

## تحلیل گرمایی تایر

علی رضوانی<sup>\*</sup>، قدرت ا... کرمی<sup>\*\*</sup> و محمود یعقوبی<sup>\*\*</sup>  
بخش مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز

(دریافت مقاله: ۷۷/۵/۱۲ - دریافت نسخه نهایی ۷۹/۱۰/۳)

چکیده - مهمترین عامل تهدیدکننده آمیزه‌های لاستیکی به کار رفته در تایر، گرماست. گرما موجب تخریب خواص فیزیکی و ساختمان شیمیایی آمیزه‌ها شده و دوام و پایداریشان را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. تولید گرما در تایر، عمدتاً در نتیجه تغییر شکل‌های ویسکوالاستیکی<sup>۱</sup> تایر و اصطکاک داخلی آن در طی حرکت غلتشی در جاده، صورت می‌پذیرد. علاوه بر آن، بخشی از گرمای تولید شده، در نتیجه اصطکاک لغزشی تایر با جاده نیز به سطح خارجی تایر منتقل می‌شود. پیش‌بینی توان تلف شده و میزان گرمایی<sup>۲</sup> و افزایش دمای ناشی از آن، در بخش‌های مختلف تایر می‌تواند در فرایند تحلیل و طراحی تایر برای شناسایی نواحی آسیب‌پذیر و اصلاح و بهبود ساختمان داخلی تایر مورد استفاده قرار گیرد.

در پژوهش حاضر، ابتدا داده‌های مورد نیاز تحلیل گرمایی شامل قابلیت هدایت گرمایی آمیزه‌های لاستیکی تایر، مؤلفه‌های نیروی مقاومت غلتشی<sup>۳</sup> و میزان گرمایی ناشی از آنها تعیین شده، سپس رفتار ترمومکانیکی تایر در حرکت بر سطح جاده به عنوان یک فرایند بازگشت ناپذیر ترمومکانیکی، در حالت یکنواخت، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. نهایتاً با نوشتن یک برنامه رایانه‌ای اجزای محدود، مقطع عرضی یک تایر با یاس<sup>۴</sup> سواری در حال حرکت، شبیه‌سازی شده و توزیع دما در بخش‌های مختلف آن برآورد شده است. نتایج حاصل از پیش‌بینی رفتار تایر در شرایط کاری مختلف نشان می‌دهد که اجزای تاج<sup>۵</sup> و کرکس<sup>۶</sup> در مجاور ناحیه شانه، به خصوص در سرعت‌های زیاد و تحت بارهای سنگین با بیشترین افزایش دما مواجه می‌شوند.

واژگان کلیدی: گرمایی، لاستیک، غلتش، طراحی، اجزای محدود، تغییر شکل الاستیک

## Thermal Analysis of Tire

A. Rezvani, G. Karami, and M. Yaghoubi

Department of Mechanical Engineering, Shiraz University

**ABSTRACT-** One of the great enemies of rubber compounds is heat. Heat will cause chemical and physical degradation of vulcanized rubber as well as a considerable loss in its strength. A major source of heat generation in a tire is due to internal friction resulting from the viscoelastic deformation of the tire as it rolls along the road. Another source of heat generation in a tire is due to its contact friction with the road. Prediction of the temperature rise at different parts of the tire will help to detect the behavior of the tire as regards its strength and its failure.

\*\* - استاد

\* - کارشناسی ارشد

*In the present work, initially the data required for the thermal analysis of the tire are determined which include: the thermal conductivity of rubber compounds, the tire rolling resistance and its heat build-up rate. The thermomechanical analysis of a typical tire then follows based on the thermodynamics of an irreversible process. The mechanical dissipatives, i.e. the hysteresis losses are assumed to be the major source of heat in the mathematical formulation.*

*A finite element code is developed for two-dimensional heat transfer analysis of the tire. The results obtained show that the highest temperature rise will occur on the carcass-tread interface in a tire specially at heavy loading and under high speed conditions.*

**Keywords:** Heat Generation, Rubber, Contact Friction, Design, Finite Element, Viscoelastic Deformation

## ۱- مقدمه

تماس تایر با جاده و تحمل فشار ناشی از بارهای استاتیکی و دینامیکی در طی حرکت غلتشی، آمیزه‌های لاستیکی تایر را در معرض فشرده شدن، کشش و پیچش پی در پی قرار می‌دهد. مجموعه این تغییرشکل‌های ویسکوالاستیکی منجر به اصطکاک بین مولکول‌های ماده و به وجود آمدن تلفات پسماند مکانیکی<sup>۷</sup> در آمیزه‌ها و ترکیب‌های لاستیکی تایر می‌شود. این تلفات علاوه بر آنکه به عنوان یک نیروی مقاوم در برابر حرکت غلتشی بخشی از توان مکانیکی منتقل شده از رینگ به تایر را به هدر می‌دهد، موجب تولید گرما در داخل آن شده و آشکارا دمای بخش‌های مختلف تایر را افزایش می‌دهد. در صورتی که گرمای تولید شده کنترل و به نحو مناسبی دفع نشود، تخریب خواص فیزیکی و ساختمان شیمیایی، کاهش کیفیت جدا شدن لایه‌ها (دو پوسته شدن)، جدا شدن نخ از آمیزه لاستیکی و نهایتاً سوختن آنها را در پی خواهد داشت. گرمایی که بدین ترتیب در داخل تایر تولید می‌شود و همچنین گرمای تولید شده در اثر اصطکاک لغزشی تایر با سطح جاده، بخش‌های مختلف تایر را که در ابتدا حرکت در تعادل دمایی با محیط هستند، به تدریج با افزایش دما مواجه می‌کند. متناسب با شرایط کاری، پس از طی مسافتی، افزایش دما در تایر متوقف شده و دمای تایر در حالت پایدار<sup>۸</sup> نزدیک می‌شود. در این حالت تمام گرمای تولید شده در درون تایر و در سطح تماس با جاده، از طریق هدایت، جابه جایی و تابش به سطح جاده، رینگ و محیط پیرامون تایر منتقل می‌شود

میزان اتلاف انرژی و گرمای ناشی از آن به ساختمان داخلی تایر و مشخصات فیزیکی آمیزه‌های لاستیکی به کار رفته

در آن، بارهای اعمال شده به تایر، سرعت و جهت حرکت، فشار باد<sup>۹</sup> تایر و همچنین شرایط محیط و بافت جاده بستگی دارد. طبعاً تایرهایی که در معرض بار بیشتر قرار داشته و با سرعت زیاد حرکت می‌کنند، با تولید گرمای بیشتری نیز مواجه‌اند. همچنین آمیزه‌های لاستیکی با پسماند گرمایی بالا، نسبت به آمیزه‌های لاستیکی با پسماند گرمایی پایین، گرم‌زایی بیشتری را از خود نشان می‌دهند و به همان نسبت، مسئله سایش، آسیب پذیر شدن در برابر ضربات و شوک‌های وارده از سطح جاده، کاهش استحکام و تخریب در آنها سریعتر اتفاق می‌افتد.

لزوم صرفه‌جویی در مصرف سوخت و جلوگیری از آلودگی‌های زیست محیطی همراه با تلاش برای ساخت تایرهایی با دوام و پایداری بیشتر، انگیزه‌های اصلی تحقیقات مرتبط با تحلیل گرمایی در سال‌های اخیر بوده است. هر چند دیدگاه هر کدام از این تحقیقات متفاوت است، اما هدف نهایی تمام آنها رسیدن به یک پیش بینی قرین واقعیت از توزیع دما در نقاط مختلف تایر در سرویس و استفاده از نتایج آن در سیکل تحلیل و طراحی تایر بوده است.

