

تحلیل ترموهایپرالاستیک و شبیه سازی بلادر در فرایند پخت تایر و بررسی نوع آمیزه بر رفتار ترمومکانیکی آن به روش المان اجزای محدود

عاطفه سلیمی^۱ و علی زرگری پور^{۲*}

۱- کارشناس مهندسی لاستیک شرکت تولیدی ایران تایر

۲- کارشناس طراح تایر شرکت تولیدی ایران تایر

alizargaripoor@gmail.com

چکیده: در این پژوهش، رفتار حرارتی و مکانیکی بلادر مورد استفاده در پرس پخت تایر با استفاده از نرم افزار المان محدود Abaqus، شبیه سازی شده است. جنس بلادر، بیوتیل در نظر گرفته شده و با فرض مدل هایپرالاستیک Mooney-Rivlin، تحلیل به صورت حرارتی-مکانیکی (Coupled Temperature-Displacement) انجام گرفته است. انتقال حرارت از داخل بلادر به صورت جابه جایی (Convection) و از بیرون، تحت دمای متغیر با زمان مدل سازی شده است. در این مدل سازی توزیع دما، تنش و جابه جایی در بلادر مورد بررسی قرار گرفته و نقاط دارای تمرکز تنش و بیشترین تغییر شکل مشخص خواهند شد. همچنین در این پژوهش تأثیر نوع آمیزه بر رفتار ترمومکانیکی بلادر، حین فرایند پخت بررسی شده و مشخص شد که توزیع تنش و تغییر شکل در آمیزه های مختلف به چه صورت خواهد بود. در پایان، نتایج عددی و شبیه سازی انجام گرفته می توانند در بهینه سازی طراحی بلادر و افزایش عمر کاری آن در چرخه های پخت صنعتی تایر کمک کنند.

واژه های کلیدی: بلادر، مدل سازی عددی، مواد هایپرالاستیک، المان اجزای محدود

مقدمه

فرایند پخت تایر (Curing)، یکی از مراحل حساس و تعیین کننده در کیفیت نهایی محصول به شمار می رود. در این فرایند، بلادر با انبساط ناشی از ورود بخار داغ، فشار و حرارت لازم برای شکل دهی و ولکانش لاستیک خام را تأمین می کند. به دلیل دمای بالا و فشارهای قابل توجه، این قطعه در معرض تغییر شکل های بزرگ، گرادین های حرارتی شدید و تماس پیچیده با بدنه داخلی تایر قرار دارد؛ بنابراین استفاده از روش های عددی المان اجزای محدود (FEM)، ابزاری قدرتمند برای تحلیل میدان های تنش، دما و پیش بینی عملکرد بلادر محسوب می شود. تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه تحلیل بلادر در فرایند پخت انجام شده است. شیوا و همکاران [۱] با افزودن آلومینیوم سولفات، رسانایی حرارتی و خواص مکانیکی بلادر را مورد بررسی قرار دادند. همچنین آن ها افزایش رسانایی حرارتی بلادر و تأثیر آن بر پروفایل دما در فرایند پخت تایر، با افزودن پودرهای سرامیکی را گزارش کرده اند [۲]. در پژوهشی دیگر، آن ها با افزودن SiC (Silicon Carbide) به بیوتیل، رسانش حرارتی را افزایش داده و باعث بهبود عملکرد بلادر شدند [۳]. فورملا و همکاران [۴] به بررسی بلادر از جنس ترکیبات بیوتیل و ارزیابی خواص ترمومکانیکی آن پرداخته اند. هدف از این پژوهش، یک مدل عددی از بلادر در نرم افزار Abaqus است که بتواند اثرات هم زمان دما و فشار را حین فرایند پخت شبیه سازی کند. در این مدل، رفتار غیرخطی ماده براساس مدل هایپرالاستیک مونی-ریولین برای لاستیک بیوتیل شبیه سازی شده و همچنین تأثیر نوع آمیزه بر رفتار ترمومکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج حاصل می توانند در بهینه سازی طراحی بلادر، انتخاب مواد مقاوم تر و پیش بینی عمر کاری آن مؤثر باشند.

