

بررسی تأثیر مشخصات شانه راه بر پارامترهای دینامیکی مؤثر بر واژگونی خودرو در فصل مشترک شانه - سواره رو قوس‌های افقی

مقاله پژوهشی

سجاد جوادی*، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین

طوسی، تهران، ایران

ایمان فرزین، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

علی عبدی کردانی، دانشیار، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین، قزوین، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sajadjavadi2012@gmail.com

دریافت: ۹۹/۰۵/۲۷ - پذیرش: ۹۹/۱۰/۰۵

صفحه ۶۲-۵۱

چکیده

حجم گسترده‌ای از واژگونی خودروها در قوس‌های افقی رخ می‌دهد. با طراحی مناسب شانه راه در قوس‌ها، می‌توان این امر را تا حد زیادی کاهش داد. در این پژوهش به منظور یافتن تأثیر ویژگی‌های شانه (شامل عرض، شیب عرضی و جنس سطح) در قوس‌های افقی بر نرخ زاویه واژگونی و شتاب جانبی وارد بر خودرو از شبیه‌سازی دینامیکی استفاده می‌شود. همچنین علاوه بر متغیرهای یادشده، ویژگی‌های دینامیکی خودرو و رفتار راننده نیز واکاوی شده است. به منظور نیل به اهداف این پژوهش، با استفاده از ۳۳۴ سناریوی متفاوت، دو مدل رگرسیون برای توضیح نرخ زاویه واژگونی و شتاب جانبی وارد بر خودرو با متغیرهای مستقل ویژگی‌های شانه، دینامیک خودرو (سرعت وسیله نقلیه) و رفتار راننده (زاویه خروج از سواره‌رو نسبت به خط میانی سواره‌رو بر حسب درجه) برای انواع خودروها (سواری مسافری، سواری شاسی‌بلند و کامیون) پرداخت گردیده است. این تحقیق شامل ۱- شبیه‌سازی سه‌بعدی دینامیکی خودرو ۲- تحلیل ارتباط ویژگی‌های شانه راه، سرعت خودرو و زاویه خروج از سواره‌رو نسبت به خط میانی با نرخ زاویه واژگونی و شتاب جانبی وارد بر خودرو برای هر سه نوع خودرو ۳- ارائه مدل رگرسیونی برای بیان ارتباط بین متغیرها است. نتایج حاکی از آن است که ویژگی‌های شانه بر ایمنی از نظر نرخ زاویه واژگونی و شتاب جانبی وارد بر خودرو تأثیر زیادی دارد. این تأثیر برای هر نوع خودرو متفاوت هست و با توجه به ویژگی‌های دینامیکی و ساختاری خودرو سنجیده می‌شود. نتایج این تحقیق می‌تواند مورد استفاده مهندسیین راه به منظور طراحی راهی ایمن قرار گیرد. همچنین در بازرسی و ممیزی ایمنی راه به منظور ارتقای سطح ایمنی راه‌ها کاربرد دارد.

واژه‌های کلیدی: دینامیک خودرو، شانه راه، شتاب جانبی وارد بر خودرو، قوس افقی، نرخ زاویه واژگونی خودرو

۱-مقدمه

واژگونی (تغییر در زاویه بین محور عمود بر شاسی خودرو و محور عمود بر جاده در واحد زمان) و شتاب جانبی (اختلاف شتاب گریز از مرکز و شتاب جانب مرکز) به میزان بسیار زیاد بر واژگونی خودرو تأثیرگذار است. در این تحقیق به منظور کاهش پتانسیل واژگونی خودروهای سواری مسافری، سواری شاسی‌بلند و کامیون، تحقیقاتی به وسیله شبیه‌سازی دینامیکی خودرو صورت می‌گیرد. با توجه به هندسه راه و

از مکان‌های بحرانی در راه‌ها می‌توان به قوس‌های افقی اشاره کرد. این قسمت از راه مستعد انواع تصادفات و واژگونی خودروها است. شانه راه از عواملی است که می‌توان با طراحی اصولی عرض، شیب عرضی و جنس آن بر افزایش ایمنی تأثیر زیادی گذاشت. در کشورهای مختلف شانه راه با عرض‌ها و جنس‌های متفاوت (شنی، آسفالتی یا بتنی) طراحی و اجرا می‌شوند. پارامترهای نرخ تغییر زاویه

ترافیک روزانه مهم‌ترین عوامل در شدت و میزان تصادفات هستند (Karlaftis and Tarko, 1998).

نولاند و اه به تحلیل ارتباط بین هندسه راه و ساختار روسازی با ایمنی راه پرداخته‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نرخ تصادفات فوتی با پهن شدن هر خط راه افزایش می‌یابد؛ اما وقتی شانه خارجی راه پهن‌تر می‌شود، تعداد تصادفات کاهش می‌یابد. اگرچه اثر عرض شانه داخلی راه در این مطالعه از نظر آماری دارای اهمیت معناداری نبود (Noland and Oh, 2004). در تحقیق (NCHRP-633) اثر افزایش عرض شانه و تأثیر آن در کاهش تصادفات در راه‌های دوخطه، چند خطه، جداشده و نشده، روستایی و بین‌شهری بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش عرض شانه به دلیل فراهم آوردن فرصت برای جبران اشتباهات رانندگی، قدرت مانور راننده افزایش و در نتیجه شدت تصادفات کاهش می‌یابد. محققان در تحقیقات خود به این نکته پی بردند که راه‌هایی با شانه‌های بدون رویه با عرض بین ۱۰ تا ۱۲ فوت کمترین نرخ تصادف را دارند (NCHRP-633, 2009).

۲-۲- عوامل تأثیرگذار بر واژگونی خودرو

یو و همکاران مطالعاتی روی سرخوردگی و واژگونی خودرو به‌عنوان دو عامل مهم افزایش شدت تصادفات انجام دادند. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که واژگونی تنها در صورت برخورد با شیئی یا خودرویی دیگر، به عنوان بزرگترین نگرانی سرنشینان خودرو برشمرده می‌شود. هرچند به واژگونی به‌عنوان عمده‌ترین عامل نگرانی برای رانندگان کامیون در قوس‌های افقی اشاره شده است (You et al., 2012). دلایل اصلی اغلب واژگونی‌ها را می‌توان خطاهای رانندگی، حمل بار بیش‌ازحد مجاز، شرایط جوی نامساعد و طراحی نامناسب راه دانست. در این بین طراحی نامناسب مسیر به‌خصوص طراحی و اجرای غلط میزان بربلندی، مهم‌ترین عامل در واژگونی‌ها تلقی می‌شود. بسیاری از تصادفات ناشی از واژگونی به دلیل حمل بیش‌ازحد مجاز بار است. این امر با افزایش ارتفاع مرکز ثقل خودرو و در نتیجه کاهش پایداری وسیله نقلیه به واژگونی منجر می‌شود (Huang and Fan, 2010). با توجه به مطالعات پیشین، دو عامل مهم در جهت بررسی پایداری خودرو، پارامترهای نرخ زاویه واژگونی و

همچنین رفتار راننده برای شبیه‌سازی، دو حالت برای قرارگیری خودرو در نظر گرفته شده است.

