

## بررسی ایمنی حرکت خودروی سدان منحرف شده در جاده‌های با شیب شیروانی قرار گرفته در محل سرازیری و قوس‌های قائم و افقی

مقاله علمی - پژوهشی

علی عطاری، دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

\*علی عبدی کردانی، استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [aliabdi@eng.ikiu.ac.ir](mailto:aliabdi@eng.ikiu.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹

صفحه ۸۲-۶۹

### چکیده

خروج وسیله نقلیه از قوس‌ها به عنوان یکی از حادثه خیزترین نقاط جاده، همواره توجه ویژه‌ای را به خود معطوف داشته است. نیروی گریز از مرکز وارده بر وسایل نقلیه و خطای انسانی دو عامل اساسی در بروز حادثه این نواحی به حساب می‌آیند که در نهایت منجر به واژگونی و یا لغزش وسایل نقلیه خواهند گردید. واژگونی و سر خوردگی وسیله نقلیه سدان جزو پارامترها و فاکتورهای مهمی است که در مسئله انحراف وسیله نقلیه در قوس‌ها مطرح می‌باشد و بر اساس آمار تصادفات، تلفات جانی و مالی بسیاری را به همراه دارند. اهمیت افزایش ایمنی سرازیری به خصوص در مسیرهای کوهستانی به دلیل احتمال ترکیب قوس‌های افقی با امتداد قائم و یا ترکیب آنها با شیب‌های تند، دو چندان خواهد بود. آئین نامه آشتو به عنوان معتبرترین آئین نامه طراحی راه‌ها، از مدل جرم نقطه ای جهت تعریف رفتار خودرو حین عبور از قوس‌ها استفاده می‌نماید که این در حقیقت به معنای حذف علم فیزیک و مهندسی مکانیک از طراحی راه می‌باشد که در نتیجه به کاهش ایمنی ختم خواهد گردید. یکی از محدودیت‌های اساسی مدل جرم نقطه‌ای نادیده گرفته شدن اختلاف توزیع نیرو روی چرخ‌ها و محورهای مختلف وسیله نقلیه می‌باشد. نتایج نهایی این تحقیق نشان از کاهش ایمنی در پیچ‌ها و قوس‌های دارای شیروانی‌های تند (۱:۳ و ۱:۴) دارد که جهت رفع این موضوع، تحقیق حاضر روابطی جدید به جهت استفاده در طراحی راه‌ها ارائه نموده است.

واژه‌های کلیدی: شیروانی، شیب سرازیری، خروج از جاده، واژگونی وسایل نقلیه، لغزش خودرو

### ۱-مقدمه

شیروانی‌های تند، دوچندان خواهد بود (کردانی و همکاران، ۲۰۱۵). اصطکاک سطح روسازی یکی از مهم‌ترین مسائل در ایمنی ترافیک جاده است. ضریب اصطکاک پایین ناشی از صیقلی شدن سطح یا اجرای نادرست، به عنوان یک پتانسیل خطر برای وقوع تصادف در نظر گرفته می‌شود. همچنین، علاوه بر کاهش اصطکاک موجود، اصطکاک مورد نیاز را افزایش می‌دهد که خطر تصادف را، به ویژه در قوس‌ها، افزایش خواهد داد (Santos, ۲۰۲۲). ضریبی تحت عناوینی چون نسبت جانبی، نسبت

قوس‌های افقی و قائم به دلیل نیروی گریز از مرکز وارده بر وسیله نقلیه، به عنوان حادثه‌خیزترین و خطرناک‌ترین نقاط جاده شناخته می‌شوند و توجه ویژه‌ای را جهت کاهش تصادفات به خود جلب کرده‌اند (مهر آرا و همکاران، ۲۰۱۴). ایمنی قوس، به‌ویژه در شیروانی‌ها، به عواملی بستگی دارد که مشخصات هندسی راه مهم‌ترین آن‌هاست. اهمیت افزایش ایمنی قوس‌های افقی و همچنین قائم، به‌ویژه در جاده‌های کوهستانی، به دلیل امکان ترکیب قوس افقی با امتداد قائم یا ترکیب آن‌ها با

چرخش، ضریب اصطکاک و ضریب اصطکاک جانبی شناخته می‌شود، که مورد آخر در اینجا به دلیل کاربرد بیشتر استفاده شده است. اصطکاک در دو جهت طولی و شعاعی (جانبی) حرکت تعریف می‌شود. بر این اساس، دستورالعمل‌های طراحی، ضرایب اصطکاک مجاز را در دو جهت حرکت تعریف می‌کنند. چرخ‌های وسیله نقلیه زمانی شروع به لغزش می‌کنند که ضریب اصطکاک جانبی به حد بالایی خود برسد که نقطه آستانه لغزشنامه‌یافته می‌شود (Wanx et al., 2022). در مطالعه‌های دیگر، کردانی و همکاران تأثیر ترکیب قوس قائم با قوس افقی را از منظر شتاب جانبی و ضریب اصطکاک جانبی بررسی کردند. آن‌ها اثر متقابل بین قوس‌های افقی و قائم و موقعیت نسبی آن‌ها را با استفاده از متغیرهایی مانند شتاب جانبی و ضریب اصطکاک جانبی شبیه‌سازی کردند. شبیه‌سازی‌ها در سرعت‌های ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت انجام گرفت. نمودارهای نیروهای اعمال‌شده نیز در تحلیل نهایی لحاظ شد. نتایج نشان دادند که حداکثر ضریب اصطکاک جانبی در مرکز قوس افقی، در عمیق‌ترین نقطه قوس قائم رخ می‌دهد. همچنین، ضریب اصطکاک جانبی کامیون‌ها نسبت به SUVها و خودروهای سواری کمتر بود، ولی شتاب جانبی آن‌ها بیشتر بود. این به آن معناست که SUV و سواری‌ها بیشتر مستعد لغزش هستند، در حالی که احتمال واژگونی در کامیون‌ها بیشتر است (کردانی و همکاران، ۲۰۱۵).

میزان اصطکاک به پارامترهای مختلفی بستگی دارد: وضعیت و نوع تایرها، وضعیت و نوع سطح روسازی، شرایط آب و هوایی، وسیله نقلیه، عملکرد راننده حین رانندگی و توانایی کنترل وسیله نقلیه در حال خروج از جاده، تغییر رفتار راننده و اعمال نیروی ترمز. با افزایش سرعت، اصطکاک مورد نیاز نیز افزایش می‌یابد، در حالی که اصطکاک موجود همزمان کاهش می‌یابد (کردانی و همکاران، ۲۰۲۱).

