

مطالعه شبیه‌سازی و تجربی عملکرد ترمزی خودروی سواری در مسیرهای دارای کاهنده سرعت و نوار لرزاننده

مقاله علمی-پژوهشی

* ناصر سینا (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

حسین رحیمی آسیابریکی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

عرفان اسلامی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

مهدی سیاسرناژاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sina@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۱ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

صفحه ۴۰۲-۳۸۷

چکیده

یکی از مباحث چالش برانگیز در حمل و نقل، مبحث ایمنی حمل و نقل است. با توجه به اینکه ایمنی حمل و نقل ناشی از عوامل سه گانه خودرو، جاده و راننده است، خاستگاه ایمنی حمل و نقل ریشه در علوم مختلف از جمله مهندسی خودرو دارد. در این مقاله، رفتار دینامیکی خودروی سواری به هنگام ترمزگیری در مسیرهای دارای کاهنده سرعت و نوار لرزاننده مورد مطالعه قرار گرفته است. کاهنده‌های سرعت و نوارهای لرزاننده برای آگاهی به رانندگان از احتمال خطر قریبالوقوع به کار می‌روند. با این وجود، بررسی عملکرد خودرو حین ترمزگیری بر روی کاهنده‌های سرعت و نوارهای لرزاننده موضوعی است که تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است و این مقاله در پی پاسخ به این مسئله است. برای این منظور، سناریوی ترمزگیری خودرو با سرعت اولیه ۶۰ کیلومتر بر ساعت در مسیر صاف و مسیر دارای پروفیل‌های نوار لرزاننده و کاهنده سرعت نیم‌سینوسی و دوزنقه‌ای تعریف و با استفاده از نرم‌افزار کارسیم شبیه‌سازی شد. همچنین سناریوی مشابهی برای آزمون تجربی تعریف گردید تا بدین ترتیب در شرایط واقعی نیز عملکرد ترمزی خودرو سنجیده شود. نتایج نشان می‌دهد که زمان توقف خودرو و مسافت ترمزی تغییرات کمی نسبت به مسیر صاف داشته است. با این وجود، تغییرات نیروی عمودی وارد بر چرخ‌ها در پروفیل‌های نیم‌سینوسی و دوزنقه‌ای قابل ملاحظه است و حتی خطر از دست دادن تماس تایر با زمین و عدم کنترل‌پذیری خودرو نیز وجود دارد که اهمیت این موارد کمتر از مسافت ترمزی و زمان توقف خودرو نیست.

واژه‌های کلیدی: خودرو، دینامیک ترمزی، استقرارپذیری، کاهنده سرعت، نوار لرزاننده

۱- مقدمه

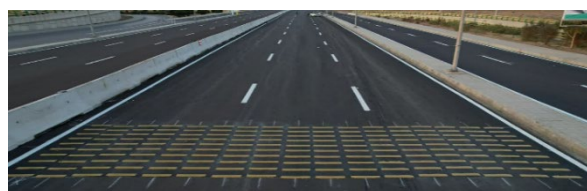
که هم زیر ساخت ایمنی ضعیف‌تری دارند و هم اجرای قوانین راهنمایی و رانندگی در آن‌ها ناکافی است (احمد و همکاران، ۲۰۲۳). در کشور عراق سالانه حدود ۷۰۰۰ مرگ ناشی از تصادفات گزارش شده است. در ترکیه نیز هزاران تصادف، به‌ویژه در مناطق شهری رخ می‌دهد و عواملی مانند افزایش خودرو، ضعف برنامه‌ریزی شهری و آموزش ناکافی نقش

ایمنی حمل و نقل، یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های برنامه‌ریزان استراتژیک، مدیران اجرایی، مهندسان و پژوهشگران است. داده‌های آماری نشان می‌دهد که روزانه بیش از ۳۰۰۰ نفر در جاده‌های سراسر دنیا جان خود را از دست می‌دهند (محمد و همکاران، ۲۰۱۹). بیش از ۹۰ درصد مرگ‌ومیرهای ناشی از تصادفات جاده‌ای در کشورهای کم‌درآمد و متوسط رخ می‌دهد

کلیدی دارند. در کشور هند نیز وضعیت بحرانی است و با ثبت بیش از ۱۴۰ هزار مرگ در سال، بالاترین آمار جهانی را به خود اختصاص داده است (محمد و همکاران، ۲۰۱۹). بر اساس آمار پایگاه اطلاعات رفاه ایرانیان، تا آذر ماه ۱۴۰۱ در ایران ۲۴ میلیون خودرو وجود داشته است و با ثبت جان باختن ۱۹،۴۳۵ نفر و معلولیت ۴۸۴،۳۸۱ نفر در سال ۲۰۲۱، در میان بیش از ۲۰۰ کشور جهان در جایگاه دوازدهم قرار دارد (ایمنی راه و حمل و نقل، ۱۴۰۴). در کشور ما، تصادفات سومین علت مرگ و میر هموطنان هستند و نرخ تلفات به ازای هر دستگاه وسیله نقلیه ۱۱ برابر میانگین جهانی است. عواملی همچون خطای انسانی، خواب‌آلودگی، ضعف زیرساخت و ایمنی پایین خودروها در ثبت چنین آماری نقش به‌سزایی دارند. در سال ۱۴۰۲ مجموعاً ۱۹،۸۲۰ نفر در حوادث رانندگی جان باختند که این عدد نسبت به سال ۱۴۰۱ حدود ۳ درصد افزایش داشته و ادامه‌ی روند نیز صعودی است که از سال ۱۳۹۵ با ۱۵،۸۸۰ آغاز شده و طی هفت سال حدود ۲۵ درصد رشد را نشان می‌دهد. در این میان، بیش از ۶۷ درصد تلفات در راه‌های برون‌شهری، ۲۶ درصد در درون‌شهر و ۷ درصد در مسیرهای روستایی رخ می‌دهد؛ همچنین افزایش ۳۲ درصدی تلفات برون‌شهری از سال ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد که جاده‌های بین شهری مهم‌ترین نقطه بحران هستند. داده‌ها همچنین نشان می‌دهد آمار تلفات در تصادف‌های درون‌شهری رابطه مستقیم با جمعیت استان‌ها دارد، اما در تصادف‌های برون‌شهری و روستایی چنین رابطه‌ای کمتر دیده می‌شود، که نشان‌دهنده نقش مهم عواملی مانند کیفیت راه، شدت تخلفات و نوع کاربری مسیرهاست (کدیور، ۱۴۰۳).

مطالعه شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تبدیل یک راه دوخطه ۸۷ کیلومتری به چهار خط جداشده در شرایط حجم یکنواخت، موجب کاهش ۶۷ درصدی تأخیر، ۳۳ درصدی چگالی و ۸ درصدی زمان سفر می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهد که مهندسی مسیر و طراحی مسیرهای جدا شده، خطوط جانبی و استفاده از تأسیسات کنترل ترافیک می‌تواند اثر قابل توجهی بر کاهش تصادفات و بهبود ایمنی و عملکرد شبکه ترافیکی داشته باشد (رحیمی و همکاران، ۲۰۱۸).

یکی از دلایل بروز تصادفات، عدم کاهش سرعت خودرو پیش از تقاطع، میدان و یا سایر مواضعی است که محدودیت سرعت در آنها برای رعایت ایمنی ترافیک الزامی است. برای اجتناب از بروز حادثه و اعلام هشدار به راننده در چنین موقعیت‌هایی معمولاً علاوه بر تابلوهای اعلان هشدار، از تعبیه علائم هشدار در سطح مسیر نیز استفاده می‌گردد. کاهنده سرعت نوار لرزاننده از جمله مواردی است که برای کاهش سرعت خودرو و اعلان هشدار به راننده پیش از مناطق حادثه خیز استفاده می‌شود. کاهنده سرعت در پروفیل‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد که از جمله پرکاربردترین آنها پروفیل نیم دایره‌ای، نیم سینوسی، مثلثی و دوزنقه‌ای است. نوار لرزاننده نیز بصورت برجستگی یا تورفتگی‌های متوالی در بخشی از جاده پیاده‌سازی می‌شود و با ایجاد لرزش و صدای محسوس به هنگام عبور تیر از روی آن‌ها، راننده را از خطر قریب‌الوقوع مطلع می‌کند. این نوارها اغلب نزدیک شدن به نقطه حادثه‌خیز یا انحراف از مسیر را هشدار می‌دهند. در شکل ۱ نمونه‌ای از کاهنده سرعت و نوار لرزاننده به تصویر درآمده است.