۱-خودرو در قوس افقی به‌گونه‌ای از سواره‌رو خارج شده که دو چرخ بیرونی خودرو روی شانه شنی و دو چرخ داخلی روی سواره‌رو آسفالتی قرار می‌گیرد.

۲-خودرو در قوس افقی به‌گونه‌ای از سواره‌رو خارج شده که دو چرخ بیرونی خودرو روی شانه آسفالتی و دو چرخ داخلی روی سواره‌رو آسفالتی قرار می‌گیرد.

در این تحقیق سعی شده است که با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی خودرو بتوان با در نظر گرفتن رفتار راننده و شرایط هندسی راه، تأثیر عرض، شیب عرضی و جنس شانه را به‌صورت کمی در افزایش ایمنی از نظر نرخ زاویه واژگونی و شتاب جانبی وارد بر خودرو بررسی کرد. در ادامه پیشینه تحقیق بر مبنای ویژگی‌های هندسی جاده و به‌خصوص شانه از یک سو و از سوی دیگر عوامل واژگونی خودرو بررسی شده است. سپس روش تحقیق بر اساس شبیه‌سازی و اطلاعات ورودی نرم افزار شبیه‌ساز بررسی شده و در آخر به ارزیابی نتایج و مدلسازی و نتیجه‌گیری از آن پرداخته شده است.

۲- پیشینه تحقیق

هدف از انجام این مطالعه بررسی تأثیر ویژگی‌های شانه راه بر عوامل مؤثر بر واژگونی خودروها در قوس‌های افقی است. در این بخش از تحقیق، ابتدا مطالعات بررسی تأثیر عرض شانه بر شدت و میزان تصادفات بررسی شده و سپس پژوهش‌های موجود در زمینه عوامل تأثیرگذار بر واژگونی خودرو مرور می‌گردد.

۲-۱- تأثیر مشخصات شانه بر شدت و میزان تصادفات

کارلافتیس و تارکو (۱۹۹۸) با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری‌شده از ایالات واشنگتن و مینه سوتا اثر عرض سواره‌رو، شانه راه، خطرپذیری راه و حجم ترافیک را روی تصادفات مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با استفاده از رگرسیون دو جمله‌ای منفی دریافتند که در مسیرهای مستقیم، به ترتیب اهمیت، میانگین ترافیک روزانه، پهنای خط عبور، پهنای شانه راه و میزان حادثه‌پذیری حاشیه راه و در تقاطعات، میانگین

شتاب جانبی وارد بر خودرو است. در ادامه به آن‌ها اشاره شده است.

۲-۲-۱- نرخ زاویه واژگونی

نستی و همکاران بر روی آستانه نرخ زاویه واژگونی مطالعه‌ای انجام دادند. مطالعه آن‌ها بر مبنای نرخ زاویه واژگونی خودرو در شبیه‌سازی رانندگی با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز و مقایسه اعداد آن با اعداد به‌دست‌آمده از حس‌گرهای نصب‌شده بر روی اتومبیل‌های مسابقه رانندگی (جهت یافتن بیشینه مجاز نرخ زاویه واژگونی خودرو) است. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد میزان نرخ زاویه واژگونی قابل‌تحمل خودرو در حالت واقعی بسیار بیشتر از حالت شبیه‌سازی است و خودرو می‌تواند مقدار $6/3$ درجه بر ثانیه را تحمل نماید (Nesti et al., 2012).

عبدی و همکاران در مورد تأثیر شانه راه در واژگونی خودرو با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک خودرو و مقایسه آن با مدل جرم نقطه‌ای، تحقیقاتی صورت داده‌اند. در این تحقیق انواع مختلف وقایع خروج غیرعمدی از مسیر بررسی شد. تحقیقات این مطالعه حاکی از آن دارد که عرض کم شانه و پایین‌افتادگی لبه شانه تأثیر زیادی بر واژگونی خودرو دارد. از نتایج مهم این تحقیق می‌توان به رابطه عددی بین عرض شانه و نرخ زاویه واژگونی خودرو اشاره کرد. به‌طوری که چنانچه عرض شانه از 1 متر به $2/6$ متر افزایش یابد، 2% از نرخ زاویه واژگونی خودروها کاسته می‌شود (Abdi et al., 2015).

۲-۲-۲- شتاب جانبی وارد بر خودرو

در ارتباط با ایمنی وسایل نقلیه و به‌خصوص پایداری آن‌ها در برابر واژگونی، شتاب جانبی وارده حین عبور از قوس افقی از پارامترهای بسیار مهم می‌باشد. در کل دو نوع شتاب جانبی وجود دارد: شتاب گریز از مرکز و شتاب جانبی مرکز؛ شتاب گریز از مرکز شتابی مجازی است که تنها در صورت حرکت در مسیری دایروی ایجاد می‌شود و در خلاف جهت با شتاب جانب مرکز می‌باشد. شتاب جانبی مرکز شتابی است که به دلیل وجود اصطکاک و شیب عرضی و در جهت مقابله با شتاب گریز از مرکز به وجود می‌آید (Bonneson, 2000 و (Awadallah, 2005). اختلاف این دو شتاب

به عنوان شتاب خالص وارد بر خودرو بوده که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. شتاب جانبی وارد بر خودرو (a_y) در قسمت‌های مختلف قوس افقی در راه‌ها از فاکتورهای مهم برای ارزیابی راحتی رانندگان بوده که با توجه به نوع راه اهمیت چند برابری می‌یابد.

در طراحی شعاع مناسب قوس‌های افقی توجه به شتاب جانبی وارد بر خودرو (a_y) بسیار مدنظر قرار گرفته، به‌طوری‌که در طراحی شعاع مناسب در قوس‌های افقی $a_y \leq 1.8m/s^2$ مقداری است که نشان دهنده راحتی کامل می‌باشد. اگر $1.8m/s^2 \leq a_y \leq 3.6m/s^2$ باشد آنگاه مقادیر شتاب جانبی در بازه شتاب جانبی قابل قبول قرار می‌گیرد و اگر $a_y \geq 5m/s^2$ که بیش از تحمل انسان می‌باشد که طراحی قوس افقی بر مبنای این شتاب جانبی مجاز نمی‌باشد (Xu et al., 2015). بررسی‌های میدانی در قوس‌های افقی و جمع‌آوری اطلاعات در مورد سرعت و سرفاصله وسایل نقلیه، شعاع قوس، نرخ بریلندی و شیب نشان داده است که یک سیاست کلی در مورد طرح هندسی راه‌ها نمی‌تواند کارآ باشد. علت این امر تفاوت در آستانه تحمل شتاب جانبی توسط رانندگان مختلف است (Bonneson, 2000). در تحقیقی که در سال ۲۰۰۱ توسط ریموند و همکاران با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز خودرو صورت گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد ارتباط بین شتاب جانبی و سرعت در قوس به‌صورت سهمی است و با افزایش سرعت در قوس به‌شدت از میزان شتاب جانبی کاسته می‌شود (Reymond et al., 2001). تا قبل از سال ۲۰۰۴ مقادیر اصطکاک جانبی مورد استفاده در طراحی شعاع قوس و نرخ بریلندی براساس مطالعات انجام‌شده در دهه ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ صورت می‌پذیرفت. با این وجود رفتار و ویژگی‌های رانندگان و مسافران در طی ۵۰ سال تغییرات عمده‌ای داشته است. بر این اساس مطالعه‌ای روی مردان و زنان با سن‌های مختلف در قوس‌های افقی صورت پذیرفت و نظر آن‌ها در مورد شتاب جانبی وارد بر خودرو بررسی شد. نتایج بیانگر این بود که بیشتر افراد در شتاب‌های جانبی ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد احساس ناراضی می‌کنند (Tan, 2005) با توجه به مرور ادبیات صورت گرفته، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه بررسی تأثیر مشخصات شانه راه بر واژگونی خودروها با استفاده از مدل سه‌بعدی صورت نپذیرفته است. با توجه به خلأ تحقیقاتی ذکرشده، این پژوهش به این موضوع می‌پردازد.

