

Increase Heat Conductivity of Bladder and Calculate its Effect on Temperature Profile of the Tire in the Curing Process

Mehdi Shiva^{1*}, Mohammad Lakhi², Ahmad Soleymani Robat³

1- Department of Chemical Engineering, Birjand University of Technology,
Post Box: 9719866981, Birjand, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

3- Department of Technology and Research, Kavir Tyre Co, Post Box: -16315
1468, Post Box Factory: 518, Birjand, Iran

Abstract

Research subject:

Bladder is a rubber part used in tyre curing process. Increasing the thermal conductivity of this rubber piece is important for the purpose of reducing the final tyre price through reducing the tyre curing time. In this study, the use of a powder containing alumina and aluminum sulfate on thermal conductivity of carbon black filled butyl rubber used in tyre curing bladder was investigated.

Research approach:

The above filler was added to the bladder mixture by 1.5 %wt. The mixtures were prepared in internal mixer and their curing behavior, mechanical/aging properties and thermal conductivity were measured. To determine the thermal diffusion coefficient of the rubber, the specimen immersion method was used in oil bath and computer simulation of heat transfer using a guess and error approach. Also, the effect of this increase in thermal diffusion coefficient on the internal temperature changes of the tire was studied by selecting a simplified geometry from the tire profile in near-tire curing conditions and by simulating two-dimensional heat transfer behavior in ABAQUS software.

Main results:

It was observed that the thermal diffusion coefficient of the mixture increased from $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ to $1.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, without altering the mechanical and aging properties of the rubber compound. The simulation results also showed that the temperature of different tire points is affected by the increase in thermal conductivity of the bladder. Therefore, there is a good potential for reducing tire curing time.

key words

Bladder
Non-isothermal curing
Heat diffusivity coefficient
Temperature-time history
Alumina
Tyre tread

*To whom correspondence should be addressed:

mehdishiva@birjandut.ac.ir

افزایش هدایت گرمایی بلادر و محاسبه تاثیر آن بر تغییرات دمایی تایر در فرایند پخت

مهدی شیوا^{۱*}، محمد لاهی^۲، احمد سلیمانی رباط^۳

۱- بیرجند، دانشگاه صنعتی بیرجند، گروه مهندسی شیمی، کد پستی ۹۷۱۹۸۶۶۹۸۱

۲- بیرجند، دانشگاه بیرجند، گروه مهندسی مکانیک

۳- بیرجند، شرکت کویرتایر، اداره تکنولوژی و تحقیقات، صندوق پستی ۵۱۸

چکیده

بلادر یا کیسه هوا یک قطعه لاستیکی است که در فرایند پخت تایر استفاده می‌شود. افزایش هدایت گرمایی این قطعه لاستیکی برای اهداف کاهش قیمت تمام شده از طریق کاهش زمان پخت تایر حائز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش استفاده از پودر حاوی آلومینا و سولفات آلومینیوم بر هدایت گرمایی فرمول لاستیک بیوتیل پر شده با دوده مورد استفاده در آمیزه بلادر پخت تایر مورد مطالعه قرار گرفته است. پرنکننده فوق به مقدار ۱٫۵ قسمت وزنی به آمیزه بلادر افزوده شد. آمیزه‌ها در مخلوط کن داخلی تهیه و رفتار پخت، خواص مکانیکی، زمانمندی و خواص هدایت حرارتی آنها اندازه‌گیری گردید. برای تعیین ضریب نفوذ حرارتی لاستیک از روش غوطه‌ور سازی نمونه با ابعاد مشخص در حمام روغن و شبیه‌سازی کامپیوتری انتقال حرارت با استفاده از یک رویکرد حدس و خطا استفاده شد. مشاهده شد ضریب نفوذ حرارتی آمیزه فوق از متوسط $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ به متوسط $1,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ افزایش می‌یابد، بدون آنکه خواص مکانیکی و زمان‌مندی این آمیزه تغییر چندانی کند. در ادامه با انتخاب یک هندسه ساده شده از نیم‌رخ تایر در شرایط نزدیک به شرایط پخت تایر و با شبیه‌سازی رفتار انتقال حرارت دو بعدی در نرم‌افزار ABAQUS تاثیر این افزایش در ضریب نفوذ حرارتی بلادر بر تغییرات دمایی قسمتهای داخلی تایر مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد دمای نقاط مختلف تایر با افزایش در هدایت گرمایی لاستیک بلادر تحت تاثیر قرار گرفته و افزایش می‌یابد، لذا پتانسیل مناسبی برای کاهش زمان پخت تایر فراهم آورده می‌شود.

کلمات کلیدی

بلادر
پخت ناهمدمای
ضریب نفوذ حرارتی
تاریخچه دما-زمان
آلومینا
رویه تایر

*مسئول مکاتبات:

mehdishiva@birjandut.ac.ir

مقدمه:

ولکانش یا پخت، یک فرایند ایجاد اتصال عرضی شیمیایی در قطعه لاستیکی است که کیفیت و قیمت تمام شده محصول را متاثر می سازد. زمان باز شدن قالب، توزیع دما و درجه پخت سه پارامتر مهم در ولکانش لاستیک می باشند. درجه پخت، بیانگر مقدار تبدیل واکنش ولکانش است که به زمان و دما بستگی دارد [۱]. توزیع ناهمگن درجه پخت باعث توزیع ناهمگن خواص و افت کیفیت قطعه لاستیکی می گردد. هدایت گرمایی پایین لاستیک مهم ترین دلیل پیدایش توزیع دما و توزیع درجه پخت در قطعه لاستیکی است که بر کیفیت محصول و زمان نهایی فرایند (پخت) تاثیر می گذارد [۲]. هدایت گرمایی لاستیک با افزایش مقدار پرکننده های رایج دوده و سیلیکا افزایش می یابد. علاوه بر این افزایش هدایت گرمایی لاستیک با مواد نوین نظیر گرافیت، گرافن، فیبرهای کربنی، نانوالماس، ذرات فلزی و اکسیدهای فلزی آدرس داده شده است [۳].

در مطالعه قبل افزایش هدایت گرمایی قطعه لاستیکی رویه تایر سواری به کمک ترکیبات حاوی آلومینا به عنوان یک راهکار مناسب برای کاهش زمان پخت و بهبود احتمالی کیفیت قطعه لاستیکی ارائه گردید [۴]. مشاهده شد با حضور این ترکیبات، ضریب نفوذ حرارتی لاستیک افزایش می یابد. اما این افزایش در کنار افت سرعت پخت به دلیل ماهیت اسیدی این ذرات اتفاق افتاد که کارایی این ذرات در کاهش زمان پخت قطعه لاستیکی را که برآیند رفتار سینتیکی و هدایت گرمایی است دچار شک می کند. همچنین استفاده از این مواد نسبتاً گرانبه در قسمت پر مصرفی مانند رویه تایر سواری هزینه زیادی را متوجه شرکت های تایر سازی می-کند.

