

بررسی شتاب قائم وسایل نقلیه در قوس‌های قائم با استفاده از مدل دینامیک Multi-Body

بهرام شیرینی*، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین
علی عبدی کردانی، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین

Email: bahram.shirini@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۲۸ - پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۲

چکیده

راحتی رانندگی و مسافت دید دو پارامتر اصلی در طراحی قوس‌های قائم جاده هستند. یکی از مهم‌ترین معیارهای اندازه‌گیری راحتی رانندگی در قوس‌های قائم، شتاب قائم است. روابط محاسبه شتاب قائم در منابع معتبر طراحی هندسی جاده از جمله کتاب سبز آشتو بر اساس مدل جرم نقطه‌ای است که در آن خودرو به‌عنوان یک جسم نقطه‌ای دارای جرم مشخص فرض شده است. با توجه به اینکه خودرو از قسمت‌های بسیاری تشکیل شده است، پاسخ‌های دینامیک هر قسمت متفاوت از یک جسم نقطه‌ای است. در این تحقیق، برای بررسی دقیق‌تر شتاب قائم خودرو و مقایسه با شتاب قائم حاصل از مدل جرم نقطه‌ای، از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی دینامیک Carsim و Trucksim تحت مدل Multi-Body (M-B) استفاده شده است. پاسخ‌های دینامیک سه نوع وسیله نقلیه تحت سرعت‌ها و شیب‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که بسته به سرعت وسیله نقلیه، شیب مسیر و نوع وسیله نقلیه، اختلاف قابل توجهی بین نتایج این دو مدل وجود دارد و مدل جرم نقطه‌ای شتاب کمتری را ارائه می‌دهد. به طوری که اختلاف شتاب قائم بین مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B بسته به سرعت و شیب مسیر در خودروی سواری بین ۱۲/۶ تا ۲۵/۹ درصد، در خودروی SUV بین ۲۳/۸ تا ۲۹/۱ درصد و در کامیون بین ۲۹ تا ۴۷/۶ درصد است. با توجه به نتایج این تحقیق، استفاده از مدل دینامیک M-B در طراحی قوس‌های قائم با توجه به شبیه‌سازی دقیق‌تر خودرو، طرح واقع‌بینانه‌تری را ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: راحتی رانندگی، مسافت دید، قوس قائم، شتاب قائم، شبیه‌سازی دینامیک

۱. مقدمه

از معیارهای مهم اندازه‌گیری راحتی راننده و سرنشینان، پاسخ‌های دینامیک خودرو از جمله شتاب قائم خودرو حین عبور از روی قوس قائم است. در طراحی قوس قائم، برای راحتی بیشتر راننده حین عبور از قوس و فاصله دید بیشتر، هر چهقدر نرخ تغییرات شیب قوس

قوس‌های قائم از اجزای اصلی جاده می‌باشند. در طراحی قوس قائم، پارامترهایی که باید در نظر گرفته شوند عبارت‌اند از: مسافت دید، راحتی سرنشینان وسیله نقلیه، زهکشی آب‌های جاری روی جاده و زیبایی مسیر. یکی

$$L = \frac{AV^2}{395} \quad (1)$$

که در آن، L طول قوس قائم مقعر (m)، V سرعت طرح (km/h) و A اختلاف جبری شیب‌ها بر حسب درصد است.

مطالعه‌ای به صورت مستقیم روی عملکرد دینامیک خودرو در قوس‌های قائم انجام نشده است. اما محققانی روی عملکرد دینامیک خودرو در قسمت‌های ترکیبی قوس افقی و قوس قائم به مطالعه پرداخته‌اند. کردانی و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی، اصطکاک جانبی و شتاب جانبی را در ترکیب قوس افقی و قوس قائم مقعر به صورت هم‌زمان بررسی نموده‌اند. در این تحقیق، از مدل **Multi-Body (M-B)** با نرم‌افزار شبیه‌سازی **Carsim** و **Trucksim** استفاده شده است. نتایج نشان داد که بیشترین ضریب اصطکاک جانبی زمانی اتفاق می‌افتد که قوس افقی در عمیق‌ترین نقطه قوس قائم مقعر (وسط قوس) شروع شود. همچنین، ضریب اصطکاک جانبی کامیون بسیار کمتر از خودروهای **Sedan** و **SUV** است. در حالی که شتاب جانبی کامیون بیشتر از وسایل نقلیه دیگر شده بود. در نهایت، می‌توان گفت که خطر لغزش در این نوع قوس‌ها برای خودروهای **Sedan** و **SUV** بیشتر از خطر واژگونی است. در مقابل، خطر واژگونی برای کامیون بیشتر از خطر لغزش است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی نشان داد که انتقال از قوس افقی همراه با قوس قائم تأثیر ناچیزی روی شتاب جانبی می‌گذارد. در مطالعات زیادی، از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی **Carsim** و **Trucksim** جهت بررسی پاسخ دینامیک خودرو و رفتار خودرو در بخش‌های مختلف جاده، از جمله قوس‌های افقی، سراسیمه‌ها، سرعت‌گاه‌ها و ترکیب عناصر مختلف جاده استفاده شده است (**NCHRP 747**، ۲۰۱۴؛ کردانی و مولان، ۲۰۱۵؛ کردانی و همکاران، ۲۰۱۸).

شیونگ و همکاران (۲۰۱۲)، تحقیقی جهت بررسی راحتی راننده بر پایه لرزش‌های حین رانندگی انجام

کمتر باشد، مناسب‌تر است. یا به عبارت دیگر، هر چقدر قوس ملایم‌تر باشد، مناسب‌تر است. برای راحتی راننده، نرخ تغییر شیب باید کم باشد. این امر در قوس‌های قائم مقعر مهم‌تر است زیرا نیروهای گرانشی و مایل به مرکز در جهت عکس یکدیگر عمل می‌کنند. در طرح قوس‌های قائم، شکل ظاهری نیز باید مد نظر باشد. شکل ظاهری قوس طولانی از قوس کوتاه مناسب‌تر است. قوس‌های قائم کوتاه در اثر پدیده جمع‌شدگی، نوعی شکستگی را در پروفیل طولی مجسم می‌کنند. در طراحی قوس قائم، دو معادله دایره و سهمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما معادله سهمی به علت سادگی محاسبات به دایره ترجیح داده شده است و در طراحی قوس‌های قائم، معادلات سهمی حاکم‌اند. مسئله‌ای که در این معادلات توجه نشده، وضعیت دینامیک خودرو حین عبور از قوس‌های قائم است. آشتو و منابع معتبر طرح هندسی جاده، جهت ساده‌سازی، خودرو را به صورت یک جسم نقطه‌ای با جرم مشخص در نظر گرفته‌اند. در حالی که خودرو یک وسیله چندبعدی است که دارای قسمت-های زیادی بوده و هر قسمت می‌تواند پاسخ‌های دینامیک مختلفی داشته باشد. سیستم تعلیق و ابعاد خودرو می‌تواند روی نتایج شتاب قائم تأثیرگذار باشد.

تأثیر و اهمیت لرزش‌های قائم بر راحتی راننده در قوس‌های قائم مقعر بیشتر از قوس‌های قائم محدب است؛ زیرا نیروهای گرانشی و جانب مرکز در خلاف جهت همدیگر هستند. مقدار راحتی در اثر لرزش‌های قائم به آسانی قابل اندازه‌گیری نیست؛ زیرا به میزان قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر سیستم تعلیق وسیله نقلیه، وزن وسیله نقلیه، انعطاف‌پذیری لاستیک‌ها و عوامل دیگر قرار دارد. در اثر تلاش‌های محدود در زمینه این‌گونه اندازه‌گیری‌ها، این نتیجه کلی حاصل شده است که وسیله نقلیه در محل قوس‌های قائم، هنگامی راحت است که شتاب قائم از 0.3 m/s^2 تجاوز نکند. رابطه کلی برای در نظر گرفتن این معیار عبارت است از (آشتو، ۲۰۱۸):

۲. روش تحقیق

جهت بررسی شتاب قائم، از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی دینامیک خودرو استفاده شده است. مسیرها، سرعت‌ها و وسایل نقلیه طرح مورد استفاده در نرم‌افزار به‌نوعی انتخاب شده‌اند که حالات مختلف قوس‌های قائم در بر گرفته شود. در ادامه، به معرفی مدل‌های دینامیک، نرم‌افزار و متغیرهای استفاده شده به ترتیب پرداخته می‌شود.

۲-۱. مدل‌های شبیه‌سازی دینامیک خودرو

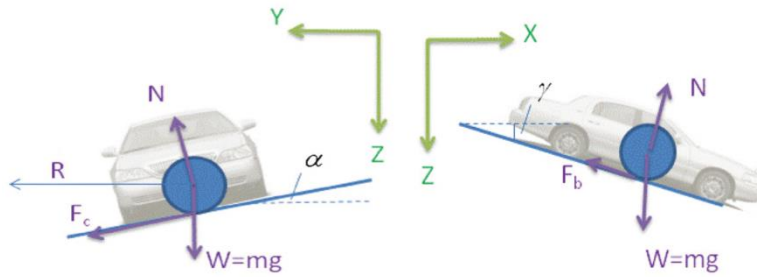
۲-۱-۱. مدل جرم نقطه‌ای^۱

مدل جرم نقطه‌ای در گذشته برای بررسی پاسخ‌های خودرو در حالت دوبعدی، برای دور زدن امتدادهای افقی، همراه با دور تحت سرعت ثابت، معرفی شد. این مدل، وسیله نقلیه را یک جسم که جرم آن در یک نقطه متمرکز شده است و سه نیروی نرمال به مرکز جرم آن به‌صورت شعاعی وارد می‌شود تعریف می‌کند. نیروهایی که به مرکز جرم وارد می‌شوند، نیروی گریز از مرکز، وزن خودرو و نیروی اصطکاک جانبی است (شکل ۱). مدل جرم نقطه‌ای که نسبتاً ساده است، بدون نقص نیست. اثرات روی‌هم‌افتادگی المان‌های افقی با المان‌های قائم را به‌طور کل نادیده می‌گیرد. زمانی که وسیله نقلیه به‌عنوان یک نقطه جرمی در نظر گرفته می‌شود توزیع نیروی اصطکاک بین چرخ جلو و عقب و چرخ بیرونی و داخلی در نظر گرفته نمی‌شود. علاوه بر این، فرمول‌های جرم نقطه‌ای فرض می‌کنند که وسیله نقلیه یک مسیر با شعاع مشخص را طی می‌کند؛ در حالی که این اتفاق عملاً رخ نمی‌دهد (هاروود، ۲۰۰۳). در نهایت، حالت رانندگی در این مدل، اجازه کاهش ضریب اصطکاک جانبی را حتی در موارد ترمزگیری و مانورهای اضطراری پیش‌بینی نشده نمی‌دهد (کتاراتوس، ۱۹۹۴).

داده‌اند. تکان‌ها و لرزش‌های مکرر می‌تواند روی خستگی و آسیب‌های سلامتی راننده تأثیر بگذارد. در این تحقیق، از مدل M-B با نرم‌افزار شبیه‌سازی Adams/Car استفاده شده است. تغییرات شتاب قائم و جانبی به‌عنوان معیار اندازه‌گیری راحتی راننده استفاده شده است. ما و همکاران (۲۰۱۵) نیز راحتی رانندگی را در سرعت‌ها و شیب‌های مختلف جاده با نرم‌افزار Carsim مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد که با افزایش شیب جاده و سرعت وسیله نقلیه، شتاب وارد بر وسیله نقلیه افزایش می‌یابد. به‌طوری که شتاب در سرعت ۵/۵، ۱۲۰ km/h برابر شتاب در سرعت ۵۰ km/h است. محققان دیگری نیز با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی Carsim و Adams/Car راحتی رانندگی تحت سرعت‌های مختلف را مورد مطالعه قرار داده‌اند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۰؛ وو و همکاران، ۲۰۱۵).

