نشریه صنعت لاستیک ایران
سال ۲۵/شماره ۱۰۱/بهار ۱۴۰۰

علمی- فنی

شبیه‌سازی توزیع دمایی ناشی از اتلاف انرژی در تایر رادیال باری با استفاده از تکنیک های پردازش تصویر

Simulation of Temperature Distribution of energy dissipation in Truck Radial Tire

چکیده:

رابر یکی از مهم‌ترین اجزای تایر می‌باشد و قسمت عمده تایر شامل رابر است. در طی عملکرد تایر به‌علت خاصیت هیسترسیز رابر و دراثر تغییر شکل، در تایر تولید گرما می‌شود. دما در اجزای تایر بستگی به عوامل مختلفی همچون هندسه تایر، فشار داخلی، مقدار بارگذاری برروی تایر، سرعت وسیله نقلیه، نوع سطح جاده، دما و شرایط محیطی می‌باشد. در این مطالعه سعی شده‌است، با استفاده از تئوری تولید گرما در داخل تایر و تکیه بر المان محدود و محاسبه میدان تنش و کرنش نقاط مختلف تایر، میدان دمایی اجزای داخل تایر رادیال باری در حالت شرایط پایدار پیش‌بینی شود. در این پیش‌بینی المان محدود از نرم افزار ABAQUS استفاده شده‌است. درنهایت نشان داده شده‌است که این نتایج پیش‌بینی با استفاده از نرم افزار ABAQUS با نتایج آزمایشگاهی که در میدان تست گروه صنعتی بارز انجام شده‌است، در تطبیق خوبی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تایر، دما، انتقال حرارت

نوع مقاله: پژوهشی

مرتضی رشیدی مقدم*
دکترای تخصصی، اداره تحقیقات و توسعه گروه صنعتی بارز، تهران، ایران

ایمیل نویسندگان و عهده‌دار مکاتبات:
morteza_rashidi@alumni.iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۸

مقدمه

فضای اقتصادی کنونی و رکود بازار کالا مستلزم آن است که صنعت تایرسازی بر کاهش هزینه‌ها ضمن بهبود ایمنی تمرکز کند. خرابی حرارتی تایر از مهم‌ترین دلایل نگهداری و یا تعویض آن‌ها در صنعت حمل و نقل و هم‌چنین معادن است. در معادن، اقدامات عملی ازجمله برنامه نظارت بر تایر مایل در ساعت (TMPH) برای پیش‌بینی محدودیت دمای تایر برای مشاغل معین استفاده شده‌است. اما مشکل خرابی‌های مربوط به گرما در تایر هنوز یک چالش برای صنعت حمل و نقل است. ماتریس الاستومری یک تایر با ترکیبات ذره‌ای و الیافی (کامپوزیت) تقویت می‌شود تا سختی[1]، انرژی پارگی[2]، مقاومت در برابر خستگی[3]، پارگی و مقاومت در برابر کشش[4] را بهبود بخشد[۱].

در زمینه شبیه‌سازی، روش‌های اجزای محدود (FEM) از دهه‌های گذشته به طور فشرده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌است تا ساختار تایر را بهتر درک کند و با این روش مقادیر عددی، قبل از تولید در زمینه‌های مختلف از جمله مقاومت غلتشی قابل شبیه‌سازی بود. قریشی در یک مقاله به صورت مفصل به جمع‌آوری پژوهش‌های پیشین در زمینه شبیه‌سازی تایر پرداخته‌است[۲].

چو و همکارانش[۳]، مقاومت غلتشی و توزیع دمایی برای یک تایر دارای پترن در حالت سه بعدی که ناشی از دست دادن هیسترسیس مربوط به کامپاند رابر ویسوالاستیک می‌باشد، با استفاده از مدل تایر دارای پترن سه‌بعدی به‌صورت عددی پیش‌بینی کردند. ناندی و همکارانش[۴] در سال ۲۰۱۴ نشان دادند که محسابه اتلاف انرژی ویسکوالاستیک با درنظر گرفتن مدل ویسکوالاستیک خطی برای کرنش‌های محدود دقیق نمی‌باشد. آن‌ها علاوه‌بر محاسبه اتلاف انرژی ویسکوالاستیک براثر چرخش تایر، به صورت مختصر به بررسی توزیع دما در تایر به علت اتلاف انرژی پرداختند.

