

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

مقاله علمی - پژوهشی

*علی عبدی کردانی (نویسنده مسئول)، استاد، گروه مهندسی عمران- برنامه ریزی حمل و نقل،

دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

علی عطاری، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران- برنامه ریزی حمل و نقل،

دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

ابراهیم جاویدی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: aliabdi@eng.ikiu.ac.ir

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

صفحه ۹۱-۱۰۸

چکیده

خروج وسایل نقلیه از خطوط عبوری در مقاطع دارای قوس، یکی از بحرانی‌ترین چالش‌ها در ارتقای ایمنی شبکه راه محسوب می‌شود. در این میان، خودروهای SUV به دلیل برخورداری از مرکز ثقل بالاتر و حساسیت‌های ساختاری در سیستم تعلیق، استعداد بسیار بالایی در بروز ناپایداری‌های غلتشی و واژگونی در زمان انحراف از مسیر دارند. این چالش دینامیکی در مناطق کوهستانی و در محل قوس‌های افقی با پروفیل‌های طولی پرسیب، به دلیل افت شدید حاشیه ایمنی، ابعاد پیچیده‌تری به خود می‌گیرد. از سوی دیگر، اختلاف ناگهانی میان شیب عرضی خط عبوری و شیب شیروانی در زمان ورود خودرو به کناره راه، باعث انتقال بار شدید و لحظه‌ای بین چرخ‌های چپ و راست می‌گردد. این توزیع نامتقارن وزن، پایداری غلتشی خودرو را برهم زده و ایمنی جابجایی را با خطر جدی واژگونی مواجه می‌سازد. با وجود اهمیت این پارامترهای هندسی، آیین‌نامه طراحی آشتو رفتار حرکتی ناوگان را بر پایه تئوری ساده‌سازی شده جرم نقطه‌ای ارزیابی می‌نماید. ضعف بنیادین این تئوری، چشم‌پوشی از انتقال نامتقارن بار روی محورها و عدم لحاظ نمودن اثرات ترکیبی شیب عرضی با شیب شیروانی جلویی است. خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی دینامیکی در این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب قوس‌ها با شیروانی‌های تند (۱:۳ و ۱:۴)، نرخ انتقال بار قائم بر روی چرخ‌های خارجی SUV را به مرز بحرانی رسانده و وقوع واژگونی را تسریع می‌کند. جهت رفع این موضوع، پژوهش حاضر مدل‌های رگرسیونی را توسعه داده است تا با پیش‌بینی آستانه ناپایداری، مبانی کاربردی جهت بهینه‌سازی مقاطع عرضی و ارتقای ایمنی کناره راه در اختیار طراحان قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: کناره راه، شیروانی جلویی، شیب عرضی، واژگونی وسایل نقلیه، لغزش خودرو

۱-مقدمه

کرده‌اند (مهرآرا و همکاران، ۲۰۱۴). ایمنی قوس، به‌ویژه در محل تلاقی با شیروانی‌ها، به عواملی بستگی دارد که مشخصات هندسی راه مهم‌ترین آن‌هاست. اهمیت ارتقای ایمنی قوس‌های افقی و قائم، به‌ویژه در مسیرهای کوهستانی، به دلیل احتمال

قوس‌های افقی و قائم به دلیل ماهیت حرکتی و اعمال نیروی گریز از مرکز بر وسایل نقلیه، همواره به عنوان یکی از چالش‌برانگیزترین مقاطع در ایمنی ترافیک جاده‌ای شناخته می‌شوند و توجه ویژه‌ای را جهت کاهش تصادفات به خود جلب

واکاوای نمود. یافته‌ها نشان داد که ورودی قوس‌های افقی به دلیل تغییرات ناگهانی زاویه فرمان، بیشترین خطر را ایجاد می‌نماید و تمرزگیری تأثیر مخربی بر کاهش حاشیه ایمنی جانبی وسایل نقلیه دارد.

عبدی کردانی و همکاران (Abdi Kordani et al., 2019) تحقیقی را برای تدوین رابطه میان ضرایب اصطکاک جانبی و شیب‌های طولی در قوس‌های افقی انجام دادند. این پژوهش نشان داد که اصطکاک جانبی هنگام عبور از قوس برای وسایل نقلیه در سرازیری‌ها به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و تفاوت‌های معناداری در پویایی حرکتی ناوگان در این مقاطع وجود دارد. عبدالله‌زاده نصیری و همکاران (Abdollahzadeh Nasiri et al., 2021) جنبه‌های ایمنی قوس افقی را با استفاده از رویکرد دینامیک چندجسمی ارزیابی کردند. بررسی‌ها نشان داد که حاشیه ایمنی با ورود وسایل نقلیه به قوس‌ها افت می‌کند و با افزایش سرعت، اختلاف چشمگیری میان اصطکاک جانبی مورد نیاز توصیه‌شده توسط آشتو و خروجی‌های واقعی شبیه‌سازی ایجاد می‌گردد. مرادی و همکاران (Moradi et al., 2020) نیز با مدل‌سازی دینامیک خودرو، روش‌های هندسی نوینی برای کنترل سرعت ناوگان در سرازیری‌های حادثه‌خیز پیش از ورود به مقاطع بحرانی ارائه نمودند. یکی از بحرانی‌ترین مراحل در تصادفات خروج از مسیر، لحظه عبور وسیله نقلیه از سواره‌رو و ورود به محدوده کناره راه است. در این فرآیند، تغییرات پروفیل عرضی، به‌ویژه اختلاف میان شیب عرضی خطوط عبوری و شیب تند شیروانی جلویی، نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری دینامیکی وسیله نقلیه ایفا می‌کند. هندسه کناره راه باید به گونه‌ای طراحی شود که فرصت بازایی و بازگشت به مسیر را برای راننده فراهم سازد. با این حال، وجود شیروانی‌های تند نظیر نسبت‌های ۱:۳ و ۱:۴، یک ناپیوستگی هندسی صلب در نقطه اتصال شانه و شیروانی ایجاد می‌نماید. عبور از این نقطه تغییر شیب، باعث دوران ناگهانی بدنه وسیله نقلیه حول محور طولی شده و ممان غلتشی فزاینده‌ای را به سینماتیک سیستم تعلیق تحمیل می‌کند.