۳- روش تحقیق

در کتاب سبز آشتو و طرح هندسی راه‌های ایران (نشریه شماره ۴۱۵) برای بررسی نیروها و به دست آوردن روابط مختلف طراحی راه از مدل جرم نقطه‌ای استفاده شده است. در این مدل، خودرو به‌عنوان یک نقطه فرض می‌شود و در قوس‌های متفاوت با توجه به شیب‌های طولی، عرضی و سرعت طرح‌های مختلف، قابلیت ارائه نیروهای ایجادشده بر خودرو (در نقطه مرکز جرم) را دارد. در موضوع ارزیابی ایمنی از نظر نیروهای وارد بر خودرو، از فرض‌های بیان‌شده در این مدل ناچیز در نظر گرفته شدن زوایایی است که محورهای عرضی و طولی خودرو با سطح راه تشکیل می‌دهند (Brown and Brennan, 2014). با توجه به کاستی‌های مدل جرم نقطه‌ای از جمله عدم در نظر گرفتن هندسه خودرو و سیستم تعلیق در وسایل نقلیه مختلف و با پیشرفت فناوری در سال‌های اخیر، از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی دینامیک خودرو برای بررسی روابط مختلف ایمنی کتاب سبز آشتو استفاده شده است. با توجه به گستردگی توانایی شبیه‌سازی سه‌بعدی نرم‌افزارهای کارسیم و تراکسیم و با توجه به در نظر گرفتن خصوصیات دینامیکی خودرو در این تحقیق، تصمیم به استفاده از این نرم‌افزارها گرفته شد. لازم به ذکر است، شرکت‌های خودروسازی بزرگ نظیر بی ام دبلیو و فورد جهت شبیه‌سازی حرکت خودروهای خود از این نرم‌افزارها استفاده می‌کنند. این پژوهش تأثیر پارامترهای دینامیکی خودرو و هندسه راه (به‌خصوص شانه راه) را بر نرخ زاویه واژگونی و شتاب جانبی وارد بر خودروها در قوس‌های افقی بررسی می‌کند. قوس‌های افقی این مطالعه در راه‌های برون‌شهری و انحراف از راه به‌صورت غیر عمد و با زوایای مختلف از سواره رو فرض شده است. سناریوهای شبیه‌سازی این‌گونه است که مقدار شعاع قوس و برخی از پارامترها از قبیل عرض شانه، سرعت طرح، شیب عرضی شانه راه، مشخصات خودرو، زاویه خروج از سواره‌رو، شرایط روسازی و سناریو حرکت خودرو در راه به‌عنوان داده ورودی در شبیه‌سازی وارد می‌شود. سپس حرکت خودرو قبل از شروع قوس افقی و درون قوس افقی و در هنگام خروج از سواره‌رو در قوس افقی شبیه‌سازی می‌شود. به‌گونه‌ای که نرخ زاویه واژگونی و شتاب جانبی وارد بر خودرو در نقاط مختلف از طریق این شبیه‌سازی به دست می‌آید. در ادامه اطلاعات ورودی به فرآیند شبیه‌سازی در این مطالعه به‌تفصیل بیان می‌شود.

۳-۱- هندسه راه

راه شامل دو بخش کلی سواره‌رو و شانه راه می‌شود. در پژوهش جاری فقط یک خط (خط بیرونی) از راه دو خطه در قوس افقی بررسی و مقدار عرض سواره‌رو و مقدار بریلندی به ترتیب ۳/۶ متر و ۶٪ (با توجه به مقدار معمول آن در قوس‌های افقی) در نظر گرفته شده است. همچنین سرعت خودرو برابر ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت، میزان شیب عرضی شانه برابر ۲٪- (خلاف شیب عرضی سواره‌رو) و ۶٪ (موافق شیب عرضی سواره‌رو)، جنس شانه به‌صورت سنی و آسفالتی انتخاب گردید. عرض شانه برابر ۱/۲، ۱/۸ و ۲/۴ متر در نظر گرفته شده است که مقادیر معمول عرض شانه در قوس‌ها در نشریه شماره ۴۱۵ و آیین‌نامه آشتو کتاب سبز است. با توجه به حداکثر بریلندی سواره‌رو و سرعت‌های در نظر گرفته برای شبیه‌سازی، از کتاب سبز آشتو جهت حداقل شعاع قوس افقی از شعاع ۲۵۲ متر برای آزمایش‌های با سرعت طرح ۸۰ کیلومتر بر ساعت، از شعاع ۴۳۷ متر برای سناریوهایی با سرعت طرح ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت و از شعاع ۷۵۶ متر برای سناریوهای با سرعت طرح ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت، استفاده گردیده است (جدول (۱)، (AASHTO (The Green book), 2011 و (۱۳۹۱، آیین‌نامه ۴۱۵)).

۳-۲- نوع مشخصات خودرو

با توجه به وجود خودروهای مختلفی که در بزرگراه تردد می‌کنند؛ سه نوع خودرو سواری مسافری، سواری شاسی‌بلند و کامیون در نظر گرفته شده است. نمونه‌های خودرو که در این شبیه‌سازی استفاده شده است، پیش‌تر در شبیه‌سازی [NCHRP- 774] در سال ۲۰۱۴ نیز مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات هندسی خودروهای مورد بررسی در نرم‌افزار شبیه‌سازی پژوهش جاری در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱. مؤلفه‌های هندسه راه در نظر گرفته شده به‌منظور

شبیه‌سازی در پژوهش جاری

مشخصه راه (واحد)	مقادیر	مشخصه راه (واحد)	مقادیر
عرض سواره‌رو (متر)	۳/۶	جنس شانه	سنی و آسفالتی
بریلندی (%)	۶	عرض شانه (متر)	۱/۸، ۲/۴، ۱/۲
شیب عرضی شانه (%)	۲-، +۶	شعاع قوس (متر)	۴۳۷، ۲۵۲، ۷۵۶

جدول ۲. مشخصات هندسی وسایل نقلیه مورد استفاده

در شبیه‌سازی پژوهش جاری

نوع خودرو	وزن خودرو (کیلوگرم)	عرض خودرو (متر)	فاصله از مرکز ثقل تا سپر جلو (متر)	ارتفاع مرکز ثقل (متر)
سواری مسافری	۱۶۵۳	۱/۸۸	۱/۴۰۲	۰/۵۹۰
سواری شاسی‌بلند	۱۵۹۲	۱/۸۷۵	۱/۱۸۰	۰/۷۱۹
کامیون	۴۴۵۵	۲/۴۳۸	۱/۱۱	۱/۱۷۵

ضریب اصطکاک بیشینه برای شانه شنی برابر یک فرض شده است (Muller et al., 2003).

