

تخمین ضریب بهبود تصادف (CMF) نوارلرزاننده شانه در قوس‌های افقی راه‌های دوخطه دوطرفه برون‌شهری با استفاده از روش مقطعی (مطالعه موردی: استان لرستان)

مقاله علمی-پژوهشی

*حامد سیفی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hamedsaify@pnu.ac.ir

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

صفحه ۳۷۵-۳۸۸

چکیده

تصادفات خروج از راه یکی از مهم‌ترین انواع تصادفات در راه‌های برون‌شهری، به‌ویژه در قوس‌های افقی، محسوب می‌شوند و سهم قابل توجهی در تلفات و خسارات جاده‌ای دارند. نوارلرزاننده شانه راه به عنوان یکی از اقدامات کم‌هزینه و مؤثر ایمنی، نقش مهمی در کاهش این نوع تصادفات ایفا می‌کند. با این حال، میزان اثربخشی این اقدام تحت تأثیر شرایط هندسی، ترافیکی و محیطی هر منطقه قرار دارد و استفاده مستقیم از ضرایب بهبود تصادف (CMF) توسعه‌یافته در سایر کشورها یا مناطق، می‌تواند منجر به برآوردهای غیرواقعی شود. هدف این پژوهش، توسعه CMF بومی برای اجرای نوارلرزاننده شانه در قوس‌های افقی راه‌های دوخطه دوطرفه برون‌شهری استان لرستان با استفاده از روش مقطعی است. بدین منظور، داده‌های مربوط به ۱۰۰ قوس افقی شامل ۴۲ قوس دارای نوارلرزاننده و ۵۸ قوس فاقد نوارلرزاننده در بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ جمع‌آوری شد. داده‌های تصادفات خروج از راه از پلیس راه و اطلاعات هندسی و ترافیکی از اداره کل راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای اخذ گردید. در این مطالعه، فراوانی تصادفات خروج از راه به عنوان متغیر وابسته و متغیرهای میانگین حجم ترافیک سالانه (AADT)، شعاع قوس، طول قوس، عرض شانه و سرعت مجاز به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. همچنین وجود یا عدم وجود نوارلرزاننده به صورت متغیر ساختگی وارد مدل شد. مدل‌سازی با استفاده از رگرسیون دوجمله‌ای منفی و روش حداکثر درست‌نمایی انجام گرفت. نتایج نشان داد متغیر وجود نوارلرزاننده دارای اثر منفی و معنادار بر فراوانی تصادفات خروج از راه است، به گونه‌ای که مقدار CMF برابر با ۰/۶۸ برآورد شد که بیانگر کاهش حدود ۳۲ درصدی تصادفات پس از اجرای نوارلرزاننده است. همچنین متغیر شعاع قوس دارای اثر کاهشی و متغیر طول قوس دارای اثر افزایشی بر فراوانی تصادفات بودند. نتایج اعتبارسنجی نیز نشان داد مدل توسعه‌یافته از توان پیش‌بینی مناسبی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: ضریب بهبود تصادف (CMF)، نوارلرزاننده، قوس‌های افقی، راه‌های دوخطه دوطرفه

۱- مقدمه

کرده است (WHO, 2023). داده‌های سازمان بهداشت جهانی نشان می‌دهد که حدود ۹۰ درصد از این مصدومین در کشورهای با درآمد متوسط و پایین رخ می‌دهد. تقریباً نیمی از این فوتی‌ها مربوط به کاربران آسیب‌پذیر راه (عابران

ایمنی راه‌ها همچنان یک چالش جهانی حیاتی باقی مانده است؛ سازمان جهانی بهداشت سالانه حدود ۱/۲ میلیون مرگ‌ومیر ناشی از تصادفات رانندگی را گزارش می‌کند که آن را به یکی از دلایل اصلی مرگ‌ومیر در سراسر جهان تبدیل

Lee et al., 2015; Wu et al., 2015; Russo et al., 2016). با کاهش فراوانی و شدت تصادفات، CMFها به حداقل رساندن هزینه‌های اجتماعی-اقتصادی ناشی از تصادفات، از جمله هزینه‌های پزشکی، از دست رفتن بهره‌وری و تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از تأخیرهای مرتبط با تصادفات، کمک می‌کنند. روش‌های مختلفی برای توسعه CMFها در دسترس هستند که رایج‌ترین آن‌ها شامل مطالعات قبل و بعد ساده، مطالعات قبل و بعد با گروه‌های مقایسه، مطالعات قبل و بعد با بیز تجربی و روش‌های مقطعی است. هر رویکرد نقاط قوت منحصربه‌فردی برای بومی‌سازی مداخلات در زمینه‌های خاص ارائه می‌دهد و بدین ترتیب شبکه‌های حمل‌ونقل ایمن‌تر، پایدارتر و مقاوم‌تر را امکان‌پذیر می‌سازد. با این حال، ایمنی راه یک مفهوم پویا و پیچیده است، زیرا محیط رانندگی، شرایط ترافیکی و عوامل مؤثر همگی به هم پیوسته‌اند و نمی‌توان آن‌ها را به سرعت از هم جدا کرد.

در این راستا اهمیت در نظر گرفتن انواع مختلف تصادف هنگام توسعه CMFs موضوعی پرتکرار در پژوهش‌های این حوزه بوده است (Shahdah et al., 2014). تحلیل سناریوهای متمایز تصادف، از جمله تصادفات مرتبط با کامیون، موتورسیکلت، خروج از راه و غیره به پژوهشگران امکان می‌دهد تا مداخلاتی را توسعه دهند که برای مقابله با چالش‌های منحصربه‌فرد مرتبط با هر نوع تصادف کارایی داشته باشند (Khan et al., 2013). زیرا توسعه CMFs برای المان‌های خاص راه (مانند قوس‌های افقی، تقاطع‌ها، قطعات و غیره) در مطالعات مختلف نشان داده است که رویکرد «همه یا هیچ» در ارزیابی ایمنی مطلوب نیست و لازم است که CMF مربوط به هر اقدام ایمنسازی حتی در شرایط مختلف جغرافیایی و یا حوزه‌های مختلف قضایی (مانند ایالات مختلف) توسعه یابد (Kat et al., 2022; Rezapour et al., 2018; Lee et al., 2017). در نتیجه، مهم است که از CMFs متعدد حاصل از مطالعات و روش‌شناسی‌های

