

رویکردی جدید در جهت بهینه‌سازی شعاع قوس‌های افقی در راه‌های نظامی کشور

مقاله علمی - پژوهشی

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

تهران، ایران

بهرام شیرینی، دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین (ره)، قزوین، ایران

بهنام باولی بهمنی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری،

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

محمدامین اصغری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری،

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sajadjavadi2012@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

صفحه ۱۲۸-۱۱۱

چکیده

در کشور ایران از آیین نامه ۴۱۵ برای بررسی طرح هندسی و تامین ایمنی در راه‌ها استفاده شده است و برای راه‌های نظامی آیین‌نامه خاصی در نظر گرفته نشده است. قوس‌های افقی از قسمت‌های بسیار مهم و بحرانی در طرح هندسی راه‌ها می‌باشند. هدف این تحقیق طراحی بهینه شعاع قوس‌های افقی در راه‌های نظامی تحت شرایط واقعی تر است. طراحی مسیر در آیین نامه ۴۱۵ بخصوص حداقل شعاع قوس افقی با توجه به مدل جرم نقطه‌ای صورت گرفته است. با توجه به این نکته که در واقعیت وسیله نقلیه چند بعدی مسیر موردنظر را طی می‌کند و نه یک جسم صلب، با یک نقطه تماس با سطح جاده، تردید در دقیق بودن رابطه ارایه شده توسط آیین نامه ۴۱۵ دور از منطق به نظر نمی‌رسد؛ زیرا در واقعیت نیروی وارد بر هر یک از چرخ‌های وسیله نقلیه هنگام عبور از قوس افقی متفاوت از هم هستند. در این راستا ۱۱۲ سناریو برای خودروهای باری (Truck) در نظر گرفته شده است. این سناریوها متشکل از تغییرات هندسه مسیر شامل شیب عرضی، شیب طولی، شعاع قوس افقی و سرعت طرح است. نتایج حاکی از آن است، که با در نظر گرفتن محدودیت‌های دینامیکی شتاب جانبی، شاخص واژگونی، شاخص انتقال بار، نرخ چرخش خودرو، ضریب اصطکاک جانبی در قوس افقی، شعاع پیشنهادی تا ۹۵/۶٪ کمتر از شعاع حاصل از آیین نامه ۴۱۵ است. همچنین می‌توان گفت که شعاع‌های پیشنهادی در این تحقیق برای قوس‌های افقی در راه‌های صعب العبور نظامی - عملیاتی مناسب و پرکاربرد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: راه‌های نظامی، قوس افقی، حداقل شعاع قوس، دینامیک خودرو، شتاب جانبی

۱-مقدمه

حوادث به خود معطوف می‌سازند. ایمنی قوس به فاکتورهای زیادی بستگی دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مشخصات هندسی جاده اشاره داشت (Findley,

قوس‌های افقی به دلیل اعمال نیروی گریز از مرکز بر وسایل نقلیه، از خطرناک‌ترین و حادثه‌خیزترین نقاط جاده‌ای محسوب می‌شوند که همواره توجه ویژه‌ای را جهت کاهش

به وسیله نقلیه موجود در سال ۱۹۳۰ دارای برتری نسبی قابل توجهی هستند. برای مثال می‌توان از بهبود یافتن سیستم تعلیق، جنس، اندازه و نوع تایرها و همچنین شکل، جنس و نوع صندلی‌های بکار رفته در وسایل نقلیه و از همه مهم‌تر تغییر در مرکز ثقل وسایل نقلیه اشاره کرد. این موارد ذکر شده تسهیلات بهتری را ایجاد نموده‌اند که باعث می‌گردد تا راننده بتواند با آرامش، ایمنی و اطمینان خاطر بیشتری مسیر مورد نظر و به خصوص قوس افقی را ببیماید (Tan, 2005). رانندگان امروزی و رانندگان در آینده شاید بتوانند مقادیر مختلف و بیشتری از شتاب جانبی را با وسیله نقلیه تجربه کنند بی آنکه احساس ناراحتی نمایند و این امر را می‌توان به پیشرفت‌های چشمگیر در صنعت وسیله نقلیه سازی مربوط دانست. چون در سال ۱۹۳۰ فناوری ساخت وسیله نقلیه با فناوری ساخت وسیله نقلیه در سال‌های اخیر تفاوت زیادی داشته و می‌توان معیارهای طراحی مسیر را با توجه به تغییر قابلیت‌های وسایل نقلیه تغییر داد (Himes, 2013). در نتیجه خودرو می‌تواند مقادیر بیشتری از شتاب جانبی را تحمل کند که این افزایش تحمل مقادیر بالایی از شتاب جانبی از یک سو و رعایت محدودیت‌های دینامیکی (شاخص واژگونی و لغزش) از سوی دیگر می‌تواند منجر به تغییر در رویکرد طرح شعاع قوس افقی نیز گردد.

اودمن و همکاران ایمنی قوس‌های افقی را براساس شعاع انتخابی رانندگان مورد بررسی قرار داده‌اند. ۹۶ قوس به صورت واقعی مورد آزمایش قرار گرفت و شتاب جانبی و سرعت وسایل نقلیه مورد سنجش قرار گرفت نتایج نشان داد تغییر خط با افزایش شعاع قوس افزایش می‌یابد. ورودی قوس خطرناک‌ترین قسمت قوس است در حالی که آیین‌نامه‌های طراحی جاده ریسک خطر پذیری را در کل طول قوس یکسان در نظر می‌گیرند (Othman, Thomson, & Lannér, 2014). معمولاً، اکثر تعیین حداقل شعاع قوس افقی در آیین‌نامه‌های طراحی هندسی جاده فارغ از مشخصات سیستم تعلیق وسایل نقلیه است چنانگ هسی تاثیر تنوع سیستم‌های مدرن در وسایل نقلیه مختلف را روی پارامترهای تعیین حداقل شعاع قوس مورد بررسی قرار داده است و روابط جدیدی ارائه نموده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار اصطکاک تعیین شده در آیین‌نامه‌ها و روابط جدید پیشنهاد شده اختلافی بین ۱۲ تا ۳۰ درصد با هم دیگر دارند (Chang, 2001). مهمترین

(Hummer, Rasdorf, Zegeer, & Fowler, 2012). نرخ تصادفات منجر به مرگ با پهن شدن هر خط در راه‌ها افزایش می‌یابد؛ اما وقتی شانه خارجی راه‌ها پهن‌تر می‌شود، تعداد تصادفات کاهش می‌یابد (Noland & Oh, 2004). اصطکاک سطح روسازی یکی از مهم‌ترین مسائل موجود در ایمنی ترافیک به حساب می‌آید که ضریب اصطکاک کم ناشی از صیقلی شدن سطح یا اجرای غلط، منبع پتانسیلی از خطر برای تصادفات محسوب می‌شود (Echaveguren, Bustos, & De Solminihac, 2004).

واژگونی وسیله نقلیه بخش قابل توجهی از تلفات ترافیکی راه‌ها را تشکیل می‌دهد (عطاری، ۱۳۹۳). در حالی که تنها ۳ درصد از تصادفات وسایل نقلیه در ایالات متحده در اثر واژگونی رخ می‌دهد، بیش از ۳۳ درصد از تمام تلفات انسانی تصادفات را به خود اختصاص داده است (عطاری، ۱۳۹۳). در سال ۲۰۰۳ در اروپا یک پروژه تحقیقاتی به مدت ۳۶ ماه درباره ارزیابی تصادفات واژگونی و خروج از جاده صورت گرفت. در طی این پروژه مشخص شد با وجود اینکه تنها ۱۰ درصد از تصادفات در اروپا به دلیل خروج از جاده است، ولی میزان تلفات انسانی حاصل از این نوع تصادفات برابر ۴۵ درصد است که میزان قابل توجهی را به خود اختصاص داده است.

