

ساخت جاده آزمایشگاهی براساس تحلیل خستگی اکسل عقب خودرو

ناصر مصطفوی نیا^۱، شهرام آزادی^۲، امیر حسن زاده^۳

۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران nassermostafavi@gmail.com

۲ استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۱۷

چکیده

طراحی و ساخت جاده‌های تست^۱ از جمله اهداف مهم صنعت خودرو است. جاده تست مسیری آزمایشی به منظور تسهیل در ارزیابی عملکرد خودرو با حرکت روی جاده‌هایی نظیر جاده واقعی است. خودروی ساخته شده در مرحله آخر جهت صحت‌گذاری بایستی از تست‌های مختلف عبور کند. از جمله این تست‌ها، تست دوام قطعات خودرو به‌هنگام عبور از جاده‌های واقعی است؛ طول این جاده‌ها معمولاً ۱۶۰۰۰۰ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود. هدف اصلی ساخت جاده تست، که جایگزین جاده واقعی با همان اثر خستگی روی خودرو است، کاهش زمان تست خودرو است که نتیجه آن نیز کاهش مسافت طی شده و صرفه‌جویی ارزی است. در این مقاله با مقایسه تحلیل خستگی روی محور عقب یک خودروی سواری حامل بار با حرکت روی دو جاده واقعی و تست به‌کمک نرم‌افزار، با ارائه یک ایده به معادل‌سازی جاده تست به‌جای جاده واقعی پرداخته شده است؛ به‌طوری‌که همان اثر خستگی در محور را نشان می‌دهد. طول به‌دست آمده برای جاده تست در مقایسه با جاده واقعی بسیار کمتر است و می‌تواند جایگزین مناسب برای جاده واقعی باشد.

واژگان کلیدی: جاده واقعی، جاده تست، خستگی، معادل‌سازی

۱. مقدمه

ریسک و خطا انجام می‌پذیرد. به‌منظور ساخت جاده تست، تحلیل خستگی روی اجزای سیستم تعلیق خودروهای سواری صورت می‌گیرد؛ اما به‌دلیل ناشناخته بودن بارگذاری‌های خستگی، در این نوع تحلیل‌ها همواره عدم دقت‌هایی وجود داشته است. همچنین در طراحی جاده تست که به‌منظور آزمایش‌های واقعی خودرو به‌کار گرفته می‌شود، تخمین بارهای خستگی نقش مهمی را ایفا می‌کند [۱]. در این مقاله، با در

از جمله مهم‌ترین چالش‌های امروز صنعت خودرو، کاهش هزینه‌های طراحی تا تولید، همچنین کاهش زمان طراحی و به تولید رساندن خودرو به‌منظور حفظ شرایط بازار و امکان رقابت با سایر رقباست. از جمله روش‌های کاهش هزینه و زمان، استفاده از محیط‌ها و تحلیل‌های مجازی به‌جای انجام طراحی و آزمون در محیط واقعی است و با این امر انجام تست‌های نمونه اولیه و تجاری کردن خودروها که از الزامات دولت‌هاست با کمترین

دست داشتن مدل المان محدود محور عقب یک خودروی سواری، براساس ورودی‌های جاده واقعی، اثر خستگی مرزی طول مشخصی از جاده به دست می‌آید. سپس جایگزین این جاده، ورودی‌هایی با فرکانس‌های مشخصی^۲ به محور وارد می‌شود، به گونه‌ای که همان اثر خستگی در محور ظاهر شود. تحلیل‌های دینامیکی مدل خودرو به کمک نرم‌افزار آدامز^۳ و تحلیل‌های تنش و خستگی به کمک نرم‌افزار نستر^۴ و فنیگ^۴ صورت گرفته است. نخستین جاده در سال ۱۹۲۴ م توسط شرکت جنرال موتورز^۵ در میلفورد^۶ ایالات متحده ساخته شد. در سال‌های بعد، تأسیسات و واحدهای جدیدتری به آن اضافه شد. همچنین شرکت‌های طراحی جاده تست زیادی نیز در اروپا ساخته شد. شرکت فرانسوی لیناس مونترلج نیز در سال ۱۹۲۵ م ساخته شد [۲-۳]. در زمینه طراحی جاده‌های تست یا آزمایش روی جاده‌های واقعی و تست فعالیت‌های زیادی انجام شده است؛ از جمله یاتنار و اصلانی (۱۹۹۴) جاده تست را جهت تست خودروهای سنگین شبیه‌سازی کردند [۴]. فرهی و خلج (۲۰۰۵) نیز مقاله‌ای در زمینه معادل‌سازی جاده تست با جاده واقعی به کمک تحلیل خستگی قطعه‌ای از خودرو به روش عددی ارائه کردند [۵]. این کار نقش مهمی در کاهش زمان تست خودرو داشت و از لحاظ اقتصادی نیز کاملاً مقرون به صرفه بود.

