

بررسی عوامل تاثیرگذار بر افزایش ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی

مقاله علمی-پژوهشی

مهدی باقری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران
*سید علی ضیائی (نویسنده مسئول)، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
مائه فضلی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sa-ziaee@um.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۸- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

صفحه ۲۷۴-۲۵۹

چکیده

ایمنی عابران پیاده یکی از چالش‌های اساسی حمل‌ونقل شهری است، زیرا گذرگاه‌های عابر به‌عنوان نقاط بحرانی ترافیک بیشترین احتمال وقوع تصادفات را دارند. این پژوهش با هدف شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر ارتقای ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده انجام شده است. پژوهش حاضر به صورت کتابخانه‌ای و پرسشنامه‌ای انجام شده است. برای مدیریت ابهام در قضاوت‌های کارشناسان، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی استفاده گردید. ابتدا با مرور نظام‌مند ۱۲۰ مقاله و گزارش ترافیکی، ۲۶ مؤلفه کلیدی در پنج دسته شامل ویژگی‌های هندسی و طراحی، کنترل و علائم ترافیکی، عملکرد جریان، عوامل رفتاری و انسانی، و شرایط محیطی شناسایی شد. سپس داده‌های حاصل از پرسشنامه‌های مقایسات زوجی فازی با مشارکت ۳۰ کارشناس تحلیل گردید. نتایج نشان داد معیار «شدت تأثیر بر ایمنی» و «امکان اجرا بدون تخریب گذرگاه» بیشترین وزن را داشتند. در میان مؤلفه‌ها، خط‌کشی گذرگاه، رفع موانع دید و نورپردازی به‌عنوان اولویت‌های اصلی معرفی شدند؛ مداخلاتی که سریع، کم‌هزینه و با اثرگذاری مستقیم بر دیدپذیری هستند. در مقابل، عواملی مانند نوع کاربری زمین و حجم ترافیک به دلیل هزینه و دشواری اجرا در اولویت پایین قرار گرفتند. یافته‌ها نشان می‌دهد تمرکز بر اقدامات ساده و کم‌هزینه می‌تواند به‌طور مؤثر ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده را افزایش دهد.

کلیدواژه‌ها: تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده، مدیریت ریسک، مداخلات ترافیکی

۱- مقدمه

ترافیکی تمرکز داشته‌اند، اما یکی از چالش‌های اساسی در این حوزه، وجود عدم قطعیت در داده‌ها و قضاوت‌های کارشناسان است. بسیاری از عوامل مؤثر بر ایمنی ماهیتی کیفی دارند و ارزیابی دقیق آن‌ها نیازمند رویکردی است که بتواند ابهام موجود در تصمیم‌گیری را مدیریت کند. در این پژوهش، با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی FAHP، تلاش شده است تا ضمن شناسایی مؤلفه‌های کلیدی، میزان اهمیت و اولویت هر یک از آن‌ها در ارتقای ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده تعیین شود (Y. Liu et al., 2020)

ایمنی عابران پیاده یکی از چالش‌های اساسی حمل‌ونقل شهری است، زیرا گذرگاه‌های عابر به‌عنوان نقاط تلاقی میان خودروها و افراد، بیشترین احتمال وقوع تصادفات را دارند. افزایش جمعیت شهری و حجم تردد وسایل نقلیه، این مسئله را به یکی از دغدغه‌های اصلی مدیران و برنامه‌ریزان شهری تبدیل کرده است. طراحی غیراستاندارد گذرگاه‌ها، کمبود تجهیزات کنترلی و هشداردهنده، عدم رعایت قوانین عبور و مرور و عوامل رفتاری و فرهنگی از جمله مهم‌ترین دلایل کاهش سطح ایمنی این فضاها محسوب می‌شوند (Haratama & etal, 2024). مطالعات پیشین عمدتاً بر تحلیل‌های آماری تصادفات یا شبیه‌سازی‌های

اهداف اصلی این مطالعه عبارت‌اند از:

-شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده بر اساس مرور ادبیات و نظرات خبرگان
-تدوین ساختار سلسله‌مراتبی شامل معیارها و زیرمعیارهای مرتبط

-تعیین وزن و اهمیت نسبی عوامل با استفاده از روش FAHP
-اولویت‌بندی معیارها و ارائه راهکارهای اجرایی برای ارتقای ایمنی گذرگاه‌ها.

اهمیت این پژوهش در آن است که با مدیریت عدم قطعیت در فرآیند تصمیم‌گیری و اولویت‌بندی علمی عوامل، می‌تواند راهنمایی عملی برای مدیران شهری و مهندسان ترافیک در طراحی و بازنگری گذرگاه‌ها فراهم آورد. نتایج حاصل، علاوه بر کاهش نرخ تصادفات و ارتقای سطح ایمنی، می‌تواند مبنای علمی برای تدوین سیاست‌های کلان

۲- پیشینه تحقیق

ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از موضوعات مهم در حوزه مهندسی ترافیک و برنامه‌ریزی شهری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که طراحی گذرگاه‌ها، ویژگی‌های زیرساختی، شرایط محیطی و رفتار کاربران از جمله عوامل کلیدی در ارتقای سطح ایمنی این فضاها هستند. بیچیچی و همکاران (Bichicchi et al., 2017) با بررسی اثر ویژگی‌های گذرگاه‌های عابر پیاده بر رفتار رانندگان نشان دادند که پیکربندی عناصر جاده‌ای و علائم ترافیکی واکنش‌های متفاوتی در رانندگان ایجاد می‌کند و می‌تواند بر سرعت نزدیک شدن، فاصله تشخیص گذرگاه و مدت زمان تمرکز رانندگان تأثیرگذار باشد. نتایج این مطالعه بیانگر آن است که پیچیدگی گذرگاه‌ها نقش مهمی در کاهش یا افزایش احتمال تصادفات مرگبار دارد. بازیه و همکاران (Basile et al., 2010) روشی برای ارزیابی ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده ارائه کردند که شامل تحلیل ویژگی‌های طراحی، وضعیت دید در روز و شب و شرایط دسترسی است. یافته‌های آن‌ها نشان داد عامل «دید شبانه» بیشترین وزن را در ارزیابی ایمنی دارد (حدود ۴۱ درصد). این مطالعه که بر روی ۲۱۵ گذرگاه در ۱۷ شهر اروپایی انجام شد، اهمیت روشنایی و طراحی مناسب گذرگاه‌ها را در کاهش تصادفات برجسته ساخت. الویک و همکاران (Elvik et al., 2013) در شهر

اسلو نروژ، با تحلیل ۱۵۹ گذرگاه علامت‌گذاری‌شده و ثبت ۳۱۶ تصادف طی پنج سال، دریافتند که عواملی همچون حجم ترافیک، تعداد خطوط عبور، موقعیت مکانی گذرگاه و سرعت خودروها تأثیر مستقیم بر میزان تصادفات دارند. نتایج نشان داد که گذرگاه‌های واقع در تقاطع‌های چهارراهی یا میدان‌ها نسبت به سایر گذرگاه‌ها خطر بیشتری دارند.

پاو و همکاران (Pau et al., 2018) با استفاده از منطق فازی، سیستمی هوشمند برای مدیریت چراغ‌های راهنمایی در محل‌های عبور عابر پیاده طراحی کردند. این سیستم با تنظیم پویا مدت زمان چراغ سبز بر اساس تعداد عابران منتظر و زمان روز، توانست صف خودروها را کاهش داده و ایمنی عابران را افزایش دهد. ماکاروا و همکاران (Makarova et al., 2018) نیز با بهره‌گیری از کنترل فازی در مدیریت چراغ‌های راهنمایی در روسیه نشان دادند که این رویکرد باعث کاهش ۳۰ درصدی تصادفات احتمالی عابران و کاهش ۱۵ تا ۲۵ درصدی صف خودروها می‌شود. جهان‌دیده و میربها (Jahandideh et al., 2019) در ایران به بررسی رفتار ریسک‌پذیری عابران پیاده پرداختند. نتایج مطالعه میدانی آن‌ها در شهر قزوین نشان داد که ویژگی‌های فردی (جنسیت، سن، سرعت حرکت)، شرایط محیطی (وجود سایر عابران متخلف، پارک خودرو در حاشیه خیابان) و شرایط ترافیکی (سرعت خودروها، زمان انتظار) تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار پرخطر عابران دارند. آخادر و آلوکایی (AlKheder & AlRukaibi, 2020) در کویت با ترکیب تحلیل داده‌های ترافیکی و منطق فازی، به بهبود ایمنی عابران و روان‌سازی جریان ترافیک پرداختند.