تأثیر این ناپیوستگی هندسی بر روی خودروهای SUV، به دلیل قرارگیری مرکز ثقل در ارتفاعی بالاتر، به مراتب پیچیده‌تر و مخرب‌تر است. با ورود بدنه SUV به سطح شیروانی جلویی، بردار نیروی وزن از محور تقارن خودرو فاصله گرفته و به سمت چرخ‌های پایین‌دست متمایل می‌شود. این پدیده منجر به پدیده

ترکیب قوس افقی با پروفیل‌های طولی پرشیب یا ترکیب آن‌ها با شیروانی‌های تند کناره راه، دوچندان خواهد بود (عبدی کردانی و همکاران، ۲۰۱۵). اصطکاک سطح روسازی یکی از مهم‌ترین پارامترها در ایمنی ترافیک و جابجایی است. ضریب اصطکاک پایین ناشی از صیقلی شدن سطح یا اجرای نادرست، پتانسیل خطر تصادف را به ویژه در قوس‌ها به شدت افزایش می‌دهد (Santos, 2022). ضریبی که تحت عناوینی چون نسبت جانبی یا ضریب اصطکاک جانبی شناخته می‌شود، نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ تعادل ناوگان دارد. چرخ‌های وسیله نقلیه زمانی شروع به لغزش می‌کنند که تقاضای اصطکاک جانبی به حد بالایی خود برسد که این نقطه، آستانه لغزش نامیده می‌شود (Wang et al., 2022). میزان اصطکاک به پارامترهای مختلفی نظیر وضعیت تایرها، نوع سطح روسازی، شرایط جوی و رفتار تمرزی راننده در زمان خروج از مسیر بستگی دارد. با افزایش سرعت، اصطکاک مورد نیاز افزایش یافته، در حالی که اصطکاک موجود کاهش می‌یابد. بر این اساس، چنانچه حاشیه ایمنی (تفاضل اصطکاک موجود و مورد نیاز) منفی گردد، پتانسیل کنترل فرمان و بازگشت به خط عبوری از بین می‌رود و لزوم اصلاح هندسه قوس‌ها، کاهش سرعت و ایمن‌سازی شیروانی‌ها ضرورت می‌یابد. در مطالعه‌ای دیگر، عبدی کردانی و همکاران تأثیر ترکیب قوس قائم با قوس افقی را از منظر شتاب جانبی و ضریب اصطکاک جانبی بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی‌های آن‌ها نشان داد که حداکثر تقاضای اصطکاک جانبی در عمیق‌ترین نقطه قوس قائم رخ می‌دهد.

بررسی‌ها اثبات نمود که SUV به دلیل ارتفاع بالاتر مرکز ثقل، حساسیت بالایی نسبت به تغییرات شتاب جانبی از خود بروز می‌دهند که این امر آن‌ها را به شدت مستعد ناپایداری در مقاطع دارای قوس می‌سازد (عبدی کردانی و همکاران، ۲۰۱۵).

بونسون مجموعه‌ای از ضرایب اصطکاک را با استفاده از تکنیک‌های دینامیک خودرو ارائه کرد. طبق این مطالعه، قوس‌های افقی تند در سرازیری‌ها به دلیل تمایل رانندگان به تمرزگیری جهت حفظ سرعت، تقاضای اصطکاک را به شدت بالا می‌برند. وی اثبات نمود که راهنمای آشتو میزان اصطکاک جانبی مورد نیاز را در قوس‌های افقی دارای شیب‌های تند و برابندی‌های کمتر، به مراتب کمتر از واقعیت برآورد می‌کند.

مهرآرا، با بهره‌گیری از مدل‌های شبیه‌ساز دینامیک خودرو، تأثیر ترکیب قوس افقی و شیب‌های طولی را بر شاخص‌های ایمنی

خطر قطعی واژگونی پیش از رسیدن به کف راه مواجه می‌سازد. از این رو، ارزیابی ترکیبی بر بلندی و هندسه شیروانی جلویی، پیش‌نیازی قطعی برای درک رفتار واژگونی SUV محسوب می‌شود. با وجود این مطالعات ارزشمند، یک خلأ بنیادین در ارزیابی ایمنی کناره راه و تأثیر هندسه شیروانی جلویی به چشم می‌خورد. آیین‌نامه آشتو رفتار حرکتی وسیله نقلیه را منحصر بر پایه فرض ساده‌شده مدل جرم نقطه‌ای ارزیابی می‌نماید. این رویکرد تئوریک، از تحلیل انتقال بار نامتقارن و توزیع نابرابر نیروهای عمودی روی چرخ‌های مختلف چشم‌پوشی می‌کند و قادر به شبیه‌سازی اثر اختلاف شیب عرضی و هندسه شیروانی جلویی بر ممان غلتشی خودروی SUV نیست. از این رو، پژوهش حاضر با هدف رفع این نارسایی، رفتار دینامیکی خودروی SUV منحرف‌شده در قوس‌های ترکیبی و شیروانی‌های کناره راه را مدل‌سازی نموده است تا با پیش‌بینی دقیق آستانه لغزش و واژگونی، روابطی نوین جهت ارتقای طراحی جایگزین فرضیات ناکارآمد پیشین گردد.

در شرایط جوی خشک، سقف ضریب اصطکاک سطح کف راه برابر با ۰٫۹، لحاظ گردید. یکی از ارکان کلیدی این مدل‌سازی، ارزیابی رفتار فرمان‌دهی راننده در لحظه انحراف از سواره‌رو و ورود به کناره راه است. بر این اساس، زاویه خروج خودروی SUV برای قوس‌های افقی در چهار سناریوی ۷٫۵، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درجه و برای قوس‌های قائم در سه حالت ۷٫۵، ۱۵ و ۲۵ درجه تعریف و تحلیل شد.

پس از اجرای سناریوهای خروج از مسیر، داده‌های خروجی مرتبط با توزیع نیروهای تماسی در محل اتصال لاستیک و سطح، استخراج گردید. محاسبه ضریب اصطکاک جانبی با تکیه بر نسبت نیروهای وارد بر چرخ‌های خودروی SUV و از طریق معادله ۱ انجام می‌شود.

$$f_y = \left| \frac{F_y}{F_z} \right|$$

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نمودارهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

در این پژوهش، استخراج ضرایب اصطکاک جانبی برای وسیله نقلیه در حال حرکت، بر پایه تحلیل نمودارهای نیروهای جانبی و عمودی وارد بر چرخ‌ها استوار است، همان‌طور که برای یکی از تست‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. تحلیل داده‌ها اثبات می‌کند که نقطه بحرانی اعمال بیشینه نیروی جانبی بر تایرها، دقیقاً پس از انحراف وسیله نقلیه از کف راه و رسیدن تغییر زاویه فرمان به بیشترین مقدار خود بر روی شیروانی جلویی اتفاق می‌افتد. مطابق با روندهای استخراج‌شده در شکل ۲، در بیشینه زاویه فرمان هنگام انحراف، تایرهای وسیله نقلیه

انتقال بار قائم به صورت کاملاً نامتقارن می‌گردد، به‌طوری‌که چرخ‌های داخلی دچار افت شدید نیروی عمودی شده و چرخ‌های خارجی تحت بیشترین فشار قرار می‌گیرند. در این وضعیت، کاهش نیروی عمودی در چرخ‌های بالادست، ظرفیت تولید نیروی جانبی تایرها را به حداقل رسانده و آستانه لغزش و واژگونی خودرو را به شدت کاهش می‌دهد.