مطالعات و پژوهش‌های زیادی در سال‌های ۱۹۳۰ تا ۱۹۴۰ یعنی سال‌هایی که آزمایش بزرگ آشتو در آن سال‌ها صورت پذیرفت، انجام گرفت. از طرفی طراحی و محاسبه شعاع قوس افقی در راه‌های مختلف بر اساس همین روابط مربوط به کتاب راهنمای آشتو انجام می‌پذیرد. مقادیر طراحی برای شتاب جانبی و شعاع قوس بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از مطالعات صورت گرفته در سال‌های انجام آزمایش به دست می‌آیند؛ حال آنکه باگذشت زمان و پیشرفت علم و فناوری شرایط جدیدی پیش‌آمده است. منظور از شرایط جدید، پیشرفت مسائل مربوط به آزمایش صورت گرفته است یعنی پیشرفت فناوری ساخت وسایل نقلیه موتوری و افزایش آگاهی و دانش افراد که باعث می‌شود تا بتوان با احتمال زیاد بیانگر این مسئله شد که مقادیر طراحی موجود در کتاب‌های راهنمایی همچون آشتو نیز باید با توجه به پیشرفت علم و فناوری دست‌خوش تغییرات هم‌جهت با این پیشرفت‌ها و تکامل‌ها، گردد؛ زیرا وسیله نقلیه ساخته‌شده در زمان حاضر می‌توان گفت که از تمامی ابعاد و شرایط نسبت

2003). در تحقیق دیگری، آقای جابری طی مطالعه کاملی حداقل شعاع لازم قوس‌های افقی را تحت سرعت‌ها و شیب‌دهی مختلف و سه نوع وسیله نقلیه سواری، شاسی بلند و کامیون با استفاده از نرم افزار شبیه ساز دینامیکی کارسیم با شعاع قوس‌های پیشنهادی آشتو مقایسه نموده است و نتایج نشان داد شعاع قوس افقی طرح شده توسط روابط آشتو تقریباً ۱۱ درصد بزرگتر از شعاع طرح شده توسط مدل رگرسیونی است. این مقدار اختلاف با افزایش شیب طولی مسیر کاهش می یابد تا جایی که در شیب ۹٪ - مقدار شعاع به دست آمده از مدل‌های رگرسیونی با شعاع طرح آشتو تقریباً برابری می کند. این امر نشان دهنده حاشیه ایمنی مثبت شعاع طرح شده توسط روابط آشتو است (۱۳۹۵، جابری). به‌طورکلی عوامل مؤثر بر حوادث در جاده‌ها را می‌توان به گروه‌های مختلفی تقسیم کرد؛ که از جمله آن‌ها می‌توان به جاده (ویژگی هندسی راه، خصوصیات روسازی و همچنین جریان ترافیکی)، وسایل نقلیه (توانایی وسیله نقلیه، نقص فنی قطعات)، عوامل انسانی (خصوصیات راننده، رفتار و حالت روحی راننده)، محیط (شرایط جوی) و ... اشاره کرد که این عوامل به‌صورت زنجیروار به یکدیگر متصل می‌باشند، امروزه توجه به افزایش ایمنی جاده‌ها با استفاده از هندسه مناسب برای راه‌ها افزایش یافته است. از عوامل متعددی که می‌توان به عنوان مکان‌های بحرانی جاده‌ها نام برد، قوس‌های افقی است که در این نقاط عوامل متعددی باعث بروز تصادفات مختلف به خصوص واژگونی و سرخوردگی وسیله نقلیه می‌شود. در این تحقیق هدف اصلی برقراری ایمنی از طریق کاهش نرخ واژگونی و سرخوردگی خودروهای نظامی (بر مبنای شبیه سازی دینامیکی خودرو) در تمام نقاط مختلف جاده‌های نظامی به خصوص در قوس‌های افقی با تغییر در اندازه شعاع قوس است.

۲- روش تحقیق

هدف از مدل کردن یک سیستم، پیش‌بینی رفتار آن نسبت به ورودی‌ها و اتفاقات محیط پیرامون است. درجه آزادی یک سیستم مکانیکی در واقع تعدادی از پارامترهای مستقل است که تعریف پیکربندی آن سیستم است. درجه آزادی یک مفهوم اساسی است که به تجزیه و تحلیل سیستم از بدنه در مهندسی حمل‌ونقل و مهندسی سازه می‌پردازد و این تعدادی

قسمت طراحی قوس‌های افقی تعیین شعاع قوس با معیارهای مختلف است.

کیلینج و بایورا روابط جدیدی برای تعیین حداقل شعاع قوس افقی را با در نظر گرفتن دور و شتاب جانبی و جرک جانبی ارائه دادند که منجر به تامین همزمان راحتی و ایمنی قوس می‌گردد (Kilinc & Baybura, 2012). توشار و اویجیت با استفاده از شبیه سازی رانندگی میزان ریسک خطر قوس‌های افقی با شعاع‌ها و سرعت‌های مختلف را در جاده‌های دو خطه بر اساس شتاب جانبی مورد بررسی قرار داده اند. نتایج نشان می‌دهد قوس‌های افقی با شعاع کمتر از ۱۰۰ متر ۲ تا ۱۰ برابر ریسک تصادف کمتری نسبت به قوس‌های با شعاع بیشتر از ۱۰۰ متر دارند. همچنین قوس‌های واقع در سراسیمه ریسک تصادف ۲ برابری نسبت به قوس‌های واقع در سربالایی را دارند (Choudhari & Maji, 2021).

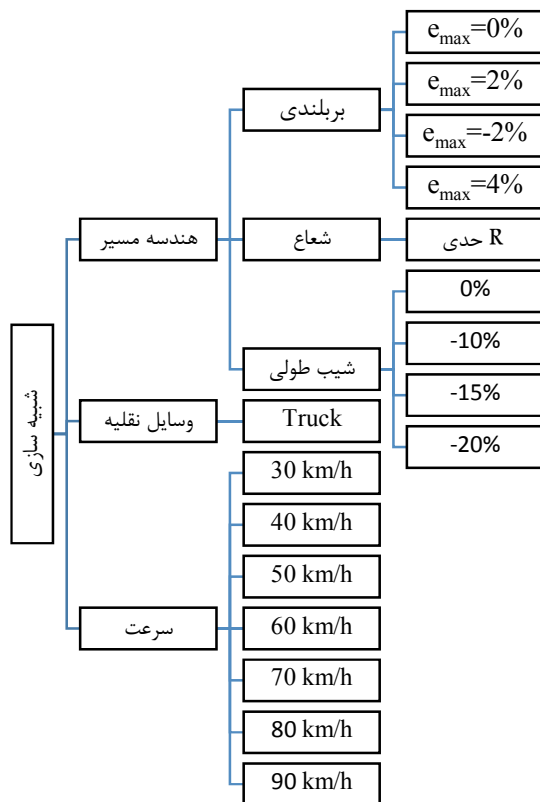
در تحقیقات جدید به جهت بررسی تاثیر تغییرات طرح هندسی بر خودرو، استفاده از شبیه سازی دینامیکی خودرو بسیار مدنظر قرار گرفته است. در یکی از این تحقیقات عبیدی و همکاران تاثیر جنس، شیب و عرض شانه را روی ایمنی قوس‌های افقی با در نظر گرفتن زاویه واژگونی را با استفاده از شبیه سازی دینامیک خودرو مورد بررسی قرار داده‌اند. در نهایت مدل رگرسیونی با در نظر گرفتن پارامترهای مذکور برای زاویه واژگونی ارائه شد. نتایج نشان داد جنس شانه بیشترین تاثیر را در تغییر زاویه واژگونی دارد. (Kordani, Javadi, & Fallah, 2018).

آیین‌نامه‌های موجود طراحی قوس‌های افقی بر پایه سرعت و بر بلندی و اصطکاک جاده می‌باشد. که جهت ساده سازی طراحی شعاع قوس افقی در یک سطح افق طراحی می‌شود و تاثیر سطح قائم در این روابط در نظر گرفته نشده است. عیسی و دابور حداقل شعاع لازم قوس‌های افقی را در فضای سه بعدی و در مواقعی که قوس افقی و قائم با همدیگر در تداخل باشند را با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی دینامیکی خودرو پیشنهاد کردند، نتایج نشان داد در برخی موارد، واژگونی کامیون قبل از رسیدن به سطح راحتی اصطکاک جانبی رخ داده است. این نشان دهنده نیاز به ایجاد کنترل طراحی متفاوت برای کامیون‌ها در سطوح ۳ بعدی نسبت به معیار راحتی است که برای اتومبیل‌های سواری در پیچ‌های افقی مسطح استفاده می‌شود (Easa & Dabbour,

سازی و نحوه انجام تغییرات در روند انجام شبیه‌سازی کمک فراوان می‌کند.

از پارامترها است که تعیین وضعیت یک سیستم فیزیکی را تعریف می‌کند. (عطاری، ۱۳۹۳).

در ادامه فلوجارت مربوط به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته (شکل ۱) آورده شده است. این قسمت به درک فرآیند شبیه



شکل ۱. فلوجارت مربوط به شبیه‌سازی و متغیرهای مورداستفاده



شکل ۲. نمونه‌ای از جاده شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار

(شعاعی که در آن بیشترین میزان شتاب جانبی مجاز به خودرو وارد می‌شود) نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است و به عنوان پاسخ مورد نظر بدست آمده است. در قسمت بربلندی مسیر، حداکثر بربلندی مجاز مسیر برای طرح قوس مقادیر ۰٪، ۲٪- (به دلیل احتمال آب شستگی و از بین رفتن بربلندی در قوس‌ها، بربلندی‌های ۰٪ و ۲٪- در نظر گرفته شدند) همچنین ۲٪ و ۴٪ در نظر گرفته شده است. در قسمت شیب طولی هم چهار قسمت مسطح (شیب ۰٪) و شیب‌های ۱۰٪-، ۱۵٪- و ۲۰٪- (به دلیل بحرانی بودن سرازیری در نظر گرفته شد) با توجه به راه‌های ساخته‌شده در مناطق

شبیه‌سازی در کل شامل چهار مرحله است. مرحله اول مربوط به هندسه مسیر، مرحله دوم مربوط به حالت حرکت وسیله نقلیه با توجه به رفتار عمومی رانندگان، مرحله سوم مربوط به نوع وسایل نقلیه و مرحله چهارم مربوط به سرعت وسیله نقلیه است.

