مقاله

ارائه روشی مناسب جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی خودرو در نرم‌افزار آدامز

علی رحمانی هنزکی*
استادیار
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
a.rahmani@srttu.edu

مهدی فیض‌اله‌زاده
دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مکانیک،
دانشگاه شهید بهشتی
feyzollahzade@gmail.com

علی میرمحمدی
استادیار
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
m.feizollahzadeh@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۹

چکیده

نرم‌افزار آدامز/کار[1] یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در زمینه مدل‌سازی خودرو است، اما در این نرم‌افزار ابزاری جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی وجود ندارد. در این مقاله به ارائه روشی مناسب جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی خودرو در آدامز/کار پرداخته می‌شود. برای این منظور، از تحلیل حرکت مستقیم با شتاب ثابت استفاده می‌شود و با حرکت خودرو در جاده‌ی سینوسی فرکانس‌های طبیعی خودرو با استفاده از نقاط پرش در نمودار شتاب و در فرکانس‌های مختلف محاسبه می‌شود. این روند بر روی یک مطالعه موردی پیاده شده و در آن نتایج حاصل از نرم‌افزار با نتایج تحلیلی مورد مقایسه قرار می‌گیرد که این مقایسه میزان دقت نتایج را نشان می‌دهد. همچنین، نتایج مطالعه موردی انجام گرفته در این مقاله نشان می‌دهد که نصب بار در خودرو، موجب کاهش فرکانس طبیعی در تمام مودهای ارتعاشی می‌شود.

واژگان کلیدی: کامیون سه محوره، فرکانس‌های طبیعی، نرم‌افزار آدامز/کار

۱. مقدمه

ارتعاشات یک پدیده غیرقابل اجتناب، ناخواسته و مضر در دینامیک خودرو است، این پدیده وقتی مهم‌تر می‌شود که یک سیستم غیر ارتعاشی به یک سیستم ارتعاشی متصل می‌گردد. خودروها سیستم‌های چند عضوی وابسته به هم هستند و از این رو مدل ارتعاشی آنها شامل یک سیستم چند درجه آزادی است. رفتار سیستم‌های چند درجه آزادی به شدت وابسته به فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای آنها می‌باشد. با توجه به این موضوع، یکی از موارد مهم در طراحی خودرو، تعیین فرکانس‌های طبیعی و تحلیل ارتعاشی خودرو است که باید کاملاً دقیق انجام گیرد [۱]. یکی از روش‌های مرسوم جهت انجام این تحلیل، استفاده از دستگاه تست ارتعاشات خودرو است. در این حالت خودور بر روی دستگاه تست قرار گرفته و با تحریک چرخ‌های خودرو می‌توان فرکانس‌های طبیعی را محاسبه کرد. اگرچه این کار از دقت بالایی بر خوردار است اما زمان و هزینه زیادی را مصرف کرده و در مراحل اولیه طراحی چندان

قابل اجرا نیست. برای برطرف نمودن این مشکل می‌توان مدلی از خودروی مورد نظر در نرم‌افزارهای مجازی ترسیم کرد و مدل‌سازی مورد نظر را متناسب با شرایط جاده‌ای روی خودروی مدل در محیط نرم‌افزارهای مجازی انجام داد. با این کار می‌توان هزینه طراحی و زمان آن را کاهش داده و نیز به‌سادگی تحلیل‌های مکرر را با تغییرات ابعادی روی خودرو انجام داد. از میان نرم‌افزارهای مجازی، آدامز یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارها در زمینه مدل‌سازی خودرو محسوب شده و با داشتن محیط‌های مختلف تخصصی خودرو، توانایی شبیه‌سازی در آزمایش‌های مختلف را داراست. این نرم‌افزار تاکنون در تحقیقات زیادی به‌کار گرفته شده است. از جمله، فازنگ[۲] و همکارانش با استفاده از این نرم‌افزار به تحلیل سواری خودرو در جاده‌های اتفاقی[۳] پرداختند [۲]. میتج[۴] با استفاده از این نرم‌افزار به شبیه‌سازی مکانیزم سیستم‌تعلیق در خودروهای صنعتی پرداخت [۳]. استفاده از یک نرم‌افزار به تنهایی معمولا نمی‌تواند روشی مناسب جهت طراحی باشد و لذا طراحان عموما از چندین نرم‌افزار جهت طراحی نهایی بهره می‌برند. زاگسیا[۵] و همکارانش به مدل‌سازی و بهینه‌سازی یک مکانیزم در محیط نرم‌افزار پرداختند [۴]. این محققین ابتدا مدل خود را در نرم‌افزار کتیا[۶] ترسیم کرده و جهت تحلیل دینامیکی مدل را به نرم‌افزار آدامز انتقال دادند. چسیل[۷] و همکارانش به کنترل ارتعاشات یک محور دوار پرداختند [۵]. این محققان مدل خود را در نرم‌افزار انسیس[۸] مش‌بندی کرده و با انتقال آن به نرم‌افزار آدامز و تعریف توابع حالت، به کنترل مدل با استفاده از متلب پرداختند. مدل‌سازی و طراحی قطعات به این شکل می‌تواند روشی کارآمد و مناسب جهت طراحی و ساخت قطعات باشد.

