

تخمین ضریب بهبود تصادف (CMF) برای افزایش شعاع قوس‌های افقی در بزرگراه‌های برون‌شهری

مقاله علمی-پژوهشی

*شاهین شعبانی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

سیدعلی رضویان امرئی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

شیما طاهری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

مجید صباغ‌زاده، دانش‌پژوه دکتری، گروه مهندسی عمران-راه و ترابری، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

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

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۳ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

صفحه ۶۱۰-۵۹۷

چکیده

ضریب بهبود تصادف (CMF) عددی است که تاثیر ایمنی اقدامات ایمن‌سازی را نشان می‌دهد و به دلیل محدود بودن منابع مالی، در تصمیم‌گیری برای اولویت‌بندی و انتخاب برنامه‌های بهبود ایمنی راه بسیار مهم است. به دلیل تفاوت‌های جغرافیایی و هندسی راه در کشورهای مختلف، لازم است که هر کشوری از جمله ایران ضرایب CMF بومی خود را توسعه داده و به کار گیرد. از آنجاکه قوس‌های افقی در راه‌های برون‌شهری یکی از چالش‌برانگیزترین المان‌های هندسی موجود است، در تحقیق حاضر با هدف تخمین CMF/افزایش شعاع قوس در قوس‌های افقی بزرگراه‌های برون‌شهری ایران، هفت استان تهران، اصفهان، فارس، مازندران، خراسان رضوی، قزوین و کرمانشاه برای پوشش مناطق مختلف کشور انتخاب شدند. از آنجاکه ضعف داده‌های تصادف و تاریخچه اقدامات وجود داشت، روش مطالعه مقطعی برای تخمین CMF انتخاب شد. داده‌های تصادفات فوتی و جرحی مربوط به سال‌های ۱۳۹۸-۱۴۰۰ کشور از دفتر ایمنی و ترافیک سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای اخذ و با استفاده از نرم‌افزار GIS پراکندگی تصادفات در محورهای بزرگراهی (با تمرکز بر قوس‌های افقی) استان‌های منتخب ترسیم شد. برای دستیابی به داده‌های حجم ترافیک و طول راه به منظور مدلسازی در روش مقطعی، از ابزارهای موجود در نرم‌افزار ArcGIS استفاده و طول قطعات قوس محاسبه شد. سپس داده‌های ترددشمار از سایت ۱۴۱ سازمان راهداری (موقعیت ترددشمار و حجم شمارش‌شده ترافیک از جمله درصد وسایل نقلیه سنگین) استخراج و در نرم‌افزار QGIS با توجه به موقعیت مکانی ترددشمارها حجم ترافیک به هر قطعه اختصاص داده شد. با هدف توسعه مدلی دقیق‌تر اطلاعات متغیرهای بهسازی قوس، شعاع قوس، نوع میانه و شرایط کنترل سبقت در قوس‌های افقی بزرگراهی نیز با کمک دفاتر ایمنی و ترافیک استانی جمع‌آوری شد. مدل دوجمله‌ای منفی با توجه به پرکاربرد بودن در ادبیات مدلسازی تصادفات به منظور توسعه CMF با استفاده از نرم‌افزار SAS به کار گرفته شد. با انجام مدلسازی، مقدار CMF برای افزایش شعاع قوس برابر ۰/۴۹ (کاهش ۵۱ درصدی تصادفات) به دست آمد. اعتبارسنجی مدل نیز با آماره‌های $Mean\ Residual$ ، MAE ، $RMSE$ و $Pseudo\ R^2$ مورد سنجش قرار گرفت و نشان از دقت خوب مدل داشت که نشان‌دهنده دقتی بودن مقادیر CMF تخمین زده شده است.

واژه‌های کلیدی: ضریب بهبود تصادف (CMF)، افزایش شعاع قوس، بزرگراه‌های برون‌شهری

۱- مقدمه

که به عنوان یکی از مهمترین شاخص‌های مرجع در زمان آماده‌سازی برنامه‌های بهبود ایمنی راه برای متولیان مدیریت

ضریب بهبود تصادف^۱ (CMF) که تغییرات در پیامد ایمنی راه را عددی می‌کند، نتیجه اجرای اقدامات ایمن‌سازی است

ترافیکی بصورت ترکیبی بر ایمنی ترافیک تاثیر می‌گذارند، اکثر مطالعات SPF را بر اساس متغیرهای طرح هندسی راه (Park et al., 2015; Cafiso et al., 2021; Vinayaraj & Perumal, 2023) و متغیرهای ترافیکی (Galgamuwa et al., 2020; Zhao et al., 2023; Chen et al., 2020) و بر پایه مدل‌های پواسون و دوجمله‌ای منفی توسعه داده‌اند (Zhang et al., 2024).

اگرچه تاکنون مقدار CMF برای بسیاری از اقدامات ایمن‌سازی در سراسر دنیا توسط پژوهشگران مختلف تعیین شده است، با این حال محدودیت‌هایی در این خصوص وجود دارد. اولاً، در حالت ایده‌آل، منطقی نیست که مقدار CMF یک منطقه از دنیا یا حتی یک کشور برای تمام دنیا استفاده شود زیرا ویژگی‌های محیطی، هندسی و ترافیکی در دنیا متفاوت است که این موارد هر چند به اندازه خیلی جزئی می‌توانند بر مقدار CMF تاثیر بگذارند. ثانیاً، در کشور ایران تا کنون مطالعات اندکی در خصوص تعیین CMF برای اقدامات ایمن‌سازی انجام شده است (کوهی و شعبانی، ۱۳۹۹؛ ۱۴۰۰؛ ۱۴۰۱؛ ۱۴۰۳؛ کوهی و صفارزاده، ۱۴۰۱؛ توکلی و همکاران، ۱۳۹۹؛ بهنود و سعادت فرد، ۱۴۰۴؛ سیفی، ۱۴۰۴) که اقدامات ایمن‌سازی لحاظ‌شده در آنها متفاوت از پژوهش حاضر است (جدول ۱). نهایتاً، در مطالعات انجام شده قبلی در کشور برای تعیین CMF معمولاً یک محور خاص در نظر گرفته شده است. بنابراین مطالعه‌ای که بتواند در سطح ملی یا استانی مقدار CMF را تعیین کند لازم و ضروری است تا بتوان با اطمینان بیشتری مقدار CMF مربوط به اقدامات ایمن‌سازی را در کشور به کار گرفت. بدین منظور هدف مطالعه حاضر تخمین مقدار CMF برای اقدام ایمن‌سازی «افزایش شعاع قوس» در بزرگراه‌های برونشهری کشور است. همچنین به منظور قابلیت بکارگیری مقادیر تخمینی CMF اقدامات لحاظ‌شده این مطالعه برای استان‌های مختلف کشور، مقادیر CMF در سطح ملی (شامل چندین استان مختلف) تخمین زده خواهد شد.