۳-۵- سناریو حرکت خودرو در راه

با توجه به متغیرهای سرعت، جنس شانه، عرض و شیب عرضی شانه، نوع خودرو و زاویه خروج از سواره‌رو، تعداد ۳۲۴ سناریو موردنیاز به دست می‌آید. درحالی‌که نحوه حرکت وسیله نقلیه در نرم‌افزار شبیه‌ساز و قرار گرفتن چرخ روی شانه در قوس‌ها به دو شکل زیر صورت می‌گیرد.

حالت اول: قرارگیری چرخ‌های داخلی خودرو در قوس افقی روی سواره‌رو آسفالتی و قرارگیری چرخ‌های دیگر روی شانه شنی (شکل (۱)). این حالت در واقع نشان‌دهنده آن است که خودرو به صورت غیر عمد از سواره‌رو خارج شده و چرخ‌های خارجی خودرو روی شانه و چرخ‌های داخلی روی سواره‌رو قرار می‌گیرد. در مرحله بعد خودرو در جهت برگشت به سواره‌رو اقدام به فرمانگیری و برگشت به سواره‌رو از شانه می‌کند.

تعداد سناریوهای این حالت برابر ۱۶۲ است ((۳ نوع خودرو)) * (۳ سرعت) * (۳ عرض شانه) * (۳ زاویه خروج از سواره‌رو) * (۲ شیب عرضی شانه) = ۱۶۲ سناریو

حالت دوم: قرارگیری چرخ‌های داخلی خودرو در قوس افقی روی سواره‌رو آسفالتی و قرارگیری چرخ‌های دیگر روی شانه آسفالتی

تعداد سناریوهای حالت دوم نیز برابر ۱۶۲ است ((۳ نوع خودرو)) * (۳ سرعت) * (۳ عرض شانه) * (۳ زاویه خروج از سواره‌رو) * (۲ شیب عرضی شانه) = ۱۶۲ سناریو.

۴- بحث و نتایج

در مدل جرم نقطه‌ای، خودرو به شکل یک نقطه فرض می‌شود که تمام جرم خودرو در مرکز ثقل خودرو قرار دارد و همه نیروهای خارجی به آن نقطه وارد می‌شوند. درحالی‌که در مدل سه‌بعدی استفاده‌شده با نرم‌افزار شبیه‌ساز دینامیک خودرو نحوه اعمال نیروها به چرخ‌ها و توزیع آن‌ها نشان داده می‌شود. نحوه استخراج اطلاعات بدین شرح است که ابتدا مکانی از مسیر که در آن نقطه حداکثر نیروی جانبی بر خودرو واردشده را با استفاده از نمودار یافته و سپس در

۳-۳- زاویه خروج از سواره‌رو

این تحقیق در واقع وضعیتی از خودروها را شبیه‌سازی می‌کند که در آن وضعیت، خودرو در قوس‌های افقی با زوایای مختلف نسبت به محور وسط راه از سواره‌رو خارج می‌شود. درواقع در این تحقیق رفتار راننده با توجه به نحوه انحراف خودرو در قوس‌های افقی و زاویه خروج از راه و همچنین سرعت خودرو نشان داده می‌شود. بر اساس مراجع مختلف زاویه‌های خروج از راه (NCHRP-492, ۷/۵, 2003) (Road side Design guide, ۲۵ و ۱۵ درجه) در نظر گرفته شده است. شروع فرآیند خروج از راه در قسمتی از قوس افقی صورت می‌گیرد که در آن نقطه بیشترین نیروی جانبی بر خودرو وارد می‌شود.

۳-۴- شرایط روسازی

در این تحقیق شرایط روسازی با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک جانبی بیشینه بین لاستیک خودرو و سطح راه، با توجه به نوع روسازی (آسفالتی و شنی) و شرایط آب و هوایی (خشک) سنجیده می‌شود.

در این شبیه‌سازی میزان ضریب اصطکاک بیشینه در حالت خشک آسفالت ۰/۹ (Ghandour et al., 2010) و

بین میانگین نرخ زاویه واژگونی و همچنین میانگین شتاب جانبی وارد بر خودروهای مورد بررسی با تغییر در پارامترهای مؤثر بر آنها (سرعت خودرو، عرض شانه، شیب عرضی شانه، جنس شانه و زاویه خروج از سواره رو) بررسی شده است.

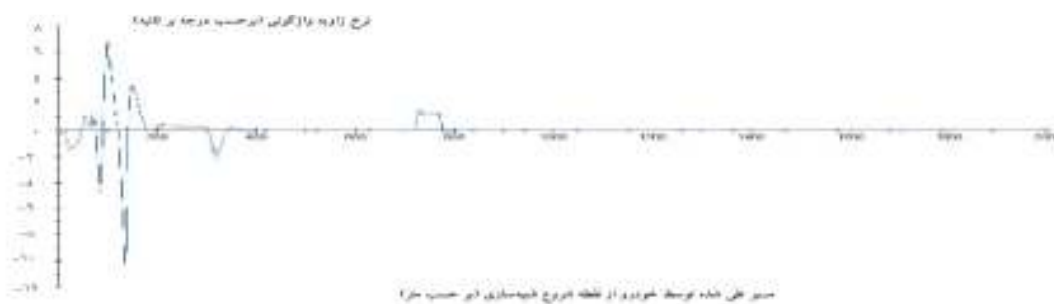
همین مکان اطلاعات نرخ زاویه واژگونی قرائت می‌گردد. نمونه‌ای از نمودارهای تغییرات نیروی جانبی و نرخ زاویه واژگونی در مسیر برای خودرو سواری شاسی‌بلند در نرم‌افزار شبیه‌سازی دینامیک خودرو در شکل (۲) نشان داده شده است. در ادامه این تحقیق و در جدول‌های (۳) و (۴) ارتباط



شکل ۱. شبیه‌سازی خروج از قوس و فرارگیری چرخ‌های خارجی خودرو روی شانه در قوس افقی در پژوهش جاری (الف- نمای کلی) و (ب- نمای هوایی)



(الف) - نمودار نیروهای جانبی وارد بر چرخ‌های خودرو سواری شاسی‌بلند در نقاط مختلف مسیر شبیه‌سازی شده



