

مدل سازی حرارتی- سینتتیکی و مکانیکی تایر موتورسیکلت در مراحل پخت و آزمون رانینگ با استفاده از نرم افزار آباکوس

علیرضا خانی^(۱)، علی تاجداری^(۲) و فرزاد عبدالحمید^(۳)

۱- رئیس اداره طراحی فرایند و فرآورده‌ها، واحد تحقیق و توسعه، شرکت دانش بنیان ایران یاسا تایر و رابر

۲- کارشناس اداره طراحی فرایند و فرآورده‌ها، واحد تحقیق و توسعه، شرکت دانش بنیان ایران یاسا تایر و رابر

۳- مدیر واحد تحقیق و توسعه، شرکت دانش بنیان ایران یاسا تایر و رابر

a.khani@iranvasa.ir

چکیده: در این پژوهش، تحلیل جامع حرارتی- سینتیکی تایر موتورسیکلت سایز ۱۷-۱۰۰/۸۰ باهدف بررسی یکنواختی پخت و رفتار حرارتی در شرایط دینامیکی انجام شده است. برای این منظور، داده‌های تجربی حاصل از نصب ترموکوپل در شش ناحیه بحرانی تایر با شبیه‌سازی المان محدود در محیط آباکوس تلفیق شد. مدل عددی با اعمال شرایط واقعی فرایند پخت شامل دمای بلادر ۱۹۵ و دمای قالب ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد توسعه یافت و سپس آزمون رانینگ ۴۲ ساعته تحت سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت و بارگذاری مرحله‌ای بازسازی شد. با استفاده از مدل سینتیکی آرنیوس، زمان‌های معادل پخت (t_{90}) و درجه پیشرفت واکنش در نواحی مختلف محاسبه شد. نتایج نشان داد ناحیه اینرلاینر به‌دلیل هدایت حرارتی بالاتر و تماس مستقیم با فشار داخلی زودتر به پخت کامل می‌رسد، درحالی‌که ناحیه ترد و بلت دارای تأخیر در پخت و گردیدن بالای تنش حرارتی است. این ناهمگنی حرارتی می‌تواند منجر به تمرکز تنش و افت چسبندگی بین‌لایه‌ای شود. چارچوب توسعه‌یافته، ابزاری کارآمد برای پیش‌بینی رفتار حرارتی- سینتیکی تایر و بهینه‌سازی دما، فشار و فرمولاسیون آمیزه در فرایند تولید به‌شمار می‌آید.

واژه‌های کلیدی: سینتیک پخت، شبیه‌سازی حرارتی- مکانیکی، آباکوس، مدل آرنیوس، دوام تایر، یکنواختی پخت

جدول ۱- مشخصات ساختاری تایر

آزمیه	EPI (ends/inch)	نوع نخ / دنیر	زاویه برش (°)	عرض (mm)	ضخامت (mm)	لایه
SBR/PBR	-	-	-	۱۴۵	۷	آج ترد (Cap)
NR/BR	۲۱٫۵	نخ D2، دنیر ۸۴۰	۴۰	۱۸۵	۱	بلت نخی (Belt)
NR/BR	۲۶	نخ D2، دنیر ۱۲۶۰	۴۸	۳۱۰	۱	لایه ۲ (Ply2)
NR/BR	۲۶	نخ D2، دنیر ۱۲۶۰	۴۸	۳۳۰	۱	لایه ۱ (Ply1)
CIIR	-	-	-	۲۰۵	۱٫۴	اینرلاینر (Innerliner)

بخش تجربی

۱. آزمون دانینگ

برای ارزیابی عملکرد حرارتی تایر در شرایط دینامیکی، آزمون رانینگ بر روی تایر نمونه انجام شد. فشار باد تایر پیش از شروع آزمون روی ۴۰ psi تنظیم شد تا شرایط واقعی بهره‌برداری بازتولید شود. تایر بر روی دستگاه درام نصب شد و با سرعت ثابت ۸۰ کیلومتر بر ساعت تحت بارگذاری مرحله‌ای قرار گرفت. مطابق جدول ۲ پروتکل بارگذاری به‌گونه‌ای طراحی شد که از بارهای سبک آغاز شده و به‌تدریج به سطوح سنگین‌تر برسد و امکان پایش گرمایش داخلی تایر در سناریوهای مختلف فراهم شود.