ب



الف



ت



پ

شکل ۱. چند نمونه کاهنده سرعت و نوار لرزاننده؛ (الف) نوار لرزاننده حاشیه‌ای (ب) نوار لرزاننده عرضی (پ) کاهنده سرعت نیم‌سینوسی (ت) کاهنده سرعت دوزنقه‌ای

در پژوهش‌های پیشین معمولاً تمرکز پژوهشگران بر تحلیل آماری رفتار و میزان بروز حوادث پس از اجرای نوار لرزاننده و کاهش سرعت معطوف بوده است. مایلز و همکاران (۲۰۰۶) به مطالعه و ارزیابی اثرات رفتاری رانندگان پس از نصب نوارهای لرزاننده پرداخته‌اند. آن‌ها سه پیکربندی از نوارهای لرزاننده عرضی، نوارهای لرزاننده مرکزی، و نوارهای لرزاننده شانه مسیر را در مطالعه خود در نظر گرفتند و با استفاده از داده‌های میدانی، رفتار رانندگان را قبل و بعد از نصب نوارهای لرزاننده تحلیل کرده‌اند. در این تحلیل عواملی همچون ترمز شدید ناگهانی، انحراف ناگهانی، تغییر مسیر سریع، تصحیح مسیر به سمت غیرمنتظره (مثلاً به شانه جاده یا در خلاف جهت حرکت) یا از دست دادن کنترل وسیله نقلیه مورد توجه قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که نگرانی درباره افزایش مانورهای خطرناک پس از نصب نوارهای لرزاننده تا حد زیادی بی‌اساس است. این مطالعه با ارائه شواهد تجربی، تأکید می‌کند که نوارهای لرزاننده نه تنها تهدیدی برای رفتار رانندگان نیستند، بلکه بدون ایجاد واکنش‌های ناگهانی، میزان هوشیاری و کنترل خودرو را بهبود می‌بخشند. یانگ و همکاران (۲۰۱۶) در قالب یک پژوهش تجربی تأثیر نصب نوارهای لرزاننده بر روی مسیرهای منتهی به تقاطع‌های پرسرعت را مورد بررسی قرار داده‌اند. پنج نقطه از جاده US-280 در ایالت آلاباما ایالات متحده انتخاب شده و در ساعات مختلف روز و شب، با اندازه‌گیری پارامترهای ارتعاش خودرو، سطح صدا، سرعت وسایل نقلیه و رفتار ترمزی رانندگان، تأثیر نوارهای لرزاننده سنجیده شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که عبور خودرو از روی نوار لرزاننده عرضی باعث ایجاد صدای داخل کابین و ارتعاش قابل توجهی می‌شود و این هشدار حسی اغلب با کاهش معنی‌دار سرعت هنگام نزدیک شدن به تقاطع همراه است. همچنین رفتار ترمزی رانندگان بعد از عبور از نوارها بهبود داشته است، به گونه‌ای که رانندگان تمایل داشتند زودتر و با آمادگی بیشتری اقدام به کاهش سرعت کنند. نتایج مطالعه حاکی از آن است که نوارهای لرزاننده عرضی یک راهکار کم‌هزینه و مؤثر برای افزایش ایمنی در تقاطع‌های پرسرعت هستند. این ابزار به خصوص در شرایطی که دید راننده محدود است یا احتمال غفلت وجود دارد، می‌تواند به عنوان مکمل علائم بصری یا چراغ راهنمایی عمل کند و احتمال وقوع تصادفات شدید را کاهش دهد. در

پژوهشی دیگر، خان و همکاران (۲۰۱۵) به ارزیابی تأثیر نوارهای لرزاننده شانه مسیر بر کاهش تصادفات در جاده‌های روستایی پرداخته‌اند. یافته‌های این پژوهش نشان داده است که نصب این نوارها در جاده‌های دوخطه باعث کاهش ۱۴ درصدی تصادفات ناشی از انحراف مسیر می‌شود زیرا که به محض انحراف خودرو از مسیر، راننده به سرعت متوجه شده و در پی اصلاح مسیر خودرو برمی‌آید. مطالعات ایمنی ترافیک نشان می‌دهد که سرعت حرکت وسیله نقلیه نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت تصادفات و میزان مرگ و میر دارد؛ به طوری که احتمال مرگ عابر پیاده در برخورد با خودرو در سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت حدود ۱۰ درصد بوده، در حالی که این مقدار در سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت به حدود ۸۰ درصد افزایش یافته و در سرعت‌های بالاتر از ۶۰ کیلومتر بر ساعت تقریباً به ۱۰۰ درصد می‌رسد. نصب کاهش‌دهنده‌های سرعت با کاهش سرعت عبور خودروها به محدوده ۲۰ تا ۳۰ کیلومتر بر ساعت، برخورد‌ها را به بازه کم‌خطر منتقل کرده و بر اساس نتایج مطالعات تجربی، موجب کاهش حدود ۴۰ تا ۶۰ درصدی تصادفات منجر به جراحت و ۵۰ تا ۶۵ درصدی تصادفات منجر به مرگ در معابر شهری می‌شود. در همین راستا، نتایج پژوهش‌های انجام‌شده در کشور ترکیه نیز نشان می‌دهد که اجرای اقدامات آرام‌سازی ترافیک به‌ویژه استفاده از کاهش‌دهنده‌های سرعت عمودی، منجر به کاهش حدود ۶۰ درصدی تصادفات منجر به جراحت و ۶۳ درصدی تصادفات منجر به مرگ شده است که بیانگر نقش مؤثر کاهش‌دهنده‌های سرعت در کاهش شدت برخورد‌ها و تلفات انسانی از طریق وادار کردن رانندگان به کاهش سرعت و ترمزگیری کنترل‌شده است (حق‌شناس و همکاران، ۲۰۲۴). چوبدار و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از نرم‌افزار SPSS و مدل رگرسیون نمایی به مدل سازی و ارائه مدل پیشنهادی پیش‌بینی تصادف در تقاطع‌ها و دوربرگردان‌های شهرستان قائم‌شهر به عنوان یک مطالعه‌ی موردی پرداختند. این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از سرعت‌گیرها در تقاطعات و دوربرگردان‌ها تنها در صورت طراحی هندسی استاندارد و نصب علائم هشداردهنده مناسب می‌تواند به کاهش تصادفات منجر شود. نتایج مدل پیش‌بینی تصادفات با ضریب تعیین ۷۲/۰ بیانگر آن است که نصب سرعت‌گیر استاندارد به‌طور متوسط حدود ۱۳/۱۱ درصد احتمال وقوع تصادف را کاهش می‌دهد. در مقابل، عدم استفاده از علائم هشداردهنده در تقاطعات دارای

۲- شرایط انجام آزمون شبیه سازی و تجربی

برای انجام شبیه سازی ها از نرم افزار CarSim® استفاده شده است. این نرم افزار بستری قابل اعتماد برای انجام شبیه سازی سیستم های دینامیکی خودرو فراهم آورده است و با توجه به مدلسازی زیرسیستم های مختلف، نتایجی بسیار نزدیک به واقعیت ارائه می دهد. از اینرو، در بسیاری از کارهای پژوهشی به منظور صحت گذاری نتایج در بسترهای کد در حلقه و نرم افزار در حلقه مورد استفاده قرار می گیرد (سینا و همکاران، ۲۰۲۱). در نرم افزار یک خودرو B-Class مطابق شکل ۲ انتخاب و شبیه سازی در دو حالت مجهز بودن به سیستم ترمز ضدقفل و فاقد سیستم ترمز ضدقفل صورت گرفته است. لازم به ذکر است که کلاس بندی خودروهای در نرم افزار بر اساس معیار دسته بندی اروپایی خودروهای سواری صورت گرفته است. در این دسته بندی، کلاس B نماینده یک خودروی جمع و جور شهری با توان موتور به نسبت پایین است.

3x1 image scale



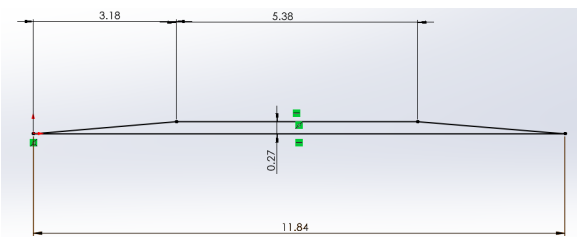
شکل ۲. خودروی مورد استفاده در شبیه سازی

راننده در هر یک مسیرهای مذکور اقدام به ترمزگیری نموده و سپس داده های مربوطه توسط GPS ثبت و ضبط می شود. برای انجام آزمون های تجربی از یک دستگاه خودروی پراید ۱۱۱ مجهز به سیستم ترمز ضدقفل مطابق شکل ۶ استفاده شده است. آزمون های تجربی در ۳ مسیر انجام شده اند که عبارتند از: مسیر صاف، مسیر با پروفیل دوزنقه ای و مسیر با نوار لرزاننده. برای انجام آزمون تجربی، سرعت اولیه خودرو به ۶۰ کیلومتر بر ساعت رسیده و سپس ترمزگیری در مسیرهای مذکور انجام شده است. برای اینکه خطاهای گوناگون انعکاس کمتری در نتایج تجربی داشته باشد، هر آزمون ۴ مرتبه انجام شده است و از نتایج میانگین گیری شده است.