یکی دیگر از موارد بسیار مورد نیاز در صنعت تایر بحث شبیه‌سازی توزیع دمای تایر در شرایط مختلف می‌باشد. به‌علت این‌که یکی از اجزای اصلی تایر، رابر تایر می‌باشد و رابرها به‌علت اثرات هیسترسیز[5] عامل تولید گرما هستند که این عامل تولید گرما ناشی از تغییر شکل رابر در اثر حرکت دورانی تایر می‌باشد. در حوزه تعیین توزیع دما، به علت وجود آزمایش‌های هزینه‌بر در حوزه مالی و زمانی، استفاده از روش المان محدود بسیار موثرتر و کارایی بهتری خواهد داشت. دمای تایر به عوامل مختلفی همچون هندسه تایر، فشار داخلی تایر، بار وارده بر تایر، سرعت تایر و شرایط محیطی وابسته است. در این پژوهش به بررسی پیش‌بینی توزیع دمای در سطح بیرونی تایر و اجزای داخلی تایر بااستفاده از روش المان محدود و یک تئوری تولید گرما در داخل تایر پرداخته شده‌است.

تئوری تولید گرما در داخل تایر

تولید گرما یا همان اتلاف انرژی مربوط به رابر، به علت هیسترسیز داخلی می‌باشد. به عبارت دیگر مقدار انرژی بازیابی شده براثر تغییر شکل الاستیک، کمتر از مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد تغییر شکل الاستیک می‌باشد [۵]. هیسترسیز به علت یک خاصیت ذاتی مربوط به رابر می‌باشد که این خاصیت ذاتی که عامل اتلاف انرژی می‌باشد، ویسکوالاستیک نامیده می‌شود. توجه شود که رابر جزء اصلی تایر می‌باشد و اطلاعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که برای سرعت‌های در محدوده 120Km/h، سهم هیسترسیز در اتلاف انرژی ۹۰ تا ۹۵٪ می‌باشد و اتلاف انرژی اصطکاک بین تایر و سطح جاده ۲ تا ۱۰٪ و مقاومت هوا سهمی بین ۱,۵ تا ۳,۵٪ درصد خواهد داشت [۶]. در پژوهش انجام شده فرض می‌شود که تمامی تولید گرما در تایر بر اثر هیسترسیز چرخش تایر می‌باشد. تست‌های مکانیکی به‌خصوص DMA، برای مشخص کردن خواص هیسترسیز رابرها به کار می‌رود.

هیسترسیز می‌تواند به‌صورت زیر تعریف شود که حاصل تقسیم چگالی انرژی کرنشی اتلافی به انرژی کرنشی کل می‌باشد[۷]:

$$H = {U_{loss}}/{U_{total}}$$

1. Stiffness 2. Rupture energy 3. Fatigue resistance 4. Tear and Tensile strength 5. hysteresis

انرژی کرنشی در واقع انرژی پتانسیل ذخیره شده در طی تغییر شکل الاستیک می‌باشد. چگالی انرژی کرنشی از تقسیم انرژی کرنشی بر واحد حجم بدست می‌آید. در این پژوهش از چگالی انرژی کرنشی و هیسترسیز برای محاسبه گرما تلف‌شده در طی چرخش تایر استفاده شده‌است. با ضرب چگالی انرژی کرنشی کلی محاسبه‌شده از مدول تغییر شکل در هیسترسیز، چگالی انرژی کرنشی اتلافی بدست خواهدآمد:

