوده است. شکل ۱، که ساختار اولیهٔ شبکه مورد نظر را به تصویر می‌کشد، به همراه دستورالعمل تکمیل در اختیار رؤسای ایمنی نواحی ریلی به عنوان منتخصصان ایمنی ریلی قرار گرفته است تا در امتیازدهی لحاظ شود.

بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه ایمنی تونل‌ها، به بحث آتش‌سوزی در تونل پرداخته است. از آنجا که محیط تونل‌ها بسته و محدودیت‌های خاص به لحاظ دسترسی، امداد و نجات در شرایط اضطراری را داراست، وضعیت آتش-سوزی می‌تواند جبران‌ناپذیرترین شرایط را به‌وجود آورد. حال آن که دیگر شرایط خطرآفرین، مانند ریزش تونل‌ها که کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، از اهمیت کمتری برخوردار نبوده و گاه عواقب حاصله هر چند از تواتر کمتر ولی از شدت بیشتری برخوردارند.

تونل‌های ریلی، با دارا بودن شرایط خاص عبور و مرور، از اهمیت ویژه‌ای برای تحلیل همه‌جانبه‌ی خطرات محتمل و میزان تأثیر خطرات در شدت پیامدهای مترتب برخوردارند. این اهمیت، با در نظر گرفتن وضعیت موجود تونل‌های راه‌آهن در کشور، به لحاظ نبود برخی سامانه‌های هشدار و اعلام خطر، بیشتر مشخص می‌شود. هرچند اقدامات درخور توجهی در جهت ایمن‌سازی این سازه‌های خاص انجام شده و در حال پیاده سازیست، اما نیاز به تحلیل ریسک خطرات و نقاط ضعف سامانه بسیار ضروری است. هرچند برخی خطرات به لحاظ تکرار وقوع در دسته‌ی "به‌ندرت" قرار می‌گیرند، ولی شدت عواقب حاصله به قدری است که تبعات اجتماعی حاصل از آن در حالت "بسیار مهم" واقع شده و لزوم توجه به آن را مشخص می‌سازد.

یکی از برتری‌های پژوهش حاضر نسبت به مطالعات ریسک ایمنی صورت گرفته، نوآوری صورت گرفته در

طرح شبکه بیزی نهایی است. بدین صورت که داده‌های مربوط به علل و عواقب که در گذشته و در مدل پاپیونی ایمنی ریسک به صورت جداگانه تحلیل و در نهایت در قالب یک مدل ارائه می‌شدند، ترکیب و احتمالات شرطی اثرات حالات مختلف احتمال وقوع متغیرها بر هم را لحاظ نموده است. همچنین، در تحلیل عواقب حادثه، تنها مسیر بحرانی را به صورت عدد ریسک بیان می‌کرد که در مدل شبکه‌ای، تمام حالات شرطی سناریوهای پیش روی خطر بررسی و در عدد ریسک لحاظ شده‌اند. این عدد بیانگر میزان احتمال وقوع برای شدتی خاص می‌باشد که سپس بر اساس معیارهای قابل قبول می‌تواند بررسی شود. از طرفی، هر گونه تغییر در اقدامات ایمنی مورد بررسی در بخش عواقب، به جهت پویایی شبکهٔ بیزی، بر میزان ایمنی کل شبکه مؤثر هستند که مدل‌سازی با استفاده از شبکهٔ بیزی به بهترین شکل این مسئله را نشان می‌دهد.

۲. پیشینه پژوهش

از آنجا که یکی از نقاط ضعف اصلی تونل‌ها، به دلیل بسته بودن محیط آن، آتش‌سوزی است، مطالعات فراوانی به تحلیل و بررسی سناریوهای مختلف ریسک آتش‌سوزی در تونل‌ها پرداخته (رونچی و همکاران، ۲۰۱۲) و تصمیم‌گیری بر اساس ارزیابی مخاطرات حاصله را مطرح نموده‌اند (برد، ۲۰۱۰) و به نوعی بحث ایمنی در تونل را به بحث آتش‌سوزی گره زده‌اند. در حالی که سایر مطالعات، شرایط خاص سازه تونل را به لحاظ ساخت و ساز ملاک مدیریت ایمنی و ریسک در نظر گرفته و با معرفی آخرین فن‌آوری‌ها در قطعات پیش‌ساخته (وانگ و همکاران، ۲۰۱۹) و سامانه پایش ایمنی (ژو و همکاران، ۲۰۱۹) ریسک‌های مربوطه را تحلیل کرده‌اند.

