تحلیل عوامل مؤثر بر سرعت عملکردی در راه‌های شهری و برون‌شهری (مطالعه موردی: استان لرستان)

مقاله علمی- پژوهشی

*محسن عموزاده عمرانی (نویسنده مسئول)، دانشیار، گروه عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران
قاسم طهمورسی، دانش آموخته دکترا، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران
بهرام سبقتی شیرازی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران
سید مهدی سجادی، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران
* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: **mo.omrani@iau.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵
صفحه ۱۴۶-۱۲۵

چکیده

ایمنی ترافیک یکی از چالش‌های مهم حمل‌ونقل است و سرعت وسایل نقلیه به‌عنوان عاملی اثرگذار در بروز و شدت تصادفات مطرح می‌شود. رفتار سرعتی رانندگان تحت‌تأثیر شرایط محیطی و هندسی مسیر قرار دارد. این پژوهش با هدف تحلیل سرعت عملکردی و عوامل مؤثر بر آن در محورهای چهارخطه برون‌شهری لرستان انجام شد. داده‌های سرعت به‌صورت نامحسوس در جریان آزاد و اطلاعات هندسی از طریق برداشت میدانی گردآوری شد. در مجموع ۲۰۱ قطعه شامل مقاطع مستقیم و قوس شناسایی و سرعت آزاد ۱۰۰ خودروی سواری در هر قطعه ثبت گردید، که ۲۰۱۰۰ داده معتبر حاصل شد. مدل‌سازی سرعت عملکردی با رگرسیون خطی چندگانه انجام گرفت. نوآوری پژوهش در تحلیل رفتار تبعیت رانندگان از محدودیت سرعت در سطوح مختلف و مقایسه عملکرد آن‌ها در قوس‌ها و مقاطع مستقیم است؛ موضوعی که کمتر در مطالعات داخلی و خارجی بررسی شده است. نتایج نشان داد رانندگان تنها در محدودیت‌های ۱۱۰ و ۹۵ کیلومتر بر ساعت از قانون پیروی می‌کنند و با کاهش مقدار محدودیت، اختلاف سرعت عملکردی و مجاز به‌ترتیب تا ۲/۲و ۲ برابر افزایش می‌یابد. در مقاطع مستقیم، سرعت ۸۵ درصد قوس قبل آن با ضریب ۰/۵۵ بیشترین اثر افزایشی را داشت، درحالی‌که شیب سربالایی، سرعت را به‌طور میانگین، ۲۵/۸ کیلومتر بر ساعت کاهش داد و وجود خط‌کشی کنار مسیر موجب افزایش ۳/۷ کیلومتر بر ساعتی سرعت شد. در قوس‌ها نیز سرعت ۸۵ درصد مسیر قبل با ضریب ۰/۶۳ اثرگذارترین عامل افزایشی بود و هر ۱۰۰ متر افزایش شعاع قوس، سرعت را ۱/۲ کیلومتر بر ساعت افزایش داد. همچنین شیب سربالایی حدود ۳/۹۶ کیلومتر بر ساعت سرعت را کاهش داد. ضرایب تعیین مدل‌ها برای مسیر مستقیم و قوس به ترتیب ۰/۷۲۱ و ۰/۷۸۶ بود که دقت مناسب مدل‌ها را نشان می‌دهد. نتایج بر لزوم طراحی پیوسته مسیر، اقدامات آرام‌سازی و تقویت کنترل‌های هوشمند برای کاهش سرعت غیرمجاز و بهبود ایمنی تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: سرعت عملکردی، سرعت مجاز، ایمنی جاده‌ای، تصادف، آرام‌سازی ترافیک

۱- مقدمه

حوادث ترافیک جاده‌ای یکی از مهم‌ترین مشکلات سلامت عمومی و توسعه اقتصادی در سطح جهان به شمار می‌آیند؛ علاوه بر تلفات انسانی، هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی قابل‌توجهی نیز به کشورها تحمیل می‌کنند (Ranjbar *et al*., 2022). این مشکل به ویژه در کشورهای در حال توسعه شدت بیشتری دارد؛ چرا که رشد سریع شهری و افزایش تعداد وسایل نقلیه، فشار مضاعفی بر زیرساخت‌های حمل‌ونقل وارد کرده است (Kardani-Yazd *et al*., 2019). سرعت حرکت وسایل نقلیه یکی از عوامل کلیدی مرتبط با ایمنی جاده‌ای است؛ افزایش میانگین سرعت یا خلاف آن، تأثیر قابل‌توجهی بر احتمال وقوع

تصادف و شدت خسارات دارد. به‌عنوان نمونه، در مطالعات به‌روز جهت تنظیم سرعت مطمئن در ایران، چارچوب رویکردی جامع به ایمنی ترافیک برای تعیین سرعت‌های در بزرگراه‌های برون‌شهری پیشنهاد شده است (Ranjbar *et al*., 2022). علاوه بر آن، مفهوم سرعت عملکردی که از رفتار واقعی رانندگان در شرایط جاری ترافیک به‌دست می‌آید، به‌عنوان معیاری مهم در تحلیل ایمنی مطرح است. این متغیر تحت تأثیر ویژگی‌های هندسی جاده (مانند شعاع قوس افقی، طول قوس، دید افق، هندسه قوس انتقالی)، شرایط ترافیکی (حجم جریان، تراکم، وضعیت دید) و مقررات محدودیت سرعت است. مطالعات اخیر بین‌المللی نشان می‌دهند که مدل‌سازی سرعت عملکردی در مقاطع منحنی و مستقیم با تفکیک هندسی، نتایج دقیق‌تری ارائه می‌کند و می‌تواند به طراحی ایمن‌تر جاده‌ها کمک کند. به عنوان مثال مطالعه‌ای در هند روی دوخطه‌های روستایی نشان داده است که عوامل هندسی مثل شعاع قوس، شیب طولی و طول قوس تأثیر معناداری بر سرعت در قوس‌ها دارند (Datta, 2025). مطالعات داخلی نیز بیانگر آن است که خطا در شناسایی نقاط پرتصادف یا درک نادرست از رفتار سرعتی رانندگان، می‌تواند منجر به استفاده غیربهینه از منابع و کاهش اثربخشی برنامه‌های ایمنی شود. رفتار کاربران راه تحت تأثیر ویژگی‌های محیطی و هندسی به‌طور چشمگیری تغییر می‌کند. برای نمونه، عموزاده عمرانی و همکاران در سال ۱۴۰۲ نشان دادند که شرایط محیطی و عملکردی در تقاطع‌های شهری می‌تواند زمان بحرانی عبور عابران را تغییر دهد و اهمیت توجه به رفتار واقعی کاربران را در تحلیل‌های ترافیکی برجسته کرد (Amouzadeh Omrani *et al*., 2023). از سوی دیگر، نتایج پژوهش عموزاده عمرانی و همکاران در سال۱۴۰۱ در محور بوشهر–برازجان بیانگر آن است که با افزایش تعداد وسایل نقلیه، تخلفات مرتبط با سرعت و فاصله طولی و در نتیجه احتمال تصادفات افزایش می‌یابد که نقش سرعت به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل خطر را تأیید می‌کند(Amouzadeh Omrani *et al*., 2022). همچنین، بررسی حوادث ریلی توسط عموزاده عمرانی و همکاران در سال۱۴۰۳ نشان داد که مجموعه‌ای از عوامل فنی، مدیریتی و محیطی می‌توانند بر ایمنی سامانه‌های حمل‌ونقل تأثیر بگذارند. این یافته‌ها در مجموع تأکید می‌کنند که تحلیل رفتار سرعتی رانندگان و شناخت عوامل مؤثر بر آن همانند شیب طولی، شعاع قوس، محدودیت سرعت و عناصر هدایت بصری، برای افزایش ایمنی راه‌های برون‌شهری ضروری است(Amouzadeh Omrani *et al*., 2024). این ضرورت پایه اصلی تحقیق حاضر در مدل‌سازی سرعت عملکردی رانندگان در راه‌های چهارخطه استان لرستان را شکل می‌دهد. اگرچه برخی پژوهش‌های داخلی نیز به تحلیل رفتار سرعت رانندگان پرداخته‌اند، اما تعداد مطالعات با نمونه میدانی بزرگ، تفکیک بین مقاطع مستقیم و قوس‌های افقی و مدل‌سازی سرعت عملکردی محدود است. به‌ویژه در ایران لازم است داده‌های واقعی مسیرهای برون‌شهری با متغیرهای هندسی دقیق جمع‌آوری شود و تاثیر قوانین محدودیت سرعت و شرایط طراحی جاده بر سرعت عملکردی رانندگان تحلیل شود (Shams & Maleki, 2022). بر این اساس، بررسی دقیق رابطه‌ی میان سرعت عملکردی و فراوانی تصادفات می‌تواند به تصمیم‌گیری مؤثرتر در تخصیص منابع ایمنی و طراحی راه‌های ایمن‌تر منجر شود. پژوهش حاضر بر تحلیل میدانی داده‌های واقعی از محورهای برون‌شهری استان لرستان متمرکز است و تلاش می‌کند با مدل‌سازی آماری، رابطه‌ی بین سرعت عملکردی وسایل نقلیه سبک و فراوانی تصادفات را تبیین کند. این مطالعه با ترکیب روش‌های سنجش میدانی سرعت و داده‌های هندسی، سعی در شناسایی پارامترهای کلیدی مؤثر بر رفتار رانندگان دارد تا از این رهگذر، پیشنهادهای کاربردی برای مدیریت سرعت و بهبود ایمنی مسیرهای برون‌شهری ارائه شود.