۲-۱- هندسه مسیر

در این قسمت بدنه اصلی مسیر طراحی می‌شود. این قسمت شامل مقدار شعاع قوس، مقدار بربلندی و در نهایت مقدار شیب طولی مسیر است. در نهایت شعاع حدی

نظامی- عملیاتی تعریف شده است. شکل (۲) نمونه‌ای از

۲-۲- وسایل نقلیه

اغلب وسایل نقلیه مورد استفاده در جاده‌های نظامی که اهمیت ویژه‌ای دارند وسایل نقلیه سنگین و کامیون‌ها می‌باشد. در این تحقیق بر مبنای گزارش NCHRP-774 از کامیون Truck به عنوان نماینده‌ای از وسایل نقلیه سنگین استفاده شده است.

۲-۳- مدل‌های دینامیکی خودرو

۲-۳-۱- مدل جرم نقطه‌ای

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 (AASHTO, 2011). در این مدل، خودرو به‌عنوان یک نقطه فرض می‌شود و در قوس‌های متفاوت با توجه به شیب‌های طولی، عرضی و سرعت طرح‌های مختلف، قابلیت ارایه 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.

۲-۳-۲- مدل‌های چند درجه آزادی

شامل مدل‌های دینامیکی خودرو بوده که بر مبنای روابط ریاضی بیان شده و دارای محدودیت در حل کردن و در نظر گرفتن خودرو به صورت یکپارچه می‌باشند.

۲-۳-۳- مدل‌های شبیه‌سازی دینامیکی (سه بعدی)

مدل‌های شبیه‌سازی دینامیک خودرو، خودرو را به حالت واقعی و یکپارچه مدل کرده و از طرفی با استفاده از برنامه‌نویسی قوی توانایی به دست آوردن پارامترهای دینامیکی خودرو در هر نقطه از مسیر را دارند.

۲-۳-۳-۱- نرم‌افزار تراکسیم

شرکت Mechanical Simulation در سال ۱۹۹۶ برای توسعه تکنولوژی شبیه‌سازی بر اساس سی سال تحقیقات موجود در جامعه وسیله نقلیه تأسیس شد. هدف این شرکت ارایه نرم‌افزارهایی در زمینه شبیه‌سازی وسیله‌نقلیه،

مسیر ساخته شده در نرم افزار را نشان می‌دهد.

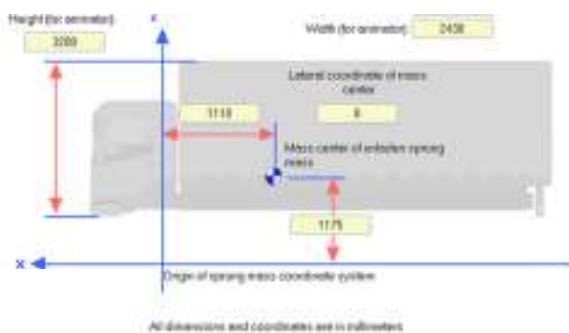
دستگاه‌هایی برای انجام تست‌های مختلف در حوزه‌های مختلف عملکردی وسیله نقلیه است (Mechanical Simulation Corporation, 2016). مدل‌های استاندارد وسیله نقلیه، تست‌های مختلف در زمینه فرمان‌پذیری و کنترل پایداری در داخل نرم‌افزار وجود دارد. این نرم‌افزار توسط شرکت‌ها و کمپانی‌های بزرگ خودروسازی نظیر شرکت‌های خودروسازی تویوتا، فورد، سوزوکی، مزدا، فولکس‌واگن، هوندا، هیوندا برای تحلیل دینامیکی و شبیه‌سازی استفاده می‌گردد (Mechanical Simulation Corporation, 2016). نرم‌افزار تراکسیم (Trucksim) قابلیت دریافت طرح هندسی مورد نظر کاربر را به‌طور وسیع دارد. همچنین مجموعه بسیار کاملی از انواع وسایل نقلیه سنگین (کامیون، اتوبوس، کامیونت و ...) در این نرم‌افزار موجود است که اغلب از وسایل نقلیه موجود و متداول در جاده‌ها می‌باشند. همچنین نتایج خروجی این برنامه علاوه بر مجموعه نمودارها و گراف‌ها می‌تواند به صورت انیمیشن و متحرک ارایه شود که تسهیلات بیشتری را برای درک و تفهیم نتایج ارایه می‌کند. با توجه به مطالب ذکر شده انتخاب نرم‌افزار تراکسیم در جهت شبیه‌سازی دینامیکی خودرو در این تحقیق صورت گرفت. در این پژوهش وسیله نقلیه کامیون Truck انتخاب شده است. دلیل اینکه این وسیله نقلیه انتخاب گردیده‌اند، این است که در بررسی جاده‌های نظامی مشخص شد که خودرو اصلی جهت عبور و مرور در مناطق نظامی- عملیاتی خودروهای Truck بوده که مشخصات آن‌ها به خودرو انتخابی بسیار نزدیک است. به‌طوری که انتخاب این مدل از وسیله نقلیه در مطالعات نشان‌دهنده استاندارد بودن ویژگی‌ها و شرایط فیزیکی این وسایل نقلیه و نزدیک بودن آن‌ها به اکثر وسایل نقلیه در حال عبور و مرور در جاده‌های نظامی موردنظر ما است.

شکل (۳) وسیله نقلیه باری- کامیون (Truck) استفاده‌شده در شبیه‌سازی دینامیکی نشان می‌دهد. در شکل (۴) مقادیر و ابعاد مهمی که در وسیله نقلیه اثرگذار هستند آورده شده است که می‌توان از جمله آن‌ها به فاصله بین محورهای وسیله نقلیه با یکدیگر، فاصله بین زمین و مرکز چرخ وسیله نقلیه، ارتفاع وسیله نقلیه و سایر مقادیر که در شکل قابل مشاهده هستند. البته قابل ذکر است که در این شکل مهم‌ترین قسمت در اندازه‌گذاری و مشخصات فیزیکی

وسيله نقلیه می‌توان گفت که ارتفاع مرکز جرم وسيله نقلیه است که با CG نشان داده می‌شود.



شکل ۳. وسيله نقلیه باری-کامیون (Truck) استفاده شده در تحقیق



The inertial properties are for the spring mass in the design configuration, with no additional loading

Spring mass (kg)	6500	Extr radii of gyration	
Roll inertia (kg-m ²)	2296.9	Rx	0.003
Pitch inertia (kg-m ²)	15406.7	Ry	2.224
Yaw inertia (kg-m ²)	34823.2	Rz	2.215
Product (kg-m ²)	0		

شکل ۴. ابعاد و مشخصات وسيله نقلیه باری-کامیون Truck

۳-راستی آزمایی نرم افزار تراکسیم

برای همان مسیری که بر مبنای داده واقعی است بر مبنای شتاب جانبی و سرعت طولی بررسی شد. بررسی‌های مقایسه‌ای بین داده‌های واقعی و نرم افزار در جدول (۱) آمده است که نشان از صحت نتایج خروجی نرم افزار تراکسیم دارد.

در این مرحله در جهت اطمینان از درستی نرم افزار تراکسیم که این تحقیق بر آن استوار است از مقاله ارایه شده در سال ۲۰۱۸ توسط کیو و همکارانش (در مورد پایداری جانبی تریلرهای باری) استفاده شد (Qu, He, Sun, & Tian, 2018). نتایج شبیه‌سازی با نرم افزار تراکسیم در این قسمت، با توجه به خودرو مورد بررسی در این تحقیق و

جدول ۱. مقایسه نتایج نرم افزار شبیه ساز تراکسیم در این تحقیق و داده‌های واقعی

پارامتر	حداکثر شتاب جانبی	سرعت در آخر مسیر
شیب (درصد)	-/۳,۱	-/۳,۱
میدانی	۰/۰۸	۷۴
شبیه سازی	۰/۰۹	۸۰
شیب (درصد)	+/۳,۱	+/۳,۱
میدانی	۰/۱۱	۶۰
شبیه سازی	۰/۱۱۵	۶۲

۴- بررسی محدودیت‌های دینامیکی

محدودیت مناسب در نظر گرفته شد که این محدودیت‌ها در ادامه معرفی می‌شوند.

باتوجه به اینکه برای شبیه‌سازی دینامیک خودرو و درجهت شعاع ایمن در قوس‌های افقی وجود محدودیت‌های مناسب الزامی است. لذا، با مطالعه تحقیقات مختلف،

۴-۱- ضریب پایداری واژگونی R

بیان می‌شود. رابطه ۱ بر مبنای تقسیم اختلاف نیروی عمودی وارد بر چرخ‌های چپ و راست بر مجموع نیروی عمودی وارد بر چرخ‌های چپ و راست بیان می‌شود.