فرایند پخت تایر از طریق حرارت دهی از دو منبع حرارتی سمت داخل و بیرون تایر خام انجام می شود. گرمای منبع حرارتی داخلی که شامل یک سیال داغ نظیر آب داغ، بخار اشباع یا فوق داغ آب و یا نیتروژن است از طریق یک قطعه لاستیکی خمره ای شکل موسوم به بلادر به داخل تایر منتقل می گردد. فرمول بندی بلادر شامل لاستیک بیوتیل با مقادیر جزئی لاستیک کلروپرن است که عمدتاً با استفاده از پرکننده دوده ای نوع کوره ای تقویت شده و به صورت رزینی با ابعاد مشخص در قالب های مخصوص پخت گردیده و در نهایت با قرارگیری در پرس پخت در فرایند تولید تایر با سایزهای مختلف استفاده می گردد. ضریب هدایت گرمایی بلادر نیز به عنوان یک قطعه لاستیکی پایین است. لذا چنانچه این ضریب افزایش یابد، می توان در جهت کاهش زمان پخت تایر اقدام موثری انجام داد. ضریب انتقال حرارت آمیزه بیوتیل با افزایش مقدار دوده های کوره ای تقویت کننده افزایش می یابد و

این دوده ها به طور گسترده در آمیزه بلادر بر پایه لاستیک بیوتیل استفاده می شوند [۵]. اما این افزایش محدود است. همچنین استفاده از دوده نوع استیلنی [۶] به جای نوع کوره ای و استفاده از مواد سرامیکی نظیر BaTiO_3 [۷] به عنوان راهکاری مناسب در جهت بهبود ضریب انتقال حرارت لاستیک بیوتیل در آمیزه بلادر آدرس داده شده است. در این پژوهش استفاده از ترکیبات حاوی آلومینا در افزایش هدایت گرمایی بلادر مطالعه شده است. همچنین یک مطالعه کلاسیک برای بررسی تاثیر افزایش این ضریب بر زمان پخت کلی تایر که به صورت ناهمدا انجام می شود انجام گردیده است. مطالعات رفتار پخت قطعه لاستیکی در شرایط ناهمدا به گستردگی مطالعات در اختیار در شرایط همدا نیست [۸-۱۴]. Wang و همکاران، درجه پیشرفت پخت یک قطعه لاستیک طبیعی را در شرایط ناهمدا به روش حل اجزای محدود مطالعه نموده اند [۸]. از سینتیک درجه اول برای مرحله پیشرفت و احتساب یک معادله نمایی مناسب برای مرحله پیش پخت استفاده گردید و از حل معادله انتقال حرارت حالت گذرا در حالت دو بعدی و تعیین شرایط مرزی مناسب، امکان تعیین تغییرات دمایی بر حسب زمان و درجه تبدیل ناهمدا فراهم شد. Ghoreyshi و همکاران از شبیه سازی رایانه ای با نرم افزار ABAQUS بر اساس مدل سینتیکی تجربی و بسط آن به چهارچوب توزیع دمای سه بعدی به کمک معادله انتقال حرارت حالت گذرا، برای تعیین توزیع دما و حالت پخت یک قطعه لاستیکی آلیاژ NR/BR پر شده با دوده استفاده نمودند [۹]. در مطالعه آنها ضریب هدایت گرمایی و ظرفیت گرمایی وابسته به دما و درجه پخت لحاظ گردید. Nozu و همکاران در مطالعه مشابه، سینتیک پخت ناهمدمای لاستیک SBR را در یک قالب استوانه ای شکل مطالعه نموده اند. معادله هدایت گرمایی در یک بعد در مختصات استوانه ای با احتساب عبارتی برای تولید گرمای واکنش پخت، با سینتیک پخت که به صورت ساز و کاری اظهار شده بود ترکیب و حل گردید [۱۰]. مطالعه مشابهی توسط Limrungruengrat و همکارانش انجام شده که از نرم افزار ABAQUS برای شبیه سازی توزیع دما و بدست آوردن درجه پخت در یک مکعب با ابعاد مشخص و شرایط مرزی ثابت استفاده نموده است [۱۱]. تعدادی محقق نیز توزیع دما و درجه پیشرفت واکنش نقاط مختلف یک تایر در شرایط واقعی پخت را به روش اجزای محدود شبیه سازی نموده اند [۱۲-۱۴]. در اکثر مطالعات سینتیک پخت ناهمدمای لاستیک از حل معادله هدایت گرمایی در شرایط گذرا برای بدست آوردن توزیع دما در قطعه لاستیکی و تعیین درجه پیشرفت در این تاریخچه دمایی استفاده شده است. در شرایط واقعی پخت تایر، از یک طرف هندسه

دستگاه رکوردر دما

۳-۲- فرمول و تهیه آمیزه

فرمول پایه مورد استفاده یک فرمول تجاری برای آمیزه بلادر است که شامل ۹۵ قسمت وزنی لاستیک بیوتیل، ۵ قسمت وزنی لاستیک کلرو پرن، ۶۰ قسمت وزنی دوده، ۶ قسمت وزنی روغن کرچک و مابقی عوامل پخت (اکسید روی، اسید استئاریک و رزین) می باشد. سیستم پخت این بلادر به صورت رزینی و با استفاده از رزین فنولیک انجام می شود. در این پژوهش اثرات افزایش ۱،۵ قسمت وزنی SP AL به این فرمول مطالعه شده است.

برای تهیه آمیزه ها طبق فرمول مشخص، آمیزه های ابتدایی (مستر) در غیاب شتابدهنده و گوگرد با افزودن محافظت کننده ها، پرکننده ها و روغن به کائوچو در مخلوط کن آزمایشگاهی ۲ لیتری مدل POMINI MIX32 ساخت کشور ایتالیا در شرایط یکسان و طبق دستورالعمل مشخص تهیه شده اند. آمیزه های حاصل در شرایط یکسان بر روی میل دو غلتکی ICCM E-R503X251 شرکت Bergamo ایتالیا، با افزودن عوامل پخت رزینی نهایی شده اند.

۴-۲- اندازه گیری خواص مکانیکی و ضریب نفوذ حرارتی آمیزه های لاستیکی

آمیزه ها در پرس پخت ۲۰ تنی برای بررسی خواص فیزیکی مکانیکی ولکانیده شده اند. خواص اندازه گیری شده که در این مطالعه ارائه شده است به شرح ذیل است: چگالی بر حسب g/cm^3 (اندازه گیری توسط چگالی سنج)، زمان پخت بهینه (Tp_{90}) بر حسب ثانیه، زمان ایمنی (SC_{02}) بر حسب ثانیه، گشتاور حداقل (ML)، حداکثر (MH) و اختلاف (DH) بر حسب $lb-in$ و سرعت پخت بر حسب $lb-in/min$ (اندازه گیری توسط رئومتر ODR شرکت آلفا در دمای ۱۸۵ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ min)، استحکام کششی (Tensile) و مدولوس ۱۰۰٪ (M_{100}) بر حسب MPa و ازدیاد طول تا نقطه پارگی (Elongation) بر حسب درصد (اندازه گیری توسط دستگاه کشش)، خواص کششی زمانمندی (aging) بعد از آون (شرایط زمانمندی ۷۲ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد)، مقاومت در برابر پارگی (Tear) بر حسب kN/m (اندازه گیری توسط دستگاه کشش طبق استاندارد ASTM D624)، سختی (Hardness) بر حسب Shore A (اندازه گیری توسط سختی سنج shore A طبق استاندارد ASTM D2240).

برای بررسی پخش ذرات پرکننده از دستگاه پخش سنج (Dispergrader) استفاده شده است. از نمونه لاستیکی پخت شده برش خورده با تیغ تیز استفاده شده است

پیچیده تایر و نیز شرایط پیچیده و متغیر مرزی که در عمل اتفاق می افتد و از طرف دیگر وابستگی دمایی و حالت پخت خواص حرارتی ماده نظیر هدایت گرمایی و ظرفیت گرمایی و نیز پیچیدگی سینتیک واکنش و در نهایت تعدد معادلات حاکم که باید همزمان حل شوند همگی باعث دشواری محاسبات و عدم اطمینان کامل از صحت توزیع دمای شبیه سازی شده برای نقاط مختلف داخل تایر می گردد، لذا برای اهداف این مطالعه، با استفاده از داده های واقعی در اختیار از آزمون سیم گذاری داخل تایر، ضمن تسهیل فرایند شبیه سازی در شرایط ناهمدمای تاثیر پرکننده آلومینا بر تغییرات دمایی نقاط مختلف تایر در حین فرایند پخت تایر مطالعه شده است.