پیاده، دوچرخه‌سواران، موتورسواران، کودکان و سالمندان است (Jaber & Al-Sahili, 2023). در حال حاضر، آسیب‌های ناشی از تصادفات جاده‌ای شایع‌ترین علت مرگ‌ومیر در افراد ۵ تا ۲۹ ساله است و پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۳۰ به هفتمین علت اصلی مرگ‌ومیر تبدیل شود (WHO, 2022). بنابراین، ایمنی راه یکی از جدی‌ترین مسائل امروزه بهداشت عمومی جهانی است. تلاش‌ها برای حل این مسئله منجر به ابتکارات بین‌المللی نظیر «دیدگاه صفر» شده است که هدف آن حذف مرگ‌ومیرهای رانندگی از طریق استراتژی جامعی است که مهندسی، اجرا، آموزش و اصلاحات سیاسی را یکپارچه می‌کند. پیشرفت‌های فناوری، از جمله خودروهای متصل، روشنایی تطبیقی و سیستم‌های ایمنی خودکار، پتانسیل خود را در بهبود قابل‌توجه نتایج ایمنی به نمایش گذاشته‌اند. با این حال، موفقیت این اقدامات به شدت تحت تأثیر عوامل خاص زمینه‌ای، از جمله کیفیت زیرساخت، رفتار رانندگان و شرایط محیطی است. برای مقابله مؤثر با این چالش‌ها، اجرای مداخلات بومی که بر داده‌های محکم و خاص منطقه‌ای استوار باشند، ضروری است. این نیاز به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مانند ایران که با پویایی‌های منحصربه‌فرد ایمنی راه‌ها و فرصت‌های بهبود تأثیرگذار روبرو هستند، آشکارتر است.

تلاش‌های گسترده‌ای از سوی متخصصان حمل‌ونقل برای به‌کارگیری راهنمای ایمنی راه (HSM, 2010) در ایالات متحده و سراسر جهان صورت گرفته است که پتانسیل آن را در بهبود ایمنی راه‌ها و پشتیبانی از سیستم‌های حمل‌ونقل پایدار به رسمیت می‌شناسند. توسعه ضریب بهبود تصادف^۱ (CMF) نه تنها ابزارهای مؤثری را برای شناسایی و اجرای کارآمدترین اقدامات ایمنی از نظر هزینه در اختیار متخصصان قرار می‌دهد، بلکه به اهداف گسترده‌تر پایداری نیز کمک می‌کند (Vinayaraj & Perumal, 2023; Al-Marafi & Somasundaraswaran, 2023; Al-Marafi & Somasundaraswaran, 2020; Park et al., 2014; Wu & Lord, 2017; Wu et al., 2017; Wang et al., 2017).

مختلف برای ایجاد ارزیابی‌های ایمنی قوی‌تر و قابل اطمینان‌تر استفاده شود (Wu et al., 2017). برای مثال اگرچه توسعه CMF برای ایجاد نوارلرزاننده توسط شاهو و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه‌ای با روش بیزتجربی برای راه‌های برونشهری استان کردستان انجام گرفته است، با این حال توسعه CMF این اقدام در سایر استان‌ها و با سایر روش‌های موجود نه تنها منطقی بلکه لازم و ضروری است. اگرچه پرکاربردترین روش مورد استفاده در ایران برای توسعه CMF روش بیزتجربی است (جدول ۱)، با این حال در مواقعی لازم است که از سایر روش‌ها مانند روش مقطعی که

امروزه در دنیا به شکلی گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (Alarifi & Alkahtani, 2025; Al-Marafi et al., 2024; Zhang et al., 2024; Elagamy et al., 2020; Al-Marafi et al., 2020) نیز برای توسعه CMF‌های بومی استفاده شود. روش مقطعی زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که داده‌های تصادفات قبل و بعد از اجرای اقدام ایمنسازی و یا تاریخچه اقدام ایمنسازی در دسترس نیست (Galgamuwa, 2020). در این روش مدل‌های رگرسیونی (یا SPF) توسعه داده می‌شود و از ضریب اقدام ایمنسازی که خود یک متغیر در مدل است، برای توسعه CMF اقدام مورد نظر استفاده خواهد شد.

جدول ۱. پژوهش‌های مربوط به توسعه CMF در ایران

محققان	سال	روش توسعه CMF	اقدام ایمن‌سازی
بهنود و همکاران	۱۳۹۶	بیزتجربی	خطوط تندروری اتوبوس
کوهی و شعبانی	۱۳۹۹	گروه مقایسه	ایجاد روشنایی
توکلی‌کاشانی و همکاران	۱۳۹۹	ساده و ساده اصلاح شده	دوربین کنترل سرعت
حافظی و همکاران	۱۴۰۰	بیزتجربی	ایجاد روشنایی
شعبانی و کوهی	۱۴۰۰	بیزتجربی	بهسازی شانه
کوهی و شعبانی	۱۴۰۱	بیزتجربی	احداث میدان
کوهی و صفارزاده	۱۴۰۱	بیزتجربی	مجموعه‌ای از اقدامات
کوهی و شعبانی	۱۴۰۳	بیزتجربی	نصب حفاظ
شاهو و همکاران	۱۴۰۳	بیزتجربی	نوارلرزاننده
بهنود و سعادت‌فرد	۱۴۰۴	مطالعه مقطعی	افزایش شعاع قوس
سیفی	۱۴۰۴	بیزتجربی	بهبود خط کشی

در خصوص استفاده از مدل‌های رگرسیونی برای توسعه CMF، سریوانسان و بائر (Srinivasan & Bauer, 2013) پیشنهاد کردند که ضرایب متغیرهای موجود در توابع عملکرد ایمنی^۲ (SPFs) می‌تواند برای برآورد CMF مرتبط با یک اقدام خاص مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد پیش‌تر توسط هاروود و همکاران (Harwood et al., 2000) مورد انتقاد قرار گرفته است که اشاره کردند «مدل‌های رگرسیونی

ابزارهای بسیار دقیقی برای پیش‌بینی کل تصادفات مورد انتظار برای یک مکان یا دسته‌ای از مکان‌ها هستند، اما اثبات نشده است که در جداسازی اثرات ویژگی‌های هندسی یا کنترل ترافیک مجزا رضایت‌بخش باشند». سریوانسان و همکاران (Srinivasan et al., 2013) نتیجه گرفتند که در موقعیت‌هایی که ارزیابی‌های قبل و بعد امکان‌پذیر نیست، ضرایب متغیرهای موجود در SPF‌ها می‌تواند برای برآورد

(Meuleners et al., 2011) کاهش ۵۸ درصدی در کل تصادفات (یعنی CMF برابر ۰/۴۲) و حتی کاهش‌های بزرگ‌تری در تصادفات جرحی (کاهش ۸۰ درصدی که نشان‌دهنده CMF برابر ۰/۲ است) را پس از اجرای نوارهای لرزاننده کناری در غرب استرالیا گزارش کردند.