در تحقیق راجامانی از ضریب پایداری واژگونی در جهت ایمنی برای مقابله با واژگون شدن خودرو استفاده شد. ضریب R که در رابطه‌های ۱ و ۲ بیان شده است در ادامه

$$R = \frac{F_{zR} - F_{zL}}{F_{zR} + F_{zL}} \quad (1)$$

رابطه ۲ بر مبنای شتاب جانبی و زاویه واژگونی و همچنین مشخصات هندسی خودرو می‌باشد.

$$R = \frac{2h_R a_y \cos\theta + 2gh_R \sin\theta}{l_w g} = \frac{2h_R}{l_w g} a_y \cos\theta + \frac{2h_R}{l_w} \sin\theta \quad (2)$$

در کتاب راجامانی برای R بازه ای به صورت $1 < R < 1$ در نظر گرفته شده که با توجه به نظرات اساتید بازه (۰,۵ و ۰,۵-) برای تحقیق در نظر گرفته شد.

۴-۲- ضریب انتقال بار

توصیف کننده دینامیک جانبی و دینامیک چرخشی به دست آمده است. با توجه به شناخت کامیون، منظور مدل دوچرخه با یک درجه آزادی می‌باشد.

نرخ انتقال بار برای خودروهای سنگین ارایه شده (رابطه (۳))، که با محاسبه این مقدار می‌توان میزان بار جابه‌جا شده بین دو محور را بدست آورد. مدل استفاده شده در این کار

$$LTR = \frac{\sum_{n=1}^6 (F_{zLn0} + F_{zLn1}) - \sum_{n=1}^6 (F_{zRn0} + F_{zRn1})}{\sum_{n=1}^6 (F_{zLn0} + F_{zLn1}) + \sum_{n=1}^6 (F_{zRn0} + F_{zRn1})} \quad (3)$$

جاده) و نرخ چرخش عمودی و زاویه پیچش نوشته شده است. در این تحقیق نرخ زاویه انحراف خودرو در قوس‌ها مدنظر قرار گرفت به طوری که نرخ زاویه انحراف ۲۰ درجه بر ثانیه به عنوان محدودیت دیگری برای خودرو تراک در قوس‌ها بررسی شد.

در تحقیق مذکور شاخص واژگونی در سه حالت هشدار واژگونی که ضریب انتقال بار در بازه (۰,۸ و ۰,۶) می‌باشد و حالت خطر واژگونی که ضریب انتقال بار در بازه (۱ و ۰,۸) و حالت بحرانی واژگونی که ضریب انتقال بار ۱ بررسی شد که حالت ۰,۵ برای ضریب انتقال بار بحرانی در این تحقیق مدنظر قرار گرفت.

۴-۳- ضریب اصطکاک جانبی

بر مبنای تحقیقات گذشتگان، ضریب اصطکاک موجود در قوس افقی بین لاستیک‌های خودرو و روسازی و براساس نیروهای افقی و عمودی وارد بر خودرو به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود. ضریب اصطکاک بحرانی به صورت رابطه (۵) و بر اساس سرعت خودرو محاسبه می‌شود.

۴-۳- نرخ زاویه انحراف

مدل سه بعدی با توجه به مجموعه زوایای جاده و ویژگی غیرخطی تایرها می‌باشد که از رفتار چهار چرخ خودرو توضیح داده می‌شود. همچنین، معادلات بر اساس زاویه انحراف خودرو (زاویه بین محور خودرو و محور میانی

$$f_D = \max\left(\left|\frac{F_{yLno} + F_{yLni}}{F_{zLno} + F_{zLni}}\right|, \left|\frac{F_{yRno} + F_{yRni}}{F_{zRno} + F_{zRni}}\right|\right) \quad (4)$$

$$\varphi = 0.874e^{-0.00393V} \quad (5)$$

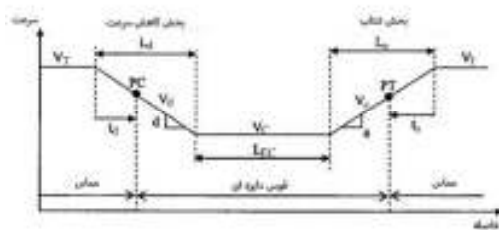
۵- بررسی رفتار راننده در قوس

بر مبنای تحقیقات شارپ ایالات متحده (NDS) بر روی پروفیل سرعت، در ابتدای قوس افقی سرعت کاهش یافته و در انتهای آن افزایش می‌یابد ولی در خود قوس فرکانس ثابتی دیده نشد اگرچه برخی راننده‌ها فقط سرعت ثابت در کل قوس را استفاده می‌کردند. به طوری که ایمبرگ و پالمبرگ بر روی این داده‌ها کار کردند و مدل پیش‌بینی سرعت ارائه کردند. مدل پیش‌بینی کننده نشان داد که ابتدای مسیر تانژانت، سرعت کاهش می‌یابد و در طول قوس افقی سرعت ثابت شده و در انتهای قوس، سرعت افزایش می‌یابد. البته با افزایش انحنای قوس میزان شتاب آخر قوس و میزان طولی از قوس که خودرو با سرعت ثابت می‌پیماید نیز کاهش می‌یابد (Imberg & Palmberg, 2015). در تحقیق مدینا و تارکو در سال ۲۰۰۷ جهت بررسی مدل سرعت خودروها، موقعیت خودرو در قوس و قبل و بعد از آن بررسی شد و مدل سرعت برای رفتار راننده برای جاده‌های دوخطه توسعه داده شد نتایج نشان می‌دهد که ۶۶٪ کاهش سرعت و ۷۲٪ افزایش سرعت در تانژانت‌ها اتفاق می‌افتد و میانگین کاهش و افزایش سرعت با نرخ ۰/۷۳۲ و ۰/۴۸۸ متر بر مجذور ثانیه برای ۱۶/۱ کیلومتر بر ساعت کاهش سرعت (شکل ۵) می‌باشد (Figuroa Medina & Tarko, 2007).

اگر ضریب اصطکاک موجود کمتر از ضریب اصطکاک مورد نیاز باشد احتمال سرخوردگی در مسیر وجود دارد. در این تحقیق باتوجه به سرعت‌های در نظر گرفته شده برای خودرو میزان اصطکاک موجود و بحرانی بررسی شد.

۴-۵- شتاب جانبی وارد بر خودرو

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 چندبرابری می‌یابد. در طراحی شعاع مناسب قوس‌های افقی توجه به شتاب جانبی وارد بر خودرو (a_y) بسیار مدنظر قرار گرفته، به طوری که در طراحی شعاع مناسب در قوس افقی $a_y \leq 1.8m/s^2$ مقداری است که نشان‌دهنده راحتی کامل می‌باشد. اگر $1.8 m/s^2 \leq a_y \leq 3.6m/s^2$ باشد آنگاه مقادیر شتاب جانبی در بازه شتاب جانبی قابل قبول قرار می‌گیرد و اگر $a_y \geq 5m/s^2$ باشد طراحی مناسب نبوده و شتاب جانبی بیشتر از توانایی تحمل انسان می‌باشد که طراحی قوس افقی بر مبنای این شتاب جانبی مجاز نمی‌باشد (Xu, Yang, Shao, & Lu, 2015). در این تحقیق شتاب جانبی ۵ متر بر مجذور ثانیه به عنوان شتاب جانبی ایمن و حدی انتخاب شد.



شکل ۵. بررسی پروفیل سرعت در نقاط مختلف قوس

یافته و در طول قوس ثابت مانده و در انتهای قوس افزایش می‌یابد و در آخر به حالت اولیه خود باز می‌گردد.

۶- بحث و تحلیل نتایج

در این قسمت جداول طراحی و تاثیرات پارامترهای مختلف روی مقدار شعاع قوس افقی در راه‌های نظامی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۶-۱- جداول شعاع بهینه

با اعمال محدودیت‌های شرح داده شده در نرم افزار تراکسیم، شعاع‌های مختلفی تحت سرعت‌ها، شیب‌ها طولی و مقدار بریلندی به دست آمده است. این نتایج برای هر سرعت به صورت جداگانه در جداول ۲ تا ۹ ارائه شده است. با توجه به جداول ۲ تا ۹ آستانه و محدوده تعریف شده برای معیارهای معرفی شده در بخش قبلی رعایت شده است.

در تحقیق لام و چویوری رفتار راننده در قوس بررسی شد، نتایج نشان داد که اگر کاهش سرعت بین تانژانت و قوس تا ۱۰ کیلومتر باشد طراحی خوب و اگر بین ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر باشد طراحی ضعیف و اگر بالاتر از ۲۰ باشد طراحی بسیار ضعیف می‌باشد (Lamm & Choueiri, 1987). در انتها باتوجه به تحقیقات گذشتگان، در این تحقیق میزان کاهش سرعت قبل از قوس و افزایش آن بعد از قوس مساوی و به میزان ۱۰ کیلومتر بر ساعت بوده و نرخ کاهش و افزایش آن بر مبنای تحقیق مدینا و تارکو مطابق شکل ۵ می‌باشد.

