

شبیه‌سازی حرارت در تایر خودرو سواری رادیال در تماس با جاده

محمد رضا روشندل، مهندس طراح شرکت سازه در پالایشگاه گاز فاز ۲۲، ۲۳ و ۲۴ پارس جنوبی

mo.roshandel@sazeh.co.ir

آرش بابایی جهرمی، سرپرست سیالات و گازهای صنعتی مجتمع فولاد هرمزگان

arash@gmail.com

حسن بصیرت تبریزی، استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Hbasirat@aut.ac.ir

چکیده

در این مقاله به شبیه‌سازی عددی و تجربی، حرارتی منطقه تماس تایر با جاده در شرایط صاف جاده‌ای پرداخته می‌شود. منطقه تماس تایر رادیال ۱۳-۱۶۵ ساخت شرکت تولیدی کیان تایر در راستای جا پا به دو منطقه، یک منطقه جلو میدان، تماس ایستایی، دوم منطقه عقب میدان تماس لغزشی تقسیم می‌شود. شبیه‌سازی تجربی در آزمایشگاه شرکت سازنده تایر توسط دستگاه درام، دستگاه شبیه‌ساز جاده‌های صاف در شرایط گوناگون استفاده از تایر، بر روی تایر فوق انجام شده است. شبیه‌سازی عددی توسط روش المان محدود و به کمک نرم‌افزار انسیس و المان دوبعدی و با فرض مرکب بودن تایر از سه ترکیب نخ، لاستیک و سیم فولادی در شرایط پایا انجام می‌شود. نمودار تغییرات انتقال حرارت از جاده به تایر در منطقه تماس لغزشی که تابع زاویه لغزش است. در شرایط سرعت متفاوت و در زمان ترمز گرفتن تا لحظه توقف کامل نشان داده می‌شود سپس تغییرات دمایی نقاط بحرانی نسبت به تغییرات سرعت نشان داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: دستگاه درام، المان محدود، تایر رادیال، زاویه لغزش، تماس ایستایی و لغزشی

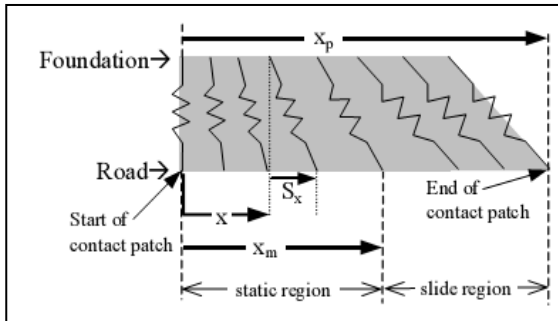
مقدمه

به هنگام اعمال نیروهای کنترلی، مثل نیروی گشتاور بازدارنده ترمز، درصد لغزش به مراتب بالاتر می‌رود و این امر شار حرارتی تولیدی و همچنین درصد حرارت جذب شده توسط لاستیک را افزایش می‌دهد. همچنین در حالت عادی سهم اصطکاک لغزشی از اتلاف انرژی

شار حرارتی ورودی به تایر از جاده در منطقه جا پا با سرعت لغزشی ارتباط مستقیم دارد که در حالت عادی درصد کمی نسبت به اصطکاک غلطشی - که عامل اصلی حرکت و چرخش تایر می‌باشد - دارد. اما



جاده اتفاق می‌افتد. تغییر مکان مسیر تماس به وسیله سختی فونداسیون طول تایر c و نیروی اصطکاک سطح محدود می‌شود.



شکل ۲. مسیر طولی تایر در امتداد سطح تماس [۱]

