ارزیابی و اولویت‌بندی استانداردهای ایمنی در طراحی و ساخت پل‌ها و تونل‌ها در پروژه‌های جاده‌ای

مقاله علمی – پژوهشی

*شهاب حسن پور (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد، ایران
عارف امرائی آستانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، بروجرد، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sh.hassanpour@abru.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷– پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵
صفحه ۱۸۰-۱۶۷

چکیده

ایمنی پل‌ها و تونل‌ها به‌عنوان زیرساخت‌های حیاتی حمل‌ونقل، نیازمند ارزیابی نظام‌مند معیارها و زیرمعیارهای مؤثر است. این پژوهش با رویکرد کاربردی–توصیفی و استفاده از روش‌های AHP و BWM به اولویت‌بندی معیارهای ایمنی پرداخت. دو پرسشنامه مستقل برای پل و تونل طراحی شد و ۳۰ نفر از خبرگان حوزه‌های سازه، ژئوتکنیک، ایمنی حریق و مدیریت ترافیک به آن پاسخ دادند. نتایج AHP با شاخص سازگاری کمتر از ۰٫۱ نشان داد که در پل‌ها «پایداری سازه‌ای» (۰٫۰۹۲) و «کیفیت مصالح» (۰٫۰۹۰) و در تونل‌ها «خروج اضطراری و امداد» (۰٫۰۸۹)، «تهویه و تخلیه دود» (۰٫۰۸۷) و «مقاومت در برابر آتش/انفجار» (۰٫۰۸۵) در رتبه‌های نخست قرار دارند. در سطح دسته‌های اصلی، سهم طراحی در تونل‌ها ۴۹٪ و در پل‌ها ۴۰٪، سهم ساخت و اجرا به ترتیب ۳۱٪ و ۴۰٪ و سهم بهره‌برداری و نگهداری در هر دو ۲۰٪ بود. نتایج BWM نیز این الگو را تأیید کرد و نشان داد در پل‌ها «ایمنی بلایای طبیعی» (۰٫۰۸۹) و «کنترل کیفیت و بازرسی» (۰٫۰۸۸) و در تونل‌ها «خروج اضطراری و امداد» (۰٫۰۹۳) و «تهویه» (۰٫۰۹۰) بالاترین وزن‌ها را دارند. این یافته‌ها بیانگر آن است که در پل‌ها باید بر مقاومت سازه‌ای و کیفیت مصالح تأکید شود، در حالی که در تونل‌ها توجه بیشتر به شرایط اضطراری و مدیریت حریق ضروری است.

واژه‌های کلیدی: ایمنی پل‌ها، ایمنی تونل‌ها، تحلیل سلسله‌مراتبی، روش بهترین- بدترین

۱- مقدمه

زیرساخت‌های حمل‌ونقل یکی از ارکان اساسی توسعه اقتصادی و اجتماعی هر کشور محسوب می‌شوند(Rambe & Nuraini, 2024). در این میان، پل‌ها و تونل‌ها به‌عنوان عناصر کلیدی شبکه‌های جاده‌ای، نقشی تعیین‌کننده در بهبود دسترسی، کاهش زمان سفر، و افزایش کارایی حمل‌ونقل ایفا می‌کنند(Hosseinian & Mirzahossein, 2024). با این حال، ماهیت پیچیده و پرریسک این سازه‌ها موجب می‌شود که ایمنی در طراحی و ساخت آن‌ها اهمیتی دو چندان پیدا کند (Choudhary et al., 2024). حوادث ناشی از ضعف در استانداردهای ایمنی، نه‌تنها منجر به خسارات مالی هنگفت و اختلال در جریان ترافیک می‌شوند، بلکه تهدیدی جدی برای جان استفاده‌کنندگان نیز به‌شمار می‌آیند. در دهه‌های اخیر، با افزایش حجم ترافیک، بارگذاری‌های سنگین، و پدیده‌هایی همچون تغییرات اقلیمی(Raufi & Maniat, 2024) و زلزله، ضرورت بازنگری و ارزیابی استانداردهای ایمنی بیش از پیش آشکار شده است(Etesami et al., 2024). در سطح بین‌المللی، سازمان‌ها و نهادهای مهندسی، دستورالعمل‌ها و استانداردهای متنوعی برای ارتقای ایمنی پل‌ها و تونل‌ها تدوین کرده‌اند؛ با این وجود، میزان انطباق پروژه‌های جاده‌ای با این استانداردها و نحوه به‌کارگیری آن‌ها در شرایط محلی همواره با چالش‌هایی مواجه بوده است. بنابراین، انجام پژوهش‌هایی با هدف ارزیابی استانداردهای ایمنی در طراحی و ساخت پل‌ها و

تونل‌ها نه‌تنها می‌تواند به شناسایی نقاط قوت و ضعف رویکردهای موجود کمک کند، بلکه بستر مناسبی برای بهبود رویه‌های اجرایی، ارتقای سطح اعتماد عمومی و کاهش ریسک حوادث فراهم می‌سازد(Maniat, 2024, 2026). مقاله حاضر با تمرکز بر پروژه‌های جاده‌ای، به بررسی جایگاه و کاربرد استانداردهای ایمنی در مراحل مختلف طراحی و ساخت می‌پردازد و تلاش دارد تا با ارائه یافته‌های علمی و کاربردی، راهکارهایی برای ارتقای سطح ایمنی در زیرساخت‌های حیاتی کشور ارائه نماید. ایمنی حمل‌ونقل جاده‌ای در ایران ، به‌ویژه در مسیرهای برون‌شهری – یکی از دغدغه‌های مهم سلامت عمومی و توسعه پایدار محسوب می‌شود. سوانح رانندگی یکی از مهم‌ترین علل مرگ‌ومیر و معلولیت در کشور شمرده می‌شود؛ چنان‌که بنابر آمار رسمی، تصادفات رانندگی پس از بیماری‌های قلبی و سرطان، سومین عامل مرگ‌ومیر در ایران است .همچنین نرخ مرگ‌ومیر ناشی از سوانح جاده‌ای در ایران (بیش از ۲۰ نفر به‌ازای هر صد هزار نفر جمعیت) به‌مراتب بالاتر از میانگین کشورهای هم‌سطح از نظر درآمدی است و کشور را در زمره‌ی کشورهایی با بالاترین نرخ تلفات ترافیکی در جهان قرار داده‌است .این ارقام نشان‌دهنده‌ی ابعاد بحرانی مشکل ایمنی ترافیک در ایران است که نمی‌توان آن را نادیده گرفت(Khorasani-Zavareh et al., 2009). در سال‌های اخیر، هزاران نفر سالانه در جاده‌های ایران جان خود را از دست می‌دهند. تنها در سال ۱۴۰۲، شمار جانباختگان حوادث رانندگی با ۴٫۹٪ افزایش نسبت به سال قبل به ۱۷٬۱۷۷ نفر رسید که به‌طور متوسط معادل مرگ نزدیک به ۵۰ نفر در هر روز است.

بر اثر سوانح رانندگی علاوه بر تلفات جانی، صدها هزار نفر نیز دچار مصدومیت و آسیب‌های جدی می‌شوند؛ به طوری که در فاصله سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۳ بیش از ۵۰۰ هزار نفر در تصادفات جاده‌ای کشور کشته و بالغ بر ۷ میلیون نفر مجروح شده‌اند .هرچند در دهه‌ی ۱۳۸۰ و اوایل ۱۳۹۰ روند کاهشی در تلفات سالانه مشاهده شد و در حدود سال ۱۳۹۵ شمار تلفات به کم‌ترین میزان خود رسید، این روند در سال‌های اخیر معکوس شده است .پس از کاهش موقتی تلفات در دوره همه‌گیری کرونا به دلیل محدودیت سفرها، آمار مرگ‌ومیر جاده‌ای بار دیگر روند افزایشی پیدا کرده‌است که زنگ خطری برای ایمنی حمل‌ونقل محسوب می‌شود. لازم به ذکر است که بخش عمده‌ای از این تلفات در جاده‌های بین‌شهری رخ می‌دهد. به‌عنوان نمونه، آمارها نشان می‌دهد حدود دو سوم جان‌باختگان حوادث رانندگی کشور در سال‌های اخیر مربوط به محورهای برون‌شهری بوده‌است .این واقعیت بیانگر آن است که خطرات ترافیکی به‌طور خاص در شبکه حمل‌ونقل برون‌شهری متمرکز هستند و نیاز به توجه ویژه دارند. چالش‌های متعددی در پس نرخ بالای تصادفات و تلفات جاده‌ای ایران قرار دارد. فرسودگی وسایل نقلیه، نگهداری نامناسب زیرساخت‌های جاده‌ای و رفتارهای پرخطر ترافیکی از عوامل آشکار بروز تصادفات شدید محسوب می‌شوند .به بیان دیگر، ناوگان خودرویی قدیمی و کم‌ایمنی، کاستی‌های ایمنی در راه‌ها (مانند نبود علایم و تجهیزات ایمنی کافی یا ضعف در نگهداری مسیرها) و هم‌چنین تخلفات و عادات نادرست رانندگی (نظیر سرعت غیرمجاز، سبقت غیرمجاز، عدم توجه به مقررات و نبستن کمربند ایمنی) نقش چشمگیری در وقوع سوانح دارند. علاوه بر این عوامل، برخی نقایص ساختاری و مدیریتی نیز در وضعیت ایمنی حمل‌ونقل دخیل‌اند؛ از جمله می‌توان به نبود متولی متمرکز و نظام‌مند برای ایمنی راه، ضعف هماهنگی میان دستگاه‌های مسئول و تمرکز بیش از حد بر مقصر دانستن رانندگان به جای بهبود سیستم ایمنی راه‌ها اشاره کرد(Mortazavi et al., 2024). یافته‌های پژوهش‌های کیفی حاکی از آن است که فرهنگ ضعیف ایمنی ترافیک در جامعه، اجرای ناکافی قوانین و نظارت‌های ترافیکی، استانداردهای پایین ایمنی وسایل نقلیه و مشکلات مهندسی راه‌ها از موانع اصلی ارتقای ایمنی به‌شمار می‌روند .مجموع این عوامل باعث شده‌است که تلاش‌ها برای کاهش تصادفات در دهه‌های اخیر به طور کامل به اهداف موردنظر نرسد و همچنان شاهد سطح بالایی از سوانح رانندگی در کشور باشیم(Mortazavi et al., 2024). با توجه به آمار نگران‌کننده و چالش‌های فوق، رسیدگی علمی و فوری به مقوله ایمنی حمل‌ونقل برون‌شهری در ایران ضرورتی انکارناپذیر است. کارشناسان تاکید می‌کنند که خلأهای موجود در دانش و نگرش نسبت به ایمنی ترافیک باید از طریق تحقیقات علمی و اقدام‌های آموزشی پر شود تا بتوان راهکارهای مؤثری برای کاهش تصادفات و تلفات به دست آورد .ضرورت انجام پژوهش در این حوزه نه تنها برای شناسایی علل ریشه‌ای حوادث بلکه برای طراحی مداخلات