روش‌های مرور شده برای توسعه CMF تنوع رویکردها نشان می‌دهد که هر کدام برای زمینه‌ها و دسترسی به داده‌های خاص بومی‌سازی شده‌اند. اگرچه روش بیزتجربی در بسیاری از مطالعات به عنوان روش استاندارد توسعه CMF شناخته می‌شود، اما اجرای آن مستلزم دسترسی به داده‌های دقیق قبل و بعد، تاریخ اجرای کامل اقدامات ایمن‌سازی و وجود گروه‌های مقایسه مناسب است. در بسیاری از راه‌های برونشهری ایران، این داده‌ها به صورت کامل در دسترس نیست. در چنین شرایطی، روش مقطعی به عنوان یک رویکرد معتبر و مورد تایید مطالعات بین‌المللی، امکان توسعه CMF را با استفاده از داده‌های موجود فراهم می‌سازد (Park et al., 2015; Galgamuwa, 2020). علاوه بر این، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که مدل‌های مقطعی مبتنی بر رگرسیون دوجمله‌ای منفی در صورت کنترل مناسب متغیرهای هندسی و ترافیکی، توانایی قابل قبولی در برآورد اثربخشی اقدامات ایمنی دارند (Gross & Donnell, 2011).

با در نظر گرفتن موارد فوق و تغییرات قابل توجه در مقادیر CMF برای نوارهای لرزاننده شانه‌راه، ضرورت توسعه CMF بومی برای اطمینان از ارزیابی‌های دقیق و حساس به مناطق مختلف لازم است. این مطالعه در نظر دارد تا CMF بومی را برای این اقدام با استفاده از روش مقطعی (مدلسازی رگرسیونی) توسعه دهد. به همین منظور با توجه به خلاء مطالعاتی موجود در زمینه کاربرد روش مقطعی برای توسعه CMF نوارهای لرزاننده در ایران و نیز اهمیت تصادفات خروج از راه در راه‌های برونشهری، این مطالعه با هدف اصلی توسعه ضریب بهبود تصادف برای نوارهای لرزاننده شانه در قوس‌های افقی راه‌های دوخطه برونشهری استان لرستان طراحی شده است. بدین منظور محورهای منتخب استان لرستان که در بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ دستخوش عملیات

CMF مرتبط با یک اقدام خاص مورد استفاده قرار گیرد. روش مقطعی نیازمند توسعه مدل‌های پیش‌بینی تصادف (یعنی SPF) برای محاسبه CMF است. این مدل‌ها با استفاده از داده‌های تصادف برای سایت‌های اصلاح شده و اصلاح نشده برای دوره زمانی یکسان توسعه می‌یابند.

از آنجا که یکی از انواع تصادفات مهم در حوزه ایمنی راه، تصادفات خروج از راه است (کوهی و شعبانی، ۱۴۰۳) و همچنین یکی از مهمترین اقدامات ایمنسازی در جهت کاهش این نوع تصادفات، اجرای نوارلرزاننده کناری (یا طولی) به خصوص در قوس‌های افقی راه‌های دوخطه برونشهری است، تمرکز این مطالعه بر توسعه CMF این اقدام در المان جاده‌ای ذکر شده (قوس‌های افقی) است. نوارهای لرزاننده شانه‌راه به عنوان یک اقدام ایمنی اثبات شده و مؤثر در نظر گرفته می‌شوند، زیرا لرزش را به رانندگان تحمیل می‌کنند که به کنترل، بازیابی و جلوگیری برای خروج از راه کمک می‌کند. وو و همکاران (Wu et al., 2014) دریافتند که نوارهای لرزاننده شانه‌راه تصادفات را ۷ درصد کاهش می‌دهند. پاتل و همکاران (Patel et al., 2007) نشان دادند که نوارهای لرزاننده شانه، ایمنی راه را برای تصادفات خروج از راه در کل تصادفات به میزان ۱۳ درصد و در تصادفات منجر به فوت و جرح به میزان ۱۸ درصد بهبود بخشیده‌اند. کاراسکو و همکاران (Carrasco et al., 2004) بیان نمودند که نوارهای لرزاننده شانه‌راه تصادفات خروج از راه را ۲۰ تا ۷۲ درصد کاهش داده است.

از مرور ادبیات در خصوص توسعه CMF، روش‌های مورد استفاده و بطور خاص اقدام ایمنسازی نوارلرزاننده، موارد زیر مشخص شد:

-مطالعات بین‌المللی پیشین تنوع قابل توجهی را در مقادیر CMF برای نوارهای لرزاننده شانه‌راه نشان داده‌اند که بسته به نوع راه، نوع تصادف، شرایط محیطی و رویکرد روش‌شناختی متفاوت است. برای مثال، توربیک و همکاران (Torbic, 2009) مقدار CMF را برابر با ۰/۸۴ برای اجرای نوارلرزاننده در راه‌های دوخطه برونشهری در ایالات متحده گزارش کردند. با این حال، مقادیر CMF بسیار پایین‌تری در زمینه‌های دیگر گزارش شده است: میلی‌نر و همکاران

نوار لرزاننده و محل‌های اجرا شده از اداره کل راه‌داری و حمل و نقل جاده‌ای استان لرستان اخذ شد. با توجه به داده‌های موجود جمع‌آوری شده و بر اساس مطالعات پیشین (HSM, 2010; Lord & Mannering, 2010) متغیرهای مناسب برای مدل‌سازی انتخاب شد. در این راستا فراوانی تصادفات خروج از راه سالیانه به ازای هر قوس افقی به عنوان متغیر وابسته و متغیرهای AADT، طول قوس افقی (بر حسب کیلومتر)، شعاع قوس افقی (بر حسب متر)، عرض شانه راه (بر حسب متر) و سرعت مجاز در آن قطعه (کیلومتر بر ساعت) به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. همچنین اقدام ایمن‌سازی اجرای نوار لرزاننده به عنوان متغیر ساختگی (صفر و یک) بصورت وجود یا عدم وجود نوار لرزاننده شانه راه (۱ = دارای نوار لرزاننده، ۰ = بدون نوار لرزاننده) در مدل وارد شد. آمار توصیفی متغیرهای مدنظر در جدول (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود، میانگین تصادفات خروج از راه در مقاطع دارای نوار لرزاننده کمتر از مقاطع بدون نوار لرزاننده است، اما برای اطمینان از معناداری این تفاوت و کنترل اثر متغیرهای مخدوشگر، نیاز به مدل‌سازی رگرسیونی است.

ایمن‌سازی با اجرای نوارهای لرزاننده شده‌اند به عنوان مطالعه موردی انتخاب شدند (یادآور می‌شود که اطلاعات قبل و بعد از اجرای نوار لرزاننده در این دوره در دسترس نیست که انجام مطالعه مقطعی را توجیه می‌نماید). در این مطالعه، با بهره‌گیری از روش مقطعی و مدل‌سازی رگرسیون دوجمله‌ای منفی، تاثیر این اقدام بر کاهش فراوانی تصادفات خروج از راه، مستقل از سایر متغیرهای هندسی و ترافیکی، کمی‌سازی خواهد شد.