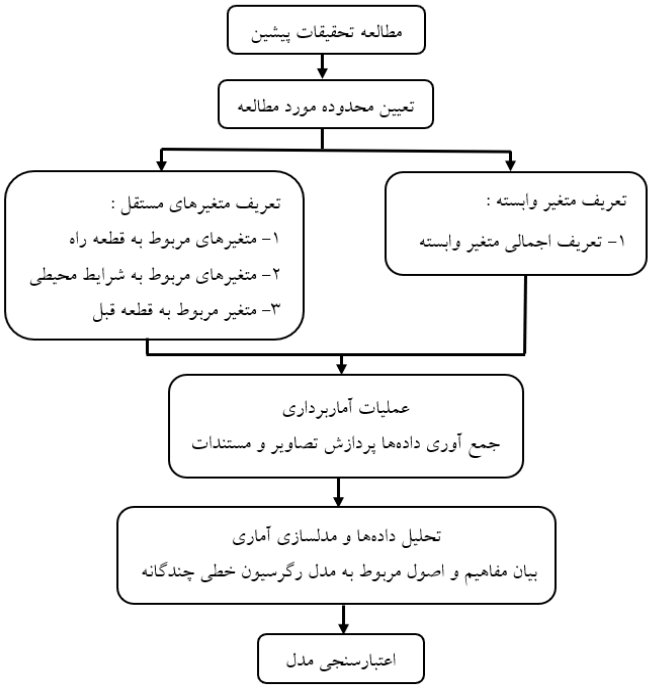
۲- پیشینه تحقیق

مطالعات متعددی در داخل و خارج کشور به بررسی عوامل مؤثر بر تصادفات جاده‌ای و سرعت عملکردی پرداخته‌اند. در ایران، پژوهشگران نشان داده‌اند که سرعت وسایل نقلیه و رفتار رانندگان نقش بسیار مهمی در بروز حوادث جاده‌ای دارند. به عنوان مثال، جهاندیده و همکاران (۱۳۹۶) با مدل‌سازی شدت ریسک پذیری عابر پیاده بر اساس شاخص ترکیبی زمان تا تصادف و سرعت وسیله نقلیه نزدیک‌شونده نشان دادند که سرعت وسیله نقلیه مؤثرترین عامل در شدت ریسک عبور عابر پیاده است و بیش از ۷۰ درصد عابران زمانی که خودرو با سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت به آنها نزدیک می‌شود، اقدام به عبور پرخطر می‌کنند (Jahandideh et al., 2017).

در همین راستا، عامری و همکاران (۱۳۹۶) اثر نصب دوربین‌های کنترل سرعت را در محور تهران–دماوند بررسی کردند و نشان دادند که میانگین سرعت وسایل نقلیه با نصب این سیستم کاهش یافته و به دنبال آن تصادفات فوتی، جرحی و خسارتی نیز کاهش یافته است. این یافته‌ها بیانگر آن است که کاهش سرعت و نظارت مؤثر بر آن، به طور مستقیم با کاهش شدت و تعداد تصادفات مرتبط است. همچنین، با بررسی احتمال وقوع تصادف وسایل نقلیه با سرعت‌های مختلف در آزادراه‌ها نشان دادند که وسایل نقلیه با سرعت پایین‌تر، به دلیل مواجهه با شرایط خطر، احتمال بیشتری برای وقوع حادثه دارند(Ameri *et al*., 2017). در مطالعه‌ای دیگر سخراوی و همکاران (۱۳۹۷) نیز با مدلسازی احتمالاتی تعداد وقوع تصادفات بر اساس سرعت متوسط و نوع راه، افزایش سرعت را با افزایش احتمال وقوع تصادف مرتبط دانستند و مدل توانی را مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی فراوانی تصادفات معرفی کردند(Sakhravi *et al*., 2018). نتایج پژوهش پورباقر و همکاران (۱۳۹۸) نیز بیانگر آن بود که سرعت غیرمجاز در مسیرهای برون‌شهری مانند محور چالوس–سلمان‌شهر، ارتباط معناداری با شدت تصادفات دارد(Pourbagher *et al*., 2019). مطالعات دیگر مانند تحقیق اکبری غیبی و نظریان (۱۳۹۹) نشان داد که استفاده از دوربین‌های کنترل سرعت می‌تواند تا ٦٨ درصد در کاهش تصادفات ناشی از تخلفات سرعتی مؤثر باشد(Akbari Gheibi & Nazarian, 2020). همچنین، توکلی کاشانی و همکاران (۱۴۰۰) تأثیر شرایط محیطی، نوع برخورد و نقص راه را بر شدت تصادفات سرعتی مورد بررسی قرار دادند و تأکید کردند که طراحی هندسی معابر و اقدامات آرام‌سازی ترافیک در ایمنی مسیرهای درون‌شهری نقش مهمی دارند (Tokalli Kashani *et al*., 2021). مطالعات بین‌المللی نیز همسو با یافته‌های داخلی، بر اهمیت سرعت و هندسه راه در تعیین سرعت عملکردی و وقوع تصادفات تأکید دارند. ایمپریالو و همکاران در سال ۲۰۱٦ میلادی نشان دادند که افزایش سرعت، به طور مستقیم منجر به افزایش فراوانی تصادفات می‌شود، هرچند نوع مدل‌سازی آماری به‌کاررفته می‌تواند شدت این رابطه میان سرعت و تصادف را تغییر دهد(Imprialou *et al*., 2016). شپورایتیس و همکاران در سال ۲۰۲۰ میلادی و مالیوکویچ و تسویتانیچ در سال ۲۰۱٦ میلادی با تمرکز بر قوس‌های افقی جاده‌های روستایی، به این نتیجه رسیدند که شعاع و انسجام هندسی قوس‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار سرعتی رانندگان دارند(Šeporaitis *et al*., 2020; Maljković & Cvitanić, 2016). همچنین، توتادی و مِهار در سال ۲۰۲٤ میلادی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی نشان دادند که مدل‌های غیرخطی می‌توانند سرعت عملکردی را در شرایط ترافیکی مختلط با دقت بیشتری پیش‌بینی کنند(Tottadi & Mehar, 2024). این مطالعات نشان می‌دهند که سرعت عملکردی علاوه بر عوامل هندسی مسیر، تحت تأثیر شاخص‌هایی نظیر شرایط روشنایی، جریان ترافیک و شیب طولی نیز قرار دارد و ترکیب این متغیرها می‌تواند نقش مهمی در پیش‌بینی و مدیریت ایمنی راه ایفا کند.

۳–روش تحقیق

برای انجام پژوهش، در ابتدا داده‌های مربوط به سرعت وسایل نقلیه و همچنین متغیرهای مؤثر بر سرعت عملکردی در دو نوع مسیر مستقیم و قوس افقی جمع‌آوری شد. در مسیر مستقیم، تعداد ۱۵ متغیر مستقل و در قوس افقی ۱٦ متغیر مستقل مورد بررسی قرار گرفتند. این متغیرها به سه گروه اصلی تقسیم شدند: متغیرهای مربوط به قطعه راه، متغیرهای مرتبط با شرایط محیطی و متغیرهایی که اثر قطعه قبل را بر مسیر جاری نشان می‌دهند. داده‌ها با استفاده از دوربین سرعت‌سنج در طول تابستان ۱۳۹۵ در استان لرستان جمع‌آوری شد و در مجموع ۲۰۱ قطعه راه شامل بخش‌های مستقیم و قوس‌های افقی مورد مطالعه قرار گرفتند. برای تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی سرعت عملکردی وسایل نقلیه در این قطعات، از رگرسیون خطی چندگانه استفاده شد که امکان بررسی اثر هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته و ارائه مدل پیش‌بینی دقیق سرعت عملکردی را فراهم می‌آورد. در نهایت عملکرد مدل‌های پیش‌بینی و خروجی مورد تحلیل قرار گرفت. روش کلی تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است.

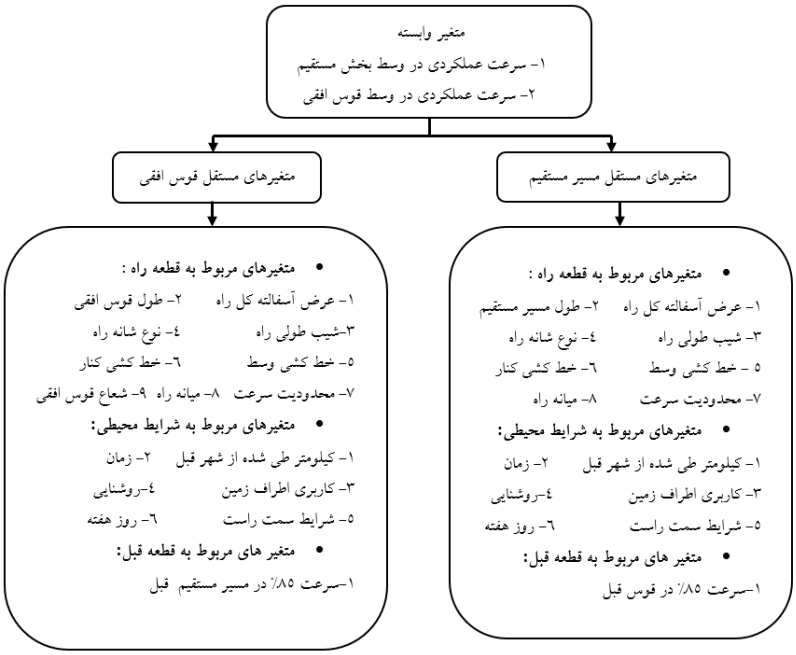


شکل ۱. فلوچارت روش تحقیق

۳-۱-معرفی داده‌ها و توصیف متغیرها

متغیر وابسته و مستقل

در این پژوهش، متغیر وابسته سرعت عملکردی وسایل نقلیه است که در دو موقعیت اندازه‌گیری شد: وسط بخش مستقیم بین دو قوس افقی و وسط قوس افقی بین دو مسیر مستقیم. این تفکیک به‌منظور بررسی تفاوت رفتار رانندگان در مسیرهای مستقیم و قوسی انجام شد. شکل (۲) نیز دسته‌بندی متغیرهای مستقل و وابسته را نمایش می‌دهد که در آن متغیرهای مستقل شامل ویژگی‌های هندسی مسیر، شرایط محیطی و مشخصات قطعه قبل است. مطابق شکل (۲) در این مطالعه، متغیرهای مستقل در سه گروه اصلی دسته‌بندی شده‌اند که نخستین گروه، متغیرهای مربوط به قطعه راه است. این متغیرها بیانگر ویژگی‌های فیزیکی و هندسی مسیر هستند که تأثیر مستقیم بر رفتار رانندگان و سرعت عملکردی آن‌ها دارند. مهم‌ترین متغیرهای این بخش شامل عرض آسفالت کل راه، طول مسیر مستقیم یا طول قوس افقی (بسته به نوع مقطع)، شعاع قوس افقی، و شیب طولی مسیر می‌باشند. علاوه بر این، متغیرهایی مانند نوع شانه راه، وجود یا عدم وجود خط‌کشی وسط و کنار راه، محدودیت سرعت اعمال‌شده در مسیر و وجود یا عدم وجود میانه راه (گاردریل) نیز به‌عنوان شاخص‌های مؤثر بر انتخاب سرعت رانندگان در مدل در نظر گرفته شده‌اند. این دسته از متغیرها مستقیماً با طراحی هندسی و ایمنی مسیر ارتباط داشته و پایه اصلی تحلیل سرعت عملکردی در این مطالعه محسوب می‌شوند.