مبتنی بر شواهد و سیاست‌گذاری‌های کارآمد احساس می‌شود. بر همین اساس، مطالعه‌ی حاضر با درک این نیاز مبرم، به بررسی جامع وضعیت ایمنی حمل‌ونقل برون‌شهری در ایران پرداخته و ضمن تبیین چالش‌های موجود، راهکارهای ممکن برای بهبود ایمنی جاده‌ای کشور را ارائه می‌کند(Khorasani-Zavareh et al., 2009).

۲- پیشینه تحقیق

ایمنی حمل‌ونقل جاده‌ای در ایران طی دهه‌های اخیر به عنوان یک چالش جدی ملی شناخته شده است. آمارها نشان می‌دهد تصادفات جاده‌ای نخستین علت آسیب و دومین علت مرگ‌ومیر در ایران هستند و به طور متوسط روزانه حدود ٦٤ نفر در جاده‌های کشور جان خود را از دست می‌دهند و نزدیک به ۱،۹٦۷ نفر مصدوم می‌شوند (Azami-Aghdash et al., 2017). اگرچه در گذشته سوانح رانندگی اغلب به‌عنوان رویدادهایی اجتناب‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شدند، اما پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که بخش عمده‌ای از این سوانح کاملاً قابل پیشگیری هستند(Alexander & Merkert, 2021). تجربه کشورهای توسعه‌یافته بیانگر آن است که اقداماتی نظیر وضع قوانین سخت‌گیرانه در محدودیت سرعت، منع رانندگی در حالت مستی، اجباری‌کردن استفاده از کمربند ایمنی، و ارتقای ایمنی راه‌ها و خودروها نقش مؤثری در کاهش چشمگیر تلفات جاده‌ای داشته است. در ایران نیز، مشابه بسیاری از کشورهای با درآمد متوسط، از اوایل دهه ۱۳۸۰ (۲۰۰۰ میلادی به بعد) مجموعه‌ای از سیاست‌ها و مداخلات در جهت کنترل تلفات جاده‌ای به اجرا درآمد. نقطه عطف این روند را می‌توان سال ۱۳۸٤ دانست که هم‌زمان چند اقدام کلیدی شامل اجباری شدن استفاده از کمربند ایمنی برای سرنشینان جلو، افزایش نظارت بر سرعت، و تشدید برخورد با تخلفات حادثه‌ساز اجرایی شد. این اقدامات آغازگر کاهشی محسوس در نرخ مرگ‌ومیر جاده‌ای بود؛ به‌گونه‌ای که نرخ مرگ‌های ناشی از تصادفات از حدود ٤۰ نفر به ازای هر ۱۰۰ هزار نفر جمعیت در سال ۱۳۸٤ به نزدیک ۲٤ نفر در سال ۱۳۹۳ رسید. همچنین، تعداد کل قربانیان سالانه از حدود ۲۷،۰۰۰ نفر در سال ۱۳۸۳ به حدود ۱٦،۰۰۰ نفر در سال ۱۳۹۵ کاهش یافت؛ دستاوردی که نشان‌دهنده بهبود قابل توجه ایمنی جاده‌ای در کشور است. با این حال، میزان مرگ‌ومیر ناشی از سوانح رانندگی در ایران همچنان بالاتر از میانگین جهانی گزارش می‌شود و بر اساس نتایج مطالعات بار بیماری‌ها، تا سال ۲۰۱۹ تصادفات رانندگی به‌عنوان سومین علت اصلی مرگ‌ومیر در کشور شناخته شده است (Krug, 2012). علیرغم اجرای سیاست‌های مختلف، ارزیابی‌ها حاکی از آن است که چالش‌های ساختاری و نهادی مهمی در مدیریت ایمنی حمل‌ونقل ایران وجود دارد .سوری و همکاران طی یک مطالعه تحلیلی، مهم‌ترین مشکل در اجرای سیاست‌های ایمنی ترافیک در ایران را «فقدان سیاست‌گذاری صحیح» شناسایی کردند(Soori et al., 2009). به بیان دیگر، مشکل نه صرفاً کمبود قانون بلکه ضعف در فرآیند سیاست‌گذاری و اجرای مؤثر آن بوده است. نمونه‌ای از این امر در سیاست اجباری‌شدن کمربند ایمنی مشاهده شد؛ به طوری که با وجود تصویب قانون، اجرای جدی آن با ۸ سال تأخیر همراه بود و میزان تبعیت رانندگان نیز تا سال‌ها کمتر از ۸۰٪ باقی ماند(Azami-Aghdash et al., 2017). ایمنی در زیرساخت‌های حمل‌ونقل، به‌ویژه در سازه‌های پیچیده‌ای چون پل‌ها و تونل‌ها، از دهه‌های گذشته همواره مورد توجه پژوهشگران و نهادهای اجرایی بوده است. بر اساس مطالعات انجام‌شده، پل‌ها و تونل‌ها به‌دلیل شرایط خاص سازه‌ای و محیطی، نسبت به سایر اجزای شبکه جاده‌ای، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر خطرات طبیعی (نظیر زلزله، سیل و رانش زمین) و مخاطرات ناشی از بهره‌برداری (مانند تصادفات، آتش‌سوزی و بارگذاری بیش از حد) دارند. از این‌رو، استانداردهای ایمنی متعددی برای کاهش ریسک و افزایش تاب‌آوری این سازه‌ها تدوین شده است.

در سطح بین‌المللی، نهادهایی نظیر AASHTO در آمریکا، Eurocode در اروپا(Harrison et al., 2015) و دستورالعمل‌های PIARC، مجموعه‌ای از الزامات و راهنماها را برای طراحی و ساخت پل‌ها و تونل‌ها ارائه کرده‌اند. این استانداردها بر جنبه‌هایی چون مقاومت سازه‌ای، طراحی لرزه‌ای، سیستم‌های تهویه و تخلیه دود در تونل‌ها، سامانه‌های نظارت و هشدار، و مدیریت ترافیک اضطراری تأکید دارند. ایمنی در پل‌ها و تونل‌های جاده‌ای همواره یکی از نگرانی‌های اساسی مهندسان عمران و مدیران زیرساخت بوده است. وقوع حوادثی همچون فرو ریختن پل‌ها یا آتش‌سوزی‌های مهیب در تونل‌ها می‌تواند تلفات جانی و خسارات اقتصادی گسترده‌ای

در پی داشته باشد(Franchini et al., 2024; پاپری فرد et al., 1396).

برای نمونه، فروپاشی پل موراندی در ایتالیا (۲۰۱۸) که به کشته‌شدن ۴۳ نفر انجامید و آتش‌سوزی تونل مون‌بلان با ۳۹ کشته، اهمیت تدوین و اجرای دقیق استانداردهای ایمنی را آشکار ساخت. در پاسخ به این چالش‌ها، نهادهای بین‌المللی و ملی اقدام به تدوین آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های فنی متعددی برای طراحی و ساخت ایمن پل‌ها و تونل‌ها کرده‌اند. استانداردهای طراحی پل در سطح بین‌المللی عمدتاً بر اساس دو چارچوب مطرح توسعه یافته‌اند: آئین‌نامه‌های آمریکایی و اروپایی (یوروکد). هر دوی این چارچوب‌ها بر روش‌های طراحی احتمالاتی تاکید دارند، اما در جزئیات رویکرد تفاوت‌هایی وجود دارد .sunkoproje.comآشتو با معرفی طراحی بر مبنای ضرایب بار و مقاومت از دهه ۱۹۹۰، دیدگاهی کاملاً احتمالاتی را دنبال می‌کند .sunkoproje.comدر این رویکرد ضرایب اطمینان جداگانه‌ای به اثرهای بارگذاری (مانند بار مرده، زنده، بار محیطی) و مقاومت مصالح اعمال می‌شود تا عدم قطعیت‌ها پوشش داده شده و سطح معینی از قابلیت اطمینان سازه تامین گردد .sunkoproje.com آشتو LRFD ضرایب خود را بر مبنای تحلیل‌های قابلیت اعتماد تنظیم کرده است تا احتمال فروپاشی در حدود قابل قبول (مثلاً شاخص اطمینان $\beta \approx ۳٫۵$ در حالت حد نهایی) نگه داشته شود.

