تحلیل فرمان پذیری خودروی سه چرخ در یک مانور استاندارد

محمدامین سعیدی[1]، محمود طاهری گرجی[2]

1 - استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی ، تهران
2- فارغ التحصیل کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران
amin_saeedi@sru.ac.ir

چکیده

در این مقاله بررسی و تحلیل دینامیکی یک خودرو سه‌چرخ در مانور تعویض خط دوگانه مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا یک مدل دینامیکی کامل خودرو سه‌چرخ در نرم افزار کارسیم با ارایه مشخصات اصلی بدنه خودرو، سیستم فرمان و مشخصات سیستم تعلیق جلو و عقب بکار گرفته شد. سپس شبیه‌سازی کامپیوتری با استفاده از نرم‌افزار کارسیم در مانور تعویض خط دوگانه برای سرعتهای مختلف انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که با افزایش سرعت، خودرو از مسیر مطلوب منحرف شده و ناپایداری واژگونی اتفاق می-افتد.

کلیدواژگان

تحلیل دینامیکی، کارسیم، خودرو سه‌چرخ، زاویه چرخش، زاویه لغزش جانبی، شتاب جانبی مرکز ثقل

Handling analysis of a three-wheel vehicle in a standard maneuver

Mohammad Amin saeedi[1], Mahmoud Taheri Gorji[2]

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.
2- Alumnus of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
Tehran, Iran, Amin_saeedi@sru.ac.ir

Abstract

In this article, dynamic analysis of a three-wheel vehicle has been examined in double lane change maneuver. First, a complete dynamic model of the three-wheeled vehicle in Carsim software was utilized by presenting the main specifications of the vehicle body, steering system and front and rear suspension specifications. Then, computer simulation has been done using CarSim software during double lane change maneuver at different velocities. The simulation results showed that the vehicle deviates from its desired value and rollover instability occurs.

Keywords

Dynamic analysis, CarSim, three-wheel vehicle, yaw angle, lateral acceleration.

۱-مقدمه

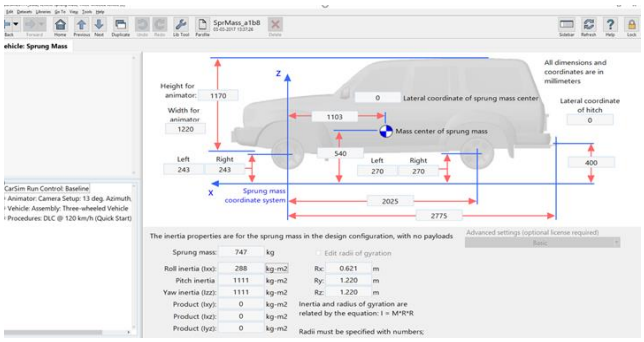
با توجه به پیشرفت علم در حوزه های مختلف، علم خودرو نیز از این روند عقب نمانده و همچنان به بروز رسانی خود ادامه می‌دهد. شرکت‌های خودرو سازی در تلاش اند تا کیفیت و دقت عمل در خودرو و راحتی، آسایش و امنیت را برای راننده و سرنشینان آن خودرو فراهم کنند. یکی از اقدامات در این راستا تلاش برای کاهش تصادفات جاده‌ای است. یکی از بدترین حالت-های تصادف واژگونی می باشد که اکثر خودرو ها در جلوگیری از آسیب به راننده در این مدل تصادف نمی‌توانند موفقیت چندانی به دست بیاورند؛ یعنی حتی ایمن‌ترین خودروها نیز ممکن است در این مدل تصادف سرنشینانشان را به کام مرگ بسپارند. دلیل این امر، این است که در پدیده ی واژگونی معمولا، خودرو با سرعت و انرژی زیاد به صورت ضربه‌ای به زمین می‌خورد. اگر مجموع سقف، ستون و شیشه‌های خودرو نتوانند یک‌ونیم برابر وزن خودرو را تحمل کنند، سرنشینان آن خودرو در واژگونی له خواهند شد و تحمل این نیروی ضربه ای زیاد کاری نیست که هر خودرویی توان انجام آن را داشته باشد ولی طراحی‌وساخت خودروهایی با این توانایی کار بعیدی نیست و می‌توانند ساخته‌شوند. بنابراین ارزیابی رفتاردینامیکی‌خودرو راهکار اصلی در جهت بررسی ایمنی خودرو، کاهش حوادث رانندگی و بهبود عملکرد خودرو است[1-6]. لذا این پژوهش تلاش دارد تا بتواند رفتاردینامیکی‌خودرو سه چرخ را در یک تست جاده ای شبیه‌سازی و در چند سرعت مختلف بررسی کند.

