

## بررسی تأثیر ناهمواری‌ها بر میزان راحتی سرنشینان وسیله نقلیه با استفاده از شاخص IRI

مقاله علمی - پژوهشی

فرشاد جواهری نیکو، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علیرضا سرکار\*، استادیار، دانشکده عمران، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sarkar@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

صفحه ۴۳۲-۴۱۳

### چکیده

تخمین ایمنی و راحتی سرنشینان وسیله نقلیه استفاده‌کننده از راه یکی از مهم‌ترین مسائلی است که محققان حوزه راه و ایمنی راه با آن روبه‌رو هستند. یکی از مهم‌ترین قسمت‌های ارزیابی ایمنی و مدیریت نگهداری راه ارزیابی ناهمواری‌های سطح راه است. برای این منظور از شاخص ناهمواری راه استفاده می‌شود. به‌منظور ارزیابی مسیر راه علاوه بر ارزیابی طراحی هندسی باید به ارزیابی وضعیت هندسه خرابی‌ها نیز توجه نمود. در صورتی که بتوان معیاری برای ارزیابی وضعیت پیدا نمود، می‌توان حالت بحرانی معیار را پیدا نموده و در صورت رسیدن به حالت بحرانی، وضعیت راه را غیر ایمن و یا نیاز به بهسازی و بهبود دانست. در این تحقیق، پاسخ دینامیکی وسیله نقلیه در حین حرکت روی جاده‌هایی با شکل‌های ناهمواری متفاوت اما با  $IRI = 10$  که جاده در حالت آسیب دیده قرار می‌گیرد و یکی از حالت‌های بحرانی IRI است، توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است. علاوه بر بررسی پاسخ دینامیکی محور جلو وسیله نقلیه (به دلیل اعمال نیروی بیشتر بر محور جلو) بر روی پارامترهای رایج مانند: شتاب قائم، حداکثر شتاب قائم و ریشه میانگین شتاب قائم، بررسی انجام شده تا مشخص گردد که در یک ناهمواری متقارن، آیا بازهم یک پاسخ دینامیکی برای چرخ چپ و راست به وجود می‌آید یا خیر. اگر بتوان رابطه مشخصی میان ناهمواری‌هایی که با استفاده از تعریف شاخص IRI در سطح راه ایجاد شده‌اند و شکل ناهمواری‌ها (طول و دامنه موج) ارتباط برقرار نمود می‌توان اولویت‌بندی ناهمواری‌های دارای طول موج بحرانی (بیشترین ایجاد ناراحتی بر آسایش سرنشینان) و برنامه‌ریزی بهتری را انجام داد. نتایج نشان می‌دهد که با بررسی بیشتر بر روی شتاب قائم در سرعت‌های مختلف می‌توان مشاهده کرد در دامنه موج‌های بیشتر بیشترین مقادیر شتاب قائم وارد به وسیله نقلیه در سرعت‌های بالا و در دامنه موج‌های پایین‌تر در سرعت‌های کم اتفاق می‌افتد. برای مثال در ناهمواری از نوع سهمی مقادیر بیشینه شتاب برای دامنه موج‌های ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۰۵/۰/۰۰۵ متر، در سرعت‌های بالای ۶۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد. در حالی مقادیر شتاب قائم برای دامنه موج‌های ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۱۵ و ۰/۰۰۱ متر در سرعت‌های کمتر از ۴۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد. در سرعت نزدیک به ۸۰ کیلومتر بر ساعت، مقدار شتاب قائم ناهمواری سینوسی (فرض IRI) تفاوت قابل‌توجهی نزدیک به ۰/۲ متر بر مجذور ثانیه نسبت به ناهمواری سهموی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ناهمواری، شاخص IRI، موج سینوسی، ایمنی، راحتی سرنشینان

### ۱- مقدمه

مسیرهای موردنظر است. الزامات ایمنی مسیر، آسایش راننده و مسافران، تأثیر مسیر بر حرکت وسیله نقلیه با توجه به پارامترهای هندسی مسیر، از تجزیه و تحلیل مطالعات صورت گرفته شده به دست آمده است. حال در این قسمت مقالات مورد استفاده در دو بخش روش‌های مختلف شاخص خرابی و همچنین راحتی

هدف این بخش ارائه مقالات و گزارش‌های فنی در محاسبه شاخص ناهمواری راه است. همچنین ارائه مقالاتی درباره ارتباط نرم‌افزارهای شبیه‌ساز دینامیک خودرو و خرابی‌های راه است. در واقع ارتباط بین شتاب وارد به سرنشینان وسیله نقلیه (راحتی) در انواع خرابی‌های موجود در راه و ارتباط آن با شاخص‌های اندازه‌گیری شده در

لی و همکاران در سال ۲۰۲۰ ارزیابی خرابی روسازی را بر اساس راحتی سرنشینان مورد مطالعه قرار دادند. این مقاله روش ترکیبی از خرابی مسیر و راحتی سرنشینان برای محاسبه خرابی مسیر ارائه داده است. بر این اساس یک شبکه عصبی برای شناسایی خرابی روسازی با استفاده از روش داده‌های تصویری ارائه شد. داده‌های شتاب وارد به وسیله نقلیه با استفاده از حس‌گرهای موجود در خودرو به دست آمد. در مرحله بعد داده‌های خرابی بر اساس شتاب وارد به سرنشینان وسیله نقلیه و داده‌های تصویری محاسبه شد. قابل ذکر است که برای تصویرسازی داده‌های تصویری از نرم‌افزار گرافیکی نیز در این تحقیق استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد می‌توان از این روش برای ارزیابی خرابی سطح روسازی و محاسبه دقیق آن بر اساس داده‌های خرابی روسازی و اطلاعات شتاب قائم وارد به وسیله نقلیه استفاده کرد. در شکل (۴) مقادیر راحتی محاسبه شده در مقایسه با استاندارد ISO 2631-1 نشان داده شده است (Li, Y., Liu, C., Du, Y., & Jiang, 2020).

در تحقیقی دیگر نوسن و همکاران در سال ۲۰۲۰ مدلی برای سرعت پیشنهادی برای وسایل نقلیه در ناهمواری‌های مسیر ارائه داد. در واقع این مدلی برای توصیف رابطه بین ضریب ناهمواری و سرعت ایمن در مسیر است. نتایج در این مقاله نشان می‌دهد مقادیر ضریب ناهمواری در مسیر به طور نامحسوسی با سرعت ایمن در معابر رابطه دارد. به عنوان مثال اگر سرعت وسیله نقلیه ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت باشد مقدار ضریب ناهمواری نباید از ۱/۹ متر بر کیلومتر باشد. به عبارت دیگر مقدار ضریب ناهمواری برای یک مسیر باید مقداری مناسب متناسب با سرعت وسیله نقلیه در یک مسیر را دارا باشد (Nguyen, X., Nguyen, T., & Tran, P. H., 2020).

سرنشینان در مسیرهای مختلف یکی از اهداف حوزه ایمنی و مدیریت و نگهداری راه‌ها است. به منظور ارزیابی مسیر راه علاوه بر ارزیابی طراحی هندسی باید به ارزیابی وضعیت هندسه خرابی‌ها نیز توجه نمود. در صورتی که بتوان معیاری برای ارزیابی وضعیت پیدا کرد، می‌توان حالت‌های بحرانی معیار را پیدا نموده و در صورت رسیدن به حالت بحرانی، وضعیت راه را غیر ایمن و یا نیاز به بهسازی و بهبود دانست. در سال‌های اخیر بسیاری از تحقیقات به سمت شاخص‌های ارزیابی وضعیت هندسی و روسازی گرایش دارند که بهبود را بر اساس راحتی سرنشینان در نظر می‌گیرند. برای این منظور محققان و مهندسان مشاور از شاخص‌های مختلفی که هنوز فراگیر نشده‌اند استفاده می‌کنند. دلیل این امر را می‌توان عدم سهولت به تجهیزات مناسب و اندازه‌گیری این شاخص‌ها، عدم قابلیت استفاده و کالیبراسیون برای شرایط محلی کشورها و شهرها و ... دانست. یکی از این شاخص‌ها که در مورد مدیریت و نگهداری راه‌ها برای بررسی میزان راحتی سرنشینان وسیله نقلیه

سرنشینان وسایل نقلیه در پروفیل‌های مسیر مورد کنکاش قرار گرفت. موکا در سال ۲۰۱۹ به بررسی مشخصات خرابی‌های مسیرها و تأثیر آن بر روی شاخص ناهمواری پرداخته است. در این مقاله مسیرهای مختلف عبور کرده را مورد بررسی قرار گرفت و خرابی‌های به دست آمده با استفاده از MRI انتخاب گردید. در این مقاله طول مسیر انتخاب شده ۱۲ کیلومتر بود. ارتعاشات به دست آمده از وسیله نقلیه با مدل وسیله نقلیه کامل اندازه‌گیری شده است. همچنین مقادیر راحتی برای انواع کلاس‌بندی راه‌ها برای  $IRI=10$  و ۱۰۰ متر انتخاب شده است. از نتایج این مقاله می‌توان به دست آوردن رابطه‌های مختلف برای اندازه‌گیری شاخص ناهمواری برای چرخ وسیله نقلیه در حین عبور از قسمت‌های مختلف را اشاره کرد (Múčka, 2019).

میرتبار و همکاران در سال ۲۰۲۰ مدلی برای پیش‌بینی خرابی روسازی ارائه دادند. در این تحقیق با استفاده از ارتعاشات دستگاه ساخته شده و همچنین استفاده از شبیه‌ساز رانندگی به این مهم دست یافته شد. پروفیل روسازی با استفاده از پاسخ شتاب لحظه‌ای به دست آمد و همچنین شاخص ناهمواری با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی و با استفاده از پروفیل مسیر به دست آمد. ضریب خرابی با درصد خطای ۰/۱۵ به مقدار ۰/۸۲ به دست آمد. توضیح که این مقدار از اطلاعات روسازی واقعی و به صورت میدانی محاسبه شد. نتایج نشان داد می‌توان این مدل را با دقت کافی برای به دست آوردن شاخص ناهمواری به دست آورد. علاوه بر این سهولت در استفاده از این مدل و همچنین هزینه کم می‌تواند دلیلی مناسبی برای استفاده از این مدل دانست (Mirtabar, 2020).