لازم به ذکر است که برای حالت‌های حرکت وسیله نقلیه خودرو در قوس‌های افقی تحت ۷ سرعت ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ کیلومتر بر ساعت (سرعت‌های غالب راه‌های فرعی و نظامی) حرکت می‌کند. که متناسب باشکله ۵ سرعت‌های مذکور برای خودرو طرح در ابتدای قوس کاهش

طراحی تحت سرعت ۳۰ km/h نظامی - عملیاتی بر بلندی شیب طولی (%)	شیب طولی (%)	نرخ زاویه انحراف (deg/s)	شمار-جانبی (m/s ²)	نرخ چرخش عمودی (deg)	R	LTR	شعاع حاصل از شبیه سازی (m)	نام شعاع حاصل از آیین نامه (۴۱۵) (m)
۴	۰	۱۸	۰,۲۱	-۱,۹۲	۰,۲۰	۰,۲۰	۲۱	۱۰۵
۴	-۱۰	۲۰	۰,۳۲	-۲,۲۵	۰,۳۳	۰,۳۱	۲۶	
۴	-۱۵	۲۰	۰,۳۸	-۲,۱۷	۰,۳۹	۰,۳۷	۲۹	
۴	-۲۰	۲۰	۰,۴۳	-۲,۰۷	۰,۴۵	۰,۴۲	۳۱	
۲	۰	۱۸	۰,۲۱	-۰,۷۶	۰,۲۳	۰,۲۲	۲۱	۳۰۰
۲	-۱۰	۲۰	۰,۳۲	-۰,۵۵	۰,۳۶	۰,۳۰	۲۸	
۲	-۱۵	۱۹	۰,۳۵	۱,۶۷	۰,۴۴	۰,۳۴	۳۱	
۲	-۲۰	۱۹	۰,۴۰	-۰,۲۹	۰,۴۶	۰,۴۱	۳۲	
۰	۰	۱۹	۰,۲۲	۰,۴۳	۰,۲۶	۰,۲۵	۲۱	-
۰	-۱۰	۱۹	۰,۳۰	۰,۳۱	۰,۳۵	۰,۳۲	۲۸	
۰	-۱۵	۱۹	۰,۳۴	۰,۶۶	۰,۴۰	۰,۳۷	۳۱	
۰	-۲۰	۱۹	۰,۴۰	۰,۸۸	۰,۴۸	۰,۴۴	۳۲	
-۲	۰	۱۹	۰,۲۲	۱,۶۱	۰,۲۸	۰,۲۷	۲۱	۳۵۰
-۲	-۱۰	۱۹	۰,۳۰	۱,۴۹	۰,۳۷	۰,۳۴	۲۸	
-۲	-۱۵	۱۹	۰,۳۴	۱,۸۴	۰,۴۲	۰,۳۹	۳۱	
-۲	-۲۰	۱۹	۰,۳۹	۲,۰۲	۰,۴۹	۰,۴۴	۳۳	

جدول ۳. شعاع های طراحی تحت سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت برای راههای نظامی - عملیاتی

شعاع حاصل از آیین نامه (۴۱۵) (m)	شعاع حاصل از شبیه سازی (m)	LTR	R	نرخ چرخش عمودی (deg)	شتاب جانبی (m/s ²)	نرخ زاویه انحراف (deg/s)	شیب طولی (%)	بر بلندی (%)
۱۹۰	۲۹	۰,۲۹	۰,۳۵	-۱,۸۹	۰,۳۳	۲۰	۰	۴
	۳۲	۰,۴۰	۰,۴۴	-۱,۶۲	۰,۴۲	۲۰	-۱۰	۴
	۳۵	۰,۴۴	۰,۴۹	-۱,۴۶	۰,۴۵	۲۰	-۱۵	۴
	۴۱	۰,۴۱	۰,۴۷	-۱,۳۹	۰,۴۴	۱۹	-۲۰	۴
۵۲۵	۲۹	۰,۳۱	۰,۳۹	۰,۵۳	۰,۳۳	۲۰	۰	۲
	۳۳	۰,۴۱	۰,۴۵	-۰,۴۵	۰,۴۰	۱۹	-۱۰	۲
	۳۷	۰,۴۴	۰,۴۸	-۰,۳۲	۰,۴۲	۱۹	-۱۵	۲
	۴۰	۰,۴۳	۰,۵۰	-۰,۲۱	۰,۴۴	۱۹	-۲۰	۲
-	۳۰	۰,۳۷	۰,۳۹	۰,۶۴	۰,۳۳	۲۰	۰	۰
	۳۳	۰,۴۳	۰,۴۷	۰,۷۳	۰,۴۰	۲۰	-۱۰	۰
	۳۸	۰,۴۵	۰,۴۹	۰,۸۴	۰,۴۱	۱۹	-۱۵	۰
	۴۵	۰,۴۶	۰,۴۹	۰,۹۰	۰,۴۱	۱۷	-۲۰	۰
۶۰۰	۳۰	۰,۴۰	۰,۴۱	۱,۸۲	۰,۳۳	۲۰	۰	-۲
	۳۴	۰,۴۳	۰,۴۸	۱,۸۹	۰,۳۹	۱۹	-۱۰	-۲
	۴۰	۰,۴۵	۰,۴۹	۱,۹۵	۰,۴۰	۱۸	-۱۵	-۲
	۴۷	۰,۴۷	۰,۵۰	۲,۰۵	۰,۴۰	۱۷	-۲۰	-۲

جدول ۴. شعاع های طراحی تحت سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت برای راه های نظامی - عملیاتی

شعاع حاصل از آیین نامه (۴۱۵) (m)	شعاع حاصل از شبیه سازی (m)	LTR	R	نرخ چرخش عمودی (deg)	شتاب جانبی (m/s ²)	نرخ زاویه انحراف (deg/s)	شیب طولی (%)	بر بلندی (%)
۲۸۰	۳۷	۰,۴۱	۰,۴۹	-۱,۰۰	۰,۴۴	۱۸	۰	۴
	۴۵	۰,۴۴	۰,۵۳	-۰,۶۰	۰,۴۷	۱۸	-۱۰	۴
	۵۲	۰,۳۷	۰,۵۴	-۰,۵۰	۰,۴۸	۱۷	-۱۵	۴
	۶۰	۰,۴۱	۰,۵۳	-۱,۰۰	۰,۴۸	۱۷	-۲۰	۴
۸۰۰	۳۷	۰,۴۹	۰,۵۰	-۰,۳۵	۰,۴۴	۲۰	۰	۲
	۴۸	۰,۴۳	۰,۵۰	-۰,۳۵	۰,۴۴	۱۸	-۱۰	۲
	۵۵	۰,۳۷	۰,۵۰	-۰,۲۰	۰,۴۴	۱۷	-۱۵	۲
	۶۵	۰,۴۲	۰,۵۲	۰,۱۰	۰,۴۵	۱۵	-۲۰	۲

بر بلندی (%)	شیب طولی (%)	نرخ زاویه انحراف (deg/s)	شتاب جانبی (m/s ²)	نرخ چرخش عمودی (deg)	R	LTR	شعاع حاصل از شبیه سازی (m)	نام شعاع حاصل از آیین نامه (۴۱۵) (m)
۰	۰	۱۸	۰٫۴۱	۰٫۶۵	۰٫۴۸	۰٫۲۵	۴۰	-
۰	-۱۰	۱۶	۰٫۴۲	۰٫۷۰	۰٫۵۰	۰٫۴۰	۵۰	۱۰۰۰
۰	-۱۵	۱۶	۰٫۴۱	۰٫۷۰	۰٫۴۹	۰٫۴۳	۵۸	
۰	-۲۰	۱۵	۰٫۴۱	۰٫۷۰	۰٫۴۹	۰٫۴۵	۷۰	
-۲	۰	۱۷	۰٫۳۹	۱٫۸۵	۰٫۴۸	۰٫۳۵	۴۵	
-۲	-۱۰	۱۶	۰٫۳۹	۱٫۹۵	۰٫۴۹	۰٫۴۲	۵۵	۱۰۰۰
-۲	-۱۵	۱۴	۰٫۳۸	۲٫۱۰	۰٫۴۸	۰٫۴۰	۶۵	
-۲	-۲۰	۱۴	۰٫۳۸	۱٫۸۷	۰٫۴۷	۰٫۳۹	۸۰	

جدول ۵. شعاع‌های طراحی تحت سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت برای راه‌های نظامی - عملیاتی