وجود ماژول‌های مختلف خودرو در نرم‌افزار آدامز موجب شده که امروزه بسیاری از شرکت‌های معتبر جهت طراحی و تحلیل خودرو از این نرم‌افزار استفاده کنند. محیط آدامز/کار یکی از محیط‌های تخصصی نرم‌افزار آدامز است که جهت تحلیل دینامیکی خودرو مورد استفاده می‌گیرد. محیط آدامز/کار اگرچه تمام تحلیل‌های استاندارد خودرو را شامل می‌شود، اما فاقد ابزاری جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی خودرو است. در واقع مدل‌سازی دقیق خودرو و وجود تعداد درجه آزادی بالا، موجب می‌شود که نتوان ابزاری را جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی خودرو در در این محیط تعبیه کرد. با توجه به مطالب فوق، در این مقاله به ارائه‌ی روشی مناسب جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی خودرو در آدامز/کار پرداخته می‌شود. برای این منظور در ادامه ابتدا روش مناسب جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی خودرو در آدامز/کار بیان شده و سپس در یک مطالعه موردی به بررسی رفتار ارتعاشی یک کامیون سه محوره با هدف بررسی اثر نصب یک سامانه با موقعیت مشخص پرداخته می‌شود.

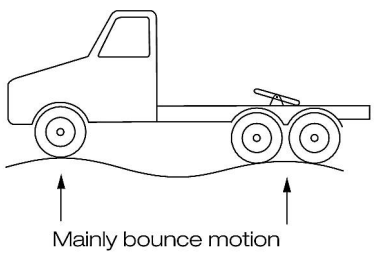
۲. استخراج فرکانس‌های طبیعی در آدامز/کار

بررسی رفتار خودرو در محدوده‌ی فرکانس‌های تحریک، یکی از مراحل مهم در طراحی و تحلیل سواری خودرو است. فرکانس‌های تحریک در خودرو، عموما وابسته به سرعت خودرو هستند. متناسب با هدف مورد استفاده، سرعت‌های مختلفی برای خودرو درنظر گرفته می‌شود و لذا خودروهای مختلف در پهنای گسترده‌ای از فرکانس‌های تحریک قرار می‌گیرند. محدوده‌ی فرکانس تحریک در خودروهای مختلف را می‌توان به بازه ۰ تا ۲۵ هرتز تقسیم کرد. این محدوده‌ی فرکانسی حاصل برانگیزش‌های مختلف از جمله ناهمواری‌های جاده، خط رانش، موتور و .... است. اگرچه محدوده‌ی فرکانس‌های تحریک در پهنای گسترده‌ای قرار دارند، اما تحریک خودرو در فرکانس‌های پایین تقریبا در تمام خودروها مشترک است و لذا مطالعه رفتار ارتعاشی خودرو در محدوده‌ی فرکانس‌های پایین نسبت به فرکانس‌های دیگر از اهمیت بالاتری برخوردار است. برای بررسی رفتار ارتعاشی خودرو در فرکانس‌های

مختلف، روش‌های مختلفی پیشنهاد می‌شود [۶]. یکی از روش‌های مرسوم جهت مدل‌سازی و تعیین فرکانس‌های طبیعی، استفاده از مدل‌هایی با درجات آزادی محدود است که برای نمونه می‌توان مدل یک چهارم، مدل نیم و یا هفت درجه آزادی را بیان کرد. این مدل‌ها متناسب با تعداد درجه‌ی آزادی درنظر گرفته شده، فرکانس‌های خاصی از خودرو را مشخص می‌کنند. بنابراین در این حالت، هدف طراحی و دقت مورد نظر است که نوع مدل و تعداد درجات آزادی آن را مشخص می‌کند [۶]. هرچند با افزایش تعداد درجه آزادی مدل خودرو، می‌توان فرکانس‌های بیشتری را تعیین کرد، اما افزایش درجه آزادی منجر به معادلات پیچیده و کوپل می‌شود که در این حالت، حل آن‌ها و تعیین مقادیر ویژه در بیشتر موارد با حجم محاسبات بالا همراه خواهد بود.

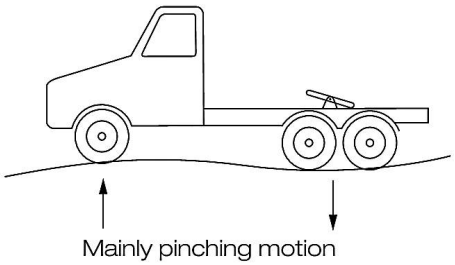
نرم‌افزارهای مجازی این امکان را فراهم می‌کنند که بدون نیاز به تعیین معادلات حرکت و حل آن‌ها، تنها با استفاد از ابزارهای گرافیکی مدل‌های مختلف را ترسیم کرده و با استفاده از ابزارهای موجود و یا تحریک‌های مختلف فرکانس‌های طبیعی را محاسبه کرد. در میان نرم‌افزارهای دینامیکی، می‌توان به نرم‌افزار آدامز اشاره کرد. این نرم‌افزار یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در زمینه‌ی تحلیل‌های دینامیکی است که با داشتن ماژول‌های مختلف، توانایی انجام انواع تحلیل‌های دینامیکی، ارتعاشی و کنترلی را داراست. ماژول آدامز/کار، یکی از ماژول‌های کاربردی نرم‌افزار آدامز است که شرکت نرم افزار ام. اس. سی.[۹] جهت مدل‌سازی دینامیکی خودرو ارائه می‌دهد. اگرچه این ماژول، در نسخه‌های ابتدایی، تنها جهت تحلیل دینامیکی خودروهای سواری مورد استفاده قرار می‌گرفت، اما امروزه این ماژول با داشتن محیط آدامز / کار تراک[۱۰]، توانایی تحلیل دینامیک خودروهای سنگین را داراست و یکی از معتبرترین نرم‌افزار تحلیل خودروهای سنگین محسوب می شود. از جمله مزایای نرم‌افزار آدامز / کار تراک وجود مدل‌های آماده است که این موضوع استفاده برای کاربران را بسیار آسان می‌کند. بسیاری از مدل‌های معروف از قسمت‌های مختلف خودروها نظیر: سیستم تعلیق مک فرسون، میله‌های ضد چرخش، سیستم فرمان شانه‌ای، شاسی خودرو، انواع تایرها و ... در این ماژول وجود دارد که امکان مدل‌سازی دقیق خودرو را با کاربری آسان برای کاربران فراهم می‌کند.