## ۲- پیشینه تحقیق

تخمین ایمنی و راحتی سرنشینان وسیله نقلیه استفاده‌کننده از راه یکی از مهم‌ترین مسائلی است که محققان حوزه راه و ایمنی راه با آن روبه‌رو هستند. ایمنی راه در شاخه‌های مختلفی بررسی می‌گردد. یکی از مهم‌ترین قسمت‌های ارزیابی ایمنی و مدیریت نگهداری راه ارزیابی و پایش خرابی‌های سطح راه است. برای این منظور از شاخص ناهمواری راه استفاده می‌شود. در واقع این شاخص برای تخمین تقریبی میزان خرابی راه برای مسیرهای طراحی شده استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر با توجه به ترکیب مهندسی دینامیک خودرو و طراحی مسیر راه‌های مناسب و با هزینه کمتری برای تشخیص خرابی‌ها و تأثیر آن بر روی وسیله نقلیه و سرنشینان آن دارد. استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز برای طراحی خودرو و مسیر و اندازه‌گیری شتاب قائم وارد به وسیله نقلیه می‌تواند راهی مناسب برای تخمین راحتی سرنشینان وسیله نقلیه باشد. قابل ذکر است که در کنار شتاب قائم وارد به وسیله نقلیه پارامترهای دینامیکی دیگر می‌تواند بر روی راحتی سرنشینان وسیله نقلیه تأثیرگذار باشد. برآورد مناسب راحتی

ایجاد شده‌اند و شکل ناهمواری‌ها (طول و دامنه موج) برقرار نمود می‌توان در اولویت‌بندی خرابی‌ها و ناهمواری‌های دارای طول موج بحرانی (بیشترین ایجاد ناراحتی بر آسایش سرنشینان) دقت بیشتری نمود و برنامه‌ریزی بهتری را انجام داد.

مقدار بحرانی شتاب قائم در هندسه ناهمواری‌های سینوسی و سهمی و همچنین در مورد طول موج در  $IRI=10$  چقدر خواهد بود؟  
مقدار بحرانی شتاب قائم در هندسه ناهمواری‌های سینوسی و سهمی و همچنین در مورد دامنه موج در  $IRI=10$  چقدر خواهد بود؟  
میزان شتاب قائم بدنه وسیله نقلیه در چه حالتی از ناهمواری‌های طراحی شده، بیشتر است؟

آیا نتایج خروجی با مقادیر پیش‌فرض ورودی  $IRI$  برابر هستند؟  
مدل آماری پیش‌بینی آسایش سرنشینان بر حسب شتاب قائم و هندسه ناهمواری‌ها و سرعت وسیله نقلیه چیست؟  
هدف اصلی در این تحقیق، بررسی اثر تغییر شکل‌های موجی شکل از نوع معادله سینوسی و سهمی و مقایسه آن با ناهمواری‌های سهمی شکل بر روی پاسخ دینامیکی وسیله نقلیه است. شتاب وارد به چرخ‌ها و کل وسیله نقلیه مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس در این مقدار ثابت تغییرات شکل ناهمواری‌های سینوسی و سهمی که شامل تغییر طول موج‌هاست انجام می‌شود. با تغییر در طول موج و دامنه موج، مقدار  $IRI$  می‌تواند تغییر کند. در اینجا تغییرات به صورتی برنامه‌ریزی می‌شود که مقدار  $IRI$  همواره ثابت بماند. به‌طوری‌که با کاهش طول موج، دامنه آن کاهش یافته و با افزایش طول موج، دامنه آن افزایش یابد.

استفاده می‌شود شتاب قائم است که با استفاده از مدل یک - چهارم وسیله نقلیه سواری (quarter-Car Model) تعریف می‌شود. اما در این شاخص مشخص نیست که میزان راحتی سرنشینان در هر سمت وسیله نقلیه چقدر خواهد بود چراکه در این شاخص فقط وضعیت هر محور مشخص می‌گردد از طرف دیگر شاخص‌های - دیگر که شتاب مبنا هستند مانند شاخص راحتی سواری ( $a_{wz}$ ) نیز وضعیت شکل ناهمواری‌ها را در نظر نمی‌گیرد. در این پایان‌نامه با- استفاده از شبیه‌سازی وسیله نقلیه کامل شتاب وارد به وسیله نقلیه اندازه‌گیری شده و تأثیر آن در خرابی‌های راه با استفاده از شاخص - خرابی بر روی راحتی سرنشینان وسیله نقلیه اندازه‌گیری شده است. با توجه به اینکه شاخص‌هایی مانند  $HRI$ ،  $FRI$  و  $IRI$  که بر مبنای - دینامیک وسیله نقلیه هستند، مسئله راحتی و آسایش سرنشینان را- بررسی نمی‌نمایند و صرفاً با استفاده از وسیله نقلیه Golden Car که توسط سایرز در سال ۱۹۹۸ میلادی معرفی شد،  $IRI$  را مدنظر قرار می‌دهند. اما با تغییر نوع وسیله نقلیه در سیستم تعلیق در واقعیت شاهد تغییرات شتاب قائم و سایر پارامترهای دینامیکی وسیله نقلیه خواهیم بود. همچنین نوع و شکل خرابی‌های راه می‌تواند بر روی راحتی و شتاب قائم وارد بر سرنشینان وسیله نقلیه مؤثر باشد. همچنین با تغییر شرایط سرعت وسیله نقلیه می‌توان شاهد لرزش‌های مختلف در بدنه وسیله نقلیه عبوری از روی ناهمواری‌ها بود. به همین منظور اهمیت این تحقیق از آنجایی مشخص می‌شود که در صورتی که بتوان رابطه مشخصی میان ناهمواری‌هایی که با استفاده از تعریف شاخص  $IRI$  در سطح راه

### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱- نرم افزار ADAMS/CAR

پیش در دانشگاه میشیگان توسط آن آر بور طراحی و برنامه‌ریزی شد و تا امروز نسخه‌های جدید این نرم‌افزار با پیشرفت زیاد در جهت سهولت در امور شبیه‌سازی روانه بازار می‌شود.

#### مزایای نرم‌افزار ADAMS/CAR

یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این نرم‌افزار نسبت به بقیه نرم‌افزارهای مشابه این است که در یک شبیه‌سازی با شرایط یکسان ممکن است با پاسخ‌های متفاوتی مواجه شد. این بدین معنی است که در این نرم‌افزار معادلات به صورت حل شده در نرم‌افزار وجود ندارد و در واقع نرم‌افزار به صورت یک هوش مصنوعی عمل می‌کند؛ به‌عنوان مثال وقتی در دنیای واقعی سیستم ترمز یک خودرو آزمایش می‌شود در دو آزمایش با شرایط یکسان (سرعت، میزان کاهش شتاب و ...) ممکن است

امروزه استفاده از نرم‌افزارهای مهندسی در زمینه طراحی به کمک کامپیوتر، مهندسی به کمک کامپیوتر و تولید به کمک کامپیوتر جز لاینفک تمام رشته‌های مهندسی است؛ بنابراین شرکت‌های زیادی در زمینه تولید و آموزش این نرم‌افزارها در حال فعالیت هستند. شرکت MSC SOFTWARE از شرکت‌های پیشرو در زمینه تولید این نوع نرم‌افزارها است. این شرکت در سال ۱۹۶۳ توسط ریچارد مک‌نال و رابرت اشوندلر تأسیس شد. هدف این شرکت ساخت مدل‌های کامپیوتری که با دقت بیشتری رفتار طراحی‌های مهندسی را در محیط واقعی پیش‌بینی می‌نمایند. شرکت‌های زیادی از جمله NASA از این نرم‌افزار استفاده می‌کنند. ADAMS از جمله نرم‌افزارهای شبیه‌ساز و تحلیل دینامیک حرکت است. نام این نرم‌افزار مخفف ADAMS است که حدود ۲۵ سال

بهدقت بسیار زیاد و به صورت مختصات طولی و عرضی وارد کرد و همچنین می‌توان تمام جزئیات یک مسیر هندسی شامل: توانایی ترکیب قوس افقی و قائم، اعمال میزان شیب عرضی مسیر به صورت تدریجی و بر اساس آیین‌نامه‌ها و استانداردهای معتبر، میزان ضریب اصطکاک طولی و ... به صورت سه‌بعدی اشاره کرد. همچنین می‌توان ناهمواری‌های مسیر با فرض حالات و شکل خرابی مدل‌سازی و به صورت ترکیبی اجرا و ایجاد نمود.

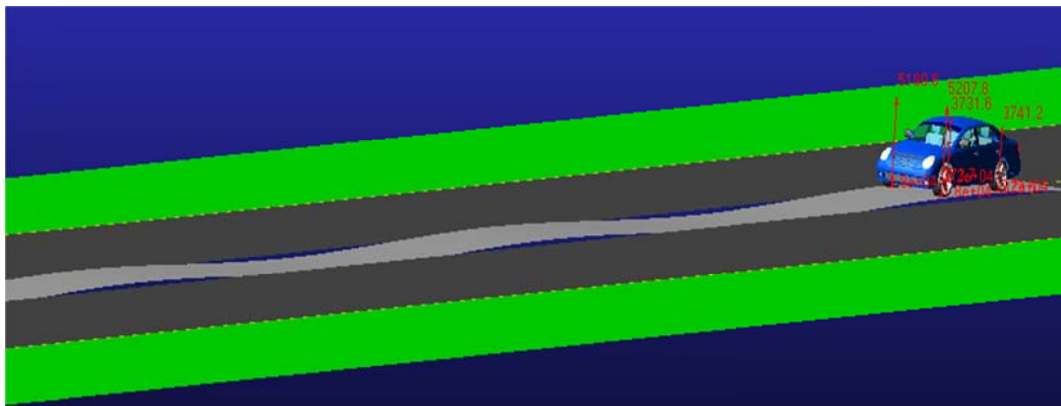
طبق شرایط راننده و وسیله نقلیه تفاوت کمی در میزان خروجی‌های ما وجود داشته باشد که امری طبیعی است ولی نرم‌افزار مشابه با ADAMS/CAR توانایی این مسئله دارد که مانند شرایط واقعی وسیله را آزمایش کند. از دیگر مزیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به دقت بسیار بالا در محاسبات و همچنین دارا بودن خروجی‌های بسیار زیاد که به صورت گراف و نمودار هستند، اشاره کرد. این نتایج علاوه بر گراف و نمودار به صورت انیمیشن برای درک بهتر در دسترس است. در این نرم‌افزار می‌توان ناهمواری و طرح هندسی موردنظر را



شکل ۱. روش تحقیق

جدول ۱. پارامترهای طراحی خودرو سدان مورد استفاده در شبیه‌سازی

پارامتر	طول	عرض	ارتفاع	وزن	فاصله مرکز جرم	ارتفاع مرکز چرخ از زمین
مقدار	۳۰۷۶ میلی‌متر	۱۸۹۵ میلی‌متر	۱۵۰۰ میلی‌متر	۱۹۸۰ میلی‌متر	۴۵۰ میلی‌متر	۴۰۰ میلی‌متر



شکل ۲. خودرو سدان مورد استفاده در شبیه‌سازی

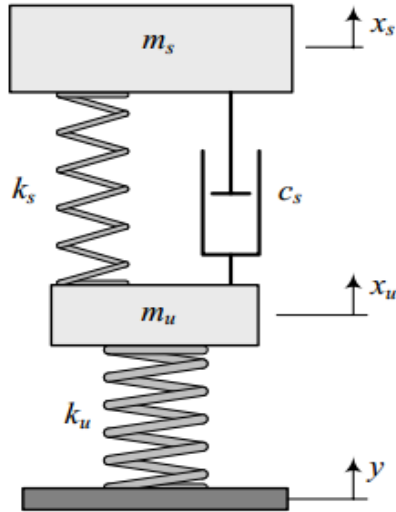
### ۲-۳- مشخصات سیستم تعلیق وسیله نقلیه مورد استفاده و تعریف IRI

پارامترهای مهم آن، نشان داده شده است. همانند سایر تحقیقات این حوزه که در فصل دوم مرور و مطالعه شده‌اند، نیاز است تا مقادیر پارامترهای سیستم تعلیق وسیله سدان که در این تحقیق معرفی و مورد استفاده قرار گرفت نیز معرفی شوند. به همین منظور جدول (۲) مشخصات آن را در مقایسه با وسیله نقلیه Golden Car معرفی می‌نماید.