۲- داده‌ها و متغیرهای مطالعه

۲-۱- محدوده مورد مطالعه و داده‌ها

در این مطالعه، کلیه مقاطع قوس افقی راه‌های دوخطه برونشهری استان لرستان (شامل محورهای خرم‌آباد-پلدختر، بروجرد-ملایر، الیگودرز-شازند و نورآباد-نهاد) که دارای حجم ترافیک سالانه و اطلاعات هندسی کامل بودند، مورد بررسی قرار گرفتند. داده‌های تصادفات خروج از راه برای یک دوره پنج ساله (۱۳۹۸-۱۴۰۲) از پلیس راه استان جمع‌آوری گردید. مقاطع دارای نوار لرزاننده (گروه هدف) که در این بازه زمانی اجرا شده بودند، با مقاطع بدون نوار لرزاننده (گروه کنترل) مقایسه شدند. اطلاعات مربوط به

جدول ۲. آمار توصیفی متغیرهای مورد استفاده برای مدل‌سازی

متغیر	وضعیت نوار لرزاننده	تعداد مقاطع	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
تصادفات خروج از راه (سالانه)	دارای نوار لرزاننده	۴۲	۱/۲۴	۱/۱۳	۰	۵
	بدون نوار لرزاننده	۵۸	۲/۶۷	۲/۰۱	۰	۹
Ln (AADT)	دارای نوار لرزاننده	۴۲	۸/۹۴	۰/۶۵	۷/۸۲	۱۰/۲۱
	بدون نوار لرزاننده	۵۸	۸/۷۶	۰/۷۱	۷/۶۴	۹/۹۸
شعاع قوس (متر)	دارای نوار لرزاننده	۴۲	۲۴۵/۳	۹۸/۴	۱۲۰	۶۵۰
	بدون نوار لرزاننده	۵۸	۳۱۲/۷	۱۳۵/۶	۱۵۰	۸۰۰
عرض شانه (متر)	دارای نوار لرزاننده	۴۲	۱/۸۲	۰/۴۳	۱	۲/۵
	بدون نوار لرزاننده	۵۸	۱/۶۵	۰/۵۱	۰/۸	۲/۲

۲-۲- بررسی همبستگی بین متغیرها

برای جلوگیری از پدیده چندهمخطی که باعث ناپایدار شدن برآورد ضرایب رگرسیون میشود، ماتریس همبستگی پیرسون بین متغیرهای مستقل محاسبه گردید. نتایج نشان داد که حداکثر همبستگی بین دو متغیر شعاع قوس و سرعت مجاز برابر ۰/۶۲ است. از آنجا که این مقدار کمتر از آستانه بحرانی ۰/۷ (Gujarati, 2022) است، مشکل چندهمخطی شدیدی بین متغیرهای مستقل وجود ندارد. همچنین علاوه بر آستانه مذکور، از شاخص تورم واریانس^۳ (VIF) نیز برای بررسی چندهمخطی استفاده شد. اگر مقدار این سنجه آماری بیشتر از ۵ باشد نشان‌دهنده وجود شدید بین متغیرهاست (Gujarati, 2022). مقدار VIF برای تمامی متغیرها کمتر از ۴ محاسبه شد که بیانگر عدم وجود همخطی قابل توجه است.

۳- روش مطالعه مقطعی

روش متداول برای برآورد CMF زمانی که اطلاعات دقیقی از داده‌های تصادفات قبل و بعد و همچنین تاریخچه دقیق اجرای اقدامات ایمن‌سازی وجود ندارد، روش مطالعه مقطعی است (Galgamuwa, 2020). رویکردی که به طور رایج برای برآورد CMF با استفاده از روش مقطعی به کار می‌رود، توسعه مدل‌های رگرسیون خطی با فرض توزیع خطای دوجمله‌ای منفی است (Gross & Donnell, 2011). در اینجا، اقدام ایمن‌سازی مورد نظر برای تصادفات خروج از راه (نوارلرزانده) و سایر ویژگی‌های هندسی راه و ترافیک به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند. سپس، پارامترهای رگرسیون برآوردشده برای اقدام ایمن‌سازی مورد نظر، برای برآورد CMF به کار می‌روند. قبل از توسعه مدل، مجموعه داده به صورت تصادفی به دو بخش ۷۰ درصد برای توسعه مدل و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی دقت مدل توسعه یافته تقسیم شد. از آنجا که مدل لگاریتمی دوجمله‌ای منفی، مدل رایج در تخمین CMF به روش مقطعی است (Zhang et al., 2024; Gross & Donnell 2011) در این پژوهش

نیز از مدل لگاریتمی دوجمله‌ای منفی استفاده شد. فرم کلی این مدل به شرح معادله (۱) است (Montgomery et al. 2015).

$$\ln y = x\beta + \varepsilon_i \quad (1)$$

که y تعداد تصادفات، β بردار پارامترهای رگرسیون تخمینی متناظر با متغیرهای مستقل مربوط به طرح هندسی و حجم ترافیک است. x ماتریس متغیرهای مستقل مدل و ε_i عبارت خطای مدل است. رابطه بین میانگین و واریانس توزیع دوجمله‌ای منفی را می‌توان مطابق معادله (۲) توضیح داد (Poch & Mannering, 1996):

$$\text{var}(y) = E(y) + kE(y)^2 \quad (2)$$

که $\text{var}(y)$ واریانس تصادفات مشاهده‌شده، $E(y)$ فراوانی تصادفات موردانتظار (μ) و k پارامتر بیش‌پراکندگی هستند. همچنین روش حداکثر درست‌نمایی، ضرایب مدل رگرسیون خطی را مطابق با معادله (۳) برآورد می‌کند (Montgomery et al. 2015).

$$L(y, x, \beta, \sigma^2) = \frac{1}{2\sigma^2 n/2} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (y - \mu)^2 \right] \quad (3)$$

پیش از توسعه مدل، باید داده‌های پرت شناسایی شوند، زیرا می‌توانند برازش مدل را تحت تأثیر قرار دهند. در برخی موارد، اگر برازش مدل مطلوب نباشد یا متغیرهای بسیاری بی‌معنی شوند، باید با داده‌های پرت برخورد کرد تا برازش مدل بهبود یابد. روشی که به‌طور رایج برای شناسایی داده‌های پرت در یک مجموعه داده استفاده می‌شود، محاسبه فاصله کوک با مقایسه مقادیر برازش‌شده با مقادیر برازش‌شده متناظر هنگام حذف یک مورد در برازش مدل رگرسیون است (Kutner et al. 2004). اگر فاصله کوک هر نقطه داده بیشتر از ۱ باشد، آن نقطه به عنوان داده پرت در نظر گرفته می‌شود (Montgomery et al. 2015). بنابراین، فاصله کوک برای متغیر وابسته (تعداد تصادفات سالیانه) برای تحلیل داده‌های پرت محاسبه شد. روش گام‌به‌گام برای انتخاب متغیرهای

