

اولویت‌بندی اصلاح نقاط حادثه‌خیز جهت رفع حوادث جاده‌ای با رویکرد اقتصادی (مطالعه موردی: محور اراک-سلفچگان)

مقاله علمی - پژوهشی

کامیار صابری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمود عامری، استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
برات مجردی، دانشیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*محمدرضا خاکباز (نویسنده مسئول)، دانشجوی دکتری، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران،

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: khakbaz9090@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۰

صفحه ۱۳۰-۱۱۵

چکیده

تصادفات جاده‌ای به عنوان چالشی اساسی در سیستم‌های حمل‌ونقل جهانی مطرح بوده و در کشورهای در حال توسعه، نقاط حادثه‌خیز سهم قابل توجهی در افزایش تلفات و خسارات اقتصادی دارند. این پژوهش با هدف شناسایی و اولویت‌بندی نقاط پرخطر در محور اراک-سلفچگان، از تلفیق مدل‌سازی بیزی و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS استفاده نموده است. با بهره‌گیری از داده‌های دو ساله تصادفات، ویژگی‌های هندسی جاده، شرایط جوی و عوامل ترافیکی، مدل بیزی برای ارزیابی ریسک تصادفات در قطعات مختلف جاده به کار گرفته شد و سپس اولویت‌بندی نقاط بحرانی بر اساس معیارهای ایمنی و توجیه اقتصادی انجام پذیرفت. یافته‌های کلیدی نشان می‌دهد که تراکم تقاطعات، مجاورت با مناطق مسکونی یا صنعتی و بی‌توجهی رانندگان از مهم‌ترین عوامل خطر هستند. در راستای اولویت‌بندی نقاط حادثه‌خیز، محور مورد مطالعه به ۱۵ قطعه تقسیم شد. قطعات ۹، ۱۵، ۱-۲ و ۱۱ به عنوان اولویت‌های اصلی برای مداخلات ایمنی شناسایی شدند. پدیده‌هایی مانند مه‌گرفتگی، خطر تصادفات را تشدید می‌کنند. این مطالعه بر ضرورت ایجاد بانک اطلاعاتی یکپارچه تصادفات، تلفیق تحلیل هزینه-فایده در فرآیند تصمیم‌گیری و اجرای اقدامات اصلاحی هدفمند تأکید دارد. با ترکیب روش‌های پیشرفته آماری و چندمعیاره، این پژوهش چارچوبی علمی برای ارتقای ایمنی جاده‌ها ارائه می‌دهد که قابلیت تعمیم به سایر محورهای پرخطر را دارا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تصادفات جاده‌ای، نقاط پر حادثه، ایمنی، پیش‌بینی تصادفات

۱- مقدمه

بنابراین، شناسایی و اصلاح این نقاط به عنوان اقدامی استراتژیک، می‌تواند نقش مهمی در کاهش هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم تصادفات ایفا کند. بررسی‌های بین‌المللی نشان داده‌اند که رابطه‌ای قوی بین ویژگی‌های هندسی جاده، کیفیت سطوح راه، حجم ترافیک، عوامل محیطی و رفتار کاربران جاده با بروز

افزایش روزافزون تلفات و خسارات ناشی از تصادفات جاده‌ای، یکی از چالش‌های اساسی نظام‌های حمل‌ونقل در سراسر جهان محسوب می‌شود. آمارها حاکی از آن است که در کشورهای در حال توسعه، سهم بزرگی از بار مالی و اجتماعی تصادفات، ناشی از نقاط حادثه‌خیز و اصلاح‌نشده در شبکه‌های جاده‌ای است.

معادل ۰,۵۹ گزارش شده است. برای محورهای استان قزوین نیز، این مقادیر به ترتیب ۰,۹۴ و ۰,۳۳ بوده‌اند که نشان‌دهنده عملکرد دقیق‌تر مدل در این ناحیه است (Shamsashtiany & Ameri, 2018).

علاوه بر تحلیل علل وقوع تصادف، ارزیابی اقتصادی اقدامات اصلاحی نیز از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است. چرا که تصمیم‌گیری در خصوص سرمایه‌گذاری در حوزه ایمنی جاده‌ها، مستلزم در نظر گرفتن بهره‌وری هزینه‌ها، میزان کاهش تصادفات و بهبود شاخص‌های ایمنی است. در این راستا، تلفیق داده‌های مربوط به فراوانی تصادفات، شدت تلفات، ویژگی‌های هندسی و محیطی راه‌ها، و تحلیل‌های آماری و چندمتغیره، زمینه‌ساز طراحی برنامه‌های هدفمند، علمی و بهینه برای ارتقای ایمنی راه‌ها می‌گردد. این امر در شرایطی صورت می‌گیرد که پژوهشگران با چالش‌هایی چون نواقص در داده‌های ثبت‌شده، تفاوت‌های منطقه‌ای، عدم قطعیت در مدل‌سازی، و ضرورت انجام اعتبارسنجی‌های گسترده در محیط‌های واقعی مواجه‌اند. از این‌رو، تمرکز تحقیقات جدید بر توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر، بهره‌گیری از روش‌های نوین مانند یادگیری ماشین و الگوریتم‌های پیشرفته تحلیل داده است تا بتوان رفتارهای خطرناک رانندگی، نقاط حادثه‌خیز و عوامل مؤثر بر بروز تصادفات را با دقت بیشتری شناسایی کرده و در نتیجه، راهکارهایی اثربخش‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر برای کاهش تصادفات و بهبود ایمنی ترافیکی ارائه داد (Daniels, 2019; Sarigiannis et al., 2024; Shah et al., 2017; Rezapour & Ksaibati, 2021).

پژوهش حاضر با هدف شناسایی و اولویت‌بندی نقاط حادثه‌خیز در محور پرتردد اراک-سلفچگان، در پی آن است تا با بهره‌گیری از رویکردی چندبعدی، مدلی جامع، بومی‌سازی‌شده و در عین حال قابل تعمیم برای ارتقای ایمنی راه‌ها ارائه دهد. این مطالعه ضمن تمرکز بر تحلیل‌های آماری و هوشمند داده‌های تصادفات، به ابعاد اقتصادی فرآیند ایمن‌سازی نیز توجه ویژه دارد، به گونه‌ای که ارزیابی هزینه-فایده اقدامات اصلاحی، به عنوان یکی از ارکان اصلی تصمیم‌سازی در اولویت‌بندی نقاط پرتصادف در نظر گرفته شده است. در این راستا، به کارگیری هم‌زمان روش‌های کمی پیشرفته مانند مدل‌های رگرسیونی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی و رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره نظیر روش تاپسیس، امکان تحلیل دقیق‌تر روابط میان متغیرهای مؤثر بر بروز تصادفات و استخراج

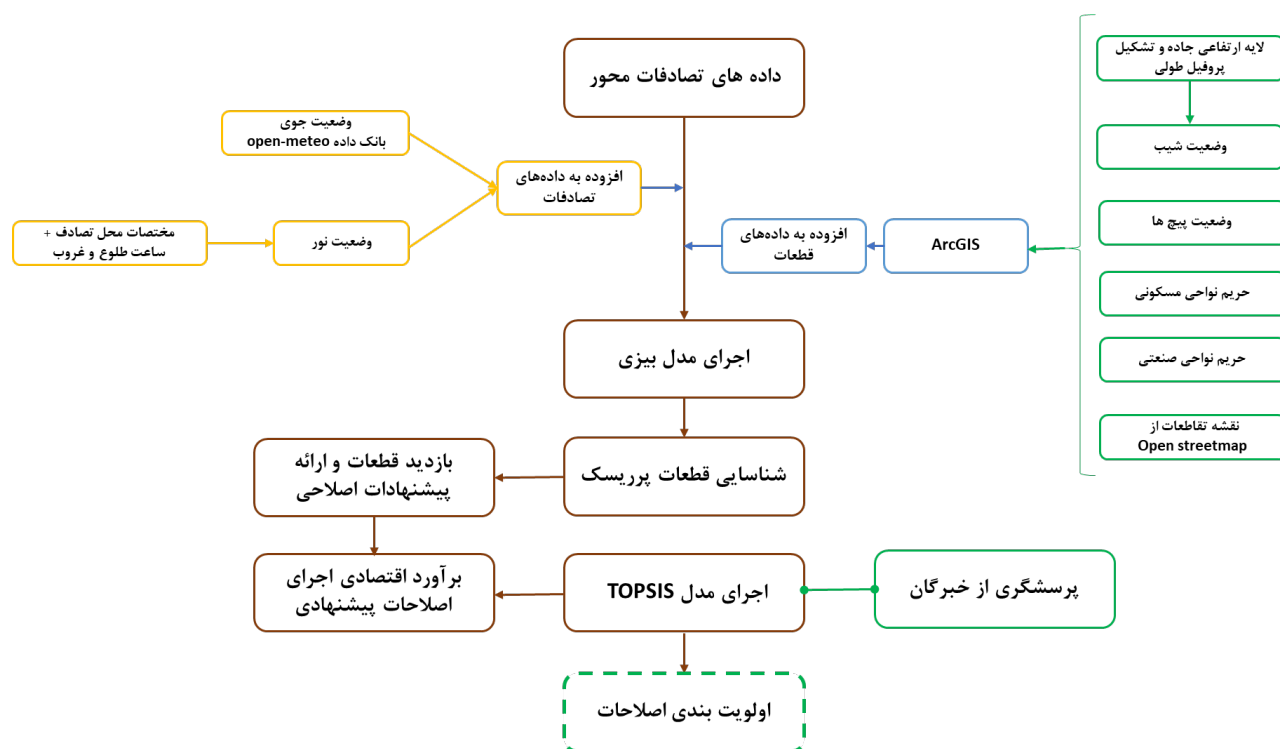
حوادث وجود دارد (Taylor & Baruya, 2000; Bester, 2003; Clark & Cushing, 2004; Liu & Young, 2004). در همین راستا، روش‌های آماری و هوشمند برای شناسایی و تحلیل نقاط پرتصادف توسعه یافته‌اند که هر یک دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. مدل‌های رگرسیون کلاسیک مانند پواسون، لوجستیک و مدل‌های دوجمله‌ای منفی برای تحلیل فراوانی و شدت تصادفات استفاده شده‌اند. در حالی که روش‌های پیشرفته‌تر نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌های بیزی توانسته‌اند رفتارهای پیچیده‌تر و غیرخطی را نیز پوشش دهند. سال‌های اخیر، تلفیق این مدل‌ها با تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند AHP و TOPSIS، دید جامع‌تری برای اولویت‌بندی نقاط خطرناک فراهم کرده است (Abbas, 2004; Memon, 2006; Li & Zhang, 2011; de Moura et al., 2022; Ziari, et al., 2017).