۲-روش تحقیق

در این بخش، با استفاده از نرم افزار کارسیم عملکرد دینامیکی یک خودرو سه چرخ در شرایط مختلف جاده ای مورد بررسی قرار می‌گیرد.

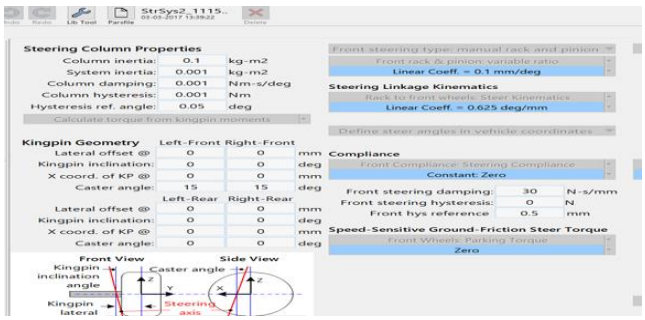
۳-مدل سازی در نرم افزار

در شبیه سازی خودرو سه‌چرخ با استفاده از نرم افزار کارسیم، خودرو سه چرخ از نوع دلتا از بخش خودروهای خدماتی انتخاب شده است. [7-9]
سپس مشخصات اصلی بدنه خودرو، مشخصات ستون فرمان، مشخصات بدنه، لاستیک تایر و مشخصات سیستم تعلیق جلو و عقب که در این مطالعه به کار رفته است.
مشخصات اصلی بدنه خودرو:



شکل۳-۱: مشخصات اصلی بدنه خودرو

مشخصات ستون فرمان:



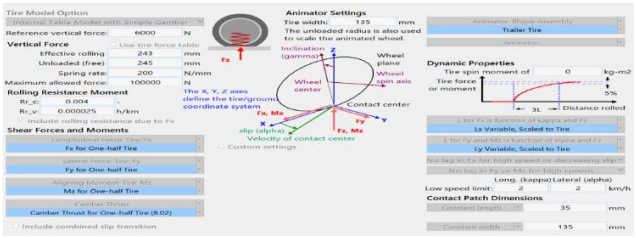
شکل۳-۲: مشخصات ستون فرمان

مشخصات سیستم تعلیق جلو و فنر و تایر آن:

مشخصات فنر جلو:

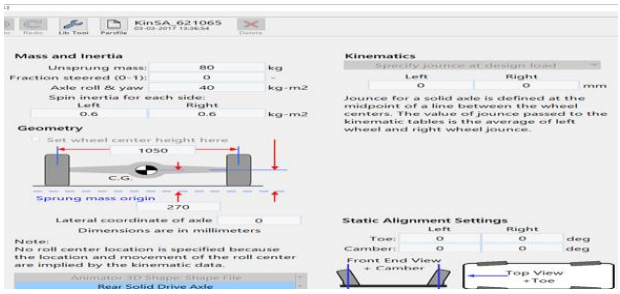
شکل۳-۳: مشخصات فنر جلو

مشخصات جرم، اینرسی و هندسه سیستم تعلیق جلو مربوط به تایر:

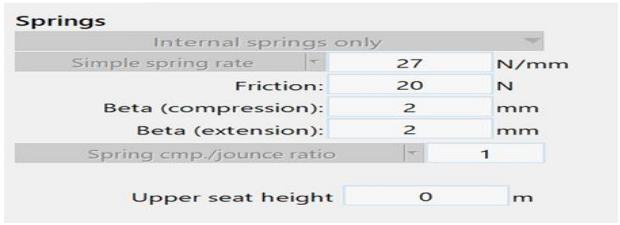


شکل ۳-۴: مشخصات تعلیق جلو مربوط به تایر

مشخصات سیستم تعلیق عقب و فنر و تایر آن:

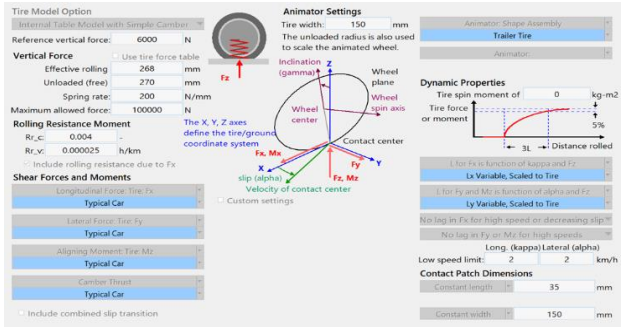


شکل ۳-۵: مشخصات تعلیق عقب



شکل۳-۶: مشخصات فنر عقب

مشخصات جرم، اینرسی و هندسه سیستم تعلیق عقب مربوط به تایر:



شکل ۳-۷: مشخصات تعلیق عقب مربوط به تایر

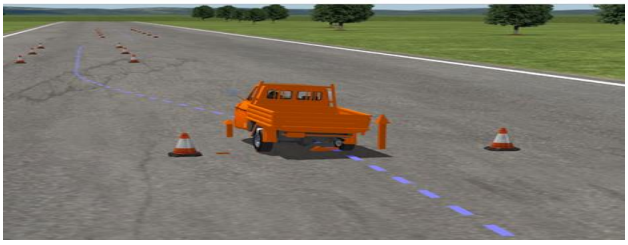
۴-شبیه سازی در نرم‌افزار

مانور تغییر خط دوگانه :

تست تغییر خط دولاین، به منظور پایداری جانبی خودرو در هنگام اعمال مانور فرار است. دراین تست که از دسته تست های معروف هندلینگ خودرو می باشد، خودرو در مسیر ثابتی در حرکت است و به طور ناگهانی تغییر مسیر میدهد و لاین خودرو عوض می‌کند؛ فاصله کوتاهی را در آن لاین می-ماند و دوباره تغییر مسیر داده و به لاین اولیه خود باز می‌گردد. در شکل ۳-۸ می‌توانیم مسیر تعیین شده این نوع تست را مشاهده کنیم.

شکل ۴-۱:تصویر تست هندلینگ در نرم‌افزار کارسیم

در این تست، خودرو وقتی وارد پیچ اول(از راست به چپ) می‌شود نیروهای عمودی وارد بر تایرهای در سمت خارج پیچ(در این تست چرخ‌های سمت راست) بیشتر خواهندبود و وزن‌ماشین بیشتر برروی تایرهای سمت‌راست می‌باشد و نیروهای عمودی وارد بر تایر های داخل پیچ(در این تست چرخ های سمت چپ) کمتر خواهد بود که به صورت فلش‌هایی عمودی در نرم‌افزار کارسیم و شبیه‌سازی آن در کنار بدنه خودرو نمایش داده‌می‌شود:

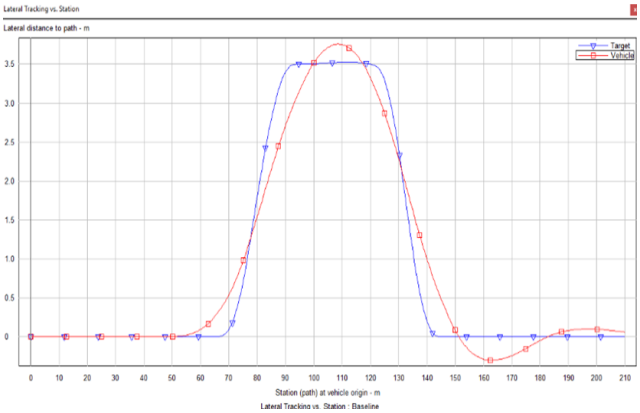


شکل۴-۲:تصویر نیروهای عمودی و عرضی وارد به تایرها

حال این تست را با شرایطی مشابه و ثابت اما با سرعت‌های متغیر بررسی و تحلیل میکنیم و نمودارها را ارزیابی می‌کنیم؛ برای این منظور با سرعت‌های ۹۵کیلومتربرساعت، ۱۰۵کیلومتربرساعت و ۱۰۸کیلومتر برساعت شروع به انجام تستی مشابه و ثابت برای هر سه سرعت می‌کنیم.