۴-۲- اعتبارسنجی مدل

مدل نهایی بر روی مجموعه آزمون (۳۰ قطعه) اعتبارسنجی شد. میانگین باقیمانده‌ها برابر ۰/۰۳۲- محاسبه گردید که بسیار نزدیک به صفر است. همچنین مقدار میانگین مربعات خطا (MSE) برای مجموعه آزمون برابر ۰/۸۹ و برای مجموعه آموزش برابر ۰/۹۱ بود. نزدیکی این دو مقدار نشان‌دهنده عدم بیش‌برازش و توانایی پیش‌بینی خوب مدل است. علاوه بر معیارهای اعتبارسنجی فوق، شاخص‌های برازش مدل نیز مورد بررسی قرار گرفتند. مقدار لگاریتم درستنمایی مدل برابر ۸۴/۰۰-، آماره LR Chi-Square برابر ۳۱/۴۲ و سطح معناداری آن کمتر از ۰/۰۰۱ به دست آمد که نشان‌دهنده معناداری کلی مدل است. همچنین مقادیر AIC و BIC به ترتیب برابر با ۱۷۶/۲۰ و ۱۸۸/۵۰ محاسبه شدند که بیانگر برازش مناسب مدل دوجمله‌ای منفی برای داده‌های مورد مطالعه است. مقدار $Pseudo R^2$ نیز برابر ۰/۲۷ برآورد شد که برای مدل‌های داده شمارشی در مطالعات ایمنی راه قابل قبول است.

جدول ۳. شاخص‌های برازش مدل

شاخص	مقدار
تعداد مشاهدات	۷۰
لگاریتم درستنمایی	-۸۴/۰۰
LR Chi-Square	۳۱/۴۲
$Prob > Chi^2$	$0/001 >$
$Pseudo R^2$	۰/۲۷
AIC	۱۷۶/۲۰
BIC	۱۸۸/۵۰
MSE (آموزش)	۰/۹۱
MSE (آزمون)	۰/۸۹
خطای میانگین باقی‌مانده‌ها	-۰/۰۳۲
پارامتر بیش‌پراکندگی	۰/۲۸۳

معنادار از میان متغیرهای کاندید برای توسعه مدل‌ها استفاده شد. تعداد تصادفات در سال به ازای هر قطعه به عنوان متغیر وابسته انتخاب شد و متغیرهای از پیش انتخاب‌شده به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند تا مدل‌های رگرسیون مطابق با معادله (۱) توسعه یابند. اعتبارسنجی مدل با استفاده از دو شاخص اصلی و رایج میانگین باقیمانده‌ها و میانگین مربعات خطا^۴ (MSE)، پس از برازش مدل تخمین‌زده‌شده، با استفاده از مجموعه داده اعتبارسنجی انجام خواهد شد.

اگر میانگین باقیمانده‌ها تقریباً برابر با صفر باشد و MSE محاسبه‌شده با استفاده از مجموعه داده اعتبارسنجی تقریباً برابر با MSE مدل باشد، مدل به عنوان یک مدل خوب برای پیش‌بینی تصادفات خروج از راه در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این دو شاخص، از سایر شاخص‌های در دسترس مانند لگاریتم درستنمایی، $Pseudo R^2$ ، LR Chi-Square، AIC و BIC نیز استفاده خواهد شد.

۴- نتایج

۴-۱- فرآیند تخمین مدل

ابتدا ۱۰۰ قطعه قوس (شامل ۴۲ قطعه دارای نوارلرزاننده و ۵۸ قطعه بدون نوارلرزاننده) به صورت تصادفی به دو مجموعه آموزش (۷۰ درصد یا ۷۰ قطعه) و آزمون (۳۰ درصد یا ۳۰ قطعه) تقسیم شدند. مدل رگرسیون دوجمله‌ای منفی با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی^۵ (MLE) در نرم‌افزار Stata 17 بر روی مجموعه آموزش برازش داده شد. پس از برازش اولیه، داده‌های پرت با استفاده از معیار فاصله کوک شناسایی شدند. هیچ قطعه‌ای با فاصله کوک بیشتر از ۱ یافت نشد (بازه ۰/۰۰ تا ۰/۶۳). سپس با استفاده از روش گام‌به‌گام رو به جلو، متغیرهای غیرمعنادار ($p\text{-value} > 0/1$) حذف شدند. مدل نهایی شامل متغیرهای وجود نوارلرزاننده، $\ln(AADT)$ ، شعاع قوس و طول قوس بود.

۴-۳- ضرایب مدل و محاسبه CMF

نتایج تخمین مدل نهایی رگرسیون دوجمله‌ای منفی در جدول (۳) ارائه شده است. براساس نتایج، ضریب نوارلرزاننده برابر با $-0/386$ برآورد شده است. لازم به ذکر است که متغیرهای شعاع و طول قوس برای بهبود مقیاس ضرایب بر حسب کیلومتر وارد مدل شده‌اند (به دلیل بهبود قابلیت تفسیرپذیری ضرایب و جلوگیری از اعداد بسیار کوچک در خروجی مدل).

همانگونه که در جدول (۳) مشاهده می‌گردد، ضریب متغیر وجود نوارلرزاننده منفی و از نظر آماری در سطح ۹۹ درصد معنادار است ($p\text{-value} < 0/001$). این نشان می‌دهد که نصب نوارلرزاننده به طور معناداری فراوانی تصادفات خروج از راه را کاهش داده است. مقدار CMF در مطالعات مقطعی بر اساس ضریب متغیر اقدام ایمن‌سازی و به صورت محاسبه می‌شود. با این تعریف، مقدار CMF برای اجرای نوارلرزاننده

کناری (طولی) برابر $0/68$ است (کاهش ۳۲ درصدی تصادفات). این مقدار با مقادیر گزارش شده توسط توربیک و همکاران (Torbic, 2009) متفاوت و به مقادیر گزارش شده توسط میلینرز و همکاران (Meuleners et al., 2011) نزدیکتر است، که نشان دهنده تأثیر بیشتر این اقدام در شرایط بومی (راه‌های کوهستانی و پرپیچ استان لرستان) است. اما نتیجه به دست آمده به تنها پژوهش مرتبط داخلی (شاهو و همکاران، ۱۴۰۳) که اثربخشی این اقدام را $33/38$ درصد با استفاده از روش بیزتجربی برای استان کردستان برآورد نموده‌اند، بسیار نزدیک است. با توجه به نزدیک بودن نتیجه پژوهش حاضر با پژوهش داخلی پیشین، متولیان ایمنی راه‌های برونشهری با اطمینان بیشتری می‌توانند درصد اثربخشی اجرای نوارلرزاننده طولی در قوس‌های افقی را حدود ۷۰ درصد در نظر بگیرند که در مدیریت ایمنی و اولویت‌بندی اقدامات ایمن‌سازی با توجه به بودجه اندک ایمنی راه، بسیار مهم است.