بر این اساس، اگر حاشیه ایمنی مقداری بزرگتر از صفر داشته باشد (یعنی: اصطکاک جانبی موجود > اصطکاک جانبی مورد نیاز)، شرایط جاده ایمن و مناسب تلقی می‌شود، اما زمانی که کمتر از صفر باشد (اصطکاک جانبی موجود < اصطکاک جانبی مورد نیاز)، اصطکاک کافی برای نیروی ترمز و بازگشت به مسیر حرکت وجود ندارد؛ در این حالت، لازم است شرایط ایمن در قوس‌های قائم و افقی با روش‌های زیر فراهم شود: تغییر و اصلاح هندسه قوس‌های افقی و همچنین قوس‌های قائم؛ تغییر و اصلاح هندسه شیروانی و شیب ایمن آن؛ کاهش مقدار سرعت ۸۵ درصد (۱۵٪)؛ بهبود شرایط اصطکاک سطح مسیر (مهر آرا و همکاران، ۲۰۱۴). بونسون مجموعه‌ای از ضرایب اصطکاک را با استفاده از تکنیک دینامیک خودرو ارائه کرد. طبق این مطالعه، قوس‌های افقی تند در سرازیری‌ها به دلیل تمایل رانندگان به

ترمزگیری برای حفظ سرعت ایمن، مایه نگرانی جدی هستند و زمانی که به ابتدای قوس نزدیک می‌شوند، تمایل بیشتری به استفاده از ترمز برای کاهش سرعت دارند. او نشان داد که ضرایب اصطکاک جانبی به شیب طولی مسیر، نوع وسیله نقلیه، نرخ برابندی، شعاع و سرعت بستگی دارد. علاوه بر این، نشان داده شد که برای اکثر قوس‌های افقی، آشتو به طور کلی، میزان اصطکاک جانبی مورد نیاز را کمتر از واقع برآورد می‌کند، به‌ویژه در قوس‌های افقی با شیب‌های تند، برابندی‌های کمتر و شعاع‌های بزرگ. مهرآرا، با بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های TruckSim و CarSim، تأثیر ترکیب قوس افقی و شیب‌های طولی را بر شاخص‌های ایمنی شامل شتاب جانبی و همچنین اصطکاک جانبی بررسی کرد. این مطالعه پایداری انواع مختلف وسایل نقلیه را در برابر واژگونی و لغزش بررسی کرد. یافته‌ها نشان داد که ورودی قوس‌های افقی به دلیل تغییرات زاویه فرمان و همچنین شتاب جانبی، بیشترین خطر را برای وسایل نقلیه ایجاد می‌کند. علاوه بر این، این مطالعه تأثیر ترمز بر اصطکاک جانبی را ارزیابی کرد. آن‌ها دریافتند که ترمزگیری تأثیر قابل توجهی بر اصطکاک جانبی دارد، به‌ویژه در خودروی سدان. بنابراین، این یک نگرانی حیاتی برای ایمنی کامیون در مورد واژگونی، و همچنین برای ایمنی سدان در مورد لغزش است.

کردانی و همکاران (Kordani et al., 2015) تحقیقی را برای نشان دادن رابطه بین ضرایب اصطکاک جانبی و شیب‌های طولی در قوس‌های افقی با استفاده از مدل شبیه‌سازی سه‌بعدی TruckSim و همچنین CarSim انجام دادند. مدل‌های مختلفی بر اساس نوع وسیله نقلیه (کامیون، SUV و سدان)، سرعت‌های طراحی و شیب‌های طولی توسعه داده شد. این تحقیق شامل انجام تحلیل رگرسیون برای ایجاد رابطه بین متغیرهای تأثیرگذار و ارائه مدلی برای ضریب اصطکاک جانبی بود. این تحقیق نشان داد که اصطکاک جانبی در هنگام عبور از پیچ برای انواع مختلف وسایل نقلیه در سرازیری‌ها بیشتر بود. علاوه بر این، تفاوت قابل توجهی در ضرایب اصطکاک بین وسیله نقلیه سنگین و وسیله نقلیه سواری مشاهده شد. عبدالله‌زاده نصیری و همکاران، در سال ۲۰۲۰ جنبه‌های ایمنی قوس افقی را با استفاده از راهنمای آشتو ارزیابی کردند. متغیرهای مختلف در طراحی هندسی قوس، مانند سرعت و وسیله نقلیه، شیب طولی، و همچنین ابعاد و وزن وسایل نقلیه، با استفاده از یک رویه شبیه‌سازی دینامیک چندجسمی بررسی شد. بر اساس آشتو، ترکیب قوس‌های دایره‌ای ساده و قوس‌های اتصال تدریجی با شیب‌های طولی منفی و مثبت مختلف توسعه یافت. بر اساس اصطکاک جانبی بین روسازی و تایر و پارامتر حاشیه ایمنی، تحلیل انجام شد. نشان داده شد که طراح باید بین وسایل نقلیه سنگین و سبک، به‌ویژه در قوس‌هایی با شعاع زیاد، تمایز قائل

جاده‌های سرازیری حادثه‌خیز با استفاده از مدل‌سازی دینامیک خودرو ارائه شد.

آن‌ها همچنین روشی را برای اصلاح پروفیل‌های طولی بزرگراه‌ها با جایگزینی سرازیری و سربالایی متوالی با سرازیری‌های پیوسته تحت دو سرعت ثابت ۷۰ و ۱۰۰ کیلومتر در ساعت ارائه کردند. کاهش سرعت وسیله نقلیه با استفاده از رویکرد ارائه شده، قبل از ورود به نقاط حادثه‌خیز، بدون ترمزگیری و دخالت راننده آشکار شد.

شود. بررسی در مورد تأثیر شیب‌های طولی نشان داد که حاشیه ایمنی با ورود وسایل نقلیه به قوس‌ها کاهش می‌یابد. کاهش حاشیه ایمنی در قوس‌های اتصال تدریجی با شیب‌های کمتری قوس‌های دایره‌ای ساده رخ داد. به علاوه، با افزایش سرعت، افزایشی در تفاوت بین اصطکاک جانبی مورد نیاز توصیه شده توسط آشتو و آنچه از شبیه‌سازی به دست آمد، مشاهده شد (Pal, S. and S.K. Roy, 2019).

یک روش طراحی هندسی توسط مرادی و همکاران (Moradi et al., 2021) برای کاهش سرعت وسایل نقلیه در

## ۲- روش شناسی

در مطالعه حاضر، از طریق نرم‌افزارهای CarSim و TruckSim، حرکات انواع مختلف وسایل نقلیه در رفتارهای رانندگی و شرایط جاده‌ای گوناگون شبیه‌سازی شده است. متغیرهای مختلف به چندین روش به منظور دستیابی به یک مدل جامع شبیه‌سازی شده‌اند. همچنین، علاوه بر سدان کلاس E و SUV کلاس E، یک کامیون دو محوره متداول نیز به عنوان وسایل نقلیه سواری انتخاب شده است. علاوه بر این، حالات مختلف قوس‌های افقی و قائم با شیروانی‌ها برای طراحی شرایط مختلف مسیر و شبیه‌سازی اشکال گوناگون موقعیت شیروانی‌ها در محل قوس‌ها استفاده شده است. علاوه بر این، در شبیه‌سازی‌های انجام شده، سرعت وسیله نقلیه سه سرعت ثابت ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر در ساعت برای قوس افقی و دو سرعت ثابت ۸۰ و ۱۰۰ کیلومتر در ساعت برای قوس قائم می‌باشد. همچنین، با توجه به شرایط خشک و روسازی

آسفالتی، حداکثر ضریب اصطکاک سطح روسازی ۰٫۹ در نظر گرفته شده است. هنگامی که وسیله نقلیه در قوس‌هایی با شیب‌های مختلف شیروانی در سرعت‌های متفاوت حرکت می‌کند، سناریوهای فرمان‌دهی به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که تغییرات رفتار رانندگان در ۴ حالت تغییر زاویه برای خروج از راه در قوس‌های افقی و ۳ حالت تغییر زاویه برای خروج از راه در قوس‌های قائم شبیه‌سازی و بررسی شده است. در نظر گرفته شده است که وسایل نقلیه با زاویه ۷٫۵، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه برای قوس‌های افقی و ۷٫۵، ۱۵ و ۲۵ درجه برای قوس‌های قائم از جاده خارج شوند. با استخراج داده‌های خروجی از طریق شبیه‌سازی‌ها و با استفاده از مجموعه داده‌های مربوط به نیروی قائم و جانبی بر روی چرخ‌های وسایل نقلیه، ضریب اصطکاک جانبی از طریق معادله ۱ تعیین می‌شود.