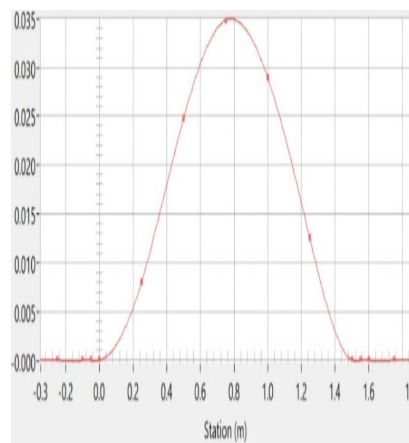
سرعت گیر باعث افزایش حدود ۱۸ درصدی تصادفات و در تقاطعات دارای سرعت کاه حدود ۱۱ درصد افزایش تصادفات می شود. همچنین استفاده از کاهنده های سرعت با ابعاد غیر استاندارد موجب افزایش ۵ تا ۱۲ درصدی تصادفات شده است. هرچند که نتایج پژوهش های پیشین عموماً تأیید کننده تأثیرات مثبت کاهنده های سرعت و نوارهای لرزاننده می باشد، با این وجود نکته ای که کمتر به آن پرداخته شده است عملکرد دینامیکی خودرو هنگام عبور از این موانع می باشد. زیرا که هنگام عبور از ناهمواری های مسیر، چرخ و بدنه خودرو به ارتعاش درآمده و تماس تایر با زمین نیز دچار تغییرات نوسانی می شود (نصیری و همکاران، ۲۰۱۵). در نتیجه این تغییرات، نیروی ترمزی ایجاد شده در محل تماس تایر و زمین نیز کاهش یافته و منجر به تضعیف عملکرد ترمزی خودرو می شود. این موضوع ریشه و اساس یافته های برخی از مطالعات پیشین مبنی بر احتمال افزایش بروز تصادفات در صورت استفاده از کاهنده های سرعت با ابعاد غیر استاندارد است. بنابراین مطالعه عملکرد ترمزی خودرو هنگام عبور از کاهنده های سرعت و نوارهای لرزاننده موضوعی مهم به نظر می رسد که در مطالعات قبلی به آن پرداخته نشده است.

همچنین برای شبیه سازی ۴ پروفیل مسیر انتخاب شد که عبارتند از مسیر صاف، مسیر با پروفیل دوزنقه ای، مسیر با پروفیل نیم سینوسی، و مسیر با پروفیل نوار لرزاننده. پروفیل دوزنقه ای مطابق شکل ۳، دارای طول کلی ۱۱/۸۴ متر و ارتفاع ۰/۲۷ متر است. ابعاد پروفیل کاهنده سرعت نیم سینوسی در شکل ۴ نمایش داده شده است.

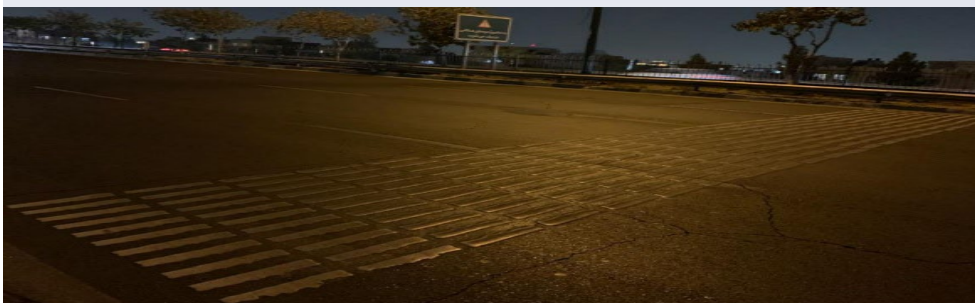
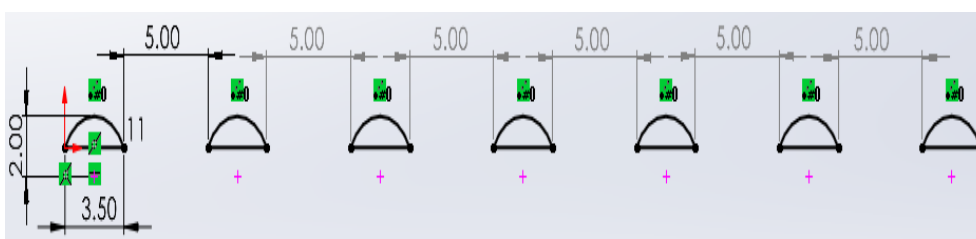
در شکل ۵ نیز نوار لرزاننده مشاهده می شود که طول آن برابر با ۱/۲۳ متر، طول هر برجستگی ۳/۵ سانتی متر با ارتفاع ۲ سانتی متر می باشد و فاصله بین دو برجستگی نیز ۵ سانتی متر می باشد. شرایط آزمون به این صورت تعریف شده است که خودرو با سرعت اولیه ۶۰ کیلومتر بر ساعت حرکت نموده و



شکل ۳. پروفیل دوزنقه‌ای



شکل ۴. پروفیل نیم‌سینوسی



شکل ۵. پروفیل نوار لرزاننده



شکل ۶. خودروی مورد استفاده در تست‌های تجربی

۳- نتایج شبیه سازی

پارامترهای مورد بررسی در این آزمون‌ها عبارتند از: مسافت ترمزی، سرعت طولی لحظه‌ای خودرو، شتاب ترمزی لحظه‌ای، لغزش طولی چرخ‌ها و نیروی عمودی چرخ‌های خودرو. مسافت ترمزی خودرو یکی از پارامترهای مهم در بررسی عملکرد ترمزی خودرو است که در کنار تحلیل سرعت و شتاب لحظه‌ای می‌توانند رفتار دینامیکی خودرو در فرآیند ترمزگیری را بیان کنند. همچنین نیروی عمودی چرخ‌ها بیانگر چسبندگی خودرو به مسیر بوده و بررسی آن از دیدگاه کنترل‌پذیری خودرو حایز اهمیت است (سینا و همکاران، ۲۰۱۸). البته که یکی از اهداف طراحی و بکارگیری سیستم تعلیق، کمینه کردن تغییر شکل دینامیکی تایر و در نتیجه افزایش پایداری و استقرارپذیری خودرو است، اما با این حال در ناهمواری‌های مسیر نیروی عمودی تایر دستخوش نوسانات ناگزیری می‌شود که این نوسانات کنترل‌پذیری خودرو را تحت تأثیر قرار می‌دهد (سینا و همکاران، ۲۰۲۱). لغزش طولی تایر نیز پارامتری است که می‌تواند قفل شدن چرخ‌ها و عدم فرمان‌پذیری خودرو را نمایان سازد و طبق تعریف می‌توان از رابطه (۱) برای محاسبه لغزش تایر استفاده نمود (سینا و همکاران، ۲۰۲۰).

$$\lambda = \frac{r\omega - v_x}{v_x} \quad (1)$$

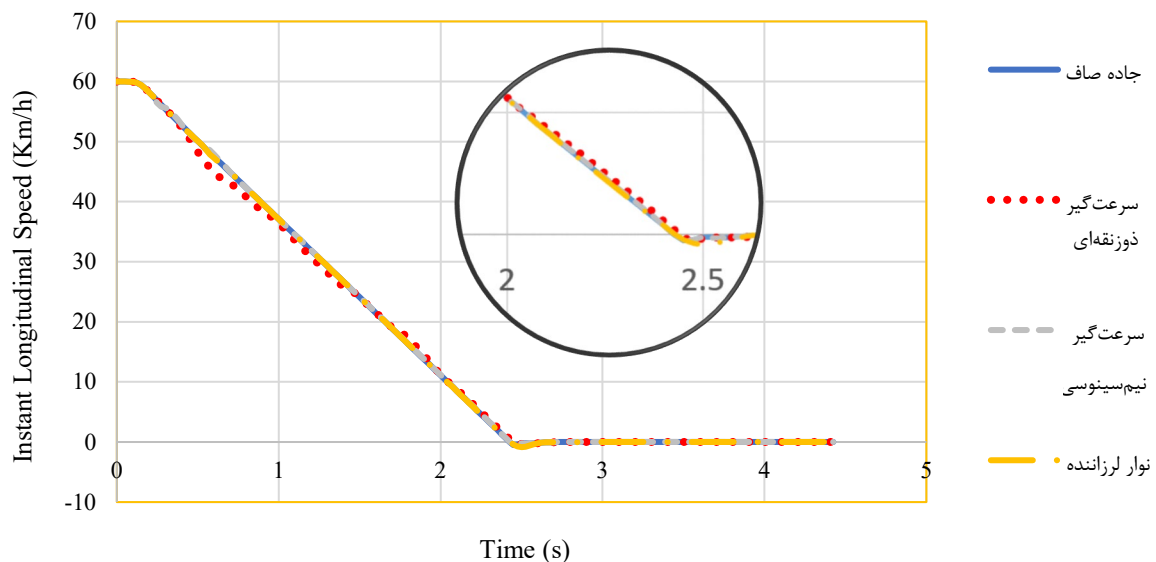
در رابطه (۱)، λ لغزش طولی، r شعاع دینامیکی تایر، ω سرعت زاویه‌ای چرخ و v_x نیز سرعت طولی خودرو است. در نمودارهای ارائه شده خطوط آبی رنگ مربوط به مسیر مسطح، نقطه چین قرمز رنگ مربوط به پروفیل دوزنقه‌ای، خط چین خاکستری مربوط به پروفیل نیم سینوسی و خط نقطه زرد رنگ نیز مربوط به نوار لرزاننده هستند.