۲- تجربی:

۱-۲- مواد

پودر حاوی آلومینا مورد استفاده که در این پژوهش SP AL نامیده می شود از مرکز تحقیقات آذرشهر) طرح تولید آلومینا از نفلین سینیت) تهیه شده و دارای چگالی پیکنومتری $3,28 gr/cm^3$ و $PH = 3,57$ می باشد و به روش پیرولیز پاششی با استفاده از پیش ماده سولفات آلومنیوم تولید گردیده است. سولفات آلومنیوم مورد استفاده از هیدروکسید آلومنیوم مستحصل از معادن نفلین سینیت شمال غرب ایران تولید گردیده است. بخش قابل توجه ای از این ماده سولفات آلومنیوم و مابقی اکسید آلومنیوم (آلومینا) می باشد. سایر مواد مورد استفاده در این مطالعه، شامل مواد معمول مورد استفاده در آمیزه بلادر است که شامل لاستیک بیوتیل، لاستیک کلروپرن، دوده، روغن کرچک، اسید استئاریک، اکسید روی و رزین فنولیک می باشد.

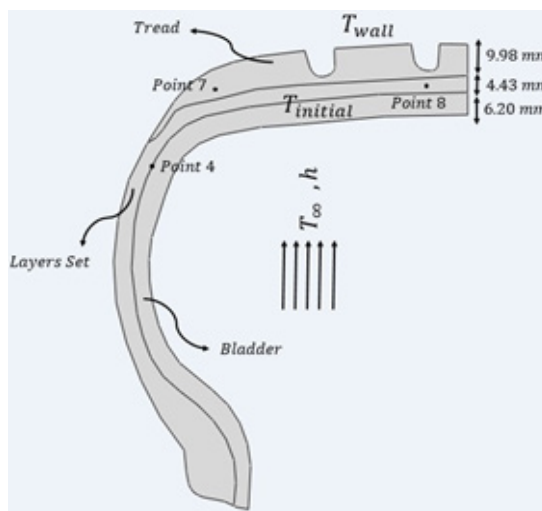
۲-۲- تجهیزات

مخلوط کن (بنبوری) آزمایشگاهی لاستیک دو لیتری مدل POMINI MIX32 ساخت کشور ایتالیا، میل دو غلتکی مدل ICCM E-R503X251 شرکت Bergamo ایتالیا، دستگاه پرس پخت ۲۰ تن مدل H.R.M.TP2 SD010 ساخت ژاپن، دستگاه کشش مدل 5-10K-S شرکت Hounsfield انگلیس، سختی سنج شور A مدل Zwick 3100 کشور آلمان، رئومتر ODR مدل 2000E شرکت Alpha، دستگاه سنجش جهندگی مدل Dunlop tripsometer، شرکت Wallace انگلیس، دستگاه اندازه گیری چگالی آمیزه لاستیکی Brabender Elatest کشور آلمان، دستگاه میکروسکوپ الکترونی FE-SEM مدل Hitachi S4160 (Cold Field Emission) کشور ژاپن، دستگاه میکروسکوپ نوری Dispergrader مدل Optigrade AB 1000NT حمام روغن.

آلومینا و در دو دمای حمام روغن °C ۱۵۰-۱۵۵ و °C ۱۶۰-۱۶۵ انجام شد. به عبارت دیگر ۴ داده برای ضریب نفوذ حرارتی برای آمیزه مرجع و ۴ داده برای ضریب نفوذ حرارتی آمیزه حاوی SP AL محاسبه و میانگین گیری شده است.

۲-۵- نحوه محاسبه تغییرات دمایی نواحی داخل تایر با تغییر ضریب نفوذ حرارتی بلادر
از شبیه سازی با نرم افزار ABAQUS برای تعیین تغییرات دمایی نقاط مختلف تایر در حین فرایند پخت

. امکان تصویر برداری از سطح نمونه بر حسب نوع پرکننده در چندین حالت وجود دارد، حالت E برای دوده درشت، حالت F برای دوده ریز، حالت G برای حالت دوده/سیلیکا و حالت J-histogram که در این حالت توزیع اندازه ذرات در تصویر نیز ارائه می گردد. در این مطالعه تصاویر اسکن دستگاه در حالت J-histogram ارائه شده است. همچنین پخش پرکننده توسط میکروسکوپ FE-SEM نیز مورد بررسی قرار گرفت. از روش ارائه شده در مقالات قبلی [۱۵،۴] برای تعیین ضریب نفوذ حرارتی فرمول های لاستیکی استفاده شد.



شکل ۱- هندسه مورد مطالعه برای شبیه سازی در نرم افزار ABAQUS
Fig. ۱: The geometry studied for simulation in ABAQUS software

تایر استفاده شده است. این شبیه سازی شامل حل معادله انتقال حرارت ذیل است [۱۶]:

$$(۱) \quad \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T + r \Delta H$$

که α در معادله فوق ضریب نفوذ حرارتی، ∇ لاپلاس تغییرات دما، ΔH گرمای واکنش و r سرعت انجام واکنش شیمیایی است. برای اهداف این پژوهش از ترم گرمای واکنش چشم پوشی شد. همچنین برای ساده تر شدن محاسبات ضریب نفوذ حرارتی برای اجزای تایر و بلادر به صورت ثابت در نظر گرفته شد.

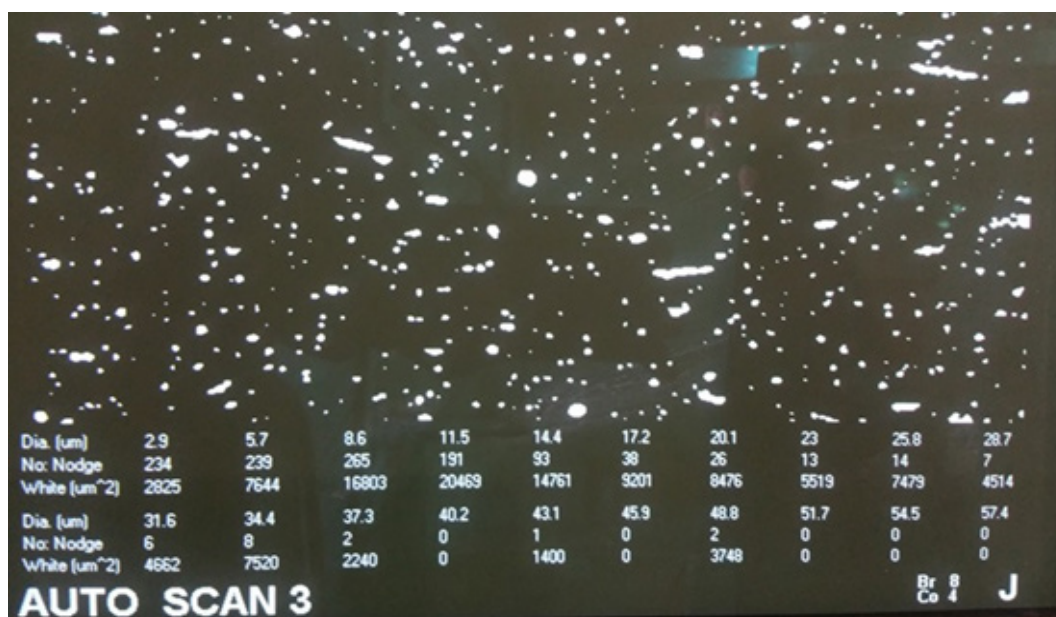
هندسه دو بعدی مورد استفاده در شکل ۱ ارائه شده است که شامل نیمرخ تایر سایز 195/60R15 KB33 می باشد. این هندسه از یک سمت در دمای ثابت °C ۱۸۷ و در سمت دیگر (سمت بلادر) در معرض بخار آب اشباع با فشار ۲۲ بار قرار دارد که شرایط مشابه با پخت واقعی این تایر می باشد.