$$f_y = \left| \frac{F_y}{F_z} \right| \quad (1)$$

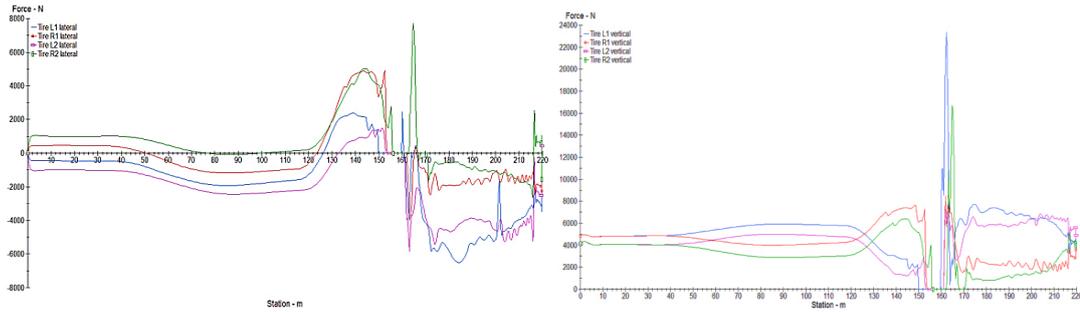
## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- نمودارهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

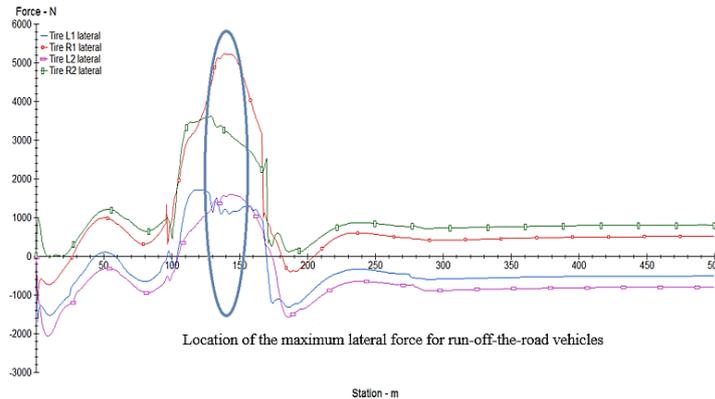
در مطالعه حاضر، برای محاسبه ضرایب اصطکاک جانبی وسیله نقلیه در حال حرکت، از نمودارهای نیروهای جانبی و قائم بر روی چرخ‌های خودرو استفاده شده است، همانطور که در شکل ۱ برای یکی از آزمایش‌های شبیه‌سازی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر نیروی جانبی بر روی چرخ‌ها پس از خروج وسیله نقلیه از جاده و زمانی که تغییر زاویه فرمان به حداکثر خود می‌رسد، در مسیر قوس روی شیروانی‌ها رخ می‌دهد. شکل ۲ نمودار نیروی جانبی بر چرخ‌های خودرو روی شیروانی را نشان می‌دهد.

که در آن،  $f_y$  ضریب اصطکاک جانبی است و  $F_y$  و  $F_z$  به ترتیب مجموع نیروی قائم و جانبی بر چرخ‌های وسایل نقلیه هستند. در نهایت، پس از استخراج تمام داده‌ها و تکمیل جداول تهیه شده، داده‌های موجود توسط نرم‌افزار SPSS مدل‌سازی می‌شوند.

در این مدل‌سازی، ضرایب اصطکاک جانبی به عنوان متغیر وابسته، و متغیرهای زاویه خروج وسایل نقلیه، سرعت و شیب شیروانی به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته خواهند شد.



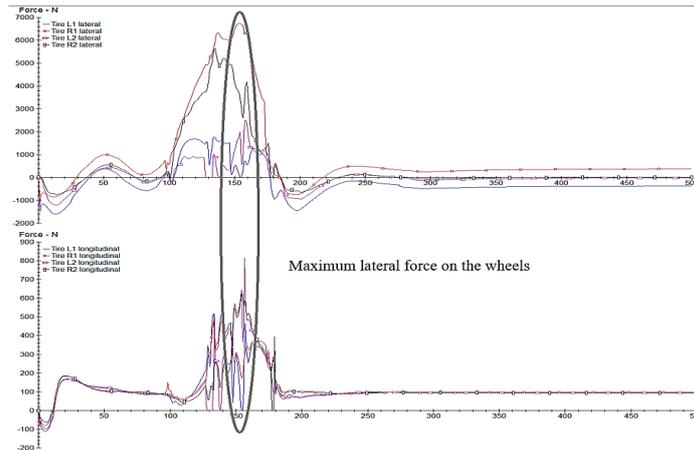
شکل ۱. نمودارهای مورد استفاده در نرم افزار: الف) نیروی جانبی بر چرخ‌های خودرو، ب) نیروی قائم بر چرخ‌های خودرو



شکل ۲. نمودار نیروی جانبی وارد بر چرخ‌های خودرو روی شیروانی

نیروهای جانبی و قائم، مشخص می‌شود که زمانی که نیروی جانبی در تمام چرخ‌ها به مقدار حداکثر خود می‌رسد، نیروی قائم برای چرخ‌های داخلی در کمترین مقدار خود (هنگام خروج خودرو از جاده روی شیروانی) قرار دارد، و برای چرخ‌های خارجی روی شیروانی، به مقدار حداکثر خود می‌رسد. دلیل این امر آن است که نیروی گریز از مرکز باعث نامتعادل شدن بار قائم روی چرخ‌ها می‌شود، که این خود اثباتی بر نقص مدل جرم نقطه‌ای است. علاوه بر این، اگر یکی از چرخ‌ها نیروی قائم کمتری نسبت به بقیه داشته باشد، احتمال لغزش آن چرخ بیشتر از سایرین است. این مسئله در شکل ۳ نشان داده شده است.

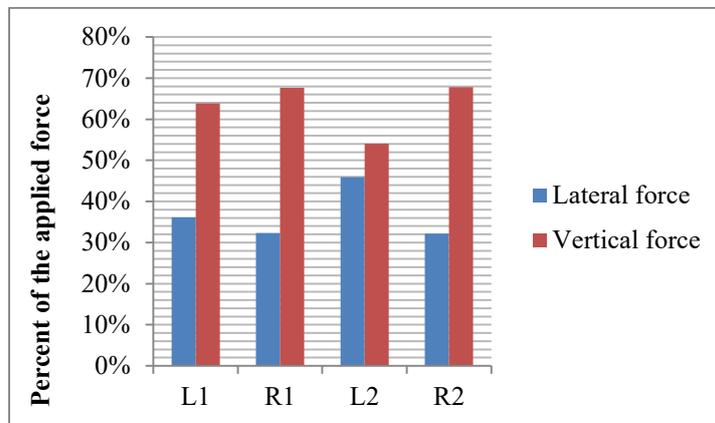
همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، در حداکثر زاویه خروج فرمان خودرو از جاده، چرخ‌های خودرو تحت حداکثر نیروی جانبی قرار می‌گیرند، که این نیرو ۵ تا ۱۰ درصد بیشتر از نیرویی است که هنگام حرکت در خارج از جاده روی شیروانی در آزمایش‌های مختلف اعمال می‌شود. در نتیجه، این نقطه به احتمال زیاد باعث لغزش وسیله نقلیه می‌شود. لازم به ذکر است که تصادفات مربوط به خروج از جاده (ROR) بیشتر به دلیل لغزش وسایل نقلیه و عدم کنترل زاویه فرمان هنگام خروج از جاده بر روی شیروانی‌ها است. با توجه به نتایج نیروهای طولی، جانبی و قائم بر روی چرخ‌های خودرو هنگام عبور از شیروانی دستخوش تغییرات زیادی می‌شوند. با توجه به نمودارهای



شکل ۳. توزیع نیروی جانبی و قائم بر چرخ‌های خودرو

۵۴٪ از نیروهای جانبی و ۵۰٪ از نیروهای قائم به چرخ‌های سمت چپ خودروی SUV وارد می‌شود. بنابراین، برخلاف فرض آشتو که در آن نیروها به طور مساوی بین چرخ‌ها توزیع می‌شوند، در واقعیت، آن‌ها بر اساس وزن وسیله نقلیه، زاویه چرخش و سرعت توزیع می‌شوند.