جدول ۳. نتایج مدل رگرسیون دوجمله‌ای منفی برای پیش‌بینی تصادفات خروج از راه در قوس‌های افقی راه‌های دوخطه برونشهری

متغیر	ضریب (β)	خطای استاندارد	آماره Z	P-value	CMF (فاصله اطمینان ۹۵ درصد)
Intercept	-۲/۴۵۱	۱/۲۰۴	-۲/۰۴	۰/۰۴۱	-
وجود نوارلرزاننده	-۰/۳۸۶	۰/۱۰۷	-۳/۶۱	۰/۰۰۰	$(0/0-81/55) 0/68$
Ln (AADT)	۰/۵۱۲	۰/۱۳۴	۳/۸۲	۰/۰۰۰	-
شعاع قوس (کیلومتر)	-۰/۳۹۲	۰/۱۸۱	-۲/۱۷	۰/۰۳۰	-
طول قوس (کیلومتر)	۰/۰۸۴	۰/۰۴۱	۲/۰۵	۰/۰۴۰	-
پارامتر بیش‌پراکندگی	۰/۲۸۳	۰/۰۷۶	-	۰/۰۰۰	-

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف توسعه ضریب بهبود تصادف (CMF) بومی برای اجرای نوارلرزاننده شانه در قوس‌های افقی راه‌های دوخطه دوطرفه برونشهری استان لرستان با استفاده از روش مقطعی انجام شد. بدین منظور، داده‌های مربوط به ۱۰۰ قوس

افقی شامل ۴۲ قوس دارای نوارلرزاننده و ۵۸ قوس فاقد نوارلرزاننده در بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۲ گردآوری و با استفاده از مدل رگرسیون دوجمله‌ای منفی تحلیل شد. نتایج نشان داد که متغیر وجود نوارلرزاننده دارای اثر منفی و معنادار

مقدار لگاریتم درستنمایی و شاخص‌های AIC و BIC نیز مناسب بودن مدل دوجمله‌ای منفی برای داده‌های مورد مطالعه را تأیید نمودند.

از منظر کاربردی، نتایج این پژوهش می‌تواند در فرآیند مدیریت ایمنی راه و اولویت‌بندی پروژه‌های ایمن‌سازی مورد استفاده سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای قرار گیرد. در شرایط محدودیت منابع مالی، استفاده از CMF بومی توسعه‌یافته این امکان را فراهم می‌سازد که اجرای نوارلرزانده در قوس‌های افقی پرخطر با دقت بیشتری اولویت‌بندی شده و اثربخشی سرمایه‌گذاری‌های ایمنی افزایش یابد.

با وجود نتایج قابل قبول، مطالعه حاضر دارای محدودیت‌هایی نیز بود. محدود بودن حجم نمونه، عدم دسترسی به برخی متغیرهای مؤثر نظیر شیب طولی، بریلندی، وضعیت روسازی، شرایط جوی و درصد وسایل نقلیه سنگین از جمله مهم‌ترین محدودیت‌های پژوهش محسوب می‌شود. همچنین در این مطالعه تفکیک شدت تصادفات (فوتی، جرحی و خسارتی) انجام نشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، توسعه CMF برای انواع شدت تصادفات و نیز استفاده از داده‌های گسترده‌تر در سایر استان‌های کشور مورد بررسی قرار گیرد. همچنین مقایسه مستقیم روش مقطعی و روش بیزتجربی در شرایط بومی ایران می‌تواند زمینه مناسبی برای توسعه مطالعات آینده در حوزه ارزیابی اثربخشی اقدامات ایمنی راه فراهم آورد.

۶- پانویس‌ها

1. Crash Modification Factor
2. Safety Performance Function
3. Variance Inflation Factor
4. Mean Squared Error
5. Maximum Likelihood Estimation

بر فراوانی تصادفات خروج از راه بوده و اجرای این اقدام ایمنی موجب کاهش قابل توجه تصادفات شده است.

بر اساس ضریب برآوردشده متغیر نوارلرزانده، مقدار CMF برابر با ۰/۶۸ محاسبه شد که بیانگر کاهش حدود ۳۲ درصدی تصادفات خروج از راه پس از اجرای نوارلرزانده است. این یافته نشان می‌دهد که نوارلرزانده شانه می‌تواند به عنوان یکی از مؤثرترین و اقتصادی‌ترین اقدامات ایمنی در قوس‌های افقی راه‌های برون‌شهری مورد استفاده قرار گیرد. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات داخلی و بین‌المللی نیز نشان داد که میزان اثربخشی این اقدام در شرایط هندسی و توپوگرافی استان لرستان نسبت به برخی مطالعات خارجی بیشتر بوده و این موضوع اهمیت توسعه CMF بومی را آشکار می‌سازد. نزدیکی نتایج این پژوهش با مطالعه شاهو و همکاران (۱۴۰۳) نیز اعتبار یافته‌های پژوهش حاضر را در شرایط جغرافیایی مشابه تقویت می‌کند.

همچنین نتایج مدل‌سازی نشان داد که متغیر شعاع قوس دارای اثر منفی و متغیر طول قوس دارای اثر مثبت بر فراوانی تصادفات خروج از راه هستند. این یافته با اصول مهندسی ایمنی راه هم‌خوانی دارد، زیرا افزایش شعاع قوس موجب کاهش تندی مسیر و کاهش احتمال از دست رفتن کنترل وسیله نقلیه می‌شود، در حالی که افزایش طول قوس می‌تواند مدت قرارگیری راننده در شرایط هندسی پرخطر را افزایش دهد. علاوه بر این، متغیر AADT نیز دارای اثر مثبت و معنادار بر فراوانی تصادفات بود که نشان‌دهنده افزایش مواجهه وسایل نقلیه با خطر تصادف در حجم‌های ترافیکی بالاتر است.

اعتبارسنجی مدل توسعه‌یافته بیانگر عملکرد مناسب مدل در پیش‌بینی تصادفات بود؛ به گونه‌ای که میانگین باقی‌مانده‌ها نزدیک به صفر و مقادیر MSE در مجموعه آموزش و آزمون بسیار نزدیک به یکدیگر به دست آمدند که نشان‌دهنده عدم بیش‌برازش و قابلیت تعمیم مناسب مدل است. همچنین شاخص‌های برازش مدل شامل آماره LR Chi-square،

۷- مراجع

- کوهی، محمد؛ شعبانی، شاهین. (۱۴۰۳). ارزیابی اثربخشی حفاظ ایمنی در کاهش شدت تصادفات خروج از راه، *فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل*، سال بیست و یکم، دوره چهارم، شماره ۸۱، زمستان. ۱۷۰-۱۶۱.