برای ساده سازی محاسبات فرض شده که ناحیه مورد بررسی شامل سه آمیزه مختلف است. ناحیه رویه تایر به ضخامت ۹،۹۸mm که در تماس با دمای ثابت °C

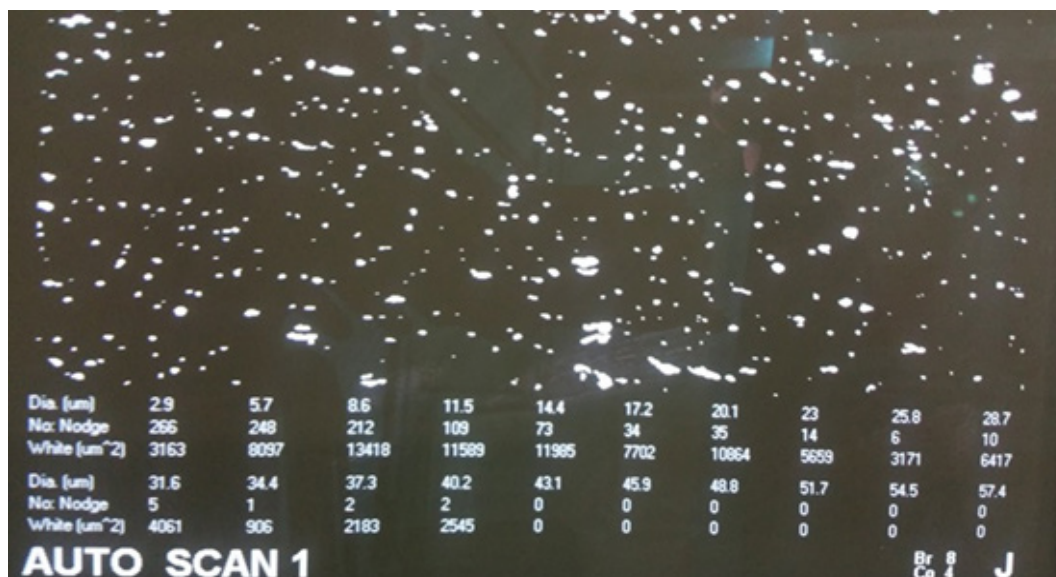
قطعه لاستیکی پخت شده مستطیل شکل به ابعاد ۵×۵×۲ cm حاوی سیم ترموکوپل در مرکز آن در حمام روغن غوطه ور و تغییرات دمایی بر حسب زمان ترسیم شد. سپس با استفاده از این داده های تجربی واقعی در کنار یک فرایند شبیه سازی انتقال حرارت گذرا برای هندسه فوق در نرم افزار ABAQUS در قالب حدس و خطا، مقادیر ضریب نفوذ حرارتی تعیین شد. برای انجام این کار معادله انتقال حرارت سه بعدی گذرا در مختصات کارتزین برای نقطه ای در مرکز نمونه مستطیل شکل به ابعاد ۵×۵×۲ cm با شبیه سازی رایانه ای در نرم افزار ABAQUS برای مقادیر مختلف ضریب نفوذ حرارتی لاستیک و شرایط مرزی حمام روغن حل شد. ضریب نفوذ حرارتی که تغییرات دما بر حسب زمان شبیه سازی شده نزدیک به داده های تجربی ارائه دهد به عنوان جواب در نظر گرفته شد. برای ساده شدن محاسبات در این پژوهش فرض شده ضریب نفوذ حرارتی، عدد ثابتی می باشد. برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج آزمون سیم گذاری و ثبت تغییرات دما در حمام روغن بر روی دو نمونه لاستیکی از فرمول مرجع و دو نمونه لاستیکی از فرمول حاوی

(۴)، مرکز رویه تایر (نقطه ۷) و داخل لایه و به فاصله ۲,۳ میلیمتر از بلادر (نقطه ۸) می باشند. با معلوم بودن این داده های دمایی، شبیه سازی در نرم افزار ABAQUS با مقادیر فرضی برای ضرایب انتقال حرارت بخار سمت بلادر به صورت حدس و خطا به گونه ای انجام شد که پروفایل های دمایی پیش بینی شده بر پروفایل دمایی تجربی تا حد امکان منطبق گردد. سپس در مرحله بعد با مشخص شدن

۱۸۷ است. ناحیه میانی شامل آمیزه لایه به ضخامت ۴,۴۳mm و ناحیه سمت بخار اشباع که همان آمیزه بلادر است و ضخامت ۶,۲mm برای آن در نظر گرفته شد. با عنایت به عدم امکان محاسبه دقیق ضرایب انتقال حرارت بخار اشباع داخل بلادر از داده های واقعی در اختیار از آزمون سیم گذاری و ثبت داده های دمایی برای سه نقطه مختلف تایر سائز فوق استفاده شد. این نقاط شامل نقطه ای در مرکز لایه و بلادر (نقطه



(الف)



(ب)

شکل ۲- تصاویر پخش پرکننده ها تهیه شده توسط پخش سنج در بستر لاستیک بیوتیل
(الف) آمیزه مرجع حاوی دوده (ب) آمیزه حاوی دوده و آلومینا

Fig. 3: Dispergrader filler dispersion images in butyl rubber matrix

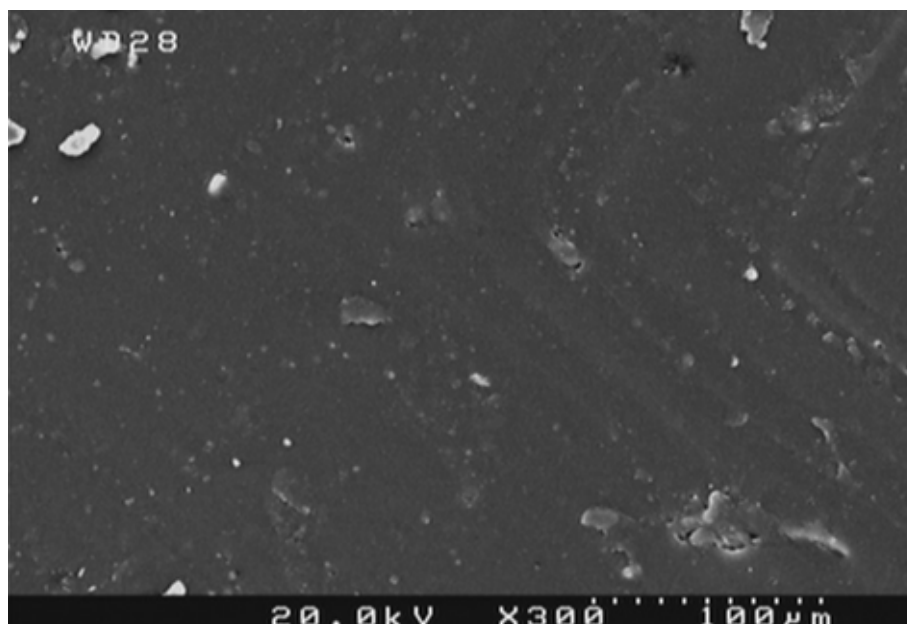
(a)The carbon black filled reference compound (b) the carbon black /SP AL filled compound

ضرایب انتقال حرارت بخار سمت بلادر، یکبار دیگر شبیه سازی با مقدار جدید ضریب نفوذ حرارتی برای بلادر (و عدم تغییر ضریب نفوذ حرارتی لایه و رویه) انجام و تغییرات دمایی سه نقطه مورد نظر (نقاط ۴، ۷ و ۸) شبیه سازی گردید. به این ترتیب تاثیر افزایش ضریب انتقال حرارت بلادر بر تغییرات دمایی نقاط مختلف مورد نظر داخل تاپر به خوبی مشخص و کمی