جدول ۲- روند بارگذاری در آزمون رانینگ

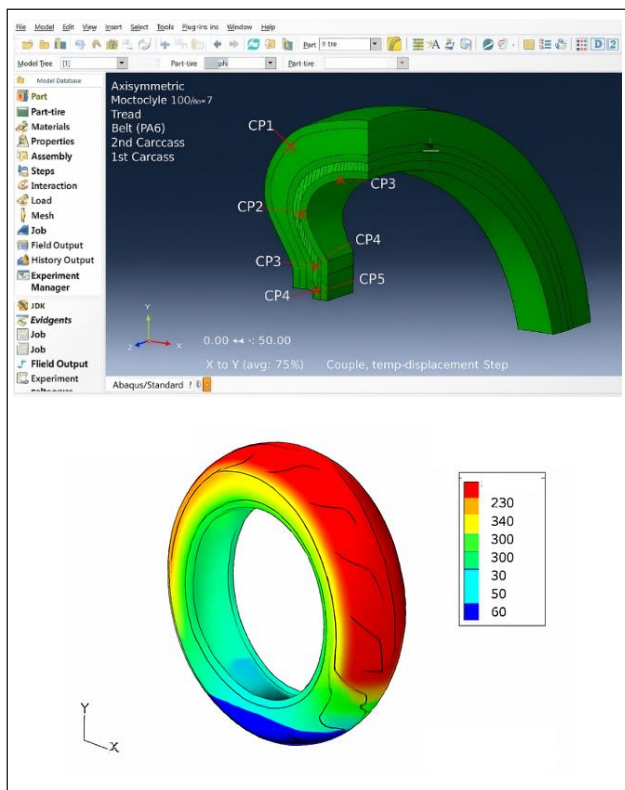
۴	۴	۲۴	۶	۴	مدت زمان (ساعت)
۲۹۴	۲۶۴	۲۳۴	۲۱۶	۲۰۰	بار (کیلوگرم)

مقدمه

کنترل رفتار حرارتی تایرهای موتورسیکلت از دیدگاه ایمنی، دوام و کارایی عملیاتی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا تجمع حرارت در حین غلشی می‌تواند فرایندهایی همچون تخریب شیمیایی آمیزه، افت خواص مکانیکی، جدایش لایه‌ای و درنهایت آسیب به نخ‌های تقویتی را به دنبال داشته باشد [۱]. منبع اصلی تولید گرما در تایر به پدیده هیستریزس و اسکوالاستیک در ترد و لایه‌های برابر مربوط می‌شود، درحالی‌که جانمایی نخ‌ها، ضخامت و آرایش لایه‌ها و همچنین شرایط بارگذاری و فشار باد نیز در شکل‌گیری نقاط داغ و توزیع حرارتی نقشی اساسی ایفا می‌کنند [۲]. باوجود پژوهش‌های متعددی که در سال‌های گذشته بر شبیه‌سازی انتقال حرارت تایر به کمک روش اجزای محدود متمرکز بوده‌اند، در بیشتر این مطالعات اثر جزئیات ساختاری مانند زاویه برش، تراکم و محل قرارگیری نخ‌ها کمتر موردتوجه قرار گرفته است [۳]. مشاهدات میدانی اما نشان داده‌اند که در برخی تایرها نخ‌های پلی‌آمید ۶ به دلیل افزایش بیش‌ازحد دمای موضعی دچار تخریب می‌شوند؛ پدیده‌ای که بیانگر اهمیت بررسی دقیق‌تر نقش سیم‌گذاری در میدان دما است. از سوی دیگر، واکنش‌های ولکانیزاسیون و میزان تکمیل پخت نیز در تعامل مستقیم با تاریخچه دمایی قرار دارند و استفاده از مدل‌های سینتیک آرنیوسی و محاسبه شاخص‌هایی مانند زمان معادل و t_{90} می‌تواند ارزیابی دقیق‌تری از کفایت و یکپارختی پخت ارائه کند. در این پژوهش، رفتار حرارتی تایر موتورسیکلت سایز ۱۷-۱۰۰/۸۰ متعلق به شرکت ایران‌یاسا با بهره‌گیری از داده‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی شده است. ساختار مطابق با جدول ۱ بوده و مشخصات نخ‌ها شامل دیر، تراکم و زاویه برش نیز مطابق داده‌های تولیدی واقعی کارخانه در مدل وارد شده است. برای تحلیل دقیق‌تر، شش سناریوی سیم‌گذاری (CP1 تا CP6) تعریف شد تا اثر محل قرارگیری نخ‌ها بر الگوی توزیع دما و زمان تکمیل پخت بررسی شود. هدف نهایی این مقاله ترکیب رویکرد عددی و داده‌های واقعی به منظور شناسایی نقاط بحرانی حرارتی و ارائه راهکارهایی برای بهبود طراحی و فرایند تولید تایر است.