شکل۲. دسته‌بندی متغیرهای مستقل و وابسته

۳-۲-متغیرهای مربوط به قطعه راه

متغیرهای مربوط به قطعه راه شامل ویژگی‌های هندسی و فیزیکی مسیر هستند که مستقیماً بر سرعت عملکردی رانندگان تأثیر می‌گذارند. این متغیرها شامل عرض آسفالت، طول مسیر مستقیم یا قوس افقی، شعاع قوس، شیب طولی، نوع شانه راه، خط‌کشی وسط و کنار، محدودیت سرعت و میانه راه هستند. هر یک از این عوامل می‌تواند درک راننده از ایمنی مسیر را تحت تأثیر قرار داده و منجر به افزایش یا کاهش سرعت شود. خلاصه اطلاعات مربوط به متغیرهای قطعه راه در مسیر مستقیم در جدول (۱) و برای قوس‌های افقی در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱. طبقه‌بندی متغیرهای قطعه راه در مسیر مستقیم

ردیف	نام متغیر	نوع متغیر	سطوح	درصد داده‌ها	میانگین متغیر
۱	عرض آسفالته کل راه	پیوسته			۱۱/۸٦ متر
۲	طول مسیر مستقیم	پیوسته			۱۰۷٤ متر
۳	شیب طولی راه	گسسته	سربالایی	٪۱۲/٦	
			افقی	٪۵۱/۷	
			سرازیری	٪۳۵/٦	
٤	شانه راه	گسسته	آسفالته	٪٦۹	
			خاکی	٪۱٤/۹	
			فاقد شانه مناسب	٪۱٦/۱	
۵	خط کشی وسط	گسسته	دارد	٪۸۲/۸	
			ندارد	٪۱۷/۲	
٦	خط کشی کنار	گسسته	دارد	٪٦۵/۵	

		ندارد		٪۳٤/٥
			۱۱۰	٪٤۳/۷
			۹٥	٪۱٦/۱
			۸۰	٪٦/۹
۷	محدودیت سرعت	گسسته	۷٥	٪۲/۳
			۷۰	٪٥/۷
			٦۰	٪۸
			٥۰	٪۱۱/٥
			٤۰	٪٥/۷
		وجود گاردریل		٪٦٥/٥
۸	میانه راه	گسسته	عدم وجود گاردریل	٪۲۷/٦
			عریض	٪٦/۹

جدول ۲. طبقه‌بندی متغیرهای قطعه راه در قوس‌های افقی

ردیف	نام متغیر	نوع متغیر	سطوح	درصد داده‌ها	میانگین متغیر
۱	عرض آسفالته کل راه	پیوسته			۱۲ متر
۲	طول قوس افقی	پیوسته			۳٥۲/۸ متر
۳	شعاع قوس افقی	پیوسته			٤۸۷/۸ متر
٤	شیب طولی راه	گسسته	سربالایی	٪۱۲/٦	
			افقی	٪٤۸/۳	
			سرپایینی	٪۳۹/۱	
٥	شانه راه	گسسته	آسفالته	٪۸٦/۱	
			خاکی	٪۹/۲	
			فاقد شانه مناسب	٪۹/۲	
٦	خط کشی وسط	گسسته	دارد	٪۸۱/٦	
			ندارد	٪۱۸/٤	
۷	خط کشی کنار	گسسته	دارد	٪٥۸/٦	
			ندارد	٪٤۱/٤	
۸	محدودیت سرعت	گسسته	۱۱۰	٪٤۲/٥	
			۹٥	٪۱۸/٤	
			۸۰	٪۱/۱	
			۷٥	٪۲/۳	
			۷۰	٪۸	

			٦٠	٪۱۱/۵
			۵۰	٪۱۱/۵
			٤٠	٪٤/٦
			وجود گاردریل	٪٦۹
۹	میانه راه	گسسته	عدم وجود گاردریل	٪۲۰۷
			عریض	٪۱۰/۳

متغیرهای مربوط به شرایط محیطی

گروه دوم از متغیرهای مستقل، متغیرهای مربوط به شرایط محیطی هستند که شامل عواملی مانند کیلومتر طی شده از شهر قبل، زمان روز، کاربری زمین اطراف، روشنایی، شرایط سمت راست مسیر و روز هفته می‌باشند. این متغیرها نقش مهمی در تعیین سرعت عملکردی رانندگان دارند و می‌توانند تحت تأثیر عوامل محیطی و زمانی تغییر کنند. خلاصه طبقه‌بندی این متغیرها برای مسیر مستقیم در جدول (۳) و برای قوس افقی در جدول (٤) ارائه شده است.

جدول ۳. طبقه بندی متغیرهای مربوط به شرایط محیطی در مدل مسیر مستقیم

ردیف	نام متغیر	نوع متغیر	سطوح	درصد داده‌ها میانگین متغیر
۱	کیلومتر طی شده از شهر قبل	پیوسته		٤۹ کیلومتر
۲	زمان	گسسته	۱۳-۹ صبح ظهر ۱۷-۱۳ عصر ۲۱-۱۷	
۳	کاربری زمین اطراف	گسسته	مسکونی	٪۱۳/۸
			تجاری- صنعتی	٪٤/٦
			بدون کاربری	٪۵٤
			کشاورزی	٪۲۷/٦
			آفتابی	٪٦۹
٤	روشنایی	گسسته	ابری	٪۱۷/۲
			رو به آفتاب	٪۱۳/۸
			وجود گاردریل	٪٦/۹
۵	شرایط سمت راست	گسسته	ترانشه خاکبرداری	٪۳۵/٦
			ترانشه خاکریزی	٪۱/۱
			همسطح	٪۵٦/۳
٦	روز هفته	گسسته	شنبه	٪۵/۷
			یکشنبه	٪۱۸/٤
			دوشنبه	٪۱٦/۱

		سه‌شنبه	٪۲۶/۴		
		چهارشنبه	٪۱۹/۵		
		پنجشنبه	٪۱۱/۵		
		جمعه	٪۲/۳		

جدول ٤. طبقه بندی متغیرهای مربوط به شرایط محیطی در مدل قوس افقی

ردیف	نام متغیر	نوع متغیر	سطوح	درصد داده‌ها	میانگین متغیر
۱	کیلومتر طی شده از شهر قبل	پیوسته			٤٨/٦ کیلومتر
۲	زمان	گسسته	۹- ۱۳صبح	٪۱۱/۵	
			۱۳-۱۷ظهر	٪۱۹/۵	
			۱۷-۲۱عصر	٪٦۹	
۳	کاربری زمین اطراف	گسسته	مسکونی	٪۵/۷	
			تجاری- صنعتی	٪۳/٤	
			بدون کاربری	٪٦۵/۵	
			کشاورزی	٪۲۵/۳	
٤	روشنایی	گسسته	آفتابی	٪٦٦/۷	
			ابری	٪۱۷/۲	
			رو به آفتاب	٪۱٦/۱	
			وجود گاردریل	٪۳/٤	
۵	شرایط سمت راست	گسسته	ترانشه خاکبرداری	٪۳٦/۸	
			ترانشه خاکریزی	٪۵/۷	
			همسطح	٪۵٤	
٦	روز هفته	گسسته	شنبه	٪٦/۹	
			یکشنبه	٪۱٦/۱	
			دوشنبه	٪۱۷/۲	
			سه‌شنبه	٪۲۵/۳	
			چهارشنبه	٪۱۷/۲	
			پنجشنبه	٪۱۱/۵	
			جمعه	٪۵/۷	

متغیرهای مربوط به قطعه قبل

گروه سوم از متغیرهای مستقل، متغیرهای مربوط به قطعه قبل است متغیرهای مربوط به قطعه قبل تأثیر بخش پیشین مسیر بر سرعت عملکردی رانندگان را نشان می‌دهند؛ برای مسیر مستقیم، سرعت ۸۵ درصد در قوس افقی قبل و برای قوس افقی، سرعت ۸۵ درصد در مسیر مستقیم قبل در نظر گرفته شده است. جدول (۵) نام متغیرهای مربوط به قطعه قبل در مدل مسیر مستقیم و مدل قوس افقی را نشان می‌دهد.

جدول ۵. متغیر مربوط به قطعه قبل در مدل مسیر مستقیم و مدل قوس افقی نام متغیر

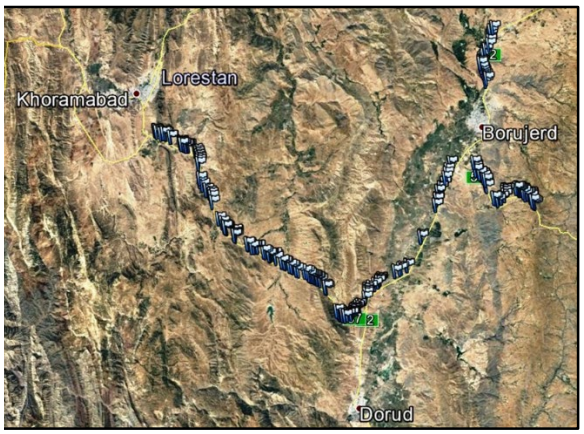
ردیف	نام متغیر	نوع متغیر	میانگین متغیر
۱	درصد در قوس افقی قبل۸۵ سرعت	پیوسته	۹۷/۰۸ کیلومتر
۲	درصد در مسیر مستقیم قبل۸۵ سرعت	پیوسته	۹۲/۱۱ کیلومتر

عملیات آماربرداری

برای عملیات آماربرداری، داده‌ها از راه‌های چهارخطه استان لرستان جمع‌آوری شد. معیار اصلی انتخاب محورها، چهارخطه بودن و سهولت دسترسی به آنها بود تا جمع‌آوری داده‌ها به شکل مؤثر و بدون اختلال در جریان ترافیک انجام شود. جدول (٦) مکان‌های مورد مطالعه و محورهای انتخابی را نشان می‌دهد. در شکل (۳) موقعیت جغرافیایی محورها و قطعات مورد مطالعه نشان داده شده است.

جدول ٦. مکان جمع آوری داده‌ها

ردیف	نام محور	نوع محور
۱	بزرگراه بروجرد – خرم آباد	چهارخطه
۲	بزرگراه بروجرد – اراک	چهارخطه
۳	بزرگراه بروجرد – همدان	چهارخطه



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی محورها و قطعات مورد مطالعه

٤-روش جمع‌آوری داده‌ها

در این مطالعه، داده‌ها به دو دسته سرعت وسایل نقلیه و مشخصات مسیر تقسیم شد. اطلاعات سرعت با دستگاه سرعت‌سنج لیزری و در شرایط جریان آزاد، نامحسوس و در ماه‌های تیر تا شهریور ۱۳۹۵ جمع‌آوری شد، به‌طوری که حداقل فاصله زمانی با خودروهای جلو و عقب به ترتیب ۵ و ۳ ثانیه رعایت گردید. داده‌های مسیر از طریق اندازه‌گیری در محل و نقشه‌های موجود به‌دست آمد. تعداد ۲۰۱ قطعه راه با روسازی مناسب، بدون حضور دوربین یا پلیس و بدون تقاطع یا چراغ راهنمایی انتخاب شد. وسایل نقلیه سنگین لحاظ نشد و در هر قطعه، سرعت ۱۰۰ خودرو سواری ثبت و برای تحلیل آماری استفاده شد.