- کوهی، محمد؛ صفارزاده، محمود. (۱۴۰۱). اثربخشی اجرای همزمان اقدامات اصلاحی در نقاط پرتصادف (مطالعه موردی: محور ملایر- جوکار)، *فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل*، سال نوزدهم، دوره دوم، شماره ۷۱، تابستان. ۱۶۰-۱۴۹.

Alarifi, S., & Alkahtani, K. (2025). Evaluating the safety and cost-effectiveness of shoulder rumble strips and road lighting on freeways in Saudi Arabia. *Sustainability*, 17(15), 6868.

-Al-Marafi, M. N., Alhadidi, T. I., Alhawamdeh, M., & Jaber, A. (2024). Enhancing road safety strategies through applying combined treatments for different crash severity. *Urban Science*, 8(3), 109-110.

-Al-Marafi, M.N., Somasundaraswaran, K. (2023). A review of the state-of-the-art methods in estimating crash modification factor (CMF). *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.* 20, 100839.

-Al-Marafi, M.N. Somasundaraswaran, K. Ayers, R. (2020). Developing crash modification factors for roundabouts using a cross-sectional method. *J. Traffic Transp. Eng. English Ed.* 7, 362-374.

-Carrasco, O. McFadden, J. Chandhok, P. Patel, R. (2004). Evaluation of the effectiveness of shoulder rumble strips on rural multilane divided highways in Minnesota. In *Proceedings of the 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC, USA, 11-15 January.

-Elagamy, S, R., El-Badawy, Sh, M., Shwaly, S, A., Zidan, Z, M., and Shahdah, U., (2020). Segmentation Effect on the Transferability of International Safety Performance Functions for Rural Roads in Egypt, *Safety*, 6, 43.

-Galgamuwa, U. Vahl, C.I. (2020). Dissanayake, S. Role of driver behaviors and environmental characteristics in evaluating safety effectiveness of roadway countermeasures:

- بهنود، حمیدرضا؛ زمانی، ساسان؛ نادران، علی (۱۳۹۶). اثربخشی احداث خطوط اتوبوس تندرو بر فراوانی تصادف در بزرگراه‌های شهری (مطالعه موردی بزرگراه رسالت تهران)، *فصلنامه مهندسی حمل و نقل*، سال دهم، شماره سوم، بهار. ۶۱۵-۶۰۳.

- بهنود، حمیدرضا؛ سعادت‌نورد، سیدعلی. (۱۴۰۴). اثربخشی ایمنی اصلاح قوس‌های افقی تیز در راه‌های برونشهری کوهستانی و تپه‌ماهوری، *فصلنامه علمی جاده*، سال بیست و سوم، دوره دوم، شماره ۱۲۳، تابستان. ۵۰۷-۴۹۷.

- توکلی کاشانی، علی؛ بختی، بهاره؛ محمدزاده مقدم، ابوالفضل. (۱۳۹۹). محاسبه ضریب اصلاح تصادف (CMF) دوربین‌های کنترل سرعت بزرگراهی شهر مشهد، *فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل*، سال هفدهم، دوره چهارم، شماره ۶۵، زمستان. ۹۶-۸۹.

- حافظی، علی؛ بهنود، حمیدرضا. (۱۴۰۰). اثربخشی ایمنی پروژه‌های روشنایی در راه‌های برونشهری، *فصلنامه مهندسی حمل و نقل*، سال سیزدهم، شماره اول، پاییز. ۱۱۷۸-۱۱۶۳.

- سیفی، حامد. (۱۴۰۴). ارزیابی تاثیر ایمنی بهبود خط‌کشی در تصادفات راه‌های برونشهری (مطالعه موردی: محور شهرضا-سمیرم)، *فصلنامه علمی جاده*، سال بیست و سوم، دوره سوم، شماره ۱۲۴، پاییز. ۳۸۴-۳۷۷.

- شاهو، دستور؛ بهنود، حمیدرضا؛ عبدی کردانی، علی؛ مرادی، فرزاد. (۱۴۰۳). اثربخشی ایمنی نصب شیارهای لرزاننده طولی در راه‌های شریانی برونشهری، *مجله راهور*، پیاپی ۴۹، ۳۴-۱.

- شعبانی، شاهین؛ کوهی، محمد. (۱۴۰۰). تخمین ضریب بهبود تصادف برای بهسازی شانه راه با توسعه مدل پیشبینی تصادف به روش بیزتجربی، *فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل*، سال هجدهم، دوره چهارم، شماره ۶۹، زمستان. ۷۰-۵۹.

- کوهی، محمد؛ شعبانی، شاهین. (۱۳۹۹). ارزیابی اثربخشی ایجاد روشنایی در کاهش تصادفات شبانه راه‌های برونشهری، *فصلنامه علمی جاده*، سال هجدهم، شماره ۱۰۴، دوره سوم، پاییز. ۸۲-۶۹.

- کوهی، محمد؛ شعبانی، شاهین. (۱۴۰۱). ارزیابی تاثیر ایمنی میدان در کاهش تصادفات تقاطع، *فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل*، سال نوزدهم، دوره اول، شماره ۷۰، بهار. ۱۲-۱.