برای مدل‌سازی و تعیین فرکانس‌های طبیعی در خودرو، در این مقاله از نرم‌افزار آدامز استفاده می‌شود. در این حالت می‌توان مدلی از خودرو با درجه آزادی بالا داشت که توانایی مدل‌سازی تمام حرکات خودرو را داراست. روش به‌کار رفته در این مقاله، استفاده از جاده‌ی سینوسی است. جاده‌ی سینوسی می‌تواند رفتاری نزدیک به شرایط واقعی را برای خودرو مهیا کند. از طرفی جاده‌ی سینوسی می‌تواند هر دو تحریک جهش و ناوش را برای خودرو ایجاد کند. این موضوع را می‌توان به روشنی در شکل ۱ مشاهده کرد. در این شکل مشخص است هنگامی که تمام تایرهای خودرو در نقاط قله جاده قرار می‌گیرند، خودرو تحت تحریک جهش قرار می‌گیرد و در نقاط دیگر تحت تحریک ناوش قرار خواهد گرفت. بنابراین با استفاده از جاده سینوسی می‌توان فرکانس‌های ناوش و جهش را مشاهده کرد. درصورتی‌که هدف تعیین فرکانس‌های دیگر باشد می‌توان با استفاده از ورودی‌های دیگر سایر فرکانس‌های طبیعی را بدست آورد.



(الف)

شکل ۱. الف) حرکت جهش



(ب)

شکل ۱. ب) حرکت ناوش

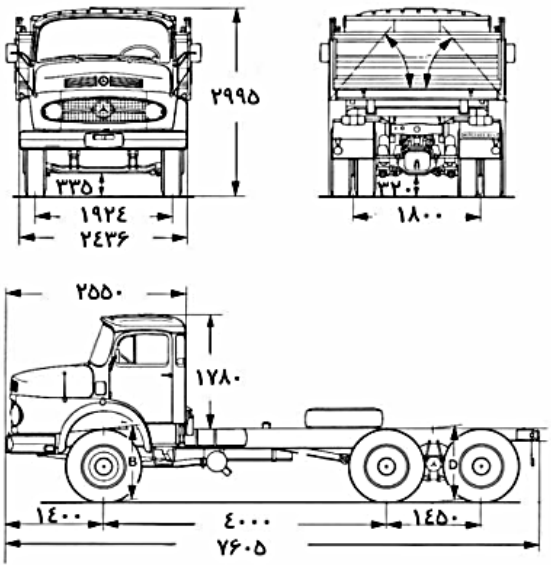
با توجه به توضیحات بیان شده در قسمت قبل، جهت تحلیل ارتعاشات خودرو و تعیین فرکانس‌های طبیعی از ورودی جاده‌ی سینوسی استفاده می‌شود. برای این منظور محدوده‌ی فرکانس تحریک ۰/۵ تا ۱۵ هرتز برای مدل مورد مطالعه درنظر گرفته می‌شود. این محدوده‌ی فرکانسی متناسب با سرعت خودرو انتخاب می‌گردد. باتوجه به سینوسی بودن پروفیل جاده، فرکانس تحریک جاده با استفاده از رابطه ۱ قابل محاسبه است:

$$\omega_{EXT} = \frac{2\pi V}{l} \qquad (۱)$$

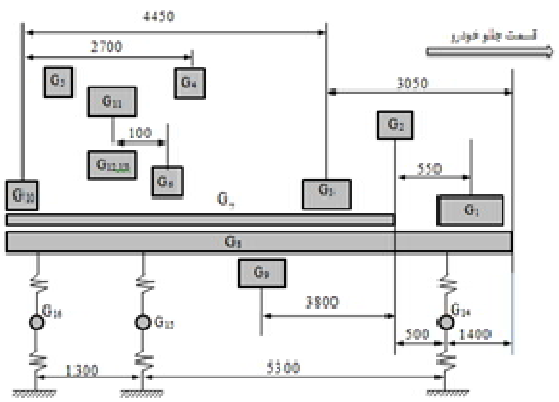
که در آن V سرعت خودرو و l طول موج جاده ورودی می‌باشد. بنابراین با توجه به متغیر بودن سرعت خودرو، فرکانس تحریک نیز متغیر بوده و درصورتی‌که فرکانس تحریک در محدوده فرکانس طبیعی باشد می‌توان فرکانس طبیعی خودروی مدل را محاسبه کرد. در ادامه به آشنایی با مدل مورد مطالعه و نحوه‌ی مدل‌سازی آن در آدامز / کار پرداخته شده و در نهایت فرکانس‌های طبیعی خودرو در محدوده‌ی ۰/۵ تا ۱۵ هرتز در این نرم‌افزار محاسبه می‌شود.

۳. آشنایی با مدل مورد مطالعه

خودرویی که در مقاله حاضر مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت کامیون سه محوره ساخت شرکت ایران خودرو دیزل است که با نام تجاری ال. کی. 2624/4000(6×4) شناخته می‌شود. سیستم تعلیق جلو از نوع فنر برگی و سیستم تعلیق عقب از نوع فنر خطی (فنر لول) درنظر گرفته شده است. شکل ۲ نمایی از خودروی فوق را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۳ موقعیت مرکز جرم قسمت‌های مختلف خودروی مورد نظر به همراه بار نصب شده را نمایش می‌دهد. جدول ۱ نیز مشخصات جرم‌های مختلف به همراه نام هریک را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمایی از خودور سه محوره LK 2624/4000(6×4)