تعریفی از سیستم تعلیق برای وسیله نقلیه‌ای که قرار است مقدار IRI را برداشت نماید و ناهمواری‌های مسیر مورد بررسی قرار می‌دهد، انجام گرفته است. شاخص IRI نشانگر میزان زبری یا ناهمواری سطح راه است که با واحدهایی چون متر بر کیلومتر، اینچ بر مایل (in/mi) و غیره سنجیده می‌شود و از آن زمان در بسیاری از کشورها استفاده می‌گردد (Sayers, 1995-1998).

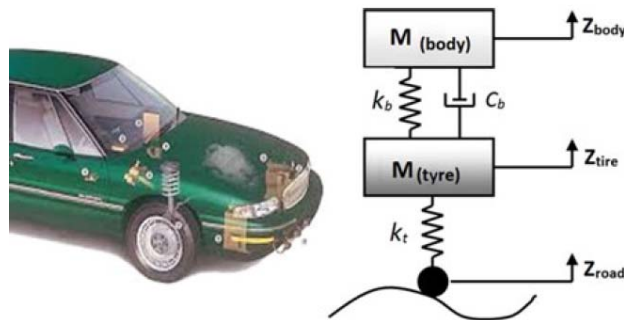
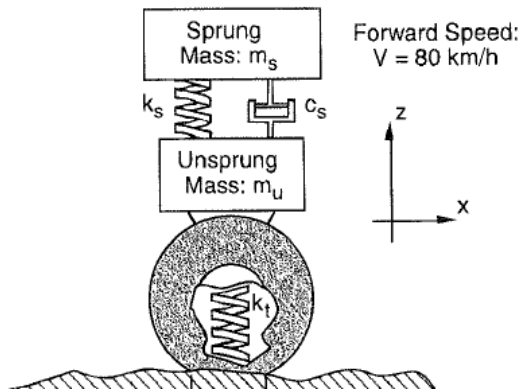
در شکل (۳) و (۴) مشخصات تعریف شده از وسیله نقلیه sedan که در خودروی Golden Car توزیع شده است به همراه

پارامتر مورد نظر در سیستم تعلیق	مقدار مربوط به پارامتر SEDAN (RWD)	Golden Car (Full Size)
$k_b$	۴۹/۹۸۷ (N/mm)	۲۵ (N/mm)
$k_t$	۱۷۰ (N/mm)	۲۶۱ (N/mm)
$C_b$	۱۹۰۰ (Ns/m)	۲۴۰۰ (Ns/m)
Mass (body)	۶۶۳/۰۰۴۹ کیلوگرم	۴۰۰ کیلوگرم
Mass (Tire)	۲۵ کیلوگرم	۶۰ کیلوگرم



شکل ۳. مدل یک چهارم وسیله نقلیه (N.Jazar, 2008)

جدول ۲. مشخصات دینامیکی سیستم تعلیق در مدل یک چهارم وسیله نقلیه



شکل ۴. پارامترهای مورد استفاده در مدل یک چهارم وسیله نقلیه

### ۳-۳- طراحی هندسی ناهمواری‌های مسیر

پس از طراحی وسایل نقلیه برای تعیین عملکرد وسایل نقلیه طراحی ناهمواری‌های هندسی مسیر انجام گرفت. در این تحقیق ۷ مسیر ناهمواری‌های هندسی مورد استفاده در مدل یک چهارم وسیله نقلیه متفاوت در دامنه موج‌های ناهمواری‌های ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۱۵، ۰/۰۰۱ بر حسب متر طراحی شد و ساخته شد که

### ۳-۴- سرعت‌های انتخاب شده

باتوجه به توضیحات فصل اول در مورد فرضیات، قرار است در این تحقیق بررسی شود که با افزایش سرعت مقدار حداکثر دوران نسبی حول محور  $Y$ ، چگونه تغییر می‌نماید؛ بنابراین تغییرات سرعت (سرعت‌های شبیه‌سازی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ کیلومتر) نیز بررسی خواهند شد. به صورت استاندارد در مورد شاخص IRI سرعت ۸۰ کیلومتر در ساعت تعریف شده است درحالی‌که در ناهمواری‌ها اگر با سرعت کمتر برداشت ناهمواری‌های انجام گردد ممکن است زمان بر باشد اما دقت بالاتری خواهد داشت. تأثیر این کاهش سرعت بر روی آسایش سرنشینان بررسی خواهد گردید.

در این مسیرها برای اعمال شرایط جوی مختلف ضرایب اصطکاک بین جاده و وسیله نقلیه به مقدار حداکثر ۰/۹ (حالت خشک سطح راه) در نظر گرفته شده است (Hegmon, 1979).

طراحی ناهمواری‌های ۱۰۰ متر از مسیر به صورت اعمال نقاط پیکتاژ شده در مسیر انجام گرفته است و برای اینکه دقت پاسخ‌های دینامیکی بالا رود نقاط بافاصله ۱ سانتی‌متر طراحی شده است. سپس با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی تست Main وسایل نقلیه در نظر گرفته شده انجام می‌شود. در شبیه‌ساز ADAMS قسمت مهمی به نام ROAD BUILDER وجود دارد مرحله نقطه دادن به مسیر طبق روابط معادلات سینوسی و سهموی ارائه شده انجام شد. در شکل (۵) مرحله اعمال نقاط طراحی مسیر در نرم‌افزار نشان داده شده است.

Number	X	Y	Z	Width	Bank	Friction Left	Friction Right
1	5.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
2	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
3	-5.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
4	-10.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
5	-15.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
6	-20.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
7	-25.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
8	-30.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
9	-35.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
10	-40.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
11	-45.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
12	-50.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
13	-55.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
14	-60.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
15	-65.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
16	-70.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
17	-75.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
18	-80.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
19	-85.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
20	-90.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
21	-95.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9
22	-100.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.9	0.9

شکل ۵. محیط نرم افزار ROAD BUILDER

### ۴- تحلیل نتایج

مقدار راحتی در اثر تغییر در جهت قائم تحت تأثیر مشخصات سیستم تعلیق وسیله نقلیه (سیستم فنربندی وسیله نقلیه، وزن وسیله نقلیه، انعطاف پذیری لاستیک‌ها) و عوامل دیگر قرار دارد. مهم‌ترین عامل در واژگونی خودرو در هنگام خروج از مسیر شتاب قائم در محل چرخ‌ها است و سرعت خودرو و شرایط جاده تعیین‌کننده شتاب قائم لحظه‌ای است.

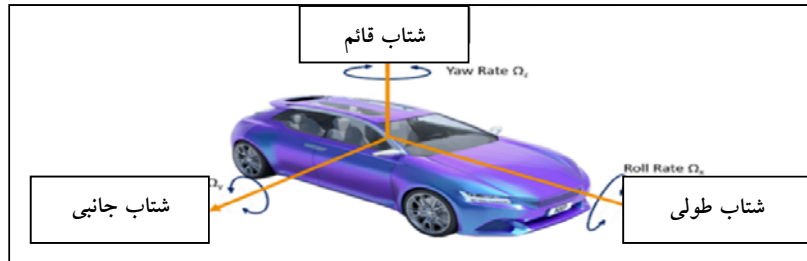
در این بخش اطلاعات مورد نیاز به منظور تحلیل و بررسی موضوع مورد مطالعه جهت پاسخگویی به سؤالات مطرح گردیده گردآوری و ارائه می‌گردد. به هنگام عبور وسایل نقلیه از مسیرهای دارای ناهمواری، چند پارامتر مهم در آسایش و راحتی سرنشینان تأثیرگذار است که بر اساس شتاب وارد بر وسیله نقلیه مورد واکاوی قرار گرفته است.

کنترل معیار: شتاب قائم وارد بر وسیله نقلیه در هر لحظه از حرکت روی ناهمواری

#### ۱-۴- شتاب قائم در آیین‌نامه طراحی هندسی راه آشتو (کتاب سبز)

در قوس‌های قائم نباید بیشتر از  $0/3$  گرم باشد که  $g$  همان شتاب گرانش است. شکل (۶) شتاب قائم بر وسیله نقلیه را نشان می‌دهد.

در آیین‌نامه طراحی هندسی مسیر آشتو (کتاب آشتو سبز) این چنین آمده که شتاب قائم در مسیرهای مقعر به دلیل نیروی گرانشی بیشتر از مسیرهای محدب است. همچنین در این آیین‌نامه عنوان می‌شود که حداکثر شتاب وارد بر وسیله نقلیه



شکل ۶. نحوه اعمال شتاب‌های مورد بررسی در نتایج

بررسی می‌گردد تا حداکثر مقدار وارد بر وسیله نقلیه برای کنترل آسایش و راحتی سرنشینان، بررسی گردد. به همین منظور کنترل‌ها بر اساس مقادیر استاندارد ISO 2631-1، مقایسه گردید.

#### ۴-۳- نتایج به دست آمده از پاسخ دینامیکی وسیله نقلیه برای پارامتر شتاب قائم

نتایج به دست آمده از پاسخ دینامیکی وسیله نقلیه Sedan هنگام شبیه‌سازی با نرم‌افزار Adams/Car در دو قسمت مختلف به صورت نمودار (شتاب - زمان) برای دو حالت شکل سینوسی و سهموی ناهمواری‌ها بررسی گردید.

#### ۴-۳-۱- نتایج شبیه‌سازی برای ناهمواری‌های سینوسی شکل

شکل‌های (۷) تا (۱۰) بر روی تست‌های مربوط به حرکت وسیله نقلیه بر روی ناهمواری‌های سینوسی شکل است. تمامی شکل‌ها به ترتیب برای دامنه موج‌های مختلف ناهمواری سینوسی شکل بر مبنای تعریف سایرز و همکاران که در فصل دوم و سوم بر روی آن بحث و معرفی صورت گرفت در محاسبات اعمال شده است. همچنین جدول (۴) مقادیر خروجی شتاب قائم ماکزیمم برای دامنه موج‌ها و سرعت‌های مختلف تست‌گیری وسیله نقلیه - ناهمواری‌های سینوسی نمایش داده شده است.