بر بلندی (%)	شیب طولی (%)	نرخ زاویه انحراف (deg/s)	شتاب جانبی (m/s ²)	نرخ چرخش عمودی (deg)	R	LTR	شعاع حاصل از شبیه سازی (m)	نام شعاع حاصل از آیین نامه (۴۱۵) (m)
۴	۰	۱۷	۰٫۴۶	-۱٫۵۰	۰٫۵۰	۰٫۴۵	۵۵	۴۰۰
۴	-۱۰	۱۶	۰٫۴۶	-۱٫۲۰	۰٫۵۰	۰٫۴۳	۶۵	
۴	-۱۵	۱۶	۰٫۴۶	-۱٫۳۰	۰٫۵۰	۰٫۳۹	۷۰	
۴	-۲۰	۱۵	۰٫۴۶	-۱٫۰۰	۰٫۵۱	۰٫۳۹	۷۵	
۲	۰	۱۶	۰٫۴۲	-۰٫۴۷	۰٫۴۷	۰٫۴۱	۶۰	۱۰۵۰
۲	-۱۰	۱۵	۰٫۴۲	-۰٫۳۰	۰٫۴۸	۰٫۴۲	۷۰	
۲	-۱۵	۱۵	۰٫۴۲	-۰٫۲۰	۰٫۴۸	۰٫۴۲	۷۵	
۲	-۲۰	۱۵	۰٫۴۳	۰٫۳۰	۰٫۵۰	۰٫۴۱	۸۰	
۰	۰	۱۵	۰٫۴۰	۰٫۸۰	۰٫۴۸	۰٫۴۲	۶۵	-
۰	-۱۰	۱۵	۰٫۴۰	۰٫۸۰	۰٫۴۸	۰٫۴۲	۷۵	
۰	-۱۵	۱۴	۰٫۴۱	۱٫۰۰	۰٫۴۹	۰٫۴۵	۸۰	
۰	-۲۰	۱۴	۰٫۴۱	۱٫۲۰	۰٫۵۰	۰٫۴۴	۸۵	
-۲	۰	۱۵	۰٫۳۹	۱٫۹۰	۰٫۴۹	۰٫۴۱	۶۵	۱۵۰۰
-۲	-۱۰	۱۵	۰٫۴۰	۲٫۰۰	۰٫۵۰	۰٫۴۴	۷۵	
-۲	-۱۵	۱۴	۰٫۳۹	۲٫۱۰	۰٫۴۹	۰٫۴۲	۸۵	
-۲	-۲۰	۱۳	۰٫۳۸	۲٫۲۵	۰٫۴۸	۰٫۴۰	۹۵	

جدول ۶. شعاع‌های طراحی تحت سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت برای راه‌های نظامی - عملیاتی

بر بلندی (%)	شیب طولی (%)	نرخ زاویه انحراف (deg/s)	شتاب جانبی (m/s ²)	نرخ چرخش عمودی (deg)	R	LTR	شعاع حاصل از شبیه سازی (m)	شعاع حاصل از آیین نامه (۴۱۵) (m)
۴	۰	۱۴	۰٫۴۳	-۱٫۰۰	۰٫۴۷	۰٫۳۷	۸۵	۵۵۰
۴	-۱۰	۱۴	۰٫۴۴	-۱٫۴۰	۰٫۴۸	۰٫۴۱	۹۰	
۴	-۱۵	۱۴	۰٫۴۳	-۱٫۳۰	۰٫۴۷	۰٫۳۲	۱۰۰	
۴	-۲۰	۱۳	۰٫۴۲	-۱٫۳۰	۰٫۴۶	۰٫۳۵	۱۰۰	
۲	۰	۱۴	۰٫۴۳	-۰٫۶۰	۰٫۴۸	۰٫۴۳	۸۵	۱۴۰۰
۲	-۱۰	۱۳	۰٫۴۲	-۰٫۳۰	۰٫۴۸	۰٫۴۳	۹۵	
۲	-۱۵	۱۳	۰٫۴۵	-۰٫۳۰	۰٫۵۱	۰٫۳۹	۱۰۰	
۲	-۲۰	۱۲	۰٫۴۱	-۰٫۰۵	۰٫۴۷	۰٫۴۰	۱۰۵	
۰	۰	۱۴	۰٫۴۵	۰٫۸۰	۰٫۵۳	۰٫۴۸	۸۹	-
۰	-۱۰	۱۴	۰٫۴۵	۱٫۰۰	۰٫۵۴	۰٫۴۷	۹۰	
۰	-۱۵	۱۴	۰٫۴۴	۱٫۱۰	۰٫۵۳	۰٫۴۶	۱۰۰	
۰	-۲۰	۱۲	۰٫۴۰	۱٫۱۰	۰٫۴۸	۰٫۳۹	۱۰۵	
-۲	۰	۱۲	۰٫۴۰	۱٫۸۰	۰٫۵۰	۰٫۴۲	۹۵	۲۰۰۰
-۲	-۱۰	۱۲	۰٫۳۹	۲٫۱۰	۰٫۴۹	۰٫۴۳	۱۰۵	
-۲	-۱۵	۱۲	۰٫۳۹	۲٫۱۰	۰٫۴۹	۰٫۴۰	۱۱۵	
-۲	-۲۰	۱۲	۰٫۳۵	۲٫۳۰	۰٫۴۵	۰٫۴۳	۱۲۰	

جدول ۷. شعاع‌های طراحی تحت سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت برای راه‌های نظامی - عملیاتی

بر بلندی (%)	شیب طولی (%)	نرخ زاویه انحراف (deg/s)	شتاب جانبی (m/s ²)	نرخ چرخش عمودی (deg)	R	LTR	شعاع حاصل از شبیه سازی (m)	شعاع حاصل از آیین نامه (۴۱۵) (m)
۴	۰	۱۱	۰٫۴۱	-۱٫۷۰	۰٫۴۳	۰٫۳۹	۱۲۰	۷۰۰
۴	-۱۰	۱۱	۰٫۴۱	-۱٫۵۹	۰٫۴۴	۰٫۳۹	۱۲۵	
۴	-۱۵	۱۱	۰٫۴۱	-۱٫۴۲	۰٫۴۵	۰٫۳۷	۱۳۰	
۴	-۲۰	۱۱	۰٫۴۳	-۱٫۲۴	۰٫۴۷	۰٫۴۱	۱۳۵	
۲	۰	۱۱	۰٫۴۱	-۰٫۵۳	۰٫۴۶	۰٫۴۲	۱۲۰	۱۷۰۰
۲	-۱۰	۱۱	۰٫۴۱	-۰٫۴۰	۰٫۴۶	۰٫۴۱	۱۲۵	
۲	-۱۵	۱۱	۰٫۴۰	-۰٫۲۶	۰٫۴۵	۰٫۳۹	۱۳۵	
۲	-۲۰	۱۱	۰٫۴۲	-۰٫۰۹	۰٫۴۸	۰٫۴۲	۱۴۰	

بر بلندی (%)	شیب طولی (%)	نرخ زاویه انحراف (deg/s)	شتاب جانبی (m/s ²)	نرخ چرخش عمودی (deg)	R	LTR	شعاع حاصل از شبیه سازی (m)	شعاع حاصل از آیین نامه (۴۱۵) (m)
۰	۰	۱۱	۰,۳۹	۰,۶۲	۰,۴۶	۰,۴۳	۱۲۵	-
۰	-۱۰	۱۱	۰,۳۸	۰,۷۲	۰,۴۵	۰,۴۱	۱۳۵	
۰	-۱۵	۱۱	۰,۳۹	۰,۹۱	۰,۴۷	۰,۴۱	۱۴۰	۲۵۰۰
۰	-۲۰	۱۱	۰,۴۱	۱,۰۴	۰,۴۹	۰,۴۲	۱۴۵	
-۲	۰	۱۰	۰,۳۸	۱,۷۹	۰,۴۷	۰,۴۳	۱۳۰	۲۵۰۰
-۲	-۱۰	۱۰	۰,۳۷	۱,۸۸	۰,۴۶	۰,۴۱	۱۴۰	
-۲	-۱۵	۱۰	۰,۳۸	۲,۰۷	۰,۴۸	۰,۴۲	۱۴۵	
-۲	-۲۰	۱۱	۰,۴۰	۲,۱۴	۰,۵۰	۰,۴۳	۱۵۰	
-۲	-۲۰	۱۱	۰,۴۰	۲,۱۴	۰,۵۰	۰,۴۳	۱۵۰	

جدول ۸. شعاع‌های طراحی تحت سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت برای راههای نظامی - عملیاتی