تحقیقات گسترده‌ای در کشورهای مختلف انجام شده که حاکی از تفاوت‌های معنادار در نرخ و نوع تصادفات براساس جمعیت، کاربری زمین، نوع راه، تراکم ترافیک و ویژگی‌های انسانی است. به عنوان نمونه، در مطالعات بلژیک، هند، تایوان، ایالات متحده و مصر، عواملی چون سن راننده، نوع تصادف، شرایط جوی، هندسه راه، ساعات شبانه و نحوه کنترل ترافیک به عنوان متغیرهای تأثیرگذار شناسایی شده‌اند. همچنین، برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که وجود زیرساخت‌های امدادسانی (مانند سیستم‌های ترومای ایالتی) در کاهش مرگ‌ومیر نقش چندانی نداشته و عواملی مانند تراکم جمعیت در نواحی روستایی اهمیت بیشتری یافته‌اند (Geremew, 2024; Cespedes, Ayuso & Santolino, 2024; Kim, Brunner & Yamashita, 2006; Kiran, Kumaraswamy & Sashidhar, 2017).

در ایران نیز مطالعاتی به منظور شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر تصادفات جاده‌ای انجام شده است. در یکی از این مطالعات، داده‌های تصادفات مربوط به شش محور دوخطه روستایی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ جمع‌آوری شد. محورهای مورد بررسی شامل جاده‌های همدان به آوج، همدان به قروه، همدان به ملایر، همدان به بیجار، ابهر به قیدار و مسیر قدیم آبیک به قزوین بودند. در این پژوهش، از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی تصادفات استفاده شد. این مدل با هدف به حداقل رساندن خطای پیش‌بینی آموزش داده شد. نتایج حاکی از دقت قابل قبول مدل بوده، به طوری که میزان ضریب تعیین برای کل مدل برابر با ۰,۸۳ و میانگین مربعات خطا

محورهای مشابه نیز به کار گرفته شود. بدین ترتیب، یافته‌های این پژوهش می‌تواند نقش مؤثری در بهینه‌سازی تخصیص منابع ایمنی جاده‌ای، کاهش نرخ تصادفات و تلفات و ارتقای اثربخشی سیاست‌های ایمنی حمل‌ونقل در سطح ملی ایفا کند.

الگوهای پنهان در داده‌ها را فراهم می‌سازد. تلفیق این ابزارهای تحلیلی با داده‌های میدانی و ویژگی‌های خاص محور مورد مطالعه، بستری فراهم می‌آورد تا نتایج حاصل از پژوهش نه تنها در سطح منطقه‌ای برای بهبود ایمنی محور اراک-سلفچگان قابل استفاده باشد، بلکه به‌عنوان الگویی قابل انطباق در سایر



شکل ۱. روند اجرای پژوهش حاضر

۲- اولویت‌بندی نقاط حادثه‌خیز جاده‌های برون‌شهری در مطالعات پیشین

در سیاست‌گذاری‌های ایمنی راه نقش مؤثری داشته‌اند (Geremew, 2024; Dong & Chang, 2023). از منظر روش‌شناسی، رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌طور گسترده‌ای برای اولویت‌بندی نقاط حادثه‌خیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. روش‌هایی نظیر ANP، AHP و تاپسیس این امکان را فراهم کرده‌اند که تصمیم‌گیرندگان بتوانند با در نظر گرفتن هم‌زمان معیارهای کمی و کیفی، به ارزیابی دقیق‌تری از اولویت نقاط پرخطر دست یابند. به‌ویژه، روش TOPSIS به‌دلیل سادگی محاسبات، انعطاف‌پذیری در تعداد معیارها و امکان استفاده در شرایط مختلف، در مطالعات متعددی به‌عنوان ابزار اولویت‌بندی

در سال‌های اخیر، با رشد سریع شبکه‌های حمل‌ونقل و افزایش حجم تردد، شناسایی و اولویت‌بندی نقاط حادثه‌خیز به یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسی ترافیک تبدیل شده است. در مطالعات مختلف، معیارهایی همچون تعداد تصادفات، شدت سوانح، تکرار وقوع، میزان خسارات مالی و جانی و همچنین نرخ تصادف به‌ازای حجم ترافیک به‌عنوان شاخص‌های اصلی تعیین نقاط پرخطر در نظر گرفته شده‌اند. در این راستا، محققان با به‌کارگیری روش‌های آماری و تحلیل داده، تلاش کرده‌اند تا الگوهایی برای شناسایی و رتبه‌بندی این نقاط توسعه دهند که

بیشترین بازده اقتصادی در قالب کاهش تلفات و خسارات ناشی از تصادفات هستند، رویکردی عقلانی و مؤثر در مدیریت منابع محدود ایمنی به‌شمار می‌رود. در این چارچوب، ارزیابی‌های اقتصادی، علاوه بر توجیه صرف هزینه‌های عمومی، امکان اولویت‌بندی اقدامات ایمنی مختلف را فراهم می‌سازند. اگرچه تحلیل هزینه-فایده با نقدهایی همراه بوده است، اما همچنان در پژوهش‌های ایمنی جاده‌ای کاربرد گسترده‌ای دارد و با اصول تصمیم‌گیری منطقی هم‌خوانی دارد. همچنین در اسناد کاربردی مانند دستورالعمل‌های AASHTO و PIARC، این نوع تحلیل به‌عنوان مبنایی برای رتبه‌بندی و تصمیم‌گیری در مورد راهکارهای ایمنی توصیه شده است. این رویکرد جامع، شفافیت تصمیم‌گیری را در حوزه ایمنی ارتقا داده و می‌تواند پایه‌ای علمی برای طراحی سیاست‌های ملی و منطقه‌ای ایمنی ترافیک فراهم سازد (Daniels et al., 2019; Lawrence et al., 2018).

۳- روش تحقیق

در این پژوهش، با هدف اولویت‌بندی اصلاح نقاط حادثه‌خیز در محور اراک-سلفچگان از منظر اقتصادی، از یک روش تحقیق توصیفی-تحلیلی با ماهیت کاربردی استفاده شده است. روش‌شناسی مطالعه متکی بر مدل‌سازی آماری بیزی برای شناسایی نقاط پرریسک و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس جهت رتبه‌بندی راهکارهای اصلاحی است. بخش توصیفی تحقیق بر تحلیل وضعیت موجود تصادفات، توزیع مکانی و زمانی آن‌ها و بررسی ویژگی‌های هندسی و محیطی محور مورد مطالعه تمرکز دارد. داده‌های این بخش از سوابق تاریخی ثبت‌شده تصادفات جاده‌ای استخراج شده‌اند. در بخش تحلیلی، با بهره‌گیری از مدل بیزی، تلاش شده است تا عوامل مؤثر بر افزایش ریسک تصادف شناسایی و عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها به‌صورت سیستماتیک مدل‌سازی شود؛ به‌گونه‌ای که بتوان ریسک نسبی هر قطعه از مسیر را برآورد کرد. پس از تعیین نقاط با ریسک بالا، بازدهی‌های میدانی بر اساس چارچوب‌های ممیزی ایمنی راه انجام می‌شود تا راهکارهای اصلاحی متناسب با شرایط هر نقطه تدوین گردد. در ادامه، با برآورد هزینه اجرای اقدامات پیشنهادی، اولویت‌بندی آن‌ها از طریق روش تاپسیس و بر مبنای شاخص‌هایی نظیر سطح ریسک، هزینه اجرا، شدت تصادفات و ویژگی‌های محیطی صورت می‌گیرد. برای وزن‌دهی شاخص‌ها نیز از نظرات کارشناسان و متخصصان حوزه حمل‌ونقل بهره گرفته شده است تا اعتبار فرآیند تصمیم‌گیری ارتقا یابد و نتایج حاصل از آن، قابلیت

کارآمد به‌کار رفته است (Zytoon, 2020; Safaei et al., 2021; Farooq, 2024).

در کنار روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نظیر AHP و تاپسیس که در اولویت‌بندی اقدامات ایمنی نقش دارند، روش‌های آماری و داده‌محور نیز در تحلیل و پیش‌بینی تصادفات جاده‌ای سهم چشم‌گیری داشته‌اند. مدل‌سازی رگرسیونی یکی از رویکردهای بنیادین در این حوزه است که برای بررسی روابط علی بین عوامل تأثیرگذار (مانند ویژگی‌های هندسی، ویژگی‌های ترافیکی، و شرایط محیطی) و نرخ وقوع تصادف به‌کار می‌رود. در این راستا، مدل رگرسیون پواسون و مدل رگرسیون منفی دوجمله‌ای به‌ویژه در تحلیل داده‌های شمارشی (مانند تعداد تصادفات در یک بازه زمانی یا مکانی مشخص) کاربرد فراوانی داشته‌اند. این مدل‌ها با توجه به خاصیت پراکندگی داده‌ها، امکان برآورد دقیق‌تر احتمال وقوع حادثه در نقاط خاص را فراهم می‌کنند. با پیشرفت فناوری‌های اطلاعاتی و افزایش کیفیت و کمیت داده‌های میدانی، روش‌های نوین یادگیری ماشین و هوش مصنوعی نیز به‌طور فزاینده‌ای در مطالعات ایمنی ترافیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. الگوریتم‌هایی نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی، درخت تصمیم، ماشین بردار پشتیبان و مدل‌های یادگیری ترکیبی مانند جنگل تصادفی، با توانایی پردازش داده‌های غیرخطی و پیچیده، نسبت به مدل‌های سنتی مزایای متعددی ارائه می‌دهند. این مدل‌ها با تحلیل داده‌های تاریخی تصادف، ویژگی‌های جاده، رفتار راننده و شرایط محیطی، می‌توانند نقاط حادثه‌خیز بالقوه را شناسایی و احتمال وقوع تصادف را پیش‌بینی کنند. از سوی دیگر، بهره‌گیری از داده‌های بلادرنگ مانند اطلاعات GPS، سنسورهای ترافیکی و تصاویر دوربین‌های نظارتی باعث شده است که این مدل‌ها پویایی بیشتری در تحلیل شرایط واقعی جاده‌ها داشته باشند. در نتیجه، به‌کارگیری این روش‌ها در کنار تحلیل‌های سنتی، دیدگاه جامع‌تری نسبت به الگوهای تصادف ایجاد کرده و امکان اتخاذ تصمیمات هوشمندتر در برنامه‌ریزی ایمنی جاده‌ای را فراهم می‌سازد (Shiran, Imaninasab & Khayamim, 2021; Islam et al., 2022; Santos et al., 2021).