دوج و کلارک [۱] با استفاده از یک مدل ویسکوالاستیک خطی ساده افت انرژی و گرمایی در هر سیکل حرکتی یک تایر هواپیما را مورد بررسی قرار داده و توزیع دما در مقاطع مختلف آن را پیش بینی کرده‌اند. چک رپورتی و ماکرجی [۲] قطعاتی از بخش‌های تاج و شان تایر پخته را در سه جهت مختلف برش داده و آنها را در فلکس میتر گودریچ<sup>۱۰</sup> در معرض تنش‌های فشاری متناوب قرار داده‌اند. آنها ضمن تعیین افزایش دمای نقاط مختلف، ضعیف‌ترین ناحیه را که با حداکثر افزایش

دما و تنش گرمایی مواجه می‌شود، در شرایط مختلف شناسایی کرده‌اند. یآوری و همکارانش [۳] رفتار ترمومکانیکی تایرهای سواری را تحلیل کردند. آنها با صرف نظر کردن از تماس اصطکاک تایر با جاده آن را در معرض بارهای مختلف شبیه سازی کرده و ضمن بررسی اتلاف انرژی و گرمایی در آن، افزایش دما را در نقاط مختلف یک تایر در سرویس برای یک شرایط خاص پیش بینی کرده‌اند. در همین زمینه در سالهای اخیر نیز می‌توان به کار فوجی کاوا و همکارانش [۴] اشاره کرد که ضمن تعیین سطح تماس واقعی تایر با جاده، نقاط تماس را به عنوان چشمه‌های گرمایی متحرک<sup>۱۱</sup> شبیه سازی کرده و توزیع دما را برای سطح یک تایر در معرض اصطکاک لغزشی برآورد کرده‌اند.

## ۲- معرفی تایر مورد آزمایش و فرضیات انجام شده

در شکل (۱) برش عرضی تایر سواری بایاس، اندازه ۱۳-۵۶۰ محصول کارخانه دنا که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته، نشان داده شده است. اجزای اصلی تشکیل دهنده این تایر عبارت‌اند از: تاج، دیواره جانبی<sup>۱۲</sup>، کرکس یا استخوان بندی تایر که خود از لایه‌های بالایی<sup>۱۳</sup> و پایینی<sup>۱۴</sup> تشکیل شده، طوقه فلزی<sup>۱۵</sup> و فیلر<sup>۱۶</sup>. نتایج ارائه شده در این مقاله، حاصل اندازه گیریها، آزمایشها و محاسبات انجام شده بر روی این تایر در شرایط کاری مختلف است.

طیف گسترده استفاده از مواد شیمیایی در آمیزه‌های لاستیکی که به خصوص در ترکیب با بافته‌های نخ، خصوصیات گرمایی پیچیده‌ای را از خود نشان می‌دهند از یکسو و دخالت پارامترهای مختلف در مسئله تماس و اصطکاک تایر با سطح جاده، تحمل فشار ناشی از بارهای اعمال شده، تغییر شکل و خمشهای پی در پی، اصطکاک داخلی و گرمایی از سوی دیگر، بررسی رفتار ترمومکانیکی تایر را بسیار پیچیده و مشکل کرده است. لذا در این پژوهش، ناگزیر به اعمال یک سری فرضهای منطقی و قابل قبول برای مدلسازی

تایر در تحلیل گرمایی شده‌ایم تا سیستم معادله‌های پیچیده را به یک سیستم قابل حل تبدیل کند. این فرضها عبارت‌اند از  
 ۱- گرمای تولید شده در نتیجه تغییر شکل‌های ویسکوالاستیکی و اصطکاک داخلی به صورت چشمه‌های گرمایی با توزیع یکنواخت در نقاط مختلف تایر در نظر گرفته شده است.  
 ۲- در تحلیل گرمایی یک شکل هندسی خاص با شرایط مرزی ثابت و پایدار مورد بررسی قرار گرفته است.  
 ۳- از گرادیان دما در محیط دایره تایر و همچنین از انتقال گرمای تابشی در سطح خارجی آن صرف نظر شده است.

## ۳- معادله حاکم در تحلیل گرمایی تایر

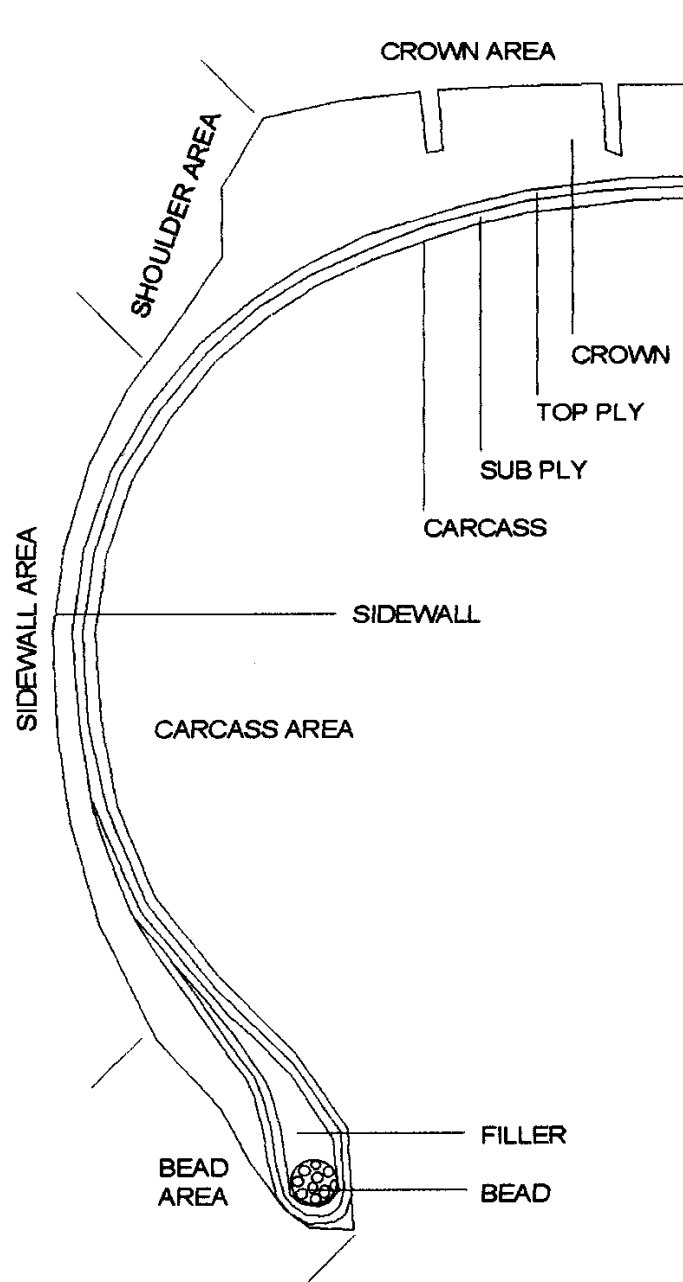
در این پژوهش، تحلیل گرمایی تایر در سرویس، در حالت پایدار و به صورت دوبعدی بررسی می‌شود. با توجه به اینکه قابلیت هدایت گرمایی اجزای مختلف تایر تابع دماست، شکل کلی معادله حاکم به صورت زیر خواهد بود