مدل‌سازی رگرسیون خطی چندگانه

با توجه به متغیر وابسته پیوسته، از رگرسیون خطی چندگانه رابطه (۱) استفاده شد (ویلیامز، ۱۳۶۸).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \qquad (1)$$

که در این رابطه Y_i مقدار متغیر وابسته در تامین آزمایش، β_0 و β_1 پارامترهای مدل رگرسیونی، X_i متغیر مستقل در i امین آزمایش، ε_i عبارت اشتباه تصادفی مدل رگرسیونی می‌باشد.

در مدل رگرسیون خطی چندگانه، رعایت مفروضات پایه برای صحت نتایج ضروری است. نخست، میانگین خطاها باید صفر باشد تا پیش‌بینی‌ها بدون انحراف سیستماتیک باشند. دوم، واریانس خطاها باید ثابت باشد تا تغییرات تصادفی داده‌ها به‌طور یکنواخت توزیع شده باشد. همچنین استقلال خطاها اهمیت دارد که با آزمون دوربین- واتسون بررسی می‌شود تا خطاها بین مشاهدات مختلف همبستگی نداشته باشند. توزیع نرمال متغیر وابسته نیز یکی دیگر از مفروضات است که با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف ارزیابی می‌شود و تضمین می‌کند که خطاها الگوی نرمال داشته باشند. در نهایت، عدم هم‌خطی بین متغیرهای مستقل باید برقرار باشد تا اثر هر متغیر به‌صورت جداگانه و بدون تداخل با سایر متغیرها اندازه‌گیری شود.

این مفروضات پایه‌ای، اعتبار و قابلیت تفسیر نتایج مدل رگرسیونی را تضمین می‌کنند.

هدف از این پژوهش، مدلسازی سرعت عملکردی وسایل نقلیه در مقاطع مستقیم و قوس‌های افقی راه‌های چهارخطه برون‌شهری استان لرستان و شناسایی عوامل مؤثر بر آن بود. نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی رگرسیونی نشان داد که در هر دو مقطع مستقیم و قوس افقی، ترکیبی از متغیرهای هندسی، محیطی و رفتاری بر سرعت عملکردی تأثیرگذار است؛ با این حال، اهمیت نسبی این متغیرها در دو نوع مقطع متفاوت است.

مسیر مستقیم

در مسیر مستقیم، چهار متغیر اصلی شامل سرعت ۸۵ درصد در قوس قبل از آن، محدودیت سرعت مصوب، شیب طولی و وجود خط‌کشی کنار راه به عنوان عوامل مؤثر بر سرعت عملکردی شناسایی شدند.

سرعت ۸۵ درصد در قوس قبل (مسیر مستقیم)

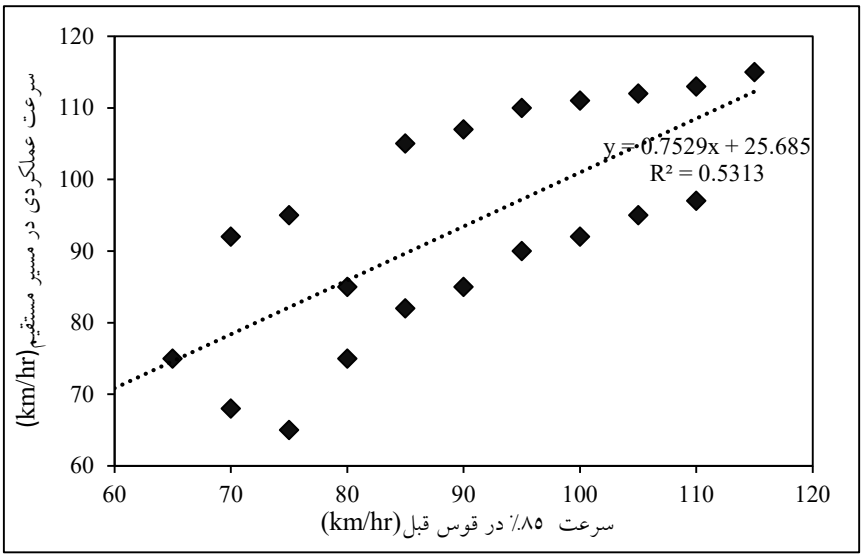
در جدول(۷) اطلاعات آماری مربوط به سرعت ۸۵ درصد در قوس قبل از مسیر مستقیم ارائه شده است. نتایج در شکل (٤) رابطه بین سرعت عملکردی در مسیر مستقیم با سرعت ۸۵ درصد در قوس قبل را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود سرعت ۸۵ درصد در قوس قبل، تأثیر زیادی بر سرعت عملکردی دارد ، به‌گونه‌ای که افزایش یک واحد در این متغیر موجب افزایش حدود ۰/۷۵ واحد در سرعت عملکردی مسیر مستقیم می‌شود. این یافته نشان می‌دهد که رفتار رانندگان در بخش‌های مستقیم تا حد زیادی تحت تأثیر شرایط هندسی و روانی قطعه قبلی مسیر است و در صورت ورود با سرعت بالا از قوس، تمایل کمتری به کاهش سرعت دارند. این موضوع اهمیت طراحی پیوسته هندسی مسیر و هماهنگی سرعت طرح در قطعات متوالی را برجسته می‌سازد.

جدول ۷. اطلاعات اماری مربوط به سرعت ۸۵ درصد در قوس قبل از مسیر مستقیم

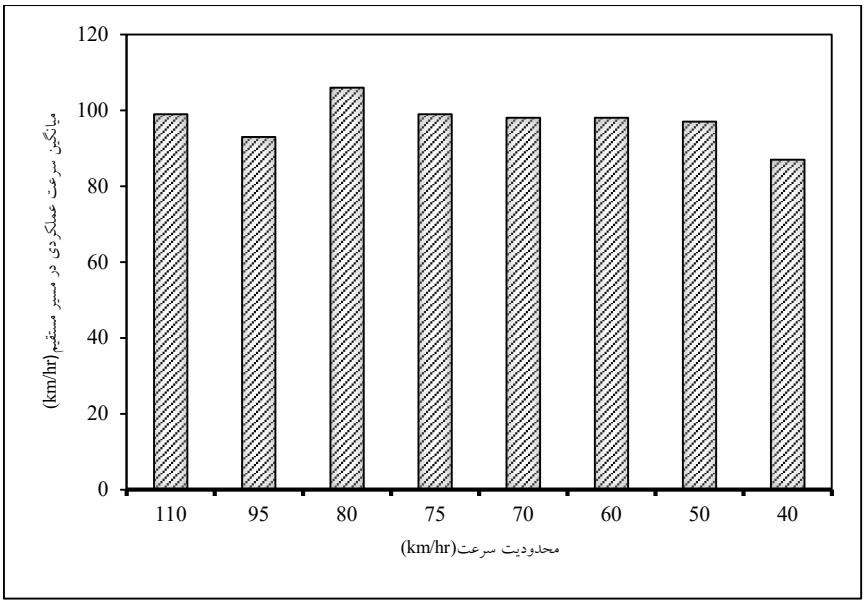
نام متغیر	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	انحراف معیار	واریانس
سرعت ۸۵ ٪ در قوس قبل	٦٥	۱۱۲	۹۲/۱۱	۱۰/۵۲۹	۱۱۰/۸۷

محدودیت سرعت (مسیر مستقیم)

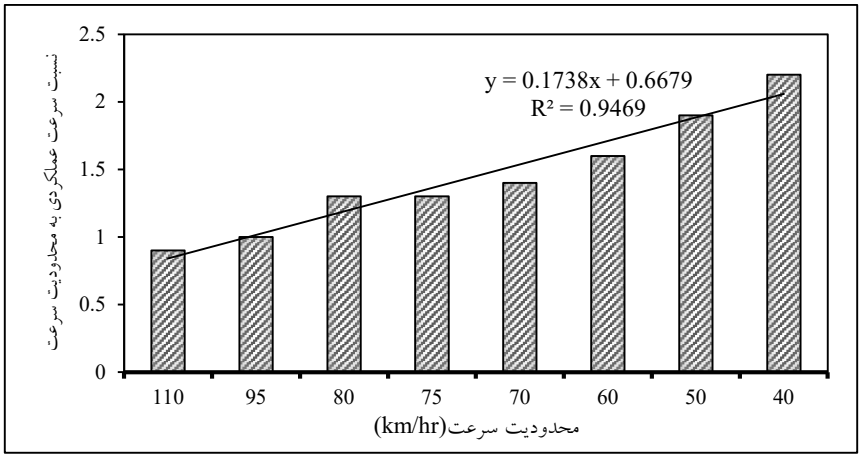
متغیر محدودیت سرعت مطابق نتایج در شکل (۵) نقش قابل‌توجهی در تعیین سرعت عملکردی داشت، اما نتایج در شکل (٦) نشان داد که قانون‌پذیری رانندگان تنها در سرعت‌های مجاز بالاتر از۹۵ و ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت، مشاهده می‌شود. در سایر محدوده‌های سرعت، نسبت سرعت عملکردی به سرعت مجاز حتی تا بیش از ۲/۲ برابر افزایش یافته است که بیانگر ضعف در کارایی تابلوهای محدودیت سرعت و بی‌توجهی رانندگان به آن‌ها در شرایط واقعی ترافیکی است. بنابراین، اعمال کنترل هوشمند و مکان‌یابی هدفمند دوربین‌های سرعت در قطعاتی با محدودیت پایین‌تر می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در رفتار سرعتی ایجاد کند.