با این حال، تحقیقات جدید نشان داده‌اند که ضرایب فعلی آشتو در برخی حالات به سطوح قابلیت اعتماد کمتر از مقدار هدف منجر می‌شوند و یکنواختی ایمنی برای همه ترکیبات بار حاصل نمی‌گردد(Lee et al., 2018). برای مثال، یک مطالعه دریافت که شاخص‌های اطمینان پل‌های بتن‌آرمه و فولادی طبق AASHTO LRFD بسته به نسبت بار مرده به زنده متغیر بوده و گاه کمتر از مقدار هدف هستند.

لذا پیشنهاد شده است ضرایب بار مخصوصاً برای بار مرده اندکی افزایش یافته و فرمول‌بندی ترکیبات بار اصلاح شود(Lee et al., 2018). در سوی دیگر، یوروکدهای اروپا یک رویکرد «نیمه‌احتمالاتی» با ضرایب جزئی ایمنی را اتخاذ کرده‌اند .در پایه طراحی سازه بر مبنای یوروکد، آیین‌نامه EN 1990(مبانی طراحی سازه) مقادیر ضریب جزئی برای انواع بارها (دائم، متغیر، اتفاقی) و مقاومت مصالح تعیین نموده است. این ضرایب نیز با هدف تامین سطح قابلیت اعتماد مشخص معمولاً معادل با β ۳٫۸ برای ساختمان‌ها و پل‌های معمولی تنظیم شده‌اند .تفاوت در رویکرد طراحی میان آشتو و یوروکد را می‌توان چنین جمع‌بندی کرد که ، آشتو از ترکیبات بار تفکیک‌شده برای حالات حدی مقاومت، سرویس و حالت‌های فوق‌العاده (مانند زلزله) استفاده می‌کند، در حالی که یوروکد ترکیبات بار را در چند دسته کلی (اساسی/عادی، اتفاقی، زلزله و غیره) تعریف می‌کند. هر دو رویکرد در نهایت هدف یکسانی دارند که پل در مواجهه با بارهای بهره‌برداری و محیطی مختلف، احتمال خرابی بسیار ناچیزی داشته باشد و الزامات سرویس‌دهی (تغییرمکان‌ها، ارتعاشات، عرض ترک‌ها و غیره) نیز برآورده گردد. در حوزه بارهای ویژه، به‌ویژه بار زلزله، استانداردهای بین‌المللی توجه خاص مبذول داشته‌اند. آیین‌نامه آشتو دارای ضوابط خاص طراحی لرزه‌ای پل‌ها (با الهام از تجربه زلزله‌های کالیفرنیا) است که استفاده از جزئیات شکل‌پذیر برای اعضا و اتصالات، و در نظرگیری تغییرمکان‌های بزرگ غیرارتجاعی را توصیه می‌کند .از سوی دیگر، یوروکد ۸ برای طراحی لرزه‌ای پل‌ها یک چارچوب مفصل‌تری (با سطوح عملکرد متفاوت و تحلیل طیفی مبتنی بر شتاب طیفی طرح) ارائه می‌دهد(Gündüz, 2022). در مجموع، هر دو استاندارد تلاش دارند ظرفیت سازه در برابر زلزله‌های طرح کافی بوده و احتمال فروپاشی کلی سازه در زلزله شدید بسیار اندک باشد. علاوه بر آیین‌نامه‌های مذکور، برخی اسناد و مراجع بین‌المللی دیگر نیز بر ایمنی پل‌ها تاثیرگذار بوده‌اند.

از جمله می‌توان به استانداردهای بریتانیا (BS) و آیین‌نامه‌های استرالیا (Austroads) و ژاپن (JRA) اشاره کرد که هر کدام فلسفه طراحی خاص خود را داشته ولی عمدتاً با رویکرد ضرایب بار و مقاومت همسو شده‌اند. همچنین در سطح بین‌المللی سازمان همکاری‌های اقتصادی (OECD) و انجمن جهانی راه (PIARC) با انتشار گزارش‌هایی به تبیین اصول ایمنی و مدیریت ریسک در پل‌ها کمک کرده‌اند. برای مثال، گزارش "پل‌های مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی به اثرات بالقوه تغییرات آب‌وهوایی (افزایش سیلاب‌ها، طوفان‌ها و غیره) بر ایمنی و دوام پل‌ها می‌پردازد و لزوم بازبینی ضرایب اطمینان در برابر بارهای محیطی فزاینده را گوشزد می‌کند(Chung & Klass, 2024).

ایمنی تونل‌های جاده‌ای به دلیل فضای محصور و مخاطرات ویژه‌ای همچون آتش‌سوزی، انفجار، دود و آلاینده‌ها، نیازمند

استانداردها و رویه‌های اختصاصی است. در سطح بین‌المللی چند مرجع کلیدی وجود دارد که ایمنی تونل‌ها را پوشش می‌دهند. یکی از مهم‌ترین آن‌ها دستورالعمل اتحادیه اروپا EC ٥٤/٢٠٠٤ است که پس از چند حادثه مرگبار تونل در اروپا (مانند فاجعه تونل مون‌بلان و تونل گوتارد در اواخر دهه ۹۰) تصویب شد. این دستورالعمل حداقل الزامات ایمنی برای تونل‌های بزرگراهی (طول بیش از ۵۰۰ متر) در شبکه راه‌های ترانس–اروپایی را تعیین می‌کند، از جمله الزام به وجود خروجی‌های اضطراری (هر ۵۰۰ متر)، سیستم تهویه دود، سیستم‌های اعلام و اطفاء حریق، و مراکز کنترل تونل کشورهای اروپایی بر اساس این چارچوب قوانین ملی خود را به‌روز کرده‌اند. برای مثال، کشور سوئیس با داشتن یکی از ایمن‌ترین شبکه‌های تونلی دنیا، پس از سال ۲۰۰۰ استانداردهای تجهیزات ایمنی تونل را بازبینی و به‌روزرسانی کرده است .به طور مشابه، فرانسه، ایتالیا و آلمان نیز دستورالعمل‌های ملی سخت‌گیرانه‌ای برای تهویه، سیستم‌های کشف حریق و آموزش بهره‌برداران تونل‌ها تدوین کرده‌اند.

در ایالات متحده، استاندارد NFPA 502 (از انجمن ملی حفاظت در برابر آتش) به عنوان مرجع اصلی ایمنی تونل‌های جاده‌ای مطرح است و الزامات مربوط به حفاظت در برابر حریق را بیان می‌کند NFPA 502 . (ویرایش‌های اخیر ۲۰۲۰ و ۲۰۲۳) سازندگان تونل را ملزم می‌کند که سازه تونل و تجهیزات آن توان مقاومت در برابر آتش‌سوزی ناشی از سوخت وسایل نقلیه را برای مدت مشخصی داشته باشند و امکاناتی برای دسترسی آتش‌نشانان و تخلیه دود پیش‌بینی شود . با این حال، یکی از نقدهایی که پژوهشگران مطرح کرده‌اند آن است که این استاندارد در خصوص چگونگی تعیین «سناریوی طراحی حریق» و کمّی‌سازی معیارهایی نظیر حد قابل قبول خسارت سازه‌ای یا وقفه ترافیکی راهنمایی کافی ارائه نمی‌دهد . به‌علاوه، NFPA 502 بر تونل‌های بلند (بیش از ۳۰۰ متر) متمرکز است و تونل‌های کوتاه‌تر را مستثنی کرده، در حالی که بسیاری از حوادث آتش‌سوزی تونل در همین دسته رخ می‌دهند .این خلأها نشان می‌دهد که استانداردهای موجود برای حریق تونل نیاز به تکمیل و تفصیل بیشتر (از طریق رویکردهای مبتنی بر عملکرد) دارند (Franchini et al., 2024). سازمان جهانی راه نیز منابع ارزشمندی در این حوزه منتشر ساخته است .دستورالعمل‌های ایمنی تونل‌های جاده‌ای مجموعه‌ای جامع از توصیه‌ها برای طراحی، تجهیز، بهره‌برداری و مدیریت شرایط اضطراری در تونل‌ها ارائه می‌دهد .آخرین گزارش PIARC درباره تاب‌آوری تونل‌های جاده‌ای بر این نکته تاکید دارد که ایمنی و تاب‌آوری مفاهیمی به‌هم‌پیوسته‌اند؛ یعنی تونل باید توانایی مقاومت، جذب و بازیابی از حوادث مختلف (حریق، سیل، زلزله، تصادف و حتی حملات خرابکارانه) را داشته باشد .این گزارش ضمن مرور ادبیات موجود، به تصمیم‌گیران و مدیران تونل توصیه می‌کند معیارهای کمی برای تاب‌آوری و ایمنی تعیین کرده و راهکارهای بهبود مستمر (از طراحی اولیه تا بهره‌برداری و بازسازی) را پیاده کنند(Tong et al., 2024).