$$\frac{\partial}{\partial X} \left( K_{(T)} \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( K_{(T)} \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \dot{q} = 0 \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $T$ ،  $\dot{q}$  و  $K_{(T)}$  به ترتیب معرف دما، گرمای تولید شده در تایر و ضریب هدایت گرمایی آن است. حل معادله حاکم مستلزم طی مراحل مختلفی چون تعیین مشخصات گرمایی آمیزه‌ها و ترکیبهای لاستیکی به کار رفته در تایر، تحلیل تغییر شکل، تحلیل رفتار ویسکوالاستیک اجزای تایر و برآورد اتلاف انرژی و گرمایی ناشی از آن است. با انجام این مراحل و مشخص شدن شرایط مرزی، امکان شبیه سازی مدل ترمومکانیکی به منظور پیش بینی توزیع دما در مقطع عرضی تایر در سرویس در حالت پایدار فراهم می‌شود.

## ۴- ضریب هدایت گرمایی آمیزه‌های لاستیکی

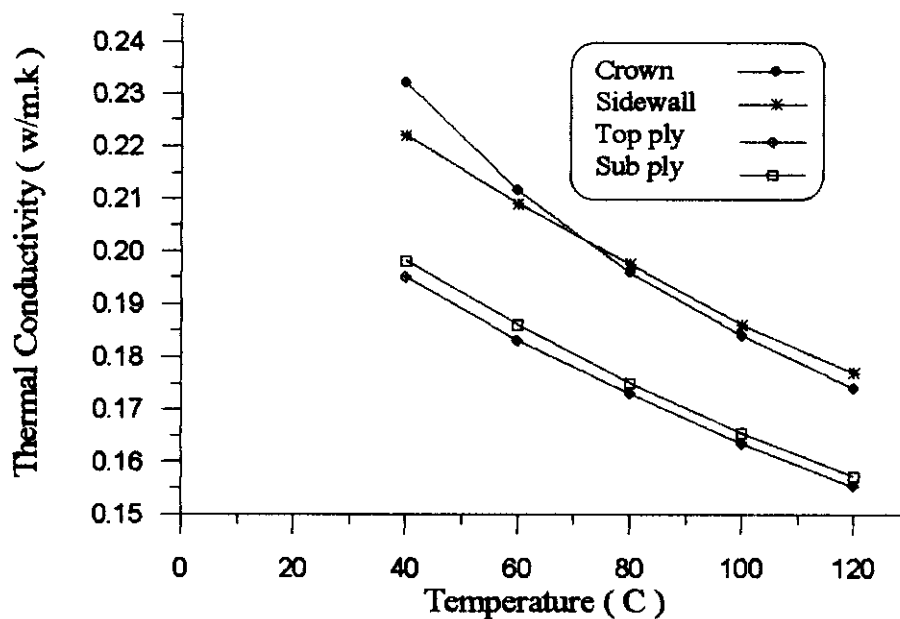
در هر آمیزه لاستیکی به کار رفته در ساختمان تایر، طیف گسترده‌های از مواد با خصوصیات گرمایی متفاوت، به کار رفته است. بنابراین تعیین قابلیت هدایت گرمایی آنها جز با استفاده



شکل ۱- برش عرضی یک تایر بایاس اندازه (۱۳-۵۶۰) و اجزا و نواحی آن

اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. شکل (۲) تغییرات ضریب هدایت گرمایی اجزای مختلف تایر را به صورت تابعی از دما نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش دما این ضریب کاهش می‌یابد. معادله‌های (۲)، (۳)، (۴) و (۵) که براساس نتایج آزمایشهای انجام شده در این پژوهش به دست آورده شده است، به ترتیب بیانگر تغییرات ضریب

از روشهای آزمایشگاهی امکانپذیر نیست. در این تحقیق، هر آمیزه لاستیکی به طور جداگانه آماده و ضمن تعبیه ترموکوپلهایی در فواصل منظم در داخل آن، در قالبهای ویژه پخت قرار داده می‌شود. در مرحله بعد، قالب حاوی آمیزه در شرایطی مشابه پخت تایر به طور یکنواخت گرما داده می‌شود تا آمیزه پخته شده حاصل شود. سپس آمیزه پخته شده در دستگاه



شکل ۲- ضریب هدایت گرمایی آمیزه‌ها و ترکیبهای لاستیکی به کار رفته در تایر ۱۳-۵۶۰

حلقه پسماند می‌گویند و بیانگر افت هیستریزس ناشی از اصطکاک داخلی مولکولهای جسم است. تفاوت انرژی مصرف شده و انرژی داده شده را تلفات پسماند مکانیکی می‌گویند. میزان این تلفات در تایر به جنس آمیزه‌ها و ترکیبات لاستیکی، ساختمان کرکس، میزان بار شعاعی اعمال شده، فشار باد، دما، سرعت حرکت تایر و وضعیت جاده بستگی دارد.

تلفات پسماند مکانیکی به عنوان مهمترین عامل مقاومت غلتشی، بیش از ۹۰ درصد افت قدرت در تایر در حال کار را شامل می‌شود. تغییر شکلهای ویسکوالاستیکی پی در پی در تایر در حال حرکت و ارتعاشاتی که پس از هر تغییر شکل به وجود می‌آید، موجب اصطکاک داخلی در نخ و آمیزه‌های لاستیکی شده و بخش قابل توجهی از انرژی منتقل شده به تایر را به هدر می‌دهد. تعیین انرژی تلف شده در تایر، عمدتاً مبتنی بر روشهای تجربی و آزمایشگاهی است. زیرا رفتار ترموویسکوالاستیکی<sup>۱۷</sup> تایر به دلیل دخالت پارامترهای متعدد چنان پیچیده است که نمی‌توان مدل تحلیلی کاملاً دقیقی برای آن به وجود آورد. ساده‌ترین شکل برخورد تحلیلی با مسئله، استفاده از یک مدل ویسکوالاستیک خطی ساده برای تعیین افت

هدایت گرمایی آمیزه‌های لاستیکی تاج، دیواره جانبی و ترکیب لاستیکی لایه‌های بالایی و پایینی کرکس تایر، به صورت تابعی از دماست.

$$K_{(T)} = 0.25 + 0.02114(T) - 0.02816(T)^{1.1} + 0.00909(T)^{1.2} \quad (2)$$

$$K_{(T)} = 0.25 + 0.00762(T) - 0.01139(T)^{1.1} + 0.0039(T)^{1.2} \quad (3)$$

$$K_{(T)} = 0.25 - 0.02461(T) + 0.02736(T)^{1.1} - 0.007807(T)^{1.2} \quad (4)$$

$$K_{(T)} = 0.25 - 0.01915(T) + 0.02060(T)^{1.1} - 0.005709(T)^{1.2} \quad (5)$$

$$40^{\circ} \leq T \leq 120^{\circ} C$$

## ۵- گرمزایی در تایر

اگر به یک تایر ساکن یا اساساً هر جسم الاستیک دیگری، یک بار عمودی اعمال و سپس آن را حذف کنیم، منحنی بار - خمش آنها به صورت یک حلقه مشاهده می‌شود که به آن

انرژی در هر سیکل است. معادله مورد استفاده در این مدل به صورت زیر است [۱]

$$W_1 = \pi \cdot U \cdot \tan \delta \quad (6)$$

در معادله بالا،  $W_1$  افت انرژی در طی هر سیکل حرکت تایر،  $U$  تغییر انرژی کرنش الاستیک در اثر فرایند تنش سیکلی و  $\tan \delta$ ، تانژانت افت آمیزه لاستیکی است که معیار اصلی میزان گرمایی در تایر به دلیل هیستریزس است و مقدار آن برای آمیزه‌های مختلف به کار رفته در تایرهای سواری بایاس در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۴۰ متغیر است.