برخی مطالعات نیز به بررسی ابعاد اقتصادی اقدامات ایمنی جاده‌ای، از جمله اصلاح نقاط حادثه‌خیز، پرداخته‌اند. در این مطالعات، تحلیل هزینه-فایده به‌عنوان ابزاری کلیدی برای بهینه‌سازی تخصیص منابع و افزایش کارایی مداخلات ایمنی معرفی شده است. بر این اساس، انتخاب اقداماتی که دارای

استفاده در برنامه‌ریزی‌های اجرایی و سیاست‌گذاری‌های ایمنی راه را داشته باشد.

۳-۱- روند کلی پژوهش

روند کلی این پژوهش به صورت گام‌به‌گام برنامه‌ریزی و اجرا شده است. در گام نخست، داده‌های مربوط به تصادفات طی دو سال گذشته شامل نوع، شدت، زمان و مکان تصادفات از اداره راهداری استان اراک دریافت شد. اطلاعات تکمیلی نظیر شرایط جوی و زمان‌بندی روز نیز به این داده‌ها افزوده شد. پس از آماده‌سازی داده‌ها، تحلیل‌های آماری اولیه برای شناسایی الگوهای کلی، پراکندگی زمانی و مکانی و روندها در تصادفات انجام گرفت. سپس، با استفاده از مدل بیزی، ارزیابی ریسک در هر قطعه از مسیر انجام شد. این مدل با بهره‌گیری از شاخص‌های مؤثر بر تصادفات، احتمال خطر را برای هر قطعه برآورد و یک شاخص ریسک تولید می‌کند. پس از اجرای مدل و به‌دست آمدن خروجی ریسک، ۱۵ قطعه دارای بالاترین میزان ریسک شناسایی شدند. در ادامه، بر اساس اصول ممیزی ایمنی راه، بازدیدهای میدانی از این قطعات انجام شد تا وضعیت واقعی مسیر، ویژگی‌های هندسی، علائم، رفتار ترافیکی و سایر مؤلفه‌های مؤثر مورد بررسی قرار گیرد. پس از این بازدیدها، پیشنهادات اصلاحی مشخصی برای هر یک از قطعات پریسک، بر اساس یافته‌های میدانی و الگوهای رایج تصادف در هر نقطه، تدوین گردید. در گام بعد، هزینه اجرای هر پیشنهاد اصلاحی با استفاده از فهرست‌بهای رسمی، تجربه پروژه‌های مشابه و مشورت با کارشناسان و پیمانکاران برآورد شد. در نهایت، به منظور اولویت‌بندی اصلاحات، یک پرسشنامه طراحی شد که در آن، اصلاح هر قطعه با در نظر گرفتن شاخص‌هایی مانند ریسک، هزینه اصلاح، موقعیت مکانی و اهمیت عملکردی قطعه، توسط کارشناسان ارزیابی شد و با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه تاپسیس، امتیاز نهایی هر قطعه به‌دست آمد و اولویت‌بندی اصلاح نقاط حادثه‌خیز صورت پذیرفت.

۳-۲- روش جمع‌آوری داده‌ها

جمع‌آوری داده‌ها در این پژوهش از ترکیب روش‌های کمی و کیفی و در دو بخش اصلی شامل داده‌های ثانویه (کتابخانه‌ای و اسنادی) و داده‌های میدانی انجام گرفت. در مرحله نخست، به منظور شناخت ادبیات موضوع، مبانی نظری، شاخص‌های

مؤثر بر ایمنی راه‌ها و آشنایی با تجارب مطالعات پیشین، مجموعه‌ای از منابع شامل مقالات علمی، گزارش‌های سازمان‌های مرتبط، استانداردها و دستورالعمل‌ها مورد بررسی قرار گرفتند.

این مطالعات چارچوب مفهومی تحقیق را مشخص کرده و در تعیین متغیرهای مدل بیزی و معیارهای تصمیم‌گیری چندشاخصه نقش داشتند. سپس، به منظور درک بهتر شرایط واقعی و تکمیل تحلیل‌های آماری، مطالعات میدانی نیز به صورت نظام‌مند انجام شد. در این بخش، ابتدا از محور مورد مطالعه بازدید به عمل آمد و شرایط هندسی، محیطی، ایمنی و علائم ترافیکی به صورت مستقیم مشاهده و مستندسازی گردید. همچنین، داده‌های آماری مربوط به تصادفات رانندگی در بازه زمانی دو ساله، شامل اطلاعاتی نظیر نوع، شدت، موقعیت مکانی دقیق، زمان و شرایط جوی وقوع تصادف، از پلیس‌راه و سازمان‌های ذی‌ربط دریافت شد. این اطلاعات پایه‌ای برای مدل‌سازی آماری و تحلیل توصیفی فراوانی و شدت تصادفات محسوب شدند. برای شناسایی دقیق شاخص‌ها و تعیین وزن معیارها در فرآیند تصمیم‌گیری، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته‌ای با گروهی از متخصصان حوزه حمل‌ونقل، مهندسان ترافیک و کارشناسان ایمنی راه انجام گرفت. این مصاحبه‌ها با هدف بهره‌گیری از دانش ضمنی خبرگان جهت وزن‌دهی شاخص‌ها در روش تاپسیس و ارائه پیشنهادات اصلاحی واقع‌گرایانه صورت پذیرفت. در نهایت، برای هر یک از قطعات شناسایی شده به عنوان نقاط پریسک، اقدامات اصلاحی متناسب پیشنهاد شد و هزینه اجرای این اقدامات با استفاده از فهرست‌بهای رسمی، تجربه طرح‌های مشابه و مشورت با پیمانکاران و کارشناسان حوزه پروژه‌های راه‌سازی و ایمنی راه برآورد گردید. این هزینه‌ها یکی از معیارهای اصلی در تحلیل چندمعیاره جهت اولویت‌بندی قطعات بودند.

۳-۳- استفاده از مدل بیزی

در این پژوهش، از مدل‌سازی بیزی به عنوان یک ابزار قدرتمند برای تحلیل آماری، مدل‌سازی عدم قطعیت و بررسی روابط پیچیده بین عوامل خطر استفاده شده است. مدل‌های بیزی این امکان را فراهم می‌آورند که علاوه بر استفاده از داده‌های مشاهده‌شده، از اطلاعات پیشین (مانند نتایج تحقیقات گذشته یا نظرات کارشناسان) نیز بهره‌برداری شود. این رویکرد با استفاده

پرسشنامه و نظرات خبرگان به دست می‌آید) در ماتریس نرمال‌شده، ماتریس تصمیم وزنی به دست می‌آید. پس از آن، بهترین و بدترین مقادیر از هر معیار برای تشکیل راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی تعیین می‌شوند. در ادامه، فاصله اقلیدسی هر گزینه تا دو راه‌حل ایده‌آل محاسبه می‌شود. در این گام، نسبت فاصله از راه‌حل منفی به مجموع فاصله‌ها به دست می‌آید که این عدد بین صفر تا یک قرار دارد و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، گزینه مطلوب‌تر خواهد بود. در نهایت، بر اساس مقادیر ضریب نزدیکی، گزینه‌ها از بهترین تا بدترین رتبه‌بندی می‌شوند که مبنای تصمیم‌گیری نهایی برای اولویت‌بندی اصلاح نقاط حادثه‌خیز خواهد بود (Trivedi et al., 2024; Beheshtinia, 2021; KALITA, 2024; Sayadinia & Bargebid, 2021).

این روش‌شناسی جامع، امکان شناسایی علمی و اولویت‌بندی اقتصادی نقاط حادثه‌خیز را فراهم می‌آورد و چارچوبی نظام‌مند برای اتخاذ تصمیمات موثر در جهت ارتقاء ایمنی جاده‌ای ارائه می‌دهد.

۴- نتایج و تفسیر

همانطور که اشاره گردید، در این مقاله از روش‌های پیشرفته تحلیل داده شامل مدل‌سازی بیزین، تحلیل مکانی، تحلیل خوشه‌ای و تحلیل زمانی-مکانی برای اولویت‌بندی نقاط حادثه‌خیز محور اراک-سلفچگان استفاده شده است. همچنین، برای اولویت‌بندی نقاط حادثه‌خیز بر اساس اهداف اصلی این بخش از پژوهش شامل شناسایی دقیق نقاط حادثه‌خیز، تحلیل عوامل مؤثر بر وقوع تصادفات با بهره‌گیری از مدل بیزی، اولویت‌بندی نقاط حادثه‌خیز بر اساس معیارهای اقتصادی و ایمنی با روش تاپسیس و ارائه پیشنهادها برای بهبود ایمنی و کاهش هزینه‌های اجتماعی ناشی از تصادفات است.

۴-۱- محور مورد مطالعه

محور اراک-سلفچگان، با طول تقریبی ۸۵ کیلومتر، شریان ارتباطی حیاتی در استان مرکزی است که مسیر ترانزیتی شمال به جنوب کشور را فراهم می‌آورد. این جاده به دلیل اتصال به مسیرهای مهمی نظیر تهران-اهواز و بندر امام خمینی، حجم بالایی از وسایل نقلیه سنگین را در خود جای داده و بخش عمده‌ای از ترافیک آن را تریلرها و کامیون‌ها تشکیل می‌دهند. میانگین تردد ساعتی در این محور ۱۰۳۰ وسیله نقلیه است که ۱۵ درصد آن وسایل نقلیه سنگین و ۸۵ درصد سبک هستند.

از قضیه بیز، ارتباطی میان توزیع پیشین، تابع درست‌نمایی و توزیع پسین برقرار می‌کند که نتیجه آن توزیع احتمال برای پارامترهای مورد نظر است و به روشنی عدم قطعیت موجود را بازتاب می‌دهد. در بخش‌های مختلف تحقیقات اخیر، از جمله مطالعه‌ای مبتنی بر گزارش‌های تصادف در ایالت مریلند، از مدل شبکه بیزی برای تحلیل تعاملی و غیرخطی عوامل خطر استفاده شده است. این مدل‌ها، به جای تحلیل مجزای متغیرها، به بررسی ساختارهای علی و وابستگی‌های میان‌متغیری می‌پردازند و مشخص می‌کنند که ترکیب چند عامل خطر (مانند رانندگی در شرایط نامساعد جوی همراه با خستگی) می‌تواند اثری مضاعف بر سطح ریسک داشته باشد؛ اثری که از جمع ساده اثرات تک‌تک عوامل قابل استنتاج نیست. این موضوع نشان می‌دهد که روابط غیرخطی بین عوامل خطر در حوادث جاده‌ای نقش مهمی دارند و باید در مدل‌سازی ریسک به آنها توجه شود. در مجموع، استفاده از مدل‌سازی بیزی و به‌ویژه شبکه‌های بیزی، با توجه به توانایی آنها در تحلیل هم‌زمان چندین عامل و نمایش روابط علی، رویکردی نوین و کارآمد در تحلیل ریسک تصادفات جاده‌ای محسوب می‌شود. این مدل‌ها با در نظر گرفتن ساختارهای غیرخطی، تعاملات پیچیده و عدم قطعیت، گامی مؤثر در جهت ارائه راهکارهای هدفمند برای بهبود ایمنی راه‌ها هستند (Wen et al., 2019; Carrodano, 2024).