۲. مدل‌سازی جاده‌های واقعی و تست

در این مقاله، مدل المان محدود محور عقب و مدل دینامیکی کامل خودرو تهیه شده است و به منظور بررسی خستگی روی محور عقب بایستی نخست به کمک نرم‌افزار آدامز مدل کامل خودروی حامل بار با سرعت مشخصی روی جاده عبور کند و نیروها را در قسمت‌های مرزی محور عقب استخراج کرده، سپس دوباره همین نیروها را به کمک نرم‌افزار تحلیلی نستر^۴ به مدل اجزای محدود محور عقب در نقاط مرزی وارد کرد و تحلیل تنش و خستگی را روی محور انجام داد. دلیل استخراج نیروها از آدامز و انتقال نیروها به نستر^۴، در دست نبودن مدل اجزای محدود کامل خودرو بود. با توجه به اینکه خودرو نخست از جاده واقعی و پس از آن از جاده تست عبور می‌کند، لذا باید مفاهیمی از جاده واقعی و جاده تست بیان گردد. جاده‌های واقعی (تصادفی)، جاده‌های نامعینی هستند که در طول مسیر خود فرکانس‌های مختلفی دارند و این فرکانس‌ها در یک بازه قرار

می‌گیرند. کیفیت سطح جاده‌های واقعی در مناطق مختلف متفاوت است و ایزوی این جاده‌ها در ۸ سطح مشخص می‌گردد. بی‌نظمی سطح این جاده‌ها در چگالی توان طیفی^۷ فرم نمایش داده می‌شود. با در نظر گرفتن معکوس آن، می‌توان مشخصات جاده (ارتفاع جاده در مقابل طول جاده) را به دست آورد. در شکل ۱ منحنی ناصافی جاده‌های تصادفی برحسب فاصله از یک نقطه مرجع نمایش داده شده است. سری ۱ جاده A (بسیار خوب)، سری ۲ جاده B (خوب)، سری ۳ جاده C (متوسط)، سری ۴ جاده D (ضعیف)، سری ۵ جاده E (بسیار ضعیف) و سری ۶ جاده F را نشان می‌دهد. در این شکل هرچه کیفیت جاده خشن‌تر می‌شود، دامنه ناهمواری جاده بیشتر می‌شود [۶].

جاده‌های تست، جاده‌هایی معین‌اند که در طول مسیر خود با یک فرکانس نشان داده می‌شوند. ساخت و مدلسازی جاده تست به منظور استفاده از آن در محیط مجازی برای تحلیل خستگی و دوام قطعات خودرو صورت می‌گیرد. در شکل ۲ گونه‌های مختلفی از این جاده‌ها نمایش داده شده است.

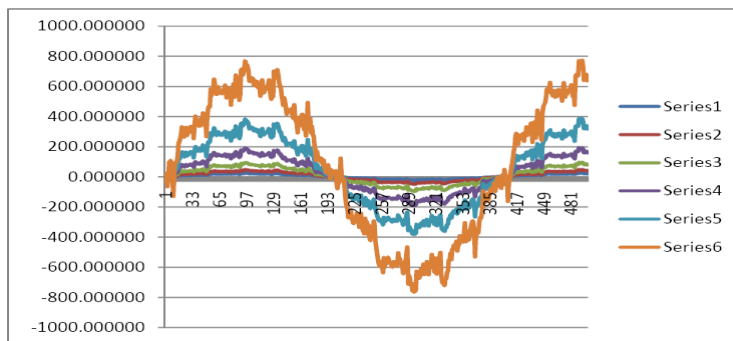
۳. جزئیات مدل خودرو و جاده‌ها

در شکل ۳ مدل کامل خودرو و در شکل ۴ مدل اجزای محدود محور عقب نمایش داده شده است. همچنین سیستم تعلیق عقب خودرو از نوع سیستم بازوی دنباله‌رو^۸ است که در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند. ماده مورد استفاده در محور عقب، فولاد AISI 1020 با استحکام کششی نهایی ۴۱۶ مگاپاسکال است. همچنین خودرو حامل بار بوده و طبق آئین‌نامه ۳۰۰ کیلوگرم بار (مسافر و بار) را حمل می‌کند. جدول ۱ اطلاعات کلی محور عقب خودرو را نشان می‌دهد. مسافت طی شده روی جاده واقعی طبق استاندارد مسیر مستقیم ۱۶۰۰۰۰ کیلومتر است که با این شرایط خودرو نخست ۱۲۰۰۰۰ کیلومتر روی جاده نوع B با سرعت ثابت ۲۰ متر بر ثانیه و ۴۰۰۰۰ کیلومتر آخر را روی جاده نوع D با سرعت ثابت ۱۰ متر بر ثانیه طی می‌کند [۷]. ورودی جاده برای چرخ‌های چپ و راست یکسان است (طبق استاندارد جاده‌ها از سرعت‌های ذکر شده استفاده شده است).