$$U_{loss} = H.U_{total}$$

چگالی انرژی کرنشی مربوط به اتلاف انرژی در واقع آن انرژی می‌باشد که بعد از تغییر شکل بازیابی نمی‌شود و در این پژوهش فرض شده‌است که تمام این اتلاف انرژی باعث تولید گرما داخلی در تایر شده‌است. برای محاسبه نرخ تولید گرما، نرخ چرخش تایر مورد نیاز می‌باشد. فرکانس (f) به‌عنوان تقسیم سرعت خطی (V_L) بر مسافت محیطی مربوط به چرخش تایر (L_c) بدست‌می‌آید که در فرمول زیر آمده است:

$$L_c = 2\pi R$$
$$f = {V_L}/{L_c}$$

در فرمول بالا R شعاع چرخش تایر می‌باشد. برای محاسبه نرخ گرمای تولیدشده بر واحد حجم ($\dot{q}_v$) با واحد J/m^3 در هر المان از ضرب چگالی انرژی کرنشی اتلافی در فرکانس چرخش تایر بدست خواهدآمد.

$$\dot{q}_v = U_{loss}.f$$

روش عددی در پیش‌بینی توزیع دمایی تایر

برای شبیه‌سازی توزیع دمایی یک تایر بااستفاده از نرم‌افزار المان محدود همان‌طور که در قسمت قبل توضیح داده‌شد، هدف اولیه پیدا کردن مقدار چگالی انرژی کل (U_{tot}) می‌باشد، بنابراین باید در ابتدا یک تحلیل المان محدود مکانیکی داشته‌باشیم و از نتایج آن برای تحلیل المان محدود توزیع دمایی استفاده‌کرد. سایز در نظر گرفته شده برای یک تایر رادیال باری (385/65R22.5) می‌باشد که در این پژوهش برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌است. مراحل شبیه‌سازی به‌صورت زیر می‌باشد:

ایجاد هندسه دوبعدی

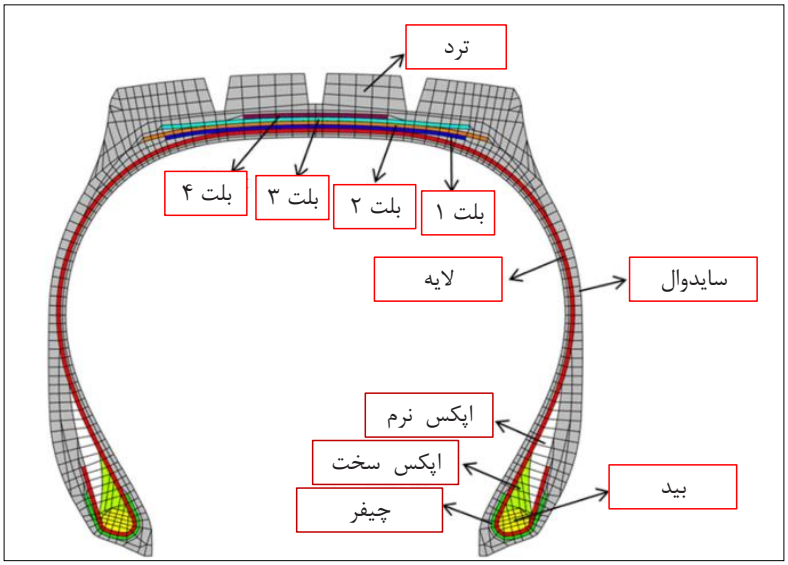
ابتدا یک سکشن در راستای عمود بر تایر همانند شکل ۱ مدل‌سازی می‌شود که این مدل‌سازی شامل رابرها و اجزای مربوط به سیم می‌باشد. رابرها به‌وسیله مدل مونی-ریولین[1] و لایه‌های سیمی ماده الاستیک خطی در نظر گرفته‌می‌شود، به‌طوری‌که بدنه تایر از یک لایه از جنس فولاد و ناحیه بلت‌ها شامل چهار بلت از جنس فولاد می‌باشد و چیفر یک لایه سیمی می‌باشد. در این مدل از المان CAX4H برای نمایش همه قسمت‌های لاستیک استفاده شده‌است. این المان از نوع غیرخطی چهار گره‌ای می‌باشد، به همراه قابلیت پیچش و فشار ثابت برای درنظر گرفتن ویژگی غیرقابل تراکم‌پذیر بودن لاستیک می‌باشد. اجزای استحکام‌دهنده تایر هم‌چون لایه، بلت، چیفر سیمی بااستفاده از یک ویژگی به نام Rebar به همراه المان سطحی SFMAX1 مدل‌سازی شده‌است که این المان از نوع المان سطحی متقارن محوری خطی دوگره‌ای می‌باشد. این مدل دوبعدی تولید شده شامل ۴۰۲ گره و ۸۰۸ المان می‌باشد در این مدل متقارن محوری، آنالیز فشار داخلی و رینگ‌کردن در دوبعد پیاده‌سازی شده‌است.