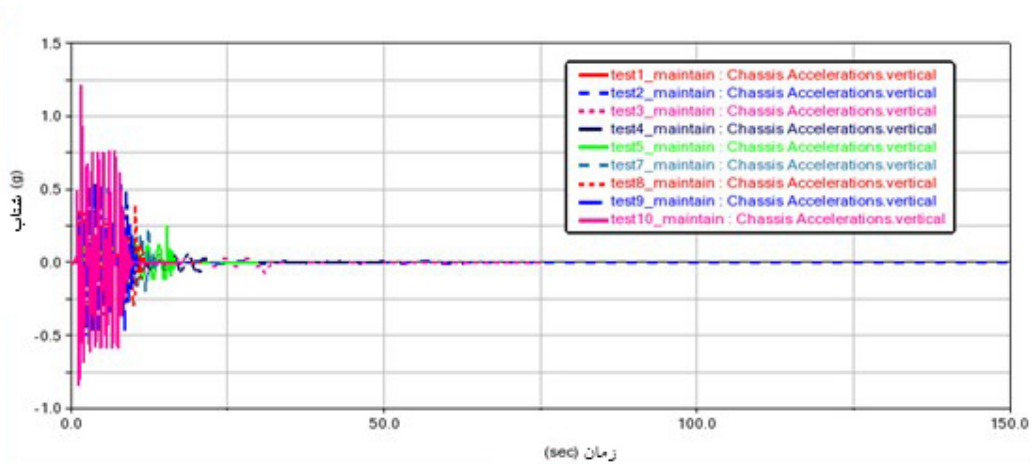
لازم به ذکر است شتاب‌های به دست آمده از نتایج بر اساس متر بر مجذور ثانیه است و باید بر عدد گرانش زمین یعنی  $g = 9/81$  ضرب شود. در صورتی که دامنه موج‌های و طول موج‌های ناهمواری‌های تعریف شده به مقادیری نزدیک به مقادیر حداقل طول قوس قائم سهموی آشتو نزدیک شوند، باید با معیار شتاب آشتو که  $0/3$  متر بر مجذور ثانیه است مقایسه انجام شود. در این مطالعه با توجه به اینکه مقادیر ناهمواری‌های حداکثر طول موج  $10$  متر تعریف شده است نیاز به مقایسه با این مقدار لازم نخواهد بود.

#### ۴-۲- شتاب قائم در استاندارد ISO 2631-1

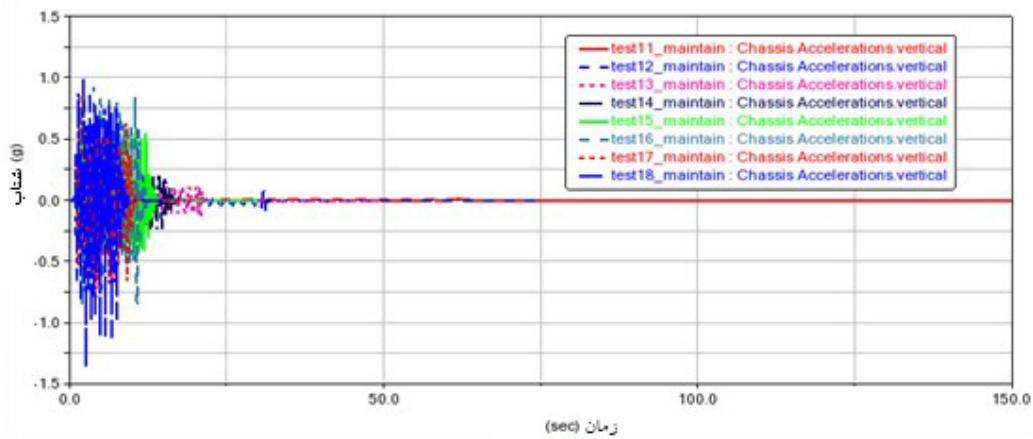
فرکانس‌های دریافتی از پاسخ دینامیکی وسیله نقلیه مربوط به شتاب قائم از مهم‌ترین پارامترهای بررسی شده در این تحقیق است. در واقع پارامترهای معرفی شده در این تحقیق مشخصه لازم برای اندازه‌گیری راحتی سرنشینان وسیله نقلیه ارائه می‌دهد. حداکثر مقادیر شاخص ناهمواری تابعی از مقادیر ارتعاش خودرو تلقی شده است که با سرعت وسیله نقلیه رابطه مستقیم دارد. در جدول (۴) مقادیر راحتی بر مبنای شتاب وارد به وسیله نقلیه به ارائه شده است. در جدول (۳) بازه‌ها برای هر بار اندازه‌گیری پیش‌بینی شده‌اند و هم‌پوشانی آن‌ها توسط استاندارد ISO پیشنهاد شده است. در این مطالعه با توجه به اینکه شکل ناهمواری‌ها بر اساس دامنه موج و طول موج تعریف شده است، و مقادیر شتاب به صورت لحظه‌ای

جدول ۳. مقادیر راحتی سر نشین بر اساس شتاب مطابق استاندارد ISO 2631-1

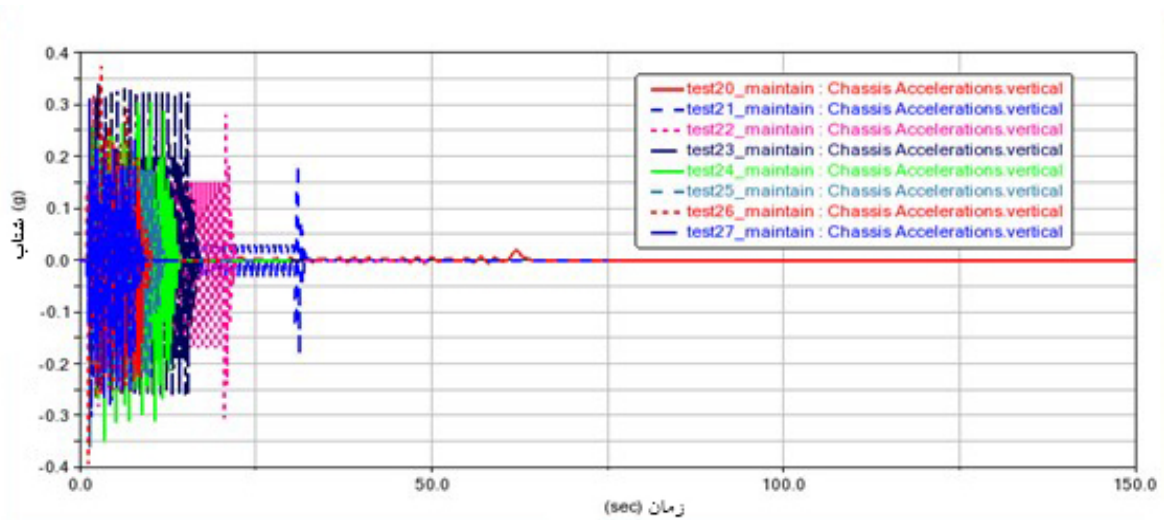
RMS شتاب وارد به وسیله نقلیه (متر بر مجذور)	سطح راحتی
$< 0.315$	راحت
$0.315 - 0.63$	کمی راحت
$0.5 - 1$	نسبتاً راحت
$0.8 - 1.6$	ناراحت
$1.6 - 2.5$	خیلی ناراحت
$> 2$	به شدت ناراحت



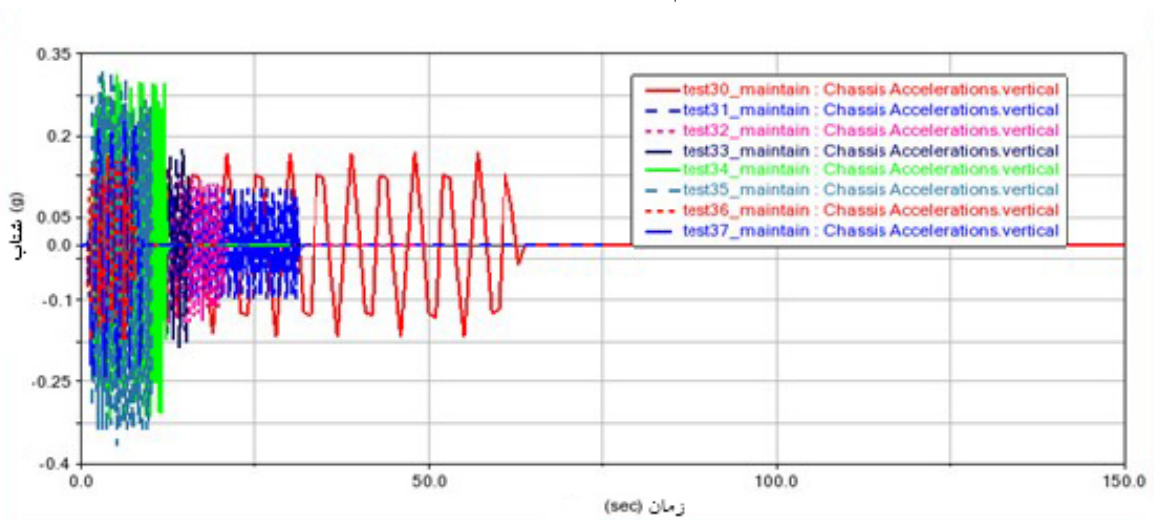
شکل ۷. تغییرات شتاب قائم در طول ناهمواری سینوسی با دامنه  $A=0.1(m)$



شکل ۸. تغییرات شتاب قائم در طول ناهمواری سینوسی با دامنه  $A=0.05(m)$



شکل ۹. تغییرات شتاب قائم در طول ناهمواری سینوسی با دامنه  $A=0.01(m)$



شکل ۱۰. تغییرات شتاب قائم در طول ناهمواری سینوسی با دامنه  $A=0.005(m)$

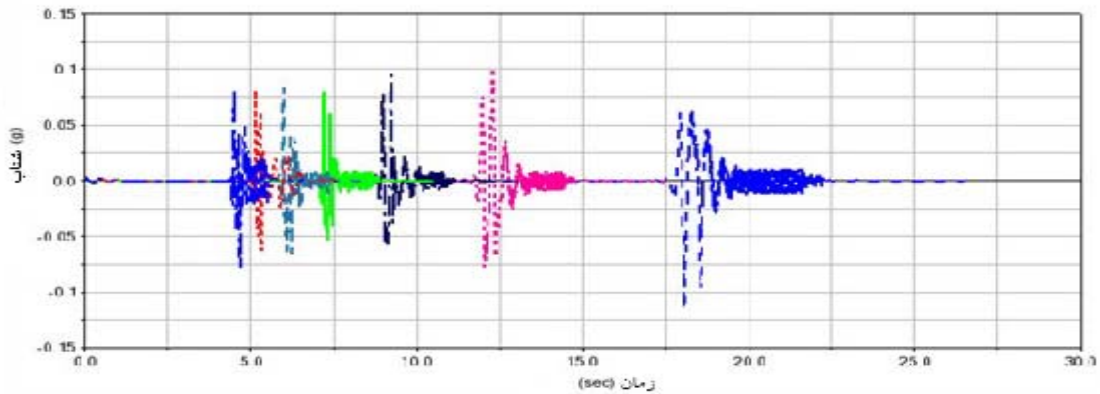
جدول ۴. مقادیر خروجی شتاب قائم ماکزیمم برای دامنه موج‌ها و سرعت‌های مختلف تست‌گیری وسیله نقلیه در ناهمواری‌های سینوسی

۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	سرعت (کیلومتر بر ساعت)	دامنه (g)
۱/۲۱	۰/۷۵۵	۰/۴۶۴۴	۰/۲۶۲۵	۰/۲۵۳۳	۰/۰۷۶۳	۰/۰۷۹۱	۰/۰۱۱۶	$A=۰/۱$	
۱/۳۷	۰/۹۷۶۴	۰/۹۲۷۶	۰/۵۹۸۶	۰/۲۳۸۳	۰/۱۷۶۳	۰/۱۲۷۳	۰/۰۱۷۵	$A=۰/۰.۵$	
۰/۰۹۱۵	۰/۰۸۲۷	۰/۰۲۵۱	۰/۰۱۹	۰/۰۲۲	۰/۰۲۵۶	۰/۰۳۲۱	۰/۰۸۴	$A=۰/۰.۱$	
۰/۰۲۳۹	۰/۰۲۴۷۱	۰/۱۸۸	۰/۳۶۶۳	۰/۳۱۸۸	۰/۱۹۹	۰/۱۵۵۴	۰/۱۱۱۳	$A=۰/۰.۰۵$	
۰/۰۱۶۵	۰/۰۱۷	۰/۰۲۳	۰/۰۲۵۴	۰/۰۴۶	۰/۰۵۳۸	۰/۱۴۴۲	۰/۰۷۵۱	$A=۰/۰.۰۲۵$	
۰/۰۸۱۵	۰/۰۶۲۴	۰/۰۱۵۱	۰/۰۱۳	۰/۰۱۶۱	۰/۰۱۷	۰/۰۲۵۱	۰/۰۵۶	$A=۰/۰.۰۱۵$	
۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۵۶	$A=۰/۰.۰۱$	

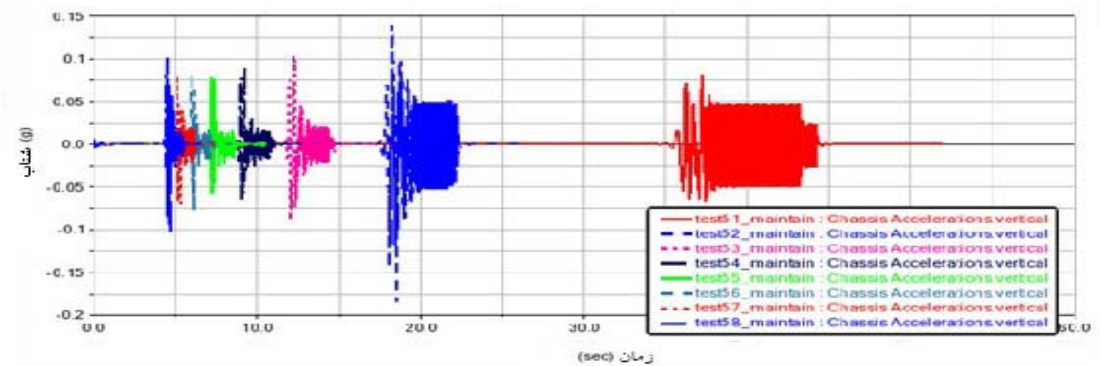
۴-۳-۲- نتایج شبیه‌سازی برای ناهمواری‌های سهموی شکل

پارامتر A (آمپلی تیود) بر حسب متر نشان داده شده است. همچنین جدول (۵) مقادیر خروجی شتاب قائم ماکزیمم برای دامنه موج‌ها و سرعت‌های مختلف تست‌گیری وسیله نقلیه - ناهمواری‌های سهموی نمایش داده شده است.

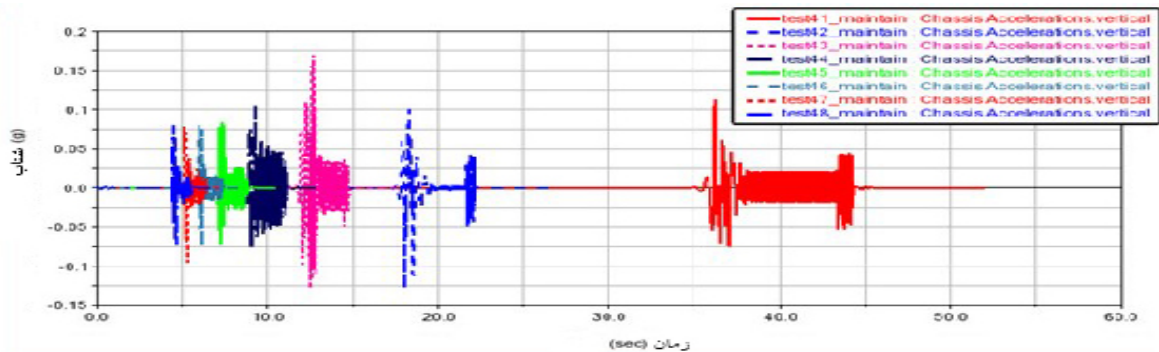
شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) بر روی تست‌های مربوط به حرکت وسیله نقلیه بر روی ناهمواری‌های سهموی شکل است. این شکل‌ها شامل ۸ تست مختلف، برای دامنه موج‌های مختلف، تعریف شده است. در توضیحات هر شکل، مقدار دامنه موج با



شکل ۱۱. تغییرات شتاب قائم در طول ناهمواری سهموی با دامنه موج  $A=0.001$  (m)



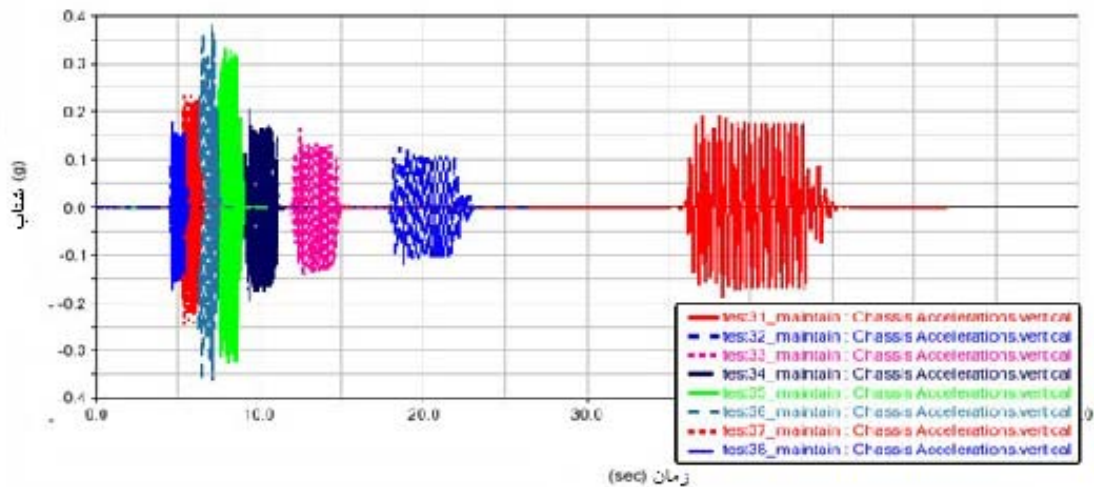
شکل ۱۲. ب تغییرات شتاب قائم در طول ناهمواری سهموی با دامنه موج  $A=0.0015$  (m)



شکل ۱۳. تغییرات شتاب قائم در طول ناهمواری سهموی با دامنه موج  $A=0.0025$  (m)

جدول ۵. مقادیر خروجی شتاب قائم ماکزیمم برای دامنه موج‌ها و سرعت‌های مختلف تست‌گیری وسیله نقلیه در ناهمواری‌های سهموی

۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	سرعت (کیلومتر بر ساعت)	شتاب (g)
۱/۱۸	۰/۶۶۳	۰/۴۵۴	۰/۴	۰/۲۷۱	۰/۲۲۵	۰/۱۸۰۹	۰/۰۹۳۹	A=۰/۱	
۰/۷۹۴۹	۱/۱۵۸	۱/۰۲	۰/۶۲۲	۰/۲۷۲۸	۰/۲۷۲۱	۰/۱۷۴	۰/۰۰۱۱	A=۰/۰۵	
۰/۲۴۱۸	۰/۲۲۹۲	۰/۲۱۶۲	۰/۱۹۱۱	۰/۲۰۶۳	۰/۲۱۲۸	۰/۲۷۰۸	۰/۰۹۲۹	A=۰/۰۱	
۰/۱۸۱۸	۰/۲۴۲۵	۰/۳۸۶۸	۰/۳۳۳۴	۰/۲۰۳۷	۰/۱۶۵۶	۰/۱۲۴۵	۰/۱۹۳۸	A=۰/۰۰۵	
۰/۰۸۰۸	۰/۰۷۸۱	۰/۰۸۱۳	۰/۰۸۴۹	۰/۱۰۵۹	۰/۱۷۰۲	۰/۱۰۰۹	۰/۱۱۳۱	A=۰/۰۰۲۵	
۰/۱۰۱۸	۰/۰۸۰۴	۰/۰۸۲۹	۰/۰۷۹۶	۰/۰۸۹۵	۰/۱۰۴۷	۰/۱۳۹۳	۰/۰۸۱۳	A=۰/۰۰۱۵	
۰/۰۸۳۳	۰/۰۸۱۳	۰/۰۸۳۷	۰/۰۸۰۳	۰/۰۹۵۷	۰/۱۰۰۷	۰/۰۶۵۳	۰/۰۸۱۱	A=۰/۰۰۱	



شکل ۱۴. تغییرات شتاب قائم در طول ناهمواری سهموی با دامنه موج  $A=0.005$  (m)

#### ۴-۱-۱- ناهمواری‌های سینوسی شکل

شکل (۲۲)، نشان می‌دهد که در سرعت عبور وسیله نقلیه در ناهمواری‌های سینوسی شکل، یک دامنه موج بحرانی وجود که به‌ازای این دامنه موج آسایش سرنشینان به خطر می‌افتد و حداکثر شتاب قائم در بیشینه خود عمل خواهد نمود. همین موضوع می‌تواند نشان دهد که در صورت داشتن سرعت عبوری وسایل نقلیه در معابر مختلف دارای ناهمواری، برای سرعت عبوری ۸۵ درصدی وسایل نقلیه، اولویت تعمیر و نگهداری ناهمواری‌ها با کدام دامنه موج یا طول موج‌ها خواهد بود تا به وضعیت آسایش سرنشینان و بهبود آن کمک نماید.

#### ۴-۲- تحلیل رابطه بین تغییرات دامنه موج بحرانی و

##### سرعت حرکت بر روی ناهمواری‌ها

به‌منظور اولویت‌دهی به تعمیر و نگهداری ناهمواری‌های سطح راه، باید توسط برنامه‌ریزها و مهندسين روسازی در یک پروژه PMS، ناهمواری‌های بحرانی در سرعت‌های عبور مجاز راه‌ها، رمپ‌ها، معابر شهری کم تردد و سرعت کم، شناسایی شوند؛ بنابراین بررسی و به‌دست‌آوردن رابطه بین دامنه موج بحرانی و سرعت حرکت وسایل نقلیه برای اولویت‌دهی به عملیات و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری و همچنین بررسی دقت شاخص‌های بر مبنای دینامیک وسیله نقلیه به‌ویژه IRI، ضروری محسوب می‌شود. در این قسمت، این ارتباطات مورد بررسی قرار می‌گیرند.