(ب) - نمودار نرخ زاویه واژگونی خودرو سواری شاسی‌بلند در نقاط مختلف مسیر شبیه‌سازی

شکل ۲. نمونه‌ای از نحوه خواندن برداشت اطلاعات خروجی در نرم‌افزار شبیه‌سازی در پژوهش جاری

جدول ۳. میانگین نرخ زاویه واژگونی خودرو تحت سناریوهای

مختلف در پژوهش جاری برحسب درجه بر ثانیه

شانه شنی				
مشخصات راه و وسیله	مقادیر	سواری مسافری	سواری شاسی بلند	کامیون
شیب شانه عرضی (درصد)	- ۲	۲/۳۳	۰/۲۶	۱/۹۴
	+ ۶	۳/۰۲	۱/۲۵	۱/۵۰
عرض شانه (متر)	۱/۲	۲/۸۵	۰/۹۳	۱/۵۹
	۱/۸	۳/۰۰	۰/۸۵	۱/۴۹
سرعت و وسیله نقلیه (کیلومتر بر ساعت)	۲/۴	۲/۱۷	۰/۴۵	۲/۰۸
	۸۰	۱/۲۱	۰/۵۴	۰/۷۲
	۱۰۰	۲/۹۵	۰/۸۵	۲/۱۴
زاویه خروج از سوارهو نسبت به سطح جانبی سوارهو (درجه)	۱۲۰	۳/۸۶	۰/۸۶	۲/۳۰
	۷/۵	۱/۴۵	۰/۳۸	۰/۶۲
	۱۵	۲/۷۳	۱/۰۰	۲/۰۱
۲۵	۳/۸۳	۰/۸۵	۲/۵۳	
شانه آسفالتی				
مشخصات راه و وسیله	مقادیر	سواری مسافری	سواری شاسی بلند	کامیون
شیب شانه عرضی (درصد)	- ۲	۲/۴۱	۰/۱۴	۱/۹۱
	+ ۶	۲/۷۷	۱/۲۵	۱/۵۵
عرض شانه (متر)	۱/۲	۳/۱۲	۰/۸۶	۱/۷۶
	۱/۸	۲/۵۸	۰/۸۲	۱/۴۲
سرعت و وسیله نقلیه (کیلومتر بر ساعت)	۲/۴	۲/۰۸	۰/۲۰	۲/۰۲
	۸۰	۱/۱۴	۰/۲۱	۰/۸۷
	۱۰۰	۲/۹۳	۰/۷۵	۲/۰۳
زاویه خروج از سوارهو نسبت به سطح جانبی سوارهو (درجه)	۱۲۰	۳/۷۱	۰/۹۲	۲/۳۰
	۷/۵	۱/۲۸	۰/۴۰	۰/۶۱
	۱۵	۳/۰۵	۰/۶۶	۲/۰۵
۲۵	۳/۴۴	۰/۸۲	۲/۵۴	

سواری مسافری با سرعت ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت در حالتی که لاستیک‌های بیرونی خودرو روی شانه شنی قرار دارد، است. در واقع با افزایش سرعت وسیله نقلیه، نرخ واژگونی خودرو نیز (حتی در شانه‌های عریض‌تر) افزایش می‌یابد. در تحلیل جدول (۳) می‌توان به نقش بسیار تأثیرگذار سیستم تعلیق خودرو (فنر و میراگر) و همچنین هندسه خودرو (عرض خودرو و فاصله مرکز جرم تا سطح راه) در تغییرات نرخ زاویه واژگونی اشاره کرد؛ به طوری که خودرو سواری شاسی بلند به دلیل سیستم تعلیق قوی کمترین تغییر نرخ زاویه واژگونی (با توجه به افزایش سرعت) را دارد.

از طرفی خودرو سواری مسافری اگرچه با تغییر سرعت بیشترین تغییر در نرخ زاویه واژگونی را دارد؛ اما به دلیل اینکه نسبت عرض خودرو به ارتفاع مرکز جرم خودرو از سطح راه زیاد است، واژگون نشده و تحمل بسیار بالایی در مقابل واژگونی دارد.

با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول (۴) بیشترین مقدار میانگین شتاب جانبی زمانی اتفاق می‌افتد که خودروی سواری مسافری در شانه شنی با عرض ۲/۴ متر حرکت کند. به طور کلی برای یک نوع خاص وسیله نقلیه، بیشترین شتاب جانبی به خودرو زمانی اتفاق می‌افتد که لاستیک‌های بیرونی خودرو روی شانه شنی و لاستیک‌های درونی روی سوارهو قرار داشته باشند. می‌توان بیان نمود، پتانسیل واژگونی خودروها با افزایش زاویه خروج از سوارهو بیشتر می‌شود. همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، شبیه‌سازی برای شانه‌های با عرض ۱/۲، ۱/۸ و ۲/۴ متر صورت پذیرفته است. نتایج حاکی از آن است که حتی زمانی که در شبیه‌سازی شتاب جانبی وارد بر خودرو از آستانه راحتی افراد فراتر می‌رود، هیچ‌یک از وسایل نقلیه واژگون نمی‌شوند. به عبارتی سرعت و زاویه خروج از جاده (به‌ویژه زاویه خروج از جاده که رابطه مستقیم با فرمانگیری دارد) بر شتاب جانبی وارد بر خودرو تأثیرگذار است. براساس نتایج مشاهده شده در جدول (۴) با افزایش ارتفاع مرکز ثقل خودرو از سطح جاده، شتاب جانبی مورد نیاز برای واژگونی خودرو کاهش می‌یابد. بنابراین شتاب جانبی قابل تحمل خودروی سواری مسافری از خودروهای شاسی‌بلند و کامیون بیشتر است.

براساس اطلاعات جدول (۳) ویژگی‌های دینامیکی خودرو مانند سرعت و زاویه خروج از جاده (به‌ویژه زاویه خروج از جاده که رابطه مستقیم با فرمانگیری دارد)، بر نرخ زاویه واژگونی تأثیر بسزایی دارد. هیچ‌یک از وسایل تحت شرایط مختلف و تغییر در نرخ زاویه واژگونی، واژگون نشده‌اند. با توجه به این جدول، بیشینه نرخ واژگونی مربوط به خودروی

است. در جدول (۵) متغیرهای مورد استفاده به منظور مدل‌سازی معرفی گردیده است.