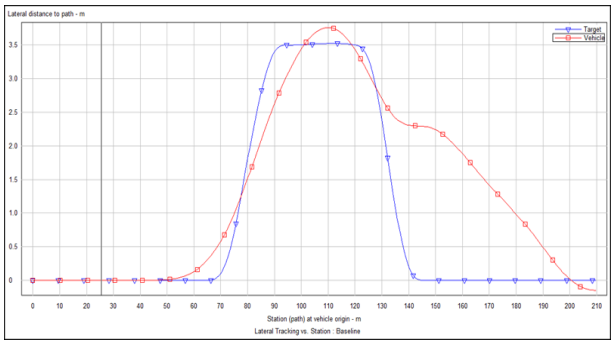
۵-نتایج شبیه‌سازی

در شکل ۵-۱ و ۵-۲ و ۵-۳ مقایسه مسیر مورد انتظار و مسیر طی شده در مانور در سه سرعت مطلوب بررسی شده است. در سرعت مربوط به ۹۵کیلومتر برساعت خودرو در پیچ اول۶۰ متری مسیر، زودتر فرمان چرخانده‌شده و در نقطه قله نمودار قرمز(۱۰۰-۱۲۰متری) از مسیر اصلی حدودا ۰.۲ متر انحراف داشته و در قسمت سوم مسیر(۱۶۰-۱۸۰متری) به میزان ۰.۳ متر انحراف داشته است.



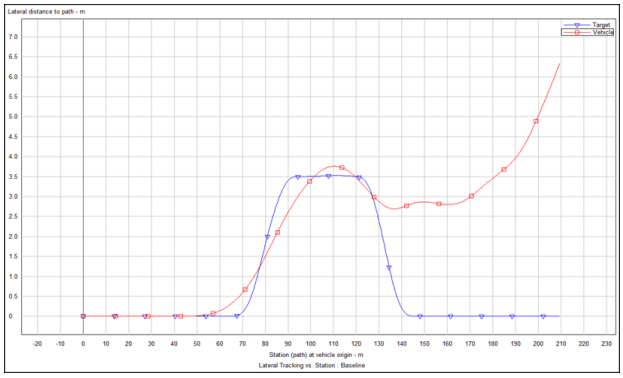
شکل۵-۱:مقایسه مسیر مورد انتظار و مسیر طی شده در سرعت ۹۵کیلومتربرساعت

برای سرعت ۱۰۵کیلومتربرساعت، خودرو در پیچ اول (۵۰ متری مسیر)، زودتر فرمان چرخانده شده و در نقطه قله نمودار قرمز (۱۱۰ متری از مسیر اصلی) حدودا ۰.۳ متر انحراف داشته و در قسمت سوم مسیر (۱۴۰-۲۰۰ متری) در شرایط معلق میان واژگونی و حرکت در حال پیمودن مسیر است و در ۲۰۰ متری مسیر هر سه چرخ روی جاده برمی‌گردند .



شکل۵-۲:مقایسه مسیر مورد انتظار و مسیر طی شده در سرعت ۱۰۵کیلومتربرساعت

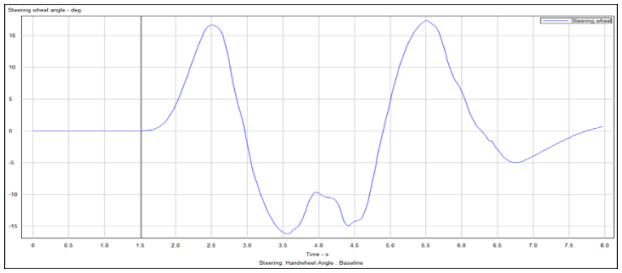
برای سرعت ۱۰۸کیلومتربرساعت، خودرو در پیچ اول (۵۰ متری مسیر) ، زودتر فرمان چرخانده شده و در نقطه قله نمودار قرمز (۱۱۰ متری از مسیر اصلی) حدودا ۰.۳ متر انحراف داشته و در قسمت سوم مسیر (۱۴۰-۱۳۰) متری ناگهان از شرایط پایدار خارج شده و چرخ عقب سمت راست از زمین بلند شده و خودرو به سمت چپ کم کم واژگون می شود و از مسیر اصلی دور می شود . (در سرعت ۱۰۷کیلومتربرساعت شاهد آستانه ی واژگونی خواهیم بود و اگر این سرعت مقداری بیشتر شود خودرو واژگون می‌شود)



شکل۵-۳:مقایسه مسیر مورد انتظار و مسیر طی شده در سرعت ۱۰۸کیلومتربرساعت

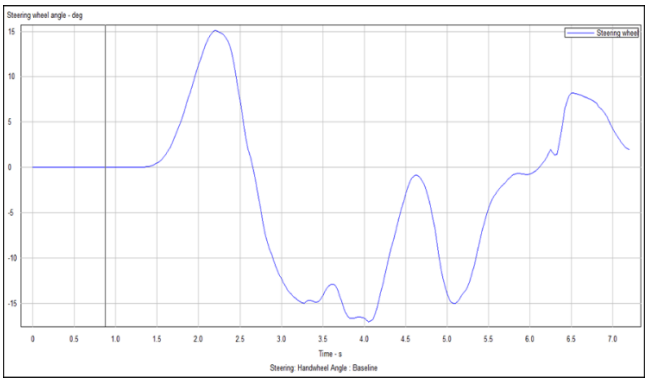
در گروه دیگر تحلیل ها تغییرات زاویه غربیلک فرمان در ۳ سرعت مطلوب بررسی شده است.[4-5]