ترافیک در سرتاسر دنیا شناخته می‌شود (Cafiso et al., 2021; Tang et al., 2021). مقدار CMF برابر ۱ نشان‌دهنده تاثیر صفر بر ایمنی است، درحالی‌که مقدار CMF بزرگتر از ۱ نشان‌دهنده افزایش ریسک تصادف و مقدار کوچکتر از ۱ نشان‌دهنده کاهش ریسک تصادف است (Zhang et al., 2024). از دهه ۱۹۸۰، مطالعات گوناگون، روش‌های مختلفی برای تخمین CMF مربوط به استراتژی‌های مدیریت ایمنی راه استفاده نموده‌اند و CMF را به عنوان پیشبینی‌کننده موفق پیامد ایمن‌سازی معرفی نموده‌اند (Al-Marafi & Somasundaraswaran, 2023). به عنوان جمع‌بندی روش‌شناسی این مطالعات، مطالعات قبل و بعد مشاهده‌ای و روش مقطعی به عنوان روش‌های پیشرفته برای توسعه CMF توسط راهنمای ایمنی راه (HSM) (AASHTO, 2010) معرفی شده است و در مطالعات دیگری نیز (Davis, 2021; Mbatta, 2017; Vinayaraj & Perumal, 2023; Gayah, 2024) بر این روشها تاکید شده است. به گفته محققان بهترین روش قبل و بعد مشاهده‌ای برای تخمین CMF روش بیزتجربی^۲ (EB) است (کوهی و شعبانی، ۱۴۰۱) که در مطالعات داخل کشور نیز به شکلی گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (جدول ۱). با این حال، به دلایل زیر، مطالعه قبل و بعد مشاهده‌ای همیشه اجرایی نیست: (۱) معمولاً داده تصادفات قبل و بعد ناکافی است و (۲) معمولاً تاریخ اجرای اقدامات ایمن‌سازی مشخص نیست (Park et al., 2015). برای غلبه بر این مسائل، روش مقطعی به دلیل نیاز به داده کمتر و آسانی پردازش، شدیداً موثر است (Galgamuwa, 2020) و در جدیدترین مطالعات تخمین CMF در خارج از کشور نیز به شکلی گسترده استفاده شده است (جدول ۲). در این روش، ایجاد توابع عملکرد ایمنی^۳ (SPF) که معمولاً شامل مدل‌های شمارشی برای فراوانی تصادف هستند، پیش‌نیاز تخمین مطمئن CMF است (Zhang et al., 2024). از آنجا که فعل و انفعال بین عملکرد روسازی، شرایط آب و هوایی و شرایط

۲- محدوده مطالعه

از آنجاکه در این مطالعه تمرکز بر توسعه CMF مربوط به افزایش شعاع قوس‌های افقی بزرگراه‌های برون‌شهری است، در ابتدا با مراجعه به مدیران و مهندسين سازمان راهداري و حمل و نقل جاده‌ای و مشورت با خبرگان سازمان، بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ در بزرگراه‌های برون‌شهری کشور مدنظر قرار گرفت، زیرا در این بازه زمانی پروژه‌های متعدد ایمن‌سازی در استان‌های مختلف کشور تعریف و به اجرا درآمده است و بسیاری از محورهای بزرگراهی کشور ایمن‌سازی شده‌اند.

به گفته کوربن و وای (Corben & Wai, 1990) استفاده از محل‌هایی با فراوانی تصادف بالا یا پایین در فرآیند جمع‌آوری داده‌ها می‌تواند موجب بروز سوگیری در نمونه‌ها شود؛ زیرا نتایج ممکن است بیش از حد به سمت محل‌هایی با نرخ تصادف بالا یا پایین متمایل شوند. بنابراین، در این پژوهش از روش انتخاب تصادفی برای کاهش این سوگیری استفاده شد. از این‌رو استان‌های مورد مطالعه بر اساس دو معیار زیر انتخاب شدند:

-موقعیت جغرافیایی استان‌ها با هدف پوشش‌دادن مناطق شمالی، جنوبی، شرقی، غربی و مرکزی کشور.

-موجودیت کافی بزرگراه‌های برون‌شهری دارای قوس‌های افقی در استان‌ها.

با در نظرگیری این دو مورد، استان‌های تهران، اصفهان، فارس، خراسان رضوی، مازندران، قزوین و کرمانشاه مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.

۳- داده‌ها

۳-۱- داده‌های تصادف

با توجه به اینکه برای توسعه CMF اقدامات ایمن‌سازی موردنظر، سطح ملی در نظر گرفته شده و به منظور مدیریت هزینه و زمان، برای جمع‌آوری داده‌های تصادف، به سازمان راهداري و حمل و نقل جاده‌ای مراجعه و با طی نمودن مراحل قانونی مکاتبات، داده‌های تصادفات دوره زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ مربوط به سراسر کشور اخذ شد. علت انتخاب این بازه زمانی، انجام پروژه‌های متعدد ایمن‌سازی در راه‌های برون‌شهری سراسر کشور بود. این داده‌ها تنها شامل تصادفات فوتی و جرحی و دارای موقعیت مکانی وقوع تصادفات بود. به همین دلیل از نرم افزار GIS استفاده شد تا علاوه بر نمایش پراکندگی داده‌های تصادف، در مراحل بعدی بتوان از قابلیت‌های این نرم افزار در تکمیل داده‌های موردنیاز استفاده نمود. با پیاده سازی داده‌های تصادف در نرم افزار ArcGIS نقشه کلی پراکندگی تصادفات فوتی و جرحی تصادفات طی سال های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ در راه های برونشهری کشور مطابق شکل (۱-الف) به دست آمد.

جدول ۱. خلاصه مطالعات تخمین CMF در داخل کشور

پژوهشگران	سال انتشار	هدف	روش
بهنود و همکاران	۱۳۹۶	ارزیابی تاثیر ایمنی خطوط تندروی اتوبوس	بیز تجربی
کوهی و شعبانی	۱۳۹۹	ارزیابی تاثیر ایمنی ایجاد روشنایی	گروه مقایسه
توکلی‌کاشانی و همکاران	۱۳۹۹	ارزیابی تاثیر ایمنی دوربین کنترل سرعت	ساده و ساده اصلاح شده
حافظی و همکاران	۱۴۰۰	ارزیابی تاثیر ایمنی ایجاد روشنایی	بیز تجربی
شعبانی و کوهی	۱۴۰۰	ارزیابی تاثیر ایمنی بهسازی شانه	بیز تجربی
کوهی و شعبانی	۱۴۰۱	ارزیابی تاثیر ایمنی احداث میدان	بیز تجربی
کوهی و صفارزاده	۱۴۰۱	ارزیابی تاثیر ایمنی مجموعه‌ای از اقدامات	بیز تجربی
کوهی و شعبانی	۱۴۰۳	ارزیابی تاثیر ایمنی نصب حفاظ	بیز تجربی
بهنود و سعادت‌فرد	۱۴۰۴	ارزیابی تاثیر ایمنی افزایش شعاع قوس	مطالعه مقطعی
سیفی	۱۴۰۴	ارزیابی تاثیر ایمنی بهبود خط کشی	بیز تجربی