۳-۴- استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس

پس از شناسایی قطعات پرریسک و ارائه پیشنهادات اصلاحی و برآورد هزینه هرکدام، مرحله بعدی اولویت‌بندی اصلاحات با استفاده از روش تاپسیس است. تاپسیس یکی از معروف‌ترین، پرکاربردترین و مفهومی‌ترین روش‌ها در تصمیم‌گیری چندمعیاره است که توسط هوانگ و یونگ معرفی شد. منطق بنیادین تاپسیس بر این فرض استوار است که گزینه بهینه، گزینه‌ای است که کمترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل مثبت (A^+) و بیشترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل منفی (A^-) دارد. مراحل اجرایی روش تاپسیس در این پژوهش شامل ساخت ماتریس تصمیم اولیه بر اساس داده‌های خام هر گزینه (قطعه راه) نسبت به هر معیار (ریسک، هزینه، شدت تصادفات، موقعیت مکانی، اهمیت عملکردی) است. سپس، معیارهای مختلف به دلیل داشتن واحدها و مقیاس‌های متفاوت، نرمال‌سازی می‌شوند تا امکان مقایسه فراهم گردد. با ضرب وزن هر معیار (که از طریق

میانگین سرعت ثبت شده توسط سامانه های تردد شمار جاده ای ۸۰ کیلومتر بر ساعت است، اما روزانه به طور متوسط ۳۵۰ مورد تخلف سرعت غیرمجاز در این محور ثبت می شود. این محور در تمام طول مسیر دارای دو خط عبوری در هر جهت است و جداسازی مسیرهای رفت و برگشت با گاردریل و جداکننده میانی انجام شده است. روشنایی جاده در طول شب تأمین شده و امکان تردد ایمن تر را فراهم می کند.

محور اراک-سلفچگان در منطقه ای با اقلیم نیمه خشک قرار دارد. در فصول گرم، افزایش دما و تابش مستقیم نور خورشید می تواند موجب کاهش کیفیت روسازی شود، در حالی که در فصول سرد، بارش باران و برف ممکن است موجب کاهش اصطکاک سطح جاده و افزایش احتمال لغزندگی شود. یکی از ویژگی های قابل توجه این محور، عبور آن از نزدیکی تالاب میقان است که در فاصله حدود ۱۰ کیلومتری از محور قرار دارد. این نزدیکی موجب مه گرفتگی شدید در فصول سرد، به ویژه پس از بارش، می شود که کاهش دید رانندگان و افزایش احتمال تصادفات را در پی دارد. از نظر اقتصادی، این محور یکی از مسیرهای حیاتی استان مرکزی و کشور است و علاوه بر تأمین دسترسی بین شهری، ارتباط مستقیم شهر اراک را با شهر جدید امیرکبیر فراهم می کند. همچنین، عبور این محور از شهرک صنعتی خیرآباد با بیش از ۴۵۰ واحد صنعتی، موجب افزایش حجم تردد روزانه وسایل نقلیه سنگین و سبک می شود. این محور به دلیل قرارگیری در مسیر تهران به استان های جنوبی کشور و ارتباط با شبکه حمل و نقل منتهی به بندر امام خمینی، یکی از مسیرهای کلیدی ترانزیت کالا در کشور به شمار می آید. در ۳۰ کیلومتری منتهی به شهر اراک، جاده از میان چندین روستا عبور می کند که چالش هایی از منظر ایمنی برای ساکنان محلی ایجاد کرده است.

۴-۲- داده های محدوده مورد مطالعه

آماده سازی داده ها داده های تصادفات مورد استفاده در این مقاله با همکاری سازمان راهداری دریافت شده و مربوط به بازه زمانی دی ماه ۱۴۰۱ تا دی ماه ۱۴۰۳ است. این مجموعه داده شامل اطلاعات جامعی از تصادفات رخ داده در محور اراک-سلفچگان از جمله تاریخ و ساعت وقوع حادثه، موقعیت جغرافیایی، تعداد کشته ها و مجروحان، نوع تصادف، شکل برخورد وسایل نقلیه و علت تام تصادف است. برای رفع نقص اطلاعاتی در خصوص وضعیت جوی و میزان روشنایی محیط در زمان وقوع حادثه، از داده های تاریخی سامانه open-meteo برای دریافت اطلاعات

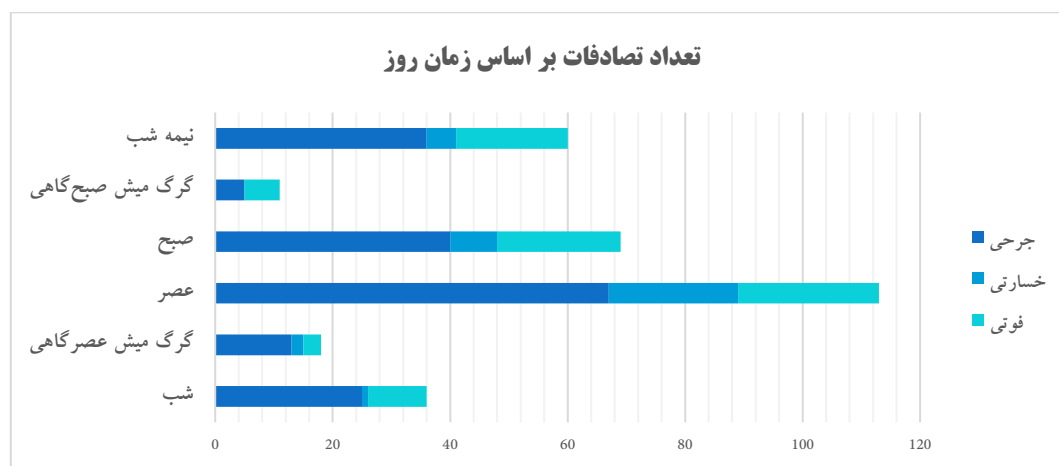
تاریخی آب و هوا استفاده شد. این داده ها برای نقاط کلیدی در محدوده محور شامل اراک، امیرکبیر، کارجان، راهجرد و سلفچگان به صورت روزانه و ساعتی استخراج و بر اساس مختصات مکانی محل حادثه و ساعت دقیق وقوع تصادف، به مجموعه داده های تصادفات تخصیص داده شدند. وضعیت جوی شامل میزان بارش (باران و برف) و شرایط جوی (آسمان صاف، ابری، باران سبک، برف و...) بود. برای تحلیل تأثیر وضعیت روشنایی محیط بر وقوع تصادفات، داده های مرتبط با روشنایی روز به مجموعه داده ها اضافه شدند. برای این منظور، با استفاده از کتابخانه suntime در پایتون، اطلاعات مربوط به ساعت طلوع و غروب خورشید استخراج شد و وضعیت زمانی تصادف از نظر روشنایی محیط به دسته های گرگ و میش صبحگاهی، صبح، عصر، گرگ و میش عصرگاهی، شب و نیمه شب تقسیم بندی گردید. هر یک از این دسته ها ویژگی های خاص خود را در خصوص دید راننده و احتمال وقوع تصادفات دارند؛ برای مثال، گرگ و میش صبحگاهی و عصرگاهی به دلیل تغییر ناگهانی شدت نور و دشواری تطابق چشم رانندگان، از پرخطرترین زمان ها محسوب می شوند. بازه های صبح و عصر با وجود روشنایی پایدار، به دلیل افزایش حجم تردد و خستگی رانندگان، نیاز به بررسی جداگانه دارند، و ساعات شب و نیمه شب نیز به دلیل کاهش نور طبیعی و افزایش خستگی خواب آلودگی رانندگان، افزایش احتمال تصادفات را به همراه دارند.

به منظور تقسیم بندی مسیر، مطابق با پیشنهاد آیین نامه ایمنی راه، کل مسیر به بازه های ۳۰۰ متری از نقطه مبدأ تقسیم شد. در نخستین گام، پروفیل طولی مسیر به منظور بررسی تغییرات شیب در هر قطعه با استفاده از نرم افزار ArcGIS و مدل رقومی ارتفاعی ایران ایجاد شد و شیب طولی مسیر در هر بخش محاسبه گردید. نتایج نشان می دهد که مسیر از نظر توپوگرافی شامل سه بخش اصلی از نظر شیب طولی است؛ ۳۰ کیلومتر ابتدایی تقریباً مسطح، بخش میانی با افزایش شیب، و ۳۰ کیلومتر انتهایی با شیب کاهشی. در ادامه، برای تحلیل تأثیر پیچ ها بر وقوع تصادفات، قطعاتی که در محدوده پیچ ها قرار داشتند، از قطعاتی که در مسیرهای مستقیم واقع شده بودند، تفکیک شدند. همچنین، برای بررسی اثر نوع کاربری زمین بر وقوع تصادفات، داده های مرتبط با کاربری اراضی شامل مناطق مسکونی، صنعتی، تجاری و کشاورزی از بانک داده OpenStreetMap (OSM)

دریافت و تحلیل شد. مجاورت قطعات جاده با نواحی مسکونی و صنعتی می‌تواند منجر به افزایش تردد عابران پیاده، وسایل نقلیه سبک و سنگین شود که ریسک تصادفات را افزایش می‌دهد. برای انجام این تحلیل، محدوده‌ی حریم ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری اطراف هر قطعه از مسیر تعیین گردید و قطعاتی که در نزدیکی نواحی مسکونی و صنعتی قرار داشتند، مشخص شدند. در ادامه، برای بررسی تأثیر تقاطعات بر وقوع تصادفات جاده‌ای، اطلاعات مربوط به تقاطعات مسیر اصلی با جاده‌های فرعی و دسترسی‌های محلی به نقشه اصلی اضافه شد. چهار ستون جدید به مجموعه داده‌ها اضافه شد که نشان‌دهنده تعداد تقاطعات در فواصل ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ متری هر قطعه از مسیر هستند.