با دخالت دادن سرعت مماسی تایر ( $V_0$ )، شعاع غلتش ( $R_0$ ) و میزان خمش شعاعی تایر ( $D$ ) در معادله (۶)، نرخ گرمایی در واحد حجم تایر در طی هر سیکل به صورت زیر به دست می‌آید [۱]

$$q = 0.161 \frac{V_0 \pi \tan \delta}{R_0 - \Delta/3} \quad (7)$$

در این پژوهش برای تعیین توان اتلاف انرژی از دستگاه آزمایش تایر<sup>۱۸</sup>، استفاده شده است. این دستگاه شامل یک استوانه با قطر زیاد است که توسط یک موتور الکتریکی با سرعت قابل تنظیم دوران می‌کند. چرخ حاوی تایر مورد آزمایش در اثر باری که توسط یک سیستم هیدرولیکی به آن اعمال می‌شود با استوانه در حال دوران درگیر شده و با سرعت تعیین شده دوران می‌کند. براساس این شرایط کاری، با اندازه‌گیری گشتاور اعمال شده به چرخ یا توان الکتریکی مصرف شده می‌توان انرژی تلف شده در تایر را برآورد کرد.

در این مدل نرخ افت انرژی ناشی از خاصیت هیستریزس آمیزه‌های لاستیکی به صورت یک جمله منبع گرمایی<sup>۱۹</sup> در معادله دیفرانسیل حاکم در نظر گرفته شده است. میزان این جمله منبع گرمایی ( $q$ ) بستگی به خاصیت هیستریزس آمیزه‌ها و ترکیبهای لاستیکی تایر و همچنین شدت و دامنه تغییر شکلها و ارتعاشات به وجود آمده در هر المان از تایر دارد. شکلهای (۳) و (۴) به ترتیب اثر سرعت مماسی و بار شعاعی اعمال شده به تایر را به میزان گرمایی در داخل تایر برای سه فشار باد متفاوت نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که با افزایش سرعت

مماسی و کاهش فشار باد یا افزایش بار شعاعی اعمال شده به تایر، به دلیل افزایش شدت و دامنه تغییر شکلها و ارتعاشات به وجود آمده، اتلاف انرژی و گرمایی بیشتری نیز در تایر اتفاق می‌افتد. این داده‌ها حاصل اندازه‌گیریهای انجام شده در این تحقیق با استفاده از دستگاه آزمایش تایر است [۵].

## ۶- شرایط مرزی در حل مسئله ترمومکانیکی تایر

شرایط مرزی برای مدل ارائه شده، عبارت است از

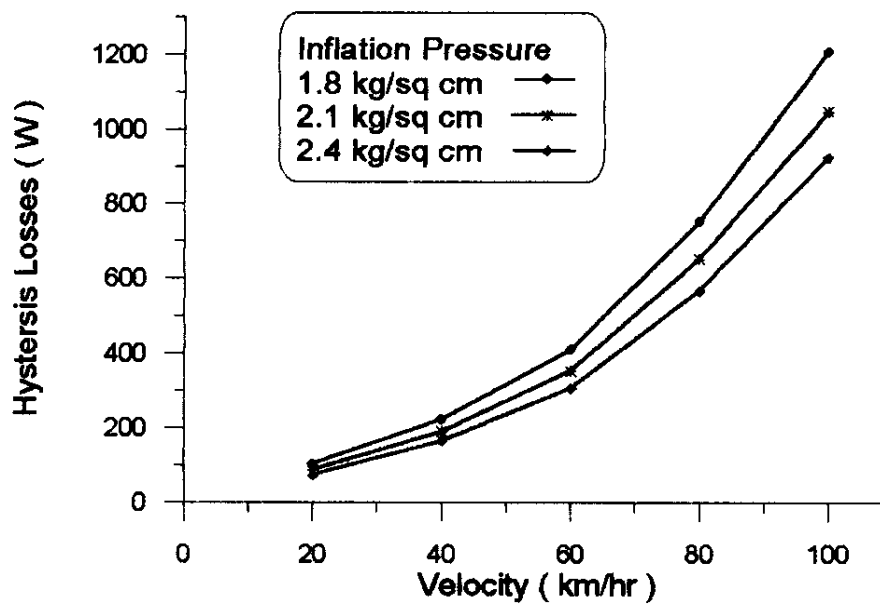
الف: در تحلیل گرمایی دوبعدی، برای کاهش حجم محاسبات، با توجه به تقارن محوری تایر می‌توان صرفاً یک نیمه از سطح مقطع عرضی را مورد بررسی قرار داد. در این صورت در محور تقارن شرط مرزی عایق برقرار می‌شود. همچنین سطح داخلی تایر که در تماس با تیوب است با توجه به پایین بودن قابلیت هدایت گرمایی تیوب هوا، در حالت پایدار عایق فرض شده است.

$$q_n = -K_n \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (8)$$

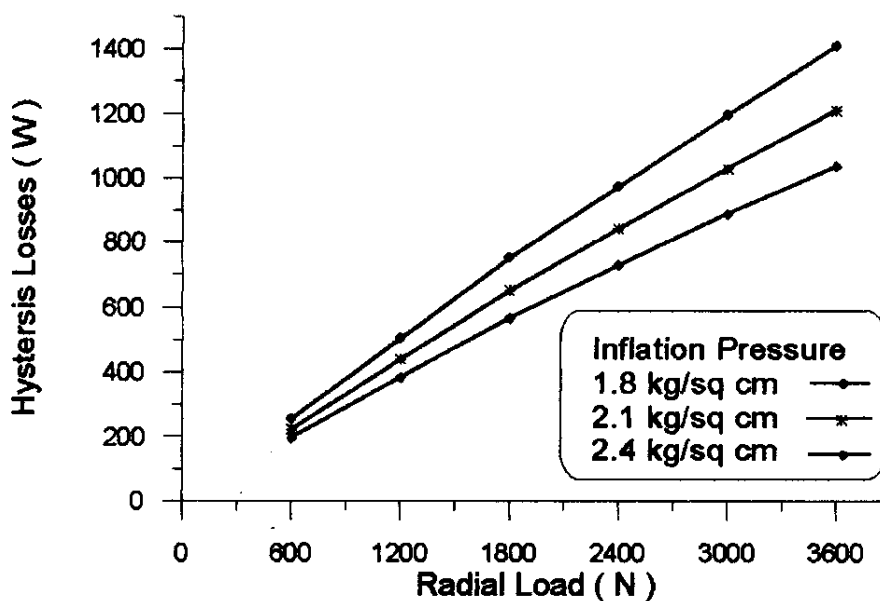
ب: مرز تماس تایر با رینگ با توجه به ثابت ماندن دمای رینگ در حالت پایدار، به صورت دما ثابت در نظر گرفته شده است.  
ج: بخشی از گرمای تولید شده در درون تایر، از طریق هدایت به دیواره خارجی و ناحیه شانه منتقل شده و در آنجا این دما از طریق جابه‌جایی به هوای پیرامون آن منتقل می‌شود. این فرایند را می‌توان با معادله زیر نمایش داد.

$$q_n = -K_n \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{wall}} = h(T_w - T_\infty) \quad (9)$$

در این معادله  $T_w$  و  $T_\infty$  به ترتیب دمای دیواره و دمای هوای پیرامون تایر و  $h$  ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی از سطح خارجی تایر است. با توجه به هندسه پیچیده‌ای که تایر از آن برخوردار است هیچ‌گونه رابطه تجربی برای تعیین ضریب  $h$  در دست نیست به همین خاطر از معادله تجربی زیر که برای اجسام کروی و استوانه‌ای شکل در جریان عرضی<sup>۲۰</sup> پیشنهاد شده، استفاده شده است [۶].