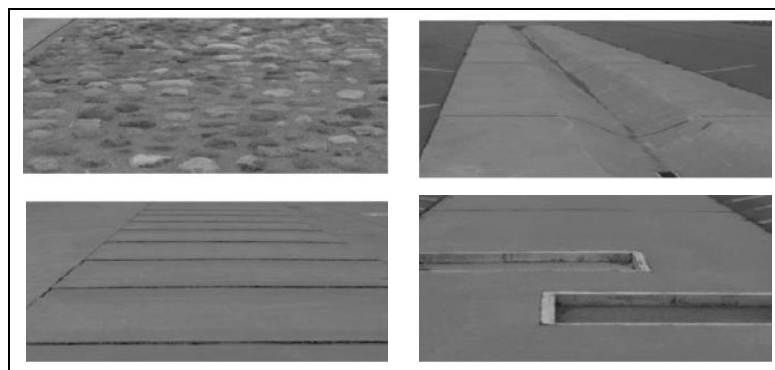
تحلیل دینامیکی همچنین جهت حرکت خودرو روی جاده تست، از چهار نوع جاده متفاوت، که ترکیب آنها جاده تست را می‌دهد، استفاده شده است. جاده اول سینوسی، جاده دوم شامل

حرکت روی جاده‌های فوق ۱۶/۶۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. شکل ۶ تا شکل ۹، جاده‌های تست را نشان می‌دهد.

دست‌انداز^۱، جاده سوم شامل پله ۱۰ و جاده چهارم شامل پله مخالف برای چرخ چپ و راست است. سرعت عبور خودرو هنگام



شکل ۱. منحنی ناصافی جاده‌های تصادفی



شکل ۲. نمایی از انواع جاده‌های تست

جدول ۱. اطلاعات کلی مدل محور عقب خودرو

مقدار	نام
۴۴۵۶۱	تعداد گره‌های مدل
۳۷۶۴۰	تعداد المان‌های مدل
۱	تعداد مواد
۱۲	تعداد خواص المان

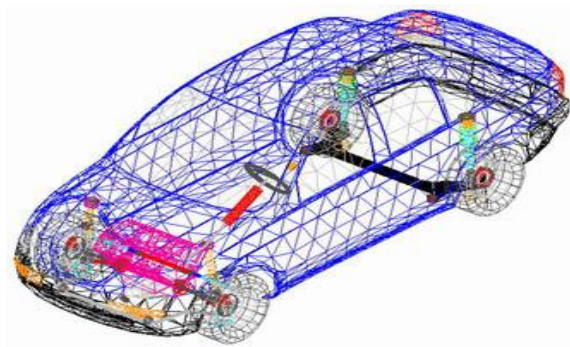
۴. تحلیل دینامیکی مدل کامل خودرو

مدل کامل خودرو با حرکت روی دو جاده واقعی و حرکت روی چهار جاده تست منجر به استخراج نیروها در قسمت‌های مرزی محور عقب خودرو شده است. محور عقب در سه قسمت مرزی به دیگر اعضای خودرو متصل است؛ از این سه قسمت، نیروها تنها در قسمت مرزی محل اتصال استرات^{۱۱} به محور عقب بدست می‌آید و دو قسمت دیگر توسط المان‌های فنر در نرم‌افزار نستر^{۱۲} به زمین متصل می‌شوند. این تحلیل با استفاده از نرم‌افزار

هدف از اعمال جاده سینوسی بررسی رفتار پایدار نیرو روی خستگی محور عقب است، در حالی که هدف از اعمال سه جاده دیگر تست، بررسی رفتار گذرای نیرو روی خستگی محور عقب است. در مورد جاده چهارم نیز باید گفت که هدف از اعمال آن، پیش‌کام در خودرو است. وقتی چرخ راست جلو از ورودی پله بالا می‌رود، چرخ چپ جلو از ورودی پله منفی پائین می‌رود و چرخ چپ عقب از ورودی پله بالا رفته و چرخ راست عقب از ورودی پله منفی پائین می‌رود.