ایجاد هندسه سه‌بعدی

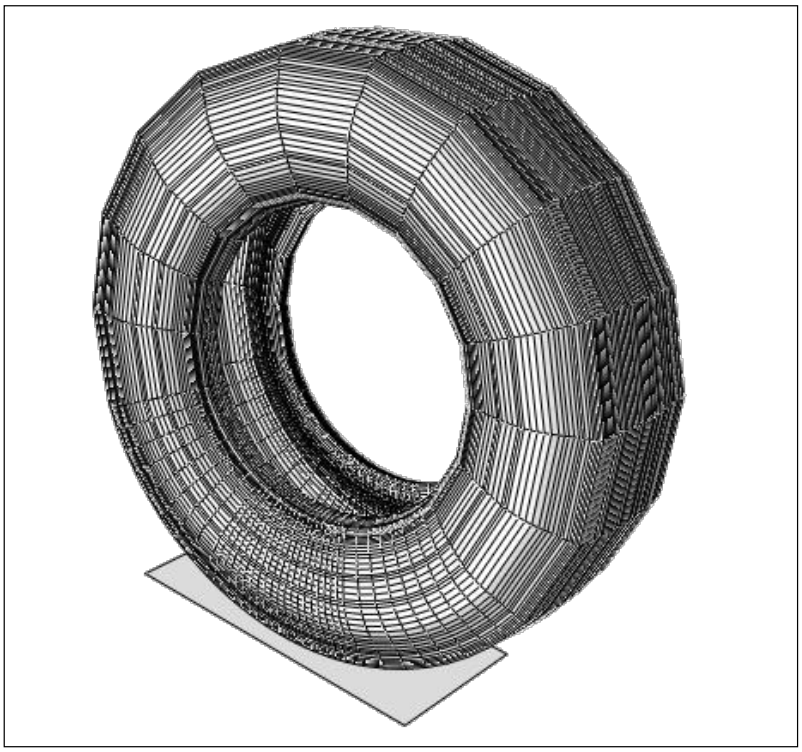
با استفاده از دستور revolve، مدل سه‌بعدی حاصل از این مدل دو بعدی حول محور تقارن خود حاصل می‌شود (شکل ۲). در این مدل سه‌بعدی در ناحیه تماس با سطح جاده، اندازه المان‌ها را برای افزایش دقت تاحد ممکن کوچک درنظر گرفته می‌شود. این مدل سه‌بعدی تولیدشده شامل ۸۰۴۰ گره و ۱۶۱۶۰ المان سه‌بعدی می‌باشد. ابتدا قسمت پاشنه بید به اندازه ۶mm به سمت مرکز

1. Mooney-Rivlin Model

تایر حرکت داده می‌شود تا فرایند رینگ‌کردن شبیه‌سازی شود و سپس تحت بارگذاری فشار داخلی ثابت به‌مقدار 0.862MPa قرار می‌گیرد و یک نیروی عمودی 4000 Kg (39240N) (۸۰ درصد بار مجاز) به تایر اعمال می‌شود تا سطح فوت پرینت تایر برروی سطح جاده حاصل شود.