شکل ٤. رابطه سرعت عملکردی در مسیر مستقیم با سرعت ۸۵ درصد در قوس قبل از آن



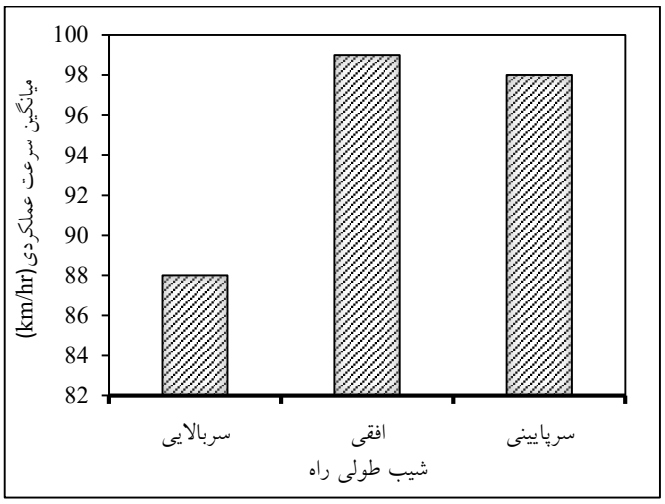
شکل ٥. رابطه بین میانگین سرعت عملکردی با محدودیت سرعت در مسیر مستقیم



شکل ٦. نسبت میانگین سرعت عملکردی به محدودیت سرعت در مسیر مستقیم

شیب طولی (مسیر مستقیم)

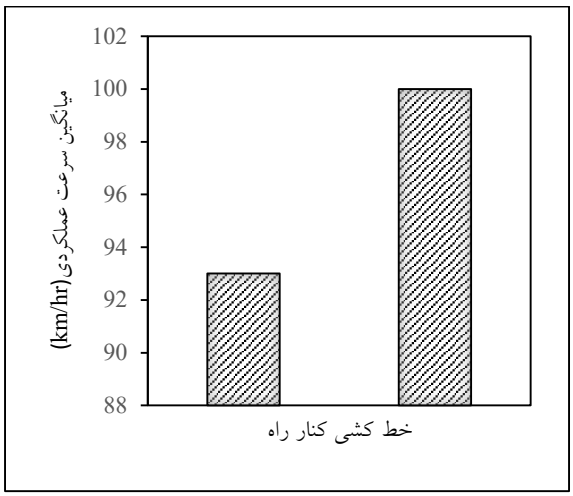
شیب طولی نیز مطابق انتظار اثر معنی‌داری بر سرعت داشت؛ رابطه میانگین سرعت عملکردی با شیب طولی راه در مسیر مستقیم در شکل(۷) ارائه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد مقاطع سربالایی، سرعت رانندگان به‌طور میانگین حدود ۱۰ کیلومتر بر ساعت کاهش یافت. با این حال، در مقاطع سرپایینی تفاوت معناداری با مسیرهای افقی مشاهده نشد، که احتمالاً ناشی از حرکت رانندگان با دنده سنگین و کنترل‌شده برای حفظ ایمنی است.



شکل ۷. رابطه میانگین سرعت عملکردی با شیب طولی راه در مسیر مستقیم

خط‌کشی کنار راه (مسیر مستقیم)

نتایج در شکل (۸) نشان داد، وجود خط‌کشی کنار راه موجب افزایش حدود ۷/۳ کیلومتر بر ساعت در سرعت عملکردی می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده نقش روانی خط‌کشی در افزایش حس ایمنی راننده و تمایل به حرکت با سرعت بالاتر است، که در طراحی و نگهداری مسیرها باید با دقت مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۸ رابطه میانگین سرعت عملکردی با خط کشی کنار راه در مسیر مستقیم

۴-۲ قوس افقی

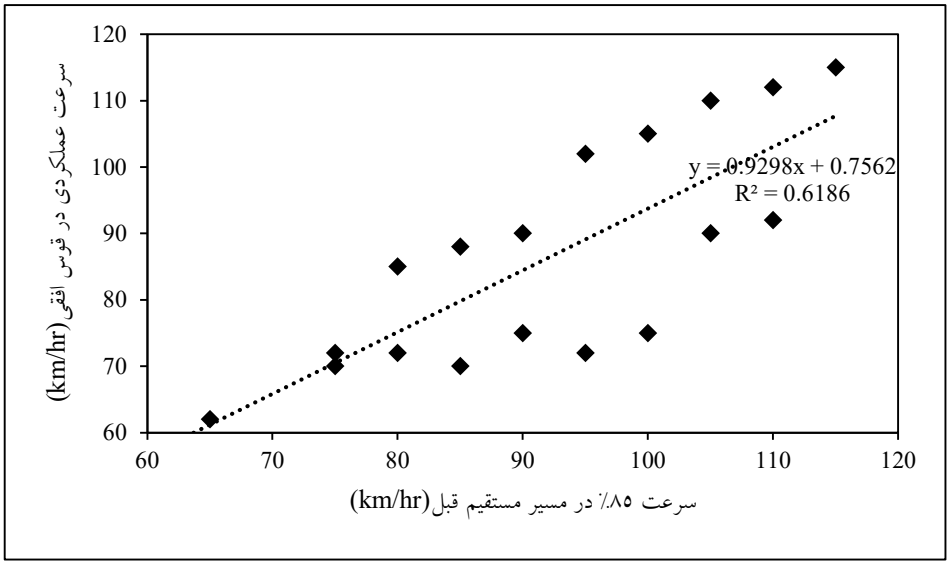
در قوس افقی نیز چهار متغیر اصلی شامل سرعت ۸۵ درصد در مسیر مستقیم قبل، شعاع قوس، محدودیت سرعت و شیب طولی تأثیر معناداری بر سرعت عملکردی داشتند.

۴-۲-۱ سرعت ۸۵ درصد در مسیر مستقیم قبل (قوس افقی)

در جدول (۸) اطلاعات آماری مربوط به سرعت مسیر مستقیم قبل ارائه شده است. همچنین نمودار شکل (۹) رابطه سرعت ۸۵ درصد در مسیر مستقیم قبل با سرعت عملکردی در قوس افقی را نمایش می‌دهد. در قوس افقی مشابه مسیر مستقیم، سرعت ۸۵ درصد در مسیر مستقیم قبل، مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده بود؛ به‌گونه‌ای که به ازای یک واحد افزایش، حدود ۰/۵۵ واحد افزایش در سرعت قوس مشاهده شد. این نتیجه نشان می‌دهد که کاهش سرعت مؤثر در قوس، وابستگی بالایی به شرایط هندسی و روانی مسیر پیشین دارد و اقدامات آرام‌سازی باید پیش از ورود به قوس اعمال شوند. در غیر این صورت، ورود با سرعت بالا می‌تواند منجر به کاهش ناگهانی کنترل و افزایش احتمال واژگونی یا خروج از مسیر شود.

جدول ۸. اطلاعات آماری مربوط به سرعت ۸۵ درصد در مسیر مستقیم قبل

نام متغیر	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	انحراف معیار	واریانس
سرعت ۸۵ ٪ در مسیر مستقیم	٦٧	۱۱۳	۹۷/۰۸	۹/۵۹	۹۱/۹۵۹



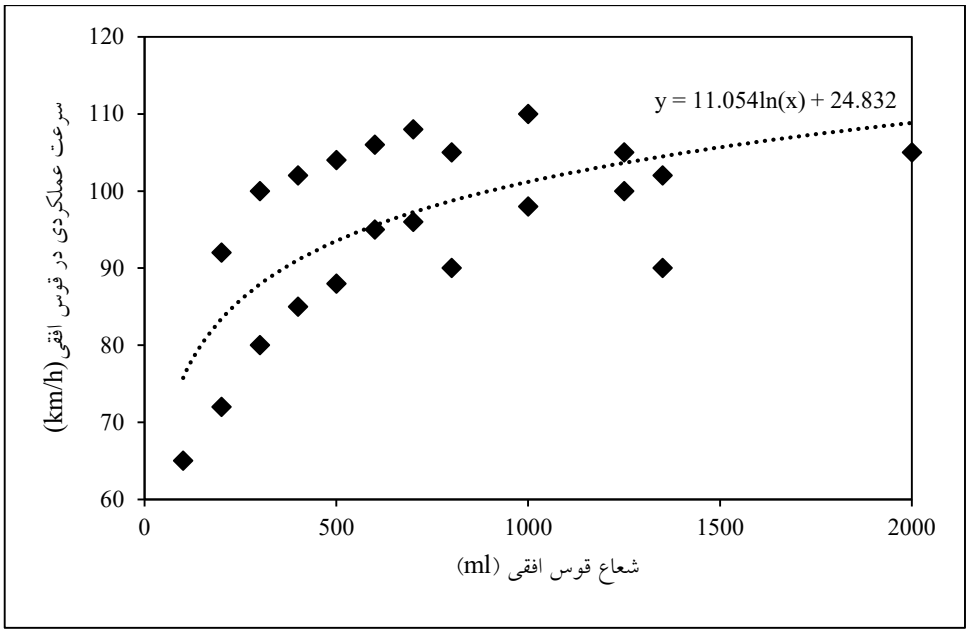
شکل ۹. رابطه سرعت ۸۵ درصد در مسیر مستقیم قبل با سرعت عملکردی در قوس افقی

شعاع قوس افقی

در جدول (۹) اطلاعات آماری مربوط به شعاع قوس افقی ارائه شده است. نتایج در شکل (۱۰) نشان داد که شعاع قوس افقی رابطه معنی‌داری با سرعت عملکردی دارد؛ به‌طوری که با افزایش شعاع قوس، تمایل رانندگان به حفظ یا افزایش سرعت بیشتر می‌شود. این نتیجه با یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی دارد و تأیید می‌کند که قوس‌های با شعاع کم (زیر ۳۰۰ متر) به‌طور طبیعی موجب کاهش سرعت می‌شوند. بنابراین، طراحی تدریجی و پیوسته قوس‌ها به‌ویژه در مسیرهایی با تغییرات ناگهانی شعاع می‌تواند از نوسانات شدید سرعت جلوگیری کرده و ایمنی را ارتقا دهد.