۳-۱- خودروی فاقد سیستم ترمز ضدقفل

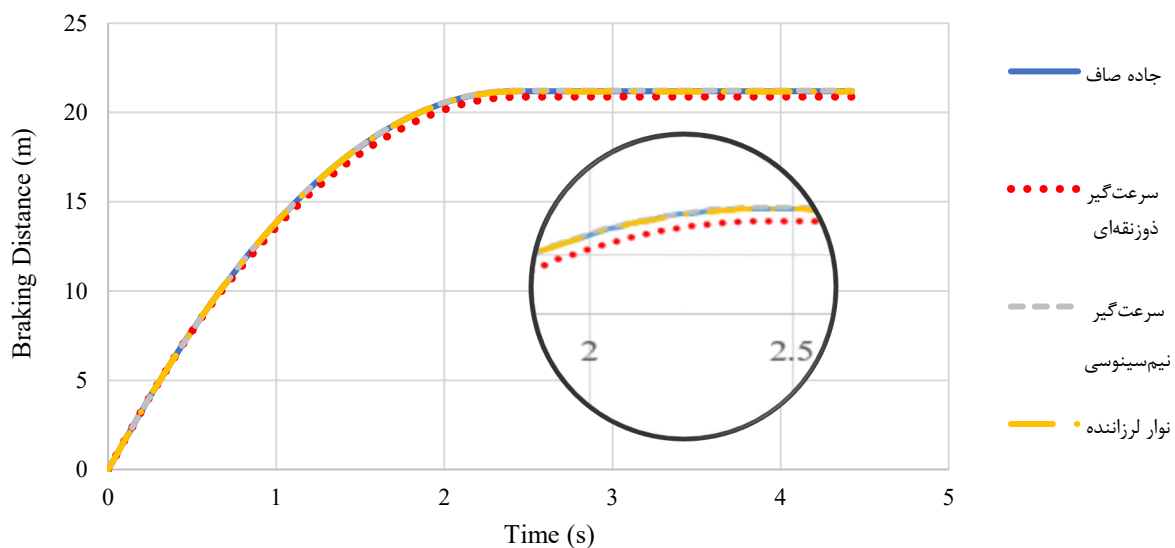
سرعت لحظه‌ای خودرو در شکل ۷ نمایش داده شده است و همانگونه که مشاهده می‌شود تغییرات سرعت طولی خودرو در شرایط مسیر صاف، مسیر دارای پروفیل نیم سینوسی و مسیر نوار لرزاننده نسبت به یکدیگر بسیار کم است و خطوط آنها بر روی یکدیگر تا حدودی منطبق شده‌اند، اما در مسیر با پروفیل دوزنقه‌ای شکل در حدود مدت زمان ۰.۵ الی ۱ ثانیه شیب خط بیشتر شده و سرعت خودرو سریع‌تر کم می‌شود. شکل ۸ مربوط به مسافت ترمزگیری می‌باشد. در این شکل نیز مشاهده می‌شود که مسافت ترمزگیری مسیر پروفیل دوزنقه‌ای

شکل کمتر می‌باشد و مسافت ترمزگیری در سایر موارد دیگر بسیار نزدیک به هم می‌باشند. شکل ۹ شتاب ترمزی لحظه‌ای خودرو را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در تصویر ملاحظه می‌شود، در هر سه پروفیل نیم سینوسی، دوزنقه‌ای و نوار لرزاننده نوسانات شتاب ترمزی زیاد است و این یک نکته منفی به حساب می‌آید، زیرا هر مقدار که نوسانات شتاب کمتر باشد، هم تسلط راننده بر کنترل‌پذیری خودرو بیشتر است و هم راحتی راننده و سرنشین بیشتر حفظ می‌شود. دلیل اصلی نوسانات شتاب ترمزی، به نوسانات شدید نیروی عمودی چرخ‌ها برمی‌گردد که نمودار آن در شکل ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده است. نوسانات شدید در نیروی عمودی چرخ‌ها، علاوه بر آنکه عملکرد ترمزی را تضعیف می‌کند، فرمان‌پذیری و مانورپذیری خودرو را نیز تضعیف می‌کند، زیرا میزان چسبندگی تایرها به زمین بیانگر میزان نیرویی است که در ترمزگیری و فرمان‌گیری به کمک راننده می‌آید و در صورتی که چسبندگی تایر و زمین کمتر شود، نیروی ترمزی و فرمان‌گیری هم کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۱۱، نیروی عمودی چرخ عقب در پروفیل نیم سینوسی و دوزنقه‌ای به صفر هم رسیده است که این موضوع بسیار خطرناک بوده و از دست دادن تماس تایر با زمین و معلق بودن چرخ در هوا را نشان می‌دهد که در این لحظه، تایر هیچ نیرویی را تحمل نکرده و خودرو از کنترل خارج است. البته که زمان معلق بودن چرخ در پروفیل نیم سینوسی و دوزنقه‌ای به مراتب بیشتر از نوار لرزاننده است و از این جهت نوار لرزاننده تأثیر منفی کمتری در ناپایداری خودرو دارد.

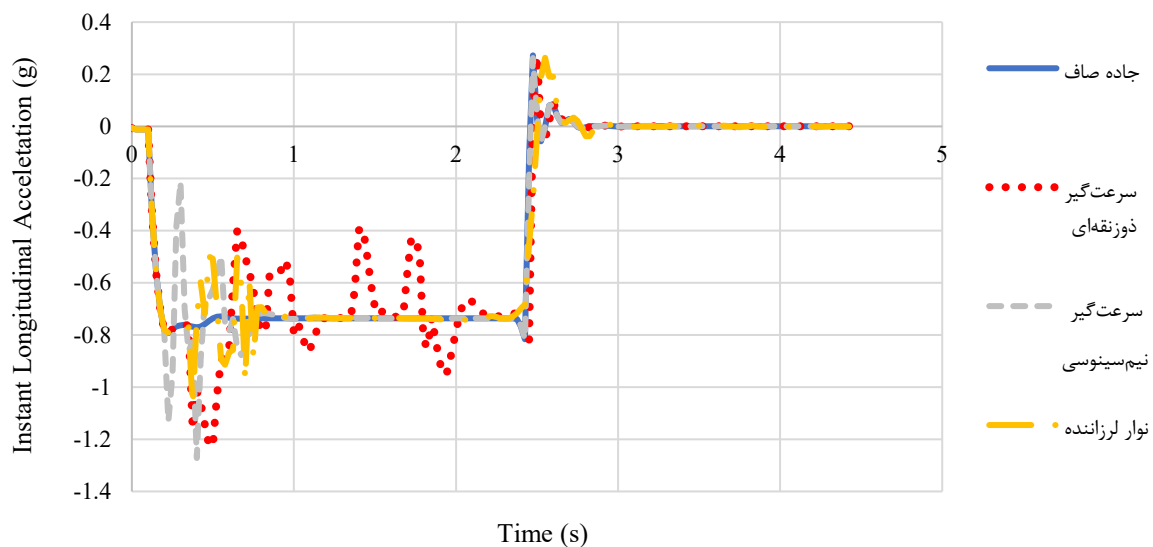
شکل ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نمودار لغزش چرخ جلو و عقب را نمایش می‌دهد. در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که لغزش تایر در همه مسیرها پس از مدت زمان کوتاهی به عدد ۱- می‌رسد که مطابق با رابطه (۱) بیانگر قفل شدن تایرهای جلو است. نوسانی که در زمان ۰.۵ ثانیه مشاهده می‌شود ناشی از افزایش لحظه‌ای نیروی عمودی چرخ‌های جلو هنگام عبور از لبه ابتدایی سرعت‌کاه دوزنقه‌ای است. نوسانات شدیدی که در انتهای زمان ترمزگیری مشاهده می‌شود، عملاً تأثیری در دینامیک ترمزی نداشته و به دلیل میل کردن سرعت خطی به صفر، لغزش تایر عدد بزرگی را بصورت لحظه‌ای نمایش می‌دهد. در شکل ۱۳ نیز مشاهده می‌شود که در پروفیل نیم سینوسی و دوزنقه که دارای نوسانات زیاد نیروی عمودی بوده‌اند، نوسانات لغزش تایر نیز قابل توجه و شدید است.