شکل ۳- تلفات پسماند مکانیکی تایر (۱۳-۵۶۰) در بار شعاعی 1800N



شکل ۴- تلفات پسماند مکانیکی تایر (۱۳-۵۶۰) در سرعت 8km/hr

سطح خارجی آن معادل سطح تبادل گرمای جابه جایی تایر مورد نظر است (برای تایر مورد نظر در این پژوهش، بعد مشخصه معادل ۴۱۵ میلیمتر به دست می آید). با تعیین بعد مشخصه و با استفاده از معادله بالا می توان عدد ناسلت و سپس ضریب انتقال گرمای جابه جایی از سطح خارجی تایر را در سرعت های مختلف حرکت تایر تعیین کرد، شکل (۵). ملاحظه

$$Nu = (495.9 + 5.767 * 10^{-4} Re + 0.288 * 10^{-9} Re^2 - 3.58 * 10^{-17} Re^3) Pr^{0.4} \quad (10)$$

$$3 * 10^5 < Re < 5 * 10^5$$

در این معادله  $Nu$ ،  $Re$  و  $Pr$  به ترتیب اعداد بی بعد ناسلت<sup>۲۱</sup>، رینولدز<sup>۲۲</sup> و پراندل<sup>۲۳</sup> هستند. بعد مشخصه برای استفاده در این رابطه نیز قطر کره ای در نظر گرفته شده است که

$$q_0 = \alpha \mu V P \quad (12)$$

در معادله بالا،  $\mu$ ،  $\alpha$  و  $V$  به ترتیب معرف: درصد گرمای جذب شده، ضریب اصطکاک لغزشی، سرعت لغزش و فشار تماس ظاهری تایر با جاده است. با افزایش سرعت و بار شعاعی اعمال شده، میزان گرمای جذب شده در سطح تماس افزایش نشان می‌دهد. پارامترهای مورد استفاده در این معادله نیز برای تایر مورد آزمایش از طریق تجربی تعیین شده است. شکل (۶) اثر سرعت را بر میزان گرمای جذب شده در ناحیه تاج تایر در سه بار شعاعی مختلف نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با بالا رفتن سرعت مماسی به دلیل افزایش سرعت لغزش و با زیاد شدن بار شعاعی اعمال شده به تایر به دلیل افزایش سطح تماس تایر با جاده و همچنین بالا رفتن فشار در آن، میزان گرمای جذب شده نیز افزایش می‌یابد.

## ۷- نتایج محاسبات عددی

داده‌های به دست آمده از مراحل قبل به عنوان ورودی مسئله گرمایی تایر مورد استفاده قرار گرفته و معادله دیفرانسیل حاکم در یک برنامه اجزای محدود غیرخطی که برای تعیین گسترش دما در مقطع عرضی تایر به صورت دوبعدی تدوین شده اجرا شده است. برای این منظور هندسه مورد نظر بر مبنای یک شبکه بندی مشتمل بر ۷۰ المان و ۹۸ گره در برنامه تدوین شده مورد تحلیل قرار می‌گیرد تا برای شرایط مرزی متفاوت، ضمن پیش بینی دما در نقاط مختلف تایر، نواحی حساس و بحرانی که با افزایش دمای بیشتری مواجه می‌شوند به عنوان نواحی آسیب پذیر در تایر شناسایی شوند.

با استفاده از برنامه محاسباتی تدوین شده، آزمایشهای متعددی برای بیش از ۳۰ حالت مختلف از سرعت مماسی، میزان بار شعاعی و فشار باد، متناسب با شرایط مرزی که تایر در جاده با آن مواجه می‌شود، حل شده است. شکل (۷) مقطع عرضی تایر مورد آزمایش و اجزای مختلف آن را نشان می‌دهد. هنگام اجرای برنامه تدوین شده در این پژوهش، نقاطی در هر جزء از تایر که با حداکثر افزایش دما نسبت به دمای محیط

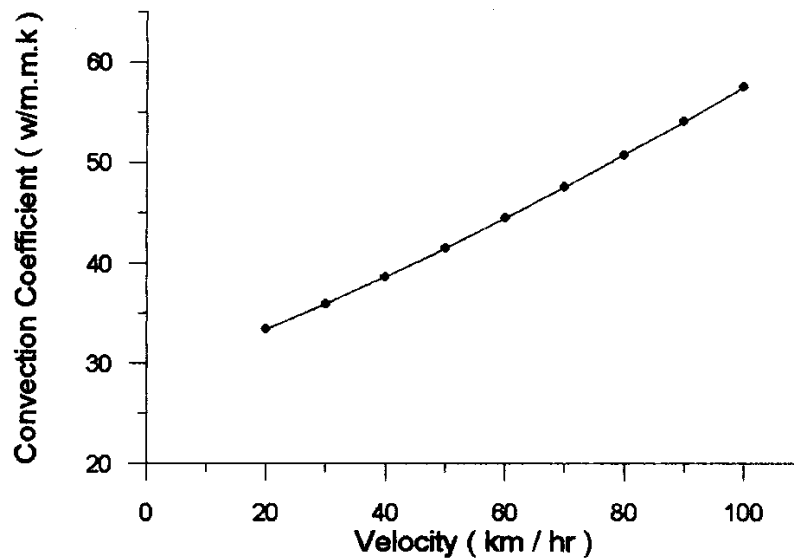
می‌شود که با بالا رفتن سرعت به دلیل آنکه اعداد رینولدز و ناسلت افزایش می‌یابند، میزان این ضریب نیز زیاد شده است.