در جدول (۶) نتایج حاصل از پرداخت مدل رگرسیون برای نرخ زاویه واژگونی نشان داده شده است. که در این جدول انواع خودروها، متغیرهای شانه راه (شیب عرضی، عرض و جنس)، سرعت خودرو، زاویه خروج از سوارهرو نسبت به خط میانی و شیب عرضی به عنوان متغیر مستقل و نرخ زاویه واژگونی به عنوان متغیر پاسخ مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۵. متغیرهای مورد استفاده در پژوهش جاری

نماد	توصیف	واحد
Width	عرض شانه راه	متر
Speed	سرعت خودرو	کیلومتر بر ساعت
Ena	زاویه خروج از سوارهرو نسبت به خط میانی	درجه
Acce	شتاب جانبی وارد بر خودرو	متر بر مجذور ثانیه
Slope	شیب عرضی شانه راه	درصد
Roll rate	نرخ زاویه واژگونی خودرو	درجه بر ثانیه

جدول ۶. نتایج پرداخت مدل رگرسیون به منظور بررسی تأثیر

متغیرهای گوناگون بر نرخ زاویه واژگونی خودرو

در پژوهش جاری

شانه شنی			
متغیر	سواری مسافری	سواری شاسی بلند	کامیون
Width	-۰/۸۷ (-۲/۳۴)	-۰/۵۵ (-۲/۳۷)	۰/۲۲ (۰/۴۹)
Speed	۰/۰۶۴ (۵/۷۵)	۰/۰۱ (۲/۵۵)	۰/۰۳ (۲/۶۷)
Ena	۰/۱۲ (۴/۶۵)	۰/۰۲ (۱/۴۶)	۰/۱۱ (۳/۵۰)
Slope	۰/۰۵ (۱/۰۰)	۰/۱۲ (۴/۲۸)	-۰/۰۴ (-۰/۸۲)
عدد ثابت	-۴/۲۴ (-۳/۰۷)	-۰/۷۷ (-۰/۰۹)	-۳/۸۶ (-۲/۳۲)
Prob > F	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰

جدول ۴. میانگین شتاب جانبی وارد شده بر خودرو تحت سناریوهای مختلف در پژوهش جاری برحسب نسبتی از شتاب گرانش

شانه شنی				
مشخصات راه و وسیله	مقادیر	سواری مسافری	سواری شاسی بلند	کامیون
شیب عرضی شانه (درصد)	- ۲	۰/۷۶	۰/۷۳	۰/۶۵
	+ ۶	۰/۷۷	۰/۷۵	۰/۶۷
عرض شانه (متر)	۱/۲	۰/۶۸	۰/۶۴	۰/۵۶
	۱/۸	۰/۷۹	۰/۷۶	۰/۶۷
	۲/۴	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۷۴
سرعت وسیله تقابله (کیلومتر بر ساعت)	۸۰	۰/۷۱	۰/۷۰	۰/۶۷
	۱۰۰	۰/۷۹	۰/۷۶	۰/۶۸
	۱۲۰	۰/۸۰	۰/۷۵	۰/۶۲
زاویه خروج از سوارهرو	۷/۵	۰/۶۹	۰/۶۸	۰/۶۲
	۱۵	۰/۷۹	۰/۷۶	۰/۶۸
	۲۵	۰/۸۲	۰/۷۸	۰/۶۷
شانه آسفالتی				
مشخصات راه و وسیله	مقادیر	سواری مسافری	سواری شاسی بلند	کامیون
عرضی شانه	- ۲	۰/۷۵	۰/۷۲	۰/۶۵
	+ ۶	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۶۶
عرض شانه (متر)	۱/۲	۰/۶۷	۰/۶۴	۰/۵۶
	۱/۸	۰/۷۸	۰/۷۵	۰/۶۷
	۲/۴	۰/۸۱	۰/۷۹	۰/۷۴
سرعت وسیله تقابله (کیلومتر بر ساعت)	۸۰	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۶۷
	۱۰۰	۰/۷۷	۰/۷۵	۰/۶۸
	۱۲۰	۰/۷۹	۰/۷۴	۰/۶۱
زاویه خروج از سوارهرو	۷/۵	۰/۶۸	۰/۶۷	۰/۶۲
	۱۵	۰/۷۸	۰/۷۵	۰/۶۸
	۲۵	۰/۸۰	۰/۷۶	۰/۶۶

۵-مدل‌سازی آماری

استفاده از مدل‌سازی در جهت سادگی در نشان دادن ارتباط

بین متغیرهای پاسخ و مستقل در تحقیقات به کار می‌رود.

در این مقاله جهت نشان‌دادن تأثیر متغیرهای مختلف بر نرخ زاویه واژگونی و شتاب جانبی وارد بر خودرو، مدل‌های رگرسیونی با استفاده از نرم‌افزار Stata پرداخت گردیده

همچنین در تمامی مدل‌ها فرضیه صفر آزمون F (معنی دار نبودن تمامی متغیرها به صورت توأمان) رد گردیده است.

جدول ۷. نتایج پرداخت مدل رگرسیون به منظور بررسی تأثیر متغیرهای گوناگون بر شتاب جانبی وارد بر خودرو در پژوهش جاری

شانه شنی			
متغیر	سواری مسافری	سواری شاسی بلند	کامیون
Width	۰/۱۱ (۹/۳۸)	۰/۱۲ (۹/۵۹)	۰/۱۵ (۸/۹۳)
Speed	۰/۰۱ (۵/۸۵)	۰/۰۰۱ (۲/۶۸)	-۰/۰۰۱ (-۲/۹۸)
Ena	۰/۰۱ (۷/۷۴)	۰/۰۱ (۵/۲۰)	۰/۰۰۲ (۲/۰۴)
عدد ثابت	۰/۲۱ (۴/۵۷)	۰/۳۲ (۶/۸۲)	۰/۵۰ (۸/۰۶)
Prob > F	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
R ² Adj	۰/۷۷	۰/۷۰	۰/۶۳
شانه آسفالتی			
Width	۰/۱۳ (۹/۵۷)	۰/۱۴ (۱۰/۳۹)	۰/۱۵ (۹/۱۸)
Speed	۰/۰۰۲ (۵/۸۸)	۰/۰۰۱ (۳/۰۱)	-۰/۰۰۱ (-۲/۶۴)
Ena	۰/۰۱ (۷/۹۶)	۰/۰۱ (۵/۷۹)	۰/۰۰۲ (۲/۱۳)
عدد ثابت	۰/۱۸ (۳/۵۲)	۰/۳ (۵/۸۰)	۰/۵۰ (۷/۹۹)
Prob > F	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
R ² Adj	۰/۷۸	۰/۷۴	۰/۶۴

نتایج وابسته نمودن شتاب جانبی وارد بر خودرو به متغیرهای عرض شانه، سرعت و زاویه خروج از سواره‌رو در جدول (۷) نمایش داده شده است. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد متغیرهای عرض شانه، سرعت خودرو و زاویه خروج از خودرو در تمامی شانه‌ها و انواع سواری معنی دار شده است. لازم به ذکر است متغیر شیب عرضی شانه راه در تمامی مدل‌ها بررسی گردید ولی در هیچ یک از مدل‌ها از لحاظ آماری معنادار نگردید. با توجه به علامت متغیر عرض شانه، با افزایش عرض شانه شتاب جانبی وارد بر خودرو افزایش می‌یابد. این متغیر تأثیر زیادتری بر کامیون نسبت به دیگر