منطقه استاتیکی مسیر تماس^۱

در منطقه جلو میدان استاتیکی در یک فاصله x از لبه ابتدایی از مسیر منبسط شدن تاج تایر مقدار S_x که برابر است با:

$$S_x = \left(1 - \frac{V_x}{\omega R}\right) \quad (1)$$

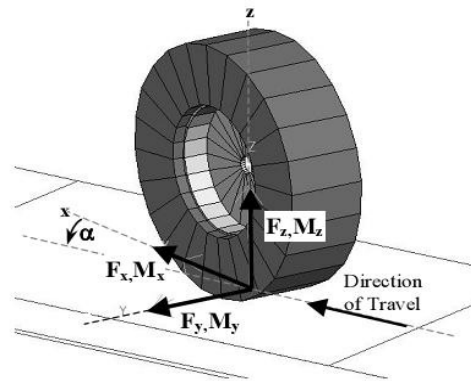
به طوری که در این رابطه V_x سرعت مرکز چرخ‌ها در راستای طول است. ω نرخ چرخش چرخ و R شعاع غلتیدن تایر است. نیروی اصطکاک طولی $f_{x,st}$ به کار رفته روی تایر در میدان استاتیکی محصولی از S_x و سختی فونداسیون C_x است، انتگرال از $X = 0$ تا X_m است.

$$f_{x,st} = \frac{C_1}{2} \left(1 - \frac{V_x}{\omega R}\right) X_m^2 \quad (2)$$

منطقه لغزش^۲ مسیر تماس

نیروهای طولی ایجادکننده اصطکاک لغزشی، کنشی در برابر نیروها در عقب منطقه لغزش از مسیر تیره‌ستند. فشار تماس عمودی در طول مدت کامل مسیر تماس تایر مانند یک ثابت رفتار می‌کنند. مقدار آن F_z/X_p است X_m تخمینی برای اصطکاک از ماکزیم فاصله مشاهده شده در مقادیر سطح تماس تایر است.

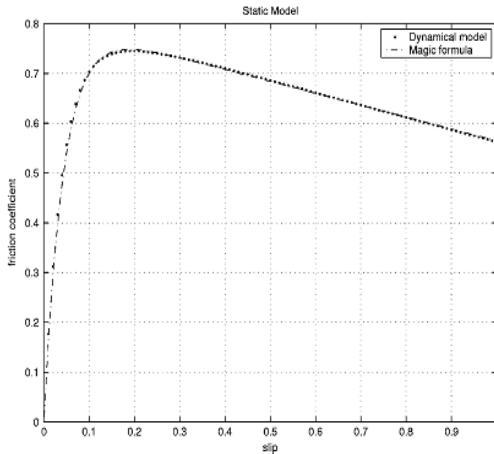
و تولید حرارت در سطح تماس کمتر از ۱۰ درصد است. در این مقاله با توجه به زاویه لغزش در تماس تایر و نمودار ضریب اصطکاک نسبت به زاویه لغزش (شکل ۱) در هنگام ترمز گرفتن، به دست آمده از مرجع [۱] و رابطه انتقال حرارت بیان شده در مرجع [۲] که تابعی از ضریب اصطکاک لغزشی و بررسی تجربی با امکانات آزمایشگاهی شرکت کیان تایر آزمون‌های تایر [۳] و همچنین با شبیه‌سازی عددی تایر رادیال که ویژگی‌های حرارتی آن در مرجع [۴] بیان شده به روش المان محدود توسط نرم‌افزار انسیس، با استفاده از المان دوبعدی در شرایط پایا، زمانی که تایر در حال حرکت با سرعت ثابت و بارگذاری به رفتار حرارتی نقاط بحرانی تایر (مرکز ترد، شانه)، فشار تایر نسبت به تغییرات سرعت و رابطه شار حرارتی ورودی به تایر از جاده با زاویه لغزش، تغییرات سرعت پرداخته می‌شود.



شکل ۱. زاویه لغزش، مومتم و نیروهای تایر [۱]

تئوری

اثر متقابل تایر / جاده / در مدل استاتیکی یک بعدی ساده (شکل ۲) برای مقاومت غلتان نشان داده می‌شود. مسیر تماس به دو قسمت تقسیم می‌شود: یک منطقه جلو، میدان استاتیکی که تاج تایر به سطح جاده چسبیده است و منطقه عقب، میدان لغزیدن که لغزش بین تایر و



شکل ۳. نسبت تغییرات ضریب اصطکاک به افزایش نرخ زاویه لغزش برای حالت ترمز [۵]

$$Q = \alpha \mu VP \quad (۹)$$

به طوری که در این رابطه Q جریان حرارتی وارد شده به ناحیه تاج، α درصد حرارت جذب شده توسط این ناحیه، μ ضریب اصطکاک لغزشی لاستیک با آسفالت و نهایتاً P فشار ظاهری تایر و جاده است.