به طور کلی، رویکردهای نوین در استانداردهای بین‌المللی تونل در حال حرکت به سوی طراحی مبتنی بر ریسک و عملکرد است. به جای تکیه صرف بر قواعد پیش‌نگاشته نظیر حداقل تعداد خروجی یا ظرفیت تهویه، توصیه می‌شود هر تونل بر مبنای تحلیل ریسک جامع ارزیابی شود و ترکیبی بهینه از تمهیدات ایمنی اتخاذ گردد. برای مثال، ممکن است یک تونل پرتردد واقع در منطقه سردسیر نیازمند سیستم‌های گرمایش سطح جاده برای جلوگیری از یخ‌زدگی باشد یا تونلی با ترافیک مواد خطرناک به تهویه و سیستم اطفاء خودکار قوی‌تری نسبت به تونل عادی نیاز داشته باشد. این انعطاف‌پذیری در رویکرد که در چارچوب‌هایی چون استانداردهای استرالیا و نیوزیلند یا برخی دستورالعمل‌های جدید اروپایی دیده می‌شود، اجازه می‌دهد تا ایمنی متناسب با شرایط و ریسک‌های هر پروژه تامین شود.

در ایران، طراحی پل‌ها و تونل‌های جاده‌ای به طور تاریخی متاثر از استانداردهای بین‌المللی خصوصاً آئین‌نامه‌های آمریکایی بوده است .آیین‌نامه طرح پل ایران سال‌ها بر پایه ترجمه و بومی‌سازی آیین‌نامه آشتو پیش می‌رفته است.

طی دهه‌های اخیر، با به‌روز شدن آشتو به روشLRFD، در ایران نیز دستورالعمل‌های جدیدی منتشر شد که روش حالت حدی و ضرایب بار و مقاومت را ملاک طراحی پل‌ها قرار می‌دهند .برای مثال، نشریه‌های فنی سازمان برنامه و بودجه (مانند نشریه شماره ٤٦٣) به عنوان راهنمای طراحی سازه‌ای پل‌ها بر اساس LRFD آشتو تهیه شده‌اند. همچنین مبحث ۲۱ مقررات ملی ساختمان ایران نیز به پل‌ها و سازه‌های وابسته پرداخته و الزامات طراحی لرزه‌ای آن‌ها را منطبق با

شرایط لرزه‌خیزی کشور تنظیم نموده است .در زمینه بارگذاری پل‌ها، آیین‌نامه بارگذاری پل‌های راه و راه‌آهن ایران تدوین شده که ترکیبی از الگوهای آشتو و استانداردهای اروپایی مانند قطار بار معادل UIC را دربرمی‌گیرد.

از منظر ساختاری، یکی از تفاوت‌های مهم در استانداردهای بومی ایران، تاکید ویژه بر بارهای لرزه‌ای است. با توجه به لرزه‌خیزی بالای اکثر نقاط ایران، آیین‌نامه‌های داخلی ضوابط محافظه‌کارانه‌تری نسبت به استانداردهای جهانی اتخاذ کرده‌اند تا پل‌ها در برابر زلزله‌های طرح (با دوره بازگشت ۴۷۵ سال یا بیشتر) مقاومت کافی داشته باشند.

برای نمونه، بر اساس آیین‌نامه طرح لرزه‌ای پل‌های ایران اقتباس‌شده از آشتو، پل‌ها باید برای دو سطح عملکرد لرزه‌ای طراحی شوند: سطح بدون خرابی سازه‌ای در زلزله بهره‌برداری و سطح جلوگیری از فروپاشی در زلزله شدید (سطح حداکثر قابل تصور) .این آیین‌نامه همچنین برای مناطق نزدیک گسل‌های فعال یا خاک‌های مستعد روانگرایی، تمهیدات مضاعفی را الزامی کرده است

در حوزه تونل‌های راه، توسعه تونل‌سازی در ایران طی دودهه اخیر شتاب چشمگیری داشته است. با افزایش طول تونل‌های بهره‌برداری، نیاز به استانداردهای بومی ایمنی تونل بیش از پیش احساس شد. هرچند تاکنون یک «آیین‌نامه جامع طراحی تونل‌های جاده‌ای» ملی منتشر نشده، اما مجموعه‌ای از نشریات و دستورالعمل‌های مرتبط وجود دارند. نشریه ۲۶۷ "آیین‌نامه ایمنی راه‌ها "که شامل چند جلد است، بخشی را به ایمنی ابنیه فنی (پل‌ها و تونل‌ها) اختصاص داده و الزامات مربوط به تهویه، روشنایی، سیستم‌های ایمنی و علائم هشداردهنده در تونل‌ها را بیان کرده است. افزون بر آن، وزارت راه و شهرسازی چک‌لیست‌هایی را برای بازرسی ایمنی تونل‌ها تدوین نموده که شامل کنترل دوره‌ای تجهیزات (فن‌ها، حسگرهای منوکسیدکربن، سیستم اطفاء حریق) و وضعیت روسازی و جداره تونل است.

با این وجود، مطالعات داخلی نشان می‌دهد هنوز چالش‌هایی در انطباق کامل ساختارها با استانداردهای ایمنی وجود دارد. برای مثال، یک پژوهش (کلانتری و الهی، ۱۳۹۳) با ارزیابی چند تونل راه در آزادراه خرم‌آباد – پل‌زال نشان داد که ضعف در سیستم روشنایی و وجود قوس افقی تند در تونل از مهم‌ترین عوامل کاهنده ایمنی بوده‌اند (کلانتری & الهی, ۱۳۹۳). این مطالعه پیشنهاد کرد با بهبود روشنایی (تامین شدت نور کافی و انتقال آرام چشم از بیرون به داخل تونل) و اصلاح شیب و شعاع قوس مسیر، می‌توان ایمنی تونل‌ها را به طور قابل توجهی ارتقاء داد. همچنین، تحقیق دیگری که در سال‌های اخیر انجام شده به عوامل خطر در ایمنی ساخت تونل‌ها پرداخته استاین تحقیق که یک مرور سیستماتیک بر پروژه‌های تونل‌سازی در کشور بود، نشان داد عوامل زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی (مثل مواجهه با گسل یا آب‌های زیرزمینی)، عوامل مدیریتی و سازمانی (مانند ضعف نظارت ایمنی حین ساخت) و عوامل انسانی از مهم‌ترین ریسک‌ها در حوادث ساخت تونل محسوب می‌شوند .بر این اساس، توصیه شده که پیش از آغاز پروژه‌های تونل‌سازی بزرگ، یک ارزیابی ریسک جامع صورت گیرد و اقدامات کنترلی مانند آموزش‌های ایمنی، به‌کارگیری تجهیزات پایش (سنسورهای همگرایی، نشت گاز و غیره) و حضور کارشناسان ایمنی در کارگاه الزامی شود (آقایی و ذوالفقاری فر, ۲۰۲۴).

نکته مهم دیگر، پوشش ضعیف بحث حریق در استانداردهای بومی تونل است. یک مقاله کنفرانسی (پاپری‌فرد و همکاران، ۱۳۹۶) تصریح کرده که نبود قوانین ایمنی کافی در برابر آتش‌سوزی تونل‌های جاده‌ای در ایران، چالش‌برانگیز است و وقوع حریق‌های فاجعه‌بار می‌تواند به انسداد طولانی‌مدت شریان‌های ارتباطی منجر شود .این مطالعه، پس از بررسی سیستم‌های اعلام حریق متداول در سایر کشورها و آیین‌نامه‌های موجود داخلی، نتیجه گرفته که باید تجهیزات ایمنی فعال در تونل‌های ایران (شامل آشکارسازهای دود و حرارت، سیستم‌های آب‌پاش خودکار و امکانات تخلیه اضطراری) تقویت گردد و دستورالعمل‌های ویژه حریق برای تونل‌ها تدوین شود(پاپری فرد و همکاران، ۱۳۹۶). خوشبختانه در سال‌های اخیر گام‌هایی در این جهت برداشته شده است؛ برای مثال، در تونل‌های آزادراه تهران–شمال تجهیزات پیشرفته تهویه و کشف حریق نصب شده و رزمایش‌های دوره‌ای مدیریت بحران در تونل‌ها برگزار می‌شود. با این حال، هنوز جای کار زیادی برای به‌هنگام‌سازی استانداردهای بومی متناسب با بهترین رویه‌های بین‌المللی وجود دارد (میرزایی و حسینی، ۱۴۰۲).