با توجه به توزیع نیروها بر روی چرخ‌های سدان همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، می‌توان مشاهده کرد که حداکثر نیروی جانبی و قائم بر روی چرخ‌های سمت چپ خودرو اعمال می‌شود ۶۱٪ از نیروهای جانبی و ۵۲٪ از نیروهای قائم به چرخ‌های سمت چپ سدان وارد می‌شود. حداکثر نیروهای جانبی و قائم نیز به چرخ‌های سمت چپ SUV اعمال می‌شود.



شکل ۴. نسبت نیروهای اعمال شده به چرخ‌ها هنگام خروج از جاده روی شیروانی برای سدان

### ۳-۲- نتایج ضریب اصطکاک جانبی

قوس‌های قائم و افقی قرار گرفته بر روی شیروانی‌ها در هر یک از تست‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهند. با استفاده از خروجی‌های جدول ۱، نتایجی مانند مقایسه ضریب اصطکاک جانبی در وسایل نقلیه مختلف در سرعت‌های متفاوت قابل حصول است و این داده‌ها در ادامه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها، نیروهای اعمال شده بر هر یک از چرخ‌های خودرو برای همه وسایل نقلیه در شرایط مختلف تعریف شده به دست آمده است. با استفاده از این نتایج و معادله ۱، ضرایب اصطکاک جانبی برای هر یک از آزمایش‌های تعریف شده قابل دستیابی است. جدول ۱ به ترتیب ضرایب اصطکاک جانبی و طولی محاسبه شده از شبیه‌سازی را برای

جدول ۱. ضرایب اصطکاک جانبی و طولی به دست آمده از شبیه‌سازی برای قوس‌های قائم بر روی شیروانی

Input										
Fore Slope: Embankment			Vertical Curve					Behavior Of The Driver 0-25 Deg In Run Of Road		
1:3	1:4	1:10	(-2,+2)	(-2,+6)	(-6,+2)	(-6,+6)	(+6,-6)	0 -7.50' Deg	0-15' Deg	0-25' Deg
YES			YES					YES		
YES			YES						YES	
YES			YES							YES
YES				YES				YES		
YES				YES					YES	
YES				YES						YES
YES					YES			YES		
YES					YES				YES	
YES					YES					YES
YES						YES		YES		
YES						YES			YES	
YES						YES				YES
YES							YES	YES		
YES							YES		YES	
YES							YES			YES
	YES		YES					YES		
	YES		YES						YES	
	YES		YES							YES
	YES			YES				YES		
	YES			YES					YES	
	YES			YES						YES
	YES				YES			YES		
	YES				YES				YES	
	YES				YES					YES
	YES					YES		YES		
	YES					YES			YES	
	YES					YES				YES
	YES						YES	YES		
	YES						YES		YES	
	YES						YES			YES
		YES	YES					YES		
		YES	YES						YES	
		YES	YES							YES
		YES		YES				YES		
		YES		YES					YES	
		YES		YES						YES
		YES			YES			YES		
		YES			YES				YES	
		YES				YES		YES		
		YES				YES			YES	
		YES					YES	YES		
		YES					YES		YES	
		YES					YES			YES
		YES					YES		YES	
		YES					YES			YES

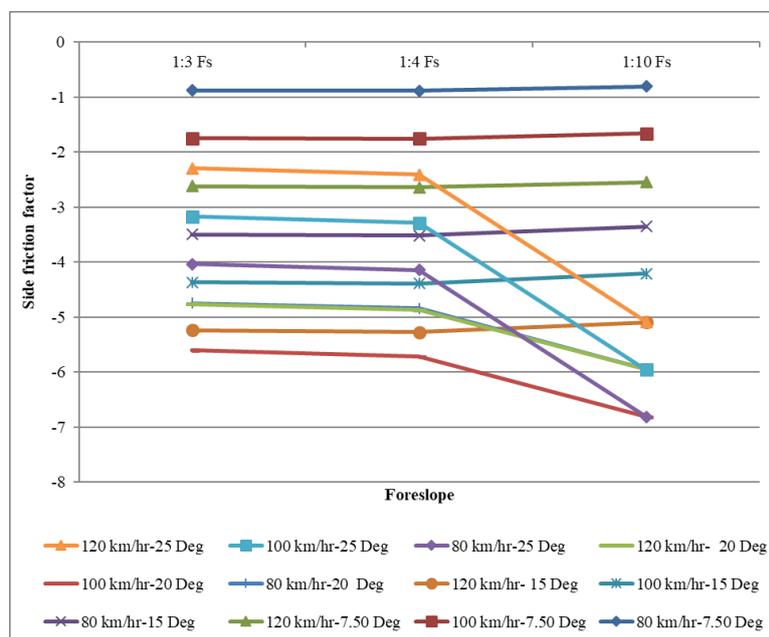
ادامه جدول ۱. ضرایب اصطکاک جانبی و طولی به دست آمده از شبیه‌سازی برای قوس‌های قائم بر روی شیروانی