بررسی داده‌ها در مرحله‌ی بعد، به‌منظور بررسی ویژگی‌های آماری داده‌ها، از نمودارهای ساده و تحلیل‌های توصیفی شامل نمودارهای پراکندگی و میله‌ای استفاده شد تا توزیع متغیرها و

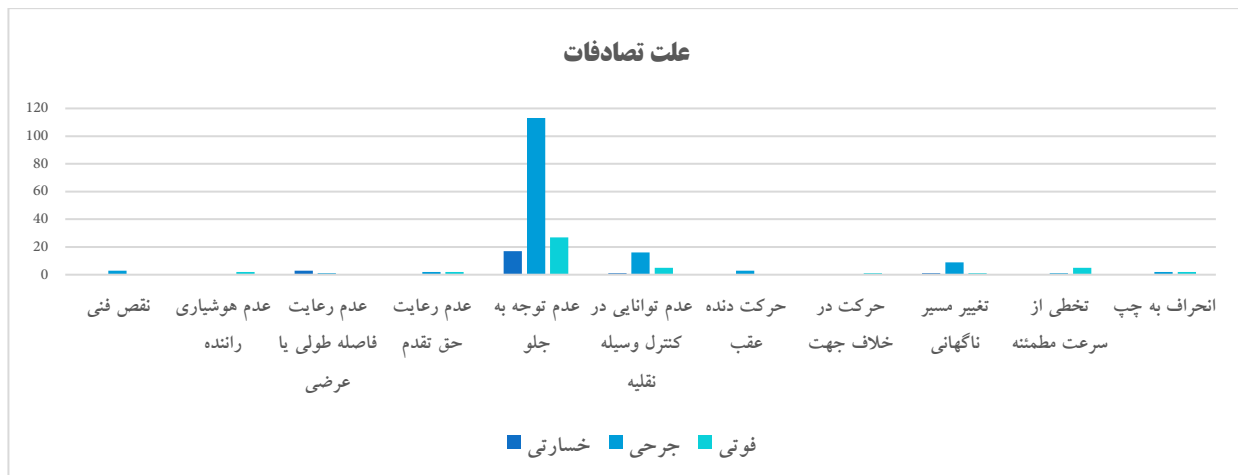
روندهای کلی داده‌ها مشخص شود. بررسی توزیع ماهانه تصادفات در محور اراک-سلفیچگان نشان می‌دهد که بیشترین تعداد تصادفات در ماه خرداد (۵۱ مورد) و شهریور (۴۲ مورد) رخ داده است، در حالی که ماه‌های بهمن و اسفند (هرکدام ۱۰ مورد) کمترین میزان تصادفات را ثبت کرده‌اند. تحلیل داده‌های تصادفات بر اساس بازه‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد که بیشترین تعداد تصادفات جرحی (۶۷ مورد) و خسارتی (۲۲ مورد) در بازه عصرگاهی رخ داده است و بیشترین تصادفات فوتی (۲۴ مورد) نیز در همین بازه ثبت شده است. بازه صبحگاهی نیز سهم قابل‌توجهی از تصادفات دارد. آمار تصادفات نشان می‌دهد که بیشترین حوادث در شرایط آسمان صاف و عمدتاً صاف رخ داده است، در حالی که تعداد تصادفات در شرایط بارندگی و برف بسیار محدود بوده است (شکل ۲).



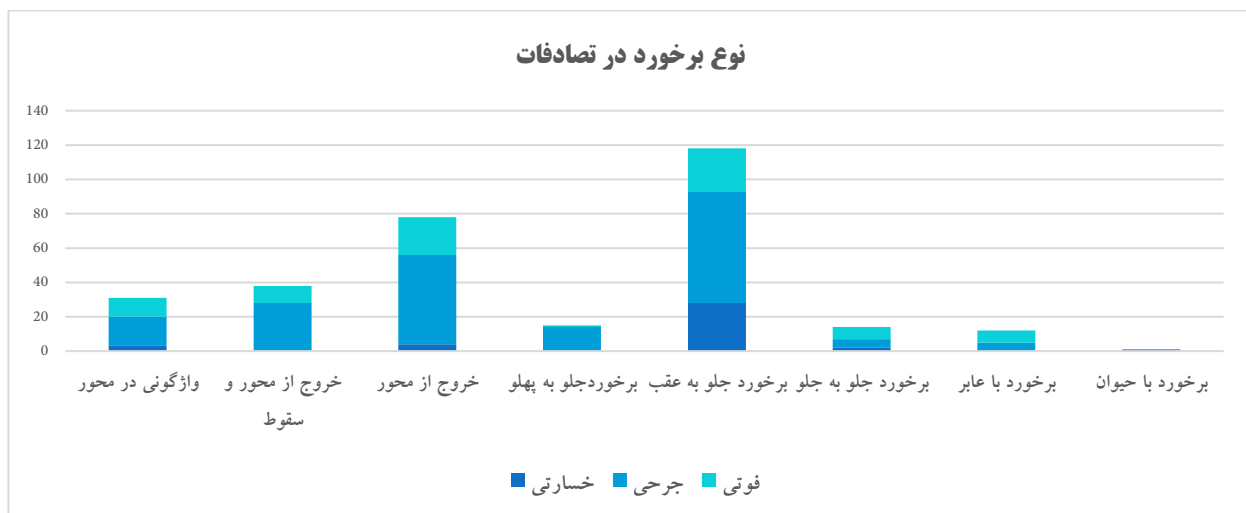
شکل ۲. تعداد تصادفات بر اساس دسته بندی زمانی

تحلیل نوع تصادفات نشان می‌دهد که واژگونی و سقوط وسایل نقلیه بیشترین میزان تصادفات فوتی را به خود اختصاص داده است (۴۱ تصادف فوتی)، پس از آن، تصادف بین دو وسیله نقلیه با ۲۲ مورد تصادف فوتی قرار دارد. تمامی تصادفات بین وسیله نقلیه و وسیله دوچرخ یا عابر پیاده منجر به جراحت یا فوت شده‌اند. در ادامه، از مجموع ۳۰۷ تصادف ثبت‌شده، در ۲۱۷ مورد علت حادثه ثبت شده است. در این میان، عدم توجه به جلو بیشترین سهم را داشته و ۱۳۰ مورد (حدود ۶۰ درصد از تصادفات با علت مشخص) را شامل می‌شود. این عامل به‌تنهایی

با ۱۱۳ تصادف جرحی و ۲۷ تصادف فوتی همراه بوده است. عدم توانایی در کنترل وسیله نقلیه و تخطی از سرعت مطمئنه نیز از جمله عوامل مؤثر هستند. برخی تخلفات، هرچند تعدادشان کمتر است، اما نرخ بالایی فوتی در آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد، مانند عدم رعایت حق تقدم و انحراف به چپ. تصادفات ناشی از خروج از محور و واژگونی از مرگبارترین حوادث هستند و در مجموع ۴۳ مورد فوتی داشته‌اند. برخوردهای جلو به عقب با ۲۵ فوتی و ۶۵ جرحی نیز از دیگر موارد پرخطر بوده و تصادف با عابر پیاده در تمام موارد منجر به آسیب جانی شده است.



شکل ۳. علت تصادفات در محور مورد مطالعه



شکل ۴. شکل برخورد تصادفات

شد که بیشترین موارد برخورد با عابران پیاده و وسایل نقلیه دوچرخ در نزدیکی مناطق مسکونی رخ داده است، که نشان‌دهنده ارتباط مستقیم میان تراکم جمعیتی و افزایش خطرپذیری برای کاربران آسیب‌پذیر جاده‌ای است.

۴-۳- مدل‌سازی بیزی برای ارزیابی ریسک تصادفات

در قطعات جاده‌ای

ایمنی راه‌ها یکی از چالش‌های اساسی در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل است و شناسایی بخش‌های پرخطر جاده‌ها می‌تواند به سیاست‌گذاران کمک کند تا با اعمال تدابیر مناسب، ریسک تصادفات را کاهش داده و از تلفات و خسارات ناشی از حوادث جلوگیری کنند. برای دستیابی به این هدف، استفاده از مدل‌های آماری که بتوانند با دقت بالا ریسک تصادفات را برآورد کنند،

نقشه پراکندگی نوع تصادفات در قطعات مسیر نشان می‌دهد که تراکم تصادفات در نزدیکی شهر اراک و سلفچگان بیشتر از بخش‌های میانی مسیر است. این الگو می‌تواند ناشی از افزایش حجم تردد، تقاطعات پرتراکم و شرایط هندسی مسیر در این مناطق باشد. همچنین، تصادفات خسارتی عمدتاً در مجاورت شهر اراک متمرکز هستند، در حالی که در قطعه‌ی میانی مسیر، به‌ویژه در محدوده‌ی شهر امیرکبیر، بیشترین تعداد تصادفات فوتی ثبت شده است. در تحلیل شاخص تصادفات، مشخص شد که برخی قطعات جاده در مقایسه با سایر بخش‌ها وضعیت نامناسب‌تری دارند، به‌ویژه قطعه مجاور شهر اراک، محل تقاطع کنارگذر اراک با محور اصلی، و قطعات واقع در مجاورت شهر امیرکبیر و سلفچگان بیشترین سطح خطر را نشان می‌دهند. این شاخص بر اساس وزن‌دهی به انواع تصادفات (فوتی: ۹، جرحی: ۳، خسارتی: ۱) محاسبه می‌شود. در تحلیل‌های بعدی مشخص

ضروری است. یکی از روش‌های کارآمد در این زمینه، مدل‌سازی بیزی است که با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها، قابلیت ارائه‌ی پیش‌بینی‌های قابل‌اتکاتری را نسبت به روش‌های کلاسیک فراهم می‌کند.

در این پژوهش، برای ارزیابی ریسک تصادفات در قطعات مختلف جاده‌ای، از یک مدل رگرسیون بیزی استفاده شده است. این مدل با بهره‌گیری از ویژگی‌های فیزیکی و ثابت هر قطعه از جاده، سعی در پیش‌بینی میزان وقوع تصادفات دارد. انتخاب روش بیزی به دلیل مزایای ذاتی آن از جمله در نظر گرفتن توزیع‌های پیشین، تخمین دقیق‌تر ضرایب و توانایی مدل‌سازی عدم قطعیت در نتایج، انجام شده است. از آنجایی که تصادفات جاده‌ای پدیده‌ای تصادفی و تحت تأثیر عوامل متنوعی هستند، استفاده از روش‌های کلاسیک رگرسیونی که تنها یک مقدار قطعی برای ضرایب مدل ارائه می‌دهند، ممکن است منجر به نتایج غیرواقعی شود. در مقابل، روش بیزی این امکان را فراهم می‌آورد که پارامترهای مدل نه به صورت مقدار نقطه‌ای، بلکه به صورت توزیع احتمالاتی تخمین زده شوند. این ویژگی به ما کمک می‌کند تا عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها و عوامل تأثیرگذار را به درستی لحاظ کنیم. خروجی این مدل، مقدار احتمالاتی ریسک تصادفات برای هر قطعه جاده‌ای است. این مقادیر می‌توانند مبنای مناسبی برای شناسایی بخش‌های پرخطر و اولویت‌بندی مداخلات ایمنی باشند. برای دستیابی به یک تصمیم‌گیری بهینه، لازم است که این مقادیر یکی از ورودی‌های فرآیند چندمعیاره تحلیل شده و رتبه‌بندی شوند.