نتایج نشان داد که استفاده از سیستم‌های هوشمند مبتنی بر منطق فازی می‌تواند زمان تأخیر در تقاطع‌ها را کاهش داده و قابلیت پیاده‌روی شهری را ارتقا دهد. بنداک و همکاران (Bendak et al., 2021) در امارات متحده عربی رفتار عابران در گذرگاه‌های دارای چراغ راهنمایی را بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که عواملی مانند جنسیت، سن، شرایط محیطی و مدت زمان چراغ‌ها بر رفتار عابران تأثیرگذارند. پوئر و همکاران (Pauer et al., 2021) در مجارستان عوامل خطر بالقوه مؤثر بر ایمنی گذرگاه‌ها را شناسایی کردند. نتایج نشان داد که نبود یا ناکافی بودن روشنایی عمومی مهم‌ترین عامل خطر است و عواملی مانند سرعت بالای ترافیک و موانع دید نیز نقش مهمی در افزایش ریسک تصادفات دارند. چاهان و همکاران (Chauhan et al.,

2023) با بهره‌گیری از واحد تعامل چراغ هوشمند برای ارتباط خودکار وسایل نقلیه با عابران، نشان دادند که استفاده از فناوری‌های نوین می‌تواند تصمیم‌گیری در شرایط پیچیده ترافیکی را بهبود بخشد و ایمنی عابران را ارتقا دهد. تروپ و همکاران (Trop et al., 2023) در پژوهشی، به بررسی عوامل مؤثر بر ادراک عابران از ایمنی و راحتی ناشی از نورپردازی فضاهای عمومی پرداختند. یافته‌ها نشان داد شدت روشنایی، یکنواختی توزیع نور و دمای رنگ منابع نوری بیشترین تأثیر را بر افزایش حس امنیت و رضایت عابران دارند. همچنین متغیرهای فردی مانند سن و جنسیت و عوامل فرهنگی و اقلیمی در تفاوت ادراک‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند. چارف و همکاران (Charef et al., 2024) در مراکش به بررسی تأثیر گذرگاه‌های عابر بر ظرفیت و سرعت در تقاطعات گردشی پرداختند. با استفاده از الگوریتم YOLO و شبیه‌سازی در محیط VISSIM، نشان دادند که افزایش فاصله گذرگاه‌ها از تقاطع گردشی (۳۰ تا ۴۰ متر) موجب کاهش تأخیر وسایل نقلیه و بهبود جریان ترافیک می‌شود. یندرا و همکاران (Yendra et al., 2024) با مرور نظام‌مند ۴۱ مطالعه، عوامل مؤثر بر ایمنی عابران در دسترسی به ایستگاه‌های اتوبوس را بررسی کردند. نتایج نشان داد رفتارهای پرخطر عابران، کمبود امکانات ایستگاه‌ها و شرایط محیطی ترافیک از جمله عوامل اصلی مخاطره‌آمیز هستند. در کشورهای کم‌درآمد، فقدان داده‌های تصادفی موجب شده پژوهشگران بر شاخص‌های ایمنی جانشین مانند زمان تا برخورد تمرکز کنند. کیم و همکاران (Kim et al., 2025) در کره جنوبی به تحلیل ایمنی عابران سالمند پرداختند. با استفاده از مدل MaxEnt و داده‌های آماری تصادفات، مناطق آسیب‌پذیر شهر سؤال‌شناسایی شدند. نتایج نشان داد نرخ تصادفات سالمندان بسیار بالاتر از میانگین OECD است و نیاز به سرمایه‌گذاری هدفمند در زیرساخت‌های ایمن برای این گروه وجود دارد. سکیب و همکاران (Sakib et al., 2024) در داکا، بنگلادش، با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین نظارت‌شده، عوامل رفتاری مؤثر بر تصمیم عابران در استفاده از گذرگاه‌ها را شناسایی کردند. نتایج نشان داد روشنایی ناکافی، نبود حفاظ ایمنی و مکان‌یابی نامناسب گذرگاه‌ها از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رفتار عابران هستند. مدل Random Forest با دقت بالاترین عملکرد را در پیش‌بینی رفتار عابران داشت.

مرور منابع نشان می‌دهد که ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده تحت تأثیر عوامل زیرساختی، محیطی و رفتاری قرار دارد و طراحی مناسب گذرگاه‌ها، روشنایی کافی، رفتار کاربران ترافیک و توجه به گروه‌های آسیب‌پذیر از مؤلفه‌های اساسی ارتقای ایمنی‌اند. در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند و رویکردهای نوین مدیریت ترافیک نیز به‌عنوان ابزاری مؤثر در کاهش مخاطرات مطرح شده است. با این حال، پیچیدگی و ماهیت مبهم بسیاری از این عوامل موجب می‌شود روش‌های سنتی تحلیل داده‌ها توانایی کافی برای ارائه ارزیابی دقیق نداشته باشند. از این رو، استفاده از سیستم‌های تصمیم‌گیری فازی، که امکان ترکیب داده‌های کمی و کیفی و کاهش ابهام در قضاوت‌های کارشناسی را فراهم می‌آورند، می‌تواند دقت تحلیل‌ها و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر ایمنی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد.

۳- روش‌شناسی

۳-۱- نوع و رویکرد پژوهش

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی است. رویکرد مطالعه بر مبنای روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام شده و به دلیل وجود عدم قطعیت و ماهیت کیفی برخی معیارهای ارزیابی، از تحلیل سلسله‌مراتبی فازی برای وزن‌دهی و تعیین اهمیت نسبی عوامل مؤثر بر ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده استفاده شده است. این روش امکان تبدیل قضاوت‌های زبانی خبرگان به مقادیر عددی و مدیریت بهتر ابهام را فراهم می‌کند.

۳-۲- جامعه آماری و نمونه پژوهش

در پژوهش حاضر، برای تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، جامعه آماری با دقت و رویکردی هدفمند انتخاب شده است تا از اعتبار و روایی داده‌ها اطمینان حاصل شود. این جامعه شامل متخصصان و کارشناسان ترافیک و ایمنی، مدیران شهری و ترافیکی، فرماندهان و افسران پلیس راهور، و اساتید و پژوهشگران حوزه ایمنی حمل‌ونقل و مدیریت ترافیک است. حجم نمونه آماری با استفاده از رابطه کوکران محاسبه شده است.

$$\frac{Z^2 \times q \times p}{d^2} = n \quad (1)$$

در رابطه (۱) Z عدد نمره از توزیع نرمال، p نسبت برآوردی

$$\frac{1.4^2 \times 0.8 \times 0.2}{0.1^2} = 31/36 \approx 30$$

ویژگی مورد مطالعه در جامعه، q نسبت افرادی که فاقد ویژگی مورد مطالعه‌اند و d میزان خطای مجاز نمونه‌گیری است.

در این پژوهش، سطح اطمینان ۹۰ درصد در نظر گرفته شد که مقدار Z متناظر با آن برابر با ۱/۶۰ است. میزان خطای مجاز نیز ۱۰ درصد در نظر گرفته شد تا برآوردهای حاصل از نمونه، با دقت و اطمینان قابل قبولی منعکس‌کننده ویژگی‌های جامعه آماری باشند. از آنجا که نسبت صفت مورد بررسی در جامعه به‌صورت دقیق در دسترس نبود مقدار ۰/۸ در نظر گرفته شده است.

۳-۱- ابزار گردآوری داده

ابزار جمع‌آوری داده‌ها شامل پرسشنامه مقایسه زوجی فازی است که براساس مقیاس ۹ درجه‌ای ساعتی فازی که در جدول ۱ ارایه شده، طراحی شده است. خبرگان اهمیت هر معیار را به‌صورت زبانی (مانند «کم»، «متوسط»، «زیاد»، «خیلی زیاد») ارزیابی کرده و این مقادیر به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند.

جدول ۱. طیف فازی معادل مقیاس ۹ درجه‌ای ساعتی در روش سلسله مراتبی فازی (Dong et al., 2021)

شاخص‌های زبانی	اعداد مثلثی دلفی فازی	معکوس مثلثی دلفی فازی
اهمیت برابر	(۱ و ۱ و ۱)	(۱ و ۱ و ۱)
بینابین	(۱ و ۲ و ۳)	(۰/۳۳ و ۰/۵ و ۰/۳۳)
اهمیت کم تا متوسط	(۲ و ۳ و ۴)	(۰/۲۵ و ۰/۳۳ و ۰/۵)
بینابین	(۳ و ۴ و ۵)	(۰/۲ و ۰/۲۵ و ۰/۳۳)
اهمیت قوی	(۴ و ۵ و ۶)	(۰/۱۶۶ و ۰/۲ و ۰/۲۵)
بینابین	(۵ و ۶ و ۷)	(۰/۲ و ۰/۱۶۶ و ۰/۱۴۲)
اهمیت خیلی قوی	(۶ و ۷ و ۸)	(۰/۱۶۶ و ۰/۱۴۲ و ۰/۱۲۵)
بینابین	(۷ و ۸ و ۹)	(۰/۱۱ و ۰/۱۴۲ و ۰/۱۱۱)
اهمیت مطلق	(۸ و ۹ و ۹)	(۰/۱۱ و ۰/۱۱۱ و ۰/۱۱۱)

پیش از توزیع پرسشنامه، معیارها بر اساس مرور ادبیات و نظر متخصصان نهایی شده‌اند.