جدول ۹. اطلاعات آماری مربوط به شعاع قوس افقی

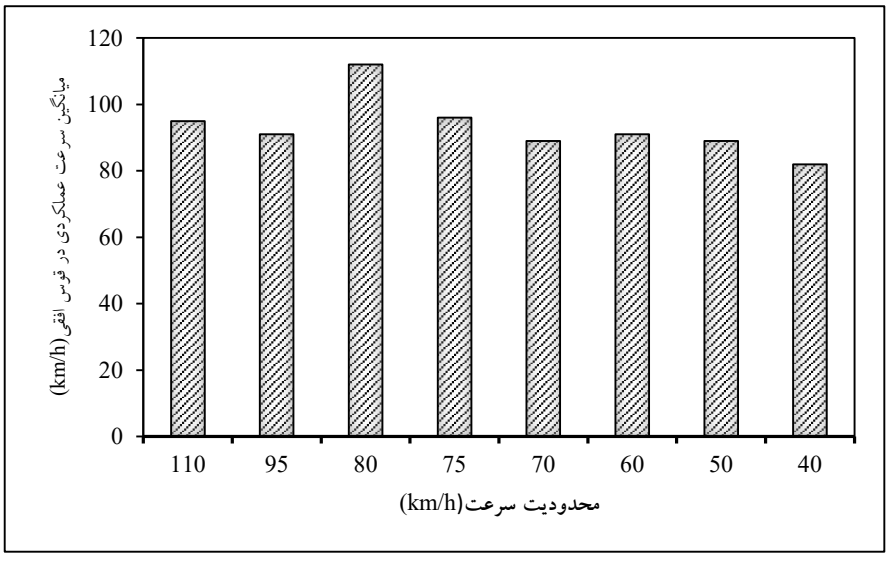
نام متغیر	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	انحراف معیار	واریانس
شعاع قوس افقی	۱۰۵	۲۰۰۰	٤٨٧/٨٣	٣٣٨/٨٥٦	١١٤٨٢٣/٤٩٣



شکل ۱۰. رابطه شعاع قوس افقی با سرعت عملکردی در قوس افقی

محدودیت سرعت(قوس افقی)

نتایج در شکل (۱۱) نشان می‌دهد محدودیت سرعت در قوس‌ها، مشابه مسیر مستقیم، تنها در مقادیر بالاتر (۱۱۰ و ۹۵ کیلومتر بر ساعت) میزان پایبندی قابل توجهی مشاهده شد. در محدودیت‌های کمتر از ۷۵ کیلومتر بر ساعت، رفتار رانندگان نشان‌دهنده تمایل به حرکت با سرعتی بالاتر از مقدار مجاز بود. این الگو نشان می‌دهد که تابلوهای محدودیت سرعت به تنهایی در تغییر رفتار رانندگان مؤثر نیستند و باید با اقدامات فیزیکی و بصری (مانند تغییر جنس روسازی، شیارهای لرزشی یا نصب علائم هشدار زودهنگام) ترکیب شوند تا اثربخشی بیشتری داشته باشند.



شکل ۱۱. رابطه بین میانگین سرعت عملکردی با محدودیت سرعت در قوس افقی

شیب طولی راه (قوس افقی)

نتایج بر اساس شکل (۱۲) نشان می‌دهد، شیب طولی راه تأثیر معناداری بر میانگین سرعت وسایل نقلیه در قوس افقی دارد. بیشترین میانگین سرعت در حالت شیب افقی ۹۴ کیلومتر برساعت، رخ می‌دهد که بیانگر شرایط پایدارتر حرکت و افزایش اعتماد رانندگان است. در مقابل، شیب سربالایی کمترین مقدار میانگین سرعت ۸۳ کیلومتر برساعت، را به خود اختصاص داده است، که می‌تواند ناشی از افت توان حرکتی خودرو و افزایش احتیاط رانندگان در مقاطع رو به بالا باشد. شیب سرپایینی نیز موجب افزایش سرعت شده و مقدار آن نزدیک به حالت افقی است.

مدلسازی

مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار SPSS و روش ورود هم‌زمان متغیرها انجام شده است.

مدلسازی مسیر مستقیم

در جدول (۱۰) متغیرهای مستقل و وابسته در مدل مسیر مستقیم ارائه شده است.

در متغیرهای مستقل گسسته، لازم است یکی از طبقات به‌عنوان طبقه مرجع انتخاب شود؛ به همین منظور، برای مدلسازی مسیر مستقیم، شیب افقی (G3) و سرعت‌مجاز ۱۱۰ کیلومتربرساعت (SL_1) به عنوان طبقات مرجع در نظر گرفته شده‌اند.

شکل ۱۲. رابطه میانگین سرعت با شیب طولی راه در قوس افقی

جدول ۱۰. متغیرهای مستقل و وابسته در مدل مسیر مستقیم

نوع متغیر	نام متغیر	کد و طبقات	توضیح
متغیر وابسته	V85r	–	سرعت عملکردی ۸۵ درصدی در مسیر مستقیم
متغیر مستقل پیوسته	V85c	–	سرعت ۸۵ درصدی قوس قبل
متغیر مستقل گسسته	شیب طولی راه	سربالایی(G1) ، سرپایینی (G2) ، افقی (G3) (مرجع)	متغیر طبقه‌ای
متغیر مستقل گسسته	سرعت مجاز	SL1 ... SL6 ،SL7(مرجع)	طبقات مختلف سرعت مجاز
متغیر مستقل گسسته	خط‌کشی کنار	MS (۰ و ۱)	وجود یا عدم وجود خط‌کشی

مدل جهت پیش‌بینی سرعت عملکردی در بخش مستقیم راه، مطابق رابطه (۲) به‌دست آمده است. ضریب منفی شیب نشان می‌دهد که این عوامل باعث کاهش سرعت می‌شوند، در حالی که ضریب مثبت برای خط‌کشی مسیر نشان‌دهنده‌ی افزایش سرعت عملکردی است.

$$V85r=47.534+0.552(V85c) -(6.373(L6) \text{ or } 6.581(SL7) \text{ or } 8.831(L8))-8.252(G1) +3.734(MS) \quad (۲)$$

بر اساس نتایج جدول (۱۱) خلاصه مدل، مقدار ضریب همبستگی چندگانه برابر ۰/۸۴۹ به‌دست آمده که نشان‌دهنده ارتباط نسبتاً قوی میان متغیرهای مستقل و سرعت عملکردی در مسیر مستقیم است. مقدار ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۷۲۱

محاسبه شد که بیان می‌کند حدود ۷۲ درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای واردشده در مدل قابل تبیین است. همچنین مقدار ضریب تعیین تعدیل‌شده برابر ۰/۶۸۰ بوده و با توجه به نقش تعداد متغیرها و حجم نمونه، معیار دقیق‌تری برای ارزیابی مدل محسوب می‌شود. خطای معیار تخمین نیز مقدار ۵/۳۵ را نشان می‌دهد که بیانگر میزان پراکندگی داده‌ها حول خط رگرسیون و دقت پیش‌بینی مدل است.

افزون بر این، مقدار آماره دوربین–واتسون برابر ۲/۱۷۴ به‌دست آمده که نزدیک به عدد ۲ است و عدم وجود خودهمبستگی سریالی در خطاهای مدل را نشان می‌دهد. مجموعه این شاخص‌ها حاکی از برازش مناسب مدل و قابلیت اطمینان آن در پیش‌بینی سرعت عملکردی در بخش مستقیم راه است.

بر اساس جدول (۱۲) ضرایب مدل رگرسیونی، ضرایب استاندارد نشده (B) و استاندارد شده (Beta) امکان بررسی اثر هر یک از متغیرهای مستقل بر سرعت عملکردی را فراهم می‌کنند. ضرایب استاندارد شده به دلیل یکسان‌سازی مقیاس متغیرها، معیار مناسب‌تری برای مقایسه نقش نسبی پیش‌بین‌ها به شمار می‌روند. نتایج آزمون t و مقادیر سطح معنی‌داری (Sig) نشان می‌دهد که متغیر (سربالایی (G1)) با ضریب منفی و معنی‌داری بالا، موجب کاهش قابل‌توجه سرعت در مسیر مستقیم می‌شود، در حالی که متغیر (سرپایینی (G2)) اثری معنی‌دار بر سرعت ندارد. وجود خط‌کشی کنار راه (MS) اثر مثبت و معنی‌داری بر سرعت عملکردی داشته و باعث افزایش سرعت می‌شود. همچنین سطوح مختلف سرعت مجاز نسبت به طبقه مرجع (۱۱۰ کیلومتربرساعت) عمدتاً اثر کاهشی داشته و بخش زیادی از آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار گزارش شده‌اند. در این میان، متغیر (سرعت ۸۵ درصدی قوس قبل (S85c)) قوی‌ترین و معنی‌دارترین اثر را بر سرعت مستقیم دارد و نشان می‌دهد که رفتار سرعتی رانندگان در قوس پیش‌ازبخش مستقیم، تأثیر مستقیم و قابل‌توجهی بر سرعت عملکردی بخش مستقیم دارد. این نتایج مجموعاً حاکی از اهمیت متغیرهای هندسی و رفتاری مسیر در تبیین تغییرات سرعت عملکردی است.

جدول ۱۱. خلاصه مدل مسیر مستقیم

Model	R	R^2	Adjusted R^2	Error of the Estimate	Durbin-Watson
۱	۰/۸۴۹	۰/۷۲۱	۰/۶۸	۵/۳۵	۲/۱۷۴

جدول ۱۲. ضرایب مدل مسیر مستقیم و سطح معنی داری آنها برای سطوح مختلف متغیرها

متغیر	ضرایب غیر استاندارد		ضرایب استاندارد	t	Sig
	B	Error	Beta		
ثابت مدل	۴۷/۵۳۴	۵/۶۳۳		۸/۴۳۹	۰
سربالایی(G1)	-۸/۲۵۲	۲/۰۲۳	-۰/۲۹۲	-۴/۰۷۹	۰
سرپایینی (G2)	۰/۰۲۳	۱/۳۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱۷	۰/۹۸۶
خط کشی کنار (MS)	۳/۷۳۴	۱/۳۹۱	۰/۱۸۹	۲/۶۸۴	۰/۰۰۹
۹۵ کیلومتربرساعت	-۳/۴۱۴	۱/۸۰۶	-۰/۱۳۳	-۱/۸۹	۰/۰۶۳
۸۰ کیلومتربرساعت	۲/۹۵۱	۲/۴۳۶	۰/۰۸	۱/۲۱۲	۰/۲۲۹
۷۵ کیلومتربرساعت	-۵/۷۸۲	۳/۹۴۳	-۰/۰۹۲	-۱/۴۶۶	۰/۱۴۷
۷۰ کیلومتربرساعت	-۱/۴۵۹	۲/۶۹۱	-۰/۰۳۶	-/۰۵۴۲	۰/۵۸۹
۶۰ کیلومتربرساعت	-۶/۳۷۳	۲/۲۷	-۰/۱۸۴	-۲/۸۰۸	۰/۰۰۶
۵۰ کیلومتربرساعت	-۶/۵۸۱	۱/۹۵۲	-۰/۲۲۳	-۳/۳۷۱	۰/۰۰۱
۴۰ کیلومتربرساعت	-۸/۸۳۱	۲/۵۸	-۰/۲۱۹	-۳/۴۲۳	۰/۰۰۱
سرعت ۸۵٪ قوس قبل(S85c)	۰/۵۵۲	۰/۰۶۲	۰/۶۱۴	۸/۸۳۹	۰

مدلسازی قوس افقی

در جدول (۱۳) متغیرهای مستقل و وابسته در مدل مسیر مستقیم ارائه شده است. در متغیرهای مستقل گسسته، لازم است یکی از طبقات به‌عنوان طبقه مرجع انتخاب شود؛ به همین منظور، برای مدلسازی قوس افقی، شیب افقی (G2) و سرعت مجاز ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت (SL1) به عنوان طبقات مرجع در نظر گرفته شد.