بخش تجربی

معادلات حاکم بر مسأله

برای جسم های لاستیکی مانند بلادر که تغییر شکل های بزرگ دارند، از روابط غیرخطی تنش-کرنش استفاده می شود. در این حالت تغییر شکل با استفاده از تنسور گرادین تغییر شکل تعریف می شود:

$$F = \frac{\partial x}{\partial X} \quad (1)$$

که در آن X مختصات اولیه و x مختصات بعد از تغییر شکل است. با استفاده از رابطه (۱)، تنسور کرنش کوشی-گرین به صورت زیر به دست می آید:

$$C = F^T F \quad (2)$$

برای توصیف ماده هایپرالاستیک از تابع انرژی کرنشی استفاده می شود. با توجه به مدل مونی-ریولین تابع انرژی کرنشی به صورت زیر بیان می شود:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (3)$$

که در آن C_{10} و C_{01} ضرایب ماده هایپرالاستیک و I_1 و I_2 پایاهای تنسور کرنش کوشی-گرین است. در این مدل، رابطه بین تنش و کرنش به صورت زیر تعریف می شود:

$$\sigma = -PI + 2C_{10}B - 2C_{01}B^{-1} \quad (4)$$

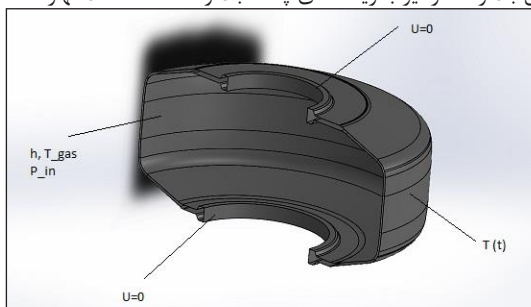
که در آن P فشار هیدرواستاتیک (برای شرط تراکم ناپذیری) و B تنسور چپ گرین است. در تحلیل ترمومکانیکی در نرم افزار Abaqus، معادلات حرکت و انرژی به صورت هم زمان (Coupled) حل می شوند که به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\nabla \cdot \sigma + f = 0 \quad (5)$$

که در آن f نیروی حجمی (مانند وزن یا فشار داخلی) است.

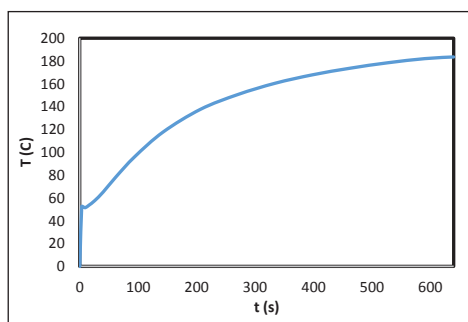
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (6)$$

که در آن ρ چگالی ماده، C_p گرمای ویژه، k ضریب رسانش حرارتی و Q منبع حرارتی درونی است و در این جا برابر صفر خواهد بود. شکل ۱ نمای سه بعدی یک بلادر سایز ۱۳/۶ و مناسب برای پخت تایر سایز ۱۴ را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، شرایط مرزی در داخل بلادر شامل فشار و انتقال حرارت جابه جایی ناشی از بخار داخل بلادر است. از آن جایی که در این پژوهش هدف اصلی بررسی رفتار بلادر است، تایر به صورت سطح مرزی با شرایط مرزی دمایی وابسته به زمان $(T(t))$ مدل شده است. همچنین فرض شده است که بالا و پایین بلادر که درگیر با رینگ های پخت بلادر هستند، کاملاً مهار شده اند.