جدول ۲. خلاصه مطالعات تخمین CMF در خارج کشور

پژوهشگران	سال انتشار	هدف	روش
چوی و همکاران	۲۰۱۸	ارزیابی تأثیر شعاع انحنای شیب و طول خطوط شتاب و کاهش سرعت بر ایمنی در رمپ‌های آزادراه	مطالعه مقطعی
شیرازی نژاد و همکاران	۲۰۱۹	ارزیابی تأثیر محدودیت سرعت در آزادراه	گروه مقایسه
المعرفی و همکاران	۲۰۲۰	ارزیابی تأثیر ویژگی‌های ترافیکی و هندسی بر ایمنی میدان‌ها	مطالعه مقطعی
الاکامی و همکاران	۲۰۲۰	ارزیابی قابلیت انتقال SPFs بین‌المللی و بررسی تأثیر CMFs در کالیبراسیون مدل‌های پیش‌بینی تصادف برای شرایط محلی	مطالعه مقطعی
لن و همکاران	۲۰۲۱	مقایسه دقت روش‌های مختلف در برآورد CMF	روش مطالعه مقطعی، روش EB و روش‌های مبتنی بر تطابق نمره تمایل
گالگامووا و همکاران	۲۰۲۱	توسعه روشی نوین برای برآورد اثربخشی ایمنی اقدامات بهبود راه‌ها از طریق مدل‌سازی بیز مکانی	مدل‌سازی بیز مکانی
کیم و همکاران	۲۰۲۱	ارزیابی اثرات ایمنی ناشی از تغییر طول خطوط کاهش و افزایش سرعت در مناطق استراحت آزادراه‌های	چارچوبی نوین مبتنی بر شبیه‌سازی
چامپاهوم و همکاران	۲۰۲۳	تحلیل عوامل مؤثر بر تصادفات جلو به عقب کامیون‌ها در بزرگراه‌های تایلند	مدل رگرسیون منفی دو-جمله‌ای با داده‌های پرسفر
اکبرینیا و بهنود	۲۰۲۳	ارزیابی تأثیر ایمنی نصب چراغ راهنمایی	روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در چارچوب مدل بیز کامل
پرنتی و همکاران	۲۰۲۴	ارزیابی سطح ایمنی راه‌های اصلی ایتالیا و تعیین قطعات پرخطر	روش HSM
کریسپینو و همکاران	۲۰۲۴	ارزیابی تأثیر طراحی مجدد شامل احداث جاده‌های انحرافی برای دور زدن مناطق مسکونی و اصلاح جزئی مسیر	مدلسازی آماری و شبیه‌سازی سناریوهای آینده
ژانگ و همکاران	۲۰۲۴	برآورد CMFs مربوط به تأثیرات ترکیبی عملکرد روسازی، شرایط جوی و شاخص‌های وضعیت ترافیک بر ایمنی آزادراه‌های کوهستانی	مطالعه مقطعی
المعرفی و همکاران	۲۰۲۴	توسعه و ارزیابی ترکیبی برای بهبود ایمنی در میدان‌های شهری	مطالعه مقطعی
العرفی و الکھتانی	۲۰۲۵	ارزیابی ایمنی و مقرون‌به‌صرفه بودن اجرای نوارهای لرزاننده شانه و روشنایی راه‌ها در آزادراه‌ها	مطالعه مقطعی و گروه مقایسه
صلواتی و جمیلی	۲۰۲۵	ارزیابی اثربخشی اقدامات ایمنی انجام‌شده در محورهای پرتصادف	روش بیزتجربی

۲-۳- داده‌های حجم ترافیک و طول قطعات

برای دستیابی به داده‌های حجم ترافیک و طول راه، پس از پیاده‌سازی نقاط تصادفات در نرم افزار، قطعات قوس مشخص گردید و با استفاده از ابزارهای موجود در نرم افزار ArcGIS طول قطعات قوس محاسبه و برای مدلسازی در نظر گرفته شد. سپس داده‌های ترددشمار از سایت ۱۴۱ سازمان راهداری (موقعیت ترددشمار و حجم شمارش شده ترافیک) استخراج و در نرم افزار QGIS با توجه به موقعیت مکانی ترددشمارها حجم ترافیک به

هر قطعه اختصاص داده شد. با توجه به محدودیت تعداد ترددشمارها در بسیاری از محورها که موجب همگونی در تردد بسیاری از قطعات مسیر می‌شود و تأثیر منفی این پدیده بر مدل‌های ریاضی مورد استفاده در مراحل بعدی، در مواردی که فاصله قطعات زیاد یا دسترسی‌هایی در بین ترددشمار و قوس وجود داشت، با روش میانبایی جغرافیایی گریجینگ، حجم ترافیک برای قطعات قوس محاسبه و اختصاص داده شد.

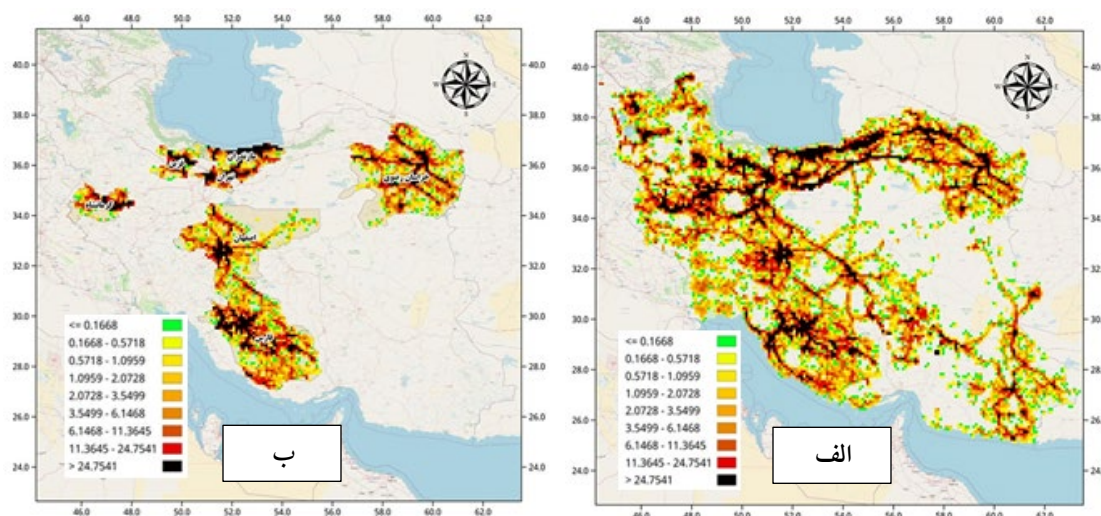
۳-۳- سایر داده‌ها

به منظور ساخت مدلی دقیق، علاوه بر داده‌های تصادفات، طول قطعات و حجم ترافیک لازم است تا متغیرهای تاثیرگذار در ایمنی قوس نیز لحاظ شود. از آنجا که جمع‌آوری این متغیرها برای کشور کاری زمان‌بر و پرهزینه بود، ابتدا لازم بود تا چندین استان به منظور آماده‌سازی سایت‌های منتخب برای مدلسازی انتخاب شود. استان‌های مورد مطالعه بر اساس دو معیار الف) موقعیت جغرافیایی استان با هدف پوشش دادن مناطق شمالی، جنوبی، شرقی و غربی کشور و ب) موجودیت کافی بزرگراه‌های برون‌شهری دارای قوس‌های افقی در استان انتخاب شدند. با در نظرگیری این دو مورد، ۷ استان تهران، اصفهان، فارس، خراسان رضوی، مازندران، قزوین و کرمانشاه به عنوان استان‌های منتخب برای تکمیل مجموعه داده و توسعه مدل در نظر گرفته شد. شکل (۱-ب) پراکندگی تصادفات فوتی و جرحی طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ و شکل (۲) نمودار تصادفات خروج از راه در برابر کل تصادفات در دوره مذکور در این استان‌ها را که برای مدلسازی رگرسیونی استفاده خواهد شد نشان می‌دهد. سپس با هماهنگی مدیران سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای و مراجعه به دفاتر ایمنی و ترافیک ادارات کل راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای ۷ استان منتخب،