لزوم توجه به ایمنی و امنیت در تونل‌ها و مخصوصاً تونل‌های حمل و نقل، و به طور خاص تونل‌های ریلی، در مطالعات اخیر مرکز فن‌آوری حمل و نقل ایالات متحده (راکوژی و همکاران، ۲۰۱۹) مطرح شده است. تحلیل ریسک ایمنی تونل‌ها با در نظر گرفتن شرایط ترافیکی علاوه بر عوامل ساخت و ساز (جنا و همکاران، ۲۰۱۹) نیز قابل توجه بوده است. در مطالعه‌ی روشن بخت و همکاران (۱۳۹۷)، به برخی از عواملی که در ریزش تونل نقش دارند اشاره شده که به منظور ایجاد شبکه‌ی بیزی از آن استفاده شده است. برای تحلیل سناریوهای خطرات تهدیدکننده‌ی تونل، از جمله سیل-بردگی و شدت عواقب حاصله، از روند انجام شده در مطالعات لیو و همکاران (۲۰۱۹) که برای هفت تونل مترو و سه تونل جاده‌ای در فلوریدا انجام داده، استفاده شده است.

مطالعاتی که به منظور تحلیل کمی ریسک در تونل‌ها انجام شده (جنا و همکاران، ۲۰۱۹)، یک تحلیل ریسک عددی را به صورت تحلیلی از ریسک خطرات برای تونلی مشخص تعریف می‌کند که تمام عوامل طراحی و شرایط ترافیکی که ایمنی را تحت تأثیر قرار می‌دهند از جمله نوع و مشخصات ترافیکی، طول و سایر ویژگی‌های تونل و اثرات وقوع خطری خاص را لحاظ کند. مطالعه‌ای که اقدامات کاهنده‌ی شدت خطرات در تحلیل ریسک ایمنی را به صورت سطح بالای بین‌المللی، منطقه‌ای و محلی دسته‌بندی می‌کند (اوتو و همکاران، ۲۰۱۹)، نقش همکاری‌های چندبخشی بین‌منطقه‌ای را در کاهش ریسک و مدیریت بحران تونل‌ها بسیار مؤثر می‌داند، که علاوه بر تسهیل انتقال اطلاعات و تجربیات، تحلیل نتایج را به صورت کاربردی‌تری بیان می‌کند.

ایده‌ی استفاده از الگوریتم شناسایی بیزی در تعیین تواتر رخداد عوامل خطر، با استفاده از مطالعات گوی و گوی (۲۰۱۹) در دسته‌بندی پسین بیزی برای داده‌های واقعی انجام شده است. همچنین، استفاده از شبکه بیزی در تحلیل ریسک تیغه ماشین حفار تونل و مدل پیش‌بینی ریزش تونل‌های زیر آب (چانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ سو و همکاران، ۲۰۱۹) نیز انجام شده است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

در مطالعه‌ی حاضر، تحلیل داده‌های ریسک ایمنی قطارها با توجه به حادثه‌ی ریزش تونل و در دو سطح انجام شده است. سطح اول، مربوط به جمع‌آوری و تحلیل داده‌های علل و عوامل اصلی ریزش تونل‌های ریلی موجود در کشور با استفاده از امتیازات تعیین شده بر اساس جدول ۱، تحت عنوان رتبه‌بندی علل بر اساس فراوانی رخداد، می‌باشد. این امتیازات که اعدادی بین ۱ تا ۹ تعیین شده‌اند، با استفاده از نظرات متخصصان گروه ایمنی ریلی در نواحی ۱۹ گانه‌ی راه‌آهن کشور (٤٢ نفر، متشکل از کارشناسان و مدیران حوزه ایمنی ریلی نواحی و ٤ کارشناس خبره در ستاد راه‌آهن که تقریباً تمام پتانسیل این حوزه محسوب می‌شوند)، به هر یک از علل رخداد ریزش تونل اختصاص داده شده‌اند. لازم به ذکر است که میانگین امتیازات تخصیص داده شده توسط خبرگان نواحی (به استثنای سه ناحیه‌ی شمال شرق، جنوب و کرمان که محورهای فاقد تونل بوده‌اند) به عنوان احتمال رخداد هر علت در نظر گرفته شده است. سطح دوم، مربوط به جمع‌آوری و تحلیل احتمال پیامد هر کدام از سناریوهای تحلیل ریسک ایمنی که به صورت متغیر مستقل در نظر گرفته شده‌اند، می‌باشد. مقادیر مربوطه، با استفاده از میانگین‌گیری نظرات خبرگان نواحی و تحلیل الگوریتم شبکه با استفاده از تعریف ریسک به صورت ضرب متغیرهای وابسته در هر کدام از مسیرهای منتهی به شدت‌های تعریف شده در دستورالعمل تعیین شدت حوادث ریلی در راه‌آهن جمهوری اسلامی، صورت گرفته است. در نهایت، دو شبکه‌ی حاصل از تحلیل علل و عواقب به صورت یکجا با گرهٔ میانی، که حادثهٔ ریزش تونل می‌باشد، پیوند داده شده‌اند. کدنویسی انجام شده در نرم‌افزار متلب، با استفاده از بستهٔ نرم‌افزاری شبکهٔ بیزی (امتیازبندی ساختار شبکه بر اساس تحلیل‌های آماری و قوانیین بیز) انجام شده است.