اهمیت بررسی دقیق این پارامترها زمانی دوچندان می‌شود که بر بلندی در مقاطع دارای قوس با پروفیل‌های طولی پرشیب و شیروانی‌های تند کناره راه ترکیب گردد. در این شرایط هندسی سه‌بعدی، تقاضای اصطکاک جانبی برای غلبه بر نیروی گریز از مرکز به بیشینه خود می‌رسد، در حالی که انتقال بار نامتقارن ناشی از شیب شیروانی جلویی، حاشیه ایمنی موجود را پیش‌تر تخلیه کرده است. ناتوانی تایرها در تأمین این نیروهای متقابل، نه تنها شانس توقف ایمن را از بین می‌برد، بلکه ایمنی جابجایی را با

۳- روش شناسی

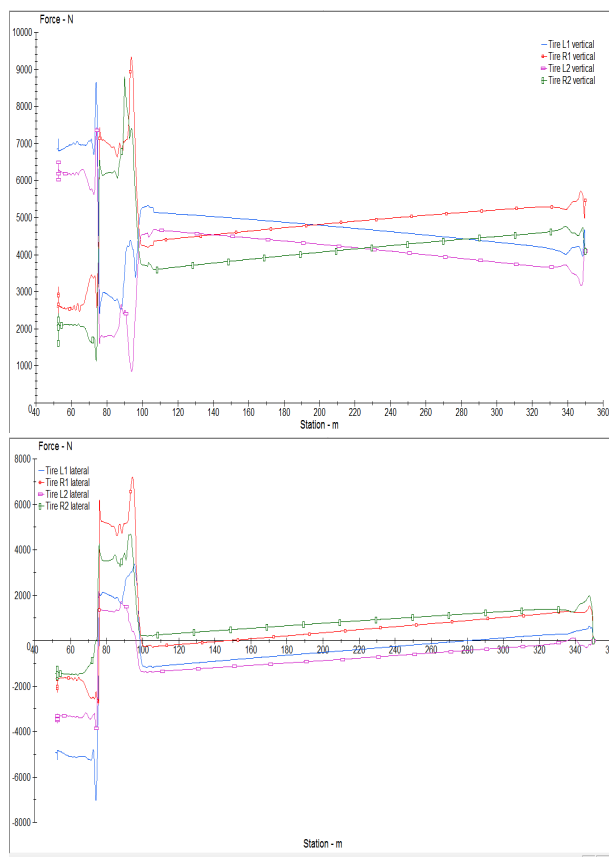
در این پژوهش، به منظور ارزیابی دقیق رفتار دینامیکی و تحلیل ناپایداری، شبیه‌سازی حرکتی منحصراً برای خودروی SUV کلاس E در محیط نرم‌افزار CarSim انجام پذیرفته است. برای دستیابی به مدلی جامع که اثرات فیزیکی مقاطع را به درستی منعکس سازد، پیکربندی‌های متنوعی از قوس‌های افقی و قائم در ترکیب با شیروانی‌های کناره راه طراحی گردید تا اشکال گوناگون قرارگیری وسیله نقلیه در این نواحی شبیه‌سازی شود. سناریوهای حرکتی بر مبنای سرعت‌های عملکردی ثابت تنظیم شده‌اند؛ به‌نحوی‌که برای قوس‌های افقی سرعت‌های ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر در ساعت و برای مقاطع دارای قوس قائم، سرعت‌های ۸۰ و ۱۰۰ کیلومتر در ساعت به عنوان مبنای ایمن جابجایی در نظر گرفته شد. همچنین با فرض روسازی آسفالتی

(۱)

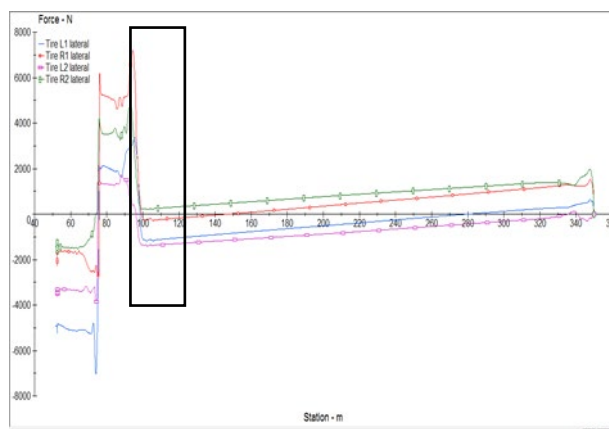
که در آن، f_y ضریب اصطکاک جانبی است و F_y و F_z به ترتیب مجموع نیروی قائم و جانبی بر چرخ‌های وسایل نقلیه هستند. در گام نهایی، پایگاه داده‌های استخراج‌شده وارد محیط نرم‌افزار SPSS گردید تا روابط رگرسیونی توسعه یابند. در ساختار این مدل‌سازی، ضریب اصطکاک جانبی نقش متغیر وابسته را ایفا می‌کند، در حالی که سرعت وسیله نقلیه، زاویه انحراف از مسیر و شیب شیروانی به عنوان متغیرهای مستقل وارد تحلیل شده‌اند.

تصادفات خروج از مسیر در این مقاطع، عمدتاً ریشه در لغزش و سیله نقلیه و ناتوانی در کنترل زاویه فرمان روی شیروانی‌های کناره راه دارد که در نهایت ایمنی جابجایی را به خطر می‌اندازد.

تحت فشار جانبی شدیدی قرار می‌گیرند؛ به نحوی که این نیرو بین ۵ تا ۱۰ درصد فراتر از نیروهای اعمال شده در سایر مراحل حرکت در کناره راه و روی شیروانی است. شایان ذکر است که



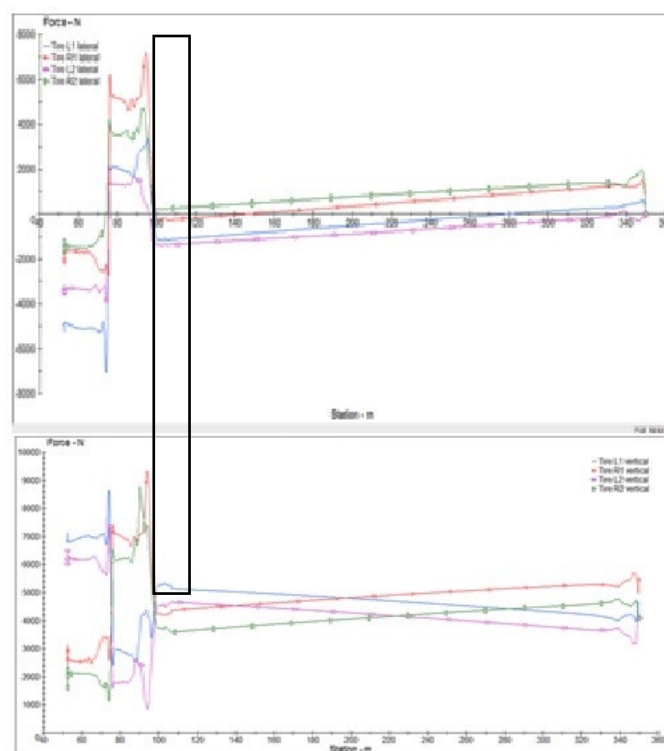
شکل ۱. نمودارهای مورد استفاده در نرم‌افزار: الف) نیروی جانبی بر چرخ‌های خودرو، ب) نیروی قائم بر چرخ‌های خودرو



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

ارزیابی همزمان نمودارهای نیروی عمودی و جانبی، یک پدیده فیزیکی بسیار مهم را در زمان عبور از شیروانی جلویی آشکار می‌سازد: درست در لحظه‌ای که نیروی جانبی در تمامی چرخ‌ها به اوج خود می‌رسد، بار قائم روی چرخ‌های داخلی (در زمان خروج به سمت شیروانی) به کمترین سطح ممکن افت کرده و در مقابل، برای چرخ‌های سمت خارج روی شیروانی، به بیشترین مقدار خود می‌رسد. دلیل این امر آن است که نیروی گریز از