۳-تحلیل سلسله مراتبی فازی

روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی نخستین بار توسط ون لاههون و پدیرتز مطرح شد و سپس مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفت (Laarhoven & PEDRYCZ). پس از آن، نسخه‌ها و رویکردهای گوناگونی برای توسعه سلسله مراتبی فازی معرفی شد. در میان این روش‌ها، تحلیل توسعه‌ای چانگ (Chang, 1996) یکی از ساده‌ترین و کاربردی‌ترین شیوه‌های تحلیل چندمعیاره فازی به شمار می‌آید. این روش بر پایه استفاده از اعداد فازی مثلثی و مقایسه‌های زوجی شکل گرفته است.

در این رویکرد، ماتریس‌های مقایسه زوجی در سطوح مختلف سلسله‌مراتب از طریق اعداد فازی تکمیل می‌شوند و وزن معیارها

از طریق روابط محاسباتی ویژه اعداد فازی تعیین می‌گردد. هر عدد فازی مثلثی با سه پارامتر (l, m, u) مشخص می‌شود که به ترتیب بیانگر کران پایین، مقدار میانه و کران بالای عدد هستند و براساس رابطه ۲ تعریف می‌شود (Zadeh, 1965).

$$\begin{cases} (x-l)/(m-l) \rightarrow l \leq x \leq m \\ (u-x)/(u-m) \rightarrow m \leq x \leq u \\ 0 \rightarrow otherwise \end{cases} \quad (2)$$

گام‌های تحلیل سلسله مراتبی به روش چانگ که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته به قرار زیر است:

گام ۱: در مرحله نخست ماتریس نتایج با استفاده از رابطه ۳ طراحی و نتایج جمع‌آوری شده است.

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{2m} \\ a_{n1} & a_{n2} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

در ماتریس مقایسات زوجی، تمامی عناصر واقع بر قطر اصلی همواره برابر با عدد ۱ هستند. علت این امر آن است که هر عنصر

$$S_{total}^{-1} = \left(\frac{1}{\sum U} \cdot \frac{1}{\sum M} \cdot \frac{1}{\sum L} \right) \quad (6)$$

در ادامه مقدار ستر هر معیار با استفاده از رابطه ۷ محاسبه خواهد شد.

$$M_i = \left(\frac{\sum L_i}{\sum U_{total}} \cdot \frac{\sum M_i}{\sum M_{total}} \cdot \frac{\sum U_i}{\sum L_{total}} \right) \quad (7)$$

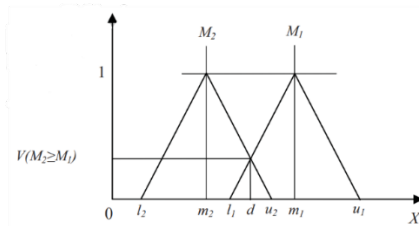
گام ۴: در صورتی که $\tilde{M}_2$ و $\tilde{M}_1$ دو عدد فازی مثلثی باشند، از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$\mu(d) = \begin{cases} 1 \rightarrow \text{if } \dots m_2 \geq m_1 \\ (u_1 - l_1) \\ (u_1 - m_1)(m_2 - l_2) \rightarrow \text{otherwise} \\ 0 \rightarrow \text{if } \dots l_1 > u_2 \end{cases} \quad (8)$$

در رابطه (۸)

$$\mu(d) = V(\tilde{M}_2 = (l_2, m_2, u_2) \geq \tilde{M}_1 = (l_1, m_1, u_1))$$

است و همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، d مختصات بالاترین نقطه تقاطع بین $\tilde{M}_2$ و $\tilde{M}_1$ است.



شکل ۱. درجه امکان $\mu(d) = V(\tilde{M}_2 \geq \tilde{M}_1)$

گام ۵: در این گام وزن غیرنرمال شده مولفه‌ها براساس رابطه ۹ محاسبه خواهد شد.

$$W'_i = \min(V(M_i \geq M_j)) \text{ for } j = 1, 2, \dots, n_j \neq i \quad (9)$$

و در نهایت با استفاده از رابطه ۱۰ وزن نرمال شده مولفه‌ها محاسبه خواهد شد.

$$W_i = \frac{W'_i}{\sum_{i=1}^n W'_i} \quad (10)$$

در این ماتریس بیانگر نسبت اهمیت یک معیار نسبت به معیار دیگر است و در حالتی که مقایسه یک معیار با خودش صورت گیرد، میزان اهمیت آن نسبت به خود، به طور بدیهی برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. از این رو، مقدار تمامی درایه‌های قطر اصلی در کلیه حالات ثابت و برابر با ۱ است. در ماتریس مقایسات زوجی اگر قضاوت i نسبت به j با عدد فازی (L, U, M) نمایش داده شود، قضاوت j نسبت به i برابر است با $(L, 1/U, 1/M, 1)$

گام ۲: در گام دوم پس از ثبت ماتریس مقایسات زوجی، محاسبه وزن فازی در دستور کار قرار خواهد گرفت، در این پژوهش از روش بسط که توسط چانگ ارایه شده است استفاده می‌شود. در این روش در ابتدا مجموع مقادیر هر سطر با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

گام ۳: محاسبه مقدار ترکیبی فازی S_i که با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

در رابطه ۴ $\otimes$ به معنای ضرب گسترده دو عدد فازی است. گام ۳: در مرحله بعد پس از ثبت ماتریس مقایسات زوجی و محاسبه مقدار ترکیبی فازی، محاسبه وزن فازی در دستور کار قرار می‌گیرد. در این پژوهش از روش بسط که توسط چانگ ارایه شده است استفاده می‌شود. در این روش در ابتدا مجموع مقادیر هر سطر با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود. پس از محاسبه شاخص S_i مجموع فازی مقادیر با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$S_{total} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (5)$$

در ادامه نیاز است تا معکوس مجموع کل با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شود.

۳-۲- تعیین گزینه‌ها، معیارها و هدف

این راستا، ابتدا چارچوبی مشخص برای بررسی مطالعات موجود تعیین گردید. واژگان کلیدی مورد استفاده شامل «گذرگاه عابر

برای شناسایی عوامل مؤثر بر ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده، یک مطالعه ساختار یافته بر مبنای مرور مقالات علمی انجام شد. در

به صورت مجزا بررسی شدند:
 بین‌المللی: Google, Web of Science, Scopus
 ScienceDirect و Transportation Research Board (TRB)
 این رویکرد با فراهم کردن بستری برای تحلیل سیستماتیک و ساختارمند مطالعات پیشین، امکان بررسی دقیق و منسجم شواهد موجود را ایجاد کرده است.
 در همین راستا، فلوچارت فرایند شناسایی عوامل مؤثر بر افزایش ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده در شکل ۲ ارائه شده است که مسیر گام‌به‌گام تحلیل و دسته‌بندی این عوامل را به تصویر می‌کشد.

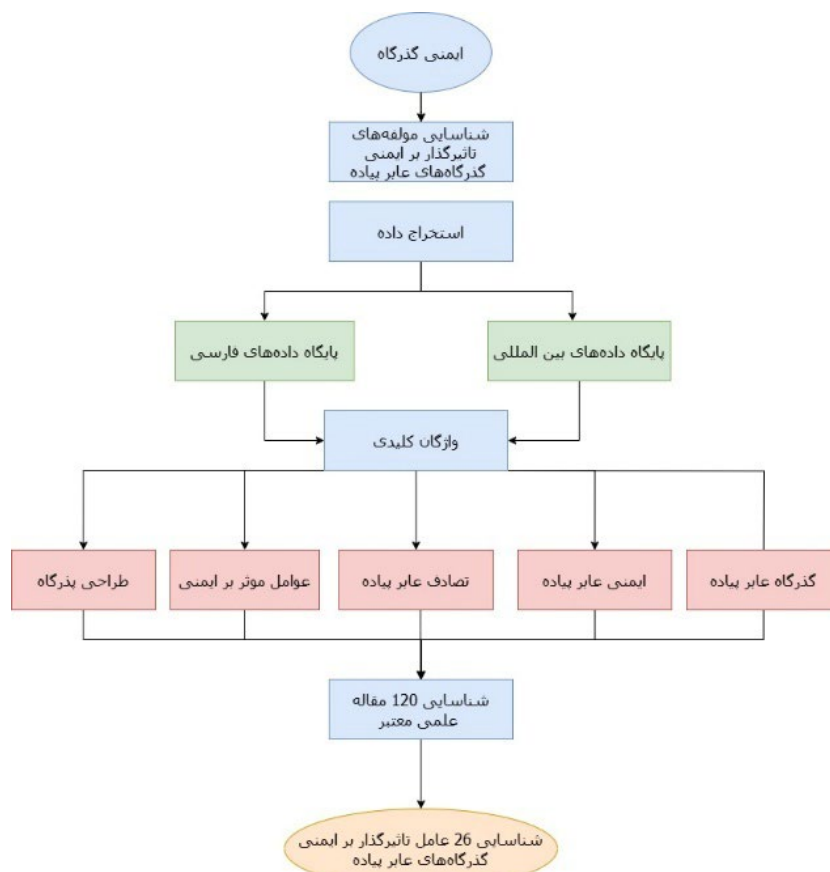
پیاده»، «ایمنی عابر پیاده»، «تصادف عابر پیاده»، «عوامل مؤثر بر ایمنی» و «طراحی گذرگاه» بودند. مقالات مرتبط و معتبر منتشر شده در ده سال اخیر گردآوری و مورد تحلیل قرار گرفتند. به منظور استخراج داده‌ها و بررسی مطالعات، سه سؤال اصلی مورد توجه قرار گرفت:

مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده کدامند؟

این عوامل چگونه دسته‌بندی می‌شوند؟

تأثیر هر یک از عوامل بر شدت و تکرار حوادث تا چه میزان است؟

برای جمع‌آوری مقالات، پایگاه‌های اطلاعاتی بین‌المللی و داخلی



شکل ۲. فلوچارت تحلیل ساختار یافته شناسایی مولفه‌های تاثیرگذار بر افزایش ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده

اصلی سازمان‌دهی شدند.
 الف) ویژگی‌های هندسی و طراحی
 ویژگی‌های هندسی و طراحی گذرگاه شامل مجموعه‌ای از عوامل فیزیکی همچون عرض گذرگاه، وجود یا عدم وجود

بر اساس فلوچارت ارائه‌شده و بررسی دقیق ۱۲۰ مقاله مرتبط، مجموعه‌ای از مولفه‌های مؤثر بر افزایش ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده شناسایی گردید. این مولفه‌ها با توجه به تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم خود بر رفتار رانندگان و عابران، در پنج دسته‌بندی

معیار اهمیت دارد، زیرا گذرگاه‌هایی که در شرایط ترافیکی پرتردد یا پرسرعت قرار دارند، نیازمند مداخلات ایمنی بیشتری هستند (Dumbaugh & Li, 2010; Manthirikul et al., 2023a; Rafe et al., 2025; Zheng & Elefteriadou, 2017).

ه) رفتاری و انسانی

این معیار به الگوهای رفتاری رانندگان و عابران مربوط می‌شود، از جمله میزان رعایت حق تقدم توسط رانندگان، نرخ توقف، نرخ استفاده عابران از گذرگاه، و میزان بروز رفتارهای پرخطر مانند عبور ناگهانی. رفتار انسانی می‌تواند حتی در شرایط وجود زیرساخت مناسب، عاملی تعیین‌کننده در وقوع یا پیشگیری از تصادفات باشد. ارزیابی گزینه‌ها با توجه به این معیار به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا اقدامات آموزشی، فرهنگی یا قانونی لازم را در کنار مداخلات فیزیکی و مهندسی در نظر بگیرند (Anciaes et al., 2020; Manthirikul et al., 2023b; Papadimitriou et al., 2016; Schroeder & Roupail, 2010; Zito et al., 2015).

و) بافت و محیط پیرامونی

بافت و محیط پیرامونی شامل نوع کاربری اراضی مجاور گذرگاه (مسکونی، تجاری، آموزشی)، تراکم عابر در ساعات اوج، پیوستگی یا گسستگی شبکه پیاده، و وجود موانع یا محدودیت‌های فیزیکی است. این عوامل بر میزان تقاضای عبور عابر و سطح خطرپذیری گذرگاه تأثیرگذارند. ارزیابی گزینه‌ها بر اساس این معیار اهمیت دارد، زیرا گذرگاه‌هایی که در محیط‌های با تقاضای بالای عابر یا در مجاورت مراکز حساس مانند مدارس قرار دارند، به اقدامات حفاظتی و کنترلی بیشتری نیاز دارند (Arellana et al., 2022; Dai et al.; Hu et al., 2024; Mansfield et al., 2018; Shehadeh et al., 2024).

پس از شناسایی مولفه‌های تأثیرگذار بر اساس مطالعات ساختار یافته، نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

جزیره میانی برای توقف و استراحت موقت عابران، ارتفاع یا برآمدگی گذرگاه به منظور کاهش سرعت وسایل نقلیه، میدان دید کافی برای رانندگان و عابران در هنگام نزدیک شدن به گذرگاه، و کیفیت و استاندارد بودن رمپ‌های دسترسی برای افراد کم‌توان یا استفاده‌کنندگان از ویلچر است. این عناصر نه تنها بر قابلیت مشاهده و پیش‌بینی رفتار ترافیک تأثیرگذارند، بلکه می‌توانند سرعت وسایل نقلیه را کنترل کرده و سهولت و ایمنی عبور عابران را بهبود بخشند. ارزیابی و بهینه‌سازی این ویژگی‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا تغییرات هوشمندانه در طراحی فیزیکی گذرگاه می‌تواند به طور قابل توجهی احتمال وقوع حوادث را کاهش دهد، سطح آسایش عابران را افزایش دهد و در نهایت محیط شهری ایمن‌تری ایجاد کند (Dumbaugh & Li, 2010; Fu et al., 2023; Loprencipe et al., 2019; Qu et al., 2022).

ب) کنترل ترافیک و علائم

این معیار شامل تجهیزات و علائم کنترل ترافیک مانند خط‌کشی‌ها، تابلوهای هشدار عابر پیاده، چراغ‌های راهنمایی ویژه عابر، و سیستم‌های روشنایی است. وجود تجهیزات مناسب و قابل رؤیت می‌تواند به بهبود آگاهی رانندگان از وجود گذرگاه و ضرورت کاهش سرعت کمک کند. ارزیابی گزینه‌ها بر اساس این معیار، نقش حیاتی در شناسایی نواقص اطلاع‌رسانی و هشداردهی و اتخاذ اقدامات اصلاحی برای ارتقای ایمنی دارد (Arellana et al., 2022; Arhin et al., 2022; Nimac et al., 2022; Rafe et al., 2025).

ج) عملکرد ترافیکی

عملکرد ترافیکی به ویژگی‌های جریان وسایل نقلیه در محدوده گذرگاه مربوط می‌شود، از جمله سرعت صدکی ۸۵، حجم متوسط روزانه تردد (ADT)، تعداد خطوط عبور، و فاصله گذرگاه تا تقاطع‌ها یا موانع دید. این شاخص‌ها نشان می‌دهند که گذرگاه در چه شرایط ترافیکی فعالیت می‌کند و چه میزان تعامل بین وسایل نقلیه و عابران وجود دارد. بررسی گزینه‌ها با این

جدول ۲. عوامل تأثیرگذار بر افزایش ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده

ردیف	دسته‌بندی	مولفه تأثیرگذار بر ایمنی	مراجع
۱	ویژگی‌های هندسی	خط‌کشی گذرگاه (علامت‌گذاری شده)	(Dumbaugh & Li, 2010; Fu et al., 2023; Loprencipe et al., 2019; Qu et al., 2022)
۲		کاهش عرض راه در گذرگاه	(Dumbaugh & Li, 2010; Fu et al., 2023; Loprencipe et al., 2019; Qu et al., 2022)
۳		نورپردازی	(Dumbaugh & Li, 2010; Fu et al., 2023; Loprencipe et al., 2019; Qu et al., 2022)
۴		علائم و خط‌کشی‌های پیشرفته	(Dumbaugh & Li, 2010; Fu et al., 2023; Loprencipe et al., 2019; Qu et al., 2022)