با توجه به اینکه مطالعه‌ای مستقیم روی عملکرد دینامیک خودرو در قوس‌های قائم صورت نگرفته است، در این تحقیق، به بررسی شتاب قائم قوس‌های قائم محذب و مقعر سهمی در شیب‌ها، سرعت‌ها و وسایل نقلیه مختلف، با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی دینامیک خودرو و مدل M-B پرداخته می‌شود. در کتاب سبز آشتو، روابط شتاب قائم در طراحی قوس قائم بر پایه مدل جرم نقطه‌ای است. این روابط فارغ از نوع وسیله نقلیه، بر اساس اختلاف جبری شیب تانژانت‌های ورودی و خروجی (A)، طول قوس و سرعت وسیله نقلیه می‌باشند. یکی از اهداف این تحقیق، مقایسه شتاب قائم حاصل از مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B در قوس‌های قائم است. اهداف دیگر این تحقیق بررسی تأثیر مقدار شیب تانژانت‌های ورودی و خروجی به‌جای A و تأثیر نوع وسیله نقلیه روی شتاب قائم می‌باشد.

^۱ - Point-mass model

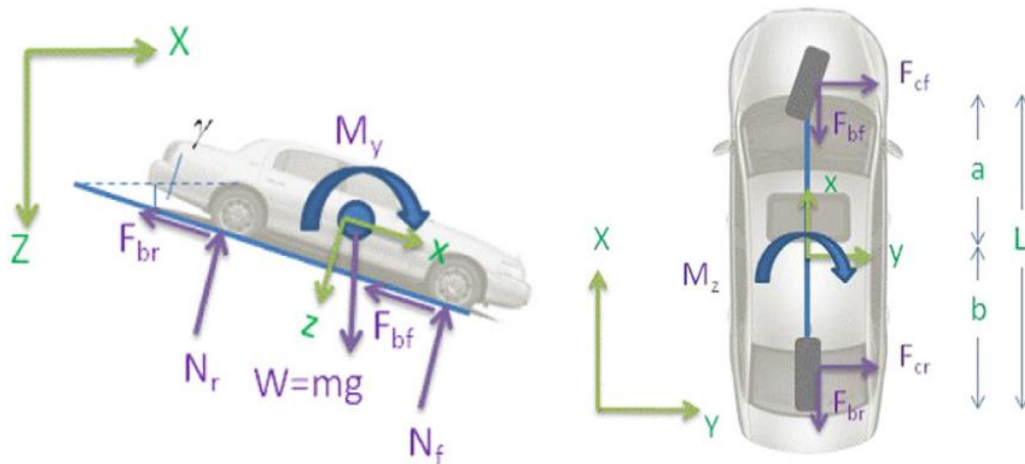


شکل ۱. نیروهای وارد بر وسیله نقلیه در مدل جرم نقطه‌ای (NCHRP 774، ۲۰۱۴)

۲-۱-۲. مدل دوچرخه پایدار^۱

اولین ایرادی که به مدل جرم نقطه‌ای وارد است این است که نیرو را با توجه به قابلیت خودرو بین محورها تقسیم نمی‌کند. برای خودروهای شخصی، معمولاً نیرو با نسبت ۶۰/۴۰ بین محور جلو و عقب تقسیم می‌شود. وقتی خودرو در قوس افقی قرار دارد، تغییرات وزن باعث افزایش نیروی اصطکاک جانبی در محور جلو بیشتر از محور عقب است. در واقع، نیروی جانبی تابعی از نسبت نیروی وزن توزیع شده روی محورها است و در صورتی که مسیر مسطح (بدون شیب و بدون دور) وجود داشته باشد، وزن به صورت کاملاً یکسان روی چرخ‌ها توزیع شده و نیروی جانبی نیز به همان نسبت توزیع می‌شود. این وضعیت برای قوس‌های افقی در سطح

مسطح، مزیتی به همراه دارد. به این صورت که بیشترین نیروی قائم فشاری رو به پایین وارد بر محوری است که به نیروی گوشه زیادی نیاز دارد. در حالی که در روی مسیر شیب‌دار و در مواقعی که کاهش شتاب وجود دارد، وزن از محور عقب به جلو انتقال پیدا می‌کند که می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای نسبت نیروهای قائم وارد بر هر چرخ در محور را تغییر دهد. اگر قوس افقی روی شیب قرار گرفته باشد، نیروی گوشه نسبتی از جرم بالای هر محور خواهد بود، نه وزن. این تفاوت بین نیروی گوشه منتج از جرم با نیروی اصطکاک منتج از وزن، دلیل مشکل ساز شدن استفاده از قوس افقی در شیب‌ها است (شکل ۲) (پاسجکا، ۲۰۰۶؛ NCHRP 774، ۲۰۱۴).



شکل ۲. نیروهای اعمال شده به وسیله نقلیه در مدل دوچرخه (NCHRP 774، ۲۰۱۴)

^۱- Steady-state bicycle model

۳-۱-۲. مدل چندبخشی^۱

مدل چندبخشی خودرو نیازمند استفاده از حل کننده عددی برای محاسبه معادلات دیفرانسیل است که از قوانین فیزیک و سینماتیک وسیله نقلیه محاسبه شده است. تعدادی از نرم افزارهایی که توانایی شبیه سازی مدل چندبخشی را دارند عبارت اند از: Carsim, Trucksim, HVOSM و ADAMS (HVOSM). (ADAMS, ۲۰۱۷, ۲۰۱۷).

شبیه سازی مدل دوچرخه شامل مدل های دینامیک تایلر، حرکت قائم تایلر، حرکت قائم سیستم تعلیق^۲ و حرکت های قائم، دوران جانبی^۳ و چرخش عمودی^۴ و همچنین حرکت های جانبی^۵، طولی^۶ و زاویه ای افقی^۷ می باشد. مدل دینامیک چندبخشی بسیار پیچیده می باشد و در مقابل، مدل دوچرخه دارای محاسبات بسیار زیاد جهت شبیه سازی است. نتایج مدل دوچرخه نیز کاملاً درست بوده و خطاهای آن بسیار کوچک است (وارونجیکار، ۲۰۱۱؛ NCHRP 774، ۲۰۱۴).

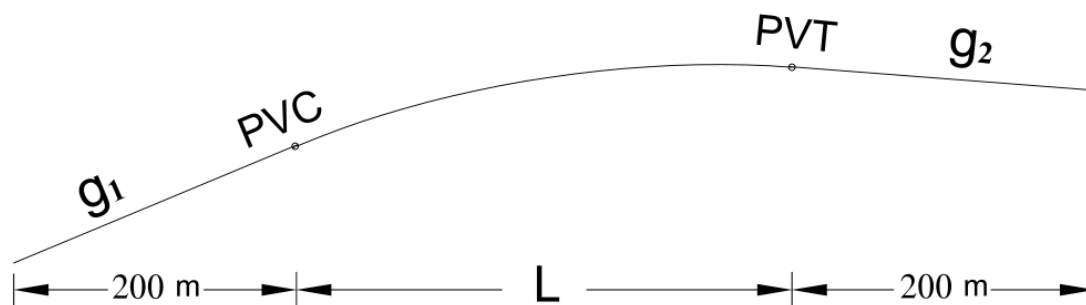
۳-۲. نرم افزارهای شبیه سازی دینامیک

نرم افزارهای Carsim و Trucksim از مجموعه نرم افزارهای بسته Mechanical Simulation Corporation هستند. Mechanical Simulation Corporation از پیشروترین شرکت های ارائه دهنده نرم افزارهای شبیه سازی رفتار وسیله نقلیه و ارائه دهنده پاسخ

های دینامیک به صورت سه بعدی در جاده های سه بعدی است. محصولات این شرکت شامل نرم افزارهای سواری، کامیون، موتورسیکلت و قطار است (Carsim, ۲۰۱۷). Carsim و Trucksim بر اساس اندازه گیری پاسخ های دینامیک وسیله نقلیه و مقایسه آن ها با یکدیگر، برای دستیابی به برگ خریدهای ایمنی و پایداری وسیله نقلیه طراحی توسعه یافته اند. Carsim و Trucksim قادر هستند رفتار دینامیک خودرو را با مدل M-B شبیه سازی کنند. این نرم افزارها در حال حاضر یکی از پُرکاربردترین برنامه های شبیه سازی حرکت وسایل نقلیه سبک و سنگین است (وارونجیکار، ۲۰۱۱). با توجه به توانایی این برنامه ها، به عنوان نرم افزار اصلی این تحقیق جهت تجزیه و تحلیل رفتار دینامیک وسایل نقلیه مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۲. مشخصات مسیر

جهت بررسی صرفاً شتاب قائم در قوس قائم و پرهیز از تأثیر و دخالت عامل خارجی روی نتایج، تمامی مسیرها از سه قسمت ساده مطابق شکل ۳ تشکیل شده است. در این تحقیق، رانندگان با سرعت ثابت از روی قوس قائم عبور خواهند کرد و مسیر حرکت خودرو در یک راستای مستقیم خواهد بود.



^۴- Pitch

^۵- Lateral motion

^۶- Longitudinal motion

^۷- Yaw

^۱- Multi-Body model

^۲- Suspension vertical motion

^۳- Roll

شکل ۳. جزییات مسیرهای تعریف شده در نرم افزار Carsim و Trucksim

های یکسان، پاسخ های دینامیک یکسانی به دست نیاید. جهت بررسی کامل تأثیر تنوع شیب ورودی و خروجی روی پاسخ های دینامیک خودرو، مسیرهای مختلفی با هر نوع شیب ورودی و خروجی تعریف می گردد. طبق جداول ارائه شده در کتاب سبز آشتو، برای هر شیبی محدودیت سرعتی تعریف شده است که بر اساس این جداول، مسیرها برحسب شیب طولی و سرعت مربوطه طراحی می شوند (جدول ۱ و ۲).

تنوع شیب ورودی و خروجی در طراحی قوس قائم در کتاب سبز آشتو در نظر گرفته نشده است. از دید ریاضی، تفاوت شیب ورودی و خروجی قوس تأثیری روی فاصله دید ندارد و طول قوس و فاصله دید به اختلاف جبری شیبها ($A = g_2 - g_1$) بستگی دارد و برای A های یکسان، طول و فاصله دید یکسانی به دست می آید. حال، شاید از جنبه دینامیک خودرویی، تنوع شیب ورودی و خروجی حائز اهمیت باشد و برای A

جدول ۱. حداکثر شیب طولی برای جاده های شریانی برون شهری (آشتو، ۲۰۱۸)

| حداکثر شیب (%) | | | | | | | | |
|--------------------------|-----|-----|-----|----|----|----|----|----------|
| نوع منطقه | | | | | | | | |
| برای سرعت های طرح (km/h) | | | | | | | | |
| ۱۳۰ | ۱۲۰ | ۱۱۰ | ۱۰۰ | ۹۰ | ۸۰ | ۷۰ | ۶۰ | |
| ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۴ | ۴ | ۵ | ۵ | هموار |
| ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۵ | ۵ | ۶ | ۶ | ناهموار |
| ۵ | ۵ | ۵ | ۶ | ۶ | ۷ | ۷ | ۸ | کوهستانی |

جدول ۲. حداکثر شیب طولی برای آزادراهها (آشتو، ۲۰۱۸)

| حداکثر شیب (%) | | | | | | |
|--------------------------|-----|-----|-----|----|----|----------|
| نوع منطقه | | | | | | |
| برای سرعت های طرح (km/h) | | | | | | |
| ۱۳۰ | ۱۲۰ | ۱۱۰ | ۱۰۰ | ۹۰ | ۸۰ | |
| ۳ | ۳ | ۳ | ۳ | ۴ | ۴ | هموار |
| ۴ | ۴ | ۴ | ۴ | ۵ | ۵ | ناهموار |
| - | - | ۵ | ۶ | ۶ | ۶ | کوهستانی |