لازم به ذکر است که در این مرحله از مدل‌سازی، تنها از ویژگی‌های فیزیکی و ثابت جاده برای تحلیل استفاده شده است. این ویژگی‌ها شامل متغیرهایی مانند شیب، میزان پیچ، تعداد تقاطعات و نوع کاربری اطراف جاده هستند. در این فاز از پژوهش، عواملی همچون شرایط جوی، حجم ترافیک و رفتار رانندگان که متغیرهای پویاتری هستند، در مدل لحاظ نشده‌اند. در مراحل بعدی، می‌توان با ترکیب داده‌های متغیر زمانی، دقت مدل را افزایش داد و تحلیل جامع‌تری از عوامل مؤثر بر تصادفات ارائه کرد. به طور کلی، استفاده از مدل‌سازی بیزی برای ارزیابی ریسک تصادفات جاده‌ای، چارچوبی علمی و مبتنی بر احتمالات را برای تحلیل داده‌ها فراهم می‌آورد. خروجی این مدل به عنوان یک معیار اولیه برای شناسایی و رتبه‌بندی قطعات پرخطر جاده‌ای مورد استفاده قرار گرفته و در ادامه با استفاده از روش

تأپسیس، این قطعات بر اساس میزان ریسک اولویت‌بندی خواهند شد. این تحلیل می‌تواند به سیاست‌گذاران کمک کند تا تصمیمات آگاهانه‌تری در زمینه‌ی ایمنی راه‌ها اتخاذ کنند و منابع را به طور بهینه تخصیص دهند.

در این پژوهش، به منظور تحلیل ریسک تصادفات جاده‌ای و اولویت‌بندی قطعات مختلف، مدل‌سازی بیزی مبتنی بر متغیرهای جاده‌ای ثابت انجام شده است. در این مرحله، متغیرهای مستقل متعددی که به صورت بالقوه می‌توانند بر شاخص تصادفات اثرگذار باشند، در نظر گرفته شدند. این متغیرها شامل پیچ مسیر، شیب طولی جاده، تعداد تقاطعات در فواصل مختلف (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۱۰۰۰ متری) و همچنین دو متغیر حریم مسکونی و صنعتی (یک متغیر دودویی با مقادیر ۰ و ۱) و محدوده‌ها در ۱۰۰۰ متری (متغیری با سه مقدار گسسته: بدون کاربری، مسکونی، صنعتی) قطعه بودند. با این حال، ورود مستقیم تمامی این متغیرها به مدل، علاوه بر افزایش پیچیدگی، ممکن است منجر به هم‌خطی میان متغیرهای مستقل شده و بر دقت تخمین پارامترها تأثیر منفی بگذارد. از این رو، پیش از مرحله‌ی مدل‌سازی، یک تحلیل مقدماتی بر مبنای ضرایب همبستگی پیرسون انجام شد تا مهم‌ترین و اثرگذارترین متغیرها انتخاب گردند. برای تعیین مؤثرترین متغیر در میان شاخص‌های مرتبط با تراکم تقاطعات، میزان همبستگی خطی هر یک از آن‌ها با شاخص تصادفات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحلیل نشان داد که متغیر تعداد تقاطعات در ۲۰۰ متری قطعه همبستگی بالاتری (حدود ۰٫۳۲) با شاخص تصادفات دارد، در حالی که همبستگی متغیرهای مشابه در فواصل ۱۰۰، ۳۰۰ و ۱۰۰۰ متری کمتر از این مقدار بود (به ترتیب ۰٫۲۶، ۰٫۲۲ و ۰٫۱۷). بنابراین، این متغیر به عنوان نماینده‌ی تراکم تقاطعات در مدل نهایی لحاظ گردید. علاوه بر این، متغیرهای مرتبط با کاربری زمین در اطراف مسیر نیز مورد بررسی قرار گرفتند. محاسبات نشان داد که متغیر حریم مسکونی و صنعتی نسبت به متغیر دیگر شاخص مناسب‌تری است. بنابراین، این متغیر در مدل‌سازی نهایی به عنوان شاخصی برای اثرات محیطی پیرامون جاده انتخاب شد.

در بخش بعدی، یک مدل بیزی برای پیش‌بینی شاخص تصادفات در بخش‌های مختلف یک جاده توسعه داده شده است. این مدل از توزیع‌های پیشین مناسب برای متغیرهای مستقل استفاده می‌کند و یک مدل رگرسیون خطی را برای بررسی تأثیر عوامل مختلف بر تصادفات پیاده‌سازی می‌کند. سپس، با استفاده از

در مورد مناطق مسکونی ($\beta_{\text{residential}}$)، میانگین ضریب برابر با ۰,۵۵۷، به دست آمده که نشان‌دهنده ارتباط مثبت میان وجود مناطق مسکونی و افزایش احتمال تصادف است. با این حال، انحراف معیار نسبتاً بالای ۱,۲۷۵ و بازه HPD برابر با [۰,۸۵۰-، ۳,۰۵۴] بیانگر آن است که میزان تأثیر این متغیر نیز با عدم قطعیت زیادی همراه بوده و ممکن است در همه شرایط، اثر افزایشی نداشته باشد.

ضریب مربوط به تعداد تقاطعات ($\beta_{\text{intersections}}$) دارای میانگین ۱,۷۸۳ است که نشان از اثر قوی و نسبتاً پایدار این عامل در افزایش احتمال وقوع تصادفات دارد. انحراف معیار ۰,۷۹۰ و بازه HPD [۰,۱۲۸، ۳,۰۶۴] نشان می‌دهند که تأثیر تقاطعات نسبت به سایر متغیرها با دقت بیشتری تخمین زده شده و به‌طور معمول با افزایش ریسک همراه است.

در نهایت، ضریب مربوط به شیب جاده (β_{slope}) با میانگین ۰,۳۳۰ نشان می‌دهد که این متغیر تأثیر نسبتاً ضعیفی بر تصادفات دارد. انحراف معیار ۰,۳۱۳ و بازه HPD برابر با [۰,۲۳۴-، ۰,۹۰۴] نیز حکایت از آن دارد که اگرچه این اثر نسبتاً پایدار است، اما در برخی شرایط ممکن است افزایش شیب حتی به کاهش احتمال تصادف بینجامد.

در ادامه، با استفاده از خروجی مدل بیزی، سطح خطر برای هر قطعه از جاده به‌صورت مستقل و بر اساس ویژگی‌های آن مانند تعداد پیچ‌ها، شیب، تعداد تقاطعات، و سایر عوامل مرتبط محاسبه شد. این سطح خطر که به‌صورت یک مقدار احتمالاتی بیان می‌شود، نشان‌دهنده احتمال وقوع تصادف در هر قطعه جاده‌ای است. این مقادیر ریسک به‌عنوان ورودی در مراحل بعدی تحلیل مورد استفاده قرار گرفتند. به‌طور خاص، ۱۵ نقطه با بالاترین سطح خطر از میان کلیه قطعات جاده‌ای شناسایی و جدا شدند. در گام بعدی، با بهره‌گیری از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، از جمله روش تاپسیس، این نقاط از نظر اولویت کاهش خطر رتبه‌بندی شده و به‌منظور اجرای اقدامات اصلاحی، به ترتیب اهمیت مورد توجه قرار گرفتند.

روش نمونه‌گیری پیشرفته‌ی NUTS، پارامترهای مدل تخمین زده می‌شوند. در این مدل، متغیرهای تأثیرگذار بر ریسک هر قطعه شامل پیچ جاده (β_{curve})، حریم مسکونی یا صنعتی ($\beta_{\text{residential}}$)، تعداد تقاطعات در ۲۰۰ متری ($\beta_{\text{intersections}}$) و شیب جاده (β_{slope}) هستند. ضرایب این متغیرها با استفاده از توزیع لاپلاس مدل شده است، زیرا این توزیع باعث ایجاد پارامترهایی با تأثیر قوی اما اسپارسی (کمتر پراکنده) می‌شود. استفاده از توزیع لاپلاس باعث انتخاب مدل‌های با پیچیدگی کمتر می‌شود، زیرا این توزیع ضرایبی را که اثر کم دارند به صفر نزدیک نگه می‌دارد. مدل اصلی یک رگرسیون خطی بیزی است که در آن مقدار شاخص تصادفات (accident_index) به‌صورت ترکیبی خطی از متغیرهای مستقل بیان می‌شود و میانگین مقدار تصادفات پیش‌بینی شده است. برای در نظر گرفتن نویز در داده‌ها، یک متغیر تصادفی گاوسی (Normal) برای تصادفات تعریف شده است که دارای میانگین و انحراف معیار σ است. برای اطمینان از مثبت بودن مقدار نویز، از توزیع نصف نرمال (HalfNormal) استفاده شده است. این کار باعث می‌شود نویز مدل به‌طور طبیعی توزیع شده باشد و در عین حال مقدار آن به‌طور فیزیکی معنادار باشد (انحراف معیار نمی‌تواند منفی باشد).

۴-۴- تفسیر نتایج

پس از اجرای مدل بیزی، نتایج حاصل از تخمین ضرایب مدل، بینش‌هایی درباره تأثیر ویژگی‌های مختلف جاده‌ای بر احتمال وقوع تصادفات ارائه می‌دهد. در این تحلیل، ضریب مربوط به پیچ جاده (β_{curve}) میانگینی برابر با ۰,۴۳۷ دارد که حاکی از آن است که وجود پیچ‌ها به‌طور متوسط با افزایش شاخص تصادفات همراه است. به بیان دیگر، مسیرهایی با تعداد پیچ بیشتر احتمالاً خطر تصادف بالاتری دارند. با این حال، انحراف معیار ۱,۱۷۸ و بازه HPD با پوشش ۹۴ درصدی در بازه [۰,۳۷۷-، ۳,۰۵۴] نشان می‌دهد که عدم قطعیت قابل توجهی در این تخمین وجود دارد و تأثیر پیچ‌ها ممکن است در شرایط مختلف تغییر کند و لزوماً همواره افزایشی نباشد.