برای سرعت ۹۵کیلومتربرساعت راننده خودرو در شروع پیچ اول با زاویه ۱۵ درجه غربیلک فرمان را به طور ناگهانی به سمت چپ می‌چرخاند و پس از ورود به پیچ به طور معکوس به سمت راست ۳۰ درجه غربیلک را میچرخاند (۱۵ درجه بازگشت به حالت اولیه + ۱۵ درجه به جهت راست) در ۴.۵ ثانیه پس از گذشت از تست فرمان را ۳۰ درجه به راست و در ۵.۵ ثانیه ۱۵ درجه فرمان را به حالت اولیه خود باز می‌گرداند.



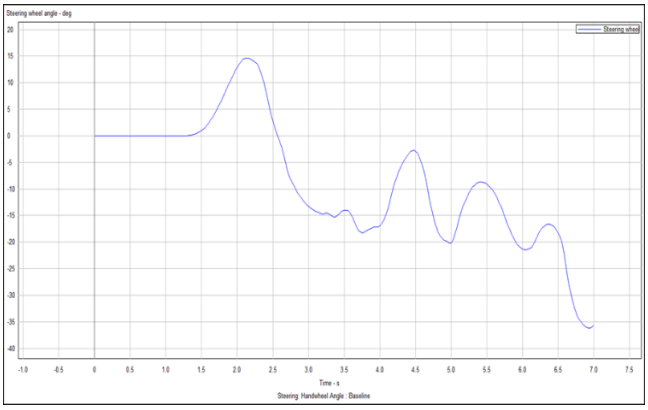
شکل۵-۴:تغییرات زاویه غربیلک فرمان در سرعت ۹۵کیلومتربرساعت

برای سرعت ۱۰۵ کیلومتر برساعت راننده خودرو در شروع پیچ اول (۱.۵ثانیه) با زاویه ۱۵ درجه غربیلک فرمان را به طور ناگهانی به سمت چپ می‌چرخاند و پس از ورود به پیچ به طور معکوس به سمت راست ۳۰ درجه غربیلک را میچرخاند (۱۵ درجه بازگشت به حالت اولیه + ۱۵ درجه به جهت راست) در ۴ ثانیه پس از گذشت از تست، راننده چند دهم ثانیه تعادل خودرو را از دست داده و فرمان در دست او ۱۰ درجه به چپ و راست به طور ناخواسته جابه جا می شود و در ۵ امین ثانیه تا ۶.۵ ثانیه از گذشت مانور ، تعادل خودروی در حال واژگونی را بدست می آورد و ۱۰ درجه فرمان را به سمت راست حرکات می دهد تا خودرو به شرایط اولیه بازگردد.



شکل۵-۵:تغییرات زاویه غربیلک فرمان در سرعت ۱۰۵کیلومتربرساعت

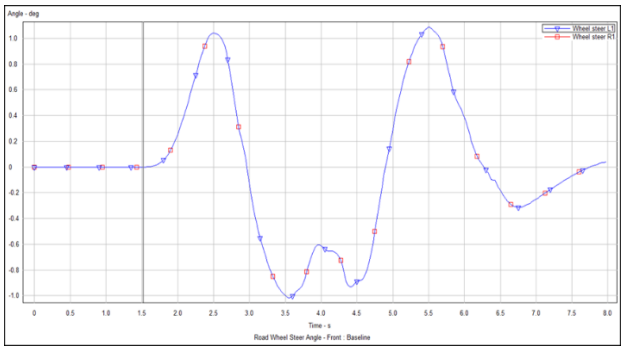
برای سرعت ۱۰۸ کیلومتربرساعت راننده خودرو در شروع پیچ اول (۱.۳ ثانیه) با زاویه ۱۵ درجه غربیلک فرمان را به طور ناگهانی به سمت چپ می-چرخاند و پس از ورود به پیچ به طور معکوس به سمت راست ۳۰ درجه غربیلک را می‌چرخاند (۱۵ درجه بازگشت به حالت اولیه + ۱۵ درجه به جهت راست) در ۳.۵ ثانیه پس از گذشت از تست (دقیقا در وسط مسیر دوم طراحی شده در مانور) راننده تعادل خودرو را از دست داده و فرمان در دست او تا ۲۰ درجه نوسان به سمت راست و چپ در درجات حالت سمت راست غربیلک فرمان دارد و خودرو به سمت چپ خود واژگون شده و چپ می‌کند.