۲-۶. انتخاب خودرو


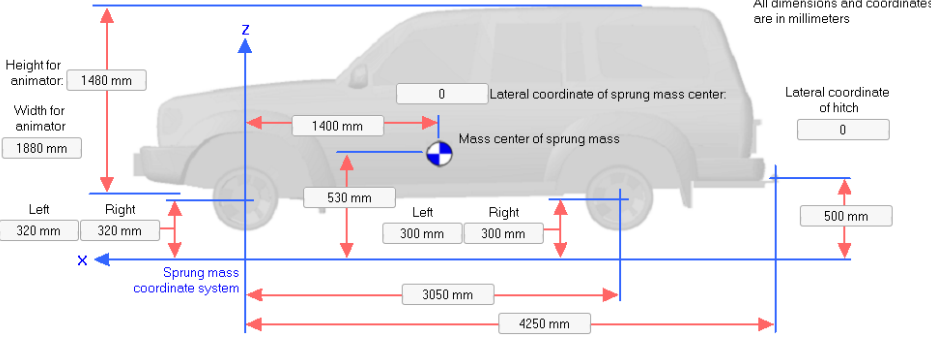

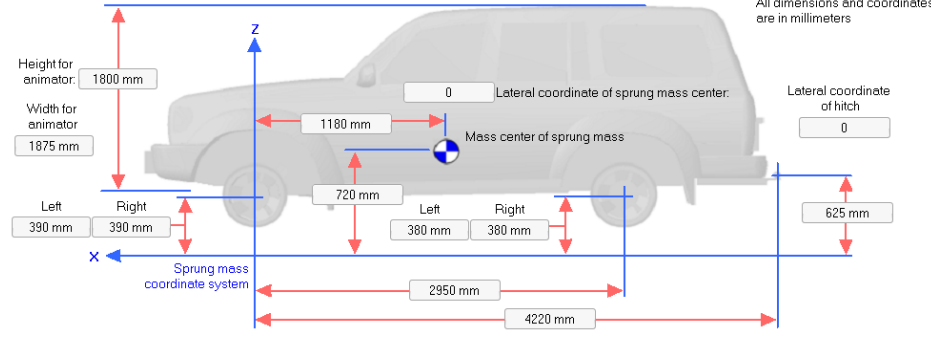

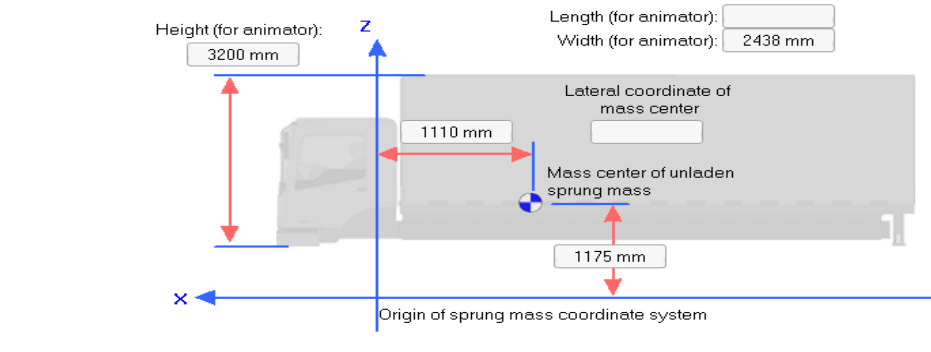
در این تحقیق، از سه وسیله نقلیه E-class Sedan، E- class SUV و 2A Truck - Conventional برای شبیه سازی استفاده شده است. مشخصات کامل وسایل نقلیه مورد استفاده در نرم افزار مطابق شکل ۴ ارائه می شود. این کلاس های وسیله نقلیه به دلیل داشتن بخش اعظمی از وسایل نقلیه در ناوگان فعلی حمل و نقل جاده ای انتخاب شده اند. هر یک از وسایل نقلیه منتخب، نماینده بازه خاصی از وسایل نقلیه موجود در سیستم حمل و نقل جاده ای می باشند که می توانند رفتار و پاسخ های دینامیک

۲-۴. سرعت وسیله نقلیه

سرعت های مورد استفاده در این تحقیق ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت می باشند.

۲-۵. قوس قائم

جهت طراحی قوس های قائم مقعر و محدب از روابط و ضوابط کتاب سبز آشتو ۲۰۱۸ استفاده شده است.

| اسم و شکل خودرو | مشخصات فنی |
|---|--|
| <p>E-Sedan</p>  | <p>All dimensions and coordinates are in millimeters</p>  |
| <p>E-SUV</p>  | <p>All dimensions and coordinates are in millimeters</p>  |
| <p>2A Truck Conventional</p>  |  |

شکل ۴. مشخصات فنی وسایل نقلیه استفاده شده در نرم‌افزارهای Carsim و Truksim

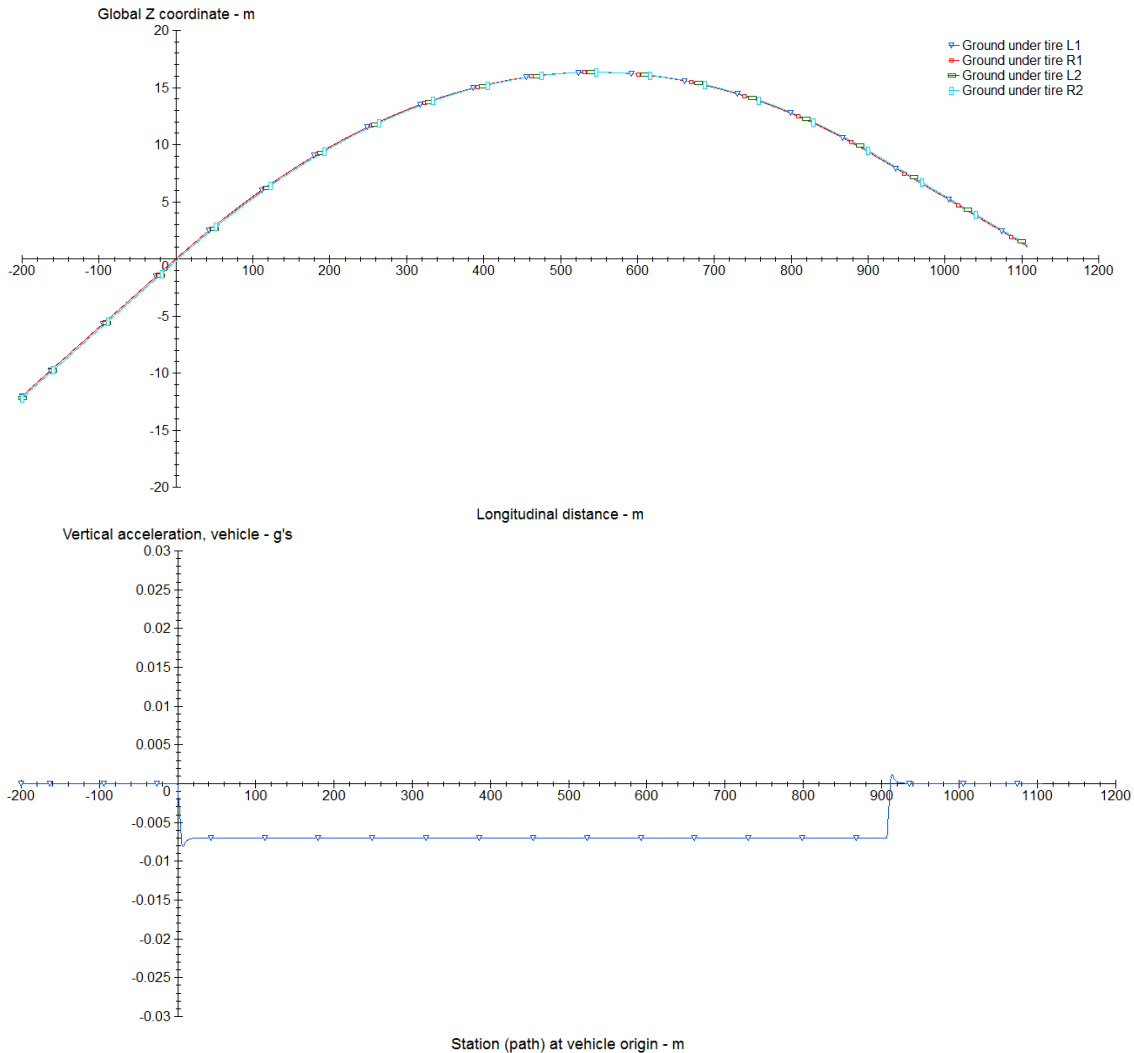
۳. نتایج و بحث

نمودارها، برای نمونه، برای یک نمودار برای قوس قائم‌محدب با خودروی E-Sedan با سرعت ۹۰ km/h تحت شیب‌های ورودی و خروجی به ترتیب +۶ و -۴ و یک نمودار دیگر برای قوس قائم‌مقعر با خودروی E-Sedan با سرعت ۸۰ km/h تحت شیب‌های ورودی و

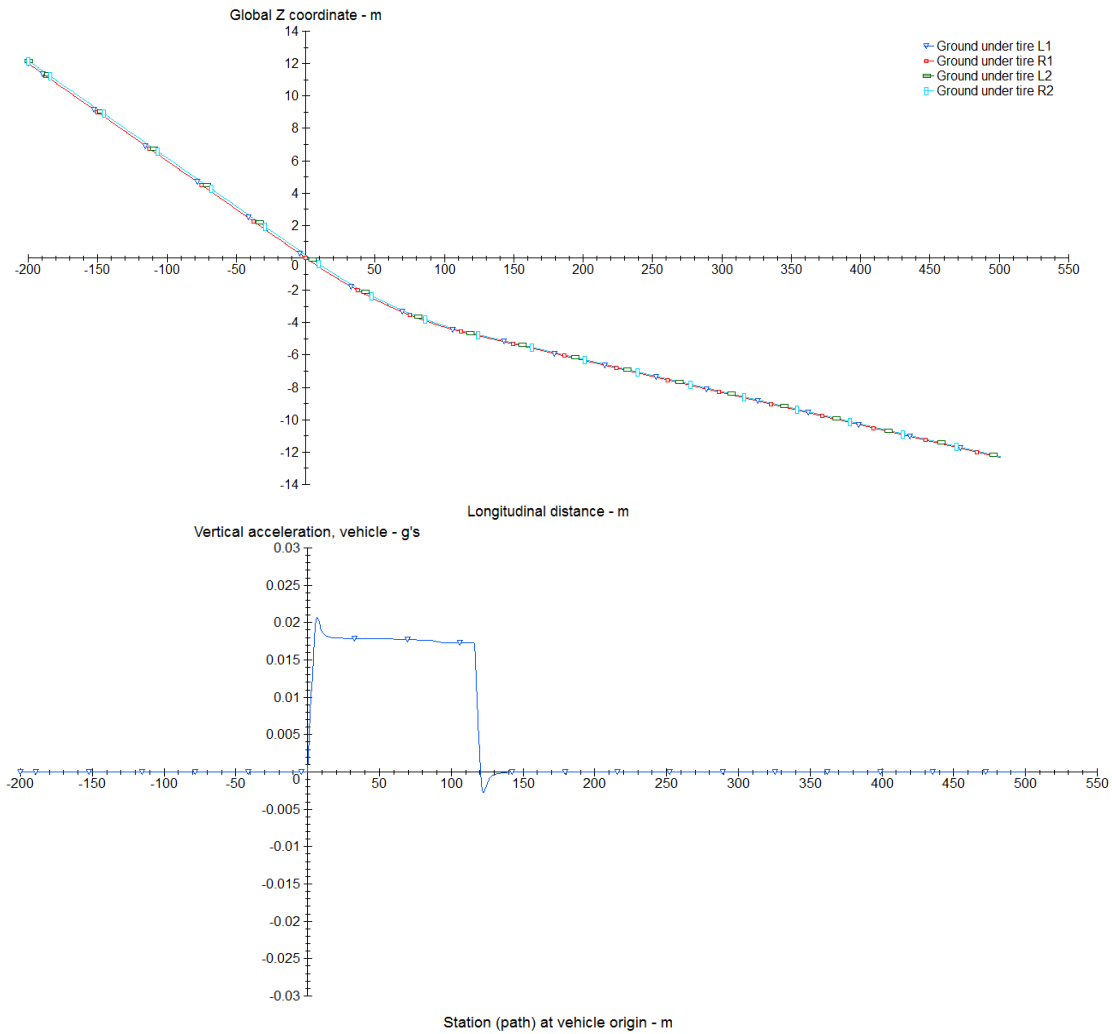
در این تحقیق، با توجه به ۱۵۰ مسیر منحصربه‌فرد و سه نوع وسیله نقلیه، مجموعاً ۴۵۰ تست شبیه‌سازی صورت گرفته است. با توجه به عدم امکان ارائه تمامی نمودارهای شتاب قائم - مسافت به علت تعداد زیاد

خروج از قوس به علت تغییر نرخ شیب از مسیر خطی به منحنی پرشی کوچک اتفاق می افتد که بیشترین شتاب قائم در نزدیکی این نقاط اتفاق می افتد. این روند در تمامی مسیرها تکرار می شود.