شکل ۱- مدل دوبعدی حاصل از تایر رادیال باری 315/80R22.5 [۶]



شکل ۲- مدل سه‌بعدی تایر رادیال باری 315/80R22.5 حاصل از دوران مدل دوبعدی [۶]

آنالیز مکانیکی تایر در حال دوران

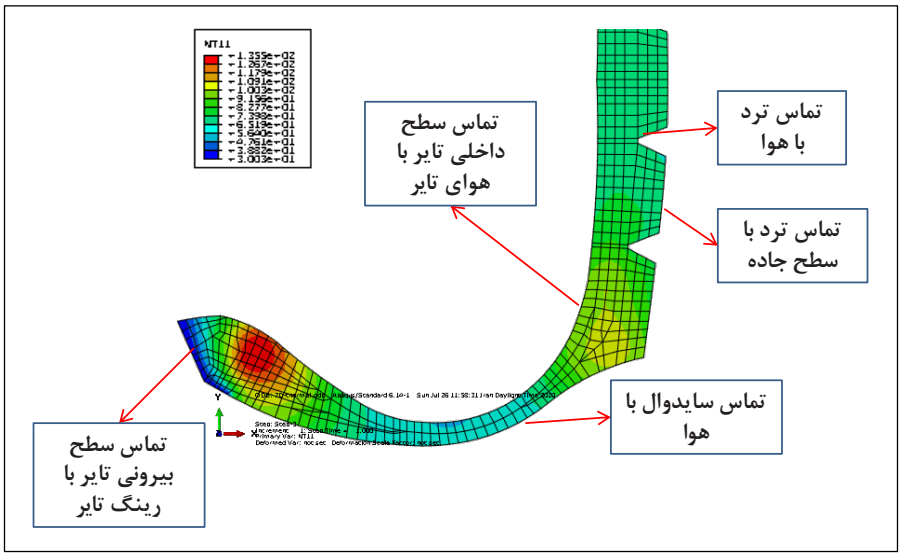
آنالیز دوران در حالت پایدار نیازمند به تمام نتایج آنالیز قسمت‌های قبل می‌باشد. در این آنالیز به یک محور یا نقطه مرجع نیازمند است که این مرجع فقط دارای سرعت انتقالی می‌باشد و سرعت دورانی آن صفر است. سرعت انتقالی تایر را برابر با 27.78m/s در نظر گرفته‌می‌شود و این سرعت ثابت درنظر گرفته‌می‌شود، با درنظرگرفتن سرعت چرخشی 60rad/s یک فرایند شتاب‌گیری حاصل خواهدشد. ازاین آنالیز حالت پایدار[1] برای محاسبه چگالی انرژی کرنشی (ESEDEN) که درواقع همان U_{tot} می‌باشد، استفاده شده‌است که نهایتا بااستفاده از فرمول $\dot{q}_v = U_{loss}.f$ مقدار تولید گرما در هر المان بدست خواهدآمد.

آنالیز حرارتی ناشی از اتلاف انرژی

درنهایت، یک تجزیه و تحلیل حرارتی متقارن دوبعدی برای مطالعه مقدار دما در تایر به‌دلیل تولید گرما انجام می‌شود. مش‌بندی این شبیه‌سازی حرارتی با سطح مقطع شبیه‌سازی دوبعدی برای تحلیل مکانیکی یکسان باید درنظر گرفته‌شود. به‌عنوان اولین تقریب، فرض می‌شود که خواص حرارتی با تغییر شکل مکانیکی دچار تغییر خاصی نمی‌شوند، از این‌رو شبیه‌سازی گرمایی با شبیه‌سازی مکانیکی که قبلاً انجام‌شده کوپل نمی‌شود. ضرایب انتقال حرارت از مطالب[۱] گرفته‌شده و درجدول ۱ خلاصه شده‌است. دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و سطح جاده ۳۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته‌می‌شود و دمای داخل تایر ۴۰ درجه سانتی‌گراد فرض می‌شود. درنهایت، با این روش مقدار توزیع

جدول۱- ضرایب انتقال حرارت استفاده‌شده برای شرایط مرزی گرمایی در شبیه‌سازی مدل انتقال حرارت تایر