شکل۵-۶:تغییرات زاویه غربیلک فرمان در سرعت ۱۰۸کیلومتربرساعت

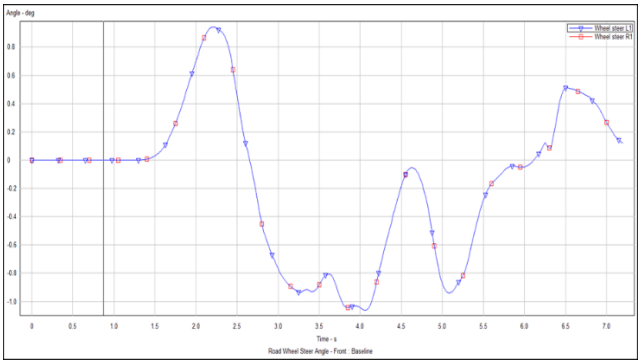
برای گروهی دیگر از تحلیل ها زاویه چرخش تایر جلو روی جاده برای ۳ سرعت مطلوب بررسی شده است.

برای سرعت ۹۵کیلومتربرساعت، تک چرخ جلوی خودروی سه چرخ مورد آزمایش، در ورود به پیچ اول به میزان مقداری بیش از یک درجه چرخش داشته و در ۲.۵ ثانیه و هنگام بازگشت فرمان به ۳۰ درجه در جهت عکس خود (۱۵ درجه به راست در غربیلک) این میزان به مقدار بیشینه خود می رسد و در ۳.۵ ثانیه تا ۴.۵ ثانیه به طور نوسانی زاویه چرخش چرخ جلو با میزان بیشینه ۰.۴ درجه تلورانس خواهد داشت ؛ پس از ۴.۵ ثانیه به میزان مقداری کمتر از دو درجه زاویه چرخ جلو به سمت چپ خواهد بود و در ۵.۵ ثانیه و در پیچ آخر به میزان ۱.۳ درجه زاویه چرخ جلو به سمت راست تغییر میکند و در ۶.۷ ثانیه به میزان ۰.۳ درجه از سمت راست به چپ درجه تایر جلو تغیر می‌کند تا خودرو به حالت اولیه خود در مسیر بازگردد.



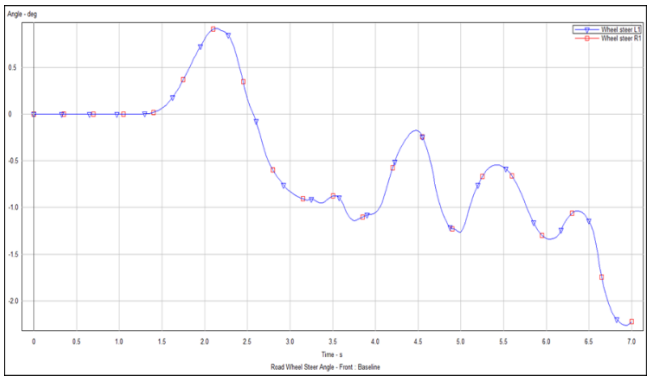
شکل۵-۷:تغییرات چرخش زاویه تایر جلو در سرعت ۹۵کیلومتربرساعت

برای سرعت ۱۰۵کیلومتربرساعت تک چرخ جلوی خودروی سه چرخ مورد آزمایش ، در ورود به پیچ اول به میزان مقداری کمتر از یک درجه(۰.۹) چرخش داشته و در ۲.۲ ثانیه و هنگام بازگشت فرمان به ۳۰ درجه در جهت عکس خود (۱۵ درجه به راست در غربیلک) این میزان به مقدار بیشینه خود می رسد و در ۳.۵ثانیه تا ۵.۵ ثانیه به طور نوسانی زاویه چرخش چرخ جلو با میزان بیشینه ۱ درجه تلورانس خواهد داشت ؛ از ۵.۵ثانیه تا ۶.۵ ثانیه به میزان ۰.۷ درجه زاویه چرخ جلو به صورت نامتعادل به سمت چپ خواهد بود و در ۶.۵ ثانیه و در پیچ آخر به میزان ۰.۵درجه زاویه چرخ جلو به سمت راست تغییر میکند و در ۸ ثانیه به میزان ۰ درجه انحراف چرخش چرخ جلو می‌رسد تا خودرو به حالت اولیه خود در مسیر بازگردد.