Output											
Speed 80 km/hr						Speed 100 km/hr					
Sedan		SUV		Truck		Sedan		SUV		Truck	
fy	fx	fy	fx	fy	fx	fy	fx	fy	fx	fy	fx
0.874608	0.0783569	0.8376098	0.1142785	0.6487838	0.0056921	0.8877945	0.0821459	0.8300889	0.0800256	0.6211157	0.0514086
0.873785	-0.032578	-0.525594	0.0271531	0.6382289	-0.01032	-0.651145	0.0417804	-0.651398	0.0617173	-0.599962	0.0077681
-0.93219	0.0813027	-0.836712	0.1048543	-0.64943	0.0043356	-0.868315	0.2305328	-0.820997	0.0958555	-0.651904	0.0007136
0.8737261	0.1285144	0.8224843	0.1276012	0.64875	0.0062429	0.868105	0.1041634	0.9060357	0.0749242	0.6134331	0.0601917
0.8638911	0.0129866	-0.505988	0.0446913	0.6353341	0.1700953	-0.614743	0.0512351	-0.61266	0.0674821	-0.576268	0.0258894
-0.795383	0.0979429	-0.815674	0.1188565	-0.622846	-0.003876	-0.85745	0.0858529	-0.805009	0.1006284	-0.651301	0.0011512
0.8952789	-0.030902	0.8699429	-0.024254	0.5516411	-0.010809	0.888881	-0.023811	0.8447815	-0.018715	0.6330153	-0.00928
0.8734211	-0.032945	-0.531132	-0.028869	0.5755746	-0.013383	-0.639565	-0.025535	-0.645082	-0.022379	-0.603202	-0.016065
-0.843252	-0.033737	-0.846392	-0.024647	-0.642563	-0.014243	-0.879565	-0.023442	-0.825221	-0.017458	-0.658001	-0.012186
0.8818001	-0.028314	0.863356	-0.022382	0.5531318	-0.00851	0.8873852	-0.02223	0.8478271	-0.017603	0.6245836	-0.007571
0.869617	-0.030796	-0.50279	-0.018269	0.6350066	-0.010334	-0.143664	-0.005929	-0.601149	-0.021097	-0.582712	-0.013637
-0.823964	-0.031692	-0.83672	-0.023831	-0.639833	-0.013639	-0.863645	-0.022254	-0.813987	-0.017159	-0.65331	-0.011415
0.9010026	-0.035549	0.8643053	-0.028494	0.6496666	0.0028012	0.9009996	-0.027056	0.8488607	-0.021738	0.5702154	-0.01064
0.875133	-0.037557	-1.00673	0.0625771	0.6409868	0.0057894	-0.823857	0.0228691	-0.811673	0.0491777	-0.58507	0.010804
-0.873356	0.0724539	-0.840465	0.09504	-0.639617	0.0075214	-0.800126	0.0745675	-0.815876	0.0906136	-0.678964	0.0066526
0.8143869	0.0722709	0.7973668	0.097208	0.6386335	-0.004495	0.8766519	0.0870978	0.8371501	0.0988704	0.6329595	0.0038854
0.875963	-0.030604	0.8210994	-0.021332	0.6435635	0.0098605	-0.65115	0.0417804	-0.651399	0.0617173	-0.599962	0.0077681
-0.834321	0.0727668	-0.836712	0.1048543	-0.64943	0.0043356	-0.868294	0.0777118	-0.820996	0.0958555	-0.651904	0.0007136
0.806113	0.109358	0.7914011	0.1320495	0.6239263	-0.005553	0.8665822	0.108654	0.8231881	0.1267829	0.6437959	0.0047224
0.8523314	0.0635982	0.8016269	0.0862162	0.6349194	0.0095289	-0.614748	0.0512351	-0.612655	0.0674821	-0.576268	0.0258894
-0.795372	0.0979429	-0.815679	0.1188565	-0.622846	-0.003876	-0.857475	0.0858529	-0.850327	0.1062933	-0.651301	0.0011512
0.8301267	-0.031993	0.8189919	-0.026326	0.6455038	-0.013891	0.9061931	-0.024268	0.8665564	-0.018206	0.6489293	-0.008931
0.8753619	-0.031108	0.8209874	-0.02329	0.6393533	-0.009919	-0.63956	-0.025535	-0.640211	-0.022379	-0.603202	-0.016065
-0.843252	-0.033737	-0.846409	-0.024647	-0.642563	-0.014243	-0.879127	-0.02343	-0.825221	-0.017458	-0.658001	-0.012186
0.8082718	-0.029396	0.791937	-0.024241	0.6466661	-0.012879	0.8993315	-0.022644	0.8691014	-0.016626	0.6386319	-0.008533
0.8719288	-0.028722	0.8261283	-0.020819	0.6381104	-0.0094	-0.579433	-0.023913	-0.601167	-0.021097	-0.582712	-0.013637
-0.82397	-0.031692	-0.83672	-0.023831	-0.639833	-0.013639	-0.863649	-0.022254	-0.813985	-0.017159	-0.65331	-0.011415
0.8296046	-0.036528	0.8232742	-0.030448	0.6169274	-0.007698	0.8917342	-0.027442	0.8561075	-0.021536	0.6442649	-0.002539
0.8741599	-0.035582	0.8209047	-0.026789	0.647946	0.0066256	-0.823857	0.0228691	-1.317315	0.0491742	-0.58507	0.010804
-0.873356	0.0724539	-0.840502	0.09504	-0.639617	0.0075214	-0.800146	0.0745675	-0.815878	0.0906136	-0.678964	0.0066526
0.6572076	0.0531225	0.6495189	0.072019	0.5609576	0.0262864	0.7881445	0.0820908	0.7751828	0.0954206	0.6131749	-0.007818
0.8513132	0.0586786	0.8088065	0.082222	0.6495039	0.0058613	0.8523308	0.0550115	-0.811809	0.098625	-0.599962	0.0077681
-0.834321	0.0727668	-0.836712	0.1048543	-0.650108	0.0043356	-0.844359	0.0486538	0.7189953	-0.016773	-0.651904	0.0007136
0.6573937	0.1002313	0.6494034	0.3905545	0.5530137	0.0350569	0.828132	0.115327	0.7706332	0.1401276	0.6036636	-0.007524
0.836766	0.0990601	0.7969698	0.1021049	0.6506641	0.0072437	0.8440041	0.0934409	-0.776916	0.196904	-0.576268	0.0258894
-0.795383	0.0979429	-0.815679	0.1188565	-0.622846	-0.003876	-0.857475	0.0858529	0.7539478	-0.010173	0.1168289	0.0011512
0.6530921	-0.03206	0.6137378	-0.026372	0.6089837	-0.012716	0.8076429	-0.026026	0.7952506	-0.021077	0.6299045	-0.017442
0.8669644	-0.029211	0.8289432	-0.021323	0.6517339	-0.009031	0.8661814	-0.02361	0.8206631	-0.01814	-0.603202	-0.016065
-0.843252	-0.033737	-0.846392	-0.024647	-0.642563	-0.014243	-0.879609	-0.023443	-0.825245	-0.017458	-0.658001	-0.012186
0.614483	-0.029303	0.6173254	-0.025286	0.5887013	-0.00985	0.7997228	-0.024396	0.7810175	-0.019638	0.6084775	-0.008208
0.8676481	-0.026813	0.8362392	-0.023242	0.6546668	-0.007973	0.5737956	-0.021935	0.8237636	-0.017075	-0.582712	-0.013637
-0.823964	-0.031692	-0.83672	-0.023831	-0.639833	-0.013639	-0.863649	-0.022254	-0.813985	-0.017159	-0.65331	-0.011415
0.6648542	-0.036437	0.6602763	-0.032066	0.5167001	0.0279673	0.7739468	-0.028804	0.7807949	-0.024144	0.605254	-0.007673
0.8687628	-0.033505	0.8242533	-0.025328	0.6488569	0.0029592	0.8737614	-0.02639	-0.821873	0.0776605	0.6468465	0.0036824
-0.873331	0.0724539	0.8145533	-0.025614	-0.639617	0.0075214	0.8133975	-0.018851	0.7045152	-0.017424	-0.678964	0.0066526

### ۳-۲-۱- تغییرات ضریب اصطکاک جانبی بر اساس تغییرات سرعت و رفتارهای مختلف رانندگی در قوس‌های افقی

می‌توان با ملایم کردن شیب شیروانی برطرف کرد. در زاویه ۲۰ و ۲۵ درجه، وسایل نقلیه سبک می‌پزند و سپس بلافاصله پس از بحرانی‌ترین نقطه اعمال نیروها، واژگون می‌شوند، اما برای کامیون‌ها، قبل از رسیدن به یک سوم شعاع قوس، وسیله نقلیه بدون لغزش یا پرش واژگون می‌شود. طبق مقدار نیروهای اعمال شده بر وسایل نقلیه، شرایط خروج از جاده ۲۰ و ۲۵ درجه، بحرانی‌ترین و نگران‌کننده‌ترین شرایط ممکن برای یک وسیله نقلیه هنگام خروج از جاده، به ویژه در سرعت‌های بالا هستند.