در مرور پژوهش‌های سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ درباره ایمنی پل‌ها و تونل‌ها روشن می‌شود که با وجود پیشرفت‌های

چشمگیر در استانداردهای فنی، همچنان کاستی‌ها و شکاف‌هایی جدی وجود دارد. نخست، بسیاری از آیین‌نامه‌ها تنها بر بارهای متعارف مانند بار زنده، مرده، باد یا زلزله تمرکز کرده‌اند و تهدیدهای نوظهوری همچون آتش‌سوزی، حملات خرابکارانه یا ریسک‌های مرتبط با خودروهای برقی و سوخت‌های نو در آنها بازتاب کافی ندارند؛ از این رو نیاز به همکاری میان‌رشته‌ای میان مهندسان سازه، متخصصان حریق و تحلیل‌گران ریسک برای طراحی سناریوهای بدبینانه بیش از پیش احساس می‌شود. دوم، خلأ قابل توجهی در زمینه روش‌های کمی‌سازی ایمنی وجود دارد، زیرا ارزیابی‌های رایج اغلب کیفی و مبتنی بر چک‌لیست‌اند و نمی‌توانند تصویر دقیقی از سطح ریسک ارائه دهند، در حالی که شاخص‌هایی نظیر شاخص ایمنی تونل یا شاخص ایمنی پل که ترکیبی از وضعیت سازه‌ای و اهمیت عملکردی هستند می‌توانند مبنایی برای تصمیم‌گیری علمی‌تر در بهسازی و تخصیص منابع فراهم کنند، هرچند هنوز نیازمند اعتبارسنجی و بومی‌سازی‌اند. سوم، حرکت از استانداردهای دستوری به سمت طراحی مبتنی بر عملکرد ضرورت یافته است، به این معنا که به جای تعیین صرف ویژگی‌های صوری، باید رسیدن به سطحی معین از ایمنی (مانند امکان تخلیه امن کاربران در زمان مشخص در هنگام حریق) هدف‌گذاری شود، اما در عمل شکاف میان نظریه و دستورالعمل‌های کاربردی همچنان وجود دارد.

چهارم، مدیریت ایمنی در دوره بهره‌برداری کمتر مورد توجه بوده، در حالی که بسیاری از پل‌ها و تونل‌های موجود با استانداردهای قدیمی ساخته شده‌اند و اکنون نیازمند ارزیابی مجدد و بهسازی مبتنی بر ریسک‌اند؛ هنوز معیارهای یکپارچه‌ای در سطح جهانی برای اولویت‌بندی چنین اقداماتی وجود ندارد. پنجم، عوامل انسانی و مدیریتی نیز در اغلب آیین‌نامه‌ها مغفول مانده است، در حالی که تجربه حوادثی مانند ریزش پل FIU نشان داد حتی طراحی صحیح نیز با یک خطای انسانی در اجرا یا نظارت می‌تواند بی‌اثر شود. بنابراین تدوین استانداردهایی که آموزش، مدیریت ایمنی پروژه و رفتار کاربران را نیز شامل شوند ضروری است. در مجموع، هرچند اسناد بین‌المللی مانند یوروکد یا آشتو ایمنی کلی سازه‌ای را تضمین می‌کنند و دستورالعمل‌های ویژه‌ای نیز برای تونل‌ها از سوی نهادهایی چون اتحادیه اروپا و پیارک منتشر شده است، اما برای پاسخ به نیازهای آینده باید استانداردها به‌روز شوند، بومی‌سازی متناسب با شرایط محلی صورت گیرد، دستورالعمل‌های مدیریتی و بهره‌برداری تقویت گردد و پژوهش‌های میان‌رشته‌ای برای کمّی‌سازی ایمنی گسترش یابند. بدین ترتیب ایمنی زیرساخت‌های حیاتی نه صرفاً با نگارش آیین‌نامه، بلکه با فرهنگ‌سازی، نظارت مستمر و یادگیری از حوادث گذشته تضمین خواهد شد.

۳-روش تحقیق

این پژوهش از نوع کاربردی–توصیفی با رویکرد چندمعیاره است و با استفاده از دو روش تصمیم‌گیری سلسله مراتبی و BWM به ارزیابی و اولویت‌بندی استانداردهای ایمنی در طراحی و ساخت پل‌ها و تونل‌ها می‌پردازد. انتخاب این دو روش به دلیل توانایی روش تحلیل سلسله مراتبی در ساختاردهی مسائل پیچیده به‌صورت سلسله‌مراتبی و تولید وزن‌های سازگار، و قابلیت BWM در کاهش بار مقایسه‌ها و افزایش دقت در تعیین وزن معیارها صورت گرفته است. برای گردآوری داده‌ها دو پرسشنامه مستقل طراحی شد: یکی برای پل و دیگری برای تونل، زیرا ماهیت استانداردهای ایمنی در این دو زیرساخت متفاوت است.

ابزار اصلی پرسشنامه مقایسات زوجی بر مبنای مقیاس ۹ درجه‌ای ساعتی (۱ = اهمیت برابر تا ۹ = اهمیت بسیار بیشتر) بود و ساختار آن منطبق بر سلسله‌مراتب تحقیق تنظیم شد. سطح اول پرسشنامه هدف (اولویت‌بندی استانداردهای ایمنی) را پوشش می‌دهد؛ سطح دوم شامل معیارهای اصلی مانند یکپارچگی سازه–ژئوتکنیک، لرزه‌ای، زهکشی و آب‌بندی، ایمنی ترافیکی، دسترسی اضطراری، آتش، روشنایی و پایش/نگهداری است؛ و سطح سوم زیرمعیارهایی را در بر می‌گیرد که بر اساس مرور ادبیات و جلسات خبرگی نهایی شده‌اند. برای افزایش روایی ابزار، پرسشنامه در دو نوبت پایلوت با ٦ نفر از خبرگان آزمون و اصلاح شد و در ابتدای هر بخش دستورالعمل تکمیل همراه با مثال عددی ارائه گردید.

جامعه آماری تحقیق را ۳۰ نفر از متخصصان خبره در حوزه‌های راه و ترابری، سازه‌های خاص، ژئوتکنیک، ایمنی حریق، بهره‌برداری پل و تونل و مدیریت ترافیک تشکیل می‌دهند که به‌صورت هدفمند–قضاوتی و با رعایت تنوع تخصص، سابقه بیش از پنج سال و تجربه عملی در پروژه‌های

مرتبط انتخاب شدند. در مطالعات مبتنی بر قضاوت خبرگان، کفایت نمونه به کیفیت و تنوع تخصص وابسته است و ادبیات روش‌های خبرگی و روش تحلیل سلسله مراتبی بازه ۱۰ تا ۳۰ نفر را کفایت‌بخش می‌داند؛ بنابراین انتخاب ۳۰ نفر در این پژوهش ضمن پوشش گسترده حوزه‌های تخصصی، امکان تحلیل‌های حساسیت مقایسه‌ای (پل در برابر تونل) و محاسبه شاخص‌های اجماع نظیر ضریب کندال W را فراهم ساخته است.

در فرایند تحلیل، برای هر ماتریس زوجی بردار ویژه وزن‌ها w از بزرگ‌ترین مقدار ویژه λmax محاسبه و پس از نرمال‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. سازگاری قضاوت‌ها با شاخص ناسازگاری بررسی شد و حد آستانه $CR \leq 0.10$ در نظر گرفته شد؛ در صورت تجاوز از این حد، ماتریس مربوطه جهت بازنگری به خبرگان بازگردانده شد. وزن‌های نهایی از ضرب وزن زیرمعیارها در وزن معیار والد به‌دست آمدند. به منظور بررسی پایداری نتایج، تحلیل حساسیت یک‌به‌یک با تغییر ±۱۰٪ در وزن معیارهای اصلی انجام شد و تغییر رتبه‌بندی‌ها گزارش گردید. در روش BWM نیز بهترین و بدترین معیارها توسط پاسخ‌دهندگان مشخص شد و مقایسه‌های مربوطه برای محاسبه وزن‌ها صورت گرفت تا نتایج با خروجی روش تحلیل سلسله مراتبی مقایسه و اعتبار متقابل یافته‌ها تقویت شود.

٤-تجزیه و تحلیل

در این پژوهش، ۳۰ نفر از خبرگان حوزه پل و تونل به پرسشنامه‌ها پاسخ داده‌اند. نتایج توصیفی نشان می‌دهد که از نظر **جنسیت**، بیشترین سهم مربوط به مردان با ۲۰ نفر (٦٧/٦٦ درصد) و سپس زنان با ۱۰ نفر (۳۳/۳۳ درصد) است. این نسبت بیانگر آن است که در حوزه‌های فنی و زیرساختی مرتبط با پل و تونل، حضور متخصصان مرد همچنان غالب است، هرچند سهم قابل توجهی نیز به زنان اختصاص یافته است. از منظر **تحصیلات**، بیشترین فراوانی مربوط به کارشناسان با مدرک کارشناسی (۱۸ نفر، ٦٠ درصد) است و پس از آن کارشناسی ارشد با ۷ نفر (۳۳/۲۳ درصد) قرار دارد.

تعداد اندکی از پاسخ‌دهندگان دارای مدرک دکتری (۲ نفر، ٦٧/٦ درصد) یا دیپلم (۳ نفر، ۱۰ درصد) هستند. جدول۱نشان می‌دهد که اکثریت شرکت‌کنندگان از سطح تحصیلات دانشگاهی برخوردارند که برای اعتبارسنجی یافته‌ها اهمیت دارد.