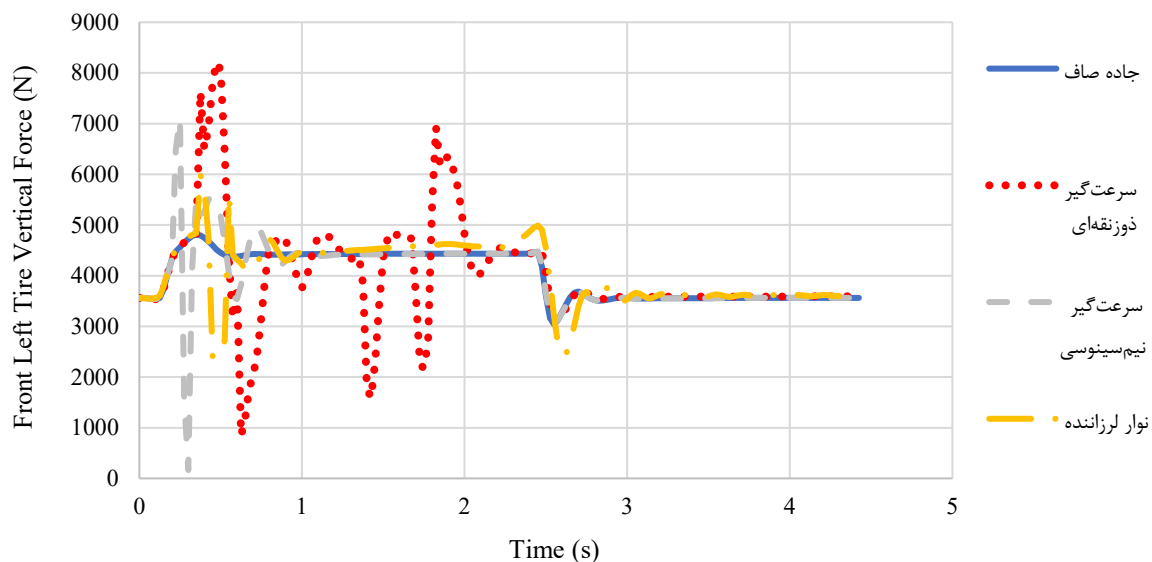
شکل ۷. نمودار سرعت لحظه‌ای خودروی فاقد ABS



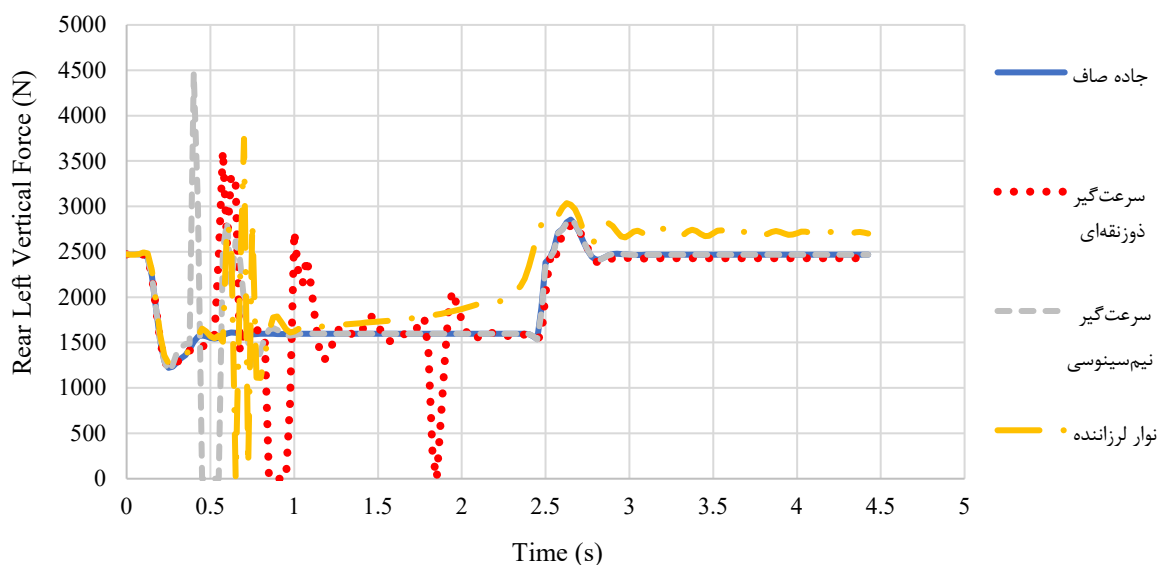
شکل ۸. نمودار مسافت ترمزی خودروی فاقد ABS



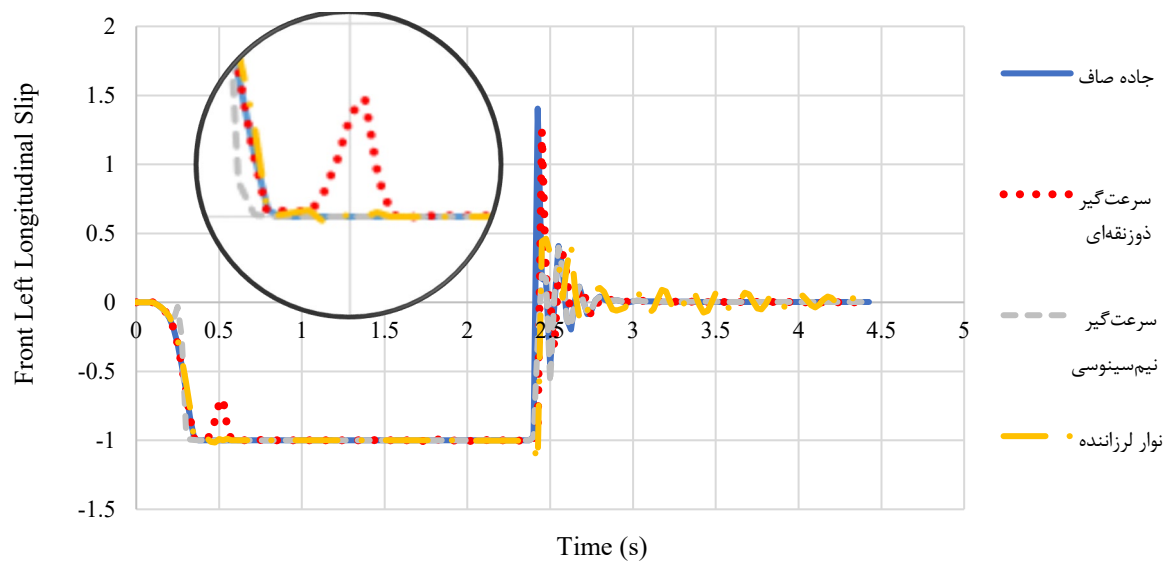
شکل ۹. نمودار شتاب ترمزی لحظه‌ای خودروی فاقد ABS



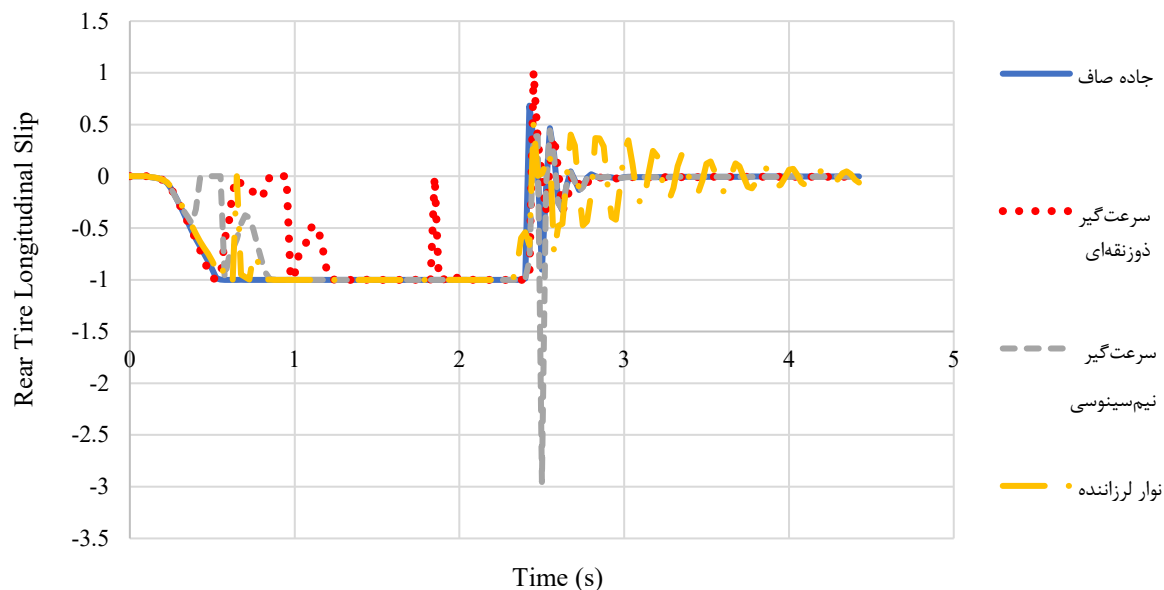
شکل ۱۰. نمودار نیروی عمودی چرخ جلوی خودروی فاقد ABS