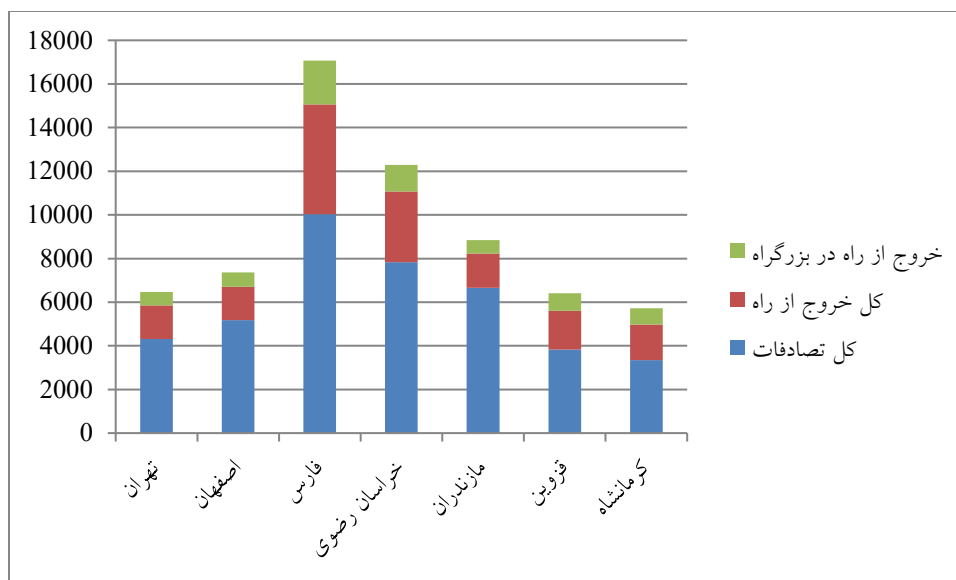
اطلاعات متغیرهای شعاع قوس، بهسازی شعاع قوس، نوع میانه و کنترل سبقت که با توجه به محدودیت‌های ادارات استانی قابل دسترسی بود، جمع‌آوری شد. همچنین از اطلاعات ترافیکی موجود در سامانه ۱۴۱، درصد وسایل نقلیه تجاری نیز استخراج شد، زیرا بصورت پیش‌فرض می‌توان انتظار داشت که بر شرایط ایمنی قوس‌ها تاثیر گذار هستند.

۳-۴- سایت‌های منتخب و مجموعه داده نهایی

در نهایت تعداد ۴۰۷۰ قطعه قوس بزرگراهی با طول کلی ۹۶۰ کیلومتر برای توسعه مدل در نظر گرفته شدند. مشخصات هندسی و مشخصات ترافیکی این قطعات در فایل اکسل وارد و سپس برای تحلیل نهایی و توسعه مدل در نرم افزار SAS وارد شد. پیش از توسعه مدل‌ها، با ایجاد ماتریس همبستگی برای مجموعه داده به منظور شناسایی هم‌خطی چندگانه در میان متغیرهای مستقل توسعه داده شد. اگر ضریب همبستگی بزرگتر از ۰/۵ باشد، یکی از متغیرها حذف می‌شود. سپس متغیرها برای مدل نهایی مشخص شدند. آماره‌های توصیفی مجموعه داده نهایی در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است.



شکل ۱. پراکندگی تصادفات فوتی و جرحی طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ الف: در راه‌های برون‌شهری کشور ب: در استان‌های هدف



شکل ۲. تحلیل اولیه تصادفات فوتی و جرحی خروج از راه در استان‌های هدف طی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰

جدول ۳. آمارهای توصیفی متغیرهای دسته‌ای مورد استفاده برای توسعه مدل

متغیرها	تعداد قطعات	طول کلی قطعات (km)	درصد طول کلی
دارای میانه	۳۱۰۰	۷۳۰	۷۶/۰۰
بدون میانه	۹۷۰	۲۳۰	۲۴/۰۰
سبقت ممنوع	۴۲۰	۹۵	۹/۸
بدون محدودیت سبقت	۳۶۵۰	۸۶۵	۹۰/۲
قوس با افزایش شعاع	۱۴۲۰	۳۳۵	۳۴/۹
قوس بدون بهسازی	۲۶۵۰	۶۲۵	۶۵/۱

جدول ۴. آمارهای توصیفی متغیرهای پیوسته مورد استفاده در مدل

متغیرهای پیوسته	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
طول قطعه (کیلومتر)	۰/۱	۱/۲	۰/۲۲	۰/۱۵
AADT	۱۵۰۰	۶۸۱۲۴	۱۸۵۰۴	۱۱۱۴۹
درصد وسایل نقلیه سنگین	۲	۳۵	۱۶/۵	۷/۲
شعاع قوس (متر)	۱۲۰	۱۴۵۰	۵۲۰	۳۱۰

۴- روش تحقیق

۴-۱- روش مقطعی

اگرچه مطالعات مشاهده‌ای قبل و بعد (بیزتجربی، گروه مقایسه، روش ساده) رویکرد ترجیحی در تخمین CMF هستند، با این حال، چندین محدودیت اجرایی در استفاده از آنها وجود دارد. برای مثال، برای تعیین دوره‌های قبل و بعد برای ارزیابی، باید تاریخ اجرای اقدام ایمن‌سازی مشخص باشد و لازم است که چندین سال بعد از اجرای اقدام ایمن‌سازی به منظور جمع‌آوری داده‌های موردنیاز سپری شود. همچنین تخمین تاثیر ایمنی هنگامی که بیش از یک اقدام ایمن‌سازی در محلی مشخص اجرا شده باشد، مشکل است (Al-Marafi et al., 2021; Hauer, 1997; Persaud et al., 2010; Wood et al., 2015). در چنین مواردی، روش مقطعی را می‌توان برای تخمین CMF به کار برد زیرا رویکردی ساده‌تر از مطالعات مشاهده‌ای برای دستیابی به داده‌های موردنیاز دارد (Al-Marafi & Somasundaraswaran, 2023). در سال‌های اخیر روش مقطعی به شکلی گسترده توسط محققان مختلف استفاده شده است (جدول ۲). در این روش، می‌توان CMF را مستقیماً از ضریب متغیر وابسته به اقدام ایمن‌سازی پیشنهادی بصورت زیر تخمین زد (Al-Marafi, 2020):