خروجی به ترتیب ۶- و ۲- در شکل های ۵ و ۶ ارائه می شود. شکل های ۵ و ۶ از دو نمودار تشکیل شده است. نمودار بالا، هندسه مسیر و نمودار پایین، شتاب قائم را نشان می دهد. با دقت در نمودار شتاب قائم - مسافت مشاهده می شود که در ابتدای ورود به قوس و انتهای



شکل ۵. دیاگرام شتاب قائم - مسافت، خودروی E-Sedan با سرعت ۹۰ km/h در مسیر $g_1 = +6$ و $g_2 = -6$



شکل ۶. دیاگرام شتاب قائم - مسافت، خودروی E-Sedan با سرعت ۸۰ km/h در مسیر $g_1 = -۲$ و $g_2 = -۶$

در جداول ۳ تا ۵، نتایج تست‌های شبیه‌سازی برای دو مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B برای تمامی مسیرها به ترتیب برای وسایل نقلیه سواری سدان، SUV و کامیون ارائه شده است. ستون اول جداول ۳ تا ۵ مشخصات مسیر را نشان می‌دهد که در آن عدد اول شیب مسیر ورودی به قوس قائم (g_1) و عدد دوم شیب مسیر خروجی از قوس قائم (g_2) است. شتاب قائم مربوط به مدل M-B (ستون سوم) از نتایج تست‌های شبیه‌سازی و شتاب قائم مربوط به مدل جرم نقطه‌ای (ستون چهارم) با توجه به رابطه (۴) به دست آمده است. شتاب قائم در قوس‌های قائم از معادله زیر به دست می‌آید

$$C = \frac{V^2}{12.96} \cdot \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right) \quad (۲)$$

$$y = \frac{(g_2 - g_1)}{2L} x^2 + g_1 x + h_1 \quad (۳)$$

با جایگذاری رابطه قوس قائم سهمی (معادله ۳) و حل معادله (۲)، مقدار شتاب قائم به صورت رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$C = \frac{(g_2 - g_1)V^2}{1296 \times L} \quad (۴)$$

که در آن C شتاب قائم (m/s^2)، V سرعت وسیله نقلیه (km/h)، g_1 و g_2 به ترتیب شیب مسیر ورودی به قوس و شیب مسیر خروجی از قوس (٪) و L طول قوس قائم (متر) است.

جدول ۳. مقایسه شتاب قائم خودروی Sedan حاصل از مدل M-B و مدل جرم نقطه‌ای تحت سرعت‌ها و مسیرها با شیب‌های

مختلف

| سرعت (km/h) | مسیر (g ₁ ,g ₂) | A | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | | سرعت (km/h) | مسیر (g ₁ ,g ₂) | A | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | | سرعت (km/h) | مسیر (g ₁ ,g ₂) | A | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | | | | | | | | |
|-------------|--|-------|---------------------------------------|---|-------------|--|-------|---------------------------------------|---|-------------|--|-----|---------------------------------------|---|-----|--------|----|-------|-------|--|--|
| | | | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | شتاب قائم مدل جرم نقطه‌ای (m/s ²) | | | | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | شتاب قائم مدل جرم نقطه‌ای (m/s ²) | | | | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | شتاب قائم مدل جرم نقطه‌ای (m/s ²) | | | | | | | |
| 60 | (-2,-8) | -6 | -0.08 | -0.07 | 70 | (-8,-6) | 2 | 0.22 | 0.18 | 80 | (0,-4) | -4 | -0.08 | -0.07 | | | | | | | |
| | (-2,8) | 10 | 0.19 | 0.16 | | (-8,0) | 8 | 0.20 | 0.17 | | (0,-6) | -6 | -0.08 | -0.07 | | | | | | | |
| | (-4,-8) | -4 | -0.09 | -0.08 | | (-8,2) | 10 | 0.20 | 0.17 | | (0,4) | 4 | 0.20 | 0.17 | | | | | | | |
| | (-4,8) | 12 | 0.19 | 0.16 | | (-8,4) | 12 | 0.21 | 0.17 | | (0,6) | 6 | 0.20 | 0.17 | | | | | | | |
| | (-6,-8) | -2 | -0.18 | -0.15 | | (-8,6) | 14 | 0.22 | 0.17 | | (2,-4) | -6 | -0.08 | -0.07 | | | | | | | |
| | (-6,8) | 14 | 0.19 | 0.16 | | (-8,8) | 16 | 0.23 | 0.17 | | (2,-6) | -8 | -0.08 | -0.07 | | | | | | | |
| | (-8,-2) | 6 | 0.19 | 0.16 | | (0,-8) | -8 | -0.09 | -0.07 | | (2,4) | 2 | 0.24 | 0.21 | | | | | | | |
| | (-8,4) | 4 | 0.20 | 0.17 | | (0,8) | 8 | 0.20 | 0.17 | | (2,6) | 4 | 0.20 | 0.17 | | | | | | | |
| | (-8,6) | 2 | 0.16 | 0.15 | | (2,-8) | -10 | -0.11 | -0.10 | | (4,-2) | -6 | -0.08 | -0.07 | | | | | | | |
| | (-8,0) | 8 | 0.19 | 0.16 | | (2,8) | 6 | 0.20 | 0.17 | | (4,-4) | -8 | -0.08 | -0.07 | | | | | | | |
| | (-8,2) | 10 | 0.19 | 0.16 | | (4,-8) | -12 | -0.08 | -0.07 | | (4,-6) | -10 | -0.08 | -0.07 | | | | | | | |
| | (-8,4) | 12 | 0.19 | 0.16 | | (4,8) | 4 | 0.20 | 0.17 | | (4,0) | -4 | -0.08 | -0.07 | | | | | | | |
| | (-8,6) | 14 | 0.21 | 0.16 | | (6,-8) | -14 | -0.08 | -0.07 | | (4,2) | -2 | -0.20 | -0.17 | | | | | | | |
| | (-8,8) | 16 | 0.21 | 0.16 | | (6,8) | 2 | 0.20 | 0.18 | | (4,6) | 2 | -0.24 | 0.21 | | | | | | | |
| | (0,-8) | -8 | -0.08 | -0.07 | | (8,-2) | -10 | -0.08 | -0.07 | | (6,-2) | -8 | -0.08 | -0.07 | | | | | | | |
| | (0,8) | 8 | 0.18 | 0.16 | | (8,4) | -12 | -0.08 | -0.07 | | (6,-4) | -10 | -0.08 | -0.07 | | | | | | | |
| | (2,-8) | -10 | -0.09 | -0.07 | | (8,6) | -14 | -0.08 | -0.07 | | (6,-6) | -12 | -0.08 | -0.07 | | | | | | | |
| | (2,8) | 6 | 0.18 | 0.16 | | (8,8) | -16 | -0.08 | -0.07 | | (6,0) | -6 | -0.08 | -0.07 | | | | | | | |
| | (4,-8) | -12 | -0.08 | -0.07 | | (8,0) | -8 | -0.08 | -0.07 | | (6,2) | -4 | -0.08 | -0.07 | | | | | | | |
| | (4,8) | 4 | 0.19 | 0.17 | | (8,2) | -6 | -0.08 | -0.07 | | (6,4) | -2 | -0.20 | -0.17 | | | | | | | |
| (6,-8) | -14 | -0.08 | -0.07 | (8,4) | -4 | -0.08 | -0.07 | (-2,-4) | -2 | -0.11 | -0.10 | | | | | | | | | | |
| (6,8) | 2 | 0.17 | 0.15 | (8,6) | -2 | -0.20 | -0.18 | (-2,-6) | -4 | -0.08 | -0.07 | | | | | | | | | | |
| (8,-2) | -10 | -0.08 | -0.07 | (-2,-4) | -2 | -0.20 | -0.17 | (-2,4) | 6 | 0.20 | 0.17 | | | | | | | | | | |
| (8,-4) | -12 | -0.08 | -0.07 | (-2,-6) | -4 | -0.08 | -0.07 | (-2,6) | 8 | 0.20 | 0.17 | | | | | | | | | | |
| (8,-6) | -14 | -0.08 | -0.07 | (-2,4) | 6 | 0.20 | 0.17 | (-4,-2) | 2 | 0.26 | 0.23 | | | | | | | | | | |
| (8,-8) | -16 | -0.08 | -0.07 | (-2,6) | 8 | 0.20 | 0.17 | (-4,-6) | -2 | -0.11 | -0.10 | | | | | | | | | | |
| (8,0) | -8 | -0.08 | -0.07 | (-4,-2) | 2 | 0.24 | 0.21 | (-4,0) | 4 | 0.20 | 0.17 | | | | | | | | | | |
| (8,2) | -6 | -0.08 | -0.07 | (-4,-6) | -2 | -0.20 | -0.17 | (-4,2) | 6 | 0.20 | 0.17 | | | | | | | | | | |
| (8,4) | -4 | -0.09 | -0.08 | (-4,0) | 4 | 0.20 | 0.17 | (-4,4) | 8 | 0.20 | 0.17 | | | | | | | | | | |
| (8,6) | -2 | -0.17 | -0.15 | (-4,2) | 6 | 0.20 | 0.17 | (-4,6) | 10 | 0.20 | 0.17 | | | | | | | | | | |
| 70 | (-2,-8) | -6 | -0.08 | -0.07 | 80 | (-4,4) | 8 | 0.20 | 0.17 | 90 | (-6,-2) | 4 | 0.20 | 0.17 | 100 | (-2,0) | 2 | 0.30 | 0.26 | | |
| | (-2,8) | 10 | 0.20 | 0.17 | | (-4,6) | 10 | 0.20 | 0.17 | | (-6,-4) | 2 | 0.21 | 0.23 | | (-2,2) | 4 | 0.21 | 0.17 | | |
| | (-4,-8) | -4 | -0.09 | -0.07 | | (-6,-2) | 4 | 0.20 | 0.17 | | (-6,0) | 6 | 0.20 | 0.17 | | (0,-2) | -2 | -0.09 | -0.07 | | |
| | (-4,8) | 12 | 0.20 | 0.17 | | (-6,-4) | 2 | 0.25 | 0.21 | | (-6,2) | 8 | 0.20 | 0.17 | | (0,2) | 2 | 0.30 | 0.26 | | |
| | (-6,-8) | -2 | -0.21 | -0.18 | | (-6,0) | 6 | 0.20 | 0.17 | | (-6,4) | 10 | 0.20 | 0.17 | | (2,-2) | -4 | -0.08 | -0.07 | | |
| | (-6,8) | 14 | 0.20 | 0.17 | | (-6,2) | 8 | 0.20 | 0.17 | | (-6,6) | 12 | 0.20 | 0.17 | | (2,0) | -2 | -0.08 | -0.07 | | |
| | (-8,-2) | 6 | 0.20 | 0.17 | | (-6,4) | 10 | 0.20 | 0.17 | | (0,-4) | -4 | -0.08 | -0.07 | | (2,-2) | -4 | -0.07 | -0.06 | | |
| | (-8,4) | 4 | 0.21 | 0.17 | | (-6,6) | 12 | 0.20 | 0.17 | | (0,-6) | -6 | -0.08 | -0.07 | | (2,0) | -2 | -0.07 | -0.06 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