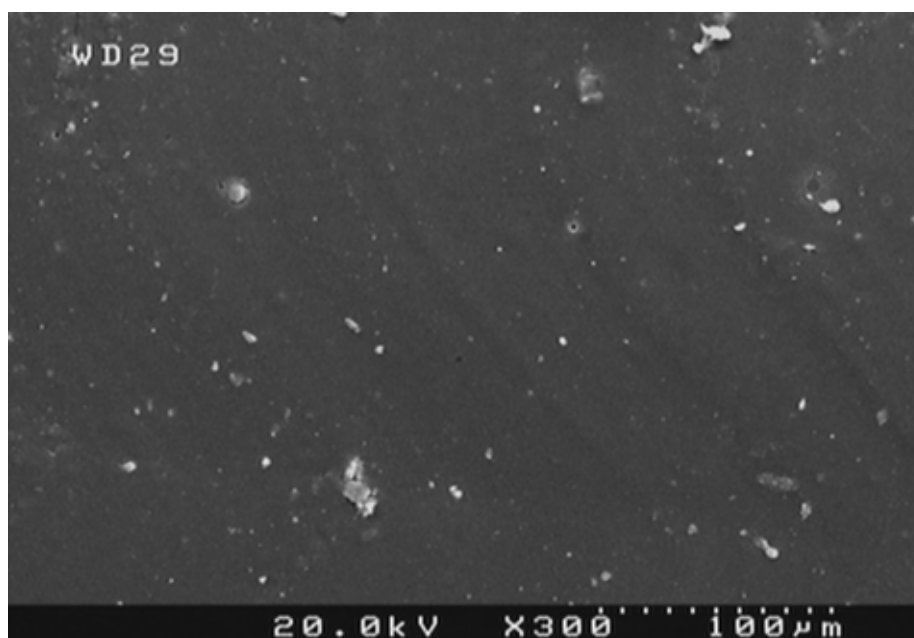
سازی شد.

۳- نتایج و بحث

در شکل ۲ نحوه پخش ذرات پرکننده در بستر لاستیک آمیزه بر پایه بیوتیل نمایش داده شده است که نشان می دهد آلیاژ دوده آلومینا از درجه پخش مناسبی برخوردار است. متاسفانه با استفاده از روش های



(الف)



(ب)

شکل ۳- تصاویر پخش پرکننده ها در بستر لاستیک بیوتیل گرفته شده توسط FESEM
(الف) آمیزه مرجع حاوی دوده (ب) آمیزه حاوی دوده و آلومینا

Fig. 3: FESEM filler dispersion images in butyl rubber matrix

(a)The carbon black filled reference compound (b) the carbon black /SP AL filled compound

برای هر آزمایش نیز در هر شکل به صورت منحنی ارائه شده است. مقادیر ضریب نفوذ حرارتی نزدیک به هم بوده و تکرار پذیری خوبی دارد. در شکل ۵ نتایج آزمون بر روی قطعه لاستیکی با فرمول حاوی SP AL آورده شده و مدل شبیه سازی با مقادیر بالاتر ضریب نفوذ حرارتی بدست آمده که تکرار پذیری خوبی نیز دارد. مقادیر متوسط این ضرایب نفوذ در جدول ۲ ارائه شده است. در همان جدول ۲ نتایج ضریب نفوذ حرارتی

جدول ۱- خواص مکانیکی، رئومتري و زمانمندی آمیزه مرجع و آمیزه حاوی پودر SP AL

Table 1. The mechanical, rheometry and aging properties of reference compound and SP AL filled compound

	Reference	SP AL
Density(cured)	1.134	1.138
Tensile(MPa)	10.2	10.1
Elongation	193.05	187.9
M100(MPa)	5.40	5.50
Tear(kN/m)	16.6	17.20
aged Tensile	9.89	9.36
aged Elongation	175.9	182.40
K	0.89	0.89
Hardness(Shore A)	74	74
ML(lbf-in)	5.22	5.21
MH(lbf-in)	38.02	36.9
DH(lbf-in)	32.89	31.69
SC02(s)	63	52
TP90(s)	180	149

آمیزه رویه تایر و لایه نیز ارائه شده که به همان روش قبل محاسبه شده اند و در مرحله شبیه سازی تغییرات دمایی داخل تایر مورد استفاده قرار گرفته اند.

مطابق نتایج جدول ۲، افزایش ۱.۵ phr پودر SP AL تاثیر افزایشی بر ضریب نفوذ حرارتی آمیزه بلادر نشان داده و بزرگی آن را از حدود 1×10^{-7} m/s برای آمیزه مرجع به حدود 3×10^{-7} m/s برای آمیزه حاوی آلیاژ دوده و SP AL رسانیده که نتیجه مطلوبی می باشد. ساز و کار این بهبود در مقاله قبلی مورد بحث قرار داده شده است [۱۵]، به نظر می رسد ذرات آلومینا پدیده انتقال فنون در بستر پلیمر را که ساز و کار اصلی شناخته شده در انتقال حرارت پلیمرهاست ارتقا بخشیده اند.

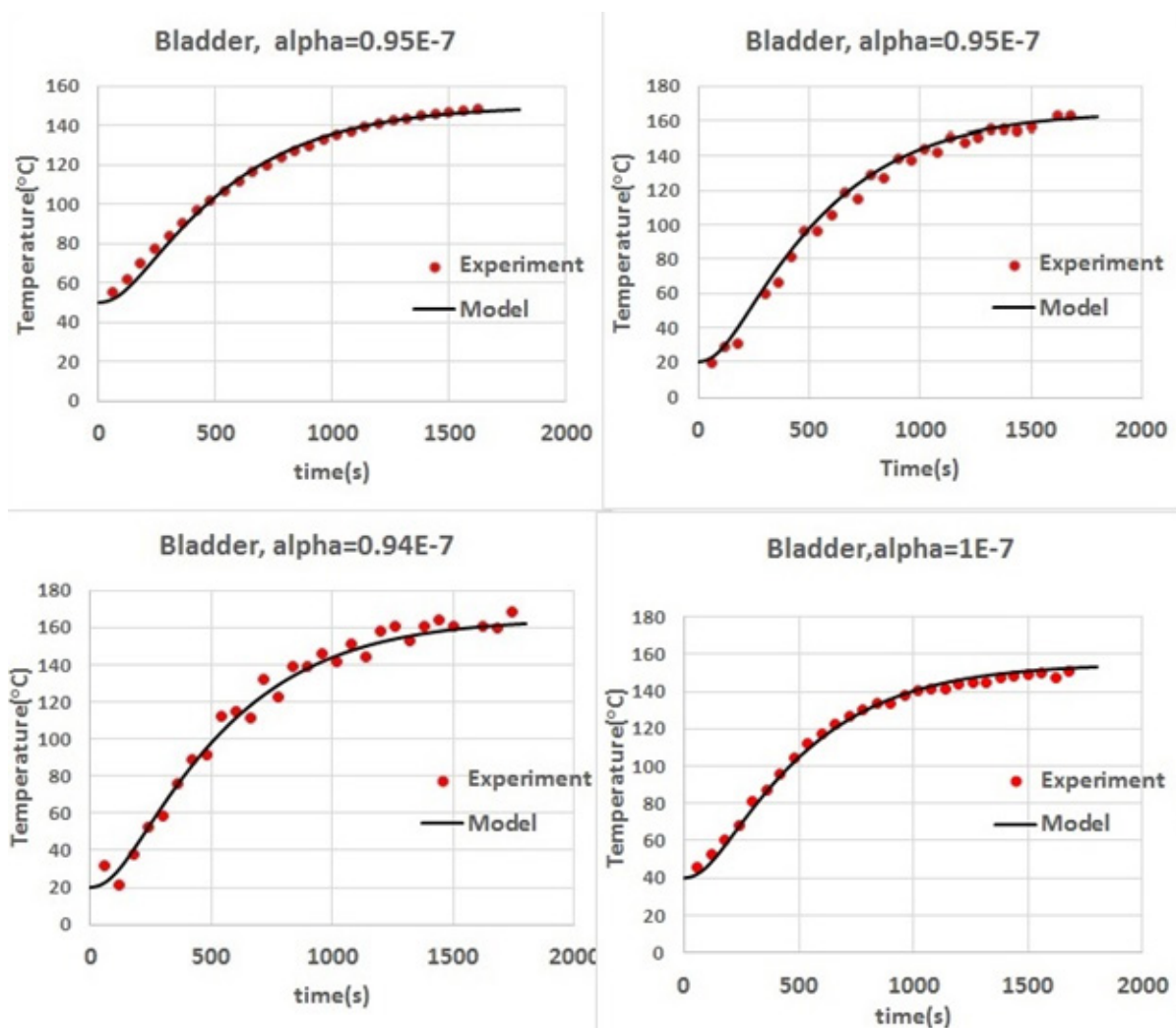
حال این سوال مهم مطرح می شود که این افزایش تا چه اندازه می تواند در کاهش زمان پخت قطعه لاستیکی منجمله تایر در شرایط واقعی پخت تاثیر داشته باشد. به عنوان دیگر مطابق نتایج جدول ۲

میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی و روبشی امکان متمایز ساختن وضعیت پخش دوده و آلومینا در بستر لاستیک به دشواری وجود دارد. اما از وضعیت پخش پرکننده ها در دو تصویر الف) پخش دوده به تنهایی و ب) پخش دوده و آلومینا می توان استنباط نمود که ذرات آلومینا نیز از وضعیت پخش خوبی در بستر لاستیک بیوتیل برخوردارند. برای تکمیل این بخش تصاویر FESEM نیز در شکل ۳ آمده است که

به زحمت پخش پرکننده در بستر لاستیک را به تصویر می کشد.

جدول ۱ نتایج خواص مکانیکی و زمان مندی آمیزه های لاستیکی را نشان می دهد. مشاهده می شود ورود ۱.۵ قسمت وزنی SP AL به فرمول تغییر محسوسی در خواص مکانیکی و زمان مندی آمیزه لاستیکی ایجاد نمی کند. نتایج رئومتري جدول ۱ نشان می دهد زمان پخت بلادر با حضور ذرات آلومینا افزایش می یابد که حاکی از آن است که ذرات آلومینا تاثیر منفی بر خواص پخت لاستیک دارند که باید در فرایند پخت بلادر مورد توجه قرار بگیرد.

شکل ۴ تغییرات دمایی مرکز قطعه مستطیل شکل تهیه شده با فرمول مرجع (آمیزه بیوتیل دوده ای) برای دو نمونه که هر کدام در دو دمای 150°C و 165°C در حمام روغن غوطه ور شده اند را نشان می دهد. نتایج شبیه سازی تغییرات دمایی مرکز این قطعه در نرم افزار ABAQUS و ضریب نفوذ حرارتی بدست آمده



شکل ۴- تغییرات دمایی نقطه مرکزی نمونه مستطیل شکل (ساخته شده با آمیزه بلادر) غوطه ور در حمام روغن و مدل شبیه ساز در نرم افزار ABAQUS بر اساس ضریب نفوذ حرارتی (چهار تکرار مختلف)

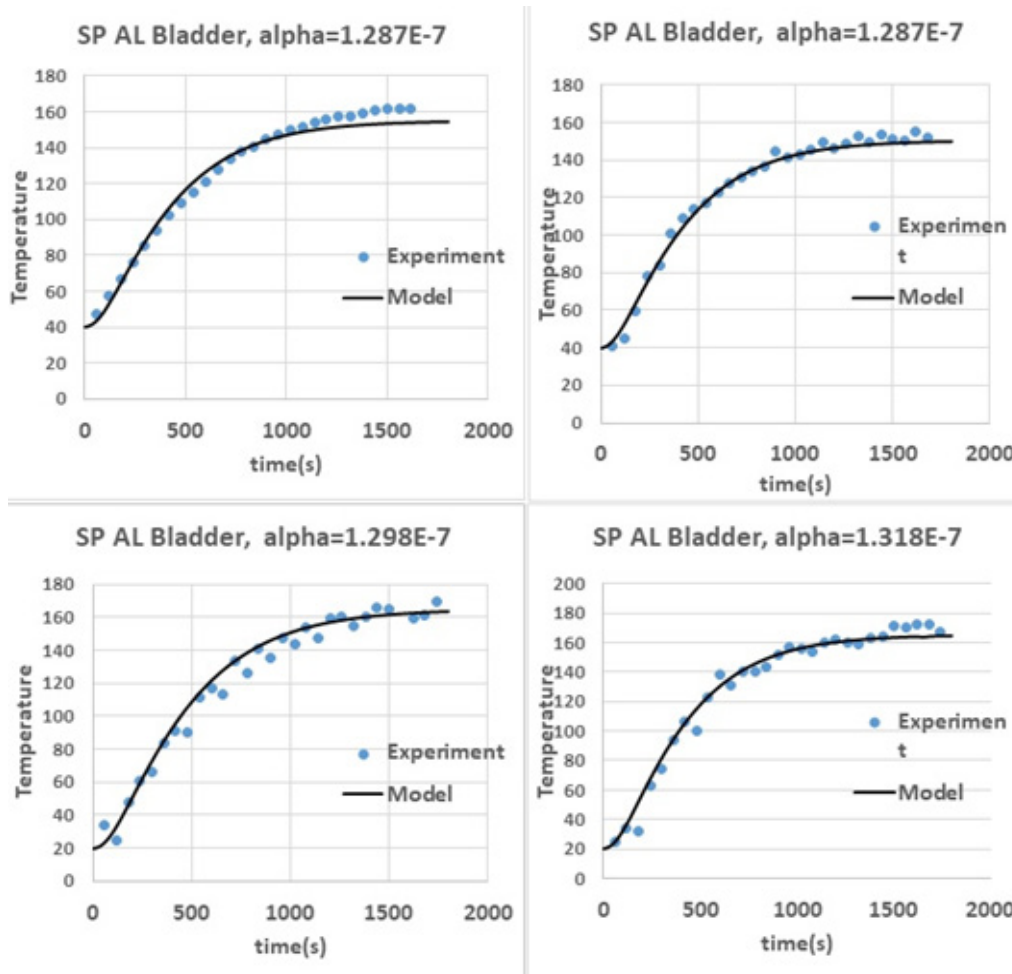
Fig. 4: Central point temperature variations of rectangular immersion sample (made of bladder compound) in oil bath and simulator model in ABAQUS software based on thermal diffusion coefficient (four different iterations)

دمایی تمامی نقاط نیمرخ تایر در زمان های مختلف پخت برای آمیزه مرجع بلادر نشان داده شده است. نتایج شکل های ۶ تا ۸ نشان می دهد دمای نقاط مورد مطالعه با افزایش ضریب نفوذ حرارتی آمیزه بلادر نظیر به نظیر افزایش می یابد. این در حالیست که طبق شکل ۱ سه نقطه ۴، ۷ و ۸ مورد مطالعه در این پژوهش از منبع حرارتی بخار آب سمت بلادر فاصله دارند اما شبیه سازی انجام شده نشان می دهد با افزایش ۳۰٪ در ضریب نفوذ حرارتی آمیزه بلادر می توان تغییرات دمایی این نقاط را متاثر نمود. با عنایت به اینکه واکنش پخت گوگردی لاستیک هم در مرحله شروع و هم در مرحله پیشرفت از انرژی فعالیت بالایی برخوردارست لذا به تغییرات دما حساسیت زیادی داشته و انتظار می رود تغییرات محسوس دمایی قادر به افزایش سرعت این واکنش ها باشند. به هر حال می توان استنباط نمود افزودن ۳۰٪ در ضریب نفوذ

افزایش تا حدود $0.3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ در ضریب نفوذ حرارتی آمیزه بلادر تا چه اندازه می تواند پروفایل دمایی نقاط مختلف تایر را متاثر سازد.

در شکل های ۶ تا ۸ نتایج داده های سیم گذاری در سه نقطه مختلف تایر رادیال (نقاط ۴، ۷ و ۸)، در کنار نتایج شبیه سازی در نرم افزار ABAQUS برای هندسه شکل ۱ آمده است.