محل شرط مرزی	ضریب انتقال حرارت $(W/m^2°C)$	دما مرجع (°C)
ترد/سطح جاده	12000	**25**
ترد/هوا	16.18	**25**
سایدوال/هوا	16.18	**25**
سطح داخلی تایر با هوای داخل تایر	5.9	**40**
تماس سطح بیرونی تایر با رینگ	88000	**25**



شکل ۳- شبیه‌سازی توزیع دمایی اجزای داخلی و سطح بیرونی تایر

1. Steady State

دما در سطح بیرونی و داخلی تایر در سرعت خطی 85Km/h برای تایر رادیال باری 385/65 R22.5 بدست خواهدآمد (شکل ۳).

اعتبارسنجی

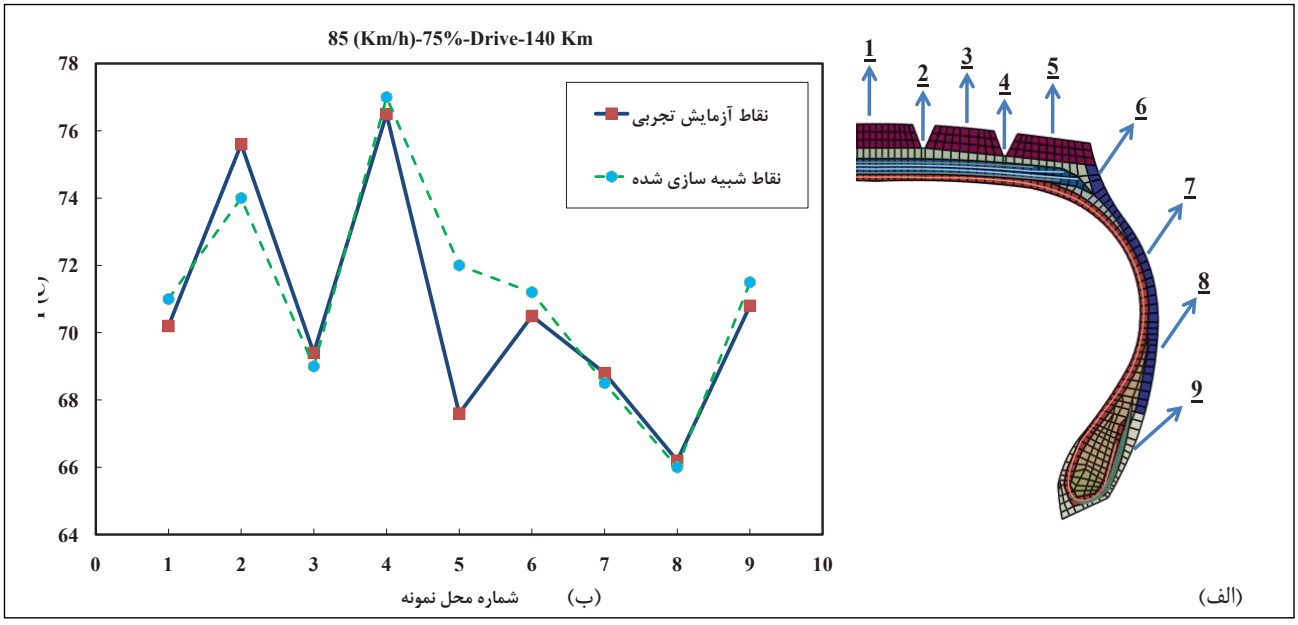
درراستای اعتبارسنجی این روش از شبیه‌سازی با تئوری تولید گرما در داخل تایر، به‌دلیل آن‌که دسترسی به‌دمای داخل تایر موجود نمی‌باشد، نوع اعتبارسنجی را فقط در محدوده سطح بیرونی تایر در نظر گرفته‌می-شود. برای این منظور در میدان تست گروه صنعتی بارز کرمان، خودرو با تایرهای رادیال باری (385/65 R22.5) آماده‌سازی شد و پس از پیمایش در حدود ۱۴۰ کیلومتر با سرعت ۸۵ کیلومتر برساعت و ۷۵ درصد بار مجاز و پس از رسیدن دمای تایر به‌دمای حالت تعادل، پس از توقف وسیله نقلیه، سریعاً دمای سطح بیرونی تایر با دماسنج لیزری در نقاط مشخص‌شده اندازه‌گیری شد. طبق شکل ۴ مشخص شده‌است که در بسیاری از نقاط شبیه‌سازی دمای سطح بیرونی تایر نزدیک به‌مقادیر تجربی می‌باشد، بنابراین این روش شبیه‌سازی می‌تواند یک روش کارآمد و موثر در پیش‌بینی توزیع دمای تایر در سطح بیرونی و اجزای داخلی تایر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