D است، نمایش می‌دهند. شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ نیز نمودار نیروها را برای جاده تست، که شامل چهار جاده است، نمایش می‌دهند.

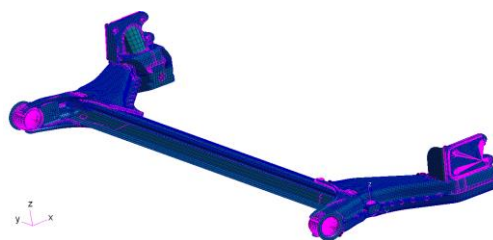
ادامز صورت گرفته است. شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نمودار این نیروها را برحسب زمان برای جاده واقعی، که شامل دو جاده نوع B و



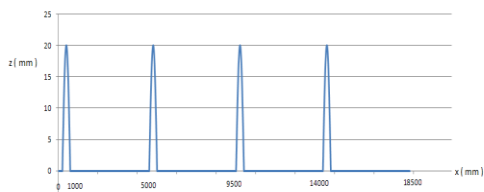
شکل ۳. مدل دینامیکی کامل خودرو در نرم‌افزار ادامز



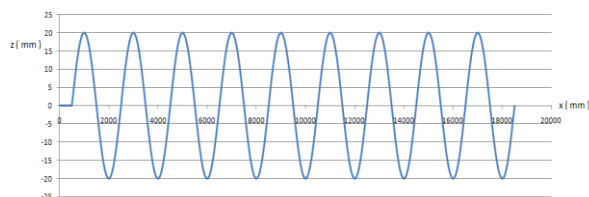
شکل ۵. نمایی از محور عقب خودرو در نرم‌افزار ادامز



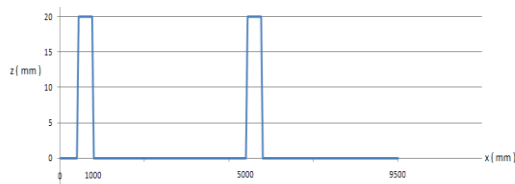
شکل ۴. مدل اجزای محدود محور عقب در نرم‌افزار نسترن



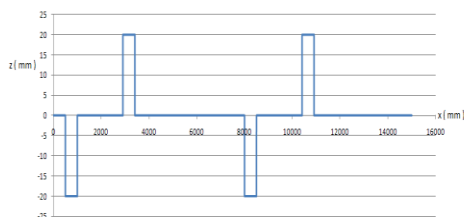
شکل ۷. ورودی جاده شامل دست‌انداز برای چرخ چپ و راست



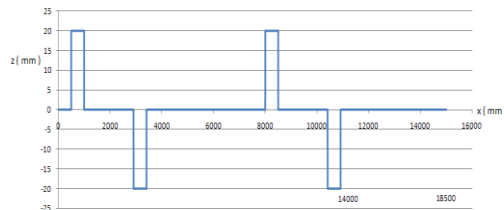
شکل ۶. ورودی جاده سینوسی برای چرخ چپ و راست



شکل ۸. ورودی جاده شامل پله برای چرخ چپ و راست



(ب)



(الف)

شکل ۹. نمایی از الف) ورودی جاده شامل پله برای چرخ راست، ب) ورودی جاده شامل پله برای چرخ چپ