جدول ۴. مقایسه شتاب قائم خودروی SUV حاصل از مدل M-B و مدل جرم نقطه‌ای تحت سرعت‌ها و مسیرها با شیب‌های

مختلف

| سرعت (km/h) | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | | | | سرعت (km/h) | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | | | | سرعت (km/h) | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | | | | | | | | |
|-------------|--|-------|-------|---------|-------------|--|-------|---------|---------|-------------|--|--------|--------|-------|-------|--------|-----|-------|-------|
| | مسیر (g ₁ ,g ₂) | A | | | | مسیر (g ₁ ,g ₂) | A | | | | مسیر (g ₁ ,g ₂) | A | | | | | | | |
| 60 | (-2,-8) | -6 | -0.10 | -0.07 | 70 | (-8,-6) | 2 | 0.25 | 0.18 | 80 | (0,-4) | -4 | -0.09 | -0.07 | 90 | (0,4) | 4 | 0.22 | 0.17 |
| | (-2,8) | 10 | 0.21 | 0.16 | | (-8,0) | 8 | 0.24 | 0.17 | | (0,-6) | -6 | -0.09 | -0.07 | | (0,6) | 6 | 0.22 | 0.17 |
| | (-4,-8) | -4 | -0.10 | -0.08 | | (-8,2) | 10 | 0.24 | 0.17 | | (0,4) | 4 | 0.23 | 0.17 | | (2,-4) | -6 | -0.09 | -0.07 |
| | (-4,8) | 12 | 0.21 | 0.16 | | (-8,4) | 12 | 0.24 | 0.17 | | (0,6) | 6 | 0.23 | 0.17 | | (2,-6) | -8 | -0.09 | -0.07 |
| | (-6,-8) | -2 | -0.21 | -0.15 | | (-8,6) | 14 | 0.24 | 0.17 | | (2,-4) | -6 | -0.09 | -0.07 | | (2,4) | 2 | 0.30 | 0.23 |
| | (-6,8) | 14 | 0.22 | 0.16 | | (-8,8) | 16 | 0.24 | 0.17 | | (2,-6) | -8 | -0.09 | -0.07 | | (2,6) | 4 | 0.22 | 0.17 |
| | (-8,-2) | 6 | 0.22 | 0.16 | | (0,-8) | -8 | -0.10 | -0.10 | | (2,-8) | -8 | -0.09 | -0.07 | | (4,-2) | -6 | -0.09 | -0.07 |
| | (-8,4) | 4 | 0.23 | 0.17 | | (0,8) | 8 | 0.22 | 0.17 | | (2,4) | 2 | 0.27 | 0.21 | | (4,-4) | -8 | -0.09 | -0.07 |
| | (-8,-6) | 2 | 0.18 | 0.15 | | (2,-8) | -10 | -0.10 | -0.07 | | (2,6) | 4 | 0.23 | 0.17 | | (4,-6) | -10 | -0.09 | -0.07 |
| | (-8,0) | 8 | 0.22 | 0.16 | | (2,8) | 6 | 0.22 | 0.17 | | (4,-2) | -6 | -0.09 | -0.07 | | (4,-8) | -8 | -0.09 | -0.07 |
| | (-8,2) | 10 | 0.22 | 0.16 | | (4,-8) | -12 | -0.10 | -0.07 | | (4,-4) | -8 | -0.09 | -0.07 | | (4,0) | -4 | -0.09 | -0.07 |
| | (-8,4) | 12 | 0.22 | 0.16 | | (4,8) | 4 | 0.23 | 0.17 | | (4,-6) | -10 | -0.09 | -0.07 | | (4,2) | -2 | -0.13 | -0.10 |
| | (-8,6) | 14 | 0.22 | 0.16 | | (6,-8) | -14 | -0.10 | -0.07 | | (4,0) | -4 | -0.09 | -0.07 | | (4,6) | 2 | 0.30 | 0.23 |
| | (-8,8) | 16 | 0.23 | 0.16 | | (6,8) | 2 | 0.23 | 0.18 | | (4,2) | -2 | -0.22 | -0.17 | | (6,-2) | -8 | -0.09 | -0.07 |
| | (0,-8) | -8 | -0.10 | -0.07 | | (6,8) | 2 | 0.23 | 0.18 | | (4,6) | 2 | 0.26 | 0.21 | | (6,-4) | -10 | -0.09 | -0.07 |
| | (0,8) | 8 | 0.21 | 0.16 | | (8,-2) | -10 | -0.10 | -0.07 | | (6,-2) | -8 | -0.09 | -0.07 | | (6,-6) | -12 | -0.09 | -0.07 |
| | (2,-8) | -10 | -0.10 | -0.07 | | (8,-4) | -12 | -0.10 | -0.07 | | (6,-4) | -10 | -0.09 | -0.07 | | (6,0) | -6 | -0.09 | -0.07 |
| | (2,8) | 6 | 0.21 | 0.16 | | (8,-6) | -14 | -0.10 | -0.07 | | (6,-6) | -12 | -0.09 | -0.07 | | (6,2) | -4 | -0.09 | -0.07 |
| | (4,-8) | -12 | -0.10 | -0.07 | | (8,-8) | -16 | -0.10 | -0.07 | | (6,0) | -6 | -0.09 | -0.07 | | (6,4) | -2 | -0.09 | -0.10 |
| | (4,8) | 4 | 0.22 | 0.17 | | (8,0) | -8 | -0.10 | -0.07 | | (6,2) | -4 | -0.09 | -0.07 | | (-2,0) | 2 | 0.34 | 0.26 |
| (6,-8) | -14 | -0.10 | -0.07 | (8,2) | -6 | -0.10 | -0.07 | (6,4) | -2 | -0.23 | -0.17 | (-2,2) | 4 | 0.23 | 0.17 | | | | |
| (6,8) | 2 | 0.20 | 0.15 | (8,4) | -4 | -0.10 | -0.07 | (-2,-4) | -2 | -0.13 | -0.10 | (0,-2) | -2 | -0.10 | -0.07 | | | | |
| (8,-2) | -10 | -0.10 | -0.07 | (8,6) | -2 | -0.24 | -0.18 | (-2,-6) | -4 | -0.09 | -0.07 | (0,2) | 2 | 0.34 | 0.26 | | | | |
| (8,-4) | -12 | -0.10 | -0.07 | (-2,-4) | -2 | -0.22 | -0.17 | (-2,4) | 6 | 0.22 | 0.17 | (2,-2) | -4 | -0.09 | -0.07 | | | | |
| (8,-6) | -14 | -0.10 | -0.07 | (-2,-6) | -4 | -0.09 | -0.07 | (-2,6) | 8 | 0.22 | 0.17 | (2,0) | -2 | -0.09 | -0.07 | | | | |
| (8,-8) | -16 | -0.10 | -0.07 | (-2,4) | 6 | 0.22 | 0.17 | (-4,-2) | 2 | 0.30 | 0.23 | (-2,0) | 2 | 0.37 | 0.28 | | | | |
| (8,0) | -8 | -0.10 | -0.07 | (-2,6) | 8 | 0.22 | 0.17 | (-4,-6) | -2 | -0.13 | -0.10 | (-2,2) | 4 | 0.23 | 0.17 | | | | |
| (8,2) | -6 | -0.10 | -0.07 | (-4,-2) | 2 | 0.27 | 0.21 | (-4,0) | 4 | 0.22 | 0.17 | (0,-2) | -2 | -0.09 | -0.07 | | | | |
| (8,4) | -4 | -0.10 | -0.08 | (-4,-6) | -2 | -0.23 | -0.17 | (-4,2) | 6 | 0.22 | 0.17 | (0,2) | 2 | 0.37 | 0.28 | | | | |
| (8,6) | -2 | -0.20 | -0.15 | (-4,0) | 4 | 0.23 | 0.17 | (-4,4) | 8 | 0.22 | 0.17 | (2,-2) | -4 | -0.08 | -0.06 | | | | |
| 70 | (-2,-8) | -6 | -0.10 | -0.07 | (-4,2) | 6 | 0.23 | 0.17 | (-4,6) | 10 | 0.22 | 0.17 | (2,0) | -2 | -0.09 | -0.07 | | | |
| | (-2,8) | 10 | 0.22 | 0.17 | (-4,4) | 8 | 0.23 | 0.17 | (-6,-2) | 4 | 0.22 | 0.17 | (-2,0) | 2 | 0.40 | 0.31 | | | |
| | (-4,-8) | -4 | -0.11 | -0.07 | (-4,6) | 10 | 0.23 | 0.17 | (-6,-4) | 2 | 0.30 | 0.23 | (-2,2) | 4 | 0.24 | 0.18 | | | |
| | (-4,8) | 12 | 0.22 | 0.17 | (-6,-2) | 4 | 0.23 | 0.17 | (-6,0) | 6 | 0.22 | 0.17 | (0,-2) | -2 | -0.08 | -0.06 | | | |
| | (-6,-8) | -2 | -0.25 | -0.18 | (-6,-4) | 2 | 0.27 | 0.21 | (-6,2) | 8 | 0.22 | 0.17 | (0,2) | 2 | 0.40 | 0.31 | | | |
| | (-6,8) | 14 | 0.23 | 0.17 | (-6,0) | 6 | 0.23 | 0.17 | (-6,4) | 10 | 0.22 | 0.17 | (2,-2) | -4 | -0.08 | -0.06 | | | |
| | (-8,-2) | 6 | 0.23 | 0.17 | (-6,2) | 8 | 0.23 | 0.17 | (-6,6) | 12 | 0.22 | 0.17 | (2,0) | -2 | -0.08 | -0.06 | | | |
| | (-8,4) | 4 | 0.24 | 0.17 | (-6,4) | 10 | 0.23 | 0.17 | (0,-4) | -4 | -0.09 | -0.07 | | | | | | | |
| | | | | (-6,6) | 12 | 0.23 | 0.17 | (0,-6) | -6 | -0.09 | -0.07 | | | | | | | | |

جدول ۵. مقایسه شتاب قائم کامیون حاصل از مدل M-B و مدل جرم نقطه‌ای تحت سرعت‌ها و مسیرهای با شیب‌های مختلف