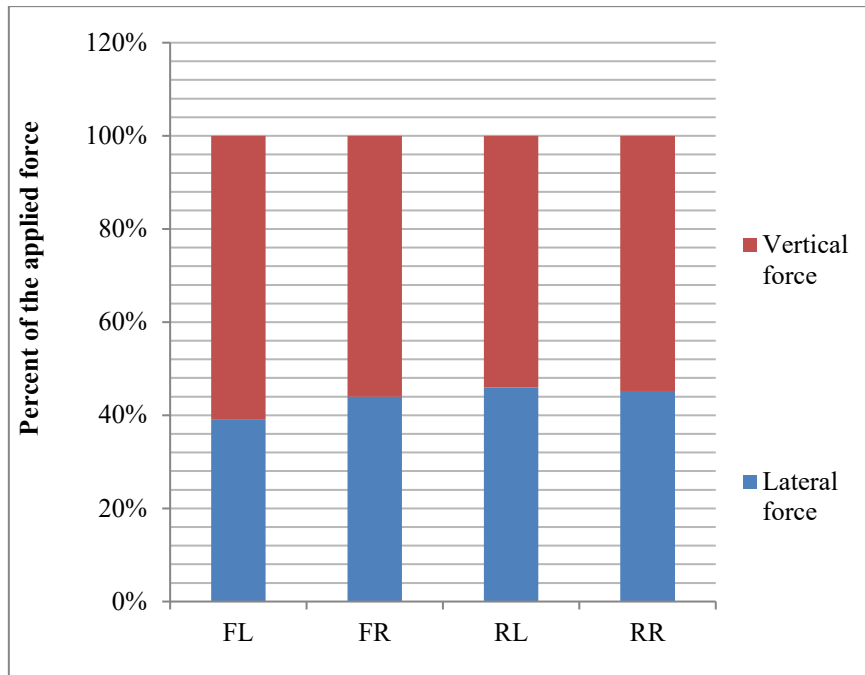
مرکز در ترکیب با اختلاف ناگهانی شیب عرضی مسیر و شیب تند شیروانی، باعث نامتعادل شدن شدید توزیع بار قائم روی چرخ‌ها می‌گردد، پدیده‌ای که خود اثباتی روشن بر نقص مدل جرم نقطه‌ای است. بدیهی است اگر تائیری نیروی عمودی کمتری را تجربه کند، پتانسیل لغزش آن بسیار بیشتر از سایر چرخ‌ها خواهد بود. این مسئله در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. توزیع نیروی جانبی و قائم بر چرخ‌های خودرو

بررسی دقیق توزیع نیروها بر روی تایرهای خودروی SUV مطابق شکل ۴ نشان می‌دهد که تمرکز اصلی بارهای جانبی و عمودی بر روی چرخ‌های سمت چپ این وسیله نقلیه اعمال می‌گردد. داده‌های شبیه‌سازی گویای آن است که ۵۴ درصد از کل نیروهای جانبی و ۵۰ درصد از بارهای قائم، منحصراً توسط

تایرهای سمت چپ خودروی SUV تحمل می‌شوند. این واقعیت فیزیکی به وضوح نشان می‌دهد که برخلاف فرضیات آشتو مبنی بر توزیع مساوی نیروها بین چرخ‌ها، در دنیای واقعی این بارهای دینامیکی کاملاً بر اساس وزن وسیله نقلیه، سرعت و زاویه چرخش فرمان روی سطوح شیب‌دار توزیع می‌گردند.



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

۳-۲- نتایج ضریب اصطکاک جانبی

در این بخش، مقادیر ضریب اصطکاک جانبی مورد نیاز برای خودروی SUV در سناریوهای مختلف انحراف از مسیر، استخراج و تحلیل شده است. خروجی‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با خروج وسیله نقلیه از کف راه و ورود به محدوده کناره راه، تغییرات ناگهانی شیب عرضی مسیر و قرارگیری تایرها روی شیروانی جلویی، تقاضای اصطکاک جانبی را به شدت افزایش می‌دهد. داده‌ها اثبات می‌کنند که با افزایش سرعت حرکت و همچنین بیشتر شدن زاویه فرمان در لحظه انحراف، میزان اصطکاک جانبی مورد نیاز برای حفظ تعادل خودرو به صورت تصاعدی بالا می‌رود.

تحلیل دینامیکی خودروی SUV گویای آن است که به دلیل قرارگیری مرکز ثقل در ارتفاعی بالاتر، انتقال بار قائم در زمان عبور از تلاقی قوس‌های افقی و سرازیری‌های تند بسیار شدیدتر از سایر وسایل نقلیه است. هنگامی که این وسیله نقلیه وارد شیروانی جلویی با شیب‌های تند (نظیر نسبت‌های ۱:۳ و ۱:۴) می‌شود، تقاضای اصطکاک تایرها برای غلبه بر نیروی گریز از

مرکز و جلوگیری از لغزش به بیشینه مطلق خود می‌رسد. در بسیاری از سناریوهای بحرانی شبیه‌سازی شده، اصطکاک جانبی مورد نیاز از پتانسیل اصطکاکی موجود در سطح فراتر رفته و حاشیه ایمنی جابجایی به طور کامل تخلیه می‌گردد. بررسی دقیق‌تر نمودارهای اصطکاک نشان می‌دهد که در شیروانی‌های تندتر، به دلیل اختلاف شدید در تراز هندسی چرخ‌ها، تایرهای سمت پایین دست بار جانبی و برشی مضاعفی را تحمل می‌کنند. این تمرکز تنش، در ترکیب با افت نیروی عمودی در چرخ‌های بالادست، آستانه لغزش را به شدت کاهش داده و آغازگر فرآیند واژگونی خودروی SUV پیش از توقف کامل در کناره راه خواهد بود. نتایج این بخش به وضوح نشان می‌دهد که در طراحی هندسی مقاطع کوهستانی، اتکا به ضرایب اصطکاک استاندارد بدون در نظر گرفتن رفتار ناپایدار خودروهای SUV بر روی شیروانی جلویی، تقاضای اصطکاک جانبی کمتر از واقعیت محاسبه کرده و در نتیجه، به تخمین نادرست حاشیه ایمنی جابجایی می‌انجامد.

فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل، سال بیست و سوم، دوره سوم، شماره ۸۸، پاییز ۱۴۰۵

جدول ۱. ضرایب اصطکاک جانبی و طولی به دست آمده از شبیه سازی برای قوس های 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

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	0.0776605	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

جدول ۲. ضرایب اصطکاک جانبی و طولی به دست آمده از شبیه سازی برای قوس های افقی بر روی شیروانی