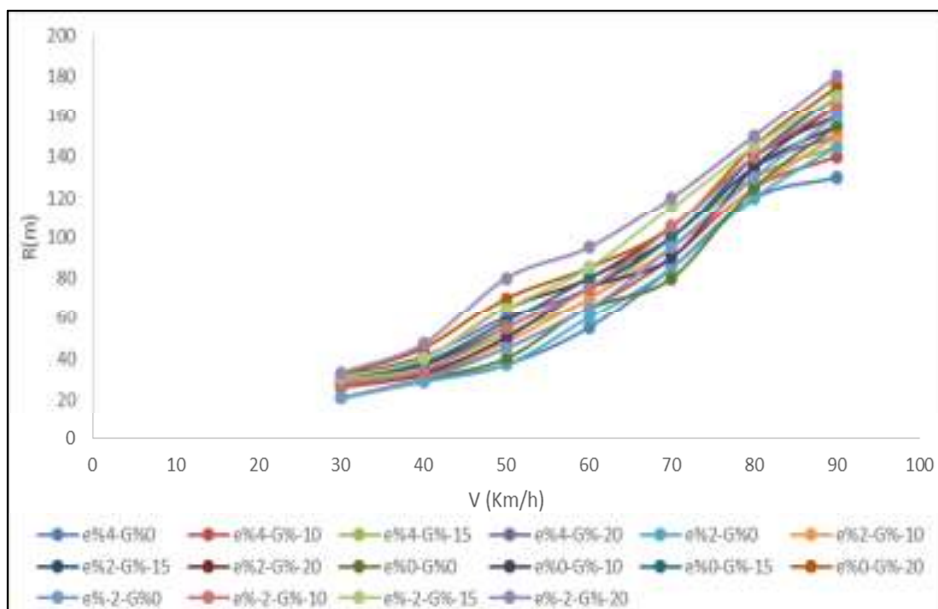
بر بلندی (%)	شیب طولی (%)	نرخ زاویه انحراف (deg/s)	شتاب جانبی (m/s ²)	نرخ چرخش عمودی (deg)	R	LTR	شعاع حاصل از شبیه سازی (m)	شعاع حاصل از آیین نامه (۴۱۵) (m)
۴	۰	۱۳	۰,۴۷	-۱,۵۰	۰,۵۱	۰,۸۴	۱۳۰	۸۷۰
۴	-۱۰	۱۳	۰,۴۴	-۱,۴۰	۰,۴۸	۰,۴۰	۱۴۰	
۴	-۱۵	۱۳	۰,۴۷	-۱,۱۵	۰,۵۲	۰,۴۲	۱۴۵	
۴	-۲۰	۱۳	۰,۴۵	-۱,۰۰	۰,۵۰	۰,۸۵	۱۵۰	
۲	۰	۱۱	۰,۴۱	-۰,۵۰	۰,۴۶	۰,۴۲	۱۴۵	۲۲۰۰
۲	-۱۰	۱۱	۰,۴۱	-۰,۳۵	۰,۴۶	۰,۴۱	۱۵۰	
۲	-۱۵	۱۲	۰,۴۳	-۰,۳۲	۰,۴۹	۰,۴۰	۱۵۵	
۲	-۲۰	۱۳	۰,۴۳	۰,۴۰	۰,۵۰	۰,۳۹	۱۶۰	
۰	۰	۱۰	۰,۴۰	۰,۶۰	۰,۴۷	۰,۳۸	۱۵۵	-
۰	-۱۰	۱۰	۰,۳۸	۰,۷۵	۰,۴۵	۰,۳۴	۱۶۵	
۰	-۱۵	۱۱	۰,۴۰	۰,۹۰	۰,۴۸	۰,۳۷	۱۷۰	
۰	-۲۰	۱۱	۰,۴۰	۱,۱۰	۰,۴۸	۰,۳۹	۱۷۵	
-۲	۰	۱۰	۰,۳۹	۱,۸۰	۰,۴۸	۰,۴۳	۱۶۰	۳۵۰۰
-۲	-۱۰	۱۰	۰,۴۰	۱,۹۰	۰,۵۰	۰,۴۲	۱۶۵	
-۲	-۱۵	۱۱	۰,۴۰	۲,۲۰	۰,۵۰	۰,۴۴	۱۷۰	
-۲	-۲۰	۱۰	۰,۳۹	۲,۳۰	۰,۴۹	۰,۴۱	۱۸۰	

*استفاده از شعاع‌های پیشنهاد شده در طراحی راههای نظامی - عملیاتی با توجه به نظر طراح صورت می‌گیرد.

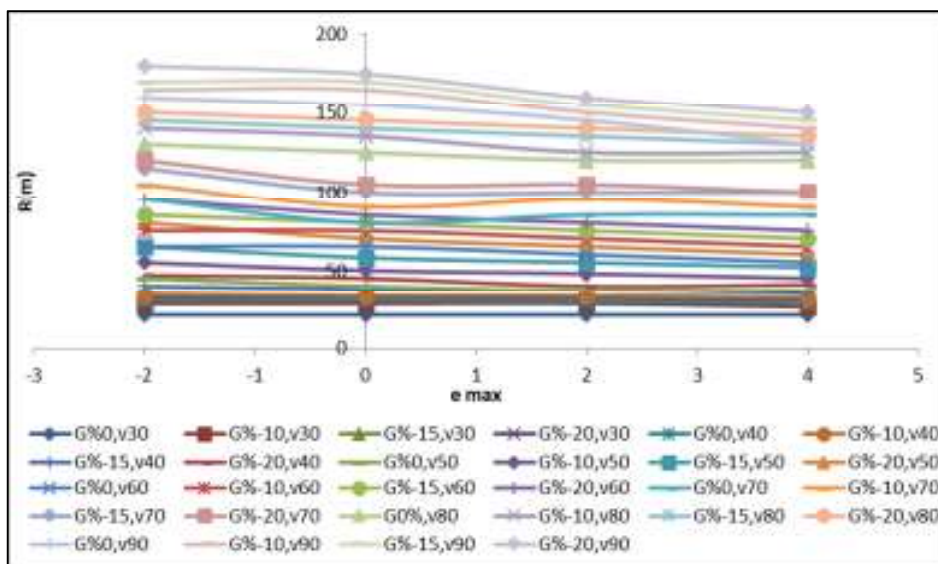
۶-۲- بررسی تغییرات شعاع‌های حدی به دست‌آمده برای قوس‌های افقی راه‌های نظامی با توجه به پارامترهای

سرعت، شیب طولی و شیب عرضی

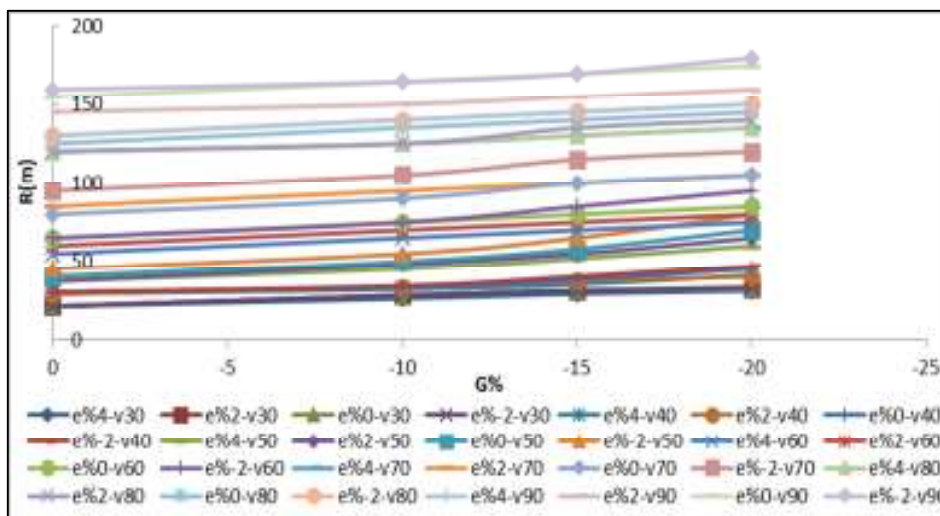
در این قسمت به بررسی تغییرات شعاع بهینه قوس‌های راه‌های نظامی با توجه به تغییر سرعت، شیب طولی و شیب عرضی در سناریوهای معرفی شده پرداخته می‌گردد.



شکل ۶. بررسی تغییرات شعاع بهینه به دست‌آمده برای قوس‌های افقی راه‌های نظامی در برابر سرعت وسیله نقلیه



شکل ۷. بررسی تغییرات شعاع بهینه به دست‌آمده برای قوس‌های افقی راه‌های نظامی در برابر شیب عرضی سواره رو



شکل ۸. بررسی تغییرات شعاع بهینه به دست آمده برای قوس‌های افقی راه‌های نظامی در برابر شیب طولی سواره رو

متر بوده است. در حالی که، شعاع بهینه در این مطالعه برابر با ۱۲۰ متر بوده است و همچنین برای سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت و شیب طولی صفر درجه میزان شعاع حدی بهینه بدست آمده در مطالعه جابری برابر با ۱۶۰ متر بوده است درحالیکه شعاع بهینه در این مطالعه برابر با ۱۳۰ متر بوده است. از عواملی که اختلاف اندکی که بین این شعاع‌ها ایجاد می‌کند این است که در مطالعه جابری رفتار راننده و کاهش سرعت در هنگام دیدن قوس افقی در نظر گرفته نشده است و راننده به صورت یکنواخت این مسیر را طی می‌کند و همچنین جنس رویه جاده، آسفالتی در نظر گرفته شده در حالی که در این مطالعه جنس رویه به صورت شنی در نظر گرفته شده است.