R ² Adj	۰/۵۲	۰/۳۵	۰/۲۴
شانه آسفالتی			
Width	-۰/۵۷ (-۱/۴۶)	-۰/۳۶ (-۱/۵۲)	۰/۴۱ (۰/۸۹)
Speed	۰/۰۶ (۵/۶۹)	۰/۰۱ (۱/۰۹)	۰/۰۴ (۲/۸۸)
Ena	۰/۱۳ (۵/۰۷)	۰/۰۲ (۱/۳۷)	۰/۱۱ (۳/۳۸)
Slope	۰/۰۸ (۱/۸۱)	۰/۱۲ (۴/۲۲)	-۰/۰۶ (-۰/۹۸)
عدد ثابت	-۵/۲۴ (-۳/۶۵)	۰/۰۳ (۰/۰۳)	-۴/۵۴ (-۲/۶۷)
Prob > F	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
R ² Adj	۰/۵۳	۰/۲۷	۰/۲۵

با توجه به جدول ۶ می‌توان گفت با توجه به آماره‌های t حاصل شده، برای خودروی سواری مسافری و کامیون در شانه‌های آسفالتی و خودروهای سواری مسافری در شانه‌های شنی متغیر شیب عرضی شانه از لحاظ آماری معنی دار نشده است. متغیر زاویه خروج از سواره‌رو برای سواری شاسی بلند در شانه‌های آسفالتی و سواری شاسی بلند در شانه‌های شنی از لحاظ آماری بر نرخ زاویه واژگونی تأثیر ندارد. همچنین سرعت در خودروهای سواری شاسی بلند در شانه‌های شنی از لحاظ آماری معنادار نیست. با توجه به نتایج حاصل شده از جدول (۶)، این متغیر تنها برای خودروهای سواری مسافری و شاسی بلند در شانه‌های آسفالتی از لحاظ آماری معنادار گردیده است. با توجه به این مطلب می‌توان ایمنی خودروها را افزایش داد. این متغیر برای سواری شخصی نسبت به سواری شاسی بلند تأثیر بیشتری دارد. به گونه‌ای که با افزایش یک واحدی عرض شانه، ۰/۸۷ از نرخ زاویه واژگونی کم می‌گردد. با افزایش سرعت وسیله نقلیه نرخ زاویه واژگونی افزایش می‌یابد. این متغیر برای سواری شاسی بلند کمترین پیامد را دارد. همچنین در میان متغیرهای مورد بررسی، سرعت وسیله نقلیه کمترین تأثیر را بر نرخ زاویه واژگونی دارد. برای متغیر زاویه خروج از سواره‌رو نسبت به خط میانی نتایج جالبی حاصل شد. این متغیر برای خودروهای سواری شاسی بلند، بدون اثر آماری و برای خودروهای سواری مسافری و کامیون تأثیر افزایشی دارد که در این میان بیشترین تأثیر متعلق به سواری مسافری در حالت قرارگیری بر شانه شنی بوده به طوری که به ازای یک واحد افزایش زاویه خروج از سواره‌رو در این حالت، ۰/۱۳ واحد به شتاب جانبی اضافه می‌شود. ضریب نیکویی برازش تمامی مدل‌ها در محدوده خوبی قرار گرفته است.

شاسی‌بلند ۳/۵۵ درصد و از خودرو کامیون ۱۵/۹ درصد بیشتر است.

۴- تأثیر جنس شانه بر شتاب جانبی وارد بر خودرو به‌عنوان عامل مهمی برای طراحی راه‌ها بر خودروهای مختلف مشخص می‌باشد. به‌طوری‌که نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است. چنانچه چرخ‌های خارجی خودرو روی شانه شنی و چرخ‌های داخلی روی سواره‌رو در قوس‌های افقی قرار بگیرند، میزان شتاب جانبی وارد بر خودروی سواری مسافری ۱/۷ درصد، بر خودروی سواری شاسی‌بلند ۱/۵ درصد و بر کامیون ۰/۴۷ درصد از حالتی که چرخ‌های خارجی روی شانه آسفالتی و چرخ‌های داخلی روی سواره‌رو آسفالتی قرار بگیرند، کمتر است.

۵- با توجه محدودیت‌های مقادیر نرخ زاویه واژگونی و شتاب جانبی وارد بر خودروهای مختلف که کارخانه‌های خودروسازی ارائه می‌دهند و با توجه به فقدان معیارهای مناسب ایمنی از نظر نرخ زاویه واژگونی و شتاب جانبی وارد بر خودرو در نشریه شماره ۴۱۵ و همچنین کتاب سبز آشتو می‌توان از مدل به‌دست‌آمده در آیین‌نامه‌های مختلف استفاده کرده و در نهایت محدودیت‌هایی برای سرعت خودرو و هندسه شانه وضع شود.

۶- نتایج نشان می‌دهد که با خروج بیشتر خودرو از سواره‌رو و قرارگرفتن خودرو بر روی شانه با عرض بیشتر، از واژگونی خودرو جلوگیری می‌شود. این در حالی است که نرخ زاویه واژگونی و شتاب جانبی وارد بر خودرو افزایش یافته است.

پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده در جهت افزایش ایمنی با توجه به شبیه‌سازی دینامیک خودرو به بررسی راه با شیب‌های طولی مختلف پرداخته شود؛ زیرا در این شرایط احتمالاً میزان شتاب جانبی بحرانی‌تری بر خودرو وارد می‌شود. همچنین پیشنهاد می‌شود در جهت ارزیابی واقعیت گرایانه مدل‌های پرداخت‌شده در این پژوهش از داده‌های واژگونی در قوس‌های افقی در مطالعات بعد استفاده گردد.

۷- پی‌نوشت‌ها

- 1.Carsim
- 2.Trucksim

۸- مراجع

- آیین‌نامه طرح هندسی راه‌های ایران"، (۱۳۹۱). "نشریه شماره ۴۱۵.

-AASHTO, (2011), "The Green book American Association of State Highway Transportation Officials", 6th Edition, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, Washington, D.C.

وسایل نقلیه دارد. با افزایش سرعت وسیله، شتاب جانبی وارد بر خودروهای سواری شخصی و شاسی‌بلند افزایش می‌یابد. شتاب جانبی وارد بر خودرو با افزایش سرعت کامیون به صورت کاهشی عمل می‌کند که نشان دهنده میزان قدرت بالای سیستم تعلیق کامیون بوده که در برابر تغییرات شتاب جانبی مقاومت می‌کند. با افزایش زاویه خروج از سواره‌رو، شتاب جانبی وارد بر خودرو افزایش می‌یابد. این متغیر بر شتاب جانبی وارد بر خودروی کامیون کمترین تأثیر را دارد. به‌گونه‌ای که با افزایش یک واحد زاویه خروج از سواره‌رو، ۰/۰۰۲ به شتاب جانبی وارد بر خودرو افزایش می‌یابد. ضریب نیکویی برازش و نتایج حاصل از آزمون F حاکی از خوبی مدل پرداخت‌شده است.