٤. توسعه‌ی مدل و تحلیل نتایج

٤-١. تعیین ساختار اولیه شبکه بیزی

مرحله‌ی نخست مدل‌سازی، تعیین متغیرهای مؤثر بر ساختار شبکه‌ی مورد نظر و سطح هر متغیر از لحاظ مقادیر یا حالات قابل دستیابی است. در پژوهش حاضر، که شناسایی متغیرها در مرحله‌ی پیش‌مطالعه به صورت مدون و با استفاده از نظرات خبرگان انجام شده است، برای تحلیل سطح ایمنی مسیر ریلی در مقابل عوامل و عواقب ناشی از ریزش تونل‌ها، عوامل شناسایی شده برای دو دسته از تونل‌های دارای پوشش دائمی و بدون پوشش دائمی طبقه‌بندی شدند. داده‌های هر کدام از متغیرهای مربوط به علل، در دو سطح صفر و یک به معنای عدم یا امکان وقوع، بر اساس جدول طبقه‌بندی احتمال وقوع (که رتبه‌ی ۹ مربوط به بسیار پرتکرار و رتبه‌ی ۱ مربوط به حالت بعید می‌باشد)، دسته‌بندی شده‌اند. داده‌های مربوط به تحلیل سناریوهای عواقب ناشی از رخداد حادثه‌ی ریزش تونل به صورت درصد برای هر سطح از وقوع یا عدم وقوع شرایط مورد نظر تدوین و در اختیار رؤسای ایمنی نواحی به منظور ثبت نظرات قرار گرفت. مرحلهٔ بعد، تعیین ساختاری نزدیک به واقعیت برای متغیرهای شبکه‌ی بیزی مورد نظر می‌باشد تا مدل نهایی پس از ورود داده‌ها و تحلیل روابط علی بین متغیرها، قابلیت کنترل با ساختار مورد نظر را داشته باشد. شکل ۱، ساختار تهیه شده برای جمع‌آوری نظرات متخصصان را نشان می‌دهد.

٤-٢. جمع‌آوری داده‌های علل و عواقب

پس از تعیین ساختار اولیه‌ی شبکه بر اساس اجماع نظر متخصصان و به منظور ایجاد درکی واحد از اعداد اختصاص داده شده به فراوانی وقوع و درصد عواقب، دستورالعملی در اختیار خبرگان ایمنی نواحی به منظور تکمیل گراف شکل ۱ قرار گرفت. فراوانی‌های مربوط به

هر کدام از متغیرهای علل که در قسمت پایین متغیر میانی، ریزش تونل، درج می‌گردید، عددی بین ۱ تا ۹ بر حسب تکرار وقوع و مطابق جدول ۱ و دستورالعمل ارسالی به نواحی و درصدهای مربوط به سطوح عواقب شناسایی شده، بر حسب شرایط موجود و تجربیات گذشته تکمیل و جدولی مطابق جدول ۲ تدوین گردید. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نواحی فاقد تونل راه‌آهن بر اساس جدول مشخصات تونل و گالری-های دریافتی از راه‌آهن مطابق جدول ۳، در امتیازدهی دخالت داده نشده و میانگین امتیاز سایر نواحی به صورت تعداد رخداد برای ایجاد دادهٔ ورودی نرم‌افزار، مورد استفاده قرار گرفته است. در طراحی شبکهٔ بیزی، داده‌ها به صورت باینری (صفر و ۱) در جداول به فرمت اکسل برای برنامه معرفی شده است. در واقع، بانک داده بر اساس امتیازبندی خبرگان تشکیل شده است.