Input									
Mu	R	V	Fore Slope: Embankment			Behavior Of The Driver In 7.5-25 Degree Run Of Road			
			1:3	1:4	1:10	7.50'Deg	15'Deg	20'Deg	0-5'Deg
0.9	230	80	YES			YES			
0.9	230	80	YES				YES		
0.9	230	80	YES					YES	
0.9	230	80	YES						YES
0.9	230	80		YES		YES			
0.9	230	80		YES			YES		
0.9	230	80		YES				YES	
0.9	230	80		YES					YES
0.9	230	80			YES	YES			
0.9	230	80			YES		YES		
0.9	230	80			YES			YES	
0.9	230	80			YES				YES
0.9	395	100	YES			YES			
0.9	395	100	YES				YES		
0.9	395	100	YES					YES	
0.9	395	100	YES						YES
0.9	395	100		YES		YES			
0.9	395	100		YES			YES		
0.9	395	100		YES				YES	
0.9	395	100		YES					YES
0.9	395	100			YES	YES			
0.9	395	100			YES		YES		
0.9	395	100			YES			YES	
0.9	395	100			YES				YES
0.9	667	120	YES			YES			
0.9	667	120	YES				YES		
0.9	667	120	YES					YES	
0.9	667	120	YES						YES
0.9	667	120		YES		YES			
0.9	667	120		YES			YES		
0.9	667	120		YES				YES	
0.9	667	120		YES					YES
0.9	667	120			YES	YES			
0.9	667	120			YES		YES		
0.9	667	120			YES			YES	
0.9	667	120			YES				YES

ادامه جدول ۲. ضرایب اصطکاک جانبی و طولی به دست آمده از شبیه سازی برای قوس های افقی بر روی شیروانی

Output																	
Speed 80 km/hr						Speed 100 km/hr						Speed 120 km/hr					
Sedan		SUV		Truck		Sedan		SUV		Truck		Sedan		SUV		Truck	
fy	fx	fy	fx	fy	fx	fy	fx	fy	fx	fy	fx	fy	fx	fy	fx	fy	fx
-0.877419	0.0329957	-0.836094	0.0535252	-0.595343	-0.003975	-0.869592	0.0294075	-0.833837	0.063689	-0.551594	-0.027761	-0.87072	0.0409	-0.835548	0.0697326	-0.592808	-0.016302
0.4258413	0.3747707	-0.735983	-0.031425	-0.603732	-0.016714	0.4787253	0.4398469	0.5013296	0.0378586	-0.56327	-0.019411	0.6542704	0.0605222	0.6542704	0.0605222	-0.644667	-0.003431
0.4930131	-0.005795	0.5281136	0.0292505	-0.475596	-0.017116	-0.859414	-0.028325	0.7379869	0.0775839	0.6026577	-0.013723	0.8436	0.0863713	0.8558509	0.1033036	0.6457269	0.0053576
0.7277845	0.0347062	0.7312634	0.0681088	0.5954036	-0.008976	0.8574209	0.0820217	0.8536445	0.1051026	0.6569887	-0.003549	0.8789301	0.075364	0.8357026	0.0891522	0.6735431	0.0022918
-0.880994	0.0491118	-0.833227	0.0752695	-0.632096	0.0016505	-0.882884	0.050305	-0.837547	0.0803754	-0.59661	-0.003811	-0.885129	0.0588873	-0.838147	0.0772991	-0.628151	0.0473951
0.8225036	-0.027777	-0.833022	-0.025865	-0.626124	-0.012295	-0.864646	-0.026958	-0.827893	-0.018337	-0.583424	-0.01039	-0.859957	-0.024433	0.6542704	0.0605222	-0.562525	-0.017884
0.432379	0.5062891	-0.866533	-0.027885	-0.554615	-0.016655	-0.874563	-0.029223	0.7379869	0.0775839	0.6026577	-0.013723	0.8436	0.0863713	0.8558509	0.1033036	0.6457269	-0.007454
0.7277845	0.0347062	0.7267132	0.0459486	0.5954036	-0.008976	0.8574209	0.0820217	0.8536445	0.1051026	0.6569887	-0.003549	0.8789301	0.075364	0.8357026	0.0891522	0.6735431	0.0015836
-0.802211	0.0530371	-0.792099	0.0838676	-0.576513	0.0228858	-0.860073	0.0705893	-0.835709	0.1000706	-0.650698	-0.000615	-0.882508	0.0823055	-0.845982	0.1153527	-0.420276	0.0230569
-3.850859	0.0337869	-0.812136	0.0593571	-0.645111	0.0066879	-0.864346	0.0357754	-0.811491	0.0637171	-0.638242	0.0051274	-0.85929	0.0360666	-0.809811	0.0642332	-0.624712	-0.008424
-0.858744	0.0185196	-0.804048	0.0490988	-0.617477	-0.012594	-0.860445	0.0113573	0.8152898	0.0408617	0.6026577	-0.013723	0.8643732	0.007998	0.8369045	0.3386932	0.6457269	-0.007454
-0.866725	-0.030973	0.7267132	0.0459486	0.5955401	-0.008976	0.8574209	0.0820217	-0.835755	-0.019112	0.6569887	-0.003549	0.870127	0.0115286	0.805636	-0.017259	0.6735431	0.0022918

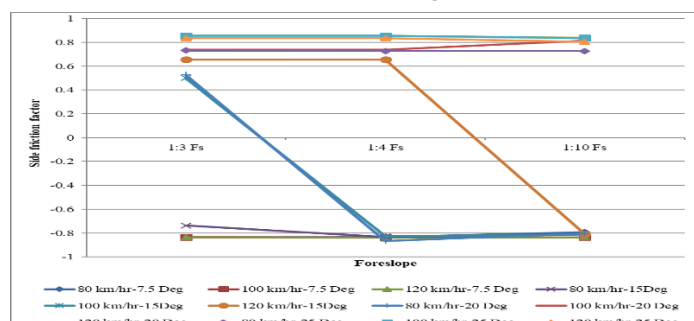
افت شدید کنترل پذیری می شود؛ چالشی که می توان آن را از طریق ملایم سازی شیب شیروانی جلویی تعدیل نمود.

در زوایای انحراف شدیدتر (۲۰ و ۲۵ درجه)، خودروی SUV رفتار بسیار بحرانی تری از خود نشان می دهد. در این سناریوها، وسیله نقلیه پس از دریافت بیشینه نیروهای دینامیکی در یک سوم ابتدایی قوس، به دلیل ارتفاع بالاتر مرکز ثقل، به سرعت پایداری خود را از دست داده و پیش از هرگونه بازیابی، بلافاصله دچار غلتش و واژگونی می گردد. با توجه به میزان نیروهای اعمال شده بر سیستم تعلیق، انحراف با زوایای ۲۰ و ۲۵ درجه هنگام ورود به کناره راه، بحرانی ترین و نگران کننده ترین سناریوهای ممکن برای ایمنی جابجایی محسوب می شوند که ترکیب آن ها با سرعت های بالا، حاشیه ایمنی وسیله نقلیه را عملاً به صفر می رساند.

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

بررسی نمودار ۵ و خروجی های شبیه سازی در مقاطع دارای قوس افقی، به ویژه در مسیرهای کوهستانی برای چهار سناریوی انحراف وسیله نقلیه نشان می دهد که بیشترین تأثیر تغییر زاویه فرمان بر ناپایداری خودروی SUV، در یک سوم ابتدایی قوس ها رخ می دهد.