- Improvements at Signalized and Stop-Controlled Intersections. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 2636, 80–87.
- Lee, C. Abdel-Aty, M.; Park, J. Wang, J. H. (2015). Development of crash modification factors for changing lane width on roadway segments using generalized nonlinear models. *Accid. Anal. Prev.*, 76, 83–91.
- Meuleners, L. Hendrie, D. Lee, A.H. (2011). Effectiveness of sealed shoulders and audible edge lines in Western Australia. *Traffic Inj. Prev.*, 12, 201–205.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., Vining. G. G. (2015). Introduction to Linear Regression Analysis. *John Wiley and Sons*, Hoboken, NJ.
- Park, J. Abdel-Aty, M. Lee, C. (2014). Exploration and comparison of crash modification factors for multiple treatments on rural multilane roadways. *Accid. Anal. Prev.* 70, 167–177.
- Park, J. Abdel-Aty, M. Lee, J. (2015). Developing crash modification functions to assess safety effects of adding bike lanes for urban arterials with different roadway and socio-economic characteristics. *Accid. Anal. Prev.* 74, 179–191.
- Patel, R.B. Council, F.M.; Griffith, M.S. (2007). Estimating safety benefits of shoulder rumble strips on two-lane rural highways in Minnesota: Empirical Bayes observational before-and-after study. *Transp. Res. Rec.* 2007, 205–211.
- Poch, M., Mannering, F., (1996). Negative binomial analysis of intersection-accident frequencies. *J. Transp. Eng. Asce* 122 (2), 105–113.
- Rezapour, M. Wulff, S.S. Ksaibati, K. (2018). Predicting Truck At-Fault Crashes Using Crash and Traffic Offence Data. *Open Transp. J.*, 12, 128–138.
- A novel approach of estimating crash modification factors. *J. Transp. Saf. Secur.*, 12, 764–781.
- Gross, F. Donnell. E. T. (2011). Case-Control and Cross-Sectional Methods for Estimating Crash Modification Factors: Comparisons from Roadway Lighting and Lane and Shoulder Width Safety Effect Studies. *Journal of Safety Research*, Vol. 42, No. 2, 117–129.
- Gujarati, D. N. (2022). Essential of Econometrics (5th ed). *SAGE Publications*.
- Harwood, D.W. Council, F.M. Hauer, E. Hughes, W.E. Vogt, A.J.B.T. (2000). Prediction of the Expected Safety Performance of Rural Two-Lane Highways; No. FHWA-RD-99-207, MRI 4584-09, Technical Report; *Federal Highway Administration: Washington, DC, USA*.
- HSM (2010). Highway Safety Manual; AASHTO: Washington, DC, USA.
- Jaber, A. Al-Sahili, K. (2023). Severity of Pedestrian Crashes in Developing Countries: Analysis and Comparisons Using Decision Tree Techniques. *SAE Int. J. Transp. Saf.* 11, 307–320.
- Kay, J. Gates, T.J. Savolainen, P.T. Mahmud, S. (2022). Safety Performance of Unsignalized Median U-Turn Intersections. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 2676, 451–466.
- Khan, G. Bill, A.R.; Chitturi, M.V. Noyce, D.A. (2013). Safety Evaluation of Horizontal Curves on Rural Undivided Roads. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 2386, 147–157.
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C., Neter. J. (2004). Applied Linear Regression Models. *McGraw Hill/Irwin*, New York, NY.
- Le, T.Q. Gross, F. Harmon, T. (2017). Safety Effects of Low-Cost Systemic Safety

- WHO, (2022). Road Traffic Injuries; WHO: Geneva, Switzerland.
- World Health Organization. (2023). Global Status Report on Road Safety 2023: Summary; *World Health Organization*: Geneva, Switzerland.
- Wu, K.F. Donnell, E.T. Aguero-Valverde, J. (2014). Relating crash frequency and severity: Evaluating the effectiveness of shoulder rumble strips on reducing fatal and major injury crashes. *Accid. Anal. Prev.*, 67, 86–95.
- Wu, L. Lord, D. Geedipally, S.R. (2017), Developing Crash Modification Factors for Horizontal Curves on Rural Two-Lane Undivided Highways Using a Cross-Sectional Study. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 2636, 53–61.
- Wu, L. Lord, D. Zou, Y. (2015). Validation of crash modification factors derived from cross-sectional studies with regression models. *Transp. Res. Rec.*, 2514, 88–96.
- Zhang, L., Huang, Zh., Kuang, A., Jie Yu, J., Cai, M., (2024). Estimation of Crash Modification Factors (CMFs) in Mountain Freeways: Considering Temporal Instability in Crash Data, *Sustainability*, 16, 5068.
- Zhang, L., Huang, Zh., Kuang, A., Jie Yu, J., Cai, M., (2024). Estimation of Crash Modification Factors (CMFs) in Mountain Freeways: Considering Temporal Instability in Crash Data, *Sustainability*, 16, 5068.
- Russo, B.J.; Savolainen, P.T.; Gates, T.J. (2016). Development of Crash Modification Factors for Installation of High-Tension Cable Median Barriers. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 2588, 116–125.
- Shahdah, U. Saccomanno, F. Persaud, B. (2014). Integrated Traffic Conflict Model for Estimating Crash Modification Factors. *Accid. Anal. Prev.*, 71, 228–235.
- Srinivasan, R.; Bauer, K.M. (2013). Safety Performance Function Development Guide: Developing Jurisdiction-Specific SPFs; No. FHWA-SA-14 005; Federal Highway Administration, *Office of Safety*: Washington, DC, USA.
- Srinivasan, R. Carter, D.; Bauer, K.M. (2013). Safety Performance Function Decision Guide: SPF Calibration vs. SPF Development; No. FHWA-SA-14-004; *Federal Highway Administration, Office of Safety*: Washington, DC, USA.
- Torbic, D.J. (2009). Guidance for the Design and Application of Shoulder and Centerline Rumble Strips; NCHRP Report 641; *Transportation Research Board*: Washington, DC, USA.
- Vinayaraj, V.S. Perumal, V. (2023). Developing Safety Performance Functions and Crash Modification Factors for Urban Roundabouts in Heterogeneous Non-Lane-Based Traffic Conditions. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 2677, 644–661.
- Wang, J. H. Abdel-Aty, M. Wang, L. (2017). Examination of the reliability of the crash modification factors using empirical Bayes method with resampling technique. *Accid. Anal. Prev.* 104, 96–105.

Estimation of the Crash Modification Factor (CMF) for Shoulder Rumble Strips on Horizontal Curves of Two-Lane Two-Way Rural Highways Using the Cross-Sectional Method (Case Study: Lorestan Province)

Hamed Sefiy, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

E-mail: hamedsaify@yahoo.com

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

Shoulder rumble strips, as a cost-effective and efficient safety countermeasure, play a crucial role in reducing Run-off-road crashes. However, the effectiveness of this measure is influenced by the geometric, traffic, and environmental conditions of each region. Directly applying Crash Modification Factors (CMFs) developed in other countries or regions may lead to unrealistic estimates. This study aims to develop a local CMF for the implementation of shoulder rumble strips on horizontal curves of two-lane two-way rural highways in Lorestan Province using the Cross-Sectional method. To this end, data were collected for 100 horizontal curves, including 42 curves with rumble strips and 58 curves without them, over the period from 2019 to 2023. Run-off-road crash data were obtained from the Traffic Police, while geometric and traffic information was acquired from the General Directorate of Road Maintenance and Transportation. In this study, the frequency of run-off-road crashes was considered the dependent variable, while the average annual daily traffic (AADT), curve radius, curve length, shoulder width, and speed limit were treated as independent variables. The presence or absence of rumble strips was included in the model as a dummy variable. Modeling was performed using negative binomial regression and the maximum likelihood method. The results indicated that the presence of rumble strips had a significant negative effect on the frequency of run-off-road crashes, with an estimated CMF of 0.68, representing an approximate 32% reduction in crashes following implementation.

Keywords: Crash Modification Factor (CMF), Rumble Strips, Horizontal Curves, Two-Lane Two-Way Highways