۵. نتایج

در این بخش نتایج تحلیل خستگی و معادل سازی جاده تست با جاده واقعی ارائه می شود. برای این منظور نیروهای به دست آمده جهت تحلیل خستگی به نرم افزار نسترن (در قسمت فتیگ) منتقل می شوند این نیروها به همان قسمت های مرزی محور عقب اعمال می شوند. تحلیل خستگی با معیار وان مایز روی مدل اجزای محدود محور صورت گرفته و نتایج به صورت کانتور عمر خستگی نشان داده خواهد شد [۸]. به دست آوردن کانتور عمر خستگی با به دست آوردن کانتور تنش روی محور عقب امکان پذیر است. روش جریان باران برای شمارش سیکل ها^{۱۲} و تئوری گودمن و تئوری پامگرن - ماینر برای محاسبه آسیب انباشته در این برنامه استفاده شده است [۹-۱۰]. با مقایسه کانتور عمر خستگی روی محور عقب در گره های مختلف، در دو حالت حرکت خودرو روی جاده واقعی و تست، که شامل چهار جاده است، می توان معادلاتی نوشت که یک طرف آنها ترکیب مقدار عمر خستگی برای چهار جاده تست با قراردادن ضرایبی برای تک تک آنها و طرف دیگر مقدار عمر خستگی جاده واقعی باشد. با حل معادلات که هر کدام چهار مجهول (ضرائب عمر خستگی چهار جاده تست) معین را دارند، مجهولات به دست می آیند. خاطر نشان می شود با توجه به زیاد بودن تعداد گره های محور (۴۴۵۶۱ گره) نمی توان این مقایسه را برای تک تک گره ها انجام داد و کافی است که این مقایسه روی تنها قسمتی از محور انجام شود. انتخاب این قسمت با توجه به شکل هندسی و تمرکز تنش در قسمت بازوی دنباله رو محور صورت گرفته است. که در شکل های ۱۸ تا ۲۲ این کانتورها نمایش داده شده است. با توجه به همسانی معادلات در گره ها تنها ۴۳ گره انتخاب شده که حاصل آن ۴۳ معادله متفاوت با چهار مجهول مشترک است. جهت سهولت در نوشتن معادلات، روی گره های مختلف قسمت بازوی دنباله رو محور عقب، که معادلات عمر خستگی روی آنها نوشته می شود، شماره گذاری شده و هر شماره نشانه معادله مربوط به آن گره است. شکل ۲۳ شماره معادلات روی گره های متفاوت مشخص می کند. به دلیل محدودیت حجم مقاله، ناگزیر چند معادله در چند گره از ۴۳ گره به دلخواه نوشته شده است که در معادلات ۲ تا ۱۰ آمده اند. فرم کلی معادلات ذکر شده است که در آن fl عمر خستگی جاده های متفاوت است.

$$a(fl_{an}) + b(fl_{bump}) + c(fl_{sep}) + d(fl_{pit}) = fl_{actual} \quad (۱)$$

$$1.41a + 9.34b + 7.34c + 0.8d = 27.4 \quad (۲)$$

$$3.12a + 10b + 8c + 0.99d = 34 \quad (۳)$$

$$3.12a + 2.74b + 1.4c + 0.41d = 14.2 \quad (۴)$$

$$2.55a + 5.38b + 4.72c + 0.6d = 20.8 \quad (۵)$$

$$4.82a + 4.72b + 0.08c + 0.6d = 20.8 \quad (۶)$$

$$4.25a + 8.68b + 6.68c + 0.99d = 34 \quad (۷)$$

$$3.12a + 10b + 8c + 0.99d = 34 \quad (۸)$$

$$5.39a + 10b + 8c + 1.19d = 40.6 \quad (۹)$$

$$3.12a + 2.74b + 1.4c + 0.41d = 14.2 \quad (۱۰)$$

دستگاه معادلات خطی در صورتی دارای جواب است که مرتبه ماتریس افزوده آن با مرتبه ماتریس ضرائب برابر باشد:

$$Rank[A] = Rank[A:B] \quad (۱۱)$$

با توجه به معادلات مذکور، رتبه هر دو ماتریس افزوده و ضرائب برابر با ۴ است. پس قطعاً ضرائب a ، b ، c و d به دست خواهند آمد. این مقادیر با روش مینیمم خطا به دست آمده اند که:

$$a = 2.905 \quad b = 1.318 \quad c = 1.286 \quad d = 0.308$$

این مقادیر به طور تقریبی و با کمترین خطا، معادلات یاد شده را ارضا می کنند؛ به عبارتی میزان $۲/۹۰۵$ درصد جاده سینوسی، $۱/۳۱۸$ درصد دست انداز، $۱/۲۸۶$ درصد پله و $۰/۳۰۸$ درصد استپ با ورودی مخالف چرخ چپ و راست در یک سیکل باید استفاده شود. با توجه به اینکه هر سیکل جاده واقعی ۱۰ متر و طول کل آن ۱۶۰۰۰ کیلومتر است، پس باید $۱/۶ \times ۱۰^۳$ بار این مسیر ده متری تکرار شود و چون در معادلات، این ضریب لحاظ نشده، باید این رقم در همه معادلات ضرب شود و به عبارتی در تمام این ضرائب جاده های معین ضرب شود. طول جاده سینوسی ۲ متر است، لذا طول کل جاده مورد استفاده برابر است با:

$$0.02905 \times 2 \times 1.6 \times 10^7 = 929600m \quad (۱۲)$$

طول جاده دست انداز ۵ متر است، لذا طول کل جاده مورد استفاده برابر است با:

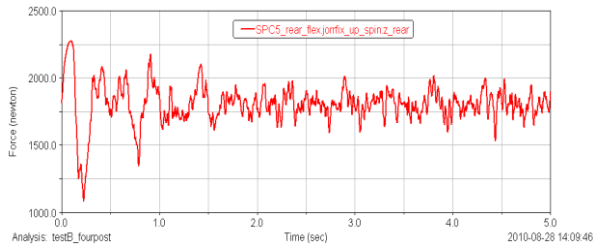
$$0.01318 \times 5 \times 1.6 \times 10^7 = 1054400m \quad (۱۳)$$

طول جاده استپ ۵ متر است، لذا طول کل جاده مورد استفاده برابر است با:

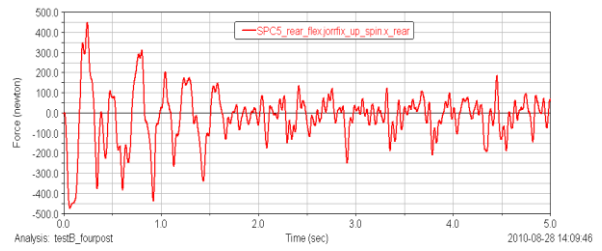
$$0.01218 \times 5 \times 1.6 \times 10^7 = 1028800m \quad (۱۴)$$

طول جاده استپ در دو چرخ چپ و راست مخالف $۲/۴۰$ متر است، لذا طول کل جاده مورد استفاده برابر است با:

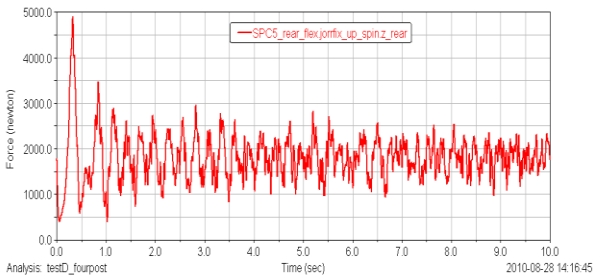
$$0.00308 \times 2.40 \times 1.6 \times 10^7 = 118272m \quad (۱۵)$$



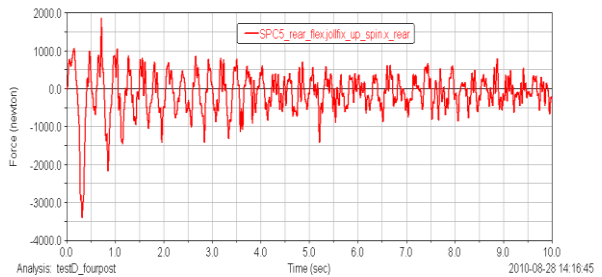
شکل ۱۱. تاریخچه نیرو با حرکت خودرو بر جاده نوع B در راستای عمودی



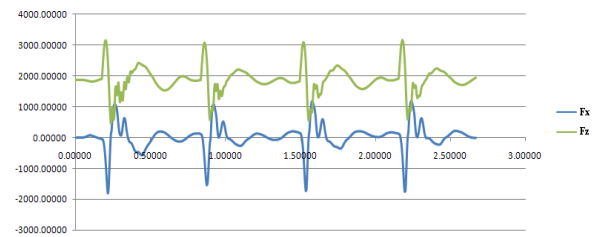
شکل ۱۰. تاریخچه نیرو با حرکت خودرو بر جاده نوع B در راستای طولی



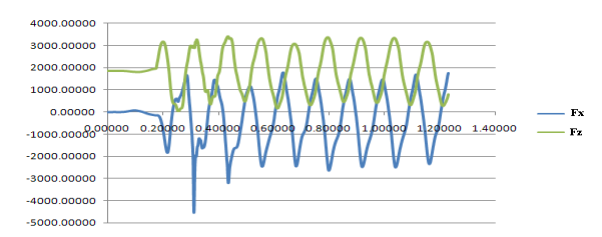
شکل ۱۳. تاریخچه نیرو با حرکت خودرو بر جاده نوع D در راستای عمودی



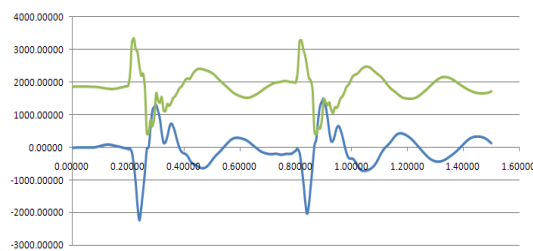
شکل ۱۲. تاریخچه نیرو با حرکت خودرو بر جاده نوع D در راستای طولی