۲. آزمون ترکوپل گذاری

تقویتی و بید تراکم مش افزایش یافت تا گرادین های دمایی با دقت ثبت شوند. تحلیل به صورت Transient با گام های زمانی تطبیقی اجرا شد و نتایج به شکل نقشه های حرارتی و پروفایل های دما- زمان در نقاط متناظر با ترکوپل ها (CP1 تا CP6) استخراج شد. این خروجی ها مبنایی برای اتصال مدل حرارتی با مدل سینتیکی پخت و تحلیل دوام تایر در مراحل بعدی پژوهش فراهم ساختند.



شکل ۱- مدل دوبعدی محور متقارن تایر موتورسیکلت ۱۷۰/۸۰/۱۰۰ در حالت تحلیل کوپل شده

به منظور تحلیل دقیق فرایند ولکانیزاسیون و بررسی رفتار شیمیایی سامانه لاستیکی مورد استفاده در تایر، داده های سینتیکی حاصل از آزمون های رتومتری و تحلیل های حرارتی مطابق جدول ۳ مورد بهره برداری قرار گرفتند. این داده ها امکان توصیف وابستگی نرخ واکنش های پخت به دما و زمان را فراهم می سازند و مبنای اصلی برای پیش بینی درجه تبدیل (Degree of Cure) در شرایط مختلف محسوب می شوند. افزون بر این، با استفاده از داده های حاصل از آزمون های ایزوترمال و غیرایزوترمال، مقادیر t_{90} و زمان های معادل در دماهای گوناگون تعیین شد و به کمک روابط ریاضی، به منحنی های تجربی-مدل سازی شده تطبیق داده شدند. چنین رویکردی امکان مقایسه مستقیم شرایط واقعی پخت در پرس با شرایط شبیه سازی شده در نرم افزارهای تحلیلی را فراهم می سازد. نکته کلیدی در بهره گیری از این داده ها آن است که رفتار حرارتی تایر در حین رانینگ (که با استفاده از نتایج ترکوپل گذاری و پروفایل های دمایی محاسبه می شود) با داده های سینتیکی ترکیب شود تا مشخص شود گرمایش داخلی ناشی از سرویس دهی تا چه اندازه می تواند موجب ادامه واکنش های پخت، بیش پخت (overcure)، یا حتی تخریب زنجیره های پلیمری شود. به این ترتیب، داده های سینتیکی نه تنها به عنوان ابزار تفسیر فرایند تولید در پرس کاربرد دارند، بلکه در پیوند با شرایط دینامیکی رانینگ، دیدگاهی جامع نسبت به دوام و ایمنی تایر فراهم می آورند.

جدول ۳- پارامترهای نقاط سیم گذاری شده

CP6	CP5	CP4	CP3	CP2	CP1	Parameter
بالک	بین لایه ۱	بین لایه ۱	بین بلت	شولدر	شولدر	محل قرارگیری
ترد	و اینرلایتر	و لایه ۲	و لایه ۲	پایین	بالا	
۱۷۳	۱۸۵	۱۷۷	۱۷۵	۱۷۱	۱۷۷	T_{max}
۱/۱۴	-	-	-	۱/۰۱	۱/۰۷	T_{90} Factor (Tread)
-	۱/۴۹	۱/۰۸	۱/۰۶	۱/۰۲	۱/۰۸	T_{90} Factor (Ply)
-	۱/۸۵	-	-	-	-	T_{90} Factor (Inner)