شکل ۵ بررسی نتایج شبیه‌سازی‌ها بر روی قوس‌های افقی دارای شیروانی، به ویژه در پیچ‌ها و نواحی کوهستانی با ۴ حالت خروج وسیله نقلیه از جاده برای وسایل نقلیه مختلف، نشان می‌دهد که بیشترین تأثیر این تغییر رفتار برای وسایل نقلیه در یک سوم ابتدایی قوس‌ها رخ می‌دهد. در مورد تغییر رفتار راننده به اندازه ۷٫۵ درجه، در صورتی که وسیله نقلیه از جاده خارج شود، می‌تواند به سطح جاده بازگردد، اما در حالت ۱۵ درجه و با سرعت ۱۲۰، بازگشت وسیله نقلیه به سطح جاده و خط سفر، همراه با پرش و عدم کنترل مناسب خواهد بود. این مشکل را

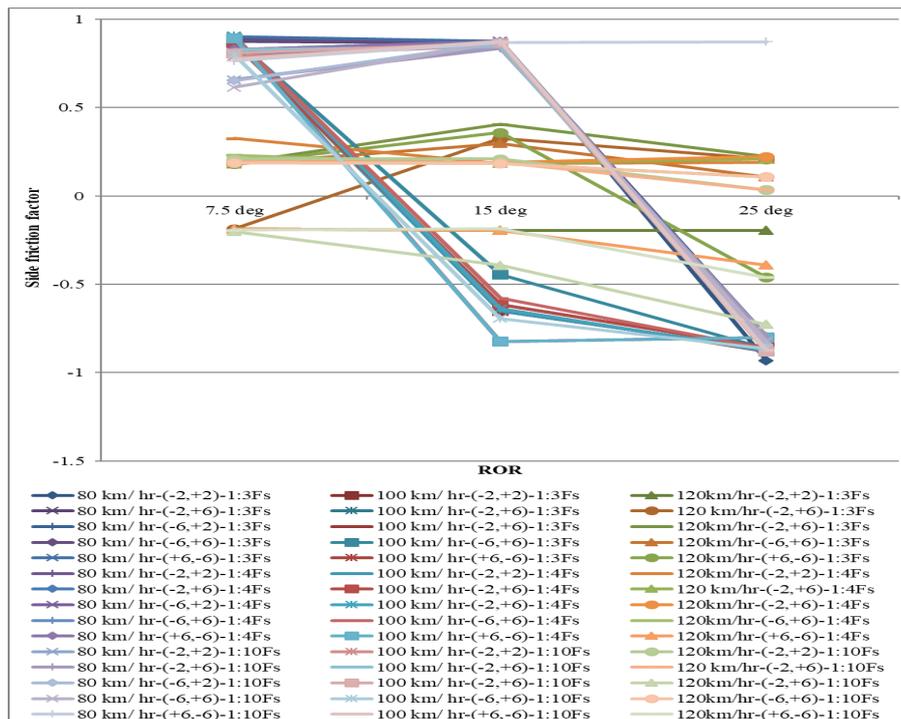


شکل ۵. تغییرات ضریب اصطکاک جانبی با تغییرات در زاویه خروج و سرعت سدان در یک قوس افقی دارای شیروانی

### ۳-۲-۲- تغییرات ضریب اصطکاک جانبی بر اساس تغییرات سرعت و رفتارهای مختلف رانندگی در قوس‌های قائم

می‌شوند و در هر سه سرعت، کامیون واژگون می‌شود. در حالت خروج از راه با زاویه ۲۵ درجه، خودروهای سدان واژگون شده و کامیون می‌غلتند. در مورد حالت ۲۵ درجه، می‌توان گفت که خودروهای سدان پس از لغزش و سر خوردگی بر روی شیروانی، در سرعت‌های مورد مطالعه واژگون می‌شوند.

طبق بررسی‌های انجام شده مطابق نتایج شکل ۶، در زاویه ۷٫۵ درجه هنگام خروج از جاده، وسیله نقلیه با نیروهای ثابتی که به آن اعمال می‌شود مواجه است و در این موارد لغزش مشاهده نمی‌شود. در حالت ۱۵ درجه تغییر در رفتار راننده، سدان در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت می‌پزند و واژگون



شکل ۶. تغییرات ضریب اصطکاک جانبی با تغییر زاویه خروج و سرعت سدان در قوس‌های قائم با شیروانی‌های مختلف

#### ۴- یافته‌ها

بدترین و بحرانی‌ترین حالت برای وسیله نقلیه‌ای است که از جاده خارج شده است. همچنین، تغییرات ضریب اصطکاک جانبی در هر دو حالت سرعت برای شیروانی‌های مختلف و حالت‌های مختلف رفتار رانندگی بسیار قابل توجه است. هرچه شیب شیروانی‌ها ملایم‌تر می‌شود، تغییرات ضریب اصطکاک جانبی کمتر شده و اشکال به دست آمده معقول‌تر می‌شوند.

#### ۴-۱- مدل‌سازی ضریب اصطکاک جانبی

در این بخش، با استفاده از خروجی‌های شبیه‌سازی و نرم‌افزار SPSS برای هر یک از وسایل نقلیه، یک مدل رگرسیون چندگانه به‌منظور محاسبه ضریب اصطکاک جانبی جهت ارتقای ایمنی طراحی‌های هندسی راه از طریق روابط جدید، ارائه شده است. این روابط، تغییر ضریب اصطکاک جانبی را بر حسب سرعت وسیله نقلیه، زاویه خروج آن از راه و شیب شیروانی به عنوان متغیرهای مستقل نشان می‌دهند.

نتایج همچنین نشان می‌دهد که زاویه خروج ۱۵ درجه از جاده برای رفتار رانندگی، نشان‌دهنده تغییری در جهت نیروهای اعمال‌شده به وسایل نقلیه هنگام خروج از قوس‌های قائم بر روی شیروانی‌ها است که در آن ضرایب اصطکاک منفی مشاهده می‌شود. در طول بحرانی‌ترین و بدترین حالات حرکت، جهت نیروی اعمال‌شده به چرخ‌های خودرو تغییر می‌کند که منجر به ضرایب اصطکاک منفی می‌شود. برای خودروی سدان، نقطه واژگونی برای زاویه خروج ۷٫۵ درجه از جاده، یک سوم طول قوس پس از نقطه تقعر یا تحدب قوس رخ می‌دهد. این نقطه برای زاویه ۱۵ درجه، پس از نقطه تقعر یا تحدب قوس است، اما قبل از یک سوم آن نقطه، و برای زاویه خروج ۲۵ درجه از جاده، قبل از تحدب یا تقعر قوس، مکانی است که لغزش و واژگونی برای این وسیله نقلیه رخ می‌دهد. با بررسی شکل‌های ۶ و تحلیل نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بر روی قوس‌های قائم، می‌توان نتیجه گرفت که در حالت (+۶، -۶) برای قوس قائم مقعر و (-۶، +۶) برای قوس قائم محدب، رفتار راننده

#### ۴-۴-۱-مدل‌سازی ضریب اصطکاک جانبی برای قوس‌های افقی

برای محاسبه ضریب اصطکاک جانبی برای وسایل نقلیه سواری، بر اساس مدل‌سازی انجام‌شده، معادله ۲ به عنوان بهترین مدل شناخته شد. بر اساس جداول ارائه‌شده، می‌توان دید که مدل به‌دست‌آمده ضریب همبستگی (R) خوبی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، با توجه به مقدار احتمال هر متغیر، مشاهده می‌شود که تمامی متغیرهای مورد استفاده، به جز متغیر سرعت، تأثیر