جدول ۶. سرعت متناظر با بیشترین شتاب قائم در دامنه موج‌های مختلف

سرعت (کیلومتر بر ساعت)	دامنه موج (متر)
۲۰	۰/۰۰۱
۸۰	۰/۰۰۱۵
۲۰	۰/۰۰۲۵
۵۰	۰/۰۰۵
۸۰	۰/۰۱
۸۰	۰/۰۵
۸۰	۰/۱

با برداشت و چیدمان داده‌های حداکثر شتاب قائم بر مبنای سرعت در مختصات دکارتی، روند و مدل ریاضی خطی که بتواند در سرعت‌های مختلف انتخابی دامنه موج بحرانی را برای اولویت تعمیر ارائه کند به شرح شکل (۱۵) به دست آمد. همچنین در نمودار (۱۶)، روند تغییرات و رابطه بین حداکثر شتاب قائم ناهمواری سینوسی و سرعت حرکت به دست آمد. این مدل نیز به صورت خطی - توانی تعریف گردید که در آن با داشتن سرعت عبور وسایل نقلیه می‌توان حداکثر شتاب قائم وارد بر وسایل نقلیه به دست آورد. مدل‌های تعریف شده به صورت روابط (۱) و (۲) هستند:

$$CA = 0.0009(S) - 0.0111, R^2 = 0.7619 \quad (1)$$

$$MVA = 0.0183(S) - 0.2419, R^2 = 0.9291 \quad (2)$$

که در روابط بالا:

CA: دامنه موج بحرانی بر حسب (متر)

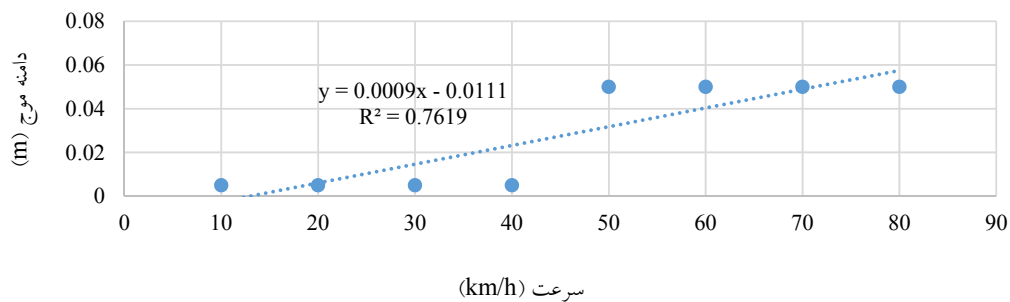
MVA: حداکثر شتاب قائم

S: سرعت وسیله نقلیه بر حسب کیلومتر بر ساعت، هستند.

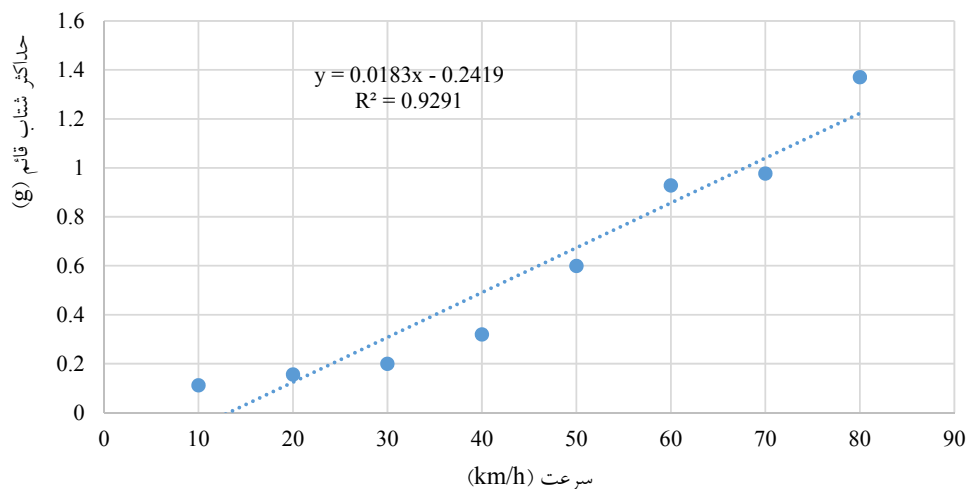
در جدول (۶) مشاهده می‌گردد که:

- در دامنه موج ۰/۰۰۱ متر، بیشترین شتاب قائم در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد.
- در دامنه موج ۰/۰۰۱۵ متر، بیشترین شتاب قائم در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد.
- در دامنه موج ۰/۰۰۲۵ متر، بیشترین شتاب قائم در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد.
- در دامنه موج ۰/۰۰۵ متر، بیشترین شتاب قائم در سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد.
- در دامنه موج ۰/۰۱ متر، بیشترین شتاب قائم در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد.
- در دامنه موج ۰/۰۵ متر، بیشترین شتاب قائم در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد.
- در دامنه موج ۰/۱ متر، بیشترین شتاب قائم در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد.

رابطه بین حداکثر شتاب قائم ناهمواری سینوسی و سرعت حرکت



شکل ۱۵. روند تغییرات و رابطه بین دامنه موج بحرانی و سرعت حرکت - ناهمواری سینوسی



شکل ۱۶. روند تغییرات و رابطه بین حداکثر شتاب قائم ناهمواری سینوسی و سرعت حرکت

#### ۴-۲- ناهمواری‌های سهموی شکل

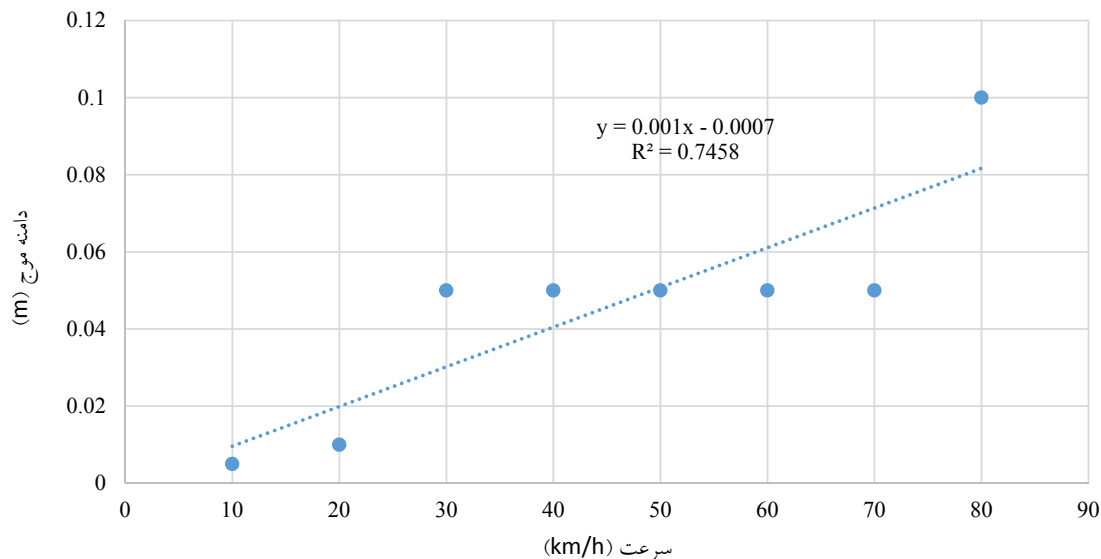
موج‌ها خواهد بود تا به وضعیت آسایش سرنشینان و بهبود آن کمک نماید. در جدول (۶) مشاهده می‌گردد که:

- در دامنه موج ۰/۰۰۱ متر، بیشترین شتاب قائم در سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد.
- در دامنه موج ۰/۰۰۱۵ متر، بیشترین شتاب قائم در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد.
- در دامنه موج ۰/۰۰۲۵ متر، بیشترین شتاب قائم در سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد.

جدول (۶)، نشان می‌دهد که در سرعت عبور وسیله نقلیه در ناهمواری‌های سهموی شکل، یک دامنه موج بحرانی وجود که به‌ازای این دامنه موج آسایش سرنشینان به خطر می‌افتد و حداکثر شتاب قائم در بیشینه خود عمل خواهد نمود. همین موضوع می‌تواند نشان دهد که در صورت داشتن سرعت عبوری وسایل نقلیه در معابر مختلف دارای ناهمواری، برای سرعت عبوری ۸۵ درصدی وسایل نقلیه، اولویت تعمیر و نگهداری ناهمواری‌ها با کدام دامنه موج یا طول

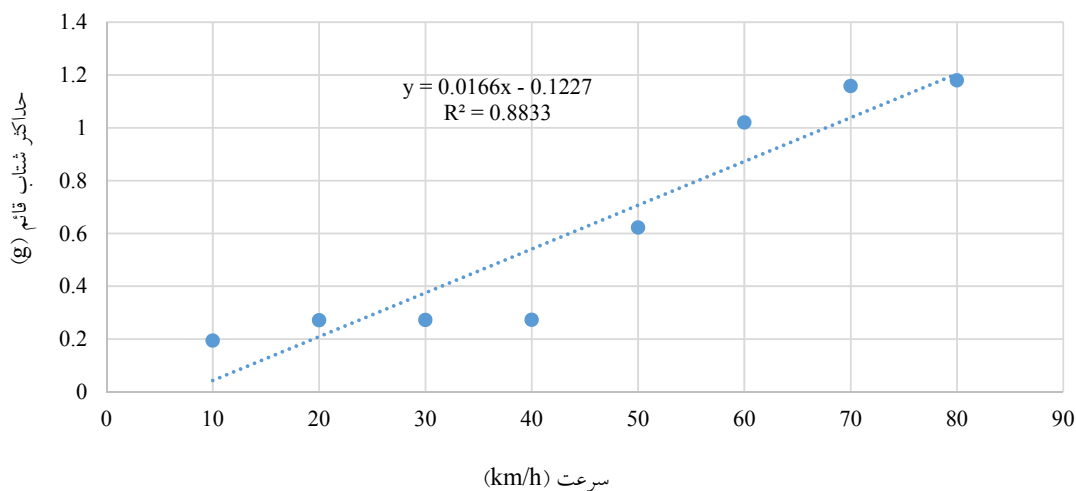
جدول ۷. بیشترین شتاب قائم در سرعت و دامنه‌های مختلف در ناهمواری سهموی

سرعت (کیلومتر)	دامنه موج (متر)
۳۰	۰/۰۰۱
۲۰	۰/۰۰۱۵
۳۰	۰/۰۰۲۵
۶۰	۰/۰۰۵
۸۰	۰/۰۱
۷۰	۰/۰۵
۸۰	۰/۱