همانطور که توضیح داده شد با استفاده از رویکرد حدس و خطا، شرایط مرزی بخار سمت بلادر برای مقادیر مشخص ضریب نفوذ حرارتی (بلادر، لایه و ترد) آنقدر تغییر داده شد تا پیش بینی مدل تا حد امکان به داده های تجربی نزدیک گردد (خطوط در شکل های ۶-۸). سپس در مرحله بعد با شرایط مرزی مشخص، تاثیر افزایش ضریب نفوذ حرارتی بلادر به مقدار ۳۰٪ بر تغییرات دمایی سه نقطه فوق شبیه سازی گردیده است (خطوط نقطه چین). در شکل ۹ نیز تغییرات



شکل ۵- تغییرات دمایی نقطه مرکزی نمونه مستطیل شکل (آمیزه بلادر حاوی پرکننده هادی (SP AL)، غوطه ور در حمام روغن و مدل شبیه ساز در نرم افزار ABAQUS بر اساس ضریب نفوذ حرارتی) (چهار تکرار مختلف)

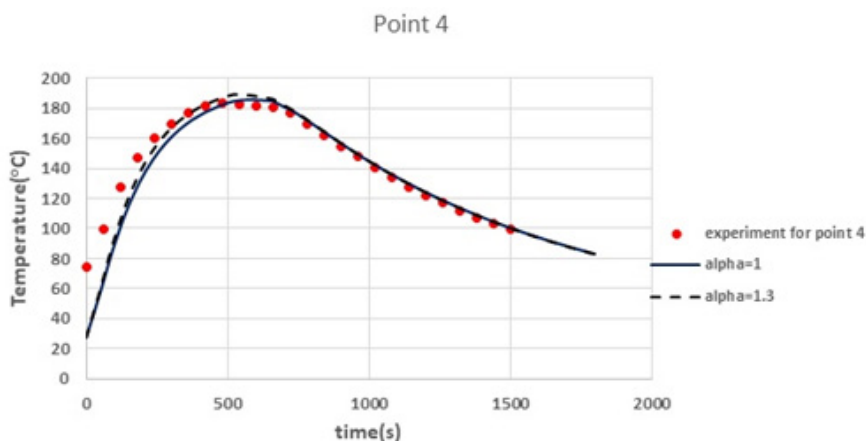
Fig. 5: Central point temperature variations of rectangular immersion sample (made of bladder compound with SP AL heat conductive filler) in oil bath and simulator model in ABAQUS software based on thermal diffusion coefficient (four different iterations)

حرارتی آمیزه بلادر پتانسیل مناسبی برای کاهش زمان پخت تایر فراهم آورده باشد. لازم به ذکر است که با استفاده از این داده های دما-زمان جدید و در قالب یک مطالعه سینتیک پخت ناهمدما می توان وضعیت پخت نواحی مختلف را در شرایط جدید پیش بینی نمود.

جدول ۲- ضرایب نفوذ حرارتی آمیزه های بلادر پخت (مرجع و حاوی SP AL) و لایه و رویه تایر سواری

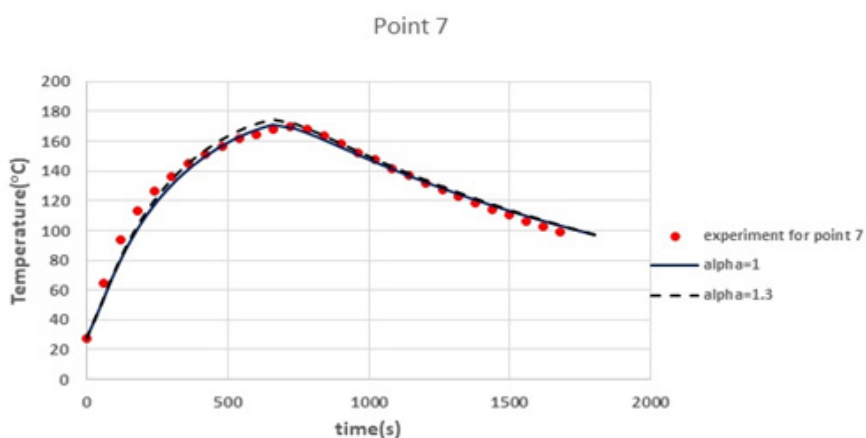
Table 2: The heat diffusivity coefficients of curing bladder (reference and SP AL filled), tread and layer tyre compounds

compound	$\alpha \times 10^7$ (m ² /s)
Layer of tyre compound	1.34
Tread of tyre compound	1.66
Reference bladder compound	1.00
SP AL filled bladder compound	1.30



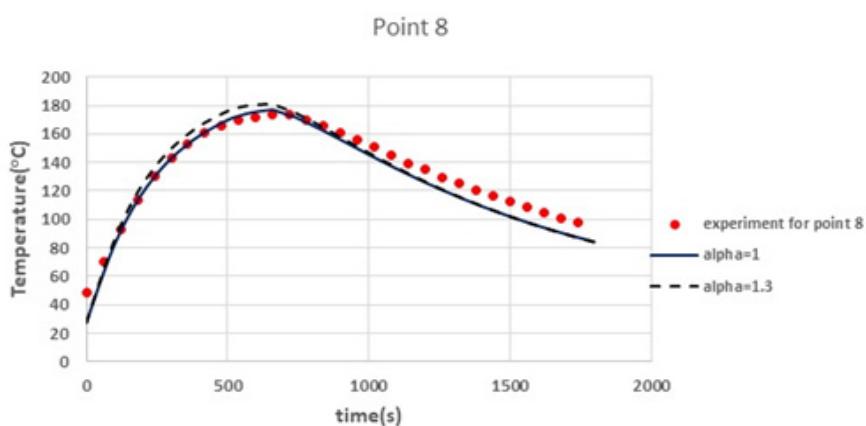
شکل ۶- تغییرات دمایی نقطه ای داخل تایر (مرز بلادر و لایه) در شرایط واقعی پخت بدست آمده از سیم گذاری و ثبت پروفایل دمایی (نقاط)، و شبیه سازی با مقادیر مختلف ضریب نفوذ حرارتی بلادر - خط $\alpha=1 \times 10^{-7}$ و نقطه چین $\alpha=1,3 \times 10^{-7}$

Fig. 6: The temperature variation of a point inside of tyre (bladder and layer boundary) at real conditions obtained from thermocouple and temperature recording (points) and simulated results with $\alpha=1 \times 10^{-7}$ (bold line) and $\alpha=1,3 \times 10^{-7}$ (dash line)