$$CMF_i = e^{\beta_i |X_i - X_{ib}|} \quad (1)$$

که X_i مقدار مشاهده‌شده برای متغیر i ، X_{ib} شرایط پایه برای متغیر i و β_i پارامترهای مدل برای متغیر i است. روش مقطعی که با عنوان SPF نیز شناخته می‌شود، تعداد تصادفات را با ویژگی‌های هندسی و حجم ترافیک راه مرتبط می‌کند و برای این کار نیازمند توسعه مدل پیشبینی تصادفات است. اکثر مطالعات SPF را بر اساس متغیرهای طرح هندسی راه (Park et al., 2015; Cafiso et al., 2021; Vinayaraj & Perumal, 2023) و متغیرهای ترافیکی (Galgamuwa et al., 2020; Zhao et al., 2023; Chen et al., 2020) و بر پایه مدل دوجمله‌ای منفی توسعه داده‌اند (Zhang et al., 2024). به همین منظور در این مطالعه نیز مدل پیشبینی تصادفات بر اساس متغیرهای هندسی و ترافیکی و بر پایه مدل دوجمله‌ای منفی توسعه داده خواهد شد.

۴-۲- مدلسازی رگرسیونی

رگرسیون پواسون توزیعی است که احتمال وقوع تعداد مشخصی از رویدادهای نادر را در یک بازه زمانی معین پیش‌بینی می‌کند (Caliendo et al., 2007). این مدل فرض می‌کند که میانگین و واریانس داده‌ها برابر یا تقریباً برابرند. برای تحلیل تصادفات جاده‌ای در محل i ام (برای مثال قطعات قوس)، فرض می‌شود که متغیر Y_i تعداد تصادف‌های رخ داده در محل i ام طی یک بازه زمانی مشخص را نشان می‌دهد و Y_i مقدار مشاهده‌شده تصادف‌ها در همان محل و دوره است، به طوری که: $y_i = 0, 1, 2, 3$. اگر فرض شود که تعداد تصادفات از توزیع پواسون پیروی می‌کند (یعنی میانگین برابر با واریانس است) با میانگین μ_i ، احتمال وقوع Y_i تصادف در یک دوره زمانی مشخص به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P(Y_i = y_i) = \frac{\mu_i^{y_i} \exp^{-\mu_i}}{y_i!} \quad (2)$$

هنگامی که میانگین و واریانس داده‌های مدل برابر نباشند، توزیع پواسون برای تحلیل داده‌ها مناسب نخواهد بود. این مسئله را می‌توان با استفاده از مدل رگرسیون دوجمله‌ای منفی^۴ (NB) به جای پواسون برطرف کرد. مدل NB به شکلی گسترده در روش مطالعه مقطعی استفاده می‌شود (Gross & Donnell, 2011). رگرسیون دوجمله‌ای منفی برای توصیف وقوع رویدادهای نادر و تصادفی به کار می‌رود. این مدل زمانی مناسب است که میانگین از واریانس کمتر باشد $(\mu + \mu^2/k)$. به طور کلی، فرم توزیع مدل دوجمله‌ای منفی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P(Y_i = y_i) = \frac{\Gamma(y_i + k - 1)}{\Gamma(k - 1) y_i!} \left(\frac{1}{1 + k \mu_i} \right)^{k-1} \left(\frac{k \mu_i}{1 + k \mu_i} \right)^{y_i} \quad (3)$$

در این معادلات، k پارامتر پراکندگی و Γ تابع گاما است. شکل کلی مدل پیش‌بینی با استفاده از رگرسیون پواسون یا دوجمله‌ای منفی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$N_{pre,i} = e^{\beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j X_{ij}} \quad (4)$$

در نظر گرفته می‌شود (Montgomery et al. 2015). بنابراین فاصله کوک برای متغیر مستقل (تعداد تصادفات در هر سال در قطعات قوس) برای تحلیل باقیمانده‌ها استفاده شد.

۴-۳- اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل با استفاده از آماره‌های متداول اعتبارسنجی در ادبیات مدل‌سازی که در نرم افزار SAS می‌توان به راحتی خروجی گرفت انجام خواهد شد. مطابق منابع علمی تحلیل رگرسیونی (Montgomery et al. 2015) اگر مقادیر آماره‌های MAE ، $RMSE$ ، $Mean Residual$ و $Pseudo R^2$ نزدیک به صفر باشد نشان‌دهنده مدلی خوب برای پیش‌بینی خواهد بود.

نتایج

نرم افزار SAS 9.4 برای توسعه مدل تصادفات فوتی و جرحی خروج از راه دوره ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ استفاده شد. جدول (۵) تخمین پارامتر برای مدل نهایی توسعه داده شده با استفاده از روش مقطعی با انحراف استاندارد و P-Value تخمین‌ها را نشان می‌دهد. در نهایت مقدار CMF از رابطه $CMF_i = e^{\beta_{il}X_i - X_{ilb}}$ محاسبه می‌شود (AASHTO, 2010) که نتایج این کار برای تعیین CMF اقدامات مدنظر در جدول (۶) نشان داده شده است. همچنین جدول (۷) آماره‌های اعتبارسنجی مدل را نشان می‌دهند. براساس نتایج جدول (۷) واضح است که مقادیر آماره‌ها نزدیک به صفر است، بنابراین مدل توسعه داده شده با استفاده از روش مقطعی دقت کافی برای پیش‌بینی تصادفات در قوس‌های افقی بزرگراهی را دارد، از این رو مقادیر CMF توسعه داده شده با استفاده از پارامترهای رگرسیونی، دقیق هستند.

که $N_{pre,i}$ تعداد تصادفات پیش‌بینی شده در بازه زمانی (T) در محل i ؛ β_0 و β_j ضرایب مدل و X_{ij} متغیر توضیفی i ام در محل i ام است.

در این پژوهش، بر اساس دستورالعمل HSM (AASHTO, 2010) عبارت فوق به صورت زیر بازنویسی شد:

$$N_{pre,i} = SL_i^{\alpha_1} \cdot Q_i^{\alpha_2} \cdot e^{\beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j X_{ij}} \quad (5)$$

که Q_i مقدار AADT در قطعه i ام؛ SL_i طول قطعه در محل i ام؛ X_{ij} متغیر توضیفی i ام در محل i ام و β_0 ، α_1 و α_2 ضرایب مدل هستند. در معادله (۵) از لگاریتم طبیعی برای متغیرهای AADT و طول قطعه استفاده شد تا رابطه غیرخطی بین این متغیرها و فراوانی تصادف منعکس شود (Abdel-Aty & Haleem, 2011; Wong et al., 2007; Park et al., 2014). روش حداکثر درست‌نمایی ضرایب مدل رگرسیون خطی را به صورت معادله (۶) تخمین می‌زند:

$$L(y, x, \sigma^2) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{n/2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2} \quad (6)$$

نرم افزار SAS 9.4 برای برآورد پارامترهای مدل استفاده می‌شود.