بررسی تجربی

در این قسمت به بررسی درجه حرارت در لایه‌های گوناگون تایر، که در حال حرکت در تماس با جاده‌های صاف ایجاد می‌شود، پرداخته می‌شود. در این آزمایش شرایط به شکلی شبیه‌سازی می‌شود که تایر به علت افزایش حرارت، در لایه‌های شانه و ترد که به سبب افزایش سرعت ایجاد می‌شود، گسیخته می‌گردد. در این قسمت، افزایش سرعت توسط دستگاه تست ویل و شرایط موجود در آزمایشگاه شرکت تولیدی کیان تایر قابل شبیه‌سازی است.

دستگاه تست ویل

دستگاه تست ویل (شکل ۴) دارای یک درام غلتک‌مانند به قطر ۱۷۰۰ میلی‌متر سطح صیقلی است که می‌تواند با سرعت معین و با اعمال بار مشخص با تایر بچرخد.

$$X_P / X_{max} = 0.5 \quad (۳)$$

X_{max} مربوط به نیروی عمودی F_z است. به وسیله معادله تجربی ۴ به دست می‌آید:

$$X_{max} = \left[4F_z / m_{est} \left(2R_u - F_z / m_{est} \right) \right]^2 \quad (۴)$$

به طوری که در این رابطه R_u شعاع تایر تغییر شکل نداده است. m_{est} ضریب طولی مسیر تعیین شده تجربی است. دیگر فرضیات به وجود آمده در مدل، خصوصیات اصطکاک لغزش تاج تایر، ایزوتروپیک هستند. بردار نیروی اصطکاک لغزش خالص $f_{xy,sl}$ واکنش معکوس برای حرکت لغزش تایر است. مقدار این نیرو عبارت است از μ و عکس‌العمل نیروی عمود در منطقه لغزش می‌باشد.

$$f_{xy,sl} = \mu \frac{(X_p - X_m) F_z}{X_p} \quad (۵)$$

سرعت لغزش در راستای x و y به ترتیب برابر با $\omega_R - V_X \tan(\alpha)$ و $V_X \tan(\alpha)$ که زاویه لغزش تایر است (شکل ۱). نرخ لغزش در مرجع [۵] به صورت روابط ۶ و ۷ بیان می‌شود.

$$v_r = (r\omega - v) \quad (۶)$$

$$S = v_r / v \quad \text{if } v > r\omega \quad (۷)$$

در هنگام ترمز کردن

$$S = v_r / r\omega \quad \text{if } r\omega > v \quad (۸)$$

ضریب اصطکاک برای مقادیر مختلف زاویه لغزش به صورت شکل ۳ بیان می‌شود.

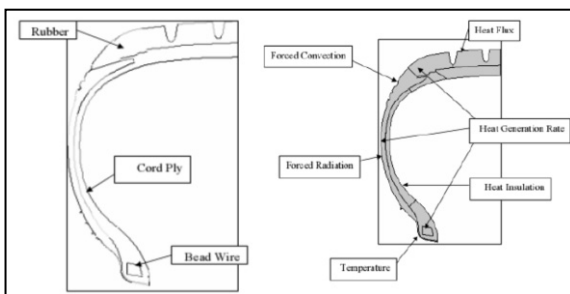
حرارت تولید شده در اثر اصطکاک

در مرجع [۲] برای محاسبه گرمای ایجاد شده در اثر اصطکاک بین سطح تایر و جاده معادله ۹ داده شده است.



نظر گرفته، سپس ضرایب حرارتی متفاوت (لایه‌ها، طوقه، تا جو دیواره) [۲]، که مطابق شکل ۵ تعریف شده، برای تایر تعریف می‌گردد.