د: ناحیه تاج تایر که در هر لحظه بخشی از آن در تماس با جاده است، علاوه بر آنکه از طریق جابه جایی با محیط تبادل گرما می‌کند، به دلیل گرمای ناشی از کار اصطکاک لغزشی در سطح تماس با جاده، در معرض یک جریان گرمایی به داخل ناحیه تاج نیز قرار دارد. تایر با سرعت زیاد در حال چرخش است، بنابراین یک نقطه از ناحیه تاج که در یک لحظه در تماس با جاده قرار دارد، درست در لحظه بعد در تماس با هوا قرار می‌گیرد و گرمای خود را از طریق جابه جایی به هوا منتقل می‌کند. هر چند که سطح تاج درست در لحظه ترک زمین، حداکثر دمای خود را داراست، اما تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که با توجه به سرعت زیاد و بالا بودن ضریب انتقال گرمای جابه جایی، گرادیان دما روی دایره محیطی تایر قابل اعمال است [۶]. بنابراین در تحلیل دوبعدی تایر، برای در نظر گرفتن آثار سه بعدی، یک شرط مرزی شامل جریان گرمایی ثابت به درون تایر و انتقال گرمای جابه جایی از سطح آن را که در واقع مقدار میانگین این دو در کل ناحیه تاج تایر است، برای مرز این ناحیه در نظر گرفته می‌شود. این شرط مرزی مرکب را می‌توان به صورت زیر نشان داد

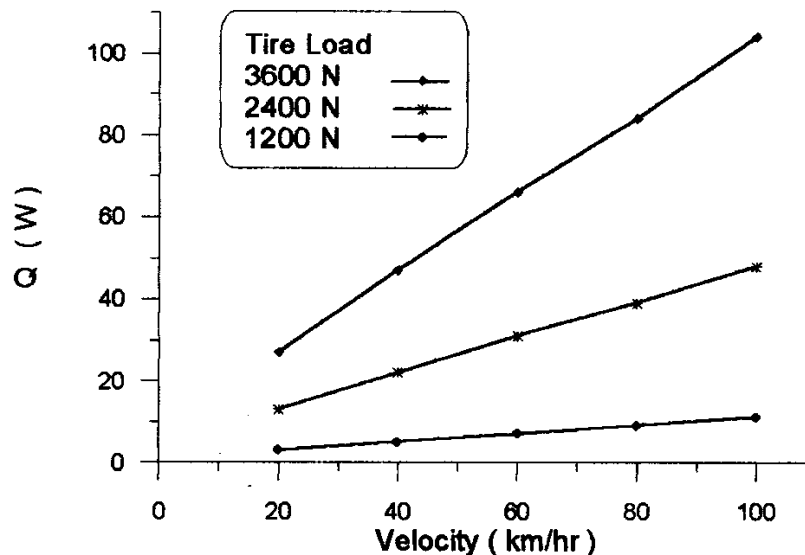
$$q_n = X_1 [h(T_\infty - T_w)] + X_2(q_0) \quad (11)$$

در این معادله،  $q_n$  جریان گرمایی معادل در ناحیه تاج تایر،  $h$  ضریب انتقال گرمای جابه جایی از سطح خارجی تایر،  $T_w$  و  $T_\infty$  به ترتیب دمای دیواره و دمای هوای پیرامون تایر،  $X_1$  و  $X_2$  معرف درصدی از سطح ناحیه تاج تایر است که به ترتیب در تماس با هوا و با جاده قرار دارد و  $q_0$  جریان گرمایی در سطح تماس با جاده است. رفتار لغزشی ترد در ناحیه تماس با جاده، نیروی مقاومی را در برابر حرکت تایر ایجاد می‌کند که به نیروی اصطکاک لغزشی موسوم است. توان تلف شده برای خنثی کردن این نیروی مقاوم، به صورت گرما در سطح تماس تایر با جاده ظاهر می‌شود. جریان گرمایی که بدین ترتیب به ناحیه تاج تایر وارد می‌شود از معادله زیر قابل محاسبه است





شکل ۵- تغییرات ضریب انتقال گرمایی جابه جایی در سطح خارجی تایر (۱۳-۵۶۰) بر حسب سرعت

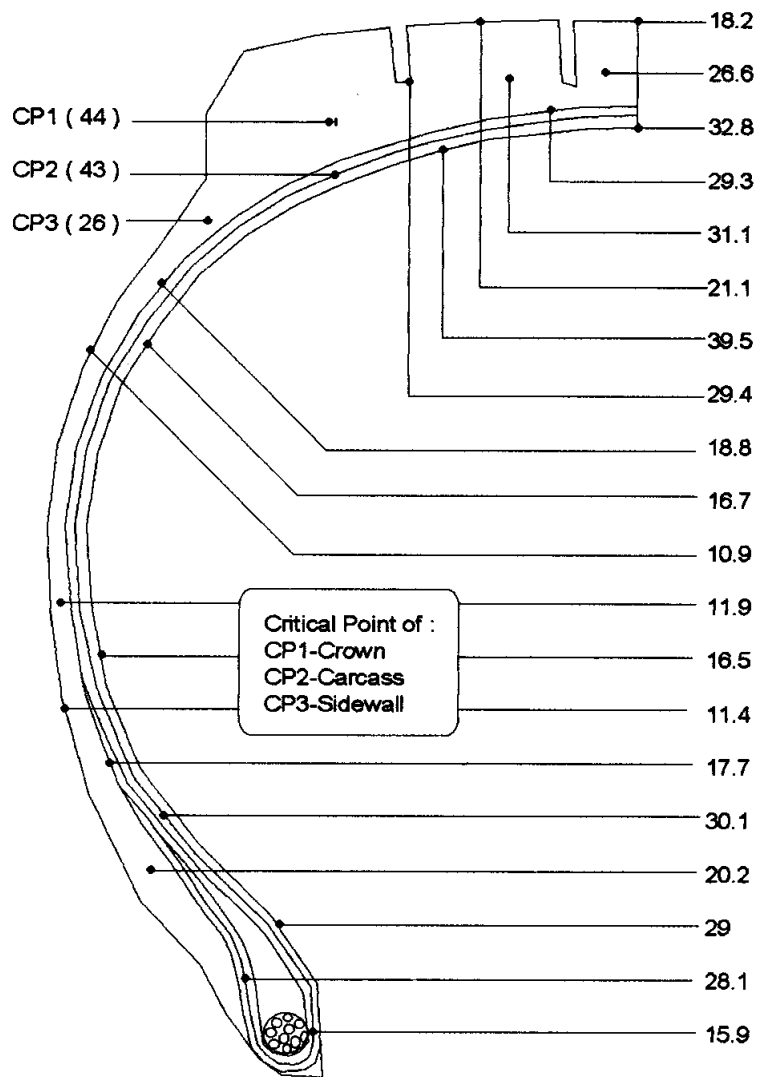


شکل ۶- گرمای جذب شده توسط تاج تایر (۱۳-۵۶۰) بر اثر اصطکاک لغزشی در فشار باد  $2.1 \text{ kg/cm}^2$

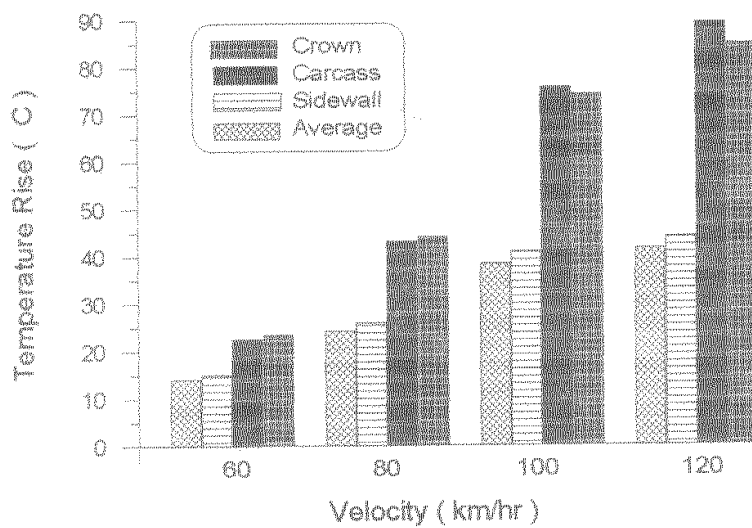
ثابت  $1800 \text{ N}$  و فشار باد  $2.1 \text{ kg/cm}^2$  در آزمایش بر روی تایر مورد نظر به دست آمده است، مبین آن است که در سرعتهای بالا که تعداد تغییرشکلها و ارتعاشات ویسکوالاستیکی تایر بیشتر است، افزایش دما بسیار زیاد است و به خصوص در مرز مشترک تاج و کرکس در مجاور ناحیه شانه که ضخامت تایر زیاد است این افزایش دما می تواند موجب سوختن آمیزه لاستیکی و جدا شدن لایه ها در کرکس شود. به همین خاطر این ناحیه را می توان به عنوان آسیب پذیرترین ناحیه از تایر معرفی