قبل از توسعه مدل، باید نقاط دورافتاده شناسایی شوند زیرا می‌توانند بر برازش مدل تاثیر بگذارند. در برخی موارد، اگر برازش مدل رضایت بخش نباشد یا برخی متغیرها معنادار نباشند، نقاط دورافتاده باید برای افزایش برازش مدل، اصلاح شوند. روش متداول برای شناسایی نقاط دورافتاده در مجموعه داده، محاسبه فاصله کوک بوسیله مقایسه مقادیر برازش شده با مقادیر متناظر برازش شده هنگامی که یک مورد در برازش مدل رگرسیونی حذف می‌شود انجام خواهد شد (Kutner et al. 2004). اگر فاصله کوک هر نقطه داده بیشتر از ۱ باشد، به عنوان یک نقطه دورافتاده

جدول ۵. تخمین پارامتر مدل توسعه داده شده

متغیر	تخمین پارامتر	انحراف استاندارد	P-Value
Intercept	-۰/۸۵	۰/۲۱	<۰/۰۰۱
نوع میانه	-۰/۱۸	۰/۰۵	<۰/۰۰۱
کنترل سبقت	-۰/۰۹	۰/۰۴	۰/۰۱۸
افزایش شعاع قوس	-۰/۷۱۳	۰/۰۶۵	<۰/۰۰۱
Ln طول قطعه	۰/۳۴	۰/۰۲	<۰/۰۰۱
Ln AADT	۰/۲۸	۰/۰۳	<۰/۰۰۱
درصد وسایل نقلیه سنگین	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲

جدول ۶. CMF برای اقدام ایمن سازی افزایش شعاع قوس

اقدام ایمن سازی	CMF
افزایش شعاع قوس	۰/۴۹

جدول ۷. اعتبارسنجی برای مدل توسعه داده شده

آماره های اعتبارسنجی	مدل	مجموعه داده اعتبارسنجی
MSE	۰/۳۱	۰/۳۶
RMSE	۰/۵۶	۰/۶۰
MAE	۰/۴۴	۰/۴۷
Mean Residual	۰/۰۲	۰/۰۵
Peseudo R ² (McFadden)	۰/۲۱	-

آزمون پایداری

به منظور ارزیابی پایداری و قابلیت اتکای نتایج مدل توسعه یافته، مجموعه ای از آزمون های پایداری بر روی مدل رگرسیون دوجمله ای منفی انجام شد. هدف این آزمون ها بررسی حساسیت ضرایب مدل، به ویژه ضریب مربوط به متغیر «افزایش شعاع قوس»، نسبت به تغییرات در مشخصات داده ها و فرم مدل بود. در گام نخست، اثر حذف داده های دورافتاده با استفاده از شاخص فاصله کوک بررسی شد. نتایج نشان داد که با حذف مشاهداتی که مقدار فاصله کوک آن ها بزرگ تر از ۱ بود، تغییر محسوسی در مقدار ضریب متغیر افزایش شعاع قوس ایجاد نشد و مقدار CMF همچنان در بازه ۰/۴۷ تا ۰/۵۱ باقی ماند. این موضوع نشان دهنده عدم وابستگی نتایج به مشاهدات خاص و پایداری مدل است. در گام دوم، مدل با مشخصات جایگزین شامل حذف برخی

متغیرهای کم اثر (نظیر نوع میانه یا درصد وسایل نقلیه سنگین) مجدداً برازش شد. نتایج نشان داد که ضریب متغیر افزایش شعاع قوس در تمامی حالات معنادار باقی مانده و تغییرات آن ناچیز بوده است (کمتر از ۵ درصد اختلاف در مقدار CMF). در گام سوم، برای بررسی حساسیت مدل نسبت به ساختار تابع، مدل پواسون نیز به صورت مقایسه ای توسعه داده شد. با وجود تفاوت در شاخص های برازش (AIC و Log-Likelihood)، مقدار ضریب مربوط به افزایش شعاع قوس در مدل پواسون نیز مشابه مدل دوجمله ای منفی و در همان راستا (کاهنده تصادف) به دست آمد. هرچند مدل دوجمله ای منفی به دلیل در نظر گرفتن پراکندگی بیش از حد، برازش بهتری ارائه داد. در نهایت، با تقسیم داده ها به دو زیرمجموعه آموزش و اعتبارسنجی و برازش مدل بر روی هر یک، نتایج نشان داد که مقدار CMF حاصل از مدل در هر دو

این نوع سوگیری‌ها نیازمند استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر مانند مدل‌های بیزین مکانی یا مطالعات قبل و بعد است. همچنین، مقدار CMF به‌دست‌آمده در این مطالعه یک مقدار متوسط برای شرایط مختلف جغرافیایی و ترافیکی کشور است و ممکن است در شرایط خاص (مانند مناطق کوهستانی یا ترافیک بسیار سنگین) متفاوت باشد. بنابراین، استفاده از این مقدار در پروژه‌های اجرایی باید با در نظر گرفتن شرایط محلی و در صورت امکان، کالیبراسیون محلی همراه باشد. در مجموع، نتایج این پژوهش تأیید می‌کند که افزایش شعاع قوس به‌عنوان یک اقدام اصلاحی هندسی، می‌تواند نقش بسیار مؤثری در بهبود ایمنی بزرگراه‌های برون‌شهری ایفا کند و در اولویت‌بندی پروژه‌های ایمنی راه مورد توجه قرار گیرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با هدف ارزیابی اثر ایمنی افزایش شعاع قوس در بزرگراه‌های برون‌شهری، ضریب بهبود تصادف (CMF) با استفاده از روش مقطعی و مدل رگرسیون دوجمله‌ای منفی برآورد شد. داده‌های مورد استفاده شامل تصادفات فوتی و جرحی، مشخصات هندسی راه و ویژگی‌های ترافیکی در چندین استان کشور بود که امکان تحلیل در سطحی نسبتاً گسترده را فراهم ساخت. نتایج نشان داد که افزایش شعاع قوس منجر به کاهش قابل توجه تصادفات می‌شود، به‌طوری‌که مقدار CMF برابر با ۰/۴۹ به‌دست آمد. این مقدار بیانگر کاهش ۵۱ درصدی در فراوانی تصادفات بوده و اهمیت اصلاح هندسی قوس‌ها را در بهبود ایمنی راه‌ها برجسته می‌سازد. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های مختلف اعتبارسنجی نشان داد که مدل توسعه‌یافته از دقت و برازش مناسبی برخوردار است. همچنین نتایج آزمون‌های پایداری بیانگر آن بود که مقدار CMF برآوردشده نسبت به تغییرات منطقی در داده‌ها و ساختار مدل حساسیت بالایی ندارد و از قابلیت اتکای مناسبی برخوردار است. با این وجود، محدودیت‌هایی مانند استفاده از روش مقطعی و عدم دسترسی به داده‌های دقیق قبل و بعد از اجرای اقدامات ایمن‌سازی وجود دارد که می‌تواند بر دقت برآوردها تأثیرگذار باشد. از این رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، با استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر نظیر بیزتجربی و همچنین توسعه مدل‌های مکانی، دقت برآورد ضرایب CMF افزایش یابد.