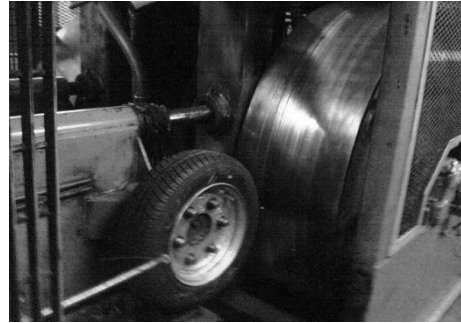
شرط اولیه دمای تایر و محیط ۳۴ درجه به عنوان ورودی‌های نرم‌افزار اعمال می‌شوند. با انتخاب خط‌های یک‌ه‌هر سطح را در بر می‌گیرند می‌توان سطح دلخواه را ایجاد کرد، بدین ترتیب تایر وابسته به جنس‌های گوناگون، همچنین تولید حرارت متفاوت در هر قسمت به چند سطح تقسیم می‌شود و برای اعمال شرط مرزی انتقال حرارت جابه‌جایی با محیط اطراف (شکل ۵) اطلاعات مربوط به ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به سرعت، با استفاده از مرجع [۲]، وارد می‌شود. شار حرارتی ورودی بر واحد سطح (اصطکاک) و نرخ تولید حرارت بر واحد حجم در هر قسمت از تایر برحسب سرعت و در قسمت تئوری و آزمایشات محاسبه شده وارد می‌شود. شرط مرزی تشعشع با محیط اطراف با در نظر گرفتن دمای محیط که در شرایط آزمایشگاهی آن ۳۴ درجه و با توجه به مرجع [۳] وارد می‌شود.



شکل ۵. قسمت‌های تفکیکی، شرایط مرزی تایر ۱۳-۱۶۵

نتایج

شکل ۶ تغییرات فشار در تایر رادیال با طرح‌های متفاوت نسبت به افزایش سرعت در بارگذاری ثابت را نشان می‌دهد. کاملاً مشخص است که فشار رفتاری



شکل ۴. دستگاه درام

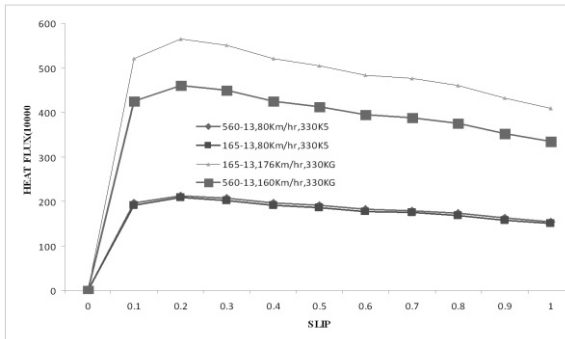
این دستگاه ماکزیمم سرعت ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت و ماکزیمم بار ۵۰۰۰ کیلوگرم را به تایر اعمال می‌کند و سپس توسط دستگاه پراب، دما را در نقاطی چون تاج، شانه، طوقه و بدنه رینگ و توسط دستگاه PI فشار را اندازه‌گیری می‌کند.

آزمایش سرعت متغیر بارگذاری ثابت

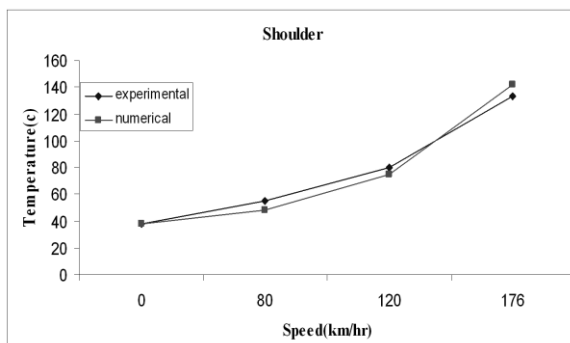
در این قسمت، در دستگاه درام، تایر در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت و بارگذاری ثابت ۳۹۰ کیلوگرم قرار می‌گیرد. پس از گذشت ۲ ساعت، اول دما در مقطع عرضی تایر (شانه، مرکز ترد یا تاج) توسط دستگاه اندازه‌گیری پراب اندازه‌گیری می‌شود. سپس سرعت در هر بازه زمانی براساس جدول ۱ افزایش می‌یابد. آزمایش تا زمانی که گسیختگی در تایر رخ دهد انجام می‌شود. در این مقاله آزمایش سرعت، پس از گذشت ۵ الی ۶ ساعت پایان می‌یابد که پس از آن در لحظه خرابی دما در مقطع عرضی تایر اندازه‌گیری می‌شود.