مواجه می شود شناسایی و بر روی شکل مشخص شده است و میزان افزایش دما در این نقاط بحرانی و آسیب پذیر در قبال شرایط کاری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل (۸) اثر سرعت را بر میزان افزایش دما در نقاط بحرانی هر جزء از تایر نشان می دهد. ملاحظه می شود که افزایش سرعت، همان گونه که مقاومت غلتشی و میزان گرمایی را در تایر افزایش می داد، افزایش دمای بیشتری را در نقاط مختلف تایر موجب می شود. داده های این شکل که در بار



شکل ۷- افزایش دمای چند نقطه از مقطع تیر ۱۳-۵۶۰ در بار 1800N سرعت 80km/hr و فشار باد  $2.1 \text{ kg/cm}^2$



شکل ۸- اثر سرعت بر حداکثر افزایش دما در اجزای مختلف تیر ۱۳-۵۶۰ در بار شعاعی 1800N و فشار باد  $2.1 \text{ kg/cm}^2$

## ۸- جمع‌بندی نتایج تحلیل گرمایی تایر

برای کاهش توان تلف شده در تایر، کاهش میزان گرمایی، تبادل گرمایی بهتر و جلوگیری از افزایش بیش از حد دما به خصوص در نقاط بحرانی، راه‌کارهای مختلفی قابل بررسی و تحقیق است که می‌تواند در فرایند اصلاح ساختاری و بهینه‌سازی تایر مورد توجه قرار گیرد.

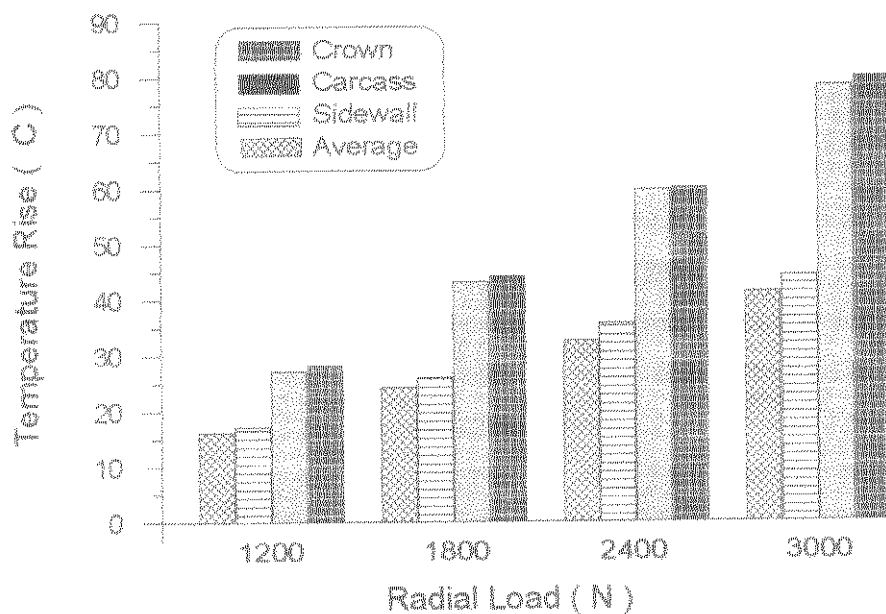
سفتی شعاعی<sup>۲۴</sup> از جمله پارامترهای طراحی تایر محسوب می‌شود که تعیین‌کننده میزان تغییر شکلها و ارتعاشات متعاقب آن در طی چرخش تایر است. مهمترین عامل مؤثر بر سفتی شعاعی تایر، فشار باد است. افزایش فشار باد، همان‌گونه که در پژوهش حاضر نشان داده شد موجب کاهش مقاومت غلتشی تایر می‌شود. اما این امر نه تنها منجر به بروز چین خوردگی لایه‌ها روی دایره محیطی تایر می‌شود، بلکه موجب می‌شود ناحیه تاج به طرف بیرون تحدب یافته و سطح تماس تایر با جاده کاهش یابد. این موضوع نیز به نوبه خود به کاهش ایمنی، ناپایداری و عدم ثبات در حرکت دامن می‌زند. به همین خاطر به نظر می‌رسد که بتوان با کاهش نسبت منظر<sup>۲۵</sup>، یعنی افزایش عرض تایر نسبت به ارتفاع آن، و افزایش فشار باد، به طور همزمان، تبعات منفی تغییر این دو پارامتر را خنثی کرد و ضمن آن با کاهش خمشها و ارتعاشات ویسکوالاستیکی تایر، تولید گرما را در تایر کاهش داد.

راه حل دیگری که در فرایند بهینه‌سازی تایر می‌تواند مورد توجه قرار گیرد، طراحی تایرهای چندساختاری است. برای این منظور می‌توان بخشی از آمیزه لاستیکی به کار رفته در ناحیه تاج تایر را از مواد با هیستریزس بالا تهیه کرد تا با افزایش مقاومت لغزشی، امکان کنترل وسیله نقلیه در سرعت‌های بالا و هنگام تغییر مسیر یا ترمزگیری فراهم شود، در عوض سایر بخشهای تایر از آمیزه‌های لاستیکی با هیستریزس پایین ساخته شوند تا با کاهش تلفات ویسکوالاستیکی تایر نه تنها اثر تغییر ذکر شده خنثی شود، بلکه در مجموع به کاهش مقاومت غلتشی تایر منتهی شود. همچنین تجدید نظر در فرمولاسیون آمیزه‌ها به خصوص در ناحیه تاج به منظور افزایش قابلیت هدایت