شکل ۱۱. نمودار نیروی عمودی چرخ عقب خودروی فاقد ABS



شکل ۱۲. نمودار لغزش چرخ جلوی خودروی فاقد ABS



شکل ۱۳. نمودار لغزش چرخ عقب خودروی فاقد ABS

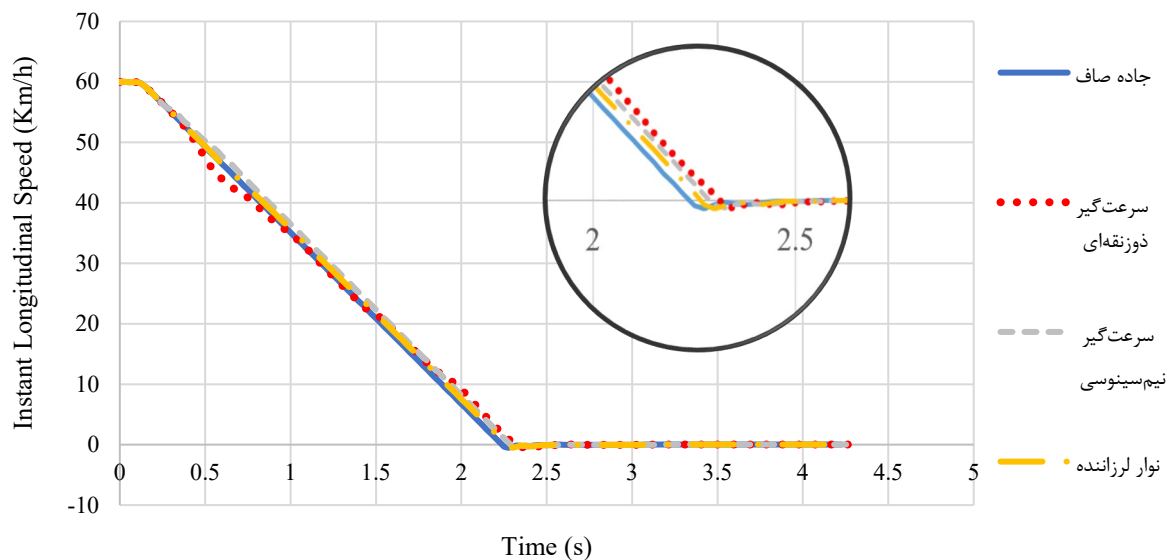
۳-۲- خودروی مجهز به سیستم ترمز ضد قفل

در مقام مقایسه چسبندگی تایر به زمین، مشاهده می‌شود که چرخ جلو هنگام عبور از پروفیل نیم‌سینوسی برای لحظه کوتاهی از زمین بلند می‌شود که یک نکته منفی به حساب می‌آید. در مورد چرخ عقب هم معلق شدن چرخ در پروفیل نیم‌سینوسی و دوزنقه‌ای رخ داده است که با توجه به زمان قابل توجه آن، می‌توان اینگونه بیان نمود که این دو پروفیل از دیدگاه پایداری خودرو اصلاً مناسب نیستند.

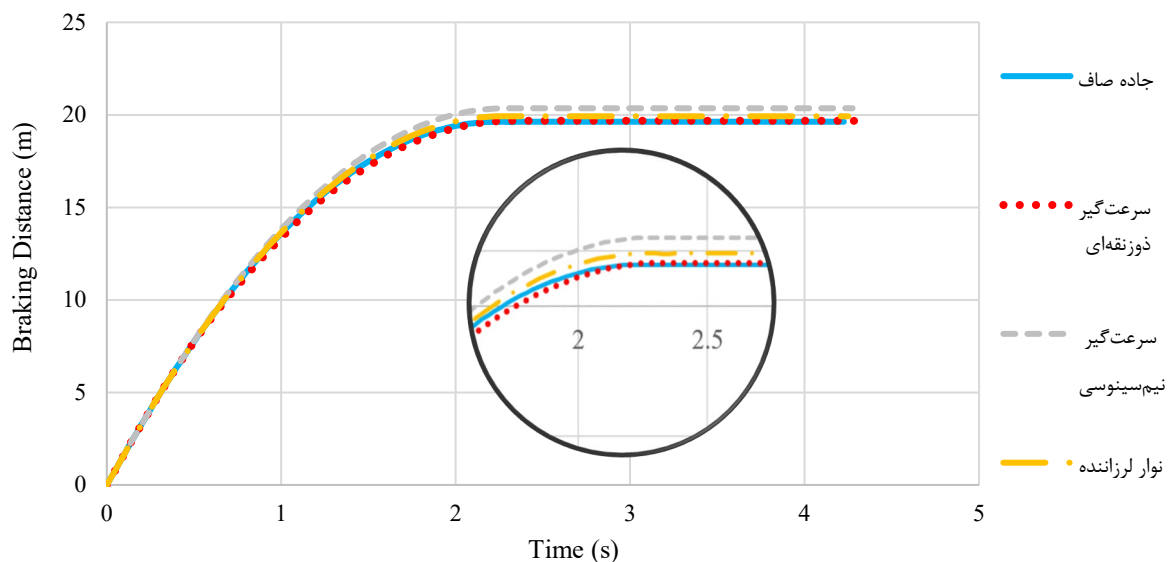
در شکل ۱۹ و ۲۰ به ترتیب لغزش چرخ جلو و عقب نمایش داده شده است. بر خلاف خودروی فاقد سیستم ترمز ضد قفل که لغزش به مقدار ۱- می‌رسد و چرخ قفل می‌شود، در خودروی مجهز به سیستم ABS لغزش چرخ‌ها تحت کنترل درآمده و در محدوده ۰/۲ نوسان می‌کند. همچنین افزایش دامنه نوسان در انتهای ترمزگیری به دلیل میل کردن سرعت خودرو به صفر است و از نظر عملکردی مسئله‌ساز نیست.

در شکل ۲۰ نیز لغزش چرخ عقب به شیوه مشابه تحت کنترل درآمده است. نکته‌ای که جلب توجه می‌کند قفل شدن لحظه‌ای چرخ عقب در پروفیل دوزنقه‌ای و نیم‌سینوسی است که این عامل ناشی از بلند شدن چرخ از زمین و از دست دادن تماس تایر با زمین است که این عامل خارج از کنترل سیستم ABS است.

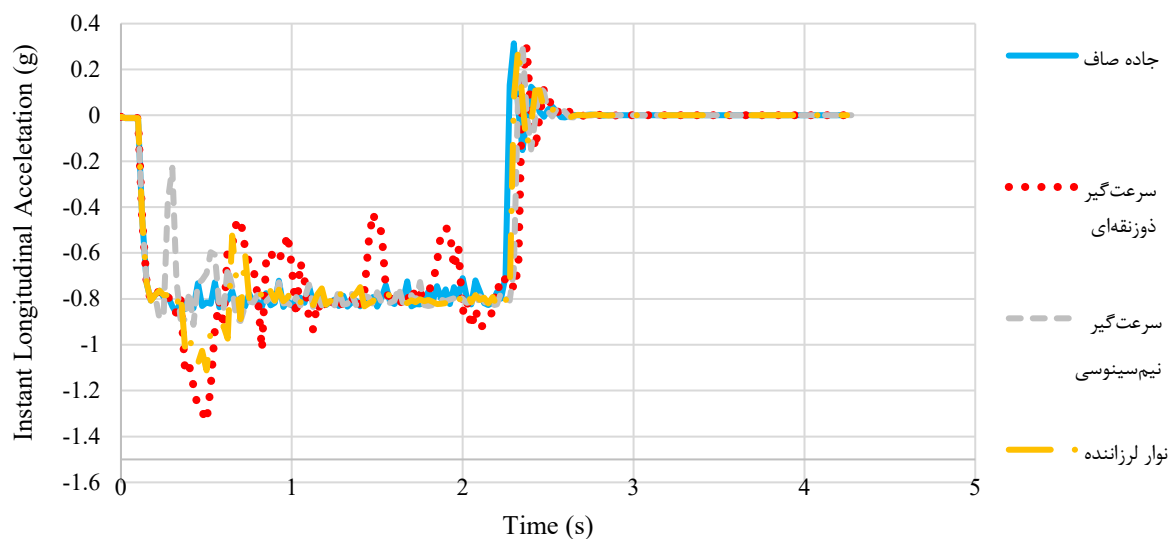
در شکل ۱۴ سرعت لحظه‌ای خودرو هنگام ترمزگیری در ۴ پروفیل مختلف نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که تقریباً همه نمودارها بر هم منطبق هستند. برای مقایسه بهتر، تصویر بزرگنمایی شده نشان می‌دهد که زمان توقف خودرو در پروفیل‌های گوناگون به میزان چند دهم ثانیه اختلاف دارد. شکل ۱۵ نیز نمودار مسافت ترمزی را نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود که پروفیل نیم‌سینوسی بیشترین مسافت ترمزی را داشته است. پروفیل دوزنقه‌ای نیز مسافت ترمزی تقریباً برابر با مسیر صاف دارد که از این نظر مطلوب است. میزان اختلاف بین کمترین و بیشترین مسافت ترمزی که به ترتیب در مسیر صاف و پروفیل نیم‌سینوسی حاصل شده است، حدود ۰/۴ متر است. در شکل ۱۶ شتاب ترمزی لحظه‌ای نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در مسیر صاف نیز شتاب ترمزی با نوسانات کوچکی همراه است که علت آن فعال شدن سیستم ضد قفل برای کنترل لغزش طولی چرخ‌ها می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که نوسانات شتاب ترمزی در پروفیل دوزنقه‌ای بیشتر و ادامه‌دارتر است. دلیل این موضوع نوسانات نیروی عمودی چرخ‌ها است که نمودار آن در شکل ۱۷ و ۱۸ نمایش داده شده است. ملاحظه می‌گردد که نوسانات نیروی عمودی چرخ جلو و عقب در پروفیل دوزنقه‌ای چشمگیر بوده و همین عامل سبب نوسانات شتاب ترمزی لحظه‌ای می‌شود. همچنین