در حالت تغییر رفتار راننده و انحراف با زاویه ۷٫۵ درجه، در صورت خروج از کف راه، همچنان امکان بازیابی و بازگشت وسیله نقلیه به مسیر عبوری وجود دارد. با این حال، در زاویه ۱۵ درجه و تحت سرعت ۱۲۰ کیلومتر در ساعت، خودروی SUV هنگام تلاش برای بازگشت به کف راه دچار جهش و

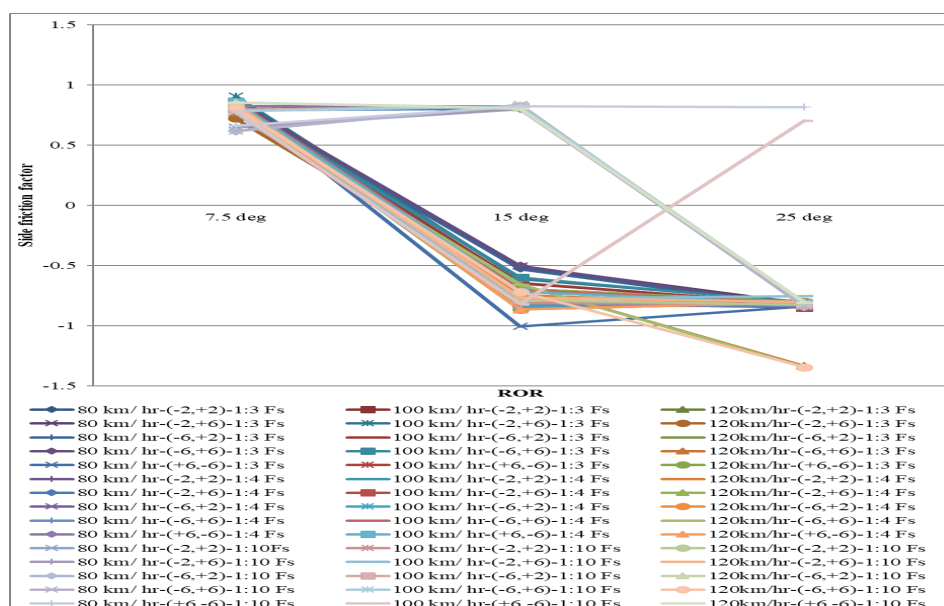


شکل ۵. تغییرات ضریب اصطکاک جانبی با تغییرات در زاویه خروج و سرعت SUV در یک قوس افقی دارای شیروانی

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

انحراف ۱۵ درجه، نمایانگر تغییرات شدیدی در جهت نیروهای اعمال‌شده بر تایرها هنگام عبور از قوس‌های قائم و ورود به کناره راه است، پدیده‌ای که خود را به صورت ضرایب اصطکاک جانبی منفی نشان می‌دهد. در بحرانی‌ترین شرایط حرکتی، معکوس شدن جهت نیروی وارده به چرخ‌های خودرو، پتانسیل کنترل فرمان را از بین برده و ایمنی جابجایی را مختل می‌سازد. ارزیابی مکان‌یابی نقطه واژگونی مشخص می‌سازد که خودروی SUV در زاویه انحراف ۱۵ درجه، رفتاری کاملاً مشابه سناریوی ۲۵ درجه بروز می‌دهد؛ به این معنا که حتی پیش از رسیدن به نقطه تحذب یا تقعر قوس، دچار لغزش و سپس واژگونی می‌گردد. به دلیل ارتفاع بالاتر مرکز ثقل و وزن بیشتر این کلاس از وسایل نقلیه، شدت این ناپایداری به مراتب بالاتر بوده و تغییر جهت نیروهای وارده به صورت یک گشتاور، همراه با لغزش تایرها، فرآیند غلتش را تسریع می‌نماید.

بررسی نمودار ۶ و نتایج شبیه‌سازی‌ها بر روی مقاطع دارای قوس قائم، به‌ویژه در نواحی کوهستانی برای چهار سناریوی انحراف وسیله نقلیه، نشان می‌دهد که بیشترین تأثیر تغییر زاویه فرمان بر ناپایداری خودروی SUV، در یک‌سوم ابتدایی قوس‌ها رخ می‌دهد. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، در زاویه انحراف ۷٫۵ درجه هنگام خروج از کف راه، وسیله نقلیه با توزیع نیروی نسبتاً باثباتی مواجه است و در این شرایط لغزش بحرانی مشاهده نمی‌شود. اما با افزایش زاویه تغییر مسیر به ۱۵ درجه، خودروی SUV در سرعت ۱۰۰ کیلومتر در ساعت، پایداری خود را روی شيروانی جلویی از دست داده و دچار لغزش شدید و واژگونی می‌گردد. در شرایط انحراف بحرانی‌تر با زاویه ۲۵ درجه، خودروی SUV پس از خروج از کف راه و ورود به محدوده کناره راه، بلافاصله روی شيروانی دچار لغزش و سرخوردگی شده و در تمامی سرعت‌های مورد مطالعه به طور قطعی واژگون می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها همچنین نشان می‌دهد که زاویه



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

مختلف، وابستگی شدیدی به هندسه شيروانی دارد؛ به‌گونه‌ای که با ملایم‌تر شدن شیب شيروانی جلویی، تغییرات ناگهانی اصطکاک کاهش یافته و پایداری دینامیکی وسیله نقلیه در کناره راه به طرز چشمگیری بهبود می‌یابد.

تحلیل نهایی نمودارهای مرتبط با قوس‌های قائم ثابت می‌کند که ترکیب شیب‌های طولی (۶+، ۶-) برای قوس مقعر و (۶-، ۶+) برای قوس محدب، در زمان انحراف از کف راه، بدترین و بحرانی‌ترین شرایط دینامیکی را رقم می‌زند. علاوه بر این، نوسانات ضریب اصطکاک جانبی در سرعت‌ها و زوایای انحراف

۳-۳- مدل سازی ضریب اصطکاک جانبی

در این بخش، با استفاده از پایگاه داده های استخراج شده از شبیه سازی و بهره گیری از نرم افزار SPSS، منحصرأً برای خودروی SUV یک مدل رگرسیون چندگانه به منظور برآورد ضریب اصطکاک جانبی توسعه یافته است تا مبنای کاربردی نوینی جهت ارتقای ایمنی طراحی های هندسی راه ارائه گردد. این روابط آماری، تغییرات ضریب اصطکاک جانبی را بر حسب متغیرهای مستقلی نظیر سرعت وسیله نقلیه، زاویه انحراف از کف راه و هندسه شیب شیروانی جلویی تبیین می نمایند.

(۲)

۳-۳-۱- مدل سازی ضریب اصطکاک جانبی برای

قوس های افقی

جهت محاسبه ضریب اصطکاک جانبی مورد نیاز برای خودروی SUV در مقاطع دارای قوس افقی، بر اساس تحلیل های رگرسیونی انجام شده، معادله ۲ به عنوان بهینه ترین مدل ریاضی استخراج گردید. مطابق با خروجی های آماری، مدل بسط یافته از ضریب همبستگی (R) بسیار مطلوبی برخوردار است که نشان از دقت بالای آن در تبیین شرایط فیزیکی دارد. علاوه بر این، ارزیابی سطح معناداری پارامترها نشان می دهد که تمامی متغیرهای مستقل وارد شده به مدل، به استثنای متغیر سرعت، تأثیر کاملاً معناداری بر تغییرات ضریب اصطکاک جانبی در محدوده کناره راه ایفا می کنند.

$$f_y = -2.763 + 0.718 RoR + 0.292 V - 0.220 Fs$$

در جدول ۳، ضریب R برای مدل سازی ROR مقدار ۰,۷۱۸، برای مدل سازی ROR و سرعت مقدار ۰,۷۷۵، و برای مدل سازی ROR، سرعت و شیروانی مقدار ۰,۸۰۶ را دارد.