شکل۳. مشخصات جرمی خودروی مورد نظر به همراه بار نصب شده

جدول ۱. مشخصات جرم‌های مختلف در خودرو

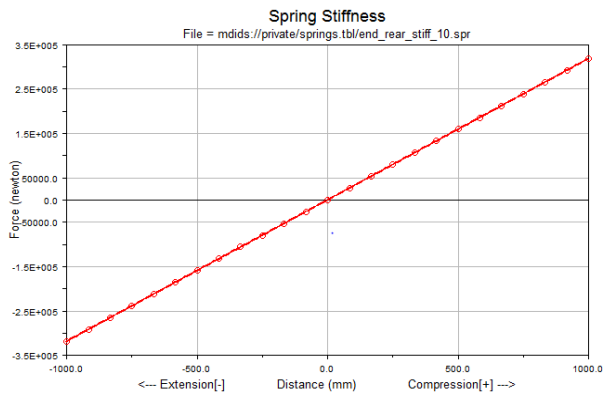
اجزا خودرو	در شکل	جرم (kg)	$(kg.m^2)\,I_{xx}$	$(kg.m^2)\,I_{yy}$	$(kg.m^2)\,I_{zz}$
موتور	G_1	880	6.30e7	1.40e8	1.60e8
کابین	G_2	600	100.00	1.00e2	1.00e2
جعبه روغن	G_3	8152	3.33e10	2.92e9	8.81e8
محافظ	G_4	2000	5.00e8	5.00e8	5.00e8
بار ۱	G_5	4105	2.00e9	2.00e9	2.00e9
بار ۲	G_6	2000	5.00e8	5.00e8	5.00e8
صفحه کف	G_7	5370	4.90e10	4.5e10	5.80e9
شاسی	G_8	768	2.96e10	1.10e9	2. 8e10
مخزن هوا	G_9	500	5.00e7	2.00e8	2.00e8
صفحه شیب	G_{10}	1200	2.30e9	2.60e9	8.30e8
بار ۳	G_{11}	635	5.00e7	5.00e7	5.00e7
بار ٤	G_{12}	635	5.00e7	5.00e7	5.00e7
بار ٥	G_{13}	635	5.00e7	5.00e7	5.00e7
محور	G_{14}	560	4.80e7	2.70e6	4.70e7
محور	G_{15}	818	1.50e7	2.00e7	1.50e7
محور	G_{16}	818	1.50e7	2.00e7	1.50e7

٤. مدل سازی در محیط مجازی

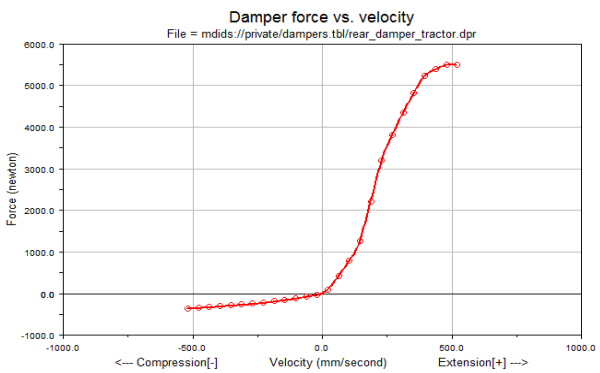
در نرم‌فزار آدامز اولین قدم در تحلیل، ساخت و آماده‌سازی مدل است که از سه مرحله‌ی: ایجاد الگو[11] ، ایجاد زیر سیستم‌ها[12] و مونتاژ[13] زیر سیستم‌ها تشکیل شده است. الگوها مدل‌هایی هستند که توسط اشخاص حرفه‌ای در نرم‌افزار ساخته شده است. بسیاری از مدل‌های معروف از قسمت‌های مختلف خودروها توسط شرکت سازنده‌ی نرم‌افزار ساخته شده و به شکل الگو همراه با نرم افزار ارائه شده است. الگوها کاملا پارامتری بوده و قابل ویرایش هستند. درصورتی‌که سیستم مورد نظر در طراحی در میان مدل‌های ارائه شده‌ی نرم افزار نباشد می‌توان مدل مورد نظر را با استفاده از الگوساز[14] ساخت و به شکل الگو ذخیره کرد. پس از ویرایش و یا ساخت الگوها، آن‌ها را برای مونتاژ به شکل زیرسیستم در آورده می‌شود. بنابراین زیرسیستم‌ها مدل‌هایی بر پایه‌ی الگوها هستند. پس از ساخت زیرسیستم‌ها آن‌ها را متناسب با نوع تحلیل مونتاژ کرده تا مدل نهایی ساخته شود. در نهایت با ساخت مدل مونتاژ می‌توان تحلیل و مدل سازی را در آدامز / کار شروع کرد.

در این مقاله، جهت آماده‌سازی مدل کامل خودرو، در برخی از قسمت‌ها، الگو به صورت کامل ساخته شده و در برخی از قسمت‌ها نیز از الگوهای آماده استفاده شده است و تنها الگوهای آماده ویرایش شده‌اند. برای مثال کابین خودرو، شاسی و ... از جمله قسمت‌های هستند که به شکل الگوی جدید ساخته شده‌اند و الگوهای سیستم تعلیق، ترمز، فرمان و ... تنها ویرایش شده‌اند. برای این منظور با داشتن