جدول ۱. ماتریس نرمال شده شاخص های ایمنی، ریسک و هزینه برای رتبه بندی قطعات جاده (TOPSIS)

قطعه	هزینه اقدامات اصلاحی	ریسک تصادف (مدل بیزی)	شاخص ترکیبی تصادف	تعداد کل تصادفات	تعداد فوتی ها	تعداد جرحی	تعداد خسارتی	حجم ترافیک عبوری	حساسیت اجتماعی موقعیت مکانی	رفتار پرخطر رانندگان در نقطه	موانع دید در محل	روسازی	وضعیت جوی
۱-۲	۰.۶۱۳	۰.۲۹۳	۰.۲۷۸	۰.۴۵۴	۰.۰۰۰	۰.۴۵۷	۰.۶۸۱	۰.۳۵۷	۰.۵۰۰	۰.۰۰۰	۰.۷۰۷	۰.۰۰۰	۰.۵۰۰
۳	۰.۲۸۴	۰.۲۶۷	۰.۱۶۹	۰.۱۴۵	۰.۱۶۴	۰.۱۶۱	۰.۰۰۰	۰.۳۵۷	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۷۰۷	۰.۰۰۰	۰.۵۰۰
۴	۰.۳۳۲	۰.۲۴۸	۰.۱۴۶	۰.۰۹۱	۰.۲۴۷	۰.۰۲۷	۰.۰۸۵	۰.۳۵۷	۰.۵۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۵۰۰
۵	۰.۳۱۸	۰.۲۷۱	۰.۲۷۳	۰.۲۵۴	۰.۳۲۹	۰.۱۶۱	۰.۳۴۱	۰.۳۵۷	۰.۵۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۵۰۰
۶	۰.۰۲۸	۰.۳۰۰	۰.۲۸۷	۰.۳۸۲	۰.۱۶۴	۰.۳۲۳	۰.۵۹۶	۰.۲۷۴	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
۷-۸	۰.۱۷۴	۰.۲۶۱	۰.۱۵۵	۰.۰۹۱	۰.۲۴۷	۰.۰۵۴	۰.۰۰۰	۰.۲۲۸	۰.۰۰۰	۰.۵۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
۹	۰.۰۵۰	۰.۳۱۳	۰.۵۸۸	۰.۵۲۷	۰.۵۷۵	۰.۵۳۸	۰.۱۷۰	۰.۲۲۸	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
۱۰	۰.۲۵۹	۰.۲۴۱	۰.۱۵۵	۰.۱۲۷	۰.۱۶۴	۰.۱۳۵	۰.۰۰۰	۰.۲۲۸	۰.۰۰۰	۰.۵۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
۱۱	۰.۰۵۹	۰.۲۹۹	۰.۳۱۱	۰.۳۲۷	۰.۱۶۴	۰.۴۳۱	۰.۰۰۰	۰.۲۲۸	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
۱۲	۰.۳۲۱	۰.۳۰۱	۰.۲۹۷	۰.۲۳۶	۰.۳۲۹	۰.۲۴۲	۰.۰۰۰	۰.۲۲۸	۰.۵۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
۱۳	۰.۳۴۹	۰.۲۷۵	۰.۲۱۲	۰.۱۲۷	۰.۳۲۹	۰.۰۸۱	۰.۰۰۰	۰.۲۲۸	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۵۷۷	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
۱۴	۰.۰۴۸	۰.۲۳۱	۰.۱۶۵	۰.۲۰۰	۰.۰۸۲	۰.۲۱۵	۰.۱۷۰	۰.۲۲۸	۰.۰۰۰	۰.۵۰۰	۰.۵۷۷	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
۱۵	۰.۰۲۷	۰.۲۹۲	۰.۲۵۴	۰.۱۸۲	۰.۳۲۹	۰.۱۶۱	۰.۰۰۰	۰.۲۲۸	۰.۰۰۰	۰.۵۰۰	۰.۵۷۷	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰

جدول ۲. نتایج مدل در تحقیق

عنوان	میانگین	انحراف معیار	hdi_۳%	hdi_۹۷%	r_hat
beta_curve	۰.۴۳۷	۱.۱۷۸	-۱.۳۷۷	۳.۰۵۴	۱
beta_residential	۰.۵۵۷	۱.۲۷۵	-۱.۸۵	۳.۰۵۴	۱
beta_intersections	۱.۷۸۳	۰.۷۹	۰.۱۲۸	۳.۰۶۴	۱
beta_slope	۰.۳۳	۰.۳۱۳	-۰.۲۳۴	۰.۹۰۴	۱
intercept	۴.۹۸۵	۱.۵۱۸	۲.۰۰۵	۷.۶۰۴	۱
sigma	۱۸.۸۸۵	۰.۴۱۴	۱۸.۰۹۱	۱۹.۶۲۳	۱

۴-۵- برآورد هزینه اقدامات اصلاحی و ادغام معیار اقتصادی در اولویت بندی

پس از شناسایی قطعات پرریسک و استخراج اقدامات اصلاحی متناسب با شرایط هر قطعه، «هزینه اجرای اقدامات اصلاحی» به عنوان معیار اقتصادی وارد فرآیند تصمیم گیری شد تا علاوه بر شدت و ریسک تصادفات، امکان سنجش قابلیت اجرای

مداخلات از منظر منابع مالی نیز فراهم گردد. برآورد هزینه ها بر پایه سه منبع انجام گرفت: نخست، فهرست بهای رسمی سازمان برنامه و بودجه برای اقلام رایج ایمنی و عملیات عمرانی (مانند نصب گاردریل، تابلو و تجهیزات کنترلی) به عنوان مرجع

به این ترتیب رتبه بندی حاصل، هم از منظر ایمنی و هم از منظر هزینه، برای خواننده ملموس و قابل دفاع خواهد بود.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، با هدف شناسایی قطعات پرخطر و اولویت بندی مداخلات ایمنی در محور مورد بررسی، یک چارچوب یکپارچه مبتنی بر مدل سازی بیزی و تصمیم گیری چندمعیاره تاپسیس به کار گرفته شد. در گام نخست، داده های تصادفات و ویژگی های هندسی-محیطی مسیر پردازش و با استفاده از مدل بیزی، ریسک تصادف هر قطعه برآورد شد تا علاوه بر مقدار ریسک، عدم قطعیت برآوردها نیز در تحلیل لحاظ گردد. نتایج برآورد بیزی نشان داد برخی متغیرهای زمینه ای (از جمله ویژگی های ترافیکی و شرایط محیطی) اثر مثبت و معناداری بر افزایش ریسک دارند و بنابراین شناسایی نقاط پرخطر صرفاً بر مبنای تعداد خام تصادفات کافی نیست، بلکه باید به سازوکارهای مؤثر بر شکل گیری تصادف نیز توجه شود. سپس خروجی ریسک مدل بیزی در کنار شاخص های کمی تصادف (شاخص ترکیبی شدت، تعداد کل تصادفات، تعداد فوتی، جرحی و خسارتی و حجم ترافیک عبوری) و شاخص های کیفی حاصل از ممیزی میدانی (حساسیت اجتماعی موقعیت، رفتار پرخطر رانندگان، موانع دید، روسازی و وضعیت جوی) در قالب یک ماتریس تصمیم تجمیع گردید تا تصویر جامع تری از «خطرپذیری» و «قابلیت مداخله» برای هر قطعه فراهم شود.

برای ملموس شدن رتبه بندی از منظر اجرایی و اقتصادی، هزینه اقدامات اصلاحی نیز به عنوان یک معیار اقتصادی وارد فرآیند شد و با توجه به اینکه معیارها دارای مقیاس های متفاوت هستند، پیش از محاسبات تاپسیس، داده ها نرمال سازی شدند تا همه معیارها بی واحد و قابل مقایسه گردند؛ بدین ترتیب رتبه بندی نهایی صرفاً یک قضاوت کلی و عمومی نبوده، بلکه بر مبنای خروجی کمی مدل، داده های واقعی تصادفات، ممیزی میدانی و محدودیت های هزینه ای شکل گرفته است. وزن دهی معیارها نیز با اتکا به نظرات خبرگان و روش وزن دهی (مانند رویکردهای مبتنی بر آنتروپی) انجام شد تا نقش معیارهای حیاتی به ویژه معیارهای مرتبط با تلفات انسانی در تصمیم نهایی پررنگ تر گردد. در نهایت با محاسبه فاصله هر گزینه از ایده آل مثبت و منفی و استخراج شاخص نزدیکی، اولویت مداخلات تعیین شد.

اصلی قیمت گذاری استفاده شد. در مواردی که فهرست بها برای شرایط خاص پروژه، جزئیات اجرایی یا اقلام کمتر متداول کفایت نداشت، برآوردها با اتکا به تجربه و نظر متخصصان ایمنی راه و ترافیک و همچنین مشورت با کارشناسان اجرایی/پیمانکاران تکمیل گردید. علاوه بر این، برای نزدیک کردن ارقام به واقعیت های اجرایی، قیمت های واقعی پروژه های مشابه اجرا شده نیز به عنوان مبنای کنترل و تطبیق در نظر گرفته شد تا هزینه های نهایی، هم مستند و هم منطبق با شرایط واقعی بازار و پروژه باشد. به این ترتیب، برای هر قطعه، «هزینه بسته اقدامات اصلاحی» به صورت یک شاخص مالی قابل اتکا به دست آمد و در کنار شاخص های ایمنی برای رتبه بندی قطعات استفاده شد. در گام اجرایی برآورد هزینه، برای هر قطعه فهرست عملیات پیشنهادی تهیه شد و برای هر عملیات، «شرح فعالیت، واحد، مقدار تخمینی و قیمت کل» مشخص گردید؛ همچنین برای شفافیت و قابلیت پیگیری، «روش تخمین قیمت» نیز برای هر ردیف ثبت شد. در نهایت، هزینه کل هر قطعه از جمع هزینه ردیف های مربوط به همان قطعه حاصل شد؛ بنابراین می توان دقیقاً مشاهده کرد که هر رقم هزینه بر چه مبنایی محاسبه شده و هزینه نهایی چگونه شکل گرفته است. این شیوه گزارش دهی باعث می شود معیار هزینه صرفاً یک عدد کلی و مبهم نباشد، بلکه نتیجه یک فرآیند محاسباتی و مستند باشد که امکان بازبینی و مقایسه را نیز فراهم می کند.