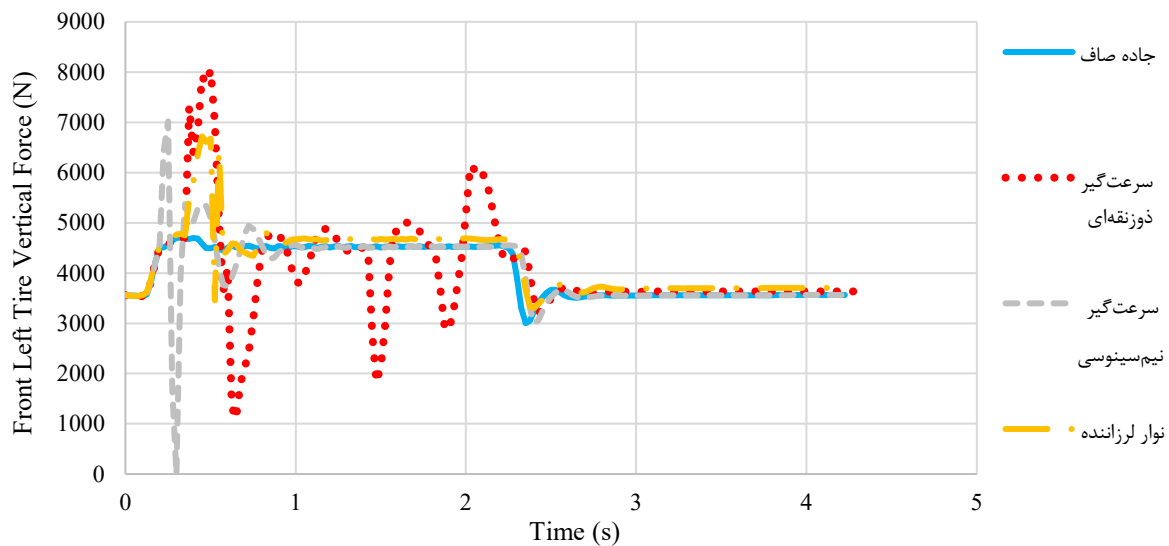
شکل ۱۴. نمودار سرعت لحظه‌ای خودروی ABS



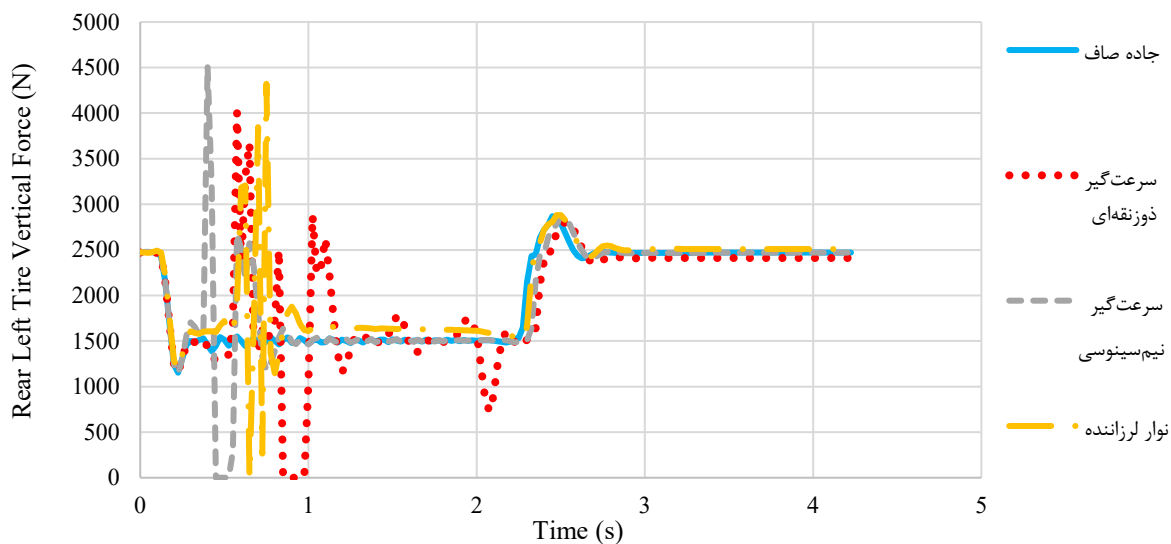
شکل ۱۵. نمودار مسافت ترمزی خودروی ABS



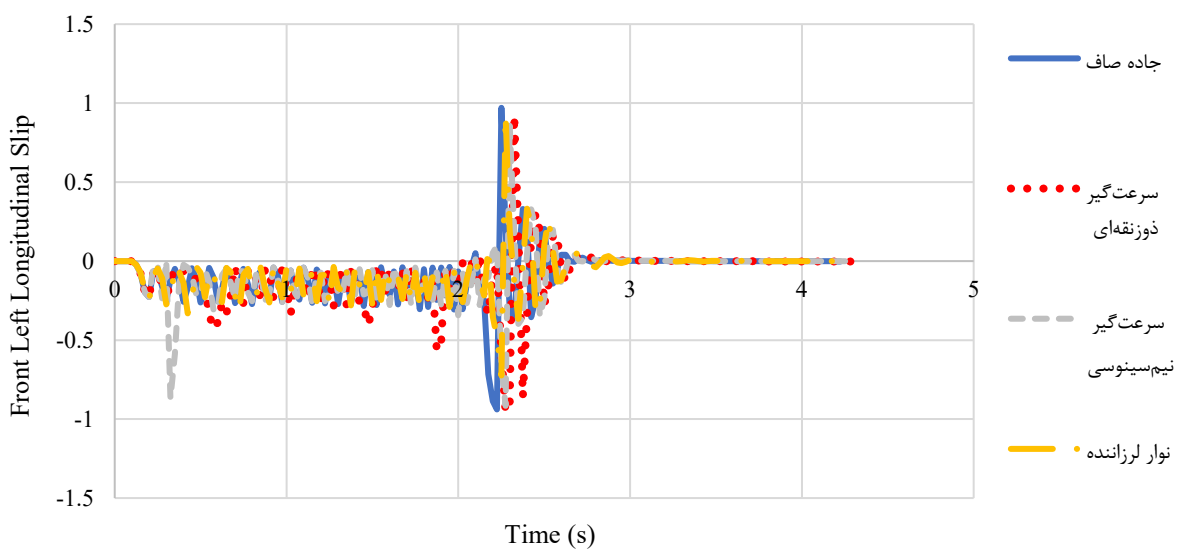
شکل ۱۶. نمودار شتاب ترمزی لحظه‌ای خودروی ABS



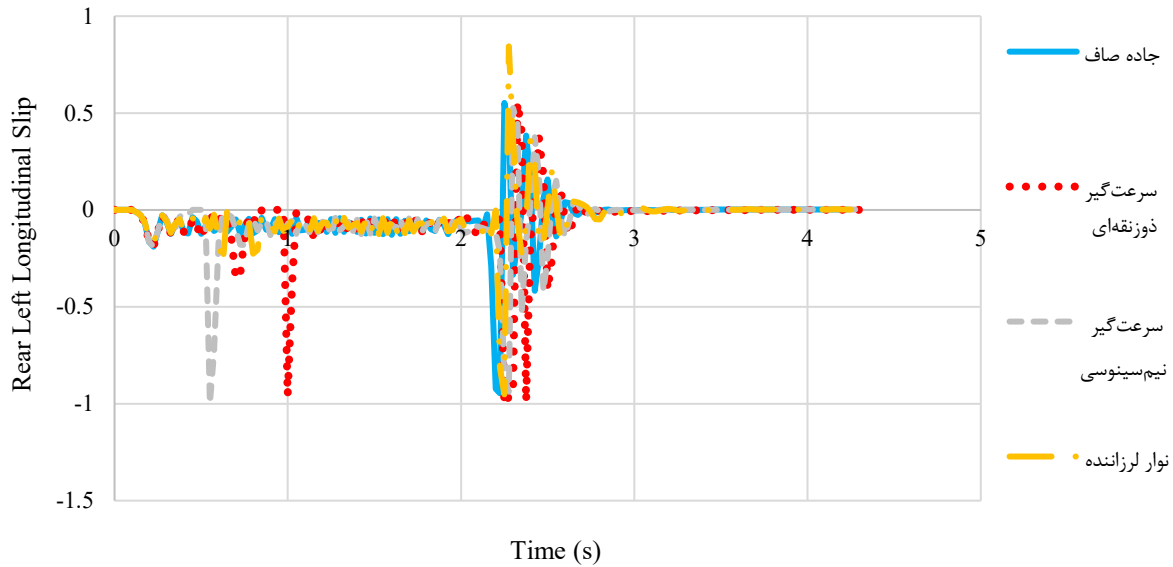
شکل ۱۷. نمودار نیروی عمودی چرخ جلوی خودروی ABS