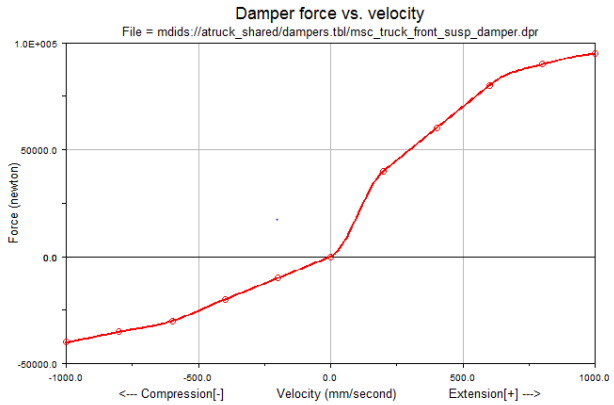
مشخصات فنی سیستم تعلیق، فنرهای عقب، کمک‌های عقب و کمک‌های جلو ویرایش شدند و برای فنرهای جلو از فنر برگی استاندارد در نرم‌افزار استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی تایر از مدل pac2000 در نرم‌افزار استفاده شده است. این مدل از تایر برای مدل فرمان‌پذیری عالی، برای خوش سواری مناسب و برای سیستم‌های کنترل و ترمز قابل استفاده است اما این مدل برای تحلیل تنش و تخمین عمر مناسب نیست [۸]. شکل ۴ نمودار نیرو–جابه‌جایی برای فنرهای محور عقب و شکل ۵ و ۶ نمودار نیرو–سرعت برای محورهای عقب و جلو را در نرم‌افزار آدامز نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۷ نیز مدل کامل خودور به همراه زیر سیستم‌ها نمایش داده شده است.



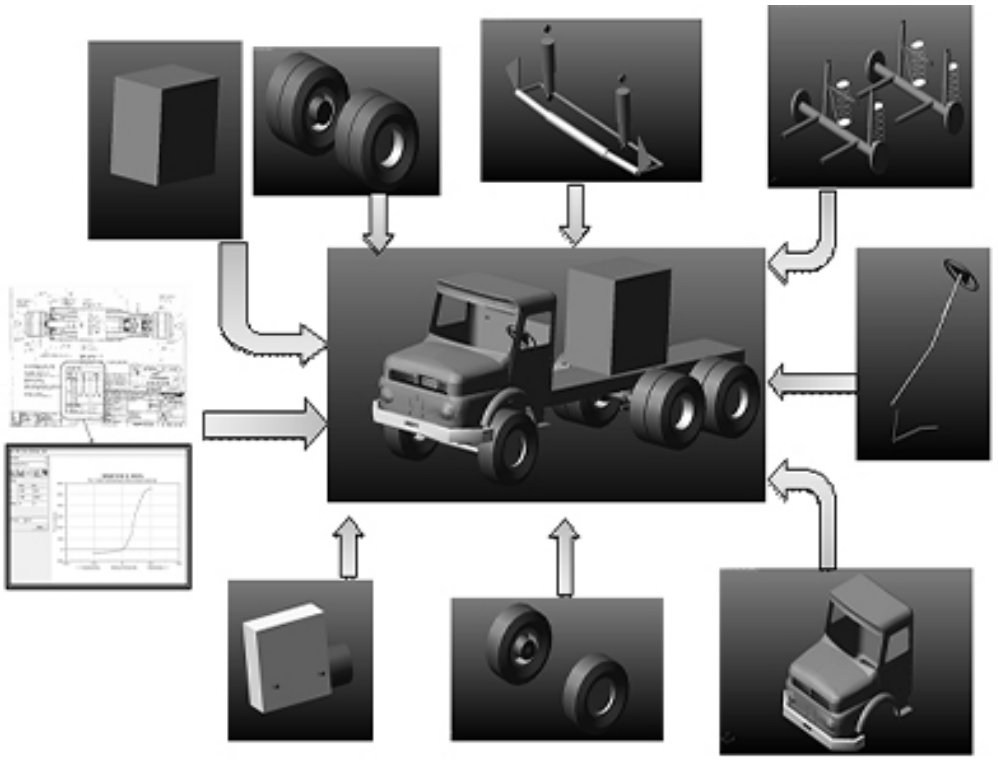
شکل ٤. نمودار نیرو– جابجایی فنر محورهای عقب



شکل ۵. نمودار نیرو– سرعت کمک فنر محور عقب



شکل ٦. نمودار نیرو–سرعت کمک فنر محور جلو



شکل ۷. مدل کامل خودور به همراه زیر سیستم‌ها

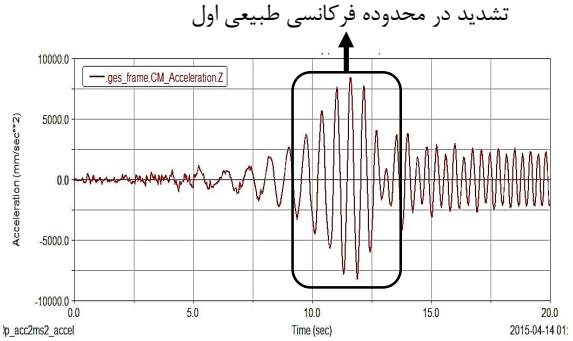
۵. نتایج شبیه‌سازیدر این قسمت به بررسی پاسخ فرکانسی خودرو پرداخته می‌شود. برای این منظور از تحلیل حرکت مستقیم با شتاب ثابت استفاده می‌شود. جدول ۲ مشخصات این تحلیل را در نزم‌افزار بیان می‌کند. همچنین جهت تولید فرکانس تحریک در محدوده‌ی ۰/۵ تا ۱۵ هرتز از چند جاده با طول موج‌های مختلف و در سرعت‌های مختلف استفاده شده است. به عنوان مطالعه اول، در شکل ۸ شتاب عمودی مرکز جرم شاسی خودرو برای محدوده‌ی سرعت ۱/۳۸ تا ۱۲/۵۷ متر بر ثانیه (محدوده‌ی فرکانس ۰/۳۴ تا ۳/۱۴ هرتز) و برای طول موج ۴ متر ترسیم شده است. همانطور که از شکل فوق ملاحظه می‌شود، در محدوده‌ی زمانی ۱۰ تا ۱۵ ثانیه دامنه‌ی شتاب عمودی افزایش پیدا کرده و پس از زمان ۱۵ ثانیه شتاب عمودی کاهش پیدا می‌کند. بنابراین در محدوده‌ی زمانی فوق، یکی از فرکانس‌های اصلی خودرو قرار دارد. با توجه به اینکه حداکثر دامنه‌ی خودرو در زمان ۱۳/۶ ثانیه رخ می‌دهد، بنابراین با تعیین سرعت خودرو در این زمان می‌توان فرکانس فوق را محاسبه کرد. برای این منظور در شکل ۹ تغییرات سرعت خودرو و در شکل ۱۰ تغییرات سرعت و شتاب خودرو در یک صفحه ترسیم شده است. با استفاده از شکل فوق می‌توان دریافت، که در زمان ۱۳/۶ ثانیه، سرعت خودرو برابر با ۷/۵۳ متر بر ثانیه بوده و لذا فرکانس طبیعی اول با استفاده از طول موج ۴ متر برابر با ۱/۸۸ هرتز بدست می‌آید.