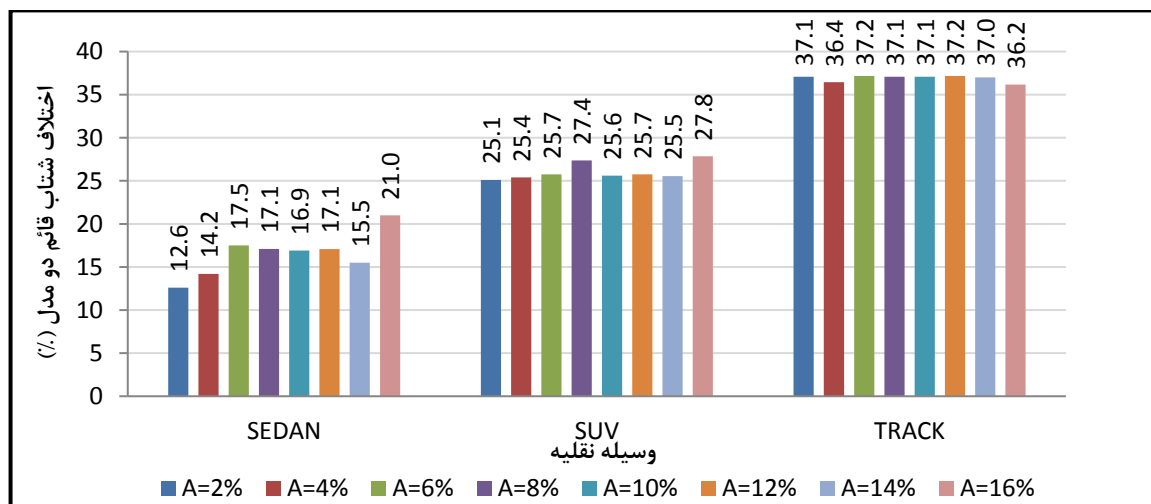
| سرعت (km/h) | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | | | | سرعت (km/h) | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | | | | سرعت (km/h) | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | | | | | | | | |
|-------------|--|-------|---------------------------------------|---|-------------|--|------|---------------------------------------|---|-------------|--|--------|---------------------------------------|---|-------|--------|-----|-------|-------|
| | مسیر (g ₁ ,g ₂) | A | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | شتاب قائم مدل جرم نقطه‌ای (m/s ²) | | مسیر (g ₁ ,g ₂) | A | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | شتاب قائم مدل جرم نقطه‌ای (m/s ²) | | مسیر (g ₁ ,g ₂) | A | شتاب قائم مدل M-B (m/s ²) | شتاب قائم مدل جرم نقطه‌ای (m/s ²) | | | | | |
| 60 | (-2,-8) | -6 | -0.12 | -0.07 | 70 | (-8,-6) | 2 | 0.26 | 0.18 | 80 | (0,-4) | -4 | -0.11 | -0.07 | 90 | (0,4) | 4 | 0.27 | 0.17 |
| | (-2,8) | 10 | 0.26 | 0.16 | | (-8,0) | 8 | 0.24 | 0.17 | | (0,-6) | -6 | -0.11 | -0.07 | | (0,6) | 6 | 0.27 | 0.17 |
| | (-4,-8) | -4 | -0.12 | -0.08 | | (-8,2) | 10 | 0.24 | 0.17 | | (0,4) | 4 | 0.26 | 0.17 | | (2,-4) | -6 | -0.12 | -0.07 |
| | (-4,8) | 12 | 0.26 | 0.16 | | (-8,4) | 12 | 0.24 | 0.17 | | (0,6) | 6 | 0.26 | 0.17 | | (2,-6) | -8 | -0.12 | -0.07 |
| | (-6,-8) | -2 | -0.25 | -0.15 | | (-8,6) | 14 | 0.24 | 0.17 | | (2,-4) | -6 | -0.11 | -0.07 | | (2,4) | 2 | 0.39 | 0.23 |
| | (-6,8) | 14 | 0.26 | 0.16 | | (-8,8) | 16 | 0.24 | 0.17 | | (2,-6) | -8 | -0.11 | -0.07 | | (2,6) | 4 | 0.27 | 0.17 |
| | (-8,-2) | 6 | 0.25 | 0.16 | | (0,-8) | -8 | -0.11 | -0.10 | | (2,4) | 2 | 0.32 | 0.21 | | (4,-2) | -6 | -0.12 | -0.07 |
| | (-8,4) | 4 | 0.26 | 0.17 | | (0,8) | 8 | 0.25 | 0.17 | | (2,6) | 4 | 0.27 | 0.17 | | (4,-4) | -8 | -0.12 | -0.07 |
| | (-8,6) | 2 | 0.21 | 0.15 | | (2,-8) | -10 | -0.11 | -0.07 | | (4,-2) | -6 | -0.11 | -0.07 | | (4,-6) | -10 | -0.12 | -0.07 |
| | (-8,8) | 8 | 0.26 | 0.16 | | (2,8) | 6 | 0.25 | 0.17 | | (4,-4) | -8 | -0.11 | -0.07 | | (4,0) | -4 | -0.12 | -0.07 |
| | (-8,2) | 10 | 0.26 | 0.16 | | (4,-8) | -12 | -0.11 | -0.07 | | (4,-6) | -10 | -0.11 | -0.07 | | (4,2) | -2 | -0.16 | -0.10 |
| | (-8,4) | 12 | 0.25 | 0.16 | | (4,8) | 4 | 0.25 | 0.17 | | (4,0) | -4 | -0.11 | -0.07 | | (4,6) | 2 | 0.38 | 0.23 |
| | (-8,6) | 14 | 0.26 | 0.16 | | (6,-8) | -14 | -0.10 | -0.07 | | (4,2) | -2 | -0.27 | -0.17 | | (6,-2) | -8 | -0.11 | -0.07 |
| | (-8,8) | 16 | 0.26 | 0.16 | | (6,8) | 2 | 0.24 | 0.18 | | (4,6) | 2 | 0.32 | 0.21 | | (6,-4) | -10 | -0.11 | -0.07 |
| | (0,-8) | -8 | -0.12 | -0.07 | | (8,-2) | -10 | -0.10 | -0.07 | | (6,-2) | -8 | -0.11 | -0.07 | | (6,-6) | -12 | -0.11 | -0.07 |
| | (0,8) | 8 | 0.26 | 0.16 | | (8,-4) | -12 | -0.10 | -0.07 | | (6,-4) | -10 | -0.11 | -0.07 | | (6,0) | -6 | -0.11 | -0.07 |
| | (2,-8) | -10 | -0.12 | -0.07 | | (8,-6) | -14 | -0.10 | -0.07 | | (6,-6) | -12 | -0.11 | -0.07 | | (6,2) | -4 | -0.11 | -0.07 |
| | (2,8) | 6 | 0.26 | 0.16 | | (8,-8) | -16 | -0.10 | -0.07 | | (6,0) | -6 | -0.11 | -0.07 | | (6,4) | -2 | -0.11 | -0.10 |
| | (4,-8) | -12 | -0.12 | -0.07 | | (8,0) | -8 | -0.10 | -0.07 | | (6,2) | -4 | -0.11 | -0.07 | | (-2,0) | 2 | 0.39 | 0.26 |
| | (4,8) | 4 | 0.26 | 0.17 | | (8,2) | -6 | -0.10 | -0.07 | | (6,4) | -2 | -0.25 | -0.17 | | (-2,2) | 4 | 0.30 | 0.17 |
| | (6,-8) | -14 | -0.11 | -0.07 | | (8,4) | -4 | -0.10 | -0.07 | | (-2,-4) | -2 | -0.17 | -0.10 | | (0,-2) | -2 | -0.13 | -0.07 |
| | (6,8) | 2 | 0.25 | 0.15 | | (8,6) | -2 | -0.22 | -0.18 | | (-2,-6) | -4 | -0.12 | -0.07 | | (0,2) | 2 | 0.45 | 0.26 |
| | (8,-2) | -10 | -0.11 | -0.07 | | (-2,-4) | -2 | -0.26 | -0.17 | | (-2,4) | 6 | 0.27 | 0.17 | | (2,-2) | -4 | -0.11 | -0.07 |
| | (8,-4) | -12 | -0.11 | -0.07 | | (-2,-6) | -4 | -0.11 | -0.07 | | (-2,6) | 8 | 0.27 | 0.17 | | (2,0) | -2 | -0.11 | -0.07 |
| | (8,-6) | -14 | -0.11 | -0.07 | | (-2,4) | 6 | 0.26 | 0.17 | | (-4,-2) | 2 | 0.38 | 0.23 | | (-2,0) | 2 | 0.51 | 0.28 |
| | (8,-8) | -16 | -0.11 | -0.07 | | (-2,6) | 8 | 0.26 | 0.17 | | (-4,-6) | -2 | -0.17 | -0.10 | | (-2,2) | 4 | 0.30 | 0.17 |
| | (8,0) | -8 | -0.12 | -0.07 | | (-4,-2) | 2 | 0.31 | 0.21 | | (-4,0) | 4 | 0.27 | 0.17 | | (0,-2) | -2 | -0.12 | -0.07 |
| | (8,2) | -6 | -0.12 | -0.07 | | (-4,-6) | -2 | -0.26 | -0.17 | | (-4,2) | 6 | 0.27 | 0.17 | | (0,2) | 2 | 0.51 | 0.28 |
| (8,4) | -4 | -0.12 | -0.08 | (-4,0) | 4 | 0.26 | 0.17 | (-4,4) | 8 | 0.27 | 0.17 | (2,-2) | -4 | -0.12 | -0.06 | | | | |
| (8,6) | -2 | -0.23 | -0.15 | (-4,2) | 6 | 0.26 | 0.17 | (-4,6) | 10 | 0.27 | 0.17 | (2,0) | -2 | -0.12 | -0.07 | | | | |
| 70 | (-2,-8) | -6 | -0.11 | -0.07 | 80 | (-4,4) | 8 | 0.26 | 0.17 | 90 | (-6,-2) | 4 | 0.27 | 0.17 | 100 | (-2,0) | 2 | 0.59 | 0.31 |
| | (-2,8) | 10 | 0.25 | 0.17 | | (-4,6) | 10 | 0.26 | 0.17 | | (-6,-4) | 2 | 0.37 | 0.23 | | (-2,2) | 4 | 0.33 | 0.18 |
| | (-4,-8) | -4 | -0.11 | -0.07 | | (-6,-2) | 4 | 0.26 | 0.17 | | (-6,0) | 6 | 0.27 | 0.17 | | (0,-2) | -2 | -0.11 | -0.06 |
| | (-4,8) | 12 | 0.24 | 0.17 | | (-6,-4) | 2 | 0.31 | 0.21 | | (-6,2) | 8 | 0.27 | 0.17 | | (0,2) | 2 | 0.57 | 0.31 |
| | (-6,-8) | -2 | -0.20 | -0.18 | | (-6,0) | 6 | 0.26 | 0.17 | | (-6,4) | 10 | 0.27 | 0.17 | | (2,-2) | -4 | -0.11 | -0.06 |
| | (-6,8) | 14 | 0.25 | 0.17 | | (-6,2) | 8 | 0.26 | 0.17 | | (-6,6) | 12 | 0.27 | 0.17 | | (2,0) | -2 | -0.11 | -0.06 |
| | (-8,-2) | 6 | 0.24 | 0.17 | | (-6,4) | 10 | 0.26 | 0.17 | | (0,-4) | -4 | -0.12 | -0.07 | | | | | |
| | (-8,2) | 4 | 0.25 | 0.17 | | (-6,6) | 12 | 0.26 | 0.17 | | (0,6) | -6 | -0.12 | -0.07 | | | | | |

۰/۱۷ و شتاب قائم حاصل از مدل M-B، 0.23 m/s^2 است و برای کامیون با سرعت 80 km/h در مسیر فوق‌الذکر، شتاب قائم حاصل از مدل جرم نقطه‌ای 0.26 m/s^2 است. نتیجه، نشان از افزایش شتاب قائم با تغییر خودرو به SUV و کامیون می‌دهد. با توجه به رابطه (۴)، شتاب قائم در مدل جرم نقطه‌ای فارغ از نوع و جرم وسیله نقلیه مقدارش ثابت است. برعکس، شتاب قائم در مدل M-B از جرم و نوع وسیله نقلیه تأثیر می‌پذیرد و مقدارش متغیر است. به مانند مثال ارائه شده، در تمامی مسیرها، شتاب قائم کامیون بیشتر از SUV و شتاب قائم SUV نیز بیشتر از سواری است.