شکل ۱۸. نمودار نیروی عمودی چرخ عقب خودروی ABS



شکل ۱۹. نمودار لغزش چرخ جلوی خودروی ABS



شکل ۲۰. نمودار لغزش چرخ عقب خودروی ABS

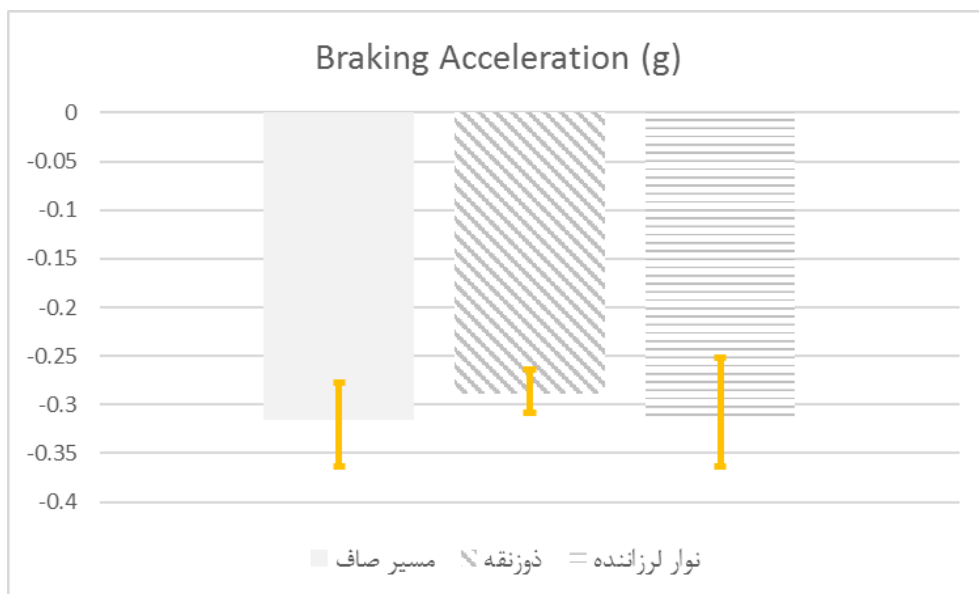
۴- نتایج تجربی

شتاب ترمزی در آزمون‌های تجربی انجام گرفته از رابطه (۲) محاسبه شده است.

$$a_x = \frac{v^2 - v_0^2}{2\Delta x} \quad (2)$$

در رابطه بالا a_x شتاب ترمزی، v سرعت نهایی، v_0 سرعت اولیه و Δx نیز مسافت ترمزی است. نتایج شتاب ترمزی در شکل ۲۱ نمایش داده شده است. در این نمودار میانگین شتاب ترمزی در آزمون‌ها به همراه نمودار میله‌ای خطا نمایش داده

شده است. نمودار میله‌ای خطا بیانگر بیشینه و کمینه داده‌ها است. بدین صورت که در مسیر صاف میانگین شتاب ترمزی برابر با $-0.315g$ است، بیشینه و کمینه آن نیز به ترتیب برابر با $-0.364g$ و $-0.277g$ است که توسط نمودار میله‌ای خطا نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که هم میانگین شتاب ترمزی و هم بیشینه شتاب ترمزی در مسیر صاف و نوار لرزاننده تقریباً با هم برابر است و بیشینه و میانگین شتاب ترمزی در مسیر دارای پروفیل دوزنقه‌ای به شکل محسوسی کمتر است.



شکل ۲۱. نمودار شتاب ترمزی تجربی

۵- نتیجه گیری

مجهر و فاقد ترمز ضدقفل از کاهنده سرعت با پروفیل نیم سینوسی و دوزنقه‌ای قابل توجه بوده و این مسئله پایداری و کنترل پذیری خودرو را دچار مخاطره می‌کند. از این نظر، لرزاننده سرعت اثر سوء کمتری دارد و تقریباً تماس تایر با زمین قطع نمی‌شود. آزمون‌های تجربی انجام پذیرفته نیز نشان می‌دهد که شتاب ترمزی در مسیر صاف و مسیر دارای نوار لرزاننده تا حد زیادی نزدیک به هم می‌باشند و تفاوت قابل توجهی در عملکرد ترمزی خودرو بوجود نمی‌آید.

در این پژوهش رفتار دینامیکی خودرو هنگام ترمزگیری در مسیرهای دارای کاهنده سرعت و نوار لرزاننده مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در صورت عبور از کاهنده‌های سرعت و نوار لرزاننده، مسافت ترمزی به میزان کمی در حدود ۲٪ افزایش می‌یابد. اما تغییرات شدید نیروی عمودی وارد بر چرخ‌ها و از دست دادن تماس تایر با زمین نکته‌ای است که اهمیت بالاتری دارد و لزوم طراحی و پیاده‌سازی پروفیل‌های کاهنده سرعت با ابعاد استاندارد را تبیین می‌کند. زمان معلق بودن چرخ در هوا هنگام عبور خودروی

۶- مراجع

- Mohammed, A. A., Ambak, K., Mosa, A. M., & Syamsunur, D. (2019). A review of traffic accidents and related practices worldwide. *The Open Transportation Journal*, 13(1).
- Nasiri, S., Sina, N., & Eslami, A. (2015). Multi-objective optimisation of McPherson strut suspension mechanism kinematics using random search method. *Indian journal of science and technology*, 8(16), 1-10. doi:10.17485/ijst/2015/v8i16/62548
- Rahimi, A. M., Moradi Madadloo, A., & Mazaheri, A. (2018). Assess the Impacts of Access Road on Intercity Routes Performance. *Journal of Transportation Research*, 15(3), 15-31. [In Persian]
- Road and Transport Safety Organization. (2025). *Accidents Statistics 1403*. Retrieved December 6, 2025, from <https://transportsafety.ir> [In Persian]
- Sina, N., Esfahanian, V., Hairi Yazdi, M. R., & Azadi, S. (2018). Introducing the modified tire power loss and resistant force regarding longitudinal slip. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 11(06-11-02-0014), 167-176. doi:10.4271/06-11-02-0014
- Sina, N., Hairi Yazdi, M. R., & Esfahanian, V. (2020). A novel method to improve vehicle energy efficiency: Minimization of tire power loss. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(4), 1153-1166. doi:10.1177/0954407019861241
- Ahmed, S. K., Mohammed, M. G., Abdulqadir, S. O., El-Kader, R. G. A., El-Shall, N. A., Chandran, D., Rehman, M. E. U., & Dhama, K. (2023). Road traffic accidental injuries and deaths: A neglected global health issue. *Health science reports*, 6(5), e1240.
- Choubdar, A., Farajollahi, A., & Ameli, A. (2020). Evaluation of the speed bumps utilization at junctions and U-turns on accidents and vehicles' speed and offering prediction model of the speed bumps effects on the accidents reduction. *Journal of transportation research (Tehran)*, 17(2), 67-80. [In Persian]
- Haghshenas, M., Ehsanpoor, I., & Ramazanzadeh, S. (2024). The effect of speed reducer on traffic calming in main and secondary arterial roads. *Journal of Transportation Research*, 21(1), 135-150. doi: 10.22034/tri.2022.352098.3063 [In Persian]
- Kadivar, A. (2024, December 8). *Analysis of Accident Deaths in Iran*. D-Mag. <https://d-mag.ir/p16056/> [In Persian]
- Khan, M., Abdel-Rahim, A., & Williams, C. J. (2015). Potential crash reduction benefits of shoulder rumble strips in two-lane rural highways. *Accident Analysis & Prevention*, 75, 35-42.
- Miles, J. D., Pratt, M. P., & Carlson, P. J. (2006). Evaluation of erratic maneuvers associated with installation of rumble strips. *Transportation research record*, 1973(1), 73-79.

- Sina, N., Hairi Yazdi, M. R., & Esfahanian, V. (2021). Modified dynamic model for longitudinal motion of ground vehicles. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 18(1), 8550-8562. **doi:10.15282/ijame.18.1.2021.14.0649**

- Yang, L., Zhou, H., Zhu, L., & Qu, H. (2016). Operational effects of transverse rumble strips on approaches to high-speed intersections. *Transportation research record*, 2602(1), 78-87.

- Sina, N., Hayeri Yazdi, M. R., & Esfahanian, V. (2021). Investigation of vehicle energy demand considering the modified tire power loss. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(6), 11-11.

doi:10.22060/MEJ.2021.18333.6802

Simulation and Experimental Study of Braking Performance of a Passenger Car in Routes with Speed Bumps and Rumble Strips

Naser Sina, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Hossein Rahimi Asiabaraki, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

Erfan Eslami, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

Mehdi Siasarnejad, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

E-mail: sina@ut.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

One of the challenging issues in transportation is the transportation safety. Considering that transportation safety arises from the three factors including vehicle, road, and driver, the origin of transportation safety is rooted in various sciences, such as automotive engineering. In this paper, the dynamic behavior of a passenger vehicle during braking on routes equipped with speed bumps and rumble strips has been investigated. Speed bumps and rumble strips are used to inform the drivers of the possibility of an imminent hazard. Nevertheless, examining the vehicle performance during braking on speed bumps and rumble strips is an issue that has not yet been studied, and this paper aims to address this issue. For this purpose, a vehicle braking scenario with an initial speed of 60 km/h was defined on a flat route and on routes with rumble strip profiles and semi-sinusoidal and trapezoidal speed bumps to be simulated using CarSim software package. In addition, a similar scenario was defined for experimental testing in order to evaluate the braking performance of the vehicle in actual conditions. The results show that the vehicle stopping time and braking distance exhibit slight changes compared to the flat route. However, variations in the vertical force applied to the wheels in the semi-sinusoidal and trapezoidal profiles are considerable, and there is even a risk of contact loss between tire and ground and therefore loss of vehicle controllability, and the importance of these issues is not less than that of braking distance and vehicle stopping time.

Keywords: Vehicle, Braking Dynamics, Road Holding, Speed Bump, Rumble Strip