معناداری در مدل دارند، که در آن ضریب اصطکاک جانبی، FS، شیب شیروانی، و RoR زاویه خروج وسیله نقلیه از راه (بر حسب درجه) است. برازش یک معادله رگرسیون با داده‌ها توسط ضریب R تعیین می‌شود که در مورد خروج از راه 0.659 و در مورد خروج از راه و شیروانی 0.716 است.

$$f_y = -1.273 + 0.659 \text{ RoR} - 0.279 \text{ Fs} \quad (۲)$$

جدول ۲. خلاصه‌ی مدل ضریب اصطکاک جانبی وسیله نقلیه در قوس افقی برای سواری (سدان)

Model	R	R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	.659 <sup>a</sup>	.435	.418	.62498	
2	.716 <sup>b</sup>	.513	.483	.58893	1.787

a. Predictor: Constant, ROR

b. Predictor: Constant, ROR, Forslope

Note: Dependent variable is  $f_y$

جدول ۲ نتایج آزمون ANOVA را نشان می‌دهد، که در آن، مقدار F به ترتیب برای مدل‌سازی خروج از راه و مدل‌سازی خروج از راه و شیروانی برابر با ۲۶،۱۴۸ و ۱۷،۳۶۹ است.

جدول ۳. نتایج آزمون ANOVA برای وسیله نقلیه سواری (سدان) در قوس‌های افقی

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	10.214	1	10.214	26.148	.000 <sup>a</sup>
1 Residual	13.280	34	.391		
1 Total	23.494	35			
2 Regression	12.048	2	6.024	17.369	.000 <sup>b</sup>
2 Residual	11.446	33	.347		
2 Total	23.494	35			

a. Predictor: Constant, ROR

b. Predictor: Constant, ROR, Forslope

میزان تأثیر (عدد) و نحوه تأثیر (علامت مثبت یا منفی) هر متغیر در مدل رگرسیون است، و Sig. مقدار اهمیت هر متغیر را در مدل‌های رگرسیون نشان می‌دهد، و مقدار کمتر از ۰،۰۵ نشان‌دهنده اهمیت بالای متغیر مورد نظر است.

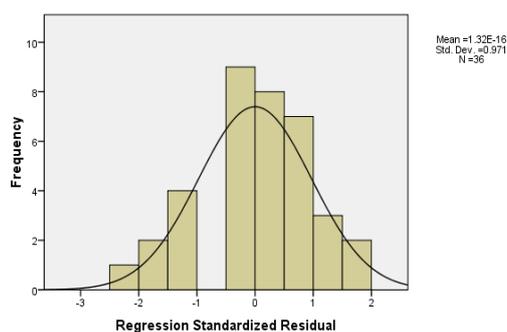
همچنین، نتایج مربوط به ضرایب مدل در جدول ۳ ارائه شده است، که در آن B ضریب مدل‌های رگرسیون است، Std. خطای استاندارد نشان‌دهنده میزان تغییر در متغیر پاسخ به ازای یک انحراف معیار تغییر در متغیر مستقل است، t نشان‌دهنده

جدول ۴: ضرایب مدل ضریب اصطکاک جانبی وسیله نقلیه در قوس افقی برای سواری (سدان)

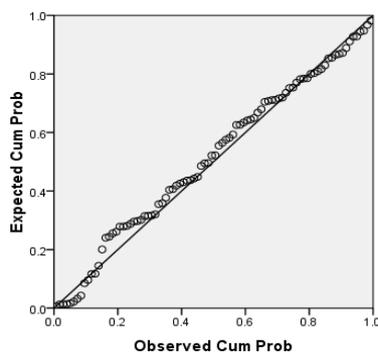
Model	Unstandardized Coefficient		Standardized Coefficient	t	Sig.	
	B	Std. Error	Beta			
1	Constant	-1.500	.291		-5.150	.000
	ROR	.082	.016	.659	5.114	.000
2	Constant	-1.273	.292		-4.366	.000
	ROR	.082	.015	.659	5.427	.000
	Foreslope	-.005	.002	-.279	-2.300	.028

به گونه‌ای که خط نشان داده شده، روند تغییرات مدل را نشان می‌دهد و نقاط دایره‌ای، هر یک از داده‌های ورودی را نمایش می‌دهند. بر اساس شکل ۸، مدل به طور کلی همبستگی خوبی دارد، به طوری که مقدار R این مدل برابر با ۰,۷۱۶ است.

شکل ۷ نتایج نمودار هیستوگرام مدل ضریب اصطکاک جانبی برای وسیله نقلیه سواری (سدان) در قوس‌های افقی را نشان می‌دهد که از داده‌های به دست آمده از تحلیل نیروهای اعمال شده بر سدان به دست آمده است. همچنین، شکل ۸ نمودار همبستگی مدل ضریب اصطکاک جانبی این وسایل نقلیه را نشان می‌دهد،



شکل ۷. نمودار هیستوگرام مدل ضریب اصطکاک جانبی در قوس‌های افقی برای وسیله نقلیه سواری (سدان)



شکل ۸. نمودار همبستگی مدل ضریب اصطکاک جانبی در قوس‌های افقی برای وسیله نقلیه سواری (سدان)

## ۵- نتیجه گیری

وسایل نقلیه ضرایب اصطکاک جانبی متفاوتی بر روی محورهای عقب و جلوی خود دارند. در وسایل نقلیه سواری، محور عقب نقش حیاتی ایفا می‌کند، اما در وسیله نقلیه کامیون، این نقش برعکس است. همچنین انتظار می‌رود که این امر ناشی از سیستم تعلیق متفاوت کامیون در مقایسه با وسایل نقلیه سواری و همچنین بار ۶،۷ تنی کامیون باشد که به محور عقب آن وارد می‌شود. در برخی موارد، ضرایب اصطکاک جانبی محور عقب وسایل نقلیه سواری تا سه برابر بیشتر از محور جلوی آن‌ها اندازه‌گیری شد. نتیجه مدل‌سازی رگرسیون ضرایب اصطکاک جانبی در قوس‌های افقی و قائم در وسایل نقلیه مختلف، همبستگی مناسبی را در مدل‌های اجرا شده با داده‌های ورودی و همچنین برازش خوب معادله رگرسیون بر مجموعه داده‌ها نشان می‌دهد، که این امر اعتبار مدل را تأیید می‌کند. در این مدل‌ها، تأثیر معنادار متغیرهایی مانند خروج از راه، سرعت و شیروانی بر مدل پیش‌بینی ضرایب اصطکاک جانبی نشان داده شد. برای جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آتی، توصیه می‌شود دامنه این مطالعه گسترش یابد تا انواع دیگر قوس‌ها، مانند قوس‌های اتصال تدریجی، و انواع دیگر شیروانی‌ها، مانند شیروانی‌های دارای حفاظ و کانال را شامل شود. همچنین، نتایج شبیه‌سازی می‌تواند با داده‌ها و آزمایش‌های دنیای واقعی اعتبارسنجی شده و عملکرد مدل‌های پیشنهادی با مدل‌های موجود مقایسه گردد. علاوه بر این، می‌توان تأثیرات سایر متغیرها، مانند وضعیت سطح راه، آب و هوا، رفتار راننده و بار وسیله نقلیه را بر ایمنی قوس‌ها و شیروانی‌ها بررسی کرد.