از نظر **سابقه کاری**، ۱۳ نفر (۳۳/٤۳ درصد) بین ۵ تا ۱۰ سال سابقه داشته‌اند، ۱۲ نفر (٤٠ درصد) بیش از ۱۰ سال تجربه داشته‌اند و تنها ۵ نفر (٦٧/١٦ درصد) کمتر از ۵ سال سابقه داشته‌اند. این توزیع بیانگر آن است که بیش از ۸۳ درصد از پاسخ‌دهندگان دارای تجربه کاری بیش از ۵ سال هستند و بنابراین قضاوت‌های آنان از پشتوانه تجربی مناسبی برخوردار است.

جدول ۱. ویژگی‌های جمعیت‌شناختی پاسخ‌دهندگان پرسشنامه

جنسیت	فراوانی	درصد
مرد	۲۰	٦٦,٦٧
زن	۱۰	۳۳,۳۳
تحصیلات	فراوانی	درصد
کارشناسی	۱۸	٦٠
کارشناسی ارشد	۱۷	۲۳,۳۳
دیپلم	۳	۱۰
دکتری	۲	٦,٦٧
سابقه کار	فراوانی	درصد
۵ تا ۱۰ سال	۱۳	٤۳,۳۳
بیشتر از ۱۰ سال	۱۲	٤٠
کمتر از ۵ سال	۵	١٦,٦٧

جدول ۲ میانگین، میانه و انحراف معیار امتیازهای ۱۴ معیار ایمنی را در دو حوزه پل و تونل نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بخش پل، معیارهای مرتبط با پایداری سازه‌ای، کیفیت مصالح و ایمنی بلایای طبیعی بالاترین میانگین را دارند، در حالی که در بخش تونل، معیارهای مربوط به خروج اضطراری و امداد، تهویه و تخلیه دود و مقاومت در برابر آتش/انفجار بالاترین اولویت‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین پراکندگی (انحراف معیار) در برخی معیارها مانند کنترل کیفیت و بازرسی در تونل‌ها بیشتر است که نشان‌دهنده تفاوت نظر میان خبرگان است.

جدول ۳ پس از محاسبه ماتریس مقایسات زوجی و نرمال سازی محاسبه شده است. در حوزه تونل، بالاترین وزن به زیرمعیارهای مرتبط با طراحی، به‌ویژه پایداری سازه‌ای، خروج اضطراری و تهویه اختصاص یافته است، در حالی که در پل‌ها معیارهای پایداری سازه‌ای و کیفیت مصالح در رتبه‌های نخست قرار دارند. تفاوت در رتبه‌بندی نشان می‌دهد که در تونل‌ها توجه بیشتری به شرایط اضطراری و ایمنی حریق و تهویه وجود دارد، اما در پل‌ها موضوعات مرتبط با مقاومت سازه‌ای و کیفیت مصالح اهمیت بیشتری یافته است. در بخش ساخت و اجرا نیز ایمنی کارگاهی و کنترل کیفیت در پل‌ها برجسته‌تر است، در حالی که در تونل وزن بیشتری به فناوری‌های نوین و ایمنی کارگاهی داده شده است.

در نهایت، در حوزه بهره‌برداری و نگهداری، هر دو زیرساخت ایمنی ترافیکی را در اولویت قرار داده‌اند، اما در پل‌ها وزن بیشتری برای کنترل کیفیت و مصالح مشاهده می‌شود، در حالی که در تونل‌ها زیرمعیارهای مرتبط با تخلیه دود و خروج اضطراری برجسته‌تر هستند.

لازم به ذکر است که شاخص سازگاری در هر دو ماتریس پل و تونل بسیار پایین و کمتر از ۰,۱ بوده است($CR\approx0.00$)، که نشان‌دهنده سازگاری مطلوب قضاوت‌های خبرگان و اعتبار نتایج حاصل از روش تحلیل سلسله مراتبی است.

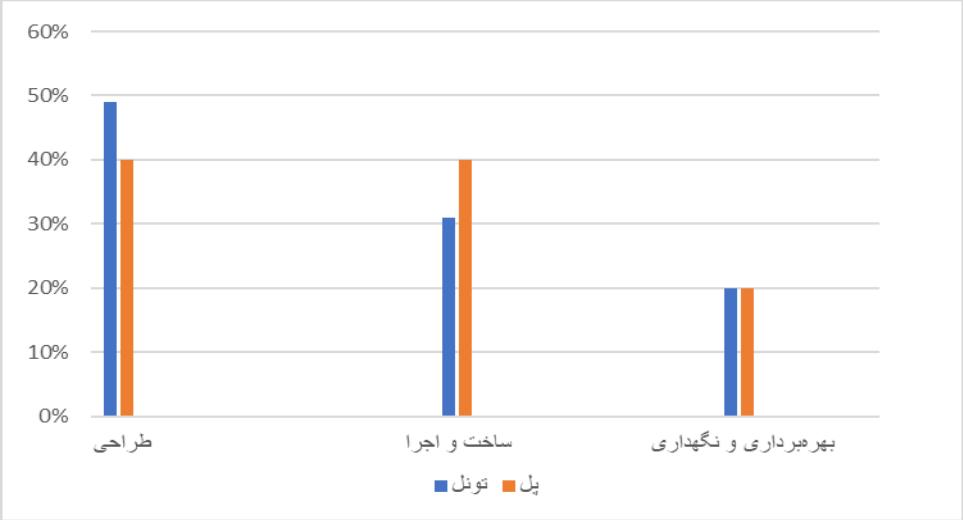
شکل۱ نتایج مقایسه سه دسته اصلی معیارها (طراحی، ساخت و اجرا، بهره‌برداری و نگهداری) را برای پل و تونل نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، در بخش طراحی وزن معیارها در پل‌ها (حدود ۵۰ درصد) بالاتر از تونل‌ها (حدود ۴۰ درصد) است و این نشان‌دهنده تمرکز بیشتر بر پایداری سازه‌ای و کیفیت مصالح در پل‌هاست. در مقابل، در بخش ساخت و اجرا، تونل‌ها با حدود ۴۰ درصد وزن نسبت به پل‌ها (حدود ۳۰ درصد) اهمیت بیشتری یافته‌اند که با توجه به حساسیت اجرای عملیات زیرزمینی و ایمنی کارگاهی قابل تبیین است. در نهایت، در حوزه بهره‌برداری و نگهداری، هر دو زیرساخت وزن مشابهی در حدود ۲۰ درصد دارند، که نشان‌دهنده اهمیت مشترک موضوعاتی مانند ایمنی ترافیک، نگهداری و پایداری زیست‌محیطی در هر دو نوع سازه است.

جدول ۲. شاخص‌های آماری معیارهای ایمنی در پل و تونل

		پل			تونل		
	معیارها	میانگین	میانه	انحراف معیار	میانگین	میانه	انحراف معیار
C1	پایداری سازه‌ای	8.3	9.0	0.8	8.3	8.0	0.8
C2	کیفیت مصالح	8.2	8.0	0.9	7.1	7.0	0.9
C3	ایمنی بلایای طبیعی	8.0	8.0	0.9	7.1	7.0	0.9
C4	کنترل کیفیت و بازرسی	7.8	8.0	0.9	4.3	4.0	1.0
C5	ایمنی ترافیک	7.0	7.0	0.8	6.8	7.0	1.0
C6	ایمنی کارگاهی	7.2	7.0	1.1	6.8	7.0	0.9
C7	کاهش زمان و هزینه	6.6	7.0	1.2	5.9	6.0	1.0
C8	فناوری‌های نوین ساخت	6.5	6.0	0.8	5.0	5.0	1.0
C9	پایداری زیست‌محیطی	6.2	6.0	0.9	4.9	5.0	1.0
C10	مقاومت در برابر آتش/انفجار	5.8	6.0	1.1	7.7	8.0	1.0
C11	مهندسی هندسی	5.4	5.0	1.0	5.2	5.0	1.1
C12	قابلیت نگهداری	5.0	5.0	1.2	6.2	6.0	0.9
C13	خروج اضطراری و امداد	4.6	5.0	1.1	8.1	8.0	0.7
C14	تهویه و تخلیه دود	4.6	5.0	1.1	7.9	8.0	0.8

جدول ۳. وزن معیارها و زیرمعیارهای ایمنی پل و تونل در روش سلسله مراتبی

		تونل			پل		
معیار	زیر معیار	وزن معیار	وزن زیر معیار	رتبه	وزن معیار	وزن زیر معیار	رتبه
طراحی	ایمنی بلایای طبیعی	49%	0.0776	6	40%	0.088219	3
	پایداری سازه‌ای		0.0907	1		0.092004	1
	تهویه و تخلیه دود		0.0867	3		0.049183	14
	خروج اضطراری و امداد		0.0889	2		0.049874	13
	مقاومت در برابر آتش/انفجار		0.0845	4		0.063539	10
	مهندسی هندسی		0.0568	11		0.05892	11
ساخت و اجرا:	ایمنی کارگاهی	31%	0.0747	7	40%	0.078709	5
	فناوری‌های نوین ساخت		0.055	12		0.071291	8
	کاهش زمان و هزینه		0.0645	10		0.072488	7
	کنترل کیفیت و بازرسی		0.0473	14		0.085691	4
	کیفیت مصالح		0.0779	5		0.090417	2
بهره‌برداری و نگهداری	ایمنی ترافیک	20%	0.0739	8	20%	0.077551	6
	پایداری زیست‌محیطی		0.0539	13		0.06767	9
	قابلیت نگهداری		0.0677	9		0.054443	12