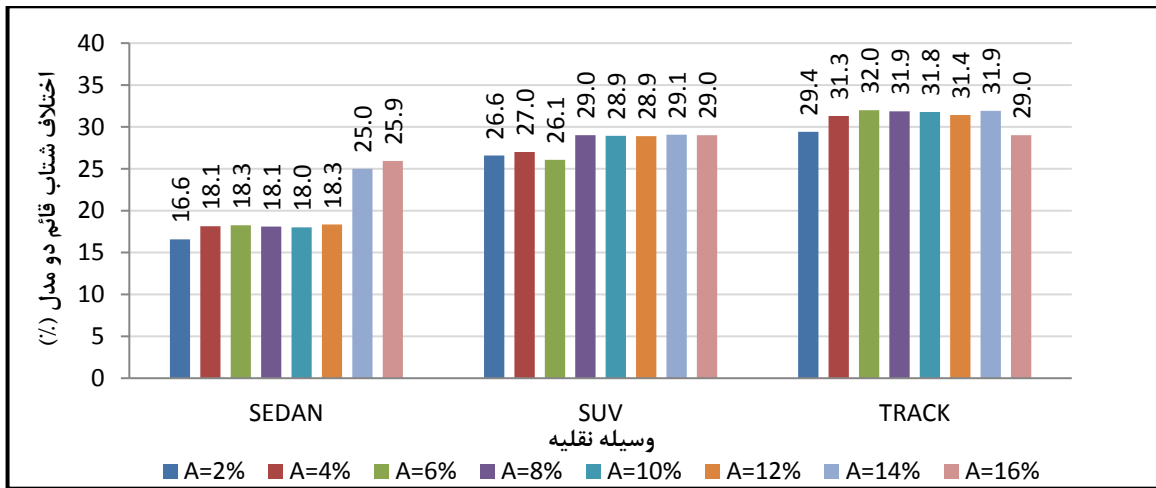
در شکل‌های ۷ تا ۱۳، حداکثر اختلاف شتاب قائم بین مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B برای |A| ها و وسایل نقلیه مختلف در سرعت‌های مربوطه به صورت درصدی آورده شده است. به عبارت دیگر، این شکل‌ها، میزان برآورد کم شتاب قائم مدل جرم نقطه‌ای نسبت به مدل M-B را نشان می‌دهند.

نتایج جداول ۳ تا ۵ نشان می‌دهد که اختلاف قابل ملاحظه‌ای در شتاب قائم حاصل از مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B در تمامی مسیرها وجود دارد. برای مثال، شتاب قائم حاصل از مدل جرم نقطه‌ای برای خودروی Sedan با سرعت 80 km/h در مسیری با شیب‌های ۶- و ۲- درصد (شکل ۶) 0.17 m/s^2 و شتاب قائم حاصل از مدل M-B، 0.20 m/s^2 است. در واقع، مدل جرم نقطه‌ای در این مسیر نسبت به مدل M-B، شتاب قائم را برای این خودرو با این سرعت، $16/15$ درصد کمتر برآورد کرده است. همین نتایج در تمامی مسیرها اتفاق می‌افتد و می‌توان بیان کرد که مدل جرم نقطه‌ای شتاب قائم را نسبت به مدل M-B کمتر برآورد می‌کند.

پارامتر مهم دیگری که می‌تواند در طراحی‌های قوس قائم در نظر گرفته شود میزان تأثیر نوع خودرو روی شتاب قائم حین عبور از روی قوس قائم می‌باشد. برای نمونه، نتایج همان مسیر فوق‌الذکر برای هر دو وسیله نقلیه دیگر نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطابق جدول ۴، برای خودروی SUV با سرعت 80 km/h در مسیر فوق‌الذکر، شتاب قائم حاصل از مدل جرم نقطه‌ای 0.26 m/s^2

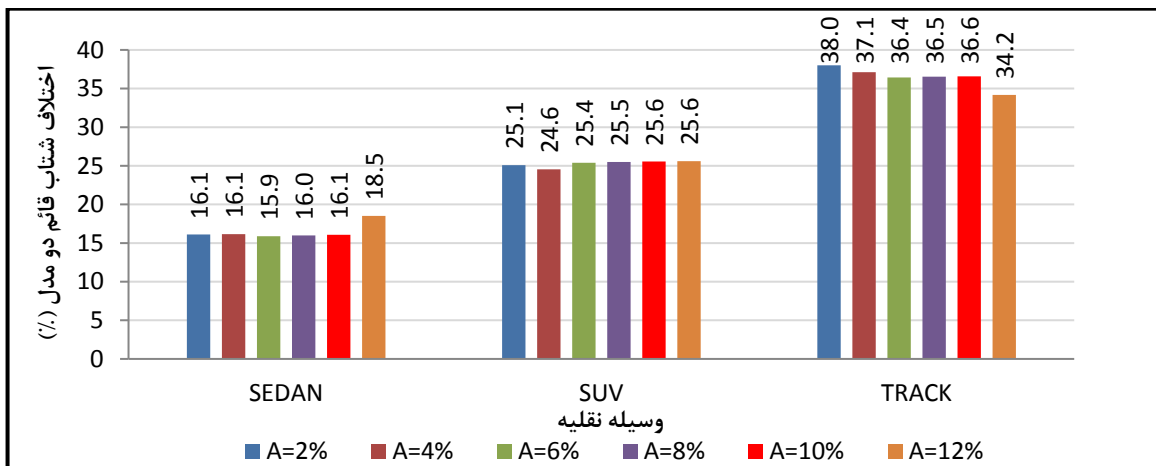


شکل ۷. حداکثر اختلاف شتاب قائم حاصل از مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B برای |A| ها و وسایل نقلیه مختلف در سرعت 60 km/h



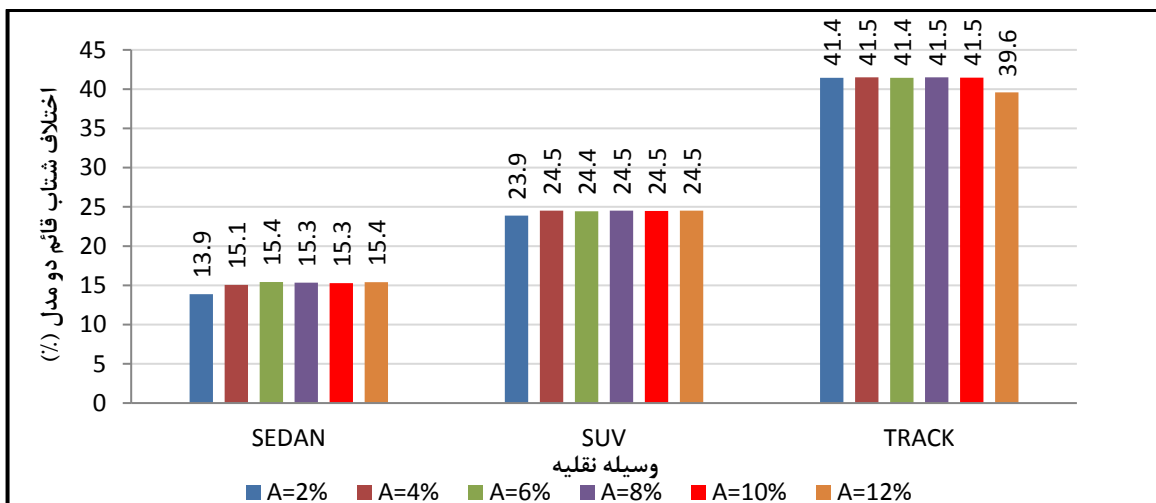
شکل ۸. حداکثر اختلاف شتاب قائم حاصل از مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B برای |A| ها و وسایل نقلیه مختلف در سرعت

۷۰ km/h



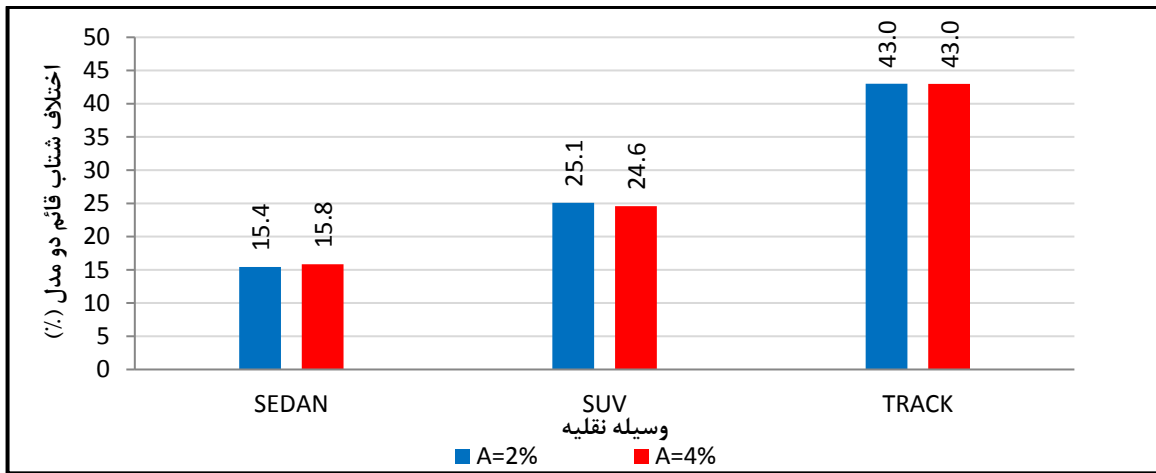
شکل ۹. حداکثر اختلاف شتاب قائم حاصل از مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B برای |A| ها و وسایل نقلیه مختلف در سرعت

۸۰ km/h



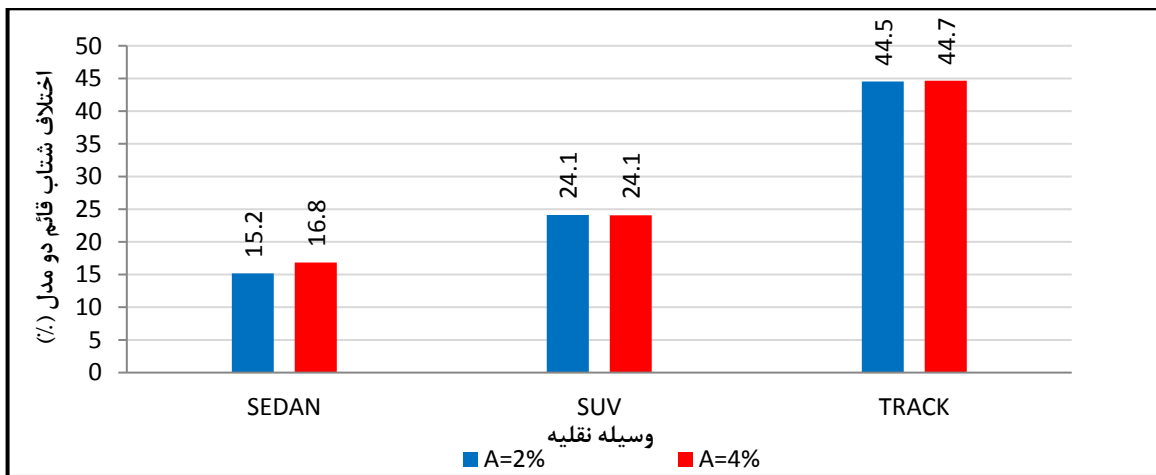
شکل ۱۰. حداکثر اختلاف شتاب قائم حاصل از مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B برای |A| ها و وسایل نقلیه مختلف در سرعت