که در آن f_y ضریب اصطکاک جانبی، V سرعت وسیله نقلیه، Fs شیب شیروانی، و RoR زاویه خروج وسیله نقلیه از راه (بر حسب درجه) است. برازش یک معادله رگرسیون با داده ها توسط ضریب R تعیین می شود که در مورد خروج از راه ۰,۷۱۸ و در مورد خروج از راه و شیروانی ضریب R به ترتیب مقادیر ۰,۷۷۵ و ۰,۸۰۶ را دارد.

جدول ۳. خلاصه ی مدل ضریب اصطکاک جانبی وسیله نقلیه در قوس افقی برای سواری (SUV)

Model	R	R ²	Adjusted R ²	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	.718 ^a	.516	.502	.56702	2.398
2	.775 ^b	.601	.577	.52229	
3	.806 ^c	.650	.617	.49728	

a. Predictor: Constant, ROR

b. Predictor: Constant, ROR, speed

c. Predictor: Constant, ROR, speed, foreslope

Note: Dependent variable is f_y

نمودار، یکی از پیش فرض‌های بنیادین تحلیل رگرسیون را با موفقیت تأیید می‌نماید.

در همین راستا، نمودار ۸ گراف پراکنش و همبستگی مقادیر مشاهده شده در برابر مقادیر پیش‌بینی شده را به تصویر می‌کشد. تجمع متراکم و یکنواخت داده‌های خروجی در مجاورت خط برازش، گواهی بر دقت و اعتبار بالای مدل ریاضی توسعه یافته است؛ به نحوی که کسب ضریب همبستگی چندگانه $R = 0.806$ نشان‌دهنده توانمندی قابل توجه این مدل در تبیین واریانس متغیر وابسته می‌باشد.

در واقع، متغیرهای مستقل وارد شده به مدل (نظیر زاویه انحراف فرمان، سرعت و هندسه شیارانی جلویی)، موفق شده‌اند بخش اعظم تغییرات پیچیده اصطکاک جانبی را در لحظه خروج وسیله نقلیه از کف راه رمزگشایی کنند.

در جدول ۴، نتایج آزمون ANOVA برای مدل ضریب اصطکاک جانبی SUV نشان داده شده است، که در آن، مقدار F به ترتیب برای مدل‌سازی خروج از راه، مدل‌سازی ROR و سرعت، و مدل‌سازی ROR، سرعت و شیارانی، برابر با ۳۶،۲۲۳، ۲۴،۸۸۳ و ۱۹،۷۶۶ به دست آمده است. همچنین، نتایج مربوط به ضرایب مدل ارائه شده در جدول ۵ نشان داده شده است. همچنین، نتایج مربوط به ضرایب مدل در جدول ۵ 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 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 اثبات‌کننده اهمیت بالا و تأثیر قطعی و معنادار متغیر مورد نظر در پیش‌بینی رفتار دینامیکی خودروی SUV است. بررسی نمودار ۷، بیانگر توزیع فراوانی خطاهای استاندارد شده برای مدل پیش‌بینی ضریب اصطکاک جانبی خودروی SUV در مقاطع دارای قوس افقی است. توزیع متقارن و نرمال پسماندها در این

جدول ۵. نتایج آزمون ANOVA برای خودروی (SUV) در قوس‌های افقی

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	11.646	1	11.646	36.223	.000 ^a
Residual	10.931	34	.322		
Total	22.578	35			
2 Regression	13.576	2	6.788	24.883	.000 ^b
Residual	9.002	33	.273		
Total	22.578	35			
3 Regression	14.664	3	4.888	19.766	.000 ^c
Residual	7.913	32	.247		
Total	22.578	35			

a. Predictor: Constant, ROR

b. Predictor: Constant, ROR, speed

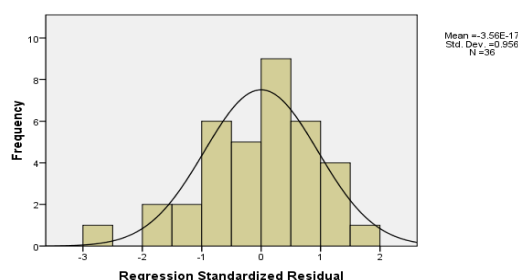
c. Predictor: Constant, ROR, speed, foreslope

جدول ۶. ضرایب مدل ضریب اصطکاک جانبی وسیله نقلیه در قوس افقی برای SUV

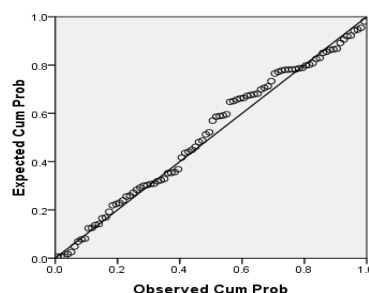
Model		Unstandardized Coefficient		Standardized Coefficient	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Constant	-1.520	.264		-5.755	.000
	ROR	.088	.015	.718	6.019	.000
2	Constant	-2.938	.586		-5.014	.000
	ROR	.088	.013	.718	6.534	.000
	Speed	.014	.005	.292	2.660	.012
3	Constant	-2.763	.564		-4.899	.000
	ROR	.088	.013	.718	6.863	.000
	Speed	.014	.005	.292	2.793	.009
	foreslope	-.004	.002	-.220	-2.098	.044

ناپایداری را پیش از اجرای فیزیکی مسیر، به صورت کمی ارزیابی کنند. در نتیجه، در صورت شناسایی مقاطع پرخطر، می‌توان با اقدامات پیشگیرانه‌ای نظیر اصلاح شعاع قوس افقی، تعدیل سرعت مجاز یا ملایم‌سازی شیب شیروانی جلویی، از وقوع ناپایداری‌های فاجعه‌بار جلوگیری به عمل آورد. این دستاورد تحلیلی، گامی مؤثر در گذار از مدل‌های تئوریک ساده‌سازی‌شده به سوی طراحی‌های مبتنی بر رفتار واقعی وسیله نقلیه محسوب می‌گردد.

این امر اثبات می‌کند که تقاضای اصطکاکی خودروی SUV بر روی سطوح شیب‌دار در محدوده کناره راه، یک پدیده کاملاً تصادفی نیست، بلکه تابعی سیستماتیک از سینماتیک خروج و توپوگرافی مقطع عرضی است که اکنون در قالب این معادله رگرسیونی با دقت بالایی فرمول‌بندی شده است. از منظر کاربردی، این مدل اجازه می‌دهد تا حاشیه ایمنی جابجایی را با رویکردی به مراتب واقع‌بینانه‌تر از فرضیات کلاسیک پیش‌بینی گردد. با جایگذاری پارامترهای طراحی در این معادله، طراحان قادر خواهند بود آستانه بحرانی لغزش و