(Dumbaugh & Li, 2010; Fu et al., 2023; Loprencipe et al., 2019; Qu et al., 2022)	مدیریت سرعت	۵	
(Dumbaugh & Li, 2010; Fu et al., 2023; Loprencipe et al., 2019; Qu et al., 2022)	موانع دید (خودرو پارک شده، درخت)	۶	
(Dumbaugh & Li, 2010; Fu et al., 2023; Loprencipe et al., 2019; Qu et al., 2022)	زیرگذرها و روگذرها	۷	
Anciaes et al., 2020; Manthirikul et al., 2023b; Papadimitriou et al., 2016;) (Schroeder & Roupail, 2010; Zito et al., 2015	حواص پرتی (تلفن همراه، عدم توجه)	۸	
Anciaes et al., 2020; Manthirikul et al., 2023b; Papadimitriou et al., 2016;) (Schroeder & Roupail, 2010; Zito et al., 2015	سرعت غیرمجاز و توقف غلط	۹	
Anciaes et al., 2020; Manthirikul et al., 2023b; Papadimitriou et al., 2016;) (Schroeder & Roupail, 2010; Zito et al., 2015	رانندگی تحت تاثیر الکل/مواد	۱۰	رفتاری و انسانی
Anciaes et al., 2020; Manthirikul et al., 2023b; Papadimitriou et al., 2016;) (Schroeder & Roupail, 2010; Zito et al., 2015	عدم حق تقدم دادن	۱۱	
Anciaes et al., 2020; Manthirikul et al., 2023b; Papadimitriou et al., 2016;) (Schroeder & Roupail, 2010; Zito et al., 2015	سرعت پیاده روی و محدودیت های جسمی	۱۲	
Anciaes et al., 2020; Manthirikul et al., 2023b; Papadimitriou et al., 2016;) (Schroeder & Roupail, 2010; Zito et al., 2015	دیدپذیری	۱۳	
Arellana et al., 2022; Dai et al.; Hu et al., 2024; Mansfield et al., 2018;) (Shehadeh et al., 2024	تاریکی هوا/نور کم	۱۴	
Arellana et al., 2022; Dai et al.; Hu et al., 2024; Mansfield et al., 2018;) (Shehadeh et al., 2024	نوع جاده و حجم ترافیک	۱۵	یافت و محیط پیرامونی
Arellana et al., 2022; Dai et al.; Hu et al., 2024; Mansfield et al., 2018;) (Shehadeh et al., 2024	نوع کاربری زمین مجاور	۱۶	
Arellana et al., 2022; Dai et al.; Hu et al., 2024; Mansfield et al., 2018;) (Shehadeh et al., 2024	تراکم عابر در ساعات اوج	۱۷	
Arellana et al., 2022; Dai et al.; Hu et al., 2024; Mansfield et al., 2018;) (Shehadeh et al., 2024	پیوستگی شبکه پیاده و وجود موانع	۱۸	
Dumbaugh & Li, 2010; Manthirikul et al., 2023a; Rafe et al., 2025; Zheng &) (Elefteriadou, 2017	سرعت صدکی ۸۵ وسایل نقلیه	۱۹	
Dumbaugh & Li, 2010; Manthirikul et al., 2023a; Rafe et al., 2025; Zheng &) (Elefteriadou, 2017	تعداد خطوط عبور	۲۰	عملکرد ترافیکی
Dumbaugh & Li, 2010; Manthirikul et al., 2023a; Rafe et al., 2025; Zheng &) (Elefteriadou, 2017	فاصله گذرگاه تا تقاطع	۲۱	
Dumbaugh & Li, 2010; Manthirikul et al., 2023a; Rafe et al., 2025; Zheng &) (Elefteriadou, 2017	حجم وسایل نقلیه	۲۲	
(Arellana et al., 2022; Arhin et al., 2022; Nimac et al., 2022; Rafe et al., 2025)	نصب تابلوهای محدودیت سرعت	۲۳	
(Arellana et al., 2022; Arhin et al., 2022; Nimac et al., 2022; Rafe et al., 2025)	نصب چراغ راهنمایی	۲۴	کنترل ترافیک و علائم
(Arellana et al., 2022; Arhin et al., 2022; Nimac et al., 2022; Rafe et al., 2025)	مخصوص عابر پیاده	۲۵	
(Arellana et al., 2022; Arhin et al., 2022; Nimac et al., 2022; Rafe et al., 2025)	علامت گذاری برجسته	۲۵	
(Arellana et al., 2022; Arhin et al., 2022; Nimac et al., 2022; Rafe et al., 2025)	یا سه بعدی گذرگاه	۲۵	
(Arellana et al., 2022; Arhin et al., 2022; Nimac et al., 2022; Rafe et al., 2025)	سرعت گیر یا برآمدگی ترافیکی	۲۶	

با توجه به گزینه‌های شناسایی شده، ۵ معیار تصمیم‌گیری به شرح زیر شناسایی و ارایه شده است.

الف) شدت تأثیر بر ایمنی

این معیار مهم‌ترین شاخص در ارزیابی مداخلات ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده است و نشان‌دهنده میزان تأثیر هر راهکار در کاهش احتمال تصادف و شدت آسیب‌های ناشی از آن می‌باشد. در فرآیند تصمیم‌گیری برای شناسایی و رتبه‌بندی گزینه‌ها، گزینه‌هایی که بیشترین تأثیر را بر کاهش ریسک تصادف و حفاظت از جان عابران دارند، اولویت بالاتری خواهند داشت. این معیار نقش محوری در مدل سلسله‌مراتبی فازی دارد زیرا هدف اصلی هر مداخله، افزایش ایمنی و کاهش خسارات جانی و مالی است (Basile et al., 2010).

ب) امکان اجرا بدون تخریب گذرگاه

این معیار قابلیت پیاده‌سازی مداخلات با حداقل تغییرات در ساختار موجود گذرگاه را ارزیابی می‌کند. در پروژه‌های شهری با محدودیت زمان، بودجه یا شرایط فیزیکی، مداخلاتی که بدون نیاز به تخریب گسترده قابل اجرا باشند، ارزش تصمیم‌گیری بالاتری دارند. در مدل فازی، این شاخص به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا گزینه‌های عملی و سریع‌الاجرا را شناسایی کرده و در کنار اثربخشی ایمنی، قابلیت پیاده‌سازی واقعی آنها را نیز مدنظر قرار دهند (Hussain et al., 2023).

ج) هزینه اجرای مداخله

هزینه مالی کل مرتبط با خرید تجهیزات، نصب، تغییرات هندسی و نگهداری از دیگر معیارهای مهم در رتبه‌بندی مداخلات ایمنی است. این شاخص به مدیران کمک می‌کند تا راهکارهایی انتخاب کنند که هم از نظر اقتصادی قابل قبول باشند و هم توانایی ایجاد اثر مثبت بر ایمنی را داشته باشند. در فرآیند شناسایی و رتبه‌بندی، ترکیب اثرگذاری ایمنی و هزینه، امکان

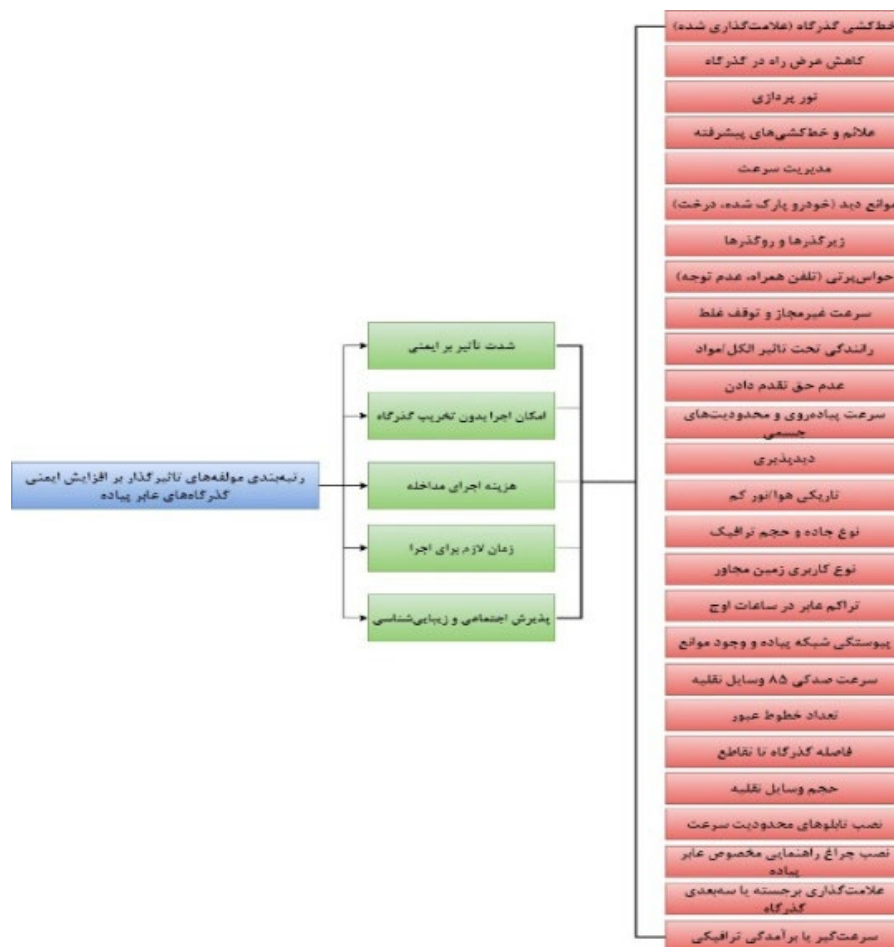
انتخاب راهکارهایی مقرون‌به‌صرفه و اثربخش را فراهم می‌کند (Zegeer et al., 2005).