شکل ۱. مقایسه وزن دسته‌های اصلی معیارهای ایمنی در پل و تونل بر اساس روش سلسله مراتبی

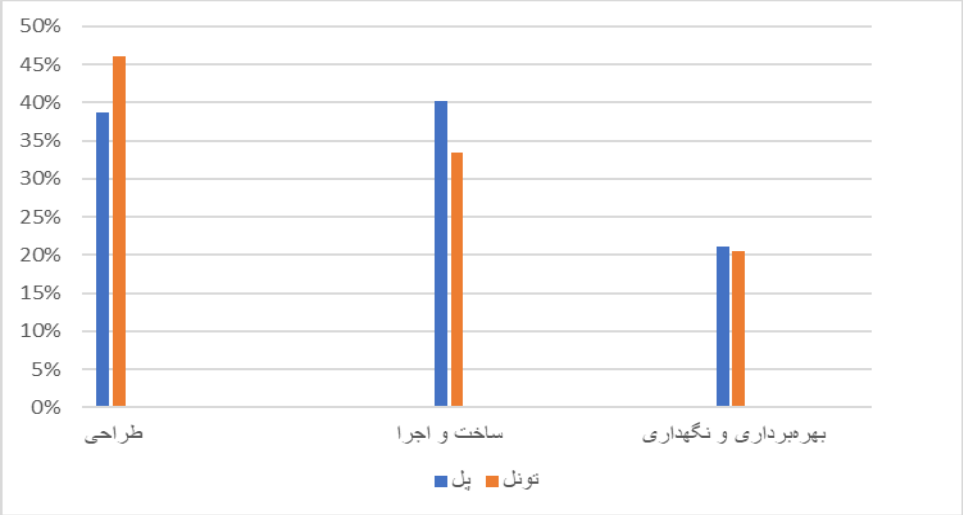
جدول ٤ وزن معیارها و زیرمعیارها را در سه دسته اصلی برای پل و تونل بر اساس روش BWM نشان می‌دهد. در حوزه پل، بیشترین وزن به معیار طراحی اختصاص یافته است (۳۹ درصد) که در آن ایمنی بلایای طبیعی و کنترل کیفیت و بازرسی رتبه‌های نخست را به خود اختصاص داده‌اند. در مقابل، در تونل‌ها معیار طراحی با ٤٦ درصد وزن در اولویت قرار گرفته و زیرمعیارهای خروج اضطراری و امداد، تهویه و تخلیه دود و کیفیت مصالح بالاترین اهمیت را کسب کرده‌اند. در بخش ساخت و اجرا، در پل‌ها ایمنی کارگاهی و کیفیت مصالح وزن بیشتری دارند، در حالی که در تونل‌ها ایمنی کارگاهی و کیفیت مصالح در کنار شاخص‌های طراحی نقش اصلی را ایفا می‌کنند. در حوزه بهره‌برداری و نگهداری نیز هر دو زیرساخت وزن مشابهی در حدود ۲۱ درصد دارند و ایمنی ترافیکی در هر دو مورد اهمیت بیشتری یافته است. نتایج بیانگر تفاوت الگوی اولویت‌بندی بین پل و تونل است، به‌گونه‌ای که در پل‌ها تأکید بیشتر بر کیفیت و کنترل فرآیند ساخت و در تونل‌ها تمرکز بر مدیریت شرایط اضطراری و ایمنی حریق و تهویه است.

جدول ٤. وزن معیارها و زیرمعیارهای ایمنی پل و تونل بر اساس روش BWM

معیار	زیر معیار	پل			تونل		
		وزن معیار	وزن زیر معیار	رتبه	وزن معیار	وزن زیر معیار	رتبه
طراحی	ایمنی بلایای طبیعی	39%	0.088715	1	46%	0.078526	5
	پایداری سازه‌ای		0.061785	11		0.062209	10
	تهویه و تخلیه دود		0.052665	14		0.090116	2
	خروج اضطراری و امداد		0.053199	13		0.092522	1
	مقاومت در برابر آتش/انفجار		0.067273	9		0.077979	6
	مهندسی هندسی		0.062752	10		0.059366	11
ساخت و اجرا	ایمنی کارگاهی	40%	0.083066	3	33%	0.079187	4
	فناوری‌های نوین ساخت		0.075231	6		0.057738	12
	کاهش زمان و هزینه		0.074487	7		0.067491	9
	کنترل کیفیت و بازرسی		0.088206	2		0.048731	14
	کیفیت مصالح		0.081243	5		0.080733	3
بهره‌برداری و نگهداری	ایمنی ترافیک	21%	0.081893	4	21%	0.07759	7
	پایداری زیست‌محیطی		0.071763	8		0.05613	13
	قابلیت نگهداری		0.057722	12		0.071682	8

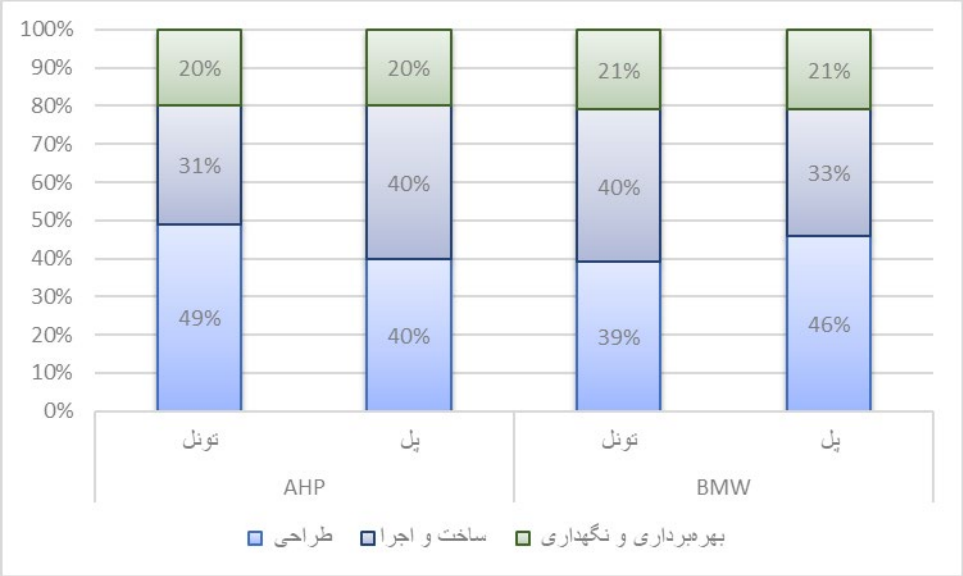
شکل ۲ توزیع وزن سه دسته اصلی معیارهای ایمنی در پل و تونل بر اساس روش BWM را نشان می‌دهد.

در تونل‌ها، طراحی بیشترین وزن را کسب کرده است (٤٦٪) در حالی که در پل‌ها این رقم حدود ۳۹٪ است. در بخش ساخت و اجرا، پل‌ها نسبت به تونل‌ها سهم بیشتری دارند و در حوزه بهره‌برداری و نگهداری هر دو نوع سازه سهم تقریباً برابری در حدود ۲۰٪ دارند.



شکل ۲. مقایسه وزن معیارهای ایمنی در پل و تونل بر اساس روش BWM

شکل ۳ ترکیب وزن سه دسته اصلی معیارهای ایمنی (طراحی، ساخت و اجرا، بهره‌برداری و نگهداری) را در پل و تونل بر اساس دو روش سلسله مراتبی و BWM نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که در هر دو روش، طراحی و ساخت بیشترین سهم را دارند، اما در تونل‌ها وزن طراحی بالاتر از پل‌هاست، در حالی که در پل‌ها ساخت و اجرا نسبت بیشتری یافته است. همچنین سهم بهره‌برداری و نگهداری در هر دو نوع سازه تقریباً ثابت و در حدود ۲۰ تا ۲۱ درصد باقی مانده است.