براساس شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، مشخص شده‌است که دما در نواحی نوک بلت ۲ و ۳ بسیار بیشتر از نواحی اطراف خود می‌باشد. این مساله به علت وجود تنش‌های فزاینده در این ناحیه می‌باشد که باعث تغییرشکل‌های زیاد و نهایتا تولید گرما و حبس گرما می‌شود و این ناحیه از نظر تنش و گرما جز نواحی بحرانی تایر محسوب می‌شود.

سپاسگزاری

IRM ...



شکل ۴- الف) نقاط مشخص‌شده درسطح بیرونی تایر در راستای اندازه‌گیری دمای تایر، ب) مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی تایر رادیال باری

مراجع

1. Nyaaba, W., Frimpong, S., Somua-Gyimah, G., & Galecki, G. (2016). FEA Prediction of Off-Road Tire Temperature Distribution.
2. Ghoreishy, M.H.R. (2008). State of the Art Review of the Finite Element Modelling of Rolling Tyres, January Iranian Polymer Journal 17:571-597.
3. Cho, J., Lee, H., Jeong, W., Jeong, K., and Kim, K., "Numerical Estimation of Rolling Resistance and Temperature Distribution of 3-D Periodic Patterned Tire," International Journal of Solids and Structures 50(1):86-96, 2013.
4. Nandi, B., Dalrymple, T., Yao, J., and Lapczyk, I. (eds.), "Importance of Capturing Non-Linear Viscoelastic Material Behavior in Tire Rolling Simulations," in Te Meeting of the Tire Society, USA, September 8-10, 2014.
5. Ebbott, T.G., Hohman, R.L., Jeusette, J.P., Kerchman, V. (1999). Tire Temperatureand Rolling Resistance Prediction with Finite Element Analysis. Tire Sci Technol 27: 2-21.
6. Wong, J.Y. (2001). Theory of Ground Vehicles, 3rd Ed., Wiley.

Lin, Y.J., Hwang, S.J. (2004). Temperature Prediction of Rolling Tires by Computer Simulation. Math Comput Simulat 67: 235-249.

۷. مرتضی رشیدی مقدم ،آرش عبدالهی، تحلیل مقاومت غلتشی تایر با استفاده از نرم افزار ABAQUS، کنفرانس بین المللی تایر و صنایع وابسته، ۱۳۹۷، تهران، هتل المپیک

Simulation of Temperature Distribution of energy dissipation in Truck Radial Tire

M. Rashidi-moghadam

1. PhD, Research and Development Department of Barez Industrial Group, Tehran, Iran

∗**Corresponding author Email:** morteza_rashidi@alumni.iust.ac.ir

Abstract: Rubber is the main element of tires and the main part of the tire consists of rubber. Tire and track heating is caused by hysteresis effects due to the deformation of the rubber during operation. Temperature in tire components depends on many factors, including tire geometry, inflation pressure, vehicle load and speed, road type and temperature and environmental conditions. In this study, using the theory of heat production in tire and relying on the finite element and calculating the stress and strain field of different parts of the tire, the temperature field of a steady-state rolling truck radial tire is predicted. ABAQUS software is used in this finite element prediction. It is shown that the results predicted using ABAQUS software are in significantly better agreement with the experimental results.

Keywords: Tire, Temperature, Heat transfer