جدول ۲. مشخصات شبیه‌سازی در تحلیل حرکت مستقیم با شتاب ثابت

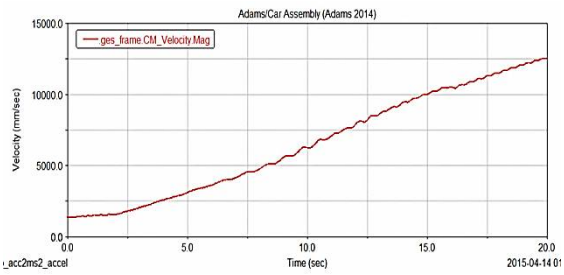
End time:	20 sec
Number of steps:	200
Simulation mode:	interactive
Road data file:	road_3d_sine_example
Steering input:	straight line
Initial velocity:	variable
Gear position:	1-3

برای تعیین فرکانس‌های بالاتر، در شکل ۱۱ شتاب عمودی مرکز جرم شاسی خودرو برای محدوده‌ی سرعت ۱۱/۰۱ تا ۱۸/۰۱ متر بر ثانیه (محدوده‌ی فرکانس ۲/۷۵ تا ۴/۵۰ هرتز) و برای طول موج ۴ متر ترسیم شده است. با استفاده از شکل فوق مشخص است که در محدوده‌ی زمانی ۰ تا ۳ ثانیه دامنه‌ی شتاب عمودی افزایش پیدا کرده و پس از زمان ۳ ثانیه شتاب عمودی کاهش می‌یابد. بنابراین در محدوده‌ی زمانی فوق، یکی دیگر از فرکانس‌های اصلی خودرو قرار دارد. با توجه به اینکه حداکثر دامنه‌ی خودرو در زمان ۱/۷ ثانیه رخ می‌دهد، بنابراین مشابه حالت قبل با ترسیم سرعت خودرو در این محدوده‌ی زمانی شکل ۱۲ می‌توان فرکانس فوق را محاسبه کرد. برای این منظور با استفاده از ترسیم نمودار سرعت و شتاب خودرو در یک صفحه، شکل ۱۳ فرکانس طبیعی دوم با استفاده از طول موج ۴ متر برابر با ۲/۸۹ هرتز بدست می‌آید.

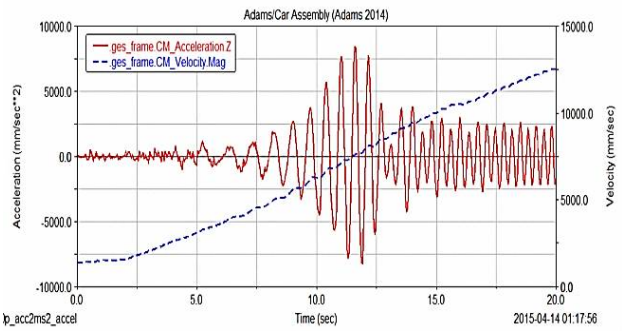
تشدید در محدوده فرکانسی طبیعی اول



شکل ۸. شتاب عمودی مرکز جرم شاسی خودرو در محدوده‌ی فرکانسی ۰/۳٤ تا ۳/۱٤ هرتز

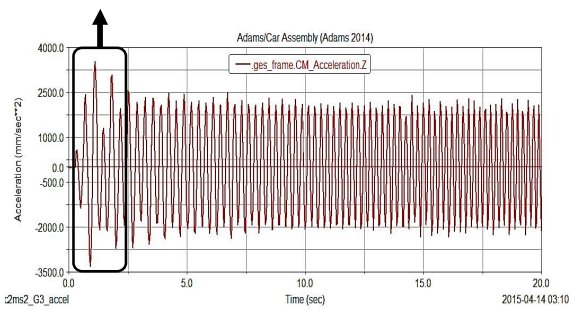


شکل ۹. سرعت مرکز جرم شاسی خودرو در محدوده‌ی فرکانسی ۰/۳٤ تا ۳/۱٤ هرتز

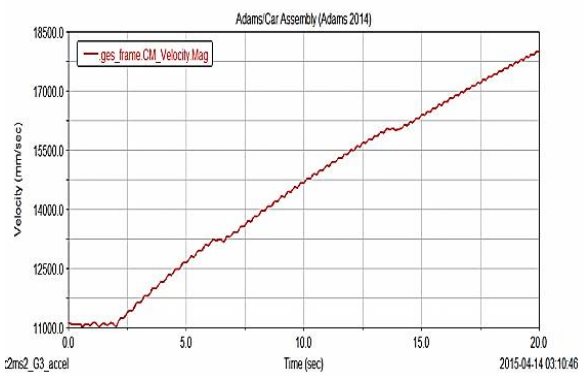


شکل ۱۰. سرعت طولی و شتاب عمودی مرکز جرم شاسی خودرو در محدوده‌ی فرکانسی ۰/۳٤ تا ۳/۱٤ هرتز