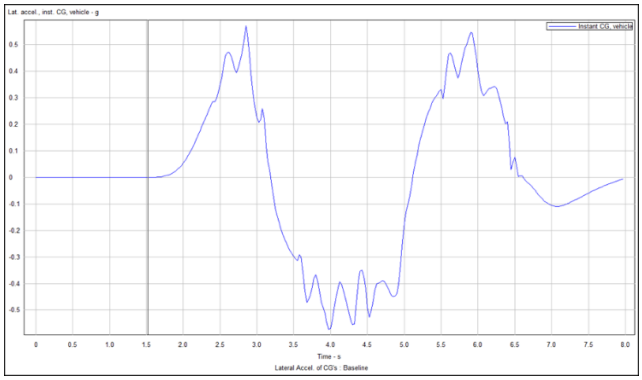
شکل۵-۸:تغییرات چرخش زاویه تایر جلو در سرعت ۱۰۵کیلومتربرساعت

برای سرعت ۱۰۸کیلومتربرساعت تک چرخ جلوی خودروی سه چرخ مورد آزمایش ، در ورود به پیچ اول به میزان ۰.۷درجه چرخش داشته و در ۲.۱ثانیه و هنگام بازگشت فرمان به ۳۰ درجه در جهت عکس خود (۱۵ درجه به راست در غربیلک) این میزان به مقدار بیشینه خود می رسد و در ۳ ثانیه تا ۷ ثانیه به طور نوسانی زاویه چرخش چرخ جلو با میزان بیشینه ۲.۵درجه تلورانس خواهد داشت و زاویه چرخ جلو به حالت اولیه خود با نمیگردد و خودرو واژگون میشود و این واژگونی از ۳.۵ ثانیه شروع شده و به طور نوسانی زاویه تایر جلو به صورت افزاینده تغییر زاویه به چپ و راست می دهد .



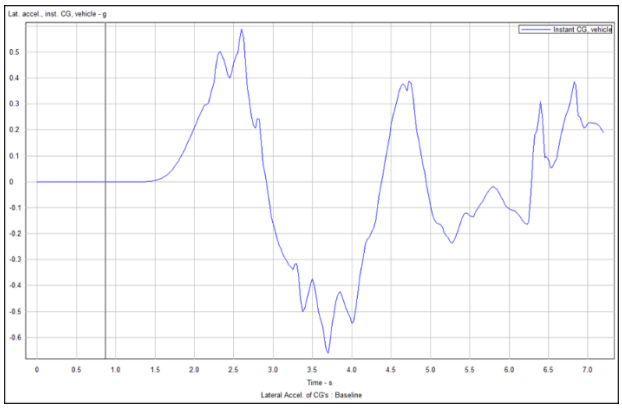
شکل۵-۹:تغییرات چرخش زاویه تایر جلو در سرعت ۱۰۸کیلومتربرساعت

برای گروهی دیگر از تحلیل ها شتاب جانبی مرکز ثقل خودرو برای ۳ سرعت مطلوب بررسی شده است.برای سرعت ۹۵ کیلومتربرساعت از ۱.۵ تا ۲.۷ثانیه شتاب جانبی مرکز ثقل خورو از ۰ تا ۰.۵۵ برابر شتاب گرانشی تغییر میکند و از ۲.۷ تا ۵.۸ ثانیه به طور رفت و برگشتی شتاب از ۰.۵۵+ تا ۰.۵۷- و از ۰.۵۷- تا ۰.۵۲+ تغییر میکند و از ۶ تا ۸ ثانیه شتاب از ۰.۵تا ۰ کاهش یافته و تا ۰.۱- نیز کاهش پیدا کرده و کم کم تا اخر مانور به ۰ می‌رسد.