بخش نظری

۱. چارچوب مدل سازی حرارتی-مکانیکی مفهومی در Abaqus

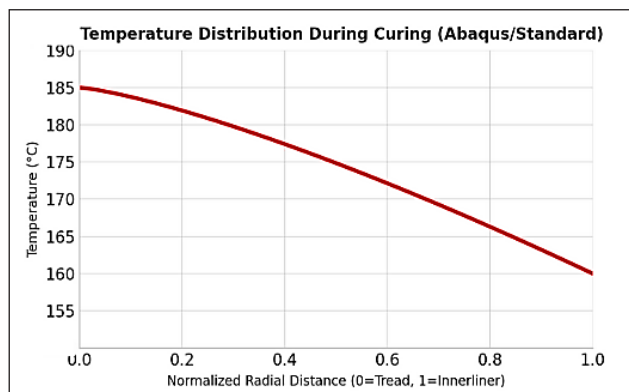
در این پژوهش، باهدف بررسی رفتار حرارتی تایر موتورسیکلت در حین بارگذاری دینامیکی و تحلیل توزیع دما در لایه های مختلف ساختار تایر، یک چارچوب مدل سازی مفهومی کوپل شده حرارتی- مکانیکی در محیط نرم افزار آباکوس توسعه داده شد. این چارچوب به گونه ای طراحی شد که بتواند اثرات مکانیکی ناشی از فشار داخلی، تماس تایر با سطح جاده و تلفات هیستریزس را به صورت همزمان با انتقال حرارت گذرا درون ساختار تایر ترکیب کند. هدف از توسعه این مدل، ارائه یک رویکرد نظام مند جهت اتصال داده های تجربی ترکوپل گذاری و تحلیل عددی در محیط اجزای محدود است. در گام نخست، هندسه مقطع تایر به صورت دوبعدی و متقارن حول محور شعاعی بازسازی و خواص مواد هر بخش شامل چگالی (ρ)، ظرفیت گرمایی ویژه (C_p) و ضریب هدایت حرارتی (k) براساس داده های آزمایشگاهی مواد پلیمری تعریف شد. در بخش تحلیل، نوع گام به صورت Coupled Temperature-Displacement انتخاب شد تا معادلات انتقال حرارت و موازنه مومنتوم به صورت همزمان و وابسته به هم حل شوند. در این حالت، افزایش دما سبب تغییر سختی ماده شده و توزیع تنش ها و کرنش ها را متقابلاً تحت تأثیر قرار می دهد. شرایط مرزی مدل براساس داده های تجربی آزمون رانینگ تعریف شد؛ فشار داخلی تایر برابر ۴۰ psi، تماس با سطح درام دارای ضریب اصطکاک μ برابر با ۰/۸ و سرعت چرخش معادل ۸۰ km/h در مرز بیرونی ترد در نظر گرفته شد. به منظور بازتولید شرایط خنک کاری محیط، انتقال حرارت همرفتی با ضریب h برابر با ۲۵ W/m²K روی سطح بیرونی اعمال شد [۴]. مدل با المان های سه بعدی از نوع C3D8T مش بندی شد تا کوپل حرارتی- مکانیکی در هر گره برقرار باشد. در نواحی بحرانی مانند محل تماس لایه های

۲. مدل سازی سینتیکی پخت و همبستگی با میدان دمایی شبیه سازی شده
به منظور پیش بینی رفتار شبکه ای شدن ترکیبات لاستیکی در نواحی مختلف تایر و ارزیابی میزان پخت مؤثر در شرایط واقعی بهره برداری، مدل سینتیکی بر پایه معادله آرنیوس انتخاب شد. در این مدل، نرخ تبدیل یا درجه پخت (α) تابعی از دما و زمان بوده و به صورت کلی از رابطه ۱ تبعیت می کند.