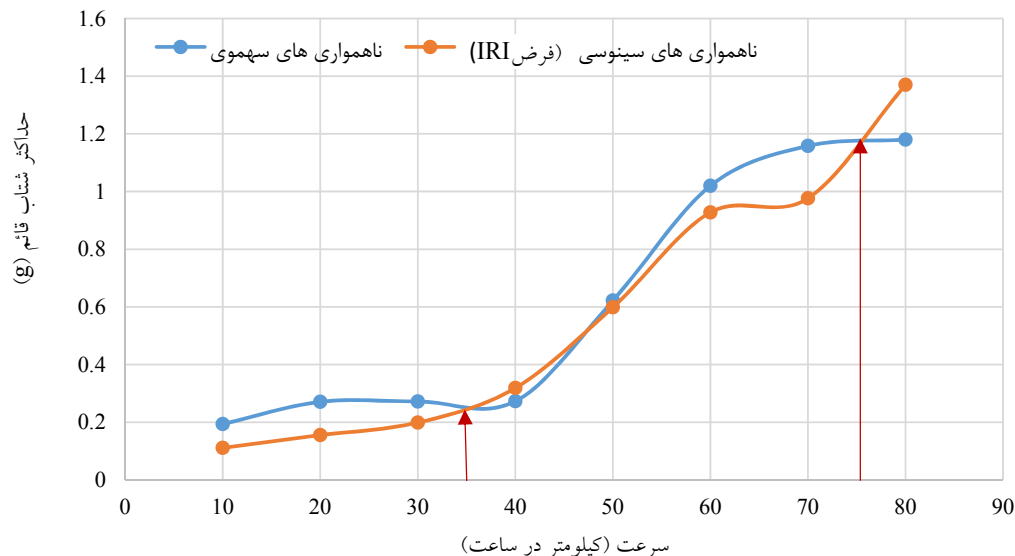


شکل ۱۷. روند تغییرات و رابطه بین دامنه موج بحرانی و سرعت حرکت - ناهمواری سهموی

- در دامنه موج ۰/۰۰۵ متر، بیشترین شتاب قائم در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد.
  - در دامنه موج ۰/۰۱ متر، بیشترین شتاب قائم در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد.
  - در دامنه موج ۰/۰۵ متر، بیشترین شتاب قائم در سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد.
  - در دامنه موج ۰/۱ متر، بیشترین شتاب قائم در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد.
- در نمودار شکل‌های (۱۷) و (۱۸) به ترتیب، مدل ریاضی خطی که بتواند در سرعت‌های مختلف انتخابی دامنه موج بحرانی ناهمواری سهموی را برای اولویت تعمیر ارائه کند و روند تغییرات و رابطه بین حداکثر شتاب قائم ناهمواری سهموی و سرعت حرکت به دست آمد. مدل ریاضی خطی - توانی به صورت روابط (۳) و (۴) تعریف گردید (پارامترها و واحدهای آن‌ها مانند روابط (۳) و (۴) هستند):
- (۳)  $CA = 0.001(S) - 0.0007, R^2 = 0.7458$
- (۴)  $MVA = 0.0166(S) - 0.1227, R^2 = 0.8833$



شکل ۱۸. روند تغییرات و رابطه بین حداکثر شتاب قائم ناهمواری سهموی و سرعت حرکت



شکل ۱۹. روند تغییرات و رابطه بین حداکثر شتاب قائم ناهمواری سهموی و سرعت حرکت

است بر اساس جداول موجود در آیین‌نامه ISO 263-1 و ISO 263-2 بازه‌های مطلوبیت راحتی سرنشینان وسیله نقلیه ارائه شده است. در تعریف شاخص بین‌المللی راحتی سرنشینان وسیله نقلیه دو روش وجود دارد که به شرح زیر است:

۱- برداشت ارتعاشات (شتاب وارد به وسیله نقلیه) بخشی از وسیله نقلیه برای تخمین راحتی سرنشینان وسیله نقلیه

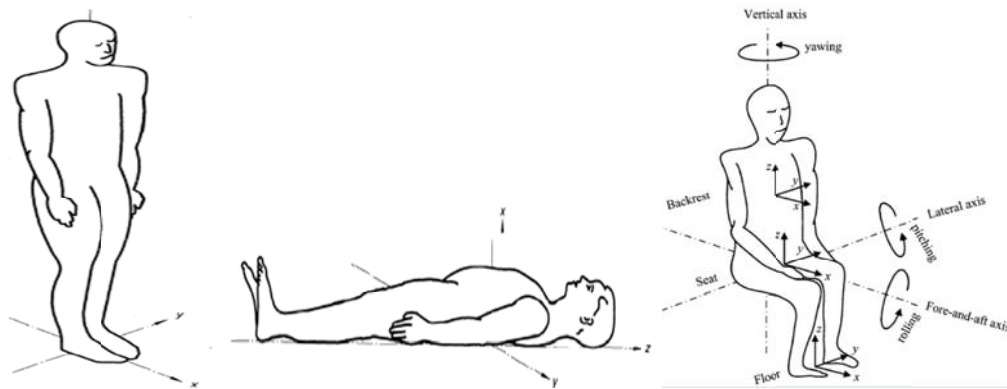
۲- برداشت ارتعاشات یا شتاب وارد به وسیله نقلیه در جهات مختلف

به‌طور کلی در روش اول مقادیر شتاب وارد به بازوها و دست‌های راننده وسیله نقلیه اندازه‌گیری می‌شود و در روش دوم مقادیر شتاب وارد به پشت‌پاها و باسن سرنشینان وسیله نقلیه اندازه‌گیری می‌شود. در روش دوم اندازه‌گیری شتاب وارد به سرنشینان وسیله نقلیه در حالات مختلف مانند ایستاده نشسته و دراز کشیده امکان‌پذیر است. از این جهت در این تحقیق به دلیل شبیه‌سازی و در نظر گرفتن کل وسیله نقلیه شتاب وارد به تمام بدنه محاسبه و ارائه شده است. در تعیین راحتی سرنشینان وسیله نقلیه فاکتورهای دیگری نیز تأثیرگذار است از جمله طول سفر و فعالیت سرنشینان وسیله نقلیه در حین سفر و ...، اما در این تحقیق با فرض ثابت بودن سرنشینان در حالات مختلف بازه‌های راحتی سرنشینان محاسبه شده است. در شکل‌های (۲۰) حالات مختلف سرنشینان وسیله نقلیه در هنگام سفر را نشان می‌دهد.

۴-۳- تحلیل تفاوت راحتی سرنشینان و شتاب قائم وارد بر وسیله نقلیه بر اساس شکل ناهمواری سهموی یا سینوسی مطابق با شکل (۱۹) مشاهده می‌شود که تا قبل از سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت، تفاوت شتاب قائم ناشی از ناهمواری‌ها بر روی وسایل نقلیه، برای نوع سهموی نسبت به سینوسی بیشتر است، با افزایش سرعت و نزدیک شدن آن به ۴۰، ۵۰ و ۶۰ کیلومتر بر ساعت مقادیر شتاب قائم هر دو نوع ناهمواری به هم نزدیک می‌شود و در سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت یک نقطه عطف برای بازه سرعت ۴۰ تا ۶۰ کیلومتر بر ساعت رخ می‌دهد. همچنین در سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت عکس اتفاقی که برای سرعت کمتر از ۴۰ کیلومتر بر ساعت رخ داده بود، می‌افتد. در سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت مقدار شتاب قائم ناهمواری سهموی همچنان بیشتر از سینوسی است. در سرعت نزدیک به ۸۰ (km/h)، مقدار شتاب قائم ناهمواری سینوسی (فرض IRI) تفاوت قابل‌توجهی نزدیک به ۰٫۲ متر بر مجذور ثانیه نسبت به سهموی را نشان می‌دهد.

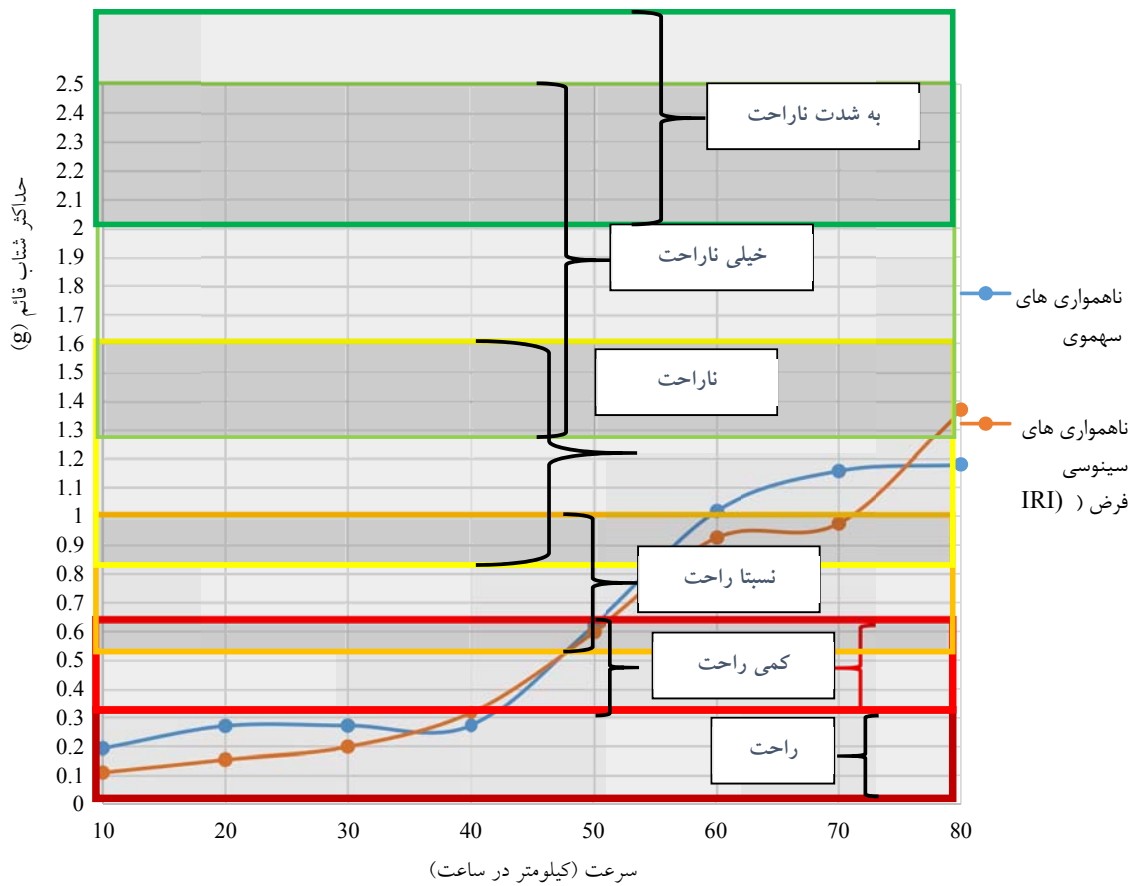
#### ۴-۴-۴- مقایسه نتایج با شاخص بین‌المللی راحتی سرنشینان

شاخص بین‌المللی تعیین راحتی سرنشینان وسیله نقلیه مقادیر ارتعاشات وسیله نقلیه را در یک مسیر اندازه گرفته و بر اساس مقادیر و بازه‌های تعیین شده مطلوب یا عدم مطلوب بودن مسیر را از نظر راحتی سرنشینان وسیله نقلیه اندازه می‌گیرند. به دلیل اینکه هدف نهایی این تحقیق به دست آوردن شتاب وارد به وسیله نقلیه



شکل ۲۰. حالت ایستاده و دراز کشیده سرنشین وسیله نقلیه و شتاب‌های وارد شده در جهات مختلف

مقایسه نتایج شتاب قائم برای هر دو نوع ناهمواری با ISO



شکل ۲۱. روند تغییرات و رابطه بین حداکثر شتاب قائم ناهمواری سهموی و سرعت حرکت

نشان می‌دهد. در سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت نیز مواردی که در مورد سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت است، اتفاق می‌افتد. در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت شتاب قائم وارد بر وسیله نقلیه در ناهمواری سینوسی مانند سرعت‌های کمتر از ۴۰ کیلومتر بر ساعت مجدداً مقادیر بالاتری را نسبت به ناهمواری‌های سهموی ارائه می‌دهد. در مقایسه با مقادیر ISO، ناهمواری سینوسی در محدوده خیلی ناراحت و ناهمواری سهموی در محدوده ناراحتی برای سرنشینان قرار می‌گیرد. به‌طور کلی از قبل می‌دانیم که با فرض ناهمواری مسیر در این تحقیق بر اساس  $IRI=10$  مقداری است عملاً باعث می‌شود وسایل نقلیه در حال حرکت با سرعت کم و کیفیت رانندگی کاهش یابد و در محدوده ناراحتی قرار می‌گیرد. اما مطابق با نتایج مشاهده می‌شود در هر دو نوع ناهمواری سینوسی و سهموی در محدوده به‌شدت ناراحت و خیلی ناراحت از استاندارد ISO قرار نگرفت، و یکی از ایرادات شاخص IRI که در فرض تحقیق بود به شمار می‌رود.