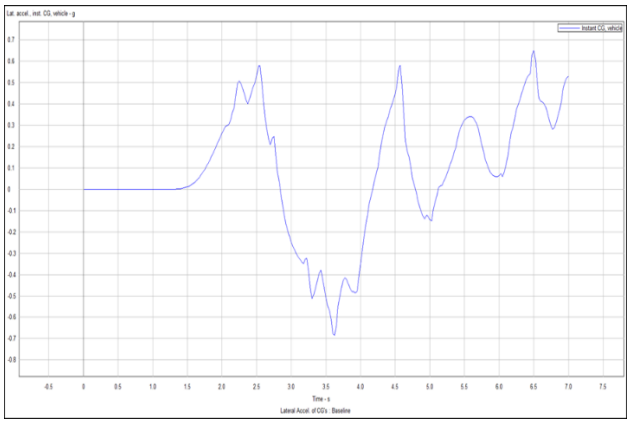
شکل۵-۱۰:تغییرات شتاب جانبی مرکز ثقل خودرو در سرعت ۹۵کیلومتربرساعت

برای سرعت ۱۰۵کیلومتربرساعت از ۱.۵تا ۲.۷ ثانیه شتاب جانبی مرکز ثقل خورو از ۰ تا ۰.۵۵ برابر شتاب گرانش تغییر می‌کند و از ۲.۷ تا ۴.۶۵ثانیه شتاب از ۰.۵۵+ تا ۰.۶۵- و از ۰.۶۵- تا ۰.۳۵+ تغییر می‌کند و از ۴.۶۵تا ۸ ثانیه شتاب بین ۰.۳ تا ۰.۲۵- به طور نوسانی تلورانس دارد.



شکل۵-۱۱:تغییرات شتاب جانبی مرکز ثقل خودرو در سرعت ۱۰۵کیلومتربرساعت

برای سرعت ۱۰۸ کیلومتربرساعت از ۱.۵تا ۲.۶ ثانیه شتاب جانبی مرکز ثقل خورو از ۰ تا ۰.۵۷ برابر شتاب گرانش تغییر می‌کند و از ۲.۶ تا ۴.۶۵ثانیه شتاب از ۰.۵۷+ تا ۰.۶۹- و از ۰.۶۹- تا ۰.۵۷+ تغییر می‌کند و از ۴.۶۵تا ۸ ثانیه شتاب به طور افزاینده بین ۰.۶۵+ تا ۰.۱۵- به طور نوسانی تلورانس دارد.



شکل۵-۱۱:تغییرات شتاب جانبی مرکز ثقل خودرو در سرعت ۱۰۵کیلومتربرساعت

۶-نتیجه گیری

هدف از این مقاله تحلیل دینامیکی خودرو سه چرخ بوده است. به همین منظور در نرم‌افزار کارسیم به شرح مدل دینامیکی این خودرو پرداخته‌شد. سپس به منظور تحلیل باید خودرو را در شرایط خاصی قرار داد. لذا تغییر دولاین به عنوان رویداد اصلی بیان شد. جهت تحلیل بهتر، مسیر حرکت، زاویه غربیلک فرمان، زاویه چرخش تایر جلو روی جاده، زاویه لغزش جانبی تایرها و شتاب مرکز ثقل خودرو در سه سرعت مختلف تحت عنوان متغیر بررسی شدند.

پس از انجام شبیه سازی، با بررسی نمودارهای بدست‌آمده از متغیرها در سه سرعت مختلف می‌توان نتیجه گرفت با افزیش سرعت خودرو در این نوع تست تمامی متغیرهای آزمایش شده از حالت انتظار فاصله گرفته و باعث هندلینگ و هدایت سخت خودرو می‌شود و از سرعت معینی به بعد (در این نوع تست ۱۰۸ کیلومتربرساعت) موجب واژگونی خودرو می‌شود.

۷- منابع

[1] Mechanical Car Sim 2017.1

[2] Poly space Mat Lab 2021

[3] "ISO-ISO 3888-2:2011 - Passenger cars – Test track for a severe lane-change maneuver-part2: Obstacle avoidance." [online]. available: www.iso.org/standard/57253.html

[4] Chris Johanson, M.T.S., *Auto Suspension And Steering Technology*

[5] Thomas D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*

[6] jeff tann, *The Complete Builder's Guide to Hot Rod Chassis and Suspensions*

[7] Saeedi MA and Kazemi R . *Stability of three-wheeled vehicles with a nd without control system*. *Int J automotive engineering* 2013; 3(1): 343– 355.

[8] Funke J, Brown M, Erlien SM, et al. Collision avoidance and stabilization for autonomous vehicles in emergency scenarios. IEEE T Control Syst Technol 2017; 25: 1204– 1216.

[9]. Liu J, Jayakumar P, Stein JL, et al. Combined speed and steering control in high-speed autonomous ground vehicles for obstacle avoidance using model predictive control. IEEE T Veh Technol 2017; 66: 8746–8763.