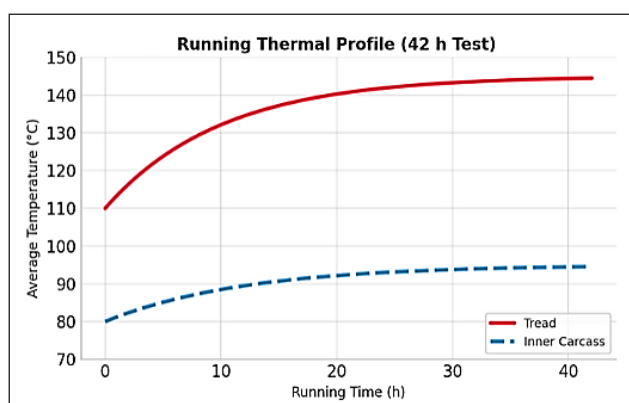
$$\frac{d\alpha}{dt} = Ae^{\frac{Ea}{RT}} \cdot f(\alpha) \quad (1)$$

در این رابطه A پیش نمایه واکنش، Ea انرژی فعال سازی، R ثابت گازها و T دمای لحظه ای در هر نقطه از ساختار تایر است. داده های دمایی $T(t)$ برای نقاط مختلف (CP1 تا CP6) از نتایج تحلیل حرارتی در محیط آباکوس استخراج و در مدل فوق جایگذاری شدند تا توزیع زمانی پخت در هر لایه (ترد، بلت، کارکاس، و اینرلایتر) محاسبه شود. برای لحاظ کردن تغییرات دمایی غیریکساخت، مفهوم زمان معادل (Equivalent Cure Time) در دمای مرجع به کار گرفته شد تا اثر شتاب دهی حرارتی در طول فرایند به صورت جمعی لحاظ شود. بر این اساس، هر تاریخچه دمایی غیرایزوترمال به یک واکنش ایزوترمال در دمای مرجع نگاشت شد و مقادیر درجه پخت در بازه های زمانی مختلف محاسبه شد. به منظور همخوانی مدل عددی با داده های واقعی، از فاکتورهای تجربی t_{90} حاصل از آزمون ترکوپل گذاری استفاده شد. این ضرایب بیانگر نسبت سرعت پخت در هر ناحیه نسبت به شرایط مرجع هستند و به صورت ضریب اصلاحی در زمان معادل لحاظ شدند. به این ترتیب، نقاطی نظیر اینرلایتر و نواحی زیر بلت که دمای پایین تر و سرعت پخت کندتری دارند، در مدل با فاکتورهای t_{90} بزرگ تر بازنمایی شدند. در نهایت، توزیع زمانی درجه پخت $\alpha(t)$ برای هر نقطه محاسبه و منحنی های حاصل جهت مقایسه رفتار سینتیکی نواحی مختلف

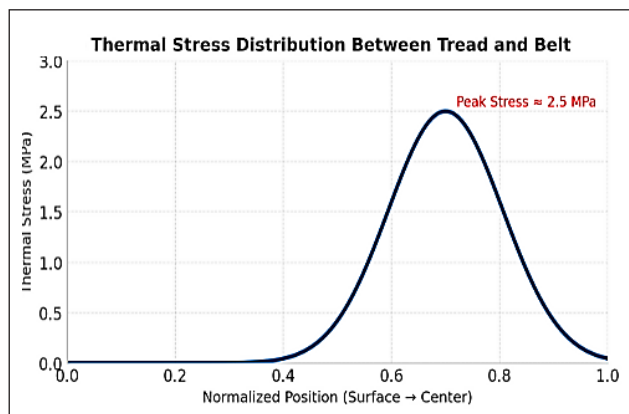
چندلایه مقاوم به پیرشدگی حرارتی در تایرهای نخه مبتنی بر PA6 قرار گیرد



شکل ۲- توزیع دمایی حین پخت



شکل ۳- پروفایل گرمایی حین آزمون رانینگ



شکل ۴- توزیع تنش حرارتی بین ترد و لایه

ترسیم شد. نتایج این بخش، امکان ارزیابی نواحی دارای کم پختی (under-cure) یا بیش پختی (over-cure) را فراهم ساخته و مبنایی برای اصلاح شرایط پخت و کنترل کیفیت در طراحی تایر فراهم می کند.