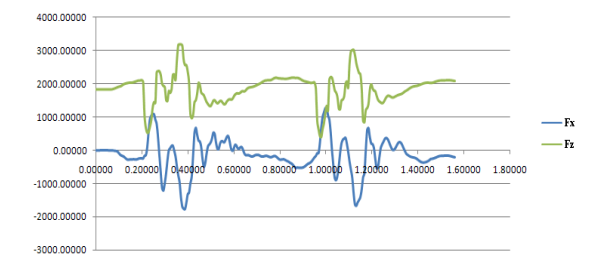
شکل ۱۵. تاریخچه نیرو با حرکت خودرو روی جاده شامل دست‌انداز



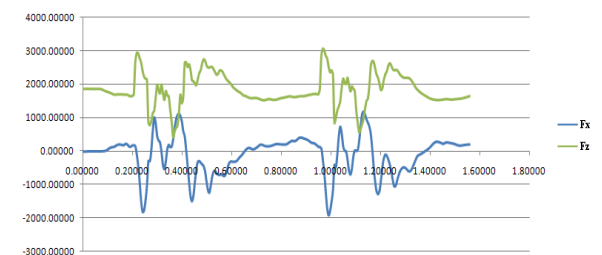
شکل ۱۴. تاریخچه نیرو با حرکت خودرو روی جاده سینوسی



شکل ۱۶. تاریخچه نیرو با حرکت خودرو روی جاده شامل پله

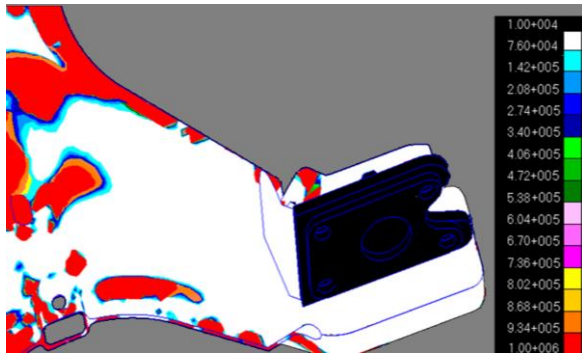


(ب)

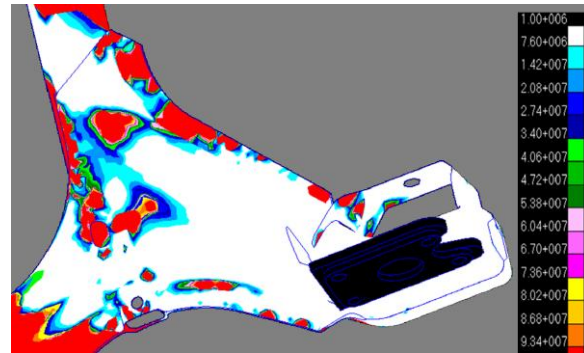


(الف)

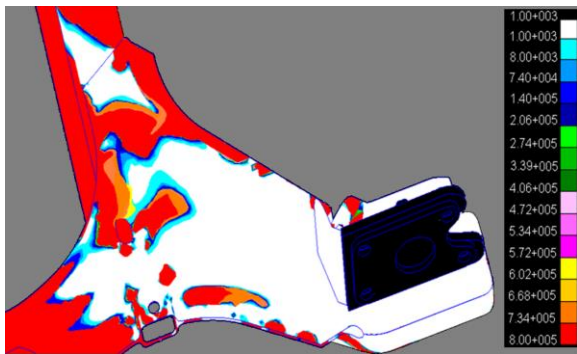
شکل ۱۷. نمایی از الف) تاریخچه نیرو با حرکت خودرو روی جاده شامل پله روی چرخ چپ، ب) برای چرخ راست



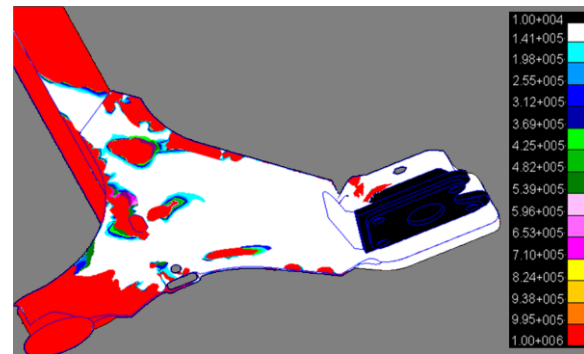
شکل ۱۹. کانتور عمر خستگی جاده شامل دست‌انداز