٤-٣. تحلیل نرم‌افزاری داده‌ها

با توجه به این که داده‌های مربوط به ریزش تونل در راه‌آهن ثبت نمی‌شود و برای تشکیل شبکه تنها با داشتن داده می‌توان ارتباط متغیرها از لحاظ درجه‌ی وابستگی و احتمالات شرطی را محاسبه کرد، لذا در این پژوهش، با توجه به امتیاز هر متغیر علت، مبنی بر تکرار وقوع و نیز بررسی داده‌های ده سال اخیر حوادث راه‌آهن شامل ٦٠٠٠ سابقه به عنوان جامعهٔ آماری، فایلی با استفاده از جدول مورگان شامل ٣٦١ نمونهٔ آماری تشکیل و با اجرای کدهای دستوری شبکه بیزی در نرم‌افزار متلب و تعریف متغیر مربوط به "ریزش تونل" به عنوان متغیر میانی، کدهای دستوری اجرا و خروجی برنامه مطابق شکل ۲ به‌دست آمده است. به منظور تحلیل ریسک سناریوهای مربوط به عواقب، از آنجا که شرایط بلی و خیر در تحلیل عواقب، مستقل از یکدیگر می‌باشند، برای هر کدام متغیر مستقلی در نظر گرفته شده است. خلاصه محاسبات و خروجی ریسک ایمنی خطوط ریلی در اثر حادثه‌ی ریزش تونل مطابق شکل ۳ می‌باشد که به تفصیل در بخش (٤-٤) مورد بررسی قرار گرفته است.

٤-٤. تفسیر و بحث پیرامون نتایج

همانگونه که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد، در قسمت بالا، علل و عوامل مؤثر بر ریزش تونل به عنوان خطری که ایمنی سامانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در قسمت پایین، سناریوهای پیش روی حادثه می‌باشد. شاید به نوعی، شکل حاصل، برعکس مدل پاپیونی ارزیابی ریسک که مدلی شناخته شده می‌باشد به حساب آید. جدول احتمالات توأم که در شکل ۳ به عنوان خروجی محاسبات نرم‌افزاری ارائه شده است، نشان می‌دهد که اثر زمین لرزه، وجود گسل و انفجار در تونل‌های فاقد پوشش دائمی، از احتمال یکسان برای وقوع برخوردارند که این احتمال نسبت به اثر نفوذ آب در اینگونه تونل‌ها بسیار کمتر است. شبکه‌ی نهایی، احتمالی برای اثر توأم این متغیرها لحاظ نمی‌کند.

قسمت پایین شبکه‌ی شکل ۲، شامل متغیرهای مربوط به وجود سامانه‌ی هشدار، احتمال ریزش تونل روی قطار، احتمال مسدودی خط و ایجاد اختلال در برنامه عملکردی سایر قطارها می‌باشد. همانطور که شبکه‌ی نهایی نشان می‌دهد، ارتباط متغیرها نشان از اثر زنجیره‌ای عوامل و تأثیر آنها بر ریسک نهایی دارد که یکی از برتری‌های شبکه بیزی بر روش‌های سنتی محاسبه‌ی ریسک می‌باشد.

متغیر شماره ۳۸، حالت ختم به خیر می‌باشد که ریسک محاسبه شده‌ی آن از مجموع حاصل‌ضرب احتمالات مسیرهای منتهی به این متغیر معادل ۳٪ به‌دست آمده است. به همین ترتیب، متغیر ۳۹، شدت درجه ۳ با ریسک ۲۰٪، متغیر ٤٠ مربوط به شدت درجه ۲ با ریسک۱۳٪، متغیر ٤١ مربوط به شدت درجه ۱ با ریسک ٥٥٪، ریسک متغیر ٤٢ مربوط به شدت مهم معادل ۱٪ و آخرین متغیر مربوط به حالت بسیار مهم معادل ۷٪

می‌باشد که تعاریف مربوطه بر اساس شدت تعیین شده در راه‌آهن و مطابق جدول ۳ می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

ریزش تونل‌های ریلی یکی از حوادث قابل تأمل در تعیین ریسک ایمنی شبکه‌ی ریلی می‌باشد که به علت تکرار کم، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. حال آنکه شدت عواقب حاصله نشان از درجه اهمیت زیاد این واقعه و لزوم توجه و به‌کارگیری راهکارهای پیشگیرانه در ارتقای سطح ایمنی شبکه‌ی ریلی می‌باشد. در این پژوهش، سعی شده است تا در تحلیل ریسک ایمنی، برخی اقدامات اصلاحی از جمله وجود سامانه‌های هشدار در تونل‌ها پیشنهاد و میزان تأثیر آنها در ریسک نهایی مورد ارزیابی قرار گیرد.