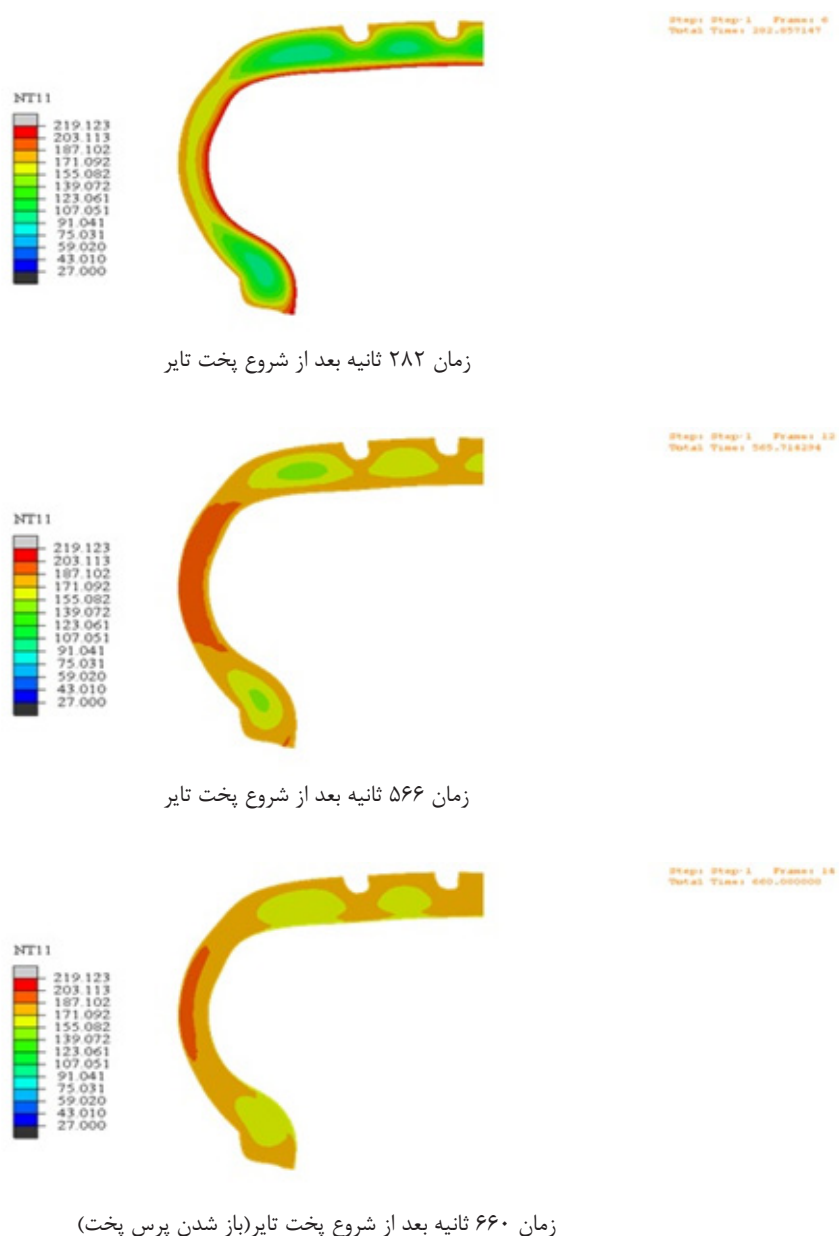
شکل ۷- تغییرات دمایی نقطه ای داخل تایر (مرکز رویه) در شرایط واقعی پخت بدست آمده از سیم گذاری و ثبت پروفایل دمایی (نقاط)، و شبیه سازی با مقادیر مختلف ضریب نفوذ حرارتی بلادر - خط $\alpha=1 \times 10^{-7}$ و نقطه چین $\alpha=1,3 \times 10^{-7}$

Fig. 7: The temperature variation of a point inside of tyre (tread center) at real conditions obtained from thermocouple and temperature recording (points) and simulated results with $\alpha=1 \times 10^{-7}$ (bold line) and $\alpha=1,3 \times 10^{-7}$ (dash line)



شکل ۸- تغییرات دمایی نقطه ای داخل تایر (داخل لایه) در شرایط واقعی پخت بدست آمده از سیم گذاری و ثبت پروفایل دمایی (نقاط)، و شبیه سازی با مقادیر مختلف ضریب نفوذ حرارتی بلادر (خط $\alpha=1 \times 10^{-7}$ و نقطه چین $\alpha=1,3 \times 10^{-7}$)

Fig. 8: The temperature variation of a point inside of tyre (tyre layer) at real conditions obtained from thermocouple and temperature recording (points) and simulated results with $\alpha=1 \times 10^{-7}$ (bold line) and $\alpha=1,3 \times 10^{-7}$ (dash line)



شکل ۹- تغییرات دمایی شبیه سازی شده نیمرخ تایر با گذشت زمان
Fig. 9: Simulated temperature variations of the tyre profile over time

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از مدیریت محترم عامل شرکت کویر تایر جهت حمایت از فعالیت های پژوهشی نهایت تشکر و امتنان را دارند.

-نتیجه گیری

در این مقاله رویکرد افزایش هدایت گرمایی آمیزه بلادر که نقش حد واسط در انتقال حرارت به تایر در فرایند پخت را بازی می کند مورد مطالعه قرار داده شد. افزایش جزئی ماده هادی و فوق سبک آلومینا توانایی افزایش این ضریب را داشته و به یاری شبیه سازی کامپیوتری نشان داده شد که این افزایش در ضریب، توانایی افزایش نقاط مختلف تایر در فرایند پخت را داراست که می تواند برای اهداف کاهش زمان پخت تایر مناسب باشد.

مراجع

- [1] Yao W., Jia Y. and Wang X., Kinetic Modelling and Finite Element Simulation of Natural Rubber Non-Isothermal Vulcanization, *Adv. Mater. Res.*, 2011 ,653-649 ,306.
- [2] Isayev A.I. and Deng J.S., Nonisothermal Vulcanization of Rubber Compounds, *Rubber Chem. Technol.*, 1988 ,361-340 ,61.
- [3] Guo B., Tang Z., and Zhang L., Transport Performance in Novel Elastomer Nanocomposites: Mechanism, Design and Control, *Prog. Polym. Sci.*, 2016 ,66-29 ,61.
- [4] Shiva M., Akhtari S. and Shayesteh M., Aluminum Compounds Prepared with Spray Pyrolysis in Tyre Compounds Formulations: Mechanical and Heat Conductivity Behavior of Tyre Tread, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, -43 ,32 2019 ,53.
- [5] Gwaily S. E., Attia G., Nasr G. M. and Hassan H. H., On the Thermal Properties of HAF Black-Loaded Butyl Rubber vulcanizates, *J. Polym. Mater.* 1993 ,225-221 ,10.
- [6] Charles, E., Improving Thermal Conductivity and Service Life in Bladder Compounds, *J. Rubber World*, 2005 ,238-232.
- [7] Gwaily S. E., Nasr G. M., Badawy M. M., Hasan H. H., Thermal Properties of Ceramic – Loaded Conductive Butyl Rubber Composites, *Polym. Degrad. Stabil*, 1995 ,395-391 ,47.
- [8] Wang D.-h., Dong Q. and Jia Y.-x., Mathematical Modelling and Numerical Simulation of the Non-Isothermal In-mold Vulcanization of Natural Rubber, *Chinese J. Polym. Sci.*, 2015 ,403-395 ,(3)33.
- [9] Ghoreyshi M. H. R., Rafei M., Naderi G., Optimization of Vulcanization Process of a Thick Rubber Article Using an Advanced Computer Simulation Technique, *Rubber Chem. Technol.*, 2012 ,589-576 ,(4)85.
- [10] Nozu Sh., Tsuji H., Itadani M., Fujiwara W., Ohnishi K., Study of Cure Process of Thick Solid Rubber, *J. Mater. Process. Technol.*, ,201 2008 ,724-720.
- [11] Limrungruengrat S., Chaikittiratana A., Pornpeerakeat S. and Chantrasm T., Finite Element Analysis for Evaluation of Cure Level in a Large Rubber Part, *Mater. Today: Proceedings*, 2018 ,9343-9336 ,5.
- [12] Su B., Wu J., Cui Z., Wang Y., Modeling of Truck Tire Curing Process by an Experimental and Numerical Method, *Iran Polym. J.*, ,(7)24 2015 ,593-583.
- [13] Prentice G. A. and Williams M. C., Numerical Evaluation of the State of Cure in a Vulcanizing Rubber Article, *Rubber Chem. Technol.* 1980 ,1031-1023 ,(5)53.
- [14] Toth W. J., Chang J. P., Zanichelli C., Finite Element Evaluation of the State of Cure in a Tire, *Tire Sci. Tech.* 212,1991-178 ,(4) 19.
- [15] Shiva M., Akhtari S. S., Soleymani A., Lakhi M., Determination of Heat Diffusivity and Thermal Conductivity of Filled Rubber Composite, 16th Chemical Engineering Congress, Amir Kabir University, Tehran, Iran, 4-2 Bahman 97.
- [16] Ghoreyshi M. H. R., Naderi G. H., The Three Dimensional Simulation and Development of a Computer Software for Rubber Curing Process by Finite Element Method, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, 2004 ,28-21 ,(1)17.