شکل ۷. نمودار هیستوگرام مدل ضریب اصطکاک جانبی در قوس‌های افقی برای خودروی SUV



شکل ۸. نمودار همبستگی مدل ضریب اصطکاک جانبی در قوس‌های افقی برای خودروی SUV

۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از محیط شبیه‌سازی CarSim، رفتار دینامیکی خودروی SUV و واکنش‌های راننده تحت شرایط هندسی گوناگون مدل‌سازی گردید. به منظور دستیابی به چارچوبی جامع، متغیرهای سینماتیکی و هندسی متنوعی در سناریوهای بحرانی انحراف از مسیر مورد ارزیابی قرار گرفتند. در نهایت، با استخراج پایگاه داده‌های شبیه‌سازی و بهره‌گیری از نرم‌افزار SPSS، منحصراً برای خودروی SUV مدل‌های رگرسیون چندگانه‌ای جهت پیش‌بینی ضریب اصطکاک جانبی توسعه یافت تا روابط نوینی برای ارتقای ایمنی طراحی هندسی راه ارائه گردد. اهم نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

در مقاطع دارای قوس افقی، مشخص گردید که یک‌سوم ابتدایی قوس، بحرانی‌ترین و خطرناک‌ترین ناحیه در زمان انحراف وسیله نقلیه از کف راه محسوب می‌شود. ریشه این ناپایداری، اعمال زوایای تند فرمان و انحرافات ناگهانی خودروی SUV در سرعت‌های عملکردی بالا (۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر در ساعت) است که تقاضای اصطکاک را به شدت افزایش می‌دهد.

تحلیل مکان‌یابی نقاط غلتش در قوس‌های قائم نشان می‌دهد که زوایای انحراف ۱۵ و ۲۵ درجه در ترکیب با شیارهای جلوبندی تند (نسبت‌های ۱:۳ و ۱:۴)، بیشترین تأثیر مخرب را بر پایداری خودروی SUV دارند. نتایج اثبات می‌کند که با ملایم‌سازی شیب شیارهای جلوبندی به نسبت‌های ۱:۶ و ۱:۱۰، نقطه غلتش از محل تحدب یا تقعر قوس فاصله گرفته و فرصت بازیابی وسیله نقلیه جهت بازگشت به مسیر عبوری فراهم می‌گردد؛ در حالی که در زوایای انحراف شدید (۲۵ درجه) روی شیارهای تند، خودروی SUV پیش از رسیدن به یک‌سوم طول قوس قائم به طور قطعی واژگون می‌شود.

ارزیابی‌ها گویای آن است که تقاضای اصطکاک جانبی با تندتر شدن شیب شیارهای جلوبندی رابطه مستقیم و فزاینده دارد؛ پدیده‌ای که در شیب‌های بحرانی ۱:۳ به اوج خود می‌رسد. در نتیجه، با افزایش تقاضا و تخلیه کامل حاشیه ایمنی جابجایی (اختلاف میان اصطکاک جانبی مورد نیاز و پتانسیل اصطکاکی

موجود در سطح) در محدوده کناره راه، احتمال لغزش و ناپایداری خودروی SUV به شدت افزایش می‌یابد.

توزیع تقاضای اصطکاک جانبی بر روی محورهای جلو و عقب خودروی SUV کاملاً نامتقارن است. به دلیل ویژگی‌های ذاتی سینماتیک سیستم تعلیق، ارتفاع بالاتر مرکز ثقل و توزیع وزن خاص در این کلاس از وسایل نقلیه، پدیده انتقال بار در زمان عبور از شیروانی جلوبندی باعث می‌شود تا محورهای عقب تنش‌های متفاوتی قرار گیرند. نتایج نشان داد که در لحظات بحرانی انحراف، توزیع نامتوازن بار قائم روی تایرهای سمت خارج قوس، ظرفیت اصطکاکی محورهای را به شدت تغییر داده و آستانه لغزش را دستخوش تغییرات بنیادین می‌سازد.

خروجی مدل‌سازی رگرسیونی برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک جانبی خودروی SUV در قوس‌های افقی و قائم، حاکی از همبستگی آماری مطلوب و برازش دقیق معادلات بر پایگاه داده‌های شبیه‌سازی است که اعتبار بالای مدل توسعه‌یافته را تضمین می‌کند. در این روابط ریاضی، تأثیر قطعی و معنادار متغیرهای مستقلی نظیر سرعت، زاویه انحراف از سواره‌رو و هندسه شیارهای جلوبندی بر میزان تقاضای پیش‌بینی‌شده به اثبات رسید. به عنوان چشم‌انداز و جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آتی، پیشنهاد می‌گردد دامنه این پژوهش جهت پوشش سایر مقاطع هندسی نظیر قوس‌های اتصال تدریجی (کلوتوئیدها) و همچنین ارزیابی شیارهای مجهز به حفاظ‌های ایمنی و کانال‌های هدایت آب توسعه یابد. علاوه بر این، اعتبارسنجی خروجی‌های شبیه‌سازی با داده‌های میدانی در دنیای واقعی و مقایسه عملکرد مدل‌های پیشنهادی با سایر مدل‌های تحلیلی موجود، می‌تواند به بهبود هرچه بیشتر نتایج کمک نماید. در نهایت، بررسی اثرات همزمان پارامترهای محیطی نظیر شرایط لغزندگی سطح کف راه تحت شرایط جوی مختلف، تغییرات بارگذاری در خودروی SUV و الگوهای رفتاری پیچیده‌تر راننده بر ایمنی کناره راه، از دیگر محورهای ارزشمند برای مطالعات آینده به شمار می‌رود.

۶- مراجع

- AASHTO, (2011). Roadside Design Guide, 4th Edition. *American Association of State and Highway Transportation Officials*.
- AASHTO, (2018). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 7th Edition. *American Association of State and Highway Transportation Officials*.
- 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.
- Chiguma, M.L., (2007). Analysis of side friction impacts on urban roads: *Case Study Dar-es-Salaam*. KTH.
- Gulivindala, P. and A. Mehar, (2018). Analysis of side friction on urban arterials. *Transport and Telecommunication Journal*, 19(1): 21-30.
- 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.
- Bonneson, J.A., (2000). Superelevation distribution methods and transition designs. Vol. 439. *Transportation Research Board*.
- Mehra Molan, A., (2014). Multi-Body Simulation Modeling of Vehicle Skidding and Roll over for Horizontal Curves on Longitudinal Grades. *93rd Annual Meeting of TRB*.
- Kordani, A.A., A.M. Molan, and S. Monajjem. (2014). New formulas of side friction factor based on three-dimensional model in horizontal curves for various vehicles. in T&DI Congress Planes, Trains, and Automobiles.
- 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.
- Santos, M.I., P.T.M.S. Oliveira, and A.P.C. (2022). Larocca, Investigation the Influence of Risk Factors on the Occurrence of Road Accidents Using the Driver Performance Model. *Transportation in Developing Economies*, 8(1): 10.
- 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*.
- 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.
- 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., *Evaluation of the application of maximum radius in horizontal curves using vehicle dynamic simulation*. Advances in Civil Engineering, 2022.
- Ksaibati, K., (2023). Impact of combined alignments and adverse weather conditions on vehicle skidding. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*.
- Ahn, C., H. Peng, and H.E. Tseng, (2012). Robust estimation of road friction coefficient using lateral and longitudinal vehicle dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 50(6): 961-985.
- 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 (2004). Solminihaç. A method to evaluate side friction in horizontal curves, using supply-demand concepts. in *6th International Conference on Managing Pavements*.
- 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.
- 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.
- Morrall, J. and R. Talarico, (1994). Side friction demanded and margins of safety on horizontal curves. *Transportation Research Record*, 1435: 145-146.