یکی از نقاط قوت مدل ارائه شده، وجود ارتباط معنادار بین متغیرهای علل و زنجیره‌ی عواقب ناشی از رخداد حادثه‌ی ریزش تونل می‌باشد. یکی از راه‌های اعتبارسنجی مدل نهایی، میزان تطابق با داده‌های واقعی می‌باشد که به علت عدم وجود هیچگونه داده‌ی مرتبط در راه‌آهن، سنجش اعتبار مدل با ایجاد داده‌هایی بر اساس تطابق با تجربیات خبرگان نواحی در حوادث مربوط به تونل‌های راه‌آهن در ده سال اخیر، مورد صحه‌گذاری قرار گرفته است. به منظور تطبیق با معیارهای جهانی و سنجش تراز ایمنی حمل و نقل ریلی از نظر میزان ایمنی تونل‌ها در مقابل ریزش، پیشنهاد می‌شود تا در مجموعه‌ی علل و عواملی که در تحلیل سوانح ثبت می‌شوند، علل مربوط به ریزش تونل با جزئیات بیشتر به صورت دسته-بندی مربوط به خطای انسانی یا عوامل محیطی نیز ثبت گردد تا امکان تحلیل هرچه دقیق‌تر مدل ریسک نهایی فراهم شود.

نتایج خروجی مدل، احتمال مربوط به نفوذ آب را به عنوان یک علت مستقل در ریزش تونل‌های بدون پوشش دائمی بیشتر از سایر علل در حالت مستقل نشان می‌دهد. همچنین، احتمال ریزش تونل‌های بدون پوشش دائمی را فارغ از علت ایجاد آن، از احتمال ریزش در تونل‌هایی که پوشش دائمی دارند بیشتر نشان می‌دهد. در تعیین میزان ریسک مربوط به ایمنی خطوط ریلی بر اثر حادثه‌ی ریزش تونل، ریسک مربوط به نبود سامانه هشدار که منجر به مسدودی خط و اختلال در برنامه عملکردی قطارهای برنامه‌ای راه‌آهن می‌شود، دارای بیشترین احتمال یا بیان دیگر منجر به شدتی با بیشترین تکرار، شناسایی شده است.

٦. مراجع

روشن بخت، ک.، آقا بیک، ک. و بکیاسا، ف. ۱۳۹۷. "انتخاب دستگاه حفاری در تونل‌های با شرایط متنوع زمین‌شناسی (مطالعه موردی تونل متوسلیان)." پژوهشنامه حمل و نقل، ۱۵(۲): ۳۳۷-۳۲۳.

Beard, A. N. 2010. “Tunnel safety, risk assessment and decision-making”. Tunn. Undergr. Sp. Tech., 25(1): 91-94.

Chung, H., Lee, I. M., Jung, J. H. and Park, J. 2019. “Bayesian networks-based shield TBM risk management system: Methodology development and application”. KSCE J. Civ. Eng., 23(1): 452-465.

Gui, S. and Gui, R. 2019. “Auto-extraction of stratified interface in the underground space-based on Bayesian detection algorithm with statistical fitting of probability density by actual data”. Sustain. Cities Soc., 101430.

Jena, J. K., Verma, A. K., Kumar, U. and Ajit, S. 2019. “Tunnel QRA: Present and future perspectives”. *In:* Kapur, P., Klochkov, Y., Verma, A. and Singh, G. (Eds.) System Performance and Management Analytics. Asset Analytics (Performance and Safety Management), Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7323-6_31

Lyu, H. M., Shen, S. L., Zhou, A. and Yang, J. 2019. “Perspectives for flood risk assessment and management for mega-city metro system”. Tunn. Undergr. Sp. Tech. 84: 31-44.

Otto, A., Kellermann, P., Thieken, A. H., Manez Costa, M., Carmona, M. and Bubeck P. 2019. “Risk reduction partnerships in railway transport infrastructure in an Alpine environment”. Int. J. Disaster Risk Reduction, 33: 385-397.

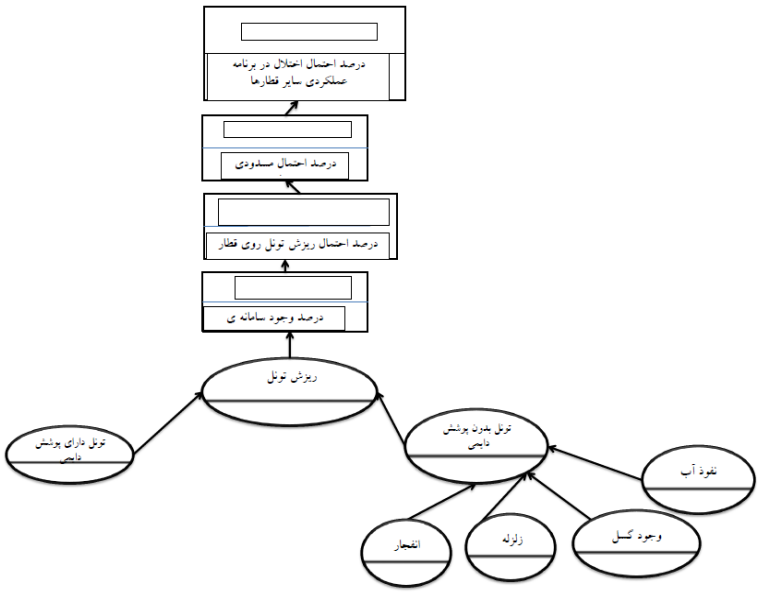
Rakoczy, A. M., Wilk, S. T. and Jones, M. C. 2019. “Security and safety of rail transit tunnels”. Transport. Res. Record, https://doi.org/10.1177/0361198118822819