د) زمان لازم برای اجرا

مدت زمان مورد نیاز برای اجرای مداخله و بهره‌برداری کامل آن از اهمیت بالایی برخوردار است، به‌خصوص در مواقعی که ایمنی فوری عابران در خطر است. مداخلاتی که سریع‌تر قابل اجرا باشند، می‌توانند به سرعت اثرات ایمنی خود را نشان دهند و ریسک تصادف را کاهش دهند. در مدل سلسله‌مراتبی فازی، این معیار به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد تا بین گزینه‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت، تعادلی مناسب برقرار کنند (Tibljaš et al., 2022).

ه) پذیرش اجتماعی و زیبایی‌شناسی

پذیرش اجتماعی و هماهنگی مداخله با محیط شهری و زیبایی بصری گذرگاه نقش مهمی در موفقیت و پایداری راهکارهای ایمنی دارد. حتی گزینه‌هایی که از نظر فنی مؤثر هستند، اگر توسط شهروندان ناپذیرفته یا ناهماهنگ با بافت محیطی باشند، ممکن است در عمل به خوبی اجرا نشوند. این معیار در مدل فازی به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا مداخلاتی انتخاب کنند که هم ایمنی ایجاد کنند و هم مورد قبول جامعه باشند (Deluka-Tibljaš et al., 2022). این معیارها در مرحله نخست با استفاده از نظرات کارشناسان و خبرگان وزن‌دهی شده و در مرحله بعد مولفه‌های تأثیرگذار بر ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده با توجه به این معیارها رتبه‌بندی خواهد شد. پس از مشخص شدن گزینه‌ها، معیارها و هدف، ساختار درخت سلسله‌مراتبی در شکل ۳ ارایه شده است.



شکل ۳. ساختار درخت سلسله مراتبی پژوهش

٤-تحليل نتائج

زیر حاصل شده است. مقادیر S_i و M_i با توجه به میانگین نظرات کارشناسان محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است.

فرم‌های نظرسنجی به روش مقایسات زوجی پس از طراحی براساس ساختار درخت سلسله مراتبی در اختیار کارشناسان و صاحب‌نظران قرار گرفت و پس از تکمیل و تحلیل، نتایج به شرح

جدول ۳. بردار بسط مرکب مرکزی معیارهای تصمیم

M_i			S_i			معیار
۰/۲۵	۰/۴۴	۰/۷۵	۱۲/۵۰	۱۶/۵۰	۲۰/۵۰	شدت تاثیر بر ایمنی
۰/۱۱	۰/۲۲	۰/۴۰	۵/۷۰	۸/۲۵	۱۰/۸۳	امکان اجرا بدون تخریب گذرگاه
۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۲۱	۲/۹۲	۴/۰۳	۵/۷۵	هزینه اجرای مداخله
۰/۰۷	۰/۱۳	۰/۲۵	۳/۵۱	۴/۸۶	۶/۷۵	زمان لازم برای اجرا
۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۱۹	۲/۵۴	۳/۴۰	۵/۱۷	پذیرش اجتماعی و زیبایی شناسی
			۲۷/۱۷	۳۷/۰۴	۴۹/۰۰	S_{total}
			۰/۰۳۶	۰/۰۲۷	۰/۰۲۰	S_{total}^{-1}

پس از نرمال سازی وزن نهایی معیارهای تصمیم در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. وزن نهایی معیارهای تصمیم

معیار	شدن تأثیر بر ایمنی	گذرگاه	امکان اجرا بدون تغییر	هزینه اجرای مداخله	زمان لازم برای اجرا	پذیرش اجتماعی و زیبایی‌شناسی
W_i	۰/۵۸۴	۰/۲۵۱	۰/۰۵۲	۰/۰۷۶	۰/۰۳۵	

سهم بیشتری در افزایش سطح ایمنی داشته و باید در فرآیند تصمیم‌گیری و تدوین سیاست‌های ایمنی شهری مدنظر قرار گیرند.

پس از تعیین وزن هر یک از مولفه‌ها بر اساس معیارهای مختلف و ترکیب آن با وزن معیارها، امتیاز و رتبه نهایی مولفه‌ها محاسبه و در جدول ۵ ارائه شده است. این رتبه‌بندی تصویری جامع از میزان اهمیت و تأثیرگذاری هر مولفه در ارتقای ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد کدام مولفه‌ها

جدول ۵. رتبه‌بندی مولفه‌های تأثیرگذار بر افزایش ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده

رتبه	وزن نهایی	مولفه
۱	۰/۰۵۹۴	خط‌کشی گذرگاه (علامت‌گذاری شده)
۵	۰/۰۴۳۹	کاهش عرض راه در گذرگاه
۳	۰/۰۴۹۸	نورپردازی
۱۵	۰/۰۳۷۵	علائم و خط‌کشی‌های پیشرفته
۴	۰/۰۴۶۰	مدیریت سرعت
۲	۰/۰۵۰۰	موانع دید (خودرو پارک شده، درخت)
۹	۰/۰۳۹۹	زیرگذرها و روگذرها
۸	۰/۰۴۰۳	حواص پرتی (تلفن همراه، عدم توجه)
۷	۰/۰۴۱۰	سرعت غیرمجاز و توقف غلط
۱۸	۰/۰۳۴۹	رانندگی تحت تأثیر الکل/مواد
۲۲	۰/۰۳۰۲	عدم حق تقدم دادن
۱۹	۰/۰۳۳۸	سرعت پیاده‌روی و محدودیت‌های جسمی
۱۷	۰/۰۳۵۲	دیدپذیری
۶	۰/۰۴۳۴	تاریکی هوا/نور کم
۲۵	۰/۰۲۷۰	نوع جاده و حجم ترافیک
۲۶	۰/۰۲۵۶	نوع کاربری زمین مجاور
۲۱	۰/۰۳۲۹	تراکم عابر در ساعات اوج

۱۲	۰/۰۳۸۲	پیوستگی شبکه پیاده و وجود موانع
۱۰	۰/۰۳۹۴	سرعت صدکی ۸۵ وسایل نقلیه
۱۶	۰/۰۳۵۴	تعداد خطوط عبور
۲۳	۰/۰۲۹۴	فاصله گذرگاه تا تقاطع
۱۱	۰/۰۳۹۰	حجم وسایل نقلیه
۱۳	۰/۰۳۸۱	نصب تابلوهای محدودیت سرعت
۲۴	۰/۰۲۸۶	نصب چراغ راهنمایی مخصوص عابر پیاده
۲۰	۰/۰۳۳۷	علامت‌گذاری برجسته یا سه‌بعدی گذرگاه
۱۴	۰/۰۳۷۷	سرعت‌گیر یا برآمدگی ترافیکی

پس از رتبه‌بندی مولفه‌های تأثیرگذار بر افزایش ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده ۶ سناریو مداخله طراحی و در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. سناریوهای مداخله در افزایش ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده

عنوان سناریو	مولفه‌های کلیدی
مداخلات سریع و کم‌هزینه	خط‌کشی گذرگاه، رفع موانع دید، نورپردازی، مدیریت سرعت
مداخلات میان‌مدت	زیرگذرها و روگذرها، سرعت صدکی ۸۵ وسایل نقلیه، حجم وسایل نقلیه، پیوستگی شبکه پیاده
مداخلات بلندمدت و زیرساختی	نوع کاربری زمین مجاور، نوع جاده و حجم ترافیک، فاصله گذرگاه تا تقاطع
مداخلات مبتنی بر فناوری هوشمند	تابلوهای محدودیت سرعت هوشمند، چراغ راهنمایی مخصوص عابر، سرعت‌گیر هوشمند
داخلات آموزشی و فرهنگ‌سازی	عدم حق تقدم دادن، رانندگی تحت تأثیر الکل/مواد، حواس‌پرتی رانندگان،
مداخلات ترکیبی شهری	پیوستگی شبکه پیاده، فاصله گذرگاه تا تقاطع، نوع کاربری زمین، نورپردازی و دیدپذیری

۵- نتیجه‌گیری

غلط که بر تصمیم‌گیری و رفتار کاربران جاده اثر دارند؛ و در نهایت بافت و محیط پیرامونی شامل نور کم یا تاریکی هوا، نوع جاده و کاربری زمین مجاور که به صورت غیرمستقیم ایمنی گذرگاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. پنج معیار اصلی برای اولویت‌بندی مولفه‌های ایمنی شناسایی شده‌اند که وزن هر یک بیانگر اهمیت آن از دیدگاه کارشناسان و خبرگان است و در تحلیل نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شدت تأثیر بر ایمنی با وزن ۰/۵۸۴ بالاترین اولویت را دارد و میزان تأثیر مستقیم هر راهکار بر کاهش تصادفات را نشان می‌دهد. امکان اجرا بدون تخریب گذرگاه با وزن ۰/۲۵۱ دومین معیار مهم است و قابلیت اجرای سریع و کم‌هزینه یک راهکار را مشخص می‌کند. زمان لازم برای اجرا با وزن ۰/۰۷۶ در جایگاه سوم قرار گرفته و بر سرعت پیاده‌سازی اقدامات تأکید دارد. هزینه اجرای مداخله

نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر ارائه شده است. الف) بر اساس مطالعات انجام شده در پایان‌نامه، ۲۶ مولفه کلیدی تأثیرگذار بر ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده شناسایی و در پنج دسته‌بندی اصلی قرار گرفته‌اند: ویژگی‌های هندسی و طراحی شامل عواملی مانند خط‌کشی و علامت‌گذاری، نورپردازی، مدیریت سرعت و وجود موانع دید که به طور مستقیم بر دید رانندگان و عابران تأثیر می‌گذارند؛ کنترل ترافیک و علائم مانند نصب تابلوهای محدودیت سرعت و چراغ‌های مخصوص عابر پیاده که با ایجاد هشدارهای بصری، رفتار رانندگان را کنترل می‌کنند؛ عملکرد ترافیکی شامل سرعت وسایل نقلیه، تعداد خطوط عبور و حجم ترافیک که شرایط ترافیکی گذرگاه و میزان ریسک را مشخص می‌سازد؛ عوامل رفتاری و انسانی مانند حواس‌پرتی، عدم رعایت حق تقدم، سرعت غیرمجاز و توقف

با وزن ۰/۰۲۷۰ در رتبه ۲۵ است، زیرا تغییر نوع جاده یا مدیریت حجم ترافیک نیازمند اصلاحات زیرساختی گسترده و هزینه بالاست. نصب چراغ راهنمایی مخصوص عابر پیاده با وزن ۰/۰۲۸۶ در رتبه ۲۴ قرار گرفته و به دلیل هزینه بالا و پیچیدگی اجرایی از اولویت پایینی برخوردار است. همچنین، فاصله گذرگاه تا تقاطع با وزن ۰/۰۲۹۴ در رتبه ۲۳ قرار دارد و تغییر آن مستلزم بازطراحی شهری و اصلاحات زیرساختی با صرف زمان و هزینه قابل توجه است.

ه) بر اساس نتایج رتبه‌بندی، شش سناریوی مداخله‌ای برای افزایش ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده طراحی شده است. مداخلات سریع و کم‌هزینه بر مولفه‌های با اولویت بالا مانند خط‌کشی، نورپردازی و رفع موانع دید تمرکز دارد و این اقدامات به سرعت قابل اجرا بوده و بیشترین تأثیر را بر ایمنی دارند. مداخلات میان‌مدت شامل اقداماتی با هزینه و زمان متوسط مانند بهبود زیرساخت عبور عابر، کنترل سرعت و پیوستگی مسیرهای پیاده است. مداخلات بلندمدت و زیرساختی بر پروژه‌های بزرگ و پرهزینه مانند احداث زیرگذرها و روگذرها و اصلاح شبکه معابر شهری تمرکز دارد که تأثیر پایداری بر ایمنی ایجاد می‌کنند. مداخلات مبتنی بر فناوری هوشمند با استفاده از فناوری‌هایی مانند تابلوهای محدودیت سرعت هوشمند و چراغ‌های راهنمایی مجهز به حسگر حرکت، ایمنی را به صورت لحظه‌ای افزایش می‌دهند. مداخلات آموزشی و فرهنگ‌سازی بر آموزش و اطلاع‌رسانی به عابران و رانندگان برای اصلاح رفتارهای پرخطر و رعایت قوانین تمرکز دارد. در نهایت، مداخلات ترکیبی شهری تلفیقی از زیرساخت، فناوری و آموزش را به کار می‌گیرد تا ایمنی و کیفیت فضای شهری به صورت همزمان ارتقا یابد.

با وزن ۰/۰۵۲ در رتبه چهارم قرار دارد و مسائل مالی و بودجه‌ای مرتبط با هر راهکار را پوشش می‌دهد. در نهایت، پذیرش اجتماعی و زیبایی‌شناسی با وزن ۰/۰۳۵ کمترین اهمیت را دارد و نشان می‌دهد که کارشناسان نسبت به سایر معیارها، اولویت پایین‌تری برای این عامل قائل شده‌اند.

ج) بر اساس رتبه‌بندی نهایی، برخی مولفه‌ها بیشترین تأثیر را بر افزایش ایمنی گذرگاه‌های عابر پیاده دارند و باید در اولویت برنامه‌ریزی و اجرا قرار گیرند. این مولفه‌ها به دلیل اثرگذاری بالا، قابلیت اجرا مناسب و هزینه کم به‌عنوان مؤثرترین راهکارهای ایمن‌سازی شناسایی شده‌اند. خط‌کشی گذرگاه (علامت‌گذاری شده) با وزن نهایی ۰/۰۵۹۴ بالاترین امتیاز را کسب کرده است، زیرا با هزینه و زمان کم، دیدپذیری و نظم‌بخشی عبور و مرور را به‌طور مستقیم بهبود می‌بخشد. موانع دید (خودرو پارک شده، درخت) با وزن ۰/۰۵۰۰ در رتبه دوم قرار دارد و حذف این موانع به‌طور مستقیم توانایی رانندگان و عابران برای مشاهده یکدیگر را افزایش می‌دهد. نورپردازی با وزن ۰/۰۴۹۸ رتبه سوم را کسب کرده و تأمین روشنایی مناسب به ویژه در ساعات شب، دیدپذیری عابران را بهبود می‌بخشد و از وقوع تصادفات جلوگیری می‌کند. مدیریت سرعت با وزن ۰/۰۴۶۰ در رتبه چهارم قرار دارد و کنترل سرعت وسایل نقلیه به‌عنوان مهم‌ترین عامل کاهش شدت جراحات در صورت بروز تصادف عمل می‌کند.

د) برخی مولفه‌ها کمترین تأثیر را در برنامه‌ریزی‌های ایمن‌سازی گذرگاه‌های عابر پیاده دارند که این امر عمدتاً به دلیل دشواری اجرا، هزینه بالا و تأثیر غیرمستقیم بر ایمنی است. نوع کاربری زمین مجاور با وزن نهایی ۰/۰۲۵۶ در رتبه ۲۶ قرار دارد و به دلیل زمان‌بر بودن تغییر کاربری و اثرگذاری غیرمستقیم بر ایمنی، پایین‌ترین اولویت را دارد. نوع جاده و حجم ترافیک

۶- مراجع

- Arellana, J., Fernández, S., Figueroa, M., & Cantillo, V. (2022). Analyzing pedestrian behavior when crossing urban roads by combining RP and SP data. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 85, 259-275. doi.org/10.1016/j.trf.2022.01.012
- Arhin, S. A., Gatiba, A., Anderson, M., Manandhar, B., Ribbisso, M., & Acheampong, E. (2022). Effectiveness of modified pedestrian crossing signs in an urban area. *Journal of Traffic and*

- AlKheder, S., & AlRukaibi, F. (2020). Enhancing pedestrian safety, walkability and traffic flow with fuzzy logic. *Science of the Total Environment*, 701, 134454.
- Anciaes, P., Di Guardo, G., & Jones, P. (2020). Factors explaining driver yielding behaviour towards pedestrians at courtesy crossings. *Transportation research part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 73, 453-469. doi.org/10.1016/j.trf.2020.07.006