۷- نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق بررسی شعاع قوس‌های افقی در راه‌های نظامی و غیرنظامی با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی خودرو و ارایه شعاع مخصوص قوس‌های افقی راه‌های نظامی می‌باشد. برای این منظور از نرم افزار شبیه‌سازی تراکسیم استفاده شده است. در این تحقیق سرعت‌های طرح ۳۰ تا ۹۰ کیلومتر بر ساعت و شیب طولی ۰، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ برای چهار شیب عرضی ۲٪، ۴٪ و همچنین رفتار راننده مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به جنس رویه‌های

نتایج شکل ۶ نشان دهنده وابستگی بالای شعاع بهینه قوس‌های افقی راه‌های نظامی به سرعت خودرو می‌باشد به طوری که برای سرعت‌های متفاوت و با توجه به محدودیت‌های دینامیکی مورد بررسی در این تحقیق، هرچه میزان سرعت افزایش یابد میزان شعاع بهینه مورد نیاز قوس افقی راه‌های نظامی بیشتر می‌شود. نتایج شکل ۷ نشان دهنده وابستگی نه چندان زیاد شعاع بهینه قوس‌های افقی راه‌های نظامی به شیب عرضی جاده می‌باشد به طوری که در شیب‌های عرضی مختلف (با توجه به محدودیت‌های دینامیکی مورد بررسی در این تحقیق)، هرچه میزان شیب عرضی افزایش یابد میزان شعاع بهینه مورد نیاز قوس افقی راه‌های نظامی کمی کمتر می‌شود. نتایج شکل ۷ نشان دهنده وابستگی نه چندان بالای شعاع بهینه قوس‌های افقی راه‌های نظامی به شیب طولی می‌باشد به طوری که برای شیب طولی و با توجه به محدودیت‌های دینامیکی مورد بررسی در این تحقیق، هرچه میزان شیب طولی منفی‌تر شود. میزان شعاع بهینه مورد نیاز قوس افقی راه‌های نظامی بیشتر می‌شود. در نهایت نتایج این تحقیق و مطالعه جابری مورد مقایسه قرار می‌گیرد و به مثال‌هایی از مسیرها و سرعت‌های مشابه جهت مقایسه اشاره می‌شود. در مطالعه جابری برای طراحی قوس افقی با سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت و شیب طولی صفر درجه میزان شعاع حدی بهینه بدست آمده برابر با ۱۴۰

-Choudhari, T., & Maji, A., (2021), "Risk assessment of horizontal curves based on lateral acceleration index: a driving simulator-based study", *Transportation in developing economies*, 7(1), pp.1-11.

-Easa, S. M., & Dabbour, E., (2003), "Design radius requirements for simple horizontal curves on three-dimensional alignments", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(6), pp.1022-1033.

-Echaveguren, T., Bustos, M., & De Solminihac, H., (2004), "A method to evaluate side friction in horizontal curves, using supply-demand concepts", Paper presented at the 6th International Conference on Managing Pavements: The Lessons, The Challenges, The Way Ahead Queensland Department of Main Roads ARRB FRH Group Exor Corporation Pavement Management Services Federal Highway Administration World Highways GHDBrisbane City Council Tasmania Department of Infrastructure, Energy and Resources Australian Road Federation (ARF) Hansen Cooperative Research Centre for Construction Innovation.

-Figuerola Medina, A. M., & Tarko, A. P., (2007), "Speed changes in the vicinity of horizontal curves on two-lane rural roads", *Journal of transportation engineering*, 133(4), pp.215-222.

-Findley, D. J., Hummer, J. E., Rasdorf, W., Zegeer, C. V., & Fowler, T. J., (2012), "Modeling the impact of spatial relationships on horizontal curve safety", *Accident Analysis & Prevention*, 45, pp.296-304.

-Himes, S. C., (2013), "Reliability Based Design of Horizontal Curves Considering the Effects of Grades".

-Imberg, J., & Palmberg, A., (2015), "How curve geometry influences driver behavior in horizontal curves-A study of naturalistic driving data".

-Kilinc, A. S., & Baybura, T., (2012), "Determination of minimum horizontal curve radius used in the design of transportation structures", depending on the limit value of comfort criterion lateral jerk TS06G-Engineering Surveying, Machine Control and Guidance.

-Kordani, A. A., Javadi, S., & Fallah, A., (2018), "The effect of shoulder on safety of highways in horizontal curves: With focus on

راه‌های نظامی و راه‌های معمولی و تفاوت در ضریب اصطکاک رویه‌ها انتظار می‌رود در راه‌های نظامی به شعاع قوس کمتری نیاز باشد. نتایج نشان داد با افزایش سرعت، شعاع بهینه نیز افزایش پیدا می‌کند و همچنین با کاهش شیب عرضی و همچنین افزایش شیب طولی، خودرو حالت بحرانی‌تری گرفته و در نتیجه قوس‌های افقی به شعاع‌هایی با اندازه بزرگتر نیاز پیدا می‌کنند. همچنین نتایج حاکی از آن است که شعاع قوس راه‌های نظامی بسته به سرعت و شیب طولی و عرضی بین ۷۰/۴ تا ۹۵/۶ درصد کوچکتر از شعاع لازم برای قوس جاده‌های غیر نظامی است که از لحاظ اجرایی و اقتصادی بسیار مناسب است. در نهایت جهت کاربردی کردن این تحقیق برای طراحان جاده، جداول طراحی برای سرعت‌ها، بریلندی و شیب‌های طولی مختلف ارائه شد. با توجه به اهمیت ویژه زمان، تجهیزات و هزینه ساخت راه‌ها در مناطق نظامی نتایج این تحقیق می‌تواند مورد استفاده طراحان راه‌های نظامی قرار گیرد.

در مطالعات آینده می‌توان همچنان روی بررسی شعاع قوس افقی راه‌های نظامی با توجه به عدم نیاز به همان مقدار راحتی رانندگی پیشنهاد شده در آیین‌نامه‌ها برای راه‌های معمولی در راه‌های نظامی، متمرکز شد. همچنین، در مطالعات آینده می‌توان از لحاظ حجم عملیات خاکی و اقتصادی ساخت راه‌های نظامی و غیر نظامی را براساس شعاع‌های پیشنهادی این تحقیق و آیین‌نامه‌های طرح هندسی مورد بررسی قرار داد.

۸-مراجع

-عطاری، ع.، (۱۳۹۳)، "بررسی اثر شیب شیروانی در ارتفاع ایمنی وسایل نقلیه خارج شده از جاده‌های برون شهری با توجه به شبیه‌سازی حرکت وسایل نقلیه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی (واحد اهر).

-جباری، ا. ح.، (۱۳۹۵)، "آنالیز حاشیه ایمنی قوس افقی در جاده‌های برون‌شهری بر اساس آشتو (کتاب سبز)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی.

-AASHTO. (2011), "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets", AASHTO.

-Chang, T. H., (2001), "Effect of vehicles' suspension on highway horizontal curve design", *Journal of transportation engineering*, 127(1), pp.89-91.

- transportation engineering, 140(4), 04014005.
- Qu, G., He, Y., Sun, X., & Tian, J., (2018), "Modeling of lateral stability of tractor-semitrailer on combined alignments of freeway", *Discrete Dynamics in nature and Society*.
- Tan, C. H., (2005), "An investigation of comfortable lateral acceleration on horizontal curves: The Pennsylvania State University."
- 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*.
- roll angle", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(8), pp.3153-3161.
- Lamm, R., & Choueiri, E. M., (1987), "Recommendations for evaluating horizontal design consistency based on investigations in the state of New York", *Transportation Research Record*, 1122(68), e78 .
- 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", *Accident Analysis & Prevention*, 36(4), pp.525-532.
- Othman, S., Thomson, R., & Lannér, G., (2014), "Safety analysis of horizontal curves using real traffic data", *Journal of*

A New Approach to Optimizing the Radius of the Horizontal Curves of the Country's Military Roads

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

Bahram Shirini, Ph.D., Civil Engineering Dept., Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Behnam Bavelibahmai, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Mohammad Amin Asghary, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

E-mail: sajadjavadi2012@gmail.com

Received: August 2021-Accepted: February 2022

ABSTRACT

In Iran, the Code 415 is used to study the geometric design and road safety. There are no specific manuals to design military roads. This paper is aimed to optimally design the radius of horizontal curves in military roads under more realistic conditions. For the purpose of road geometric design in the Code 415, the minimum radius of horizontal curves is calculated based on the point mass model. In the real world, vehicles move like a multi-dimensional mass not a rigid one; therefore the equation presented in the code 415 can be questioned. This doubt seems to be reasonable, since in reality, the forces acted on each single tire differs as vehicle passes the horizontal curve. So, in order to analyze more accurately, 112 scenarios are considered in this research. The scenarios include different slopes, grades, rollover indices, load transfer indices, lateral friction factors in the horizontal curves. The results showed that considering the dynamic limitations of lateral acceleration, Rollover index, load transfer index, Roll rate, lateral friction factor, the proposed radius in this paper can be lower than the proposed radius in 415 by 95.6 percent. These proposed radii of horizontal curves are suitable and widely used in difficult operational-military routes.

Keywords: Military Roads, Horizontal Curve, Minimum Radius, Vehicle Dynamic