مجموعه اختلاف ناچیزی داشته و در حدود $0/02 \pm 0/49$ قرار دارد. بر اساس نتایج حاصل از آزمون‌های فوق، می‌توان نتیجه گرفت که مدل توسعه‌یافته از پایداری مناسبی برخوردار بوده و مقدار تخمین‌زده‌شده CMF برای افزایش شعاع قوس، نسبت به تغییرات منطقی در داده‌ها و ساختار مدل حساسیت قابل توجهی ندارد.

نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش شعاع قوس در بزرگراه‌های برون‌شهری تأثیر قابل توجهی در کاهش تصادفات خروج از مسیر دارد، به‌گونه‌ای که مقدار ضریب بهبود تصادف (CMF) برابر با ۰/۴۹ برآورد شد. این مقدار نشان‌دهنده کاهش ۵۱ درصدی در فراوانی تصادفات است که از نظر ایمنی ترافیک، کاهش معنادار و قابل توجه محسوب می‌شود. از دیدگاه فیزیکی و رفتار راننده، این نتیجه قابل توجیه است. افزایش شعاع قوس موجب کاهش شتاب جانبی وارد بر وسیله نقلیه شده و در نتیجه پایداری دینامیکی خودرو بهبود می‌یابد. همچنین با افزایش شعاع، میدان دید راننده در امتداد مسیر افزایش یافته و زمان واکنش برای مواجهه با شرایط پیش‌بینی‌نشده بیشتر می‌شود. این دو عامل به‌طور مستقیم در کاهش احتمال خروج وسیله نقلیه از مسیر نقش دارند. مقایسه نتایج این مطالعه با مقادیر ارائه شده در ادبیات موضوع (Bauer & Harwood, 2013; Gooch et al., 2016; Buddhavarapu et al., 2013; Wood & Donnell, E.T., 2020) نشان می‌دهد که مقدار CMF به‌دست‌آمده در محدوده مقادیر گزارش‌شده در ادبیات بین‌المللی قرار دارد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که بهبود مشخصات هندسی قوس‌ها، به‌ویژه افزایش شعاع، معمولاً منجر به کاهش قابل توجه تصادفات می‌شود (Ahmed et al., 2011; Bauer & Harwood, 2013)، هرچند میزان این کاهش بسته به شرایط ترافیکی، محیطی و کیفیت اجرا متفاوت است. قرارگیری مقدار ۰/۴۹ در این بازه، بیانگر واقع‌بینانه بودن نتایج این پژوهش است. با این حال، باید توجه داشت که روش مقطعی مورد استفاده در این تحقیق، اگرچه در شرایط محدودیت داده‌ها بسیار کاربردی است، اما به‌طور ذاتی در معرض برخی سوگیری‌ها قرار دارد. به‌عنوان مثال، ممکن است عوامل پنهان که در مدل لحاظ نشده‌اند، بر نتایج تأثیرگذار باشند. هرچند تلاش شد با وارد کردن متغیرهای کلیدی هندسی و ترافیکی این اثرات کنترل شود، اما حذف کامل

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Crash Modification Factor
2. Empirical Bayes
3. Safety Performance Function
4. Negative Binomial

۸- مراجع

پژوهشنامه حمل و نقل، سال نوزدهم، دوره اول، شماره ۷۰، بهار.

- 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.

- 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.

- کوهی، محمد و 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.

- Abdel-Aty, M & Haleem, K (2011). Analyzing angle crashes at unsignalized intersections using machine learning techniques. *Accident Analysis & Prevention*, vol. 43, no. 1, 461-70.

- Ahmed, M. Huang, H. Abdel-Aty, M. Guevara, B. (2011). Exploring a Bayesian hierarchical approach for developing safety performance functions for a mountainous freeway, *Accid. Anal. Prev.* 43 (4), 1581-1589.

- Akbarinia, F., & Behnood, H. (2023). A genetic algorithm based reliability assessment of crash modification factors calculated by full Bayesian method. *International Journal of Transportation Engineering*, 11(2), 1471-1489.

- 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.

- بهنود، حمیدرضا؛ زمانی، ساسان؛ نادران، علی (۱۳۹۶) اثرسنجی 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.

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

- 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.

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

- 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.

- شعبانی، شاهین؛ کوهی، محمد (۱۴۰۰)، تخمین ضریب بهبود تصادف برای بهسازی شانه راه با توسع، زمستان.

- صفارزاده، محمود؛ کوهی، محمد (۱۴۰۲). مدیریت ایمنی راه، انتشارات موسسه پژوهشی حمل و نقل طراحان پارسه،

- کوهی، محمد؛ شعبانی، شاهین. (۱۴۰۱)، ارزیابی تاثیر ایمنی میدان در کاهش تصادفات تقاطع، فصلنامه علمی

Effect on the Transferability of International Safety Performance Functions for Rural Roads in Egypt, *Safety*, 6, 43.

- Galgamuwa, U., Du, J., & Dissanayake, S. (2021). Bayesian spatial modeling to incorporate unmeasured information at road segment levels with the INLA approach: A methodological advancement of estimating crash modification factors. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(1), 95–106.

- Galgamuwa, U. Vahl, C.I. (2020), Dissanayake, S. Role of driver behaviors and environmental characteristics in evaluating safety effectiveness of roadway countermeasures: A novel approach of estimating crash modification factors. *J. Transp. Saf. Secur*, 12, 764–781.

- Gayah, V.V. Donnell, E.T.; Zhang, P. (2024). Crash modification factors for high friction surface treatment on horizontal curves of two-lane highways: A combined propensity scores matching and empirical Bayes before-after approach. *Accid. Anal. Prev*, 199, 107536.

- Gooch, J.P. Gayah, V.V. Donnell, E.T. (2016). Quantifying the safety effects of horizontal curves on two-way, two-lane rural roads, *Accid. Anal. Prev*. 92, 71–81.

- 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.

- Hauer, E., (1997). Observational before/after studies in road safety: Estimating the effect of highway and traffic engineering measures on road safety. *Pergamon Press*, Oxford.

- Kim, H., Kwon, K., Park, N., Park, J., Abdel-Aty, M., (2021). Crash- and Simulation-Based Safety Performance Evaluation of Freeway Rest Area, *Sustainability*, 13, 4963.

- Kutner, M. H., Nachtsheim, C., Neter. J. (2004). Applied Linear Regression Models. *McGraw Hill/Irwin*, New York, NY.

- Lan, B., & Srinivasan, R. (2021). Comparison of crash modification factors for engineering treatments

- Al-Marafi, M. N., Somasundaraswaran, K., & Ayers, R. (2020). Developing crash modification factors for roundabouts using a cross-sectional method. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(3), 362–374.

- 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.

- Bauer, K.M., Harwood, D.W. (2013), Safety effects of horizontal curve and grade combinations on rural two-lane highways, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2398 (1), 37–49.