۹۰ km/h



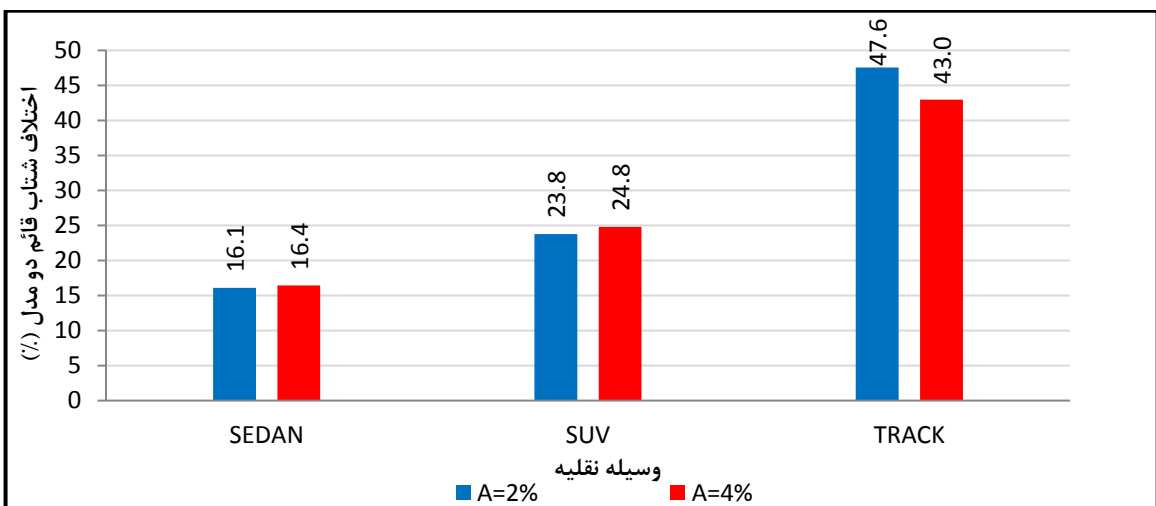
شکل ۱۱. حداکثر اختلاف شتاب قائم حاصل از مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B برای |A| ها و وسایل نقلیه مختلف در سرعت

۱۰۰ km/h



شکل ۱۲. حداکثر اختلاف شتاب قائم حاصل از مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B برای |A| ها و وسایل نقلیه مختلف در سرعت

۱۱۰ km/h



شکل ۱۳. حداکثر اختلاف شتاب قائم حاصل از مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B برای |A| ها و وسایل نقلیه مختلف در سرعت

۱۲۰ km/h

تا ۴۷/۶ درصد است.

با بررسی نتایج ارائه شده در شکل های ۷ تا ۱۳ مشاهده می شود که علاوه بر اختلاف برآورد در هر مسیر، مقدار این اختلاف با تغییر وسیله نقلیه به SUV و کامیون بیشتر نیز می شود که نشان از تأثیرپذیری شتاب قائم از نوع خودرو است.

یکی دیگر از اهداف این تحقیق، بررسی تأثیر تنوع شیب مسیر ورودی به قوس و شیب مسیر خروجی از قوس روی شتاب قائم بود. در مدل جرم نقطه ای که مبنای طراحی اکثر مراجع طراحی هندسی جاده، از جمله آشتو، است، طبق رابطه (۴) اختلاف شیب های ورودی و خروجی (A) در نظر گرفته می شود. برای مثال، شتاب قائم مسیری با $g_1 = -6$ و $g_2 = +4$ با شتاب قائم مسیری $g_1 = -2$ و $g_2 = +8$ تفاوتی ندارد؛ زیرا در هر دو مسیر $A = 10$ است. با توجه به جداول ۳ تا ۵، نتایج مدل M-B نیز این روند را تایید می کنند و مشاهده می شود در اکثر مسیرهای با اختلاف شیب ورودی و خروجی یکسان، شتاب قائم یکسانی ایجاد می شود.

۴. نتیجه گیری

شتاب قائم در قوس های قائم یکی از معیارهای مهم طراحی است. در اکثر مراجع طراحی هندسی جاده، از جمله آشتو، روابط طراحی طول قوس قائم بر اساس مدل جرم نقطه ای است. با توجه به اینکه خودرو یک جسم چندبندی است، در این تحقیق، با استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی دینامیک بر اساس مدل M-B، شتاب قائم وسایل نقلیه مختلف تحت سرعت ها و مسیرهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج مدل جرم نقطه ای مقایسه گردید که نتایج در ادامه آورده می شود:

- در مدل جرم نقطه ای، شتاب قائم در قوس ثابت و در مدل M-B متغیر است.
- مطابق نتایج مدل M-B، شتاب قائم در مناطق ابتدایی و انتهایی قوس قائم بیشترین مقدار را داراست.

با توجه به شکل ۷، در سرعت 60 km/h اختلاف شتاب قائم برآورد شده دو مدل بسته به $|A|$ های مختلف برای خودروی سواری بین $12/6$ تا 21 درصد، برای خودروی SUV این اختلاف بین $25/1$ تا $27/8$ درصد و برای کامیون این اختلاف بین $36/2$ تا $37/2$ درصد است. مطابق شکل ۸، در سرعت 70 km/h اختلاف شتاب قائم برآورد شده دو مدل بسته به $|A|$ های مختلف برای خودروی سواری بین $16/6$ تا $25/9$ درصد، برای خودروی SUV این اختلاف بین $26/6$ تا $29/1$ درصد و برای کامیون این اختلاف بین 29 تا 32 درصد است. مطابق شکل ۹، در سرعت 80 km/h اختلاف شتاب قائم برآورد شده دو مدل بسته به $|A|$ های مختلف برای خودروی سواری بین $16/1$ تا $18/5$ درصد، برای خودروی SUV این اختلاف بین $24/6$ تا $25/6$ درصد و برای کامیون این اختلاف بین $34/2$ تا 38 درصد است. مطابق شکل ۱۰، در سرعت 90 km/h اختلاف شتاب قائم برآورد شده دو مدل بسته به $|A|$ های مختلف برای خودروی سواری بین $13/9$ تا $15/4$ درصد، برای خودروی SUV این اختلاف بین $23/9$ تا $24/5$ درصد و برای کامیون این اختلاف بین $39/6$ تا $41/5$ درصد است. مطابق شکل ۱۱، در سرعت 100 km/h اختلاف شتاب قائم برآورد شده دو مدل بسته به $|A|$ های مختلف برای خودروی سواری بین $15/4$ تا $15/8$ درصد، برای خودروی SUV این اختلاف بین $24/6$ تا $25/1$ درصد و برای کامیون این اختلاف 43 درصد است. مطابق شکل ۱۲، در سرعت 110 km/h اختلاف شتاب قائم برآورد شده دو مدل بسته به $|A|$ های مختلف برای خودروی سواری بین $15/2$ تا $16/8$ درصد، برای خودروی SUV این اختلاف 24 درصد و برای کامیون این اختلاف بین $44/5$ تا $44/7$ درصد است. مطابق شکل ۱۳، در سرعت 120 km/h اختلاف شتاب قائم برآورد شده دو مدل بسته به $|A|$ های مختلف برای خودروی سواری بین $16/1$ تا $16/4$ درصد، برای خودروی SUV این اختلاف بین $23/8$ تا $24/8$ درصد و برای کامیون این اختلاف بین 43

- مدل جرم نقطه‌ای در تمامی حالات شتاب قائم را نسبت به مدل M-B کمتر برآورد می‌کند.
- نوع وسیله نقلیه در مدل جرم نقطه‌ای روی شتاب قائم تأثیری ندارد.
- نوع وسیله نقلیه در مدل M-B روی شتاب قائم تأثیر زیادی دارد.
- اختلاف برآورد شتاب قائم بین مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B با توجه به سرعت، شیب مسیر و نوع وسیله متفاوت می‌باشد.
- اختلاف برآورد شتاب قائم بین مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B با افزایش ابعاد و وزن وسیله نقلیه بیشتر می‌شود.
- اختلاف برآورد شتاب قائم بین مدل جرم نقطه‌ای و مدل M-B بسته به سرعت و نوع مسیر در خودروی سواری بین ۱۲/۶ تا ۲۵/۹ درصد، در خودروی SUV بین ۲۳/۸ تا ۲۹/۱ درصد و در کامیون بین ۲۹ تا ۴۷/۶ درصد است.
- تنوع شیب‌های مسیر ورودی به قوس قائم و مسیر خروجی از قوس قائم تأثیری بر شتاب قائم ندارد. بلکه به‌مانند مدل جرم نقطه‌ای اختلاف این شیب‌ها (A) عامل تأثیرگذاری است.
- در نهایت، می‌توان بیان کرد که اختلاف شتاب قائم برآورد شده توسط دو مدل قابل ملاحظه است و می‌تواند در طراحی قوس‌های قائم به این اختلافات و پاسخ‌های دینامیک حاصل از مدل M-B توجه جدی‌تری داشت.

۵. پیشنهاد برای مطالعات آتی

ارائه مدل آماری رگرسیون جهت سنجش راحتی رانندگی، با در نظر گرفتن پارامترهای متعدد دینامیکی خودرو از جمله شتاب قائم، میزان جمع شدگی فنر، نیروهای وارد بر سیستم تعلیق و هر چرخ خودرو.

۶. مراجع

- AASHTO. 2018. "A policy on geometric design of highways and streets,(green book 2018)". American Association of State Highway and Transportation Officials, 6th Edition, Washington, D. C.
- ADAMS. 2017. "MSC software". <http://www.mscsoftware.com>
- CarSim. 2017. "Mechanical simulation corporation". <http://www.carsim.com>
- Fan, X. and Hu, C. 2012. "The analysis of electric vehicle ride comfort test simulation based on the Adams/car". Adv. Mater. Res. 569: 552-555.
- Harwood, D. W. 2003. "Review of truck characteristics as factors in roadway design". Transportation Research Board, NCHRP Report 505.
- HVOSM. 2017. "McHenry software". <http://www.mchenrysoftware.com>
- Kontaratos, M., Psarianos, B. and Yotis, A. 1994. "Minimum horizontal curve radius as function of grade incurred by vehicle motion in driving mode". Transport. Res. Record, 1445: 86-93.
- Kordani, A. A. and Molan, A. M. 2015. "The effect of combined horizontal curve and longitudinal grade on side friction factors". KSCE J. Civ. Eng., 19(1): 303-310.
- Kordani, A. A., Sabbaghian, M. H. and Kallebasti, B. T. 2015. "Analyzing the influence of coinciding horizontal curves and vertical sag curves on side friction factor and lateral acceleration using simulation modeling". Proceedings of the 15th International Symposium on Highway Geometric Design.
- Kordani, A. A., Javadi, S. and Fallah, A. 2018. "The effect of shoulder on safety of highways in horizontal curves: With focus on roll angle". KSCE J. Civ. Eng., 22(8): 3153-3161.
- Ma, R., Chen, X. and Yang, J. 2015. "A simulation analysis of vehicle-pavement coupling vibration". J. Transp. Inform. Safe., 2, 18 p.
- National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 737. 2014. "Superelevation criteria for sharp horizontal curves on steep grades". Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C.
- Pacejka, H. B. 2006. "Tire and vehicle dynamics". SAE International, Butterworth-Heinemann, Burlington, MA.
- Varunjikar, T. 2011. "Design of horizontal curves with downgrades using low-order vehicle dynamics models". The Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA.

- Wu, B. G., Li, S. P. and Yan, S. F. 2015. "Vehicle ride comfort simulation based on virtual prototyping technology". *Appl. Mech. Mater.*, 697: 190-193.
- Xiong, J. Q., Huang, J. H. and Qun, L. 2012. "Research and implementation of vibration based on analysis of vehicle ride comfort". *Appl. Mech. Mater.*, 189: 281-284.
- Zhang, E., Liu, Z. H., Ji, Z. H., Shan, J. Y. and Wang, D. S. 2010. "Simulation and experimental research on human riding comfort in human-vehicle system". *J. Eng. Design*, 17(2): 107-113.
- Zhu, M. T., Shao, C. Z. and Wang, G. L. 2010. "Research on road model rebuilding and vehicle simulation of ride comfort based on Carsim software". *Mach. Design Manuf.*, 10: 78-80.