شبیه‌سازی آنالیز کامپیوتری

در نخستین قدم، برای تحلیل تایر نیمی از مقطع عرضی دوبعدی تایر (شکل ۵) را در نظر می‌گیریم. سپس مدل‌سازی و مش‌بندی توسط نرم‌افزار انسیس و المان سطحی ۷۷ که یک المان چهارضلعی صورت می‌گیرد مطابق شکل ۵ تایر را از ۳ قسمت هم‌گنایزوتروپ در



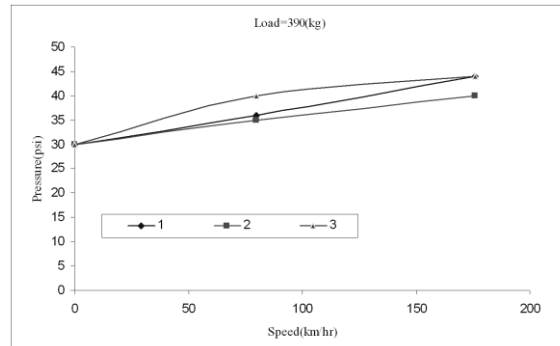
شکل ۸. میزان تغییرات تجربی شار حرارتی ورودی به تایر در منطقه لغزش نسبت به زاویه لغزش



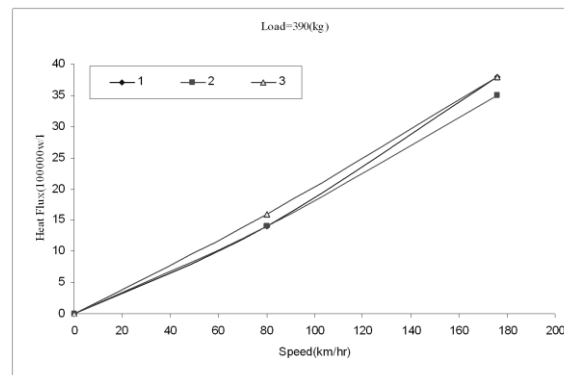
شکل ۹. مقایسه تغییرات حرارت عددی و تجربی در شانه تایر ۱۳-۱۶۵ رادیال نسبت به سرعت در بارگذاری ثابت ۳۹۰ کیلوگرم

در شکل ۹ بالاترین میزان توانایی تایر رادیال و بایاس سواری است که بعد از آن در تایر خرابی ایجاد می شود. مشخص است که تایرهای رادیال مقاومت بالاتری در برابر شار ورودی به تایر بایاس در لحظه ترمز کردن دارند و میزان شار ورودی در زاویه لغزش ۰/۲ ترمز کردن بالاترین شار حرارتی به تایر وارد می شود. شکل ۱۰ تغییرات دما در نقاط بحرانی تایر شانه و مرکز ترد نسبت به افزایش سرعت را در تایر رادیال سواری در منطقه لغزش نشان می دهد. مشاهده می شود با افزایش سرعت در هنگام رانندگی میزان دما در لایه های تایر افزایش می یابد که از لحاظ عددی و شبیه سازی کامپیوتری قابل بیان است.

غیرخطی دارد و بعد از سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت تقریباً افزایش فشار شیب کمتری دارد و این از رفتار ترمودینامیکی نشأت می گیرد. در اثر افزایش سرعت دما افزایش می یابد و در اثر ازدیاد دما، فشار. افزایش فشار با توجه به رابطه ۹ میزان حرارت ورودی (شکل ۷) به تاج تایر را بالا می برد.



شکل ۶. تغییرات تجربی فشار تایر ۱۳-۱۶۵ رادیال با طرح های متفاوت در بارگذاری ثابت نسبت به افزایش سرعت



شکل ۷. تغییرات تجربی شار ورودی به تاج تایر ۱۳-۱۶۵ رادیال با طرح های متفاوت در بارگذاری ثابت نسبت به افزایش سرعت

تغییرات فشار در اثر ۵ ساعت کارکرد در سرعت متغیر از ۸۰ الی ۱۷۶ کیلومتر به میزان ۱۴ پی. اس. آی است. در شکل ۹ میزان تغییرات شار حرارتی ورودی به تایر در منطقه لغزش براساس مقادیر به دست آمده از آزمایشات تجربی نشان داده شده است.