Ronchi, E., Colonna, P., Capote, J., Alvear, D., Berloco, N. and Cuesta, A. 2012. “The evaluation of different evacuation models for assessing road tunnel safety analysis”. Tunn. Undergr. Sp. Tech., 30: 74-84.

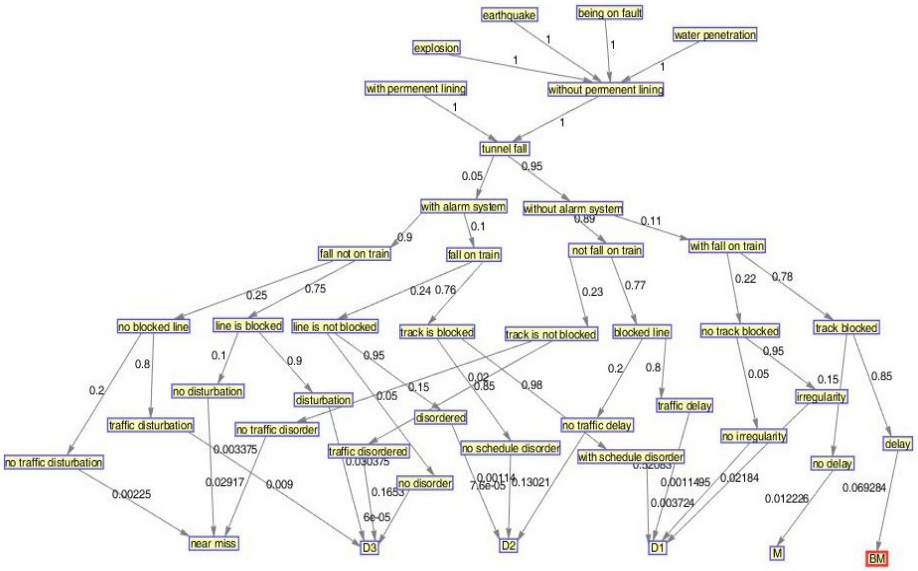
Su, M., Wang, P., Xue, Y., Qiu, D., Li, Z., Xia, T. and Li, G. 2019. “Prediction of risk in submarine tunnel construction by multi-factor analysis: A collapse prediction model”. Marine Georesour. Geotech., 37(9): 1119-1129.

Wang, Q., Luan, Y., Jiang, B., Li, S., He, M., Sun, H., Qin, Q. and Lu, W. 2019. “Study on key technology of tunnel fabricated arch and its mechanical mechanism in the mechanized construction”. Tunn. Undergr. Sp. Tech., 83: 187-194.

Zhou, C., Luo, H., Fang, W., Wei, R. and Ding, L. 2019. “Cyber-physical-system-based safety monitoring for blind hoisting with the internet of things: A case study”. Automat. Constr., 97: 138-150.



شکل ۱. ساختار اولیهٔ شبکهٔ مورد نظر



شکل ۲. شبکه‌ی به‌دست آمده از خروجی برنامه

Estimated Markov Blanket of node ۷ (ans = ۱ ۶)

p(with permanent lining = Yes)= ۶,۶۶۶۷e-۰۴

p(with permanent lining = No)= ۰,۹۹۹۳, p(explosion = Yes)= ۱,۶۶۶۷e-۰۴,p(explosion = No)= ۰,۹۹۹۸

p(earthquake = Yes)= ۱,۶۶۶۷e-۰۴,p(earthquake = No)= ۰,۹۹۹۸,p(being on fault = Yes)= ۱,۶۶۶۷e-۰۴