از سوی دیگر، چون معیارهای مورد استفاده در اولویت بندی دارای مقیاس ها و واحدهای متفاوت هستند (هزینه با واحد پولی، تعداد تصادفات به صورت شماری و برخی شاخص ها به صورت امتیازی)، پیش از اجرای روش تاپسیس مرحله نرمال سازی انجام شد تا همه معیارها بی واحد و هم مقیاس شوند و امکان مقایسه و تجمیع آنها فراهم گردد. در این پژوهش از نرمال سازی برداری استفاده شد؛ به این صورت که مقدار هر معیار برای هر قطعه بر ریشه مجموع مربعات همان معیار در بین همه قطعات تقسیم شد و یک ماتریس نرمال به دست آمد. سپس مقادیر نرمال شده با وزن های معیارها ترکیب گردید تا «اهمیت واقعی هر معیار در هر قطعه» در تصمیم نهایی لحاظ شود. در ادامه، با تعیین ایده آل مثبت و منفی (به گونه ای که هزینه معیار کمینه سازی و سایر معیارهای ایمنی عمدتاً بیشینه سازی در نظر گرفته شدند)، فاصله هر قطعه از بهترین و بدترین حالت محاسبه و شاخص نزدیکی به عنوان مبنای رتبه بندی استخراج شد؛

طراحی مداخلات مرحله‌ای هستند. بر این اساس، دستاورد اصلی پژوهش آن است که یک مبنای داده‌محور، قابل ردیابی و دفاع‌پذیر برای تخصیص منابع ارائه می‌دهد؛ یعنی مدیران می‌توانند به‌جای بیان توصیه‌های کلی، با اتکا به خروجی مدل بیزی، ماتریس تصمیم نرمال و رتبه‌بندی تاپسیس، تصمیم بگیرند «کدام قطعه»، «با چه فوریتی» و «با چه ملاحظات هزینه‌ای» در اولویت اصلاح قرار گیرد. در عین حال، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی با تکمیل بانک اطلاعاتی، به‌روزرسانی دوره‌ای هزینه‌ها و ارزیابی پس از اجرای مداخلات (قبل و بعد)، دقت برآورد اثر اقدامات اصلاحی و پایداری رتبه‌بندی در طول زمان نیز سنجیده شود.

مطابق نتایج، قطعه ۹ به‌دلیل برخورداری از مقادیر بالاتر در شاخص‌های شدت و تلفات (برای مثال مقدار بالای شاخص ترکیبی و نیز مقادیر بالای مؤلفه‌های فوتی و جرحی در ماتریس نرمال) و همزمان هزینه اصلاحی نسبتاً پایین، به‌عنوان گزینه‌ی دارای اولویت بالاتر برای مداخله معرفی گردید. پس از آن، قطعه ۱۵ و قطعات ۱-۲ نیز به دلیل ترکیب نامطلوبی از ریسک تصادف و عوامل زمینه‌ای (از جمله حضور رفتارهای پرخطر، مسائل روسازی و دید و حساسیت مکانی) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند؛ به‌طور خاص، قطعات ۱-۲ با وجود هزینه اصلاحی بالاتر، به علت برجستگی برخی عوامل خطر (نظیر موانع دید و شاخص‌های مرتبط با پیامد تصادف) نیازمند توجه مدیریتی و

۶- مراجع

accidents on rural roads in Egypt. *Accident Analysis & Prevention*, 36(2), 149-163.
Applied to Urban Accident-Prone Locations: A Scoping Review.
-Daniels, S., Martensen, H., Schoeters, A., Van den Berghe, W., Papadimitriou, E., Ziakopoulos, A., ... & Perez, O. M. (2019). A systematic cost-benefit analysis of 29 road safety measures. *Accident Analysis & Prevention*, 133, 105292.
-Daniels, S., Martensen, H., Schoeters, A., Van den Berghe, W., Papadimitriou, E., Ziakopoulos, A., ... & Perez, O. M. (2019). A systematic cost-benefit analysis of 29 road safety measures. *Accident Analysis & Prevention*, 133, 105292.
-Farooq, D. (2024). Application of pythagorean fuzzy analytic hierarchy process for assessing driver behavior criteria associated to road safety. *Journal of Soft Computing and Decision Analytics*, 2(1), 144-158.
-Islam, M. K., Reza, I., Gazder, U., Akter, R., Arifuzzaman, M., & Rahman, M. M. (2022). Predicting road crash severity using classifier models and crash hotspots. *Applied Sciences*, 12(22), 11354.
-Liu, P., & Young, H. G. (2004, January). A neural network approach on studying the effect of urban signalized intersection characteristics on occurrence of traffic accidents. In *83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*.

-Abbas, K. A. (2004). Traffic safety assessment and development of predictive models for
-Bester, C. J. (2003). The effect of road roughness on safety. In *82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC., January.
-Beheshtinia, M. A., Sayadinia, S., & Bargebid, H. (2021). Identifying the factors affecting road accidents and providing multi-criteria hybrid decision-making methods for ranking hazardous points. *International Journal of Transportation Engineering*, 9(1), 439-458.
-Clark, D. E., & Cushing, B. M. (2004). Rural and urban traffic fatalities, vehicle miles, and population density. *Accident Analysis & Prevention*, 36(6), 967-972.
-Cespedes, L., Ayuso, M., & Santolino, M. (2024). Effect of population density in aging societies and severity of motor vehicle crash injuries: the case of Spain. *European Transport Research Review*, 16(1), 48.
-Carrodano, C. (2024). Data-driven risk analysis of nonlinear factor interactions in road safety using Bayesian networks. *Scientific Reports*, 14(1), 18948.
-Dong, C., & Chang, N. (2023). Overview of the identification of traffic accident-prone locations driven by big data. *Digital Transportation and Safety*, 2(1), 67-76.
-De Moura, F. S., Garcia, L. F., Torres, T. B., de Oliveira, L. P., & Nodari, C. T. (2022). Identification and Prioritization Techniques

- Sarigiannis, D., Atzemi, M., Oke, J., Christofa, E., & Gerasimidis, S. (2024). Feature Engineering and Decision Trees for Predicting High Crash-Risk Locations Using Roadway Indicators. *Transportation Research Record*, 2678(8), 535-548.
- Shah, S. A. R., Brijs, T., Ahmad, N., Pirdavani, A., Shen, Y., & Basheer, M. A. (2017). Road safety risk evaluation using gis-based data envelopment analysis—Artificial neural networks approach. *Applied Sciences*, 7(9), 886.
- Safaei, B., Safaei, N., Masoud, A., & Seyedekrami, S. (2021). Weighing criteria and prioritizing strategies to reduce motorcycle-related injuries using combination of fuzzy TOPSIS and AHP methods. *Stud*, 54, 217-234.
- Shiran, G., Imaninasab, R., & Khayamim, R. (2021). Crash severity analysis of highways based on multinomial logistic regression model, decision tree techniques, and artificial neural network: a modeling comparison. *Sustainability*, 13(10), 5670.
- Santos, D., Saias, J., Quaresma, P., & Nogueira, V. B. (2021). Machine learning approaches to traffic accident analysis and hotspot prediction. *Computers*, 10(12), 157.
- Taylor, M. C., Lynam, D. A., & Baruya, A. (2000). The effects of drivers' speed on the frequency of road accidents, 421. *Crowthorne: Transport Research Laboratory*.
- Trivedi, P., Shah, J., Čep, R., Abualigah, L., & Kalita, K. (2024). A hybrid best-worst method (BWM)—technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) approach for prioritizing road safety improvements. *IEEE Access*.
- Wen, H., Zhang, X., Zeng, Q., & Sze, N. N. (2019). Bayesian spatial-temporal model for the main and interaction effects of roadway and weather characteristics on freeway crash incidence. *Accident Analysis & Prevention*, 132, 105249.
- Zytoon, M. A. (2020). A decision support model for prioritization of regulated safety inspections using integrated Delphi, AHP and double-hierarchical TOPSIS approach. *IEEE Access*, 8, 83444-83464.
- Ziari, H., Amini, A., Saadatjoo, A., Hosseini, S. M., & Gilani, V. N. M. (2017). A prioritization model for the immunization of accident prone using multi-criteria decision methods and fuzzy hierarchy algorithm. *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering (CRPASE)*, 3(3).
- Geremew, G. (2024). Analyzing road traffic accidents through identification and prioritization of accident-prone areas on the dembecha to injibara highway segment in amhara region, ethiopia. *Scientific Reports*, 14(1), 24276.
- Li, X., Lord, D., & Zhang, Y. (2011). Development of accident modification factors for rural frontage road segments in Texas using generalized additive models. *Journal of Transportation Engineering*, 137(1), 74-83.
- Lawrence, M., Hachey, A., Bahar, G. B., & Gross, F. B. (2018). Highway safety benefit-cost analysis guide (No. FHWA-SA-18-001). United States. Federal Highway Administration. *Office of Safety*.
- Kim, K., Brunner, I. M., & Yamashita, E. Y. (2006). Influence of land use, population, employment, and economic activity on accidents. *Transportation Research Record*, 1953(1), 56-64.
- Kiran, B. N., Kumaraswamy, N., & Sashidhar, C. (2017). A review of road crash prediction models for developed countries. *American Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2(2), 10-25.
- KALITA, K. (2024). A Hybrid Best-Worst Method (BWM)—Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) Approach for Prioritizing Road Safety Improvements.
- Geremew, G. (2024). Analyzing road traffic accidents through identification and prioritization of accident-prone areas on the dembecha to injibara highway segment in amhara region, ethiopia. *Scientific Reports*, 14(1), 24276.
- Memon, A. Q. (2006). Road accident prediction models developed from a national database: Poisson and negative binomial regressions (No. 06-1643).
- Rezapour, M., & Ksaibati, K. (2021). Application of machine learning technique for optimizing roadside design to decrease barrier crash costs, a quantile regression model approach. *Journal of Safety Research*, 78, 19-27.
- Shamsashtiany, R., & Ameri, M. (2018). Road accidents prediction with multilayer perceptron MLP modelling case study: roads of Qazvin, Zanzan and Hamadan. *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 2(4), 181-192.

Prioritization of High-Risk Location Remediation for Road Accident Mitigation with an Economic Perspective (Case Study: Arak-Salafchegan Route)

Kamyar Saberi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Moahmoud Ameri, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Barat Mojaradi, Associate Professor, Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Mohammad Reza Khakbaz, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

E-mail: khakbaz9090@gmail.com

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

Road accidents pose a significant challenge to global transportation systems, particularly in developing countries where accident-prone areas substantially contribute to increased fatalities and economic losses. This study employed an integrated approach combining Bayesian modeling and the TOPSIS multi-criteria decision-making method to identify and prioritize high-risk zones along the Arak-Salafchegan route. Using two years of accident data, road geometric characteristics, weather conditions, and traffic factors, we applied Bayesian analysis to assess accident risks across different road segments, followed by safety and economic-based prioritization of critical points. Our findings reveal intersection density, proximity to residential/industrial areas, and driver inattention as the most significant risk factors. The study area was divided into 15 segments, with segments 9, 15, 1-2, and 11 identified as top priorities for safety interventions. Adverse weather conditions like fog were found to exacerbate accident risks. The research underscores the need for establishing a comprehensive accident database, incorporating cost-benefit analysis into decision-making, and implementing targeted safety measures. By integrating advanced statistical and multi-criteria methods, this study provides a scientifically robust framework for road safety improvement that can be adapted to other high-risk routes.

Keywords: Road Accidents, Accident-Prone Spots, Safety, Accident Prediction