جدول ۱. مراحل آزمایش سرعت متغیر بارگذاری ثابت

میزان بارگذاری (کیلوگرم)	سرعت (کیلومتر بر ساعت)	مجموع افزایش سرعت	زمان هر مرحله افزایش سرعت (ثانیه)
۳۳۰	۸۰	۷۲۰۰	۷۲۰۰
۳۳۰	۱۲۰	۹۰۰۰	۱۸۰۰
۳۳۰	۱۲۸	۱۰۸۰۰	۱۸۰
۳۳۰	۱۳۶	۱۲۶۰۰	۱۸۰۰
۳۳۰	۱۴۴	۱۴۴۰۰	۱۸۰۰
۳۳۰	۱۵۲	۱۶۲۰۰	۱۸۰۰
۳۳۰	۱۶۰	۱۸۰۰۰	۱۸۰۰
۳۳۰	۱۶۸	۱۹۸۰۰	۱۸۰۰

MOTION ON HIGH AND LOW FRICTION ROAD SURFACES” Simulation Conference USA.

[۲] روشندل، محمدرضا، حسن بصیرت تبریزی، حسین صمدی، فریبرز تاجدینی، "بهینه‌سازی مصرف انرژی در تایر"، سومین همایش ملی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، ۱۳۸۹.

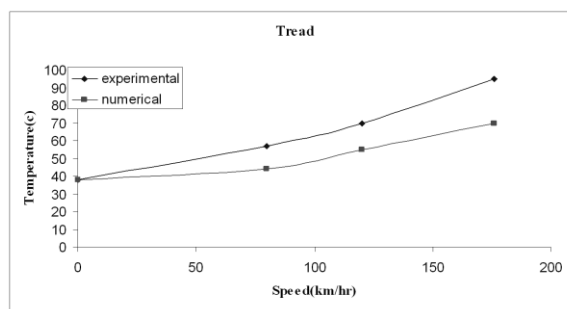
[۳] روشندل، محمدرضا، حسن بصیرت تبریزی، حسین صمدی، فریبرز تاجدینی، "بررسی تغییرات دما در تایر خودروهای سنگین در اثر افزایش بارگذاری"، سومین همایش ملی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، ۱۳۸۹.

[۴] روشندل، محمدرضا، حسن بصیرت تبریزی، فریبرز تاجدینی، "بررسی افزایش دما در تایرهای رادیال و بایاس در اثر ناهنجاری‌های ناشی از تولید"، دهمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ۱۳۸۸.

[5] Alvarez, Luis, Jingang ,Yi, Horowitz, Roberto, Olmos, Luis, 2005 “Dynamic Friction Model-Based Tire-Road Friction Estimation and Emergency Braking Control”, ASME, , Vol. 127, 22-32.

پی‌نوشت

1. static region
2. slide region



شکل ۱۰. مقایسه تغییرات حرارت عددی و تجربی در مرکز ترد تایر ۱۳-۱۶۵ رادیال نسبت به سرعت در بارگذاری ثابت ۳۹۰ کیلوگرم

نتیجه‌گیری

بیشترین میزان انتقال حرارت در منطقه لغزش در هنگام ترمز کردن و در زاویه لغزش ۰/۲ درجه است. مقاومت بالای تایرهای رادیال در برابر تایرهای بایاس، شار حرارتی ورودی به تایر و فشار تایر و دما با تغییرات سرعت رابطه مستقیم دارند، اما نسبت به زاویه لغزش اینچنین نیست. از جمله قسمت‌های حساس و بحرانی‌تر طراحی تایر ناحیه شانه و مرکز ترد است که علاوه بر تنش‌های مکانیکی دمای ماکزیمم را نیز تحمل می‌کنند.

مراجع

[1] Lacombe ,James Lacombe, 2000 “TIRE MODEL FOR SIMULATIONS OF VEHICL