مقایسه مقادیر خروجی پاسخ دینامیکی وسیله نقلیه در مورد پارامتر شتاب قائم با مقادیر راحتی استاندارد ISO نشان می‌دهند که برای هر دو نوع ناهمواری سینوسی و سهموی، در سرعت‌های کمتر از ۴۰ کیلومتر بر ساعت مطابق با شکل (۲۱)، در محدوده راحتی ISO قرار می‌گیرند، درحالی‌که در سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت در محدوده کمی راحت قرار می‌گیرد. با رسیدن سرعت حرکت وسیله نقلیه آزمایش به‌سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت برای ناهمواری سهموی در محدوده ناراحتی و برای ناهمواری سینوسی در محدوده نسبتاً راحت قرار خواهد گرفت. این موضوع نشان می‌دهد که بر اساس استاندارد ISO، ناهمواری سینوسی که فرض اولیه برای ساخت شاخص IRI است، فرض محافظ کارانه‌ای نمی‌باشد و در صورتی‌که در یک IRI ثابت، نوع شکل ناهمواری (از خرابی‌های راه) تغییر نماید و به شکل سهموی فرض و یا تبدیل شود، مقدار شتاب قائم طبق ISO ناراحتی سرنشینان را

## ۵- نتیجه‌گیری

مقادیر شتاب قائم وارد به وسیله نقلیه در سرعت‌های بالا اتفاق می‌افتد و همچنین مقادیر شتاب قائم بیشینه در دامنه موج‌های پایین‌تر در سرعت‌های کمتر اتفاق می‌افتد. به‌عنوان مثال در ناهمواری از نوع سهموی مقادیر بیشینه شتاب برای دامنه موج‌های ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۰۵ متر، در سرعت‌های بالای ۶۰ کیلومتر بر ساعت رخ می‌دهد. درحالی‌که مقادیر شتاب قائم برای دامنه موج‌های ۰/۰۰۲۵، ۰/۰۰۱۵ و ۰/۰۰۱ متر ددر سرعت‌های کمتر از ۴۰ کیلومتر بر ساعت اتفاق می‌افتد. در دو ناهمواری مطرح شده می‌توان مشاهده کرد که در دامنه موج ۰/۰۰۵ متر مقادیر شتاب وارد به وسیله نقلیه با افزایش سرعت افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. بدین صورت که مقادیر شتاب وارد به وسیله نقلیه در خرابی‌های طراحی شده در سرعت‌های ۷۰ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت از مقادیر شتاب در سرعت‌های ۵۰ و ۶۰ کیلومتر بر ساعت کمتر است و این می‌توان نشان از این باشد که با افزایش سرعت در همه نوع خرابی و در دامنه موج‌های مختلف مقدار شتاب بیشینه وارد به وسیله نقلیه افزایش پیدا نمی‌کند.

تغییرات شتاب قائم وسیله نقلیه در طول موج‌های مختلف و در ناهمواری به شکل سینوسی و سهمی نشان از این دارد که دامنه موج‌های ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۱۵ و ۰/۰۰۲۵ متر مقادیر شتاب قائم در محدوده‌ای تقریباً ثابت در حال نوسان هستند. این موضوع در ناهمواری‌های سینوسی و سهمی صدق می‌کند. تغییرات شتاب قائم برای خرابی‌های طراحی شده با افزایش سرعت تغییرات کمی را در دامنه موج‌های ذکر شده نشان می‌دهد. اما با افزایش مقادیر دامنه موج به ۰/۱ متر واضح است که مقدار شتاب قائم وارد به وسیله نقلیه افزایش پیدا کرده است. با تغییرات سرعت وسیله نقلیه در دامنه موج‌های کوتاه و در ناهمواری سینوسی مقادیر شتاب با افزایش ناچیزی مواجه است درحالی‌که در دامنه موج ۰/۱ و ۰/۰۵ متر مقادیر شتاب به‌صورت یکباره تغییرات افزایش زیادی را نشان می‌دهد. این موضوع برای خرابی از نوع سهمی نیز وارد است. در واقع در سرعت‌های مختلف و برای یک دامنه موج کوتاه اختلاف زیادی بین شتاب قائم وارد به وسایل نقلیه وجود ندارد. اما این مقادیر در دامنه موج‌های بلندتر زیاد می‌شود.

از نتایج مهم دیگر در این پایان‌نامه می‌توان نمودار تشکیل شده برای ارزیابی نتایج راحتی بر اساس استانداردهای ذکر شده است.

با بررسی بیشتر بر روی شتاب قائم در سرعت‌های مختلف می‌توان مشاهده کرد که در دامنه موج‌های بلندتر بیشترین

عطف برای بازه سرعت ۴۰ تا ۶۰ کیلومتر بر ساعت رخ می‌دهد. همچنین در سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت عکس اتفاقی که برای سرعت کمتر از ۴۰ کیلومتر بر ساعت رخ داده بود، می‌افتد. در سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت مقدار شتاب قائم ناهمواری سهمی همچنان بیشتر از سینوسی است. در سرعت نزدیک به ۸۰ کیلومتر بر ساعت که فرض IRI است، مقدار شتاب قائم ناهمواری سینوسی تفاوت قابل توجهی نزدیک به ۰/۲ متر بر مجذور ثانیه نسبت به سهمی را نشان می‌دهد.

باتوجه به این نمودار می‌توان گفت که در سرعت‌های ۶۰، ۷۰ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت شتاب وارد به وسیله نقلیه وارد فاز ناراحت می‌شود. به‌طور کلی نحوه تغییرات شتاب برای دو نوع خرابی مشابه است. اما قبل از سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت، تفاوت شتاب قائم ناشی از ناهمواری‌ها بر روی وسایل نقلیه، برای نوع سهمی نسبت به سینوسی بیشتر است، با افزایش سرعت و نزدیک شدن آن به ۴۰، ۵۰ و ۶۰ کیلومتر بر ساعت مقادیر هر دو نوع ناهمواری به هم نزدیک شده و در سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت یک نقطه

## ۶- مراجع

- Nguyen, X., Nguyen, T., & Tran, P. H. (2020, July). The Effect of Road Surface Roughness to Recommended Speed of Vehicles. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, *IOP Publishing*, Vol. 886, No. 1, 012014-012015.
- Rudolph R. Hegmon, (1979). Definition and Measurement of Pavement Surface Roughness. *Washington, D.C. 20590, June (U.S.A)*
- Sayers, M. W. (1995). On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile. *Transportation Research Record*, (1501).
- Sayers, M. W. (1998). The little book of profiling: basic information about measuring and interpreting road profiles. University of Michigan, Ann Arbor, *Transportation Research Institute*.
- International Standards Organization. (1997). Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration. Part 1: General Requirements. International. *Standard ISO 2631-Genève*.
- Li, Y., Liu, C., Du, Y., & Jiang, S. (2020). A novel evaluation method for pavement distress based on impact of ride comfort. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-13.
- Mirtabar, Z., Golroo, A., Mahmoudzadeh, A., & Barazandeh, F. (2020). Development of a crowdsourcing-based system for computing the international roughness index. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-10.
- Můčka, P. (2019). Influence of profile specification on International Roughness-
- N.Jazar, Reza. *Vehicle Dynamics*. New York. 2008. 931-932.

# Investigating the Effect of Wavy Roughness on the Comfort of Vehicle Passengers Using IRI Index

*Farshad Javaherinekoo, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*Alireza Sarkar, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*E-mail: sarkar@srbiau.ac.ir*

Received: February 2024- Accepted: June 2024

## **ABSTRACT**

Estimating the safety and comfort of the occupants of a road-using vehicle is one of the most important issues facing researchers in the field of road and road safety. Road safety is examined in different branches. One of the most important parts of road safety assessment and maintenance management is the assessment and monitoring of road surface failures. The Road Roughness Index (IRI) is used for this purpose. . In order to evaluate the path of the road, in addition to evaluating the geometric design, it is also necessary to evaluate the geometry of the faults. If a criterion can be found to assess the situation, the critical state of the criterion can be found and if it reaches a critical state, the road condition can be considered unsafe or in need of improvement. In this research, the dynamic response of the vehicle while moving on roads with different rough shapes but with the same IRI (the case where the two-wheel IRI of the vehicle is equal to 10) is simulated by the software. In addition to examining the dynamic response of the front axle of the vehicle (due to the application of more force on the front axle) on common parameters such as: vertical acceleration, maximum vertical acceleration and the minimum root of vertical acceleration, to determine whether in a symmetrical roughness, again a response Is there dynamics for the left and right wheels? If a clear relationship can be established between the roughness created by the definition of the IRI index at the road surface and the shape of the roughness (wavelength and amplitude), it is possible to prioritize the breakdowns with critical wavelengths (most inconvenient). The results show that by further examination of the vertical acceleration at different speeds, it can be seen that in the amplitude of longer waves, the highest values of vertical acceleration entered by the vehicle at speed. High speeds occur and also maximum vertical acceleration values occur at lower wavelengths at lower speeds. For example, in parabolic failure, the maximum acceleration values for the wave amplitudes of 0.1(m), 0.05(m), 0.01(m), 0.005(m) occur at speeds above 60 km / h. Vertical acceleration values for wave amplitudes of 0.0025, 0.0015 and 0.001 occur at speeds of less than 40 km / h. At a speed of nearly 80 km / h, the value of the vertical acceleration of sinusoidal roughness (according to IRI) shows a significant difference of about 0.2 m / s relative to the parabolic.

**Keywords:** Roughness, IRI Index, Safety, Passenger Comfort