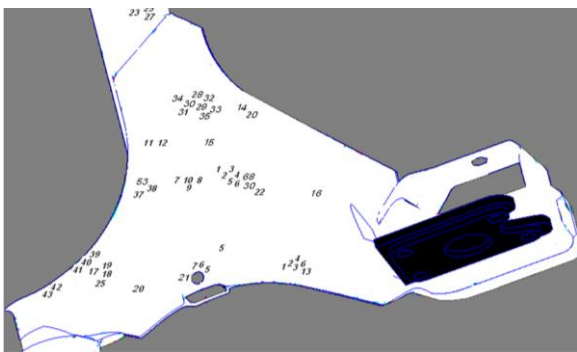
شکل ۱۸. کانتور عمر خستگی جاده واقعی



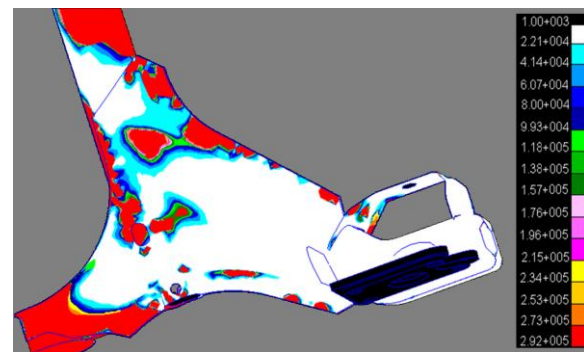
شکل ۲۱. کانتور عمر خستگی جاده شامل پله



شکل ۲۰. کانتور عمر خستگی جاده سینوسی



شکل ۲۳. مشخص کردن شماره معادلات روی گره‌های متفاوت



شکل ۲۲. کانتور عمر خستگی جاده شامل پله مخالف چهار چرخ

۶. جمع‌بندی

میزان خستگی در اکسل عقب خودرو ایجاد شود؛ این معادل‌سازی هم زمان را کوتاه می‌کند و هم از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه است. طول جاده آزمایش نشان می‌دهد که ۲۹/۲۲ درصد جاده سینوسی، ۳۳/۱۶ درصد جاده شامل دست‌انداز، ۳۲/۳۵ درصد پله و ۵/۲۷ جاده استپ مخالف در چرخ چپ و راست در مجموع طول کل جاده تست قرار گرفته‌اند.

طول کل جاده تست با جمع طول چهار جاده بالا به‌دست خواهد آمد که برابر با ۳۱۳۱ کیلومتر است. این عدد نشان می‌دهد که خودرو به‌جای آنکه ۱۶۰۰۰۰ کیلومتر روی جاده واقعی با سرعت مشخصی حرکت کند تا اثر خستگی روی اکسل عقب خودرو تحلیل شود، از طول کوتاه جاده تست استفاده می‌شود تا خودرو با حرکت روی آن با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت تقریباً همان

۷. مآخذ

[1] Smith, K. V., R. F. Stornant. "Cumulative damage approach to durability route design." SAE 791033, 1979.

- [2] Zhang, Y., A. T. Tang, C. Palmer. "Hazard." *Int. J. Vehicle Design*, 21 (1999), pp.450-470.
- [3] Canova, J. H. "Vehicle design evaluation using the digital proving ground." SAE 2000-01-0126.
- [4] Aslani, F., M. Yatheendar, R. H. Visintainer, D. S. Rohweder, J. L. deAlda. "Simulation of proving ground events for heavy truck cabs using ADAMS, MSC/NASTRAN and P/FATIGUE." MSC 1994 World Users Conference Proceedings.
- [5] Farrahi, G. H., A. Khalaj. "Estimation of fatigue damage caused by actual roads and maneuvers on proving ground", School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, 2005.
- [6] Wong, J. Y., *Theory of ground vehicles*, John Wiley & Sons, 1993.
- [7] شرعیات، م، اصول طراحی و تحلیل سازه و بدنه خودرو، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران: ۱۳۸۸.
- [8] MSC/NASTRAN Dynamic analysis Handbook, Mac-Neal Swindler Corporation, 1994.
- [9] Bannantine, J. A., J. J. Comer, J. L. Handrock, *Fundamentals of metal fatigue analysis*, Prentice Hall, 1990.
- [10] Fatigue and fracture, ASME Handbook, Vol 19, ASME International, 1996.

پی‌نوشت

-
1. proving ground
 2. deterministic input
 3. MSC.ADAMS
 4. MSC.NASTRAN, MSC.FATIGUE
 - ⁵ General Motors Company
 - ⁶ Milford
 7. Power Spectral Density
 8. trailing arm
 9. Bump
 10. Step
 11. Strut
 12. Rain Flow Method