p(being on fault = No)= ۰,۹۹۹۸,p(water = Yes)= ۸,۳۳۳۳e-۰۴,p(water = No)= ۰,۹۹۹۲, p(without permanent lining = Yes | explosion = Yes , earthquake = Yes , being on fault = Yes , water = Yes)= ۰,p(without permanent lining = Yes | explosion = Yes , earthquake = Yes , being on fault = Yes , water = No)= ۰,p(without permanent lining = Yes | explosion = Yes , earthquake = Yes , being on fault = No , water = Yes)= ۰,p(without permanent lining = Yes | explosion = Yes , earthquake = No , being on fault = Yes , water = Yes)= ۰,p(without permanent lining = Yes | explosion = No , earthquake = Yes , being on fault = Yes , water = Yes)= ۰,p(without permanent lining = Yes | explosion = No , earthquake = No , being on fault = Yes , water = Yes)= ۰,p(without permanent lining = Yes | explosion = No , earthquake = Yes , being on fault = No , water = Yes)= ۰,p(without permanent lining = Yes | explosion = No , earthquake = Yes , being on fault = Yes , water = No)= ۰,p(without permanent lining = Yes | explosion = Yes , earthquake = No , being on fault = No , water = Yes)= ۰,p(without permanent lining = Yes | explosion = Yes , earthquake = No , being on fault = Yes , water = No)= ۰,p(without permanent lining = Yes | explosion = Yes , earthquake = Yes , being on fault = No , water = No)= ۰,p(without permanent lining = Yes | explosion = No , earthquake = No , being on fault = No , water = Yes)= ۸,۳۳۳۳e-۰۴,p(without permanent lining = Yes | explosion = No , earthquake = No , being on fault = Yes , water = No)= ۱,۶۶۶۷e-۰۴,p(without permanent lining = Yes | explosion = Yes , earthquake = No , being on fault = No , water = No)= ۱,۶۶۶۷e-۰۴,p(without permanent lining = Yes | explosion = No , earthquake = No , being on fault = No , water = No)= ۰,p(without permanent lining = No | explosion = Yes , earthquake = Yes , being on fault = Yes , water = Yes)= ۰,p(without permanent lining = No | explosion = Yes , earthquake = Yes , being on fault = Yes , water = No)= ۰,p(without permanent lining = No | explosion = Yes , earthquake = Yes , being on fault = No , water = Yes)= ۰,p(without permanent lining = No | explosion = Yes , earthquake = No , being on fault = Yes , water = Yes)= ۰,p(without permanent lining = No | explosion = No , earthquake = Yes , being on fault = Yes , water = Yes)= ۰,p(without permanent lining = No | explosion = No , earthquake = No , being on fault = Yes , water = Yes)= ۰,p(without permanent lining = No | explosion = No , earthquake = Yes , being on fault = No , water = Yes)= ۰,p(without permanent lining = No | explosion = No , earthquake = Yes , being on fault = Yes , water = No)= ۰,p(without permanent lining = No | explosion = Yes , earthquake = No , being on fault = No , water = No)= ۰,p(without permanent lining = No | explosion = No , earthquake = No , being on fault = No , water = No)= ۰,۹۹۸۷

risk of ۳۸ is ۰,۰۳۴۸,risk of ۳۹ is ۰,۲۰۴۷,risk of ۴۰ is ۰,۱۳۱۴,risk of ۴۱ is ۰,۵۴۷۵,risk of ۴۲ is ۰,۰۱۲۲,risk of ۴۳ is ۰,۰۶۹

شکل ۳. خروجی محاسبات احتمالات شرطی و ریسک شدت عواقب حادثه‌ی ریزش تونل‌های ریلی

جدول ۱. رتبه‌بندی علل بر اساس تواتر رخداد

طبقه‌بندی احتمال وقوع		
عنوان فراوانی	**تکرار وقوع**	**رتبه**
بسیار پرتکرار	یک بار در هر روز و بیشتر	۹
پرتکرار	حداقل یک بار در هفته	۸
بسیار زیاد	حداقل یک بار در دوهفته	۷
زیاد	حداقل یک بار در ماه	٦
متوسط	حداقل یک بار در ٦ ماه	٥
موردی	حداقل یک بار در سال	٤
کم	حداقل یک بار در ۲ سال	۳
خیلی کم	حداقل یک بار در ٥ سال	۲
بعید	حداقل یک بار در بیش از ٥ سال	۱

	تبریز	لرستان	خراسان	بندر عباس	اندیمشک	فارس	طبس	اراک	یزد	گرگان	زاهدان	شمال غرب	تهران	اصفهان	قم	مازندران
تونل دارای پوشش دائمی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱
انفجار	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱
زلزله	۱	۱	۳	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
وجود گسل	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۱	٤	۱	۲	۱	۱	۱	۱
نفوذ آب	۱	۱	۲	۱	۲	۱	٤	۲	۱	۳	۱	۲	۱	۱	۱	۱
تونل بدون پوشش دائمی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	٤	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
ریزش تونل	۱	۱	۱	۱	۱	۱	٤	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