جدول ۱۳. متغیرهای مستقل و وابسته در مدل مسیر مستقیم

نوع متغیر	نام متغیر	کد و طبقات	توضیح
متغیر وابسته	V85c	–	سرعت عملکردی ۸۵ درصدی رانندگان در قوس افقی
متغیر مستقل پیوسته	V85r	–	سرعت ۸۵ درصد مسیر مستقیم قبل
متغیر مستقل پیوسته	شعاع قوس افقی	R	شعاع قوس افقی در متر
متغیر مستقل گسسته	شیب طولی راه	سربالایی(G1) ، سرپایینی (G2) ، افقی (G3) (مرجع)	متغیر طبقه‌ای برای شیب مسیر
متغیر مستقل گسسته	سرعت مجاز	SL1تاSL8	طبقات مختلف محدودیت سرعت در قوس افقی

رابطه (۳) مدل پیش‌بینی سرعت عملکردی در قوس افقی نشان می‌دهد که افزایش سرعت مسیر مستقیم قبل (V85r) و شعاع قوس (R) اثر مثبت و قابل توجهی بر سرعت رانندگان دارند، در حالی که شیب سربالایی (G1) و محدودیت‌های پایین سرعت (SL6 و SL7) اثر کاهنده دارند. این مدل نقش متغیرهای هندسی و رفتاری مسیر را در تعیین سرعت عملکردی برجسته می‌کند و توانایی پیش‌بینی تغییرات سرعت در قوس‌های افقی را دارد.

$$V85c = 25.942 + 0.634(V85r) + 0.012(R) - 3.959(G1) - \big(5.466(SL6) or\ 3.98(SL7)\big) \quad (۳)$$

جدول (۱۴) خلاصه شاخص‌های برازش مدل رگرسیونی قوس افقی را نشان می‌دهد. مقدار R برابر با ۰/۸۸۷ نشان می‌دهد که بین متغیرهای مستقل و سرعت عملکردی همبستگی بالایی وجود دارد. مقدار R^2 برابر با ۰/۷۸۶ بیانگر آن است که حدود ۷۹ درصد از تغییرات سرعت عملکردی توسط متغیرهای مستقل مدل توضیح داده می‌شود. با در نظر گرفتن تعدیل حجم نمونه و تعداد متغیرها، R^2 تعدیل‌شده ۰/۷۵۵ معیاری مناسب‌تر برای ارزیابی قدرت توضیح‌دهی مدل ارائه می‌دهد. خطای معیار تخمین برابر با ۵/۲۱۵ نشان‌دهنده پراکندگی مقادیر مشاهده‌شده حول خط رگرسیون است. همچنین آماره دوربین– واتسون برابر با ۲/۰۳۲ است که نشان می‌دهد فرض عدم خودهمبستگی خطاها پذیرفته می‌شود و مدل از نظر آماری قابل اعتماد است.

در جدول (۱۵)، ضرایب استاندارد نشده (B) و استاندارد شده (Beta) نشان می‌دهند که هر یک از متغیرهای مستقل چه تاثیری بر سرعت عملکردی رانندگان در قوس افقی دارند. شیب سربالایی (G1) با ضریب منفی و معنی‌دار موجب کاهش قابل توجه سرعت عملکردی می‌شود، در حالی که شیب سرپایینی (G2) اثر قابل توجهی ندارد. در میان محدودیت‌های سرعت، سطوح پایین‌تر نسبت به سطح مرجع (۱۱۰ کیلومتربرساعت) عمدتاً اثر کاهشی داشته و بخش زیادی از آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار هستند، به‌ویژه محدودیت ۶۰ کیلومتربرساعت که اثر کاهش‌دهنده قابل توجهی دارد. متغیرهای پیوسته شعاع قوس افقی (R) و سرعت ۸۵ درصد مسیر مستقیم قبل (S85c) اثر مثبت و معناداری بر سرعت عملکردی دارند، به طوری که افزایش شعاع و سرعت مسیر قبل موجب افزایش سرعت عملکردی می‌شود و سرعت مسیر قبل (S85c) قوی‌ترین اثر مثبت را نشان می‌دهد. این نتایج تأکید می‌کنند که متغیرهای هندسی مسیر، از جمله شعاع و شیب، و همچنین متغیرهای رفتاری راننده مانند سرعت مسیر قبل، نقش کلیدی در تعیین سرعت عملکردی رانندگان در قوس‌های افقی دارند و مدل ساخته‌شده توانایی پیش‌بینی این تغییرات را به‌طور قابل اعتماد دارد. این نتایج تأکید می‌کنند که متغیرهای هندسی مسیر، از جمله شعاع و شیب، و همچنین متغیرهای رفتاری راننده مانند سرعت مسیر قبل، نقش کلیدی در تعیین سرعت عملکردی رانندگان در قوس‌های افقی دارند و مدل ساخته‌شده توانایی پیش‌بینی این تغییرات را به‌طور قابل اعتماد دارد.

جدول ١٤. خلاصه مدل قوس افقی

Model	R	R^2	Adjusted R^2	Error of the Estimate	Durbin-Watson
۱	۰/۸۸۷	۰/۷۸٦	۰/۷۵۵	۵/۲۱۵	۲/۰۳۲

جدول ۱۵. ضرایب مدل قوس افقی و سطح معنی داری آنها برای سطوح مختلف متغیرها

متغیر	ضرایب غیر استاندارد		ضرایب استاندارد	t	Sig
	B	Error	Beta		
ثابت مدل	۲۵/۹٤۲	٦/۸۰٤		۳/۸۱۳	۰
سربالایی(G1)	-۳/۹۵۹	۱/۹۰۱	-۰/۱۲٦	-۲/۰۸۳	۰/۰٤۱
سرپایینی (G3)	۱/٦۹	۱/۲۷۵	۰/۰۷۹	۱/۳۲۵	۰/۱۸۹
۹۵ کیلومتربرساعت	-۰/۹۸۹	۱/۵۷٦	-۰/۰۳۷	-۰/٦۲۷	۰/۱۸۹
۸۰ کیلومتربرساعت	۲/۸٤	۵/٤۰۲	۰/۰۲۹	۰/۵۲٦	۰/٦۰۱
۷۵ کیلومتربرساعت	۲/۱۱٦	۳/۹۰۸	۰/۰۳	۰/۵٤۱	۰/۵۹
۷۰ کیلومتربرساعت	-۲/۸۲٤	۲/۲۰۹	-۰/۰۷۳	-۱/۲۷۸	۰/۲۰۵
٦۰ کیلومتربرساعت	-۵/٤٦٦	۱/۹۱۲	-۰/۱٦۷	-۲/۸۵۹	۰/۰۰٦
۵۰ کیلومتربرساعت	-۳/۹۸	۲/۰۱۸	-۰/۱۲۱	-۱/۹۷۲	۰/۰۵۲
٤۰ کیلومتربرساعت	-۱/۲۹۱	۳/۰۲	-۰/۰۲٦	-۰/٤۲۸	۰/٦۷
شعاع قوس افقی(R)	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۳۹۳	٦/۲۳۹	۰
سرعت ۸۵٪ قوس قبل(S85c)	۰/٦۳٤	۰/۰۷۱	۰/۵۷۷	۸/۹۲۱	۰

۵-نتیجه‌گیری

در این پژوهش با هدف تحلیل و مدل‌سازی سرعت عملکردی رانندگان، ابتدا داده‌های سرعتی از چندین قطعه مسیر مستقیم و قوس افقی در راه‌های چهارخطه برون‌شهری استان لرستان برداشت شد. سپس سرعت عملکردی رانندگان با استفاده از تجهیزات ثبت سرعت در شرایط ترافیکی آزاد و بدون حضور پلیس اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های هندسی شامل شعاع قوس، شیب طولی، وجود یا عدم وجود خط‌کشی حاشیه‌ای، و محدودیت سرعت رسمی هر قطعه نیز ثبت گردید. در نهایت، دو مدل رگرسیون خطی چندگانه مجزا برای قطعات مسیر مستقیم و قوس افقی ساخته شد. اهم نتایج حاصل از پژوهش به شرح ذیل است:

در مسیر مستقیم، سرعت ۸۵ درصد در قوس قبل از آن، قوی‌ترین متغیر تأثیرگذار بود و به‌ازای هر واحد افزایش، حدود ۰/۵۵ واحد به سرعت عملکردی افزوده شد. علاوه بر این، شیب سربالایی باعث کاهش حدود ۸/۲۵ کیلومتر بر ساعت، سرعت شد، اما شیب سرپایینی اثر معناداری نداشت. وجود خط‌کشی کنار راه نیز موجب افزایش حدود ۳/۷ کیلومتر بر ساعت سرعت گردید که نشان‌دهنده نقش روانی آن در افزایش حس ایمنی رانندگان است.

در قوس افقی نیز سرعت ۸۵ درصد مسیر مستقیم قبل، اصلی‌ترین عامل تعیین‌کننده سرعت بود و هر واحد افزایش آن حدود ۰/٦۳ واحد سرعت قوس را افزایش داد. از سوی دیگر، شعاع قوس با ضریب مثبت و معنی‌دار تأثیر چشمگیری بر سرعت داشت و هر ۱۰۰ متر افزایش شعاع تقریباً ۱/۲ کیلومتر بر ساعت سرعت را افزایش داد. شیب سربالایی نیز کاهش سرعت حدود ۳/۹٦ کیلومتر بر ساعت را به‌دنبال داشت، در حالی که شیب سرپایینی تفاوت معناداری ایجاد نکرد.