در مطالعه حاضر، با استفاده از شبیه‌سازی CarSim و TruckSim، حرکات مختلف وسیله نقلیه و رفتارهای راننده در شرایط مختلف جاده شبیه‌سازی شده است. همچنین، برای دستیابی به یک مدل جامع، متغیرهای مختلفی برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند که هر یک در حالت‌های گوناگون بررسی شده‌اند. در نهایت، با استفاده از خروجی‌های شبیه‌سازی و نرم‌افزار SPSS برای وسیله نقلیه سدان، یک مدل رگرسیون چندگانه به‌منظور بررسی ضرایب اصطکاک جانبی جهت ارائه روابط جدید برای ارتقای ایمنی طراحی هندسی راه‌ها ارائه گردید. نتایج نشان داد که:

برای قوس‌های افقی، مشخص شد که یک سوم ابتدایی شروع قوس، خطرناک‌ترین بخش قوس‌های افقی هنگام خروج وسایل نقلیه از قوس است. دلیل این امر، انحرافات ناگهانی وسیله نقلیه و زاویه فرمان در سرعت‌های بالا، یعنی ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت است.

بررسی نقاط غلتش وسایل نقلیه در قوس‌های قائم نشان می‌دهد که زاویه خروج ۱۵ و ۲۵ درجه برای وسیله نقلیه و شیروانی‌های ۱:۳ و ۱:۴ بیشترین تأثیر را بر این نقاط داشته‌اند؛ به‌طوری‌که، با ملایم‌تر کردن شیروانی‌ها به ۱:۴ و ۱:۱۰، نقطه غلتش از تحذب و تععر قوس‌ها فاصله می‌گیرد و وسیله نقلیه قادر خواهد بود بیشتر به مسیر حرکت بازگردد، یا در زاویه خروج بزرگتر (۲۵ درجه) در حدود یک سوم نقطه تععر یا تحذب قوس قائم واژگون می‌شود. ضرایب اصطکاک جانبی با افزایش مقدار در تمام شیب‌های تندتر شیروانی مرتبط بودند، که این موضوع در شیب‌های ۱:۳ آشکارتر بود. بنابراین، با کاهش حاشیه ایمنی (تفاوت بین اصطکاک جانبی و اصطکاک موجود) وسایل نقلیه در این نوع شیروانی‌ها، احتمال لغزش بیشتر خواهد شد.

## ۶- مراجع

-Ahn, C., H. Peng, and H.E. Tseng, Robust (2012). estimation of road friction coefficient using lateral and longitudinal vehicle dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 50(6): 961-985.  
-Bonneson, J.A., (2000). Superelevation distribution methods and transition designs. Vol. 439. *Transportation Research Board*.

-Abdollahzadeh Nasiri, A.S., et al., (2020). Evaluation of safety in horizontal curves of roads using a multi-body dynamic simulation process. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(16): 5975-5976.  
-Aboutalebi Esfahani, M. and S.M.F. Hojjati, (2021). Evaluation of horizontal curve radius in overlap with longitudinal slope and vertical curve. *Transportation letters*, 13(4): 263-272.

- Moradi, M., A. Abdi Kordani, and M. Zarei, (2021). New geometric design approach to reduce vehicle's speed in accident-prone downgrade highways using dynamic vehicle modeling. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 147(1): 04020149-04020150.
- Mehrra Molan, A., (2014). Multi-Body Simulation Modeling of Vehicle Skidding and Roll over for Horizontal Curves on Longitudinal Grades. *93rd Annual Meeting of TRB*.
- Pal, S. and S.K. Roy, (2019). Impact of side friction on performance of rural highways in India. *Journal of Infrastructure Systems*, 25(2): 04019006-04019007.
- Santos, M.I., P.T.M.S. Oliveira, and A.P.C. Larocca, (2022). Investigation the Influence of Risk Factors on the Occurrence of Road Accidents Using the Driver Performance Model. *Transportation in Developing Economies*, 8(1): 10-11.
- Shafabakhsh, G. and Y. Sajed, (2022). Identification methods of accident hotspots and providing a model for evaluating the number and severity of accidents on roadways. *International Journal of Transportation Engineering*, 10(1): 865-875.
- Sharf Aldeen, A., et al., (2022). Evaluation of the application of maximum radius in horizontal curves using vehicle dynamic simulation. *Advances in Civil Engineering*.
- Wang, X., et al., (2022). The impact of the combination equilibrium of horizontal and sag-vertical curves on safety. *International Journal of Transportation Science and Technology*.
- Chiguma, M.L., (2007). Analysis of side friction impacts on urban roads: Case study Dar-es-Salaam. *KTH*.
- Donnell, E., et al., (2016). Use of side friction in horizontal curve design: A margin of safety assessment. *Transportation Research Record*, 2588(1): 61-70.
- Ergun, M., S. Iyınam, and A.F. Iyınam, (2005). Prediction of road surface friction coefficient using only macro-and microtexture measurements. *Journal of Transportation Engineering*, 131(4): 311-319.
- Echaveguren, T., M. Bustos, and H. De Solminihac (2004). A method to evaluate side friction in horizontal curves, using supply-demand concepts. in *6th International Conference on Managing Pavements*.
- Gulivindala, P. and A. Mehar, (2018). Analysis of side friction on urban arterials. *Transport and Telecommunication Journal*, 19(1): 21-30.
- Ksaibati, K., (2023). Impact of combined alignments and adverse weather conditions on vehicle skidding. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*.
- Salini, S., S. George, and d.R. Ashalatha, (2016). Effect of side frictions on traffic characteristics of urban arterials. *Transportation Research Procedia*, 17: 636-643.
- Hu, J., S. Rakheja, and Y. Zhang, (2020). Real-time estimation of tire-road friction coefficient based on lateral vehicle dynamics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D. *Journal of Automobile Engineering*, 234 (10-11): 2444-2457.
- Morrall, J. and R. Talarico, (1994). Side friction demanded and margins of safety on horizontal curves. *Transportation Research Record*, 1435: 145-146.

# **Safety Analysis of Run-off-Road (ROR) Sedan Vehicles on Foreslopes Located on Downgrades, Horizontal Curves, and Vertical Curves**

*Ali Attari, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering,  
Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin,  
Iran.*

*Ali Abdi Kordani, Professor, Department of Civil Engineering,  
Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin,  
Iran.*

**E-mail: aliabdi@eng.ikiu.ac.ir**

Received: September 2025- Accepted: February 2026

## **ABSTRACT**

Run-off-road (ROR) incidents on curves, as one of the most accident-prone locations on roads, have always attracted special attention. Centrifugal force exerted on vehicles and human error are considered two fundamental factors in accident occurrence in these areas, ultimately leading to vehicle rollover or skidding. Rollover and skidding of Sedan vehicles are among the critical parameters in the issue of vehicle deviation on curves, and according to accident statistics, they are associated with significant human and financial losses. The importance of enhancing safety on downgrades is amplified, especially on mountainous routes, due to the potential combination of horizontal curves with vertical alignments and/or their combination with so-called steep grades. The AASHTO guideline, as the most reputable road design manual, uses the "point mass model" to define vehicle behavior when traversing curves. This, in effect, means excluding the principles of physics and mechanical engineering from road design, which consequently leads to reduced safety. One of the fundamental limitations of the point mass model is its disregard for the differential force distribution on the vehicle's various wheels and axles. The final results of this research indicate reduced safety on curves and bends with steep foreslopes (1:3 and 1:4). To address this issue, the present study provides new relationships for use in road design.

**Keywords:** Foreslope, Run- of- Road, Downgrade, Vehicle Rollover, Vehicle Skidding