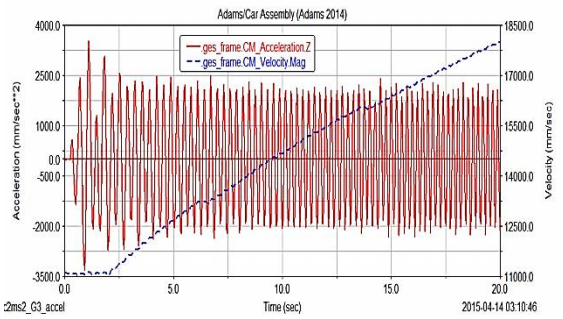
تشدید در محدوده فرکانسی طبیعی دوم



شکل ۱۱ . شتاب عمودی مرکز جرم شاسی خودرو در محدوده‌ی فرکانس ۲/۷۵ تا ٤/۵۰ هرتز

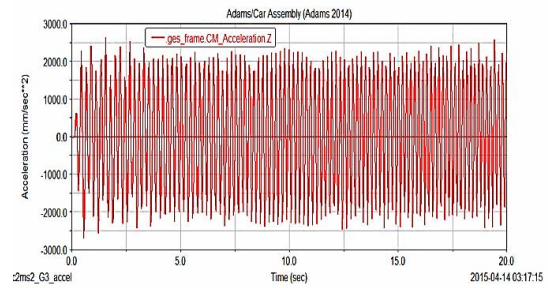


شکل ۱۲ . سرعت مرکز جرم شاسی خودرو در محدوده‌ی فرکانس ۲/۷۵ تا ٤/۵۰ هرتز



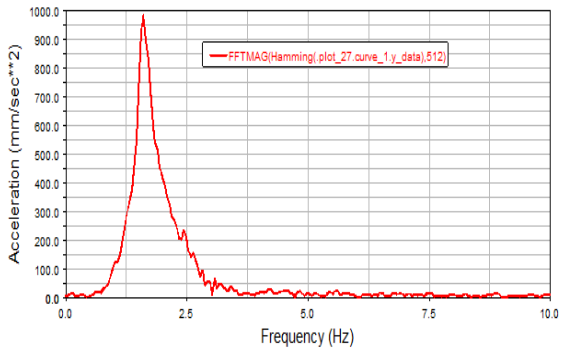
شکل ۱۳. شتاب عمودی مرکز جرم شاسی خودرو در محدوده‌ی فرکانس ۲/۷۵ تا ٤/٥٠ هرتز

در ادامه به منظور بررسی پاسخ خودرو در فرکانسهای بالاتر و تعیین فرکانسهای طبیعی، شتاب عمودی خودرو در محدوهی فرکانسهای بالاتر ترسیم شده است. برای این منظور در شکل ۱۴ شتاب عمودی خودرو در محدودهی فرکانسی ۴/۴۹ تا ۵/۵۳ هرتز و برای طول موج ۴ متر ترسیم شده است. با بررسی شکل فوق میتوان دریافت که در محدودهی فرکانسی فوق، شتاب عمودی خودرو دچار تغییرات دامنه نشده و لذا فرکانس طبیعی خودرو در این محدودهی فرکانسی قرار ندارد.

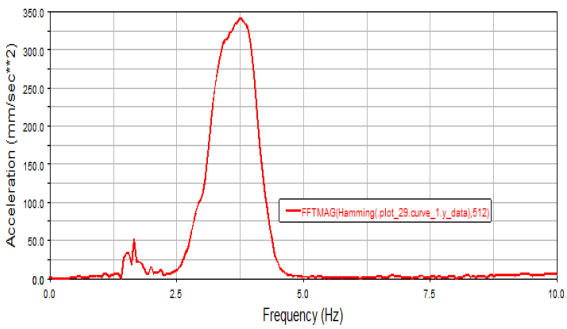


شکل ١٤. شتاب عمودی مرکز جرم شاسی خودرو در محدوده‌ی فرکانسی ٤/٤٩ تا ٥/٥٣ هرتز

تغییرات دامنه در نمودار شتاب عمودی می‌تواند وجود فرکانس طبیعی در محدوده‌ی تحریک را نمایش دهد. اما در برخی موارد تغییرات و بی نظمی بسیار در نمودار موجب می‌شود که تشخیص دقیق مکان فرکانس طبیعی مشکل شود. برای حل این مشکل می‌توان از تابع FFT در نرم‌افزار آدامز استفاده کرد. با استفاده از این دستور می‌توان به روشنی فرکانس‌های اصلی در نمودار را مشخص کرد. برای بررسی این موضوع به عنوان نمونه در اشکال ۱۵ و ۱۶ با استفاده از دستور FFT در آدامز، تبدیل فوریه سریع نمودارهای اشکال ۸ و ۱۱ ترسیم شده است. همانطور که از اشکال فوق مشخص است استفاده از تبدیل فوریه می‌تواند به روشنی فرکانس‌های طبیعی در نمودار را آشکار کند.



شکل ۱۵. تبدیل فوریه (FFT) تغییرات شتاب عمودی خودرو در محدوده‌ی فرکانسی ۰/۳٤ تا ۳/۱٤ هرتز



شکل ١٦ . تبدیل فوریه (FFT) تغییرات شتاب عمودی خودرو در محدوده‌ی فرکانس ۲/۷۵ تا ٤/٥٠ هرتز

جدول ۳. مشخصات آزمون‌های انجام گرفته جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی خودروی با بار

ردیف	محدوده‌ی سرعت (m/s) / محدوده فرکانس تحریک (Hz)	طول موج (m)	فرکانس طبیعی (Hz)
1	$1.37 \leq \leq 12.57$ $0.34 \leq \leq 3.14$	4	1.8825
2	$11.05 \leq \leq 18.06$ $2.75 \leq \leq 4.50$	4	2.8925
3	$17.97 \leq \leq 22.14$ $4.49 \leq \leq 5.50$	4	.....
4	$24.61 \leq \leq 27.00$ $6.15 \leq \leq 6.75$	4	.....
5	$5.50 \leq \leq 15.46$ $5.50 \leq \leq 15.46$	1	5.5600