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله نتایج مبتنی بر شبیه‌سازی دینامیکی در حالت‌های مختلف با ۳۲۴ سناریو مختلف حرکت خودرو را بررسی می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که:

۱- تغییر جنس شانه بر روی نرخ زاویه واژگونی خودروهای مختلف تأثیر می‌گذارد. به‌طوری‌که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد اگر در قوس‌های افقی (با توجه به خروج غیر عمد از سواره‌رو) چرخ‌های خارجی خودرو روی شانه شنی و چرخ‌های داخلی روی سواره‌رو قرار بگیرند، میزان نرخ زاویه واژگونی خودرو سواری مسافری ۳ درصد و نرخ زاویه واژگونی خودرو سواری شاسی‌بلند ۱۷ درصد بیشتر از حالتی است که چرخ‌های خارجی روی شانه آسفالتی و چرخ‌های داخلی روی سواره‌رو آسفالتی قرار می‌گیرند. درحالی‌که مقدار نرخ زاویه واژگونی کامیون در صورت قرارگیری چرخ‌های خارجی روی شانه شنی، ۰/۶۵ درصد کمتر از نرخ زاویه واژگونی کامیون در حالت قرارگیری چرخ‌های خارجی بر روی شانه آسفالتی است.

۲- با توجه به ویژگی‌های مختلف هر خودرو میزان نرخ زاویه واژگونی و شتاب جانبی وارد بر آن متفاوت است به‌طوری‌که می‌توان به نقش پارامترهای تأثیرگذار وسیله نقلیه (هندسه و سیستم تعلیق خودرو) در طراحی ایمن شانه راه‌ها اشاره کرد.

۳- نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میانگین نرخ زاویه واژگونی در خودرو سواری مسافری از خودرو سواری شاسی‌بلند ۲۸۰ درصد و از کامیون ۵۲ درصد بیشتر است. همچنین نتایج حاکی از آن است که به‌طور میانگین شتاب جانبی وارد بر خودرو سواری مسافری از خودرو سواری

- realism in driving simulation". Actes INRETS, pp.23-31.
- Noland, R.B., Oh, L., (2004), "The effect of infrastructure and demographic change on traffic related fatalities and crashes: a case study of Illinois county-level data". *J. Accid. Anal. Prev.* 36 (4), pp.525-532.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0001-4575\(03\)00058-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0001-4575(03)00058-7).
- Reymond, G., Kemeny, A., Droulez, J., & Berthoz, A., (2001), "Role of lateral acceleration in curve driving: Driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator". *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 43(3), pp.483-495.
- Stamatiadis, N., Pigman, J., Sacksteder, J., Ruff, W., & Lord, D., (2009), "Impact of shoulder width and median width on safety". NCHRP Report 633. Transportation Research Board, Washington, DC. ISBN: 978-0-309-11782-1.
- Muller, S., Uchanski, M., & Hedrick, K. (2003), "Estimation of the maximum tire-road friction coefficient". *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 125(4), pp.607-617.
- Tan, C. H., (2005), "An investigation of comfortable lateral acceleration on horizontal curves".
- Torbic, D. J., O'Laughlin, M. K., Harwood, D. W., Bauer, K. M., Bokenkroger, C. D., Lucas, L. M. & Varunjikar, T., (2014), "NCHRP report 774: "superelevation criteria for sharp horizontal curves on steep grades". Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.
- Xu, J., Yang, K., Shao, Y., & Lu, G., (2015), "An experimental study on lateral acceleration of cars in different environments in Sichuan", Southwest China. *Discrete Dynamics in Nature and Society*.
- You, K., Sun, L., & Gu, W., (2012), "Reliability-based risk analysis of roadway horizontal curves. *Journal of Transportation Engineering*", 138(8), pp.1071-1081.
- Abdi, Kordani, A. Sabbaghian, M.H. Tavassoli, Kallebasti, B. Attari, A., (2015), "Effect of Shoulder Width and Drop-off on Vehicle Rollover and Shoulder Crossover Using Vehicle Dynamics Simulations", 5th international Symposium on Highway Geometric Design (ISHGD-2015), Vancouver, BC, Canada.
- Awadallah, F., (2005), "Theoretical analysis for horizontal curves based on actual discomfort speed". *Journal of transportation engineering*, 131(11), pp.843-850.
- Bonneseon, J., (2000), "Kinematic approach to horizontal curve transition design". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1737), pp.1-8.
- Bonneseon, J. A., (2000), "Superelevation distribution methods and transition designs". Vol. 439. Transportation Research Board.
- Brown, A., & Brennan, S., (2014), "On the required complexity of vehicle dynamic models for use in simulation-based highway design". *Journal of safety research*, 49, pp.105-106.
- Ghandour, R., Victorino, A., Doumiati, M., & Charara, A., (2010), "Tire/road friction coefficient estimation applied to road safety". In *Control & Automation (MED), 2010 18th Mediterranean Conference on*, pp. 1485-1490.
- Guide, R. D., (2011), "American Association of State Highway and Transportation Officials", Washington, DC.
- Huang, Q., & Fan, H., (2010), "Optimization Modeling of Superelevation Rates Based on Operation Speed". In *ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable*, pp. 548-555.
- Karlaftis, M.G. Tarko, A., (1998), "Heterogeneity considerations in accident modeling", *Accident Analysis and Prevention*, No.30.
- Mak, K. K., & Sicking, D. L., (2003), *Roadside Safety Analysis Program (RSAP)—Engineer's Manual*, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 492, National Research Council. Transportation Research Board, Washington, DC.
- Nesti, A., Masone, C., Barnett-Cowan, M., Giordano, P. R., Bulthoff, H. H., & Pretto, P. (2012), "Roll rate thresholds and perceived

Evaluation of the Effect of Road Shoulder Characteristics on Dynamic Parameters Affecting on Vehicle Rollover in the Joint of Shoulder-Roadway in Horizontal Curves

Sajad Javadi, Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Iman Farzin, Ph.D. Candidate, Faculty of Civil and Environment Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Ali Abdi Kordani, Associated Professor, Faculty of Technical & Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

E-mail: sajadjavadi2012@gmail.com

Received: September 2020-Accepted: January 2021

ABSTRACT

A large number of vehicle rollovers occur in horizontal curves. Designing the shoulders appropriately may reduce the number of these kinds of accidents. Therefore, this study aims at exploring the influence of shoulder characteristics on the rate of rollover accidents. Also, lateral acceleration and drivers' behavior is analyzed considering the effects of shoulder characteristics at curves. The characteristics considered in this research are width, transverse slope, and pavement. To conduct this research, dynamic simulation is used. The number of scenarios that are indeed the number of observations is 324. Two linear regression models are developed with their dependent variables being the rollover rate and the lateral acceleration. The independent variables are shoulder characteristics, vehicle dynamics (vehicle speed) and driver behavior (encroachment angle into centerline in Degree) and different types of vehicles (Sedan, SUV, and Truck). The results indicate that the shoulder characteristics significantly affect the safety in terms of the roll rate and the lateral acceleration on the vehicles. This effect differs among the different types of vehicles and is measured by the dynamic and structural characteristics of the vehicles. The results of this research are useful for designing safer roads as well as the road safety audit.

Keywords: Vehicle Dynamic, Road Shoulder, Lateral Acceleration on The Vehicle, Horizontal Curve, Roll Rate