جدول ۳. مشخصات تونل‌ها در نواحی راه‌آهن

تعداد تونل‌ها و گالری‌ها در شبکه خطوط راه‌آهن

ردیف	نواحی	تونل‌ها				گالری ها				مجموع	
		یک خطه		دوخطه		یک خطه		دوخطه			
		طول*	تعداد	طول	تعداد	طول	تعداد	طول	تعداد	طول	تعداد
۱	لرستان	۲۹۳٦۱	۹۱	۰	۰	۱۳۱	۵	۰	۰	۲۹٤۹۱/۷	۹٦
۲	تهران	۰	۰	۸۰۰۰	۱	۰	۰	۰	۰	۸۰۰۰	۱
۳	زاگرس	۲۷۷٦۷	٤۷	۰	۰	۱۵۰	۹	۰	۰	۲۷۹۱۷	۵٦
٤	اراک	۱٦۲۰	٦	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱٦۲٦	٦
۵	شمال	۲٤۲٤۹	۹۳	۰	۰	۹۱	۲	۰	۰	۲٤۳٤۰	۹۵
٦	شمالشرق۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۷	قم	٤۰۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	٤۰۰	۱
۸	خراسان	۵۹۲۰	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۹۲۰	۳
۹	شمالغرب	۱۸۱۱۷	٤۰	۰	۰	۳٤۵۷	۱۸	۰	۰	۲۱۵۷۳/۹	۵۸
۱۰	کرمان	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۱	یزد	۰	۰	۸۱۲	۱	۰	۰	۰	۰	۸۱۲	۱
۱۲	آذربایجان	۱۳۳۰۳	٤۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳۳۰۳/۳	٤۵
۱۳	اصفهان	۱۷۲	۱	۱۱۸۹	۳	۰	۰	۰	۰	۱۳٦۱	٤
۱٤	هرمزگان	۲۱۵۰	۵	۱٦۰٤۹	۲۵	۰	۰	۰	۰	۱۸۱۹۹	۳۰
۱۵	فارس	۹۸۹۵	۱۷	۳۳۳۲	٤	۹۵۵	۲	۰	۰	۱٤۱۸۲	۲۳
۱٦	جنوب	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۷	جنوبشرق	۵۵۹۸	۱۷	۰	۰	۲۳۸	۳	۰	۰	۵۹۵٤/۵	۲۰
۱۸	شرق	۵٤۰۰	۲	۰	۰	٤۸٤٤	۲۵	۰	۰	۱۰۲٤٤	۲۷
۱۹	شمالشرق۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	مجموع	۱٤۳۹۵۲	۳٦۸	۲۹۳۸۲	۳٤	۹۸٦٦	٦٤	۰	۰	۱۸۳۳۲٤/٤	٤٦٦

* واحد طول‌ها، متر می‌باشد.

جدول ٤. دسته‌بندی شدت حوادث و شبه‌حوادث راه‌آهن

درجه اهمیت	تلفات انسانی (نفر)	خسارت مالی (میلیون ریال)	زمان مسدودی (دقیقه)	تعداد قطار مسافری حذف شده (رام)	مجموع تأخیر در مسیر قطار برنامه‌ای (دقیقه)	تعداد محور از خط خارج شده	
						مسافری	باری
D3 درجه سه	۰	۰ – ۸۰۰	۰ – ۱۲۰	۰	۰ – ۳٦۰	۰ ، ۱ و ۲	کمتر یا مساوی ٦
D2 درجه دو	۱	۸۰۱ – ۲٤۰۰	۱۲۱ – ۲٤۰	۱	۳٦۱ – ۱۳۸۰	٤ -۳	۷ – ۱٤
D1 درجه یک	۲	۲٤۰۱ – ٦۰۰۰	۲٤۱ – ۳٦۰	۲	۱۳۸۱ – ۲۱٦۰	۱۲ – ٥	۱٥ – ۲۲
مهم M	۳ یا ٤	٦۰۰۱ – ۱۲۰۰۰	۳٦۱ – ٦۰۰	٥ -۳	۲۱٦۱ – ۲۸۸۰	۱٥ – ۱۳	٤۲ -۲۳
بسیار مهم BM	٥ یا بیشتر	بیش از ۱۲۰۰۱	بیش از ٦۰۱	٦ یا بیشتر	بیش از ۲۸۸۰	بیش از ۱٥	بیش از ٤۲