نتیجه ها و بحث

تحلیل کوپل شده حرارتی- سینتیکی توسعه یافته در نرم افزار آباکوس، بر پایه داده های تجربی ترموکوپل گذاری و آزمون رانینگ ۴۲ ساعته، تصویری جامع از رفتار حرارتی تایر موتورسیکلت در دو فاز کلیدی عمر، پخت و عملکرد ارائه داد. همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می شود، در فاز پخت به دلیل اختلاف دمای بلادر (۱۹۵ °C) و سطح قالب (۱۷۰ °C)، شار حرارتی از درون به بیرون برقرار است و اینرلاینر به عنوان داغ ترین ناحیه با بیشینه دمای حدود ۱۸۵ °C شناسایی شد. این گرادیان حرارتی منفی در راستای شعاعی باعث می شود که نرخ واکنش شبکه ای شدن در لایه های داخلی بیشتر بوده و اینرلاینر حدود ۳۰٪ زودتر از بالک ترد به آستانه تبدیل t_{90} برسد. اختلاف حرارتی (۲۵ °C) میان لایه ها، منبع اصلی ناهمگنی پخت و تنش های حرارتی اولیه محسوب می شود. در مقابل، نتایج مدل حرارتی گذرای رانینگ در شکل ۳ نشان می دهد که با تغییر جهت شار حرارتی از بیرون به درون، دمای ترد به تدریج افزایش یافته و در پایان ۴۲ ساعت رانینگ به میانگین ۱۳۵ °C و در شولدر به بیشینه ۱۴۵ °C رسیده است؛ درحالی که دمای کارکاس و اینرلاینر حدود ۹۵ °C باقی مانده است. گرادیان دمایی معکوس (۴۰ °C) منجر به ایجاد میدان تنش حرارتی متناوب در مرز بین لایه های ترد و بت می شود. تحلیل مکانیکی کوپل شده حرارتی- سینتیکی نشان داد که تنش حرارتی ماکزیمم در این ناحیه حدود ۲/۵ MPa است که در شکل ۴ به صورت ناحیه تمرکز تنش مشخص شده و با نواحی مشاهده شده جدایش بین لایه ای در آزمون های دوام مطابقت دارد. نتایج مدل رانینگ هم چنین نشان داد که نواحی شولدر و ترد در محدوده دمایی ۱۳۰ تا ۱۵۰ °C قرار دارند که مطابق منحنی های سینتیکی، در بازه واکنش های پس پخت (post-curing) است. در این شرایط، ادامه جزئی واکنش پخت یا وقوع reversion در شبکه گوگردی محتمل است، درحالی که لایه های میانی در دمای پایدار باقی می مانند. این مشاهده ها، به روشنی بیانگر آن است که در طراحی سیکل پخت باید از یک سو جلوگیری از over-cure در اینرلاینر و از سوی دیگر جبران کم پختی احتمالی در لایه های بیرونی مدنظر قرار گیرد. از دیدگاه صنعتی، تحلیل ترکیبی پخت و رانینگ این مقاله ابزاری کارآمد برای مهندسان فرایند فراهم می سازد تا اختلاف زمانی t_{90} بین لایه ها را کاهش دهند و با بهینه سازی پروفایل حرارتی پرس، یکنواختی پخت و چسبندگی بین لایه ای را بهبود بخشند. به علاوه، شناسایی نواحی داغ در رانینگ امکان انتخاب مواد با هدایت حرارتی بالاتر در ترد و شولدر یا اصلاح هندسه شیارها را فراهم می کند تا گرادیان حرارتی از ۴۰ °C به حدود ۲۵ °C کاهش یابد. در نهایت، مدل عددی توسعه یافته با بازتولید رفتار واقعی حرارتی و مکانیکی تایر، پلی میان طراحی فرایند و عملکرد سرویس ایجاد کرده و می تواند مبنای طراحی ساختارهای

مراجع

- [1] Gent, A.N. & Walter, J.D., The Pneumatic Tire, CRC Press, 2006.
- [2] Rivlin, R.S., "Tire Mechanics and Hysteresis," Rubber Chemistry and Technology, 1974.
- [3] Cho, J.R., et al., "Numerical Prediction of Rolling Resistance and Temperature Distribution of a Passenger Car Tire," Composite Structures, 2004.
- [4] Bach, T. & Pugno, N. (2018). Coupled thermo-mechanical modelling of tire deformation and heating, Int. J. Mechanical Sciences, 150, 47-58.