بررسی رفتار رانندگان نسبت به محدودیت‌های سرعت نشان می‌دهد که تبعیت واقعی تنها در محدودیت‌های بالای ۹۵ و ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت مشاهده شد، در حالی که در محدودیت‌های کمتر، نسبت سرعت عملکردی به سرعت مجاز تا بیش از ۲ برابر در قوس و تا ۲/۲ برابر در مسیر مستقیم افزایش یافت. این یافته نشان می‌دهد تنها بخش کمی از تابلوها منجر به کاهش سرعت می‌شوند. تحلیل نتایج نشان داد که در مقاطع مستقیم، تنها ۳ مورد از ۸ تابلو، محدودیت سرعت اثرگذاری معنادار داشته‌اند و این مقدار در قوس‌ها به ۲ مورد محدود شده است. این امر بیانگر آن است که تنظیم سرعت توسط رانندگان عمدتاً تابع هندسه و شرایط واقعی مسیر است، نه علائم ترافیکی. ازاین‌رو، استفاده از اقدامات فیزیکی آرام‌سازی، از جمله کاهش تدریجی سرعت پیش از قوس‌ها، برای کاهش خطرات ناشی از سرعت زیاد ضروری به نظر می‌رسد. مدل پیش‌بینی سرعت عملکردی در مسیر مستقیم نشان داد که سرعت ۸۵ درصد در قوس قبل از بخش مستقیم (V85) با ضریب ۰/۵۵۲ قوی‌ترین اثر مثبت را بر سرعت در بخش مستقیم دارد. همچنین شیب سربالایی (G1) موجب کاهش ۸/۲۵ کیلومتر برساعت سرعت عملکردی می‌شود؛ در حالی که، وجود خط‌کشی کنار مسیر (MS) باعث افزایش ۳/۷۳ کیلومتر برساعت سرعت رانندگان است. این امر ناشی از احساس امنیت بیشتر در مسیر است. محدودیت‌های سرعت پایین‌تر نیز نسبت به سرعت مرجع (۱۱۰ کیلومتر برساعت) اثر کاهشی معنادار دارند؛ به‌طور نمونه محدودیت‌های ٤٠، ٥٠ و ٦٠ کیلومتر برساعت به ترتیب موجب کاهش سرعت به اندازه ۸/۸۳، ٦/٥٨ و ٦/٣٧ کیلومتر برساعت می‌شوند. ضریب تعیین، R^2=۰/۷۲۱ نشان‌دهنده اعتبار و قابلیت پیش‌بینی مناسب مدل هستند.

در مدل پیش بینی سرعت عملکردی در قوس افقی، متغیر سرعت ۸۵ درصد مسیر مستقیم قبل (V85r) با ضریب ۰/٦٣٤ بیشترین اثر مثبت را بر سرعت عملکردی در قوس دارد. شعاع قوس (R) نیز اثر مثبت و معنی‌دار داشته و هر ۱۰۰ متر افزایش شعاع حدود ۱/۲ کیلومتر برساعت، سرعت را افزایش می‌دهد. شیب سربالایی (G1) موجب کاهش ۳/۹٦ کیلومتر برساعت سرعت و محدودیت‌های پایین‌تر سرعت مانند ٦٠ کیلومتر برساعت باعث کاهش ٥/٤٦ کیلومتر برساعت می‌شوند. ضریب تعیین، R^2=۰/۷۸٦ نشان‌دهنده اعتبار و قابلیت پیش‌بینی مناسب مدل است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی پیوسته مسیر، اعمال آرام‌سازی رفتاری پیش از قوس و تقویت اقدامات کنترلی هوشمند، برای بهبود ایمنی و کاهش سرعت‌های غیرمجاز ضروری است.

٦- مراجع

-Akbari Gheibi, R., & Nazarian, P. (2020). Examining the impact of speed enforcement cameras on reducing road accidents and speeding violations: A case study of Zanjan-Qazvin freeway. *In International Conference on Civil Engineering, Architecture, Development, and Urban Infrastructure Regeneration in Iran,* Tehran, Iran.

-Ameri, M., & Gorji, M. (2017). The role of speed enforcement cameras in reducing crash severity. *In 1st National Conference on Road and Transportation Engineering,* Rasht, Iran.

-Amouzadeh Omrani, M., Tahmoursi, G., & Ghazanfari Tehran, A. (2023). Analysis and Comparison of Critical Pedestrian Crossing Time at Intersections Adjacent to Holy Places and other Places. *Quarterly Journal of Transportation Engineering,* 14(3), 2751-2773. **doi:10.22119/jte.2022.338084.2596**

-Amouzadeh, O. M., AkbariGheibi, R., Hefzollah, R., & Zeynalzadeh, M. (2022). Investigating the effect of increasing the number of vehicles on accidents related to unauthorized distance and speed violations (case study: Bushehr-Borazjan highway). **doi: 10.22034/road.2021.274055.1937**

-AmouzadehOmrani, M., Hadizadeh, E., & Hajimirzajan, A. (2024). Investigating the causes and factors of railway accidents caused by the escape of a train carrying dangerous goods and its role in the Khayyam station accident. *Road,* 32(118), 75-90. **doi: 10.22034/road.2023.359722.2082**

-Das, S., Khodadadi, A., & Liu, J. (2024). Short-Duration Crash Modeling to Understand the Impact of Operating Speed on Freeway Crashes During COVID-19. *Transportation Research Record,* 2678(12), 632-642.

studies adopting a safe system approach to determine safer speed limits: A case study from Iran. *Journal of Road Safety,* 33(1), 30-35.

-Sakhravi, M., & Zorbakhsh, M. (2018). Probabilistic modeling of crash frequency based on average speed and prioritization of road types in terms of crash cost. *In International Conference on Civil Engineering, Architecture, and Urban Development Management in Iran,* Tehran, Iran.

-Šeporaitis, A., Vorobjovas, V., & Vaitkus, A. (2020). Influence of horizontal curve radius on driving speed on rural roads. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering,* 15(2), 140–150. **doi.org/10.7250/bjrbe.2020-15.475**

-Shams, M., Maleki, M., Shariatinia, S., Omidimorad, A., Zakeri, H., Fallah Zavareh, M., Hamelmann, C., Shuey, R., & Ranjbar, M. (2022). Insights for speed management among Iranian drivers: a social marketing formative research study. *Journal of Injury and Violence Research,* 14(3), 199-200.

-Tokalli Kashani, A., Mirhashemi, A., & Amirifar, S. (2021). Examining the effect of environmental conditions and accidents on crash severity due to speeding in Mashhad city. *In 8th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture, and Urban Management,* Tehran, Iran.

-Torrão, G. (2022). Speed related variables for crash injury risk analysis: what has been used?. *International Journal of Crashworthiness,* 27(5), 1560-1567. **doi.org/10.1080/13588265.2021.1959152**

-Tottadi, K. K., & Mehar, A. (2024). Estimating Operating Speed on Highways using Multiple Linear Regression and Artificial Neural Network Technique. *Transactions on Transport Sciences,* 15(2). **doi.org/10.5507/tots.2024.001**

-Williams, N. (1989). Linear regression (Gh. Tarmest, Trans.). Ahvaz, Iran: Jahad Daneshgahi, Shahid Chamran University.

-Datta, S. (2025). Modeling operating speed of mixed vehicular classes at horizontal curves on two-lane undivided rural highways. Discover Civil Engineering, 2(1). **doi.org/10.1007/s44290-025-00306-9**

-Imprialou, M. I. M., Quddus, M., Pitfield, D. E., & Lord, D. (2016). Re-visiting crash–speed relationships: A new perspective in crash modelling. *Accident Analysis & Prevention*, *86*, 173-185. **doi.org/10.1016/j.aap.2015.10.001**

-jahandideh,Z., Mirbaha,B. & Rassafi,A. A. (2017). Modeling Crossing Pedestrians' Risk Intensity Based on Mixed Index Ranking: Selected Time to Collision and Speed of Approaching Vehicle (A Case Study of Qazvin City). *Quarterly Journal of Transportation Engineering,* 9(2), 277-294. **dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20086598.1396.9.2.9.7**

-Kardani-Yazd, N., Kardani-Yazd, N., & Mansouri Daneshvar, M. R. (2019). A rapid method for evaluating the variables affecting traffic flow in a touristic road, Iran. *Environmental Systems Research,* 8(1), 34. **doi.org/10.1186/s40068-019-0162-0**

-Maljković, B., & Cvitanić, D. (2016). Evaluation of design consistency on horizontal curves for two-lane state roads in terms of vehicle path radius and speed. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, *11*(2), 127-135.

-Pourbagher, M., Salehpour, A., & Divandari, H. (2019). Developing a model for the impact of vehicle speed on crash severity on rural highways: A case study of Chalus-Salman Shahr. I*n 6th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture, and Urban Management, Tehran, Iran.*

-Ranjbar, M., Kashani, A. T., Besharati, M. M., Bondarabadi, M. A., Zakeri, H., Hosseinizadeh, S., ... & Shuey, R. (2022). Road safety case

Analysis of Factors Affecting Operating Speed on Urban and Intercity Roads (Case Study: Lorestan Province)

Mohsen Amouzadeh Omrani, *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, Iran.*
Ghasem Tahmouresi, Ph.D. Graduate, Department of Civil Engineering, Am.C., Islamic Azad University, Amol, Iran.
Bahram Sebghati Shiraz, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Za.C., Islamic Azad University, Zanjan, Iran.
Seyed Mehdi Sajjadi, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Za.C., Islamic Azad University, Zanjan, Iran.

E-mail: Mo.Omrani@iau.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT
Traffic safety remains a major challenge in transportation engineering, and vehicle speed is a key factor influencing both the occurrence and severity of crashes. Drivers' speed behavior is affected by environmental conditions and roadway geometry. This study aims to analyze operating speed and its influencing factors on four-lane rural highways in Lorestan Province. Free-flow speed data were collected covertly, and geometric characteristics were obtained through field surveys. A total of 201 segments, including tangent and curve sections, were identified, and the free-flow speed of 100 passenger cars was recorded for each segment, resulting in 20,100 valid observations. Multiple linear regression was used to model operating speed. The novelty of this study lies in its empirical assessment of drivers' compliance with various posted speed limits and the comparison of speed behavior between tangent and curved sections—an aspect rarely addressed in previous domestic and international studies. Results showed that compliance was observed only at posted limits of 110 km/h and 95 km/h, while decreasing the speed limit increased the gap between operating and posted speeds by up to 2.2 times on tangents and 2 times on curves. On tangents, the 85th-percentile speed of the preceding curve had the strongest positive effect ($\beta = 0.55$), whereas upgrades reduced speed by an average of 25.8 km/h and edge line markings increased speed by 3.7 km/h. On horizontal curves, the preceding tangent's 85th-percentile speed ($\beta = 0.63$) was the most influential factor, and each 100-m increase in curve radius raised speed by 1.2 km/h. Upgrades reduced curve speeds by 3.96 km/h. The coefficient of determination was 0.721 for tangents and 0.786 for curves, indicating good predictive performance. Findings highlight the need for consistent geometric design, targeted traffic-calming measures, and enhanced intelligent control systems to manage speeding and improve rural highway safety.

Keywords: Operating Speed, Speed Limit, Road Safety, Traffic Accident, Traffic Calming