شکل ۳. مقایسه سهم نسبی دسته‌های اصلی معیارهای ایمنی در پل و تونل بر اساس دو روش سلسله مراتبی و BWM

۵-نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که ایمنی پل‌ها و تونل‌ها، با وجود اشتراکات در برخی حوزه‌ها، الگوهای اولویت‌بندی متفاوتی دارند. نتایج حاصل از روش سلسله مراتبی با شاخص سازگاری کمتر از ۰٫۱ اعتبار مناسبی داشت و نشان داد که در پل‌ها معیارهای «پایداری سازه‌ای» (وزن ۰٫۰۹۲) و «کیفیت مصالح» (وزن ۰٫۰۹۰) بیشترین اهمیت را دارند، در حالی که در تونل‌ها «خروج اضطراری و امداد» (وزن ۰٫۰۸۹)، «تهویه و تخلیه دود» (۰٫۰۸۷) و «مقاومت در برابر آتش/انفجار» (۰٫۰۸۵) در رتبه‌های اول قرار گرفتند. تحلیل دسته‌های اصلی نیز بیانگر آن بود که در تونل‌ها سهم طراحی (۴۹٪) بر سایر بخش‌ها غلبه دارد، در حالی که در پل‌ها طراحی و ساخت و اجرا سهمی تقریباً برابر (۴۰٪) دارند. به‌کارگیری روش BWM نیز ضمن تأیید نتایج روش سلسله مراتبی، تغییرات جزئی در رتبه‌بندی ایجاد کرد؛ به‌گونه‌ای که در پل‌ها «ایمنی بلایای طبیعی» (۰٫۰۸۹) و «کنترل کیفیت و بازرسی» (۰٫۰۸۸) اهمیت بیشتری یافتند، و در تونل‌ها «خروج اضطراری و امداد» (۰٫۰۹۳) و «تهویه» (۰٫۰۹۰) در جایگاه نخست قرار گرفتند. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که در پل‌ها باید بر تقویت مقاومت سازه‌ای، کیفیت مصالح و کنترل فرآیند ساخت تمرکز شود، در حالی که در تونل‌ها توجه ویژه به مدیریت شرایط اضطراری، سیستم‌های تهویه و مقاومت در برابر حریق ضروری است. به طور کلی، استفاده همزمان از دو روش روش سلسله مراتبی و BWM موجب افزایش اطمینان و اعتبار نتایج شد و تصویر جامع‌تری از اولویت‌های ایمنی فراهم آورد. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای بازنگری آیین‌نامه‌های ملی، تدوین دستورالعمل‌های تکمیلی در طراحی و ساخت، و همچنین اولویت‌بندی اقدامات بهسازی و تخصیص منابع در پروژه‌های زیرساختی کشور قرار گیرد.

۶- مراجع

-آقایی، صمصام، و ذوالفقاری فر، سید یعقوب. (۲۰۲۴). بررسی فاکتورهای خطر مؤثر بر ایمنی ساخت تونل‌ها. *نشریه عمران و پروژه*، ۶(۲). ۳۷-۴۷.

doi.org/10.22034/cpj.2024.447136.1266

-پاپری فرد، فریبرز، پاپری فرد، بهروز، توکلی، عبدالوحید، و پاپری فرد، گلناز (۱۳۹۶). آسیب‌پذیری تونل‌های جاده‌ای در برابر آتش‌سوزی: مطالعه موردی استان بوشهر. در *کنفرانس بین‌المللی کارشناسان HSE صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، فولاد و سیمان و پروژه‌های عمرانی. شیراز.*

-میرزایی، مهران، و حسینی، سیده شیلان (۱۴۰۲). درس‌آموخته‌ها، چالش‌ها و تجربیات احداث تونل‌های منطقه

دو آزادراه تهران–شمال. در چهاردهمین کنفرانس تونل ایران. تهران.

–کلانتری، امین، و الهی، ناصر (۱۳۹۳). بررسی وضعیت ایمنی تونل‌های راه به روش سلسله‌مراتبی: مطالعه موردی تونل‌های آزادراه خرم‌آباد، پل زال، استان لرستان. *در اولین کنفرانس سراسری توسعه‌محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران. گرگان.*

-Alexander, D. W., & Merkert, R. (2021). Applications of gravity models to evaluate and forecast US international air freight markets post-GFC. *Transport Policy*, *104*, 52–62.

-Azami-Aghdash, S., Gorji, H. A., Shabaninejad, H., & Sadeghi-Bazargani, H. (2017). Policy analysis of road traffic injury prevention in Iran. *Electronic physician*, *9*(1), 3630.

-Choudhary, A., Garg, R. D., Jain, S. S., & Khan, A. B. (2024). Impact of traffic and road infrastructural design variables on road user safety–a systematic literature review. *International Journal of Crashworthiness*, *29*(4), 583–596.

-Chung, D., & Klass, S. (2024). Comprehensive Safety Strategies and Innovations for Infrastructure Resilience in Bridges. *Journal of Student Research,* 13(2). **doi.org/10.47611/jsrhs.v13i2.6772**

-Etesami, S., Raufi, P., & Maniat, M. (2024). New Technology and Primary Energy Consumption in the Transportation Sector: A Critical Discourse Analysis. *Journal of Technology Innovations and Energy*, *3*(4), 15–31.

-Franchini, A., Barake, B., Galasso, C., Moreyra Garlock, M. E., Mulligan, J., Quiel, S., & Torero, J. L. (2024). Integrating fire safety into bridge design is essential for resilient infrastructure. *Nature Communications*, *15*(1), 6629.

-Gündüz, M. G. (2022). *Influence of Ground Motion Scaling Methods on Seismic Response of Highway Bridges* Middle East Technical University (Turkey)].

-Harrison, J., Alejano, L., Bedi, A., Ferrero, A., Lamas, L., Mathier, J., Migliazza, R., Olsson, R., Perucho, A., & Sofianos, A. (2015). Rock engineering design and the evolution of Eurocode 7: The critical six years to 2020. *ISRM Congress.*

-Hosseinian, S. M., & Mirzahossein, H. (2024). Efficiency and safety of traffic networks under the effect of autonomous vehicles. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, *48*(4), 1861–1885.

-Khorasani-Zavareh, D., Mohammadi, R., Khankeh, H. R., Laflamme, L., Bikmoradi, A., & Haglund, B. J. (2009). The requirements and challenges in preventing of road traffic injury in Iran. A qualitative study. *BMC public health*, *9*, 1–9.

-Krug, E. (2012). Decade of action for road safety 2011–2020. *Injury-International Journal of the Care of the Injured*, *43*(1), 6.

-Lee, H. S., Bae, C., & Kim, J. H. (2018). Assessment of reliability levels and adjustment of load-resistance factors using optimization for gravitational loads-governed limit states of the AASHTO LRFD bridge design specifications. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *22*(9), 3462–3472.

-Maniat, M. (2024). Introduction of Discourse Analysis in Transportation: A Framework for Understanding Policy and Practice in Urban Mobility.

-Maniat, M. (2026). Small Narratives of Mobility: A Discourse-Theoretical Framework for Analysing Transport Futures. *Available at SSRN 6581759*.

-Mortazavi, S. M., Sadeghi-Bazargani, H., Charkhabi, S. A., Rasoulzadeha, Y., & Nadrian, H. (2024). A qualitative study on apparent and latent contributing factors to driving errors in Iran. *Scientific Reports*, *14*(1), 21127.

-Rambe, R. M. H., & Nuraini, C. (2024). Analysis of Transportation Infrastructure Development to Support Economic Growth in Batu Bara Regency. *International Conferance of Digital Sciences and Engineering Technology*, *1*(1), 56–67.

-Raufi, P., & Maniat, M. (2024). Transport Policy's Impact on Auto Emissions: A Critical Review. *Available at SSRN 4719317*.

-Soori, H., Ainy, E., Movahedinejad, A., Mahfozphoor, S., Rezazadeh Azari, M., Vafaee, R., Hatamabadi, H., & Masoodeinejad, M. (2009). A practical model of political mapping in road traffic injury in Iran in 2008. *Hakim Journal*, *12*(3), 1–9.

-Tong, J., Zhang, W., Li, C., Yuan, D., Lou, H., Wang, Q., Wang, H., & Zhai, J. (2024). Review of Resilience Evaluation Methods in Operational Highway Tunnel: Analysis of Index Systems and Evaluation Frameworks. *Journal of Advanced Transportation*, *2024*(1), 9273719.

Evaluation and Prioritization of Safety Standards in the Design and Construction of Bridges and Tunnels in Road Projects

Shahab Hassanpour, *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ayatollah Borujerdi University, Borujerd, Iran.*

Aref Amraei Astani, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Boroujerd, Iran.

E-mail: sh.hassanpour@abru.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

Bridge and tunnel safety, as vital elements of transportation infrastructure, requires a systematic evaluation of relevant criteria and sub-criteria. This study, adopting an applied–descriptive approach, employed the AHP and BWM methods to prioritize safety criteria. Two separate questionnaires were designed for bridges and tunnels, and responses were collected from 30 experts in the fields of structural engineering, geotechnics, fire safety, operation, and traffic management. The AHP results, with a consistency ratio (CR) below 0.1, indicated that for bridges, "structural stability" (0.092) and "material quality" (0.090) were the most important criteria, whereas for tunnels, "emergency evacuation and rescue" (0.089), "ventilation and smoke extraction" (0.087), and "fire/explosion resistance" (0.085) ranked highest. At the level of main categories, the share of design was 49% in tunnels and 40% in bridges, construction and execution accounted for 31% and 40% respectively, and operation and maintenance represented 20% in both. The BWM analysis confirmed this pattern, showing that for bridges, "natural hazard safety" (0.089) and "quality control and inspection" (0.088) were most significant, while in tunnels, "emergency evacuation and rescue" (0.093) and "ventilation" (0.090) were top-ranked. These findings highlight that in bridges, emphasis should be placed on structural integrity and material quality, whereas in tunnels, greater attention must be directed toward emergency preparedness and fire management.

Keywords: Bridge safety, Tunnel safety, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM), Analytic Hierarchy Process (AHP), Best–Worst Method (BWM)