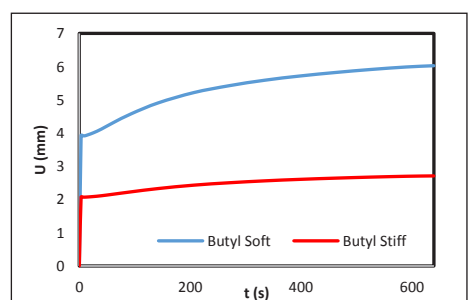


شکل ۱- شرایط مرزی اعمال شده روی بلادر

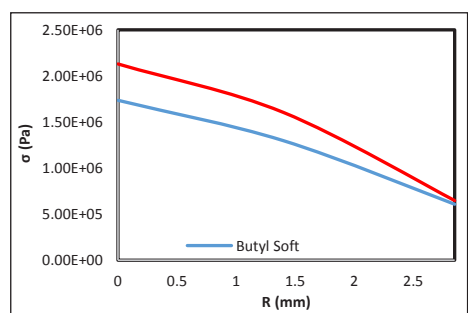
شکل ۴ نمودار دما برحسب زمان در نقطه ی بیرونی بلادر را نشان می دهد. طبق این نمودار، دما به تدریج تا مقدار ۱۸۳/۵ °C افزایش می یابد. مطابق شکل ۴، گرادین دمای در طول فرایند به تدریج تا انتهای پخت تقریباً یکنواخت می شود. به منظور بررسی نوع آمیزه بر رفتار ترمومکانیکی بلادر در فرایند پخت، دو نوع کامپاند بیوتیل با پارامترهای مکانیکی و حرارتی متفاوت مدل شده اند. در نوع بیوتیل نرم تر (با مدول کمتر) کرنش های بزرگ تر و جابه جایی بیشتری به وجود می آید (شکل ۵). در حالی که در نوع بیوتیل سخت تر (با مدول بالاتر) تغییر شکل کمتر اما تنش های موضعی بیشتری پدید آمده است (شکل ۶). این موضوع نشان می دهد که انتخاب نوع بیوتیل تأثیر مستقیم بر توزیع تنش و دوام بلادر در شرایط کاری دارد.



شکل ۴ تغییرات دما برحسب زمان روی سطح بیرونی بلادر



شکل ۵ تغییرات جابه جایی برحسب زمان روی سطح بلادر



شکل ۶ تغییرات تنش در طول ضخامت بلادر در ناحیه ی میانی

نتیجه گیری:

در این پژوهش بلادر حین فرایند پخت با استفاده از نرم افزار المان محدود Abaqus و به صورت مدل هایپر الاستیک مونی-ریولین مدل شده و توزیع دما، تنش و تغییر شکل در آن نشان داده شده است. همچنین تأثیر نوع آمیزه بر رفتار ترمومکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفته و توزیع تنش و تغییر شکل در آن ها مقایسه شده است. نتایج به دست آمده از این تحلیل می تواند جهت طراحی بهینه بلادر و افزایش عمر آن در صنعت تایر سازی مورد استفاده قرار گیرد.

بنابراین در سطح داخلی بلادر (در تماس با بخار داغ داخل)، از شرایط انتقال حرارت جابه جایی استفاده می شود:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{\infty}) \quad (7)$$

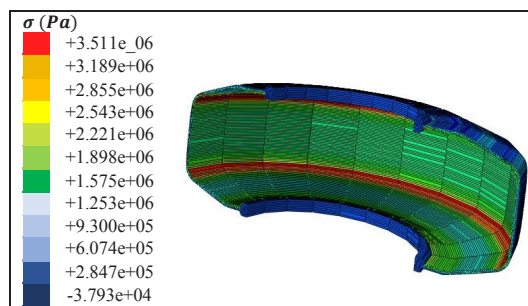
که در آن h ضریب انتقال حرارت جابه جایی، T_{∞} دمای بخار داخل بلادر و n بردار عمود بر سطح بلادر است. مقدار $T_{\infty}=206K$ و $h=50(W/(m.K))$ فرض شده و $P_{int}=1.7MPa$ (فشار بخار داخل بلادر) است. همچنین با تعریف تایلر به صورت سطح مرزی، دمای سطح بیرونی بلادر را می توان به صورت وابسته به زمان در طول فرایند پخت بیان کرد. با توجه به نتایج به دست آمده، زمان فرایند پخت ۱۰ دقیقه و ۴۰ ثانیه در نظر گرفته شده و دما از ۵۲/۹ °C به صورت تدریجی تا ۱۸۳/۵ °C افزایش می یابد. برای بررسی نوع آمیزه بر رفتار ترمومکانیکی بلادر از دو کامپاند بیوتیل با خواص متفاوت (یکی نرم و دیگری سخت) استفاده شده است. خواص مربوط به این دو کامپاند در جدول زیر لیست شده اند:

جدول ۱- خواص مکانیکی و حرارتی دو کامپاند بیوتیل نرم و سخت

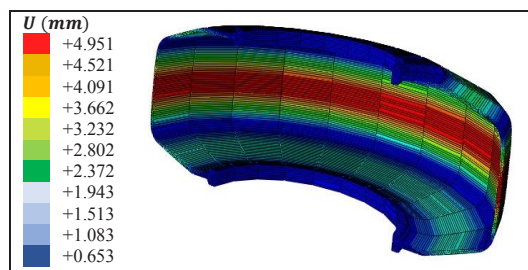
	$C_{10}(MPa)$	$C_{01}(MPa)$	$\rho(Kg/m^3)$	$C_p(J/Kg.K)$	$k(W/m.K)$	$\alpha(1/K)$
Butyl_Soft	۰.۲۵	۰.۰۲	۱۰۵۰	۱۴۰۰	۰.۱۲	۰.۰۰۰۱
Butyl_Stiff	۰.۶	۰.۱۲	۱۲۰۰	۱۶۰۰	۰.۱۸	۰.۰۰۰۸

نتیجه ها و بحث

در این بخش نتایج مربوط به شبیه سازی بلادر در فرایند پخت نمایش داده شده است. شکل ۲ و شکل ۳ کانتور تنش و جابه جایی را در بلادر نشان می دهد. بررسی توزیع تنش ها نشان می دهد که بیشینه تنش در سطح داخلی بلادر ایجاد می شود. جایی که فشار داخلی و دمای بالا هم زمان اعمال می شوند. مطابق شکل ۲ مقدار تنش ها به سمت سطح بیرونی کاهش می یابد و در مرز تماس با تایلر به حداقل می رسد. همچنین در نقاط نزدیک به تکیه گاه ها و همچنین در شانه ی بلادر که محل تمرکز تنش هست، مقدار تنش بالا خواهد بود. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، نقاط دور از لبه ها و تکیه گاه ها (در شکم بلادر)، جابه جایی، بیشترین مقدار را دارد. همچنین در نقاط با ضخامت کمتر به دلیل کمترین محدودیت هندسی مقدار جابه جایی بیشتری ملاحظه می شود.



شکل ۲- توزیع تنش در نقاط مختلف بلادر در حین فرایند پخت



شکل ۳ توزیع جابه جایی در نقاط مختلف بلادر در حین فرایند پخت

مراجع

- [1] Shiva M., Ahmadi M., Esmaili E., and Zivdar M., "Heat diffusivity and mechanical properties of a tire bladder composite in the presence of ceramic fillers", Polymer Bulletin, 81, 1635-1649 (2023).
- [2] Shiva M., Lakhi M., and Robot AS., "Increase heat conductivity of bladder and calculate its effect on temperature profile of the tire in the curing process", Applied Research in Chemical - Polymer Engineering, 3, 93-105 (2019).
- [3] Shiva M., Dallakheh MK., Ahmadi M., and Lakhi M., "Effects of silicon carbide as a heat conductive filler in butyl rubber for bladder tire curing applications", Materials Today, 29, (2021).
- [4] Formela K., and Haponiuk JT., "Curing characteristics, mechanical properties and morphology of butyl rubber filled with ground tire rubber (GTR)", Iranian Polymer Journal, 23, 185-194 (2014).