- Buddhavarapu, P. Banerjee, A. Prozzi, J.A., (2013), Influence of pavement condition on horizontal curve safety, *Accid. Anal. Prev*. 52, 9–18,

- Cafiso, S.; Montella, A.; D'Agostino, C.; Mauriello, F.; Galante, F. (2021), Crash modification functions for pavement surface condition and geometric design indicators. *Accid. Anal. Prev*, 149, 105887.

- Caliendo, C., De Guglielmo, M.L., Guida, M., (2013). A crash-prediction model for road tunnels. *Accid. Anal. Prev*. 55, 107–115.

- Chen, Y. Wu, L. Huang, Z. (2020), Assessing quality of crash modification factors estimated by empirical Bayes before-after methods. *J. Cent. South Univ*, 27, 2259–2268.

- Choi, Y. H., Park, S. H., Ko, H., Kim, K. H., & Yun, I. (2018). Development of safety performance functions and crash modification factors for expressway ramps. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(2), 804–812.

- Corben, BF & Wai, FC (1990). Pro-active traffic engineering safety study, final report: Part 2 right-turn-against crashes at traffic signals, Report No. 11, *Monash University*, Australia.

- Crispino, M., Camozzi, K., Ketabdari M., Antoniazzi, A., Toraldo, E., (2024). Safety Impact Prediction of Redesigning National Roads Crossing Residential Areas: An Italian Case Study, *Appl. Sci.*, 14, 4984.

- Davis, G.A. (2021). Mechanisms, mediators, and surrogate estimation of crash modification factors. *Accid. Anal. Prev*, 151, 105978.

- Elagamy, S, R., El-Badawy, Sh, M., Shwaly, S, A., Zidan, Z, M., and Shahdah, U., (2020). Segmentation

- Tang, F.; Fu, X.; Cai, M.; Lu, Y.; Zhong, S. (2021). Investigation of the Factors Influencing the Crash Frequency in Expressway Tunnels: Considering Excess Zero Observations and Unobserved Heterogeneity. *IEEE Access*, 9, 2169–3536.
- Thanapong Ch., Se, Ch., Jomnonkwao, S., Kasemsri, R., Ratanavaraha, V., (2023). Analysis of the Effects of Highway Geometric Design Features on the Frequency of Truck-Involved Rear-End Crashes Using the Random Effect Zero-Inflated Negative Binomial Regression Model, *Safety*, 9, 76.
- 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*, 8, 644–661.
- Wong, S, Sze, N-N & Li, Y-C (2007). Contributory factors to traffic crashes at signalized intersections in Hong Kong. *Accident Analysis & Prevention*, vol. 39, no. 6, pp. 1107-13.
- Wood, J., Donnell, E.T. (2020). Empirical Bayes before-after evaluation of horizontal curve warning pavement markings on two-lane rural highways in Pennsylvania, *Accid. Anal. Prev.* 146, 105734.
- Wood, J.S., Donnell, E.T., Porter, R.J., (2015). Comparison of safety effect estimates obtained from empirical Bayes before–after study, propensity scores-potential outcomes framework, and regression model with cross-sectional data. *Accid. Anal. Prev.* 75, 144–154.
- 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.
- Zhao, J.; Kargel, A. McDaniel-Wilson, C.; Kolody, K.; Zhou, H. (2023). Evaluating Safety Treatments with Crash Modification Function: Case Study on Combined Safety Treatments for Rural Two-Lane Highways. *J. Transp. Eng. Part A Syst*, 149, 04023021.
- estimated by before–after empirical Bayes and propensity score matching methods. *Transportation Research Record*, 2675(1), 148–160.
- Mbatta, G. (2017), Developing Crash Modification Factors for Urban Highway with Substandard Wide Curb Lane. *Florida State University: Tallahassee, FL, USA*.
- 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. *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 70, 167-77.
- 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.
- Park, J.; Abdel-Aty, M.; Wang, J.; Lee, C. (2015). Assessment of safety effects for widening urban roadways in developing crash modification functions using nonlinearizing link functions. *Accid. Anal. Prev*, 79, 80–87.
- Perneti, M., Antoniazzi, A., Ketabdari, M., Crispino, M., & Toraldo, E. (2024). Determining the safety level of state roads: An Italian case study. *Applied Sciences*, 14(16), 6663.
- Persaud, B., Lan, B., Lyon, C., Bhim, R., (2010). Comparison of empirical Bayes and full Bayes approaches for before–after road safety evaluations. *Accid. Anal. Prev.* 42 (1), 38–43.
- Salavati, M. A., & Jamili, J. (2025). Evaluation of safety measures on the highways of Isfahan Province based on before-and-after studies using the experimental Bayes method. *International Journal of Transportation Engineering*, 12(4), 2025–2037.
- Shirazinejad, R, S., Dissanayake, S., Al-Bayati, A, J., York, D, D., (2018). Evaluating the Safety Impacts of Increased Speed Limits on Freeways in Kansas Using Before-And-After Study Approach, *Sustainability*, 11, 119.

Estimation of Crash Modification Factor (CMF) for Increasing the Radius of Horizontal Curves on Rural Highways

Shahin Shabani, Department of Civil Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran.

Seyed Ali Razavian, Department of Civil Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran.

Shima Taheri, Department of Civil Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran.

Majid Sabaghzadeh, Department of Civil Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran.

E-mail: shabani@pnu.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

Since horizontal curves on rural highways are among the most challenging geometric elements, this study aimed to estimate the CMF associated with increasing the curve radius on rural highway horizontal curves in Iran. To cover diverse regions of the country, seven provinces — Tehran, Isfahan, Fars, Mazandaran, Khorasan-Razavi, Qazvin, and Kermanshah — were selected. Due to data limitations in crash records and intervention histories, a cross-sectional study method was adopted for CMF estimation. Crash data (fatal and injury crashes) from 2019 to 2021 were obtained from the Road Safety and Traffic Office of the Road Maintenance and Transportation Organization. Using GIS software, the spatial distribution of crashes along highway routes — with a focus on horizontal curves — in the selected provinces was mapped. To obtain data on traffic volume and road length required for cross-sectional modeling, ArcGIS tools were utilized to calculate the length of curve segments. Traffic counter data (including counter locations, traffic volumes, and the percentage of heavy vehicles) were extracted from the website of the Road Maintenance and Transportation Organization (site 141). Then, in QGIS software, traffic volumes were assigned to each road segment based on the spatial position of traffic counters. To enhance model accuracy, additional information on curve improvement variables — such as curve radius, median type, and overtaking control conditions — was collected from provincial road safety and traffic offices. The negative binomial regression model, commonly used in crash modeling literature, was employed to develop the CMF using SAS software. Modeling results showed that the CMF for increasing the curve radius was 0.49, indicating a 51% reduction in crashes. Model validation, conducted using RMSE, MAE, Mean Residual, and Pseudo R^2 statistics, confirmed the good accuracy of the model, suggesting that the estimated CMF values are reliable.

Keywords: Crash Modification Factor (CMF), Curve Radius Increase, Rural Highways