برای بررسی دقت نتایج حاصل از نرم‌افزار آدامز در ادامه به مقایسه نتایج حاصله با نتایج حاصل از معادلات تحلیلی کامیون سه محوره و در حالت بدون بار در محیط نرم افزار متلب که در [۷] گزارش شده، پرداخته می‌شود و در جدول ۴ مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در این مدل تحلیلی با استفاده از یک مدل ۱۹ درجه آزادی از خودرو، فرکانس‌های طبیعی خودرو محاسبه شده است. با بررسی مقادیر موجود در جدول ۴ مشاهده می‌شود که بیشترین اختلاف بین نتایج حاصل از نرم‌افزار آدامز و مدل تحلیلی در حدود ۱۲ درصد بوده که این موضوع میزان دقت نرم‌افزار علیرغم وجود اختلاف بین مدل نرم‌افزار و مدل تحلیلی را بیان می‌کند. همچین در جدول ۵، مقادیر فرکانس طبیعی حاصل از نرم‌افزار آدامز برای خودروی بدون بار و خودروی با بار مورد مقایسه قرار گرفته است. از جدول فوق می‌توان دریافت که نصب بار موجب کاهش فرکانس طبیعی در تمام مودها شده اما میزان کاهش فرکانس‌های طبیعی در تمام مودها یکسان نیست. چنانچه با وجود بار در خودرو، فرکانس طبیعی اول ۱۰/۶۶ درصد، فرکانس طبیعی دوم ۲۲/۲۳ درصد و فرکانس طبیعی سوم ۱۶/۰۴ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ٤. مقایسه مقادیر فرکانس طبیعی حاصل از نرم‌افزار آدامز با نتایج تحلیلی برای خودروی بدون بار

شماره مود	روش تحلیلی [۷] (rad/sec)	نتایج نرم افزار (rad/sec)	خطای نسبی (درصد)
اول	۱۱/۵۳۲۵	۱۳/۲۳۳۲	۱۲/۸۵
دوم	۲٤/۲۷۲۲	۲۳/۹۷۷۰	۱/۲۱
سوم	۳۸/۰۳۱۱	٤۱/۵۸۸٦	۸/۵۵

جدول ۵. مقایسه مقادیر فرکانس طبیعی برای خودروی بدون بار و خودروی با بار

شماره مود	خودرو به همراه بار (rad/sec)	خودروی بدون بار (rad/sec)	درصد کاهش فرکانس طبیعی
اول	۱۱/۸۲۲۱	۱۳/۲۳۳۲	۱۰/٦٦
دوم	۱۸/۱٦٤۹	۲۳/۹۷۷۰	۲۲/۲۳
سوم	۳٤/۹۱٦۸	٤۱/۵۸۸٦	۱٦/۰٤

٦. نتیجه گیری

در این مقاله به ارائه‌ی روشی جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی خودرو در آدامز / کار پرداخته شد. برای این منظور مدل کامل خودرو در این نرم‌افزار آماده سازی شد و سپس با استفاده از تحلیل حرکت مستقیم با شتاب ثابت و با حرکت خودرو در جاده‌ی سینوسی فرکانس‌های طبیعی خودرو با استفاده از نقاط پرش در نمودار شتاب و در فرکانس‌های مختلف محاسبه شد. در نهایت نتایج حاصل از نرم‌افزار با نتایج تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفت که این مقایسه میزان دقت مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

۷. مآخذ

[1] Jazar, R., "*Vehicle dynamics Theory and Application*, *Springer Science"*, New York, 2008.

[2] Fuzhong, W., L. Xiaoli, "Research on the Simulation of Vehicle Ride Comfort with Random Road Inputs Based on ADAMS/View". *International Conference on Computer Design and Appliations (ICCDA)*, 2010, pp. 187–191.

[3] Matej, J., "Tracked mechanism simulation of mobile machine in MSC.ADAMS/View", *Res. Agr. Eng*, Vol. 56, 2010, pp. 1–7.

[4] Xiaoxia, X., L. Ming, H. Lili, W. Lan, "The Parameterized Model and Optimization Design based on ADAMS of the Motion Mechanism of Car Sunroof", *Proccedings of Intetnationa Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE)*, 2010, pp. 480-483.

[5] Kim, C. S., Y. G. Jung, S. Y. Cho, and H. H. Jung, "Vibration Control Simulation for a Multi-Body High Speed Flexible Rotor Model using a Phase Adjusting Method", *Procceding of ICROS-SICE International Joint Conference*, 2009, pp. 2286-2290.

[٦]گليسپي، توماس ، ترجمه رضا كاظمي و محمد مهدي انصاري موحد، "مباني ديناميک خودرو"، *انتشارات ماهنامه ايران خودرو*، ١٣٨١.

[٧]رحماني هنزكي، علي، مهدي فيض اله زاده، سعيد شجايي، "مدل‌سازي ديناميكي و تحليل ارتعاشات آزاد يک كاميون سه محوره با استفاده از نرم‌افزار آدامز / كار"، *دومين كنفرانس بين المللي و سومين همايش ملي كاربرد فناوري هاي نوين در علوم مهندسي*، ١٣٩٤.

[8] *www.mscsoftware.com/assets/1712_adm6_02_dat_tire_ee_r5*.pdf

پی‌نوشت

1. Adams/car
2. Fuzhong
3. Random Roads
4. Matej
5. Xiaoxia
6. Catia
7. Chaesil
8. Ansys
9. MacNeal-Schwendler Corporation (MSC)
10. Adams/Car Truck
11. Template
12. Subsystems
13. Assembly
14. Template builder