- Haratama, K. R., & etal. (2024). Improvement on Street Safety using In-Street Pedestrian Crossing Sign: A Literature Review. *International Joint Conference on Science and Engineering*.
- Hu, Y., Chen, L., & Zhao, Z. (2024). How does street environment affect pedestrian crash risks? A link-level analysis using street view image-based pedestrian exposure measurement. *Accident Analysis & Prevention*, 205, 107682. doi.org/10.1016/j.aap.2024.107682
- Hussain, Q., Alhajyaseen, W. K., Kharbeche, M., & Almallah, M. (2023). Safer pedestrian crossing facilities on low-speed roads: Comparison of innovative treatments. *Accident Analysis & Prevention*, 180, 106908.
- Jahandideh, Z., Mirbaha, B., & Rassafi, A. A. (2019). Identifying factors affecting pedestrians' crossing decisions at intersections in Iran. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer*,
- Kim, S., Choi, S., & Kim, B. H. (2025). Analysis of factors affecting pedestrian safety for the elderly and identification of vulnerable areas in Seoul. *Accident Analysis & Prevention*, 211, 107878.
- Laarhoven, P., & PEDRYCZ, W. A fuzzy extension of Saaty's priority theory, *Fuzzy Sets and Systems*, 11, 1-3.
- Loprencipe, G., Moretti, L., Pantuso, A., & Banfi, E. (2019). Raised pedestrian crossings: Analysis of their characteristics on a road network and geometric sizing proposal. *Applied Sciences*, 9(14), 2844.
- Makarova, I., Shubenkova, K., Mavrin, V., & Buyvol, P. (2018). Improving safety on the crosswalks with the use of fuzzy logic. *Transport Problems*, 13.
- Mansfield, T. J., Peck, D., Morgan, D., McCann, B., & Teicher, P. (2018). The effects of roadway and built environment characteristics on pedestrian fatality risk: A national assessment at the neighborhood scale. *Accident Analysis & Prevention*, 121, 166-176.
- Manthirikul, S., Jain, U., & Marisamynathan, S. (2023a). Pedestrian delay models for compliant & non-compliant behaviour at signalized midblock crosswalks under mixed traffic conditions. *IATSS Research*, 47(3), 401-415. doi.org/10.1016/j.iatssr.2023.08.003
- Manthirikul, S., Jain, U., & Marisamynathan, S. (2023b). Pedestrian waiting delay at signalized midblock crosswalks under mixed traffic conditions. *Journal of transportation engineering, Part A: Systems*, 149(11), 04023107.
- Nimac, P., Krpič, A., Batagelj, B., & Gams, A. (2022). Pedestrian traffic light control with crosswalk FMCW radar and group tracking algorithm. *Sensors*, 22(5), 1754.
- Papadimitriou, E., Lassarre, S., & Yannis, G. (2016). Introducing human factors in pedestrian crossing behaviour models. *Transportation Engineering (English Edition)*, 9(1), 21-32. doi.org/10.1016/j.jtte.2021.04.001
- Basile, O., Persia, L., & Usami, D. S. (2010). A methodology to assess pedestrian crossing safety. *European Transport Research Review*, 2(3), 129-137.
- Bendak, S., Alnaqbi, A. M., Alzarooni, M. Y., Aljanaahi, S. M., & Alsuwaidi, S. J. (2021). Factors affecting pedestrian behaviors at signalized crosswalks: An empirical study. *Journal of Safety Research*, 76, 269-275.
- Bichicchi, A., Mazzotta, F., Lantieri, C., Vignali, V., Simone, A., Dondi, G., & Costa, M. (2017). The influence of pedestrian crossings features on driving behavior and road safety. In *Transport Infrastructure and Systems*, CRC Press, 741-746.
- Chang, D. Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649-655.
- Charef, A., Jarir, Z., & Quafafou, M. (2024). The impact of pedestrian crossings on speed patterns and roundabout capacity. *International Journal of Scientific Research and Innovative Studies*, 3(1), 13-20.
- Chauhan, V., Chang, C.-M., Javanmardi, E., Nakazato, J., Lin, P., Igarashi, T., & Tsukada, M. (2023). Fostering fuzzy logic in enhancing pedestrian safety: Harnessing smart pole interaction unit for autonomous vehicle-to-pedestrian communication and decision optimization. *Electronics*, 12(20), 4207.
- Dai, D., Taquechel, E., Steward, J., & Strasser, S. (2021). The Impact of Built Environment on Pedestrian Crashes and the Identification of Crash Clusters on an Urban University Campus. *A Peer-Reviewed Professional Journal*.
- Deluka-Tibljša, A., Šurdonja, S., Ištoka Otković, I., & Campisi, T. (2022). Child-pedestrian traffic safety at crosswalks—literature review. *Sustainability*, 14(3), 1142.
- Dong, J., Wan, S., & Chen, S.-M. (2021). Fuzzy best-worst method based on triangular fuzzy numbers for multi-criteria decision-making. *Information Sciences*, 547, 1080-1104.
- Dumbaugh, E., & Li, W. (2010). Designing for the safety of pedestrians, cyclists, and motorists in urban environments. *Journal of the American Planning Association*, 77(1), 69-88.
- Elvik, R., Sørensen, M. W., & Nævestad, T.-O. (2013). Factors influencing safety in a sample of marked pedestrian crossings selected for safety inspections in the city of Oslo. *Accident Analysis & Prevention*, 59, 64-70.
- Fu, T., Xie, S., Li, R., Wang, J., Zhang, L., Sobhani, A., & Fang, S. e. (2023). Investigating pedestrian crossing patterns at crossing locations based on trajectory data collected by UAV. *Journal of Advanced Transportation*, 2023(1), 5529970.

- Shehadeh, E. A., Al-Bayatti, A. H., & Bingöl, M. A. (2024). Effect of roadway environment characteristics on pedestrian safety at signalised intersections in Amman. *Urban, Planning and Transport Research*, 12(1), 2317766.
- Trop, T., Shoshany Tavory, S., & Portnov, B. A. (2023). Factors affecting pedestrians' perceptions of safety, comfort, and pleasantness induced by public space lighting: A systematic literature review. *Environment and Behavior*, 55(1-2), 3-46.
- Y. Liu, C. M. Eckert, & Earl, a. C. (2020). A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. *Expert Systems with Applications*, 161.
- Yendra, D., Haworth, N., & Watson-Brown, N. (2024). A comparison of factors influencing the safety of pedestrians accessing bus stops in countries of differing income levels. *Accident Analysis & Prevention*, 207, 107725.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
- Zegeer, C. V., Stewart, J. R., Huang, H. H., Lagerwey, P. A., Feaganes, J. R., & Campbell, B. (2005). Safety effects of marked versus unmarked crosswalks at uncontrolled locations final report and recommended guidelines.
- Zheng, Y., & Elefteriadou, L. (2017). A model of pedestrian delay at unsignalized intersections in urban networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 100, 138-155.
doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.018
- Zito, G. A., Cazzoli, D., Scheffler, L., Jäger, M., Müri, R. M., Mosimann, U. P., Nyffeler, T., Mast, F. W., & Nef, T. (2015). Street crossing behavior in younger and older pedestrians: an eye-and head-tracking study. *BMC Geriatrics*, 15(1), 176.
- Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 36, 69-82. **doi.org/10.1016/j.trf.2015.11.003**
- Pau, G., Campisi, T., Canale, A., Severino, A., Collotta, M., & Tesoriere, G. (2018). Smart pedestrian crossing management at traffic light junctions through a fuzzy-based approach. *Future Internet*, 10(2), 15.
- Pauer, G., Krizsik, N., Szigeti, S., & Hamza, Z. (2021). Identification And Analysis Of Potential Risk Factors Influencing The Road Safety Level At Designated Pedestrian Crossings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Qu, D., Li, H., Liu, H., Wang, S., & Zhang, K. (2022). Crosswalk safety warning system for pedestrians to cross the street intelligently. *Sustainability*, 14(16), 10223.
- Rafe, A., Singleton, P. A., Boyer, S., & Mekker, M. (2025). Pedestrian crossing behaviors at signalized intersections in Utah: Factors affecting spatial and temporal violations. *International Journal of Transportation Science and Technology*.
doi.org/10.1016/j.ijtst.2024.12.005
- Sakib, N., Paul, T., Ahmed, M. T., Al Momin, K., & Barua, S. (2024). Investigating factors influencing pedestrian crosswalk usage behavior in Dhaka city using supervised machine learning techniques. *Multimodal Transportation*, 3(1), 100108.
- Schroeder, B. J., & Roupail, N. M. (2010). Mixed-priority pedestrian delay models at single-lane roundabouts. *Transportation Research Record*, 2182(1), 129-138.

Investigating Factors Influencing the Enhancement of Pedestrian Crosswalk Safety Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)

*Mehdi Bagheri, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering,
Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
Seyed Ali Ziaee, Associate Professor, Department of Civil Engineering,
Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
Maede Fazli, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering,
Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University of Sabsevar, Iran.*

E-mail: sa-ziaee@um.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

Pedestrian safety is one of the fundamental challenges of urban transportation, as pedestrian crossings are considered critical traffic points with the highest likelihood of accidents. This study aims to identify and prioritize the factors influencing the improvement of pedestrian crossing safety. The research was conducted using a library-based review and a questionnaire survey. To manage uncertainty in expert judgments, the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) was employed. First, through a systematic review of 120 articles and traffic reports, 26 key components were identified and classified into five categories: geometric and design characteristics, traffic control and signage, traffic flow performance, behavioral and human factors, and environmental conditions. Subsequently, data obtained from fuzzy pairwise comparison questionnaires completed by 30 experts were analyzed. The results indicated that the criteria “severity of impact on safety” and “feasibility of implementation without physical disruption of the crossing” had the highest weights. Among the components, crosswalk markings, removal of sight obstructions, and lighting were identified as top priorities—interventions that are rapid, low-cost, and have a direct impact on visibility. In contrast, factors such as land-use type and traffic volume were ranked lower due to their high costs and implementation difficulties. The findings demonstrate that focusing on simple and low-cost measures can effectively enhance pedestrian crossing safety.

Keywords: Fuzzy Analytic Hierarchy Process, Pedestrian Crossing Safety, Risk Management, Traffic Interventions