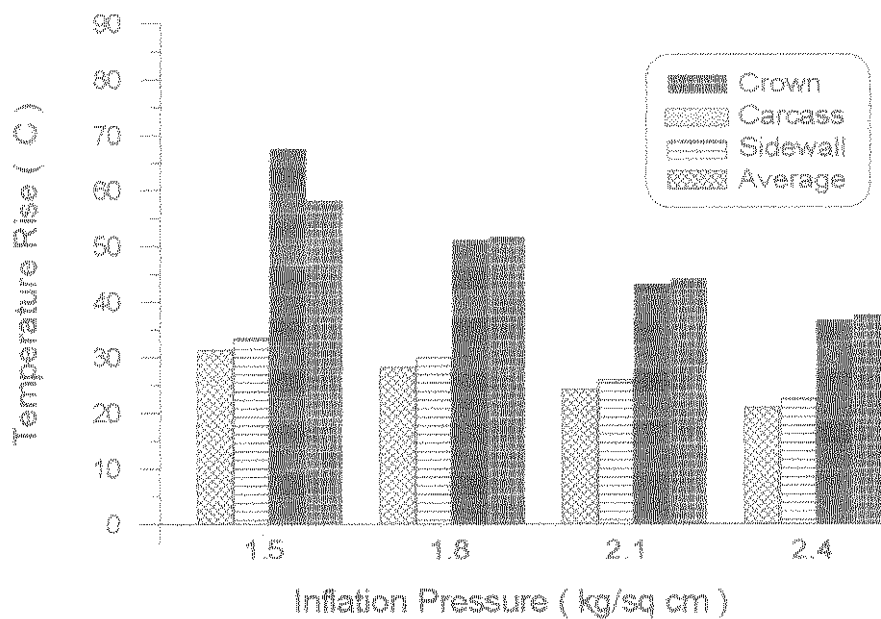
کرد. به طور مثال در سرعت 100 km/hr هر چند متوسط افزایش دما در تایر 38.38°C است، اما تاج و کرکس به ترتیب با افزایش دمای حداکثر 74°C و 75°C مواجه می‌شوند. در همین حالت حداکثر افزایش دما در ناحیه دیواره جانبی، به دلیل ضخامت کم و سطح گسترده تبادل گرما با محیط 41°C است و در چنین حالتی آسیبی را متوجه آمیزه لاستیکی به کار رفته در این ناحیه نمی‌کند (حد تحمل آمیزه‌های لاستیکی حدود 125°C است [۷]).

شکل (۹) اثر بار شعاعی اعمال شده را بر میزان افزایش دما در نقاط بحرانی اجزای مختلف تایر نشان می‌دهد. همان‌گونه که افزایش بار، به دلیل افزایش دامنه خمشها و ارتعاشات تایر، مقاومت غلتشی و تولید گرما در تایر را بیشتر می‌کند، افزایش دمای بیشتری را نیز در اجزای مختلف تایر موجب می‌شود. داده‌های این شکل که در سرعت مماسی 80 km/hr و فشار باد 2.1 kg/cm<sup>2</sup> به دست آمده است، مجدداً بیشترین افزایش دما را در مرز تاج و کرکس در مجاور ناحیه شانه نشان می‌دهد. به طور مثال در بار شعاعی ۳۰۰ نیوتن، تاج و کرکس تایر به ترتیب با حداکثر افزایش دمایی معادل 78.5°C و 78°C مواجه می‌شدند در حالی که حداکثر افزایش دما در ناحیه دیواره 42°C و متوسط افزایش دمای تایر 41.07°C است.

شکل (۱۰) اثر فشار باد را بر حداکثر افزایش دما در نقاط بحرانی اجزای مختلف تایر مورد نظر نشان می‌دهد. این داده‌ها که در سرعت مماسی 80 km/hr و تحت بار ثابت 1800N به دست آمده‌اند، بیانگر آن هستند که با کاهش فشار باد، دامنه تغییر شکلها و ارتعاشات تایر، به دلیل کاهش سفتی شعاعی آن، افزایش یافته و گرمایی باعث افزایش دمای بیشتری در تایر می‌شود. در این آزمایش نیز حداکثر افزایش دمای ناحیه تاج و کرکس در مجاور ناحیه شانه بسیار بیشتر از متوسط افزایش دمای تایر است. به طور مثال در فشار باد 1.5 kg/cm<sup>2</sup> افزایش دما در نواحی آسیب‌پذیر تاج و کرکس به ترتیب 58°C و 57.5°C است در حالی که متوسط افزایش دما در تایر 31.32°C است.



شکل ۹- اثر بار شعاعی بر حداکثر افزایش دما در اجزای مختلف تایر ۱۳-۵۶۰ در سرعت ۸۰km/hr و فشار باد ۲.۱kg/cm<sup>2</sup>



شکل ۱۰- اثر فشار باد بر حداکثر افزایش دما در اجزای مختلف تایر ۱۳-۵۶۰ در بار ۱۸۰۰N و سرعت ۸۰km/hr

می‌شود. افزایش انحنای لبه عاج در ناحیه شانه نه تنها اثرات ناشی از ضخامت زیاد را کاهش می‌دهد، بلکه با افزایش سطح تبادل گرمایی در این ناحیه، انتقال گرما از تایر به هوا نیز افزایش می‌یابد.

تأثیر سرعت، فشار باد و بار شعاعی اعمال شده بر میزان اتلاف انرژی و تولید گرما در تایر، به طور مشروح در این

گرمایی آن می‌تواند در تبادل گرمای بیشتر تایر با هوا و جلوگیری از افزایش بیش از حد دما در این ناحیه مؤثر باشد.

یکی از دلایل افزایش بیش از حد دما در نقاط بحرانی تایر ضخامت زیاد تایر در ناحیه شانه است. این ضخامت زیاد از یکسو، افت هیستریزس و گرمای تولید شده در تایر را افزایش می‌دهد و از سوی دیگر موجب کند شدن دفع گرما از تایر

تغییر در نقش<sup>۲۶</sup> تاج تایر، برای افزایش سطح گرمایی و تبادل گرمای بیشتر با محیط، کاهش اصطکاک لغزشی و میزان ساییش در سطح تماس با جاده، کاهش اصطکاک آیرودینامیکی و جلوگیری از حبس شدن هوا در زمان تماس با جاده، نیز از جمله مواردی است که می‌تواند مورد بررسی و تحقیق بیشتر قرار گیرد.

پژوهش مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. ملاحظه شد که چنانچه سرعت مماسی و بار شعاعی اعمال شده به تایر از حد مشخصی تجاوز کند، به طور فزاینده‌ای دما در نقاط بحرانی تایر افزایش می‌یابد. به همین خاطر رعایت استانداردها در سرعت مماسی تایر و بار شعاعی اعمال شده به آن، ساده‌ترین روش برای مهار افزایش دما و جلوگیری از تخریب تایر است.

## واژه نامه

- |                                 |                        |                      |
|---------------------------------|------------------------|----------------------|
| 1. viscoelastic deformations    | 10. Flexmeter Goodrich | 19. heat source      |
| 2. heat build up                | 11. moving heat source | 20. cross flow       |
| 3. rolling resistance           | 12. side wall          | 21. Nusselt Number   |
| 4. bias tire                    | 13. top ply            | 22. Reynolds Number  |
| 5. crown                        | 14. sub ply            | 23. Prantel Number   |
| 6. carcass                      | 15. bead               | 24. radial stiffness |
| 7. mechanical hysteresis losses | 16. filler             | 25. aspect ratio     |
| 8. steady state                 | 17. thermoviscoelastic | 26. pattern          |
| 9. inflation pressure           | 18. drum tester        |                      |

## مراجع

- Dodge, N., and Clark, S. K., "Tire Modeling and Contact Problems Heat Generation in Aircraft Tires," *Computer & Structures*, Vol. 20, No. 1-3, 1985.
- Chakraborty, S. K., and Mukherjee, D. P. "Study of Heat Build-Up of a Cured Tire Using a Goodrich Flexmeter," *Rubber World*, PP. 30-40, June 1987.
- Yavari, B., Tworzydło W. W., and Bass, J. M., "A Thermomechanical Model to Predict the Temperature Distribution of Steady State Rolling Tires," *Tire Science and Technology, TSTCA*, Vol. 21, No. 3, PP. 163-178, 1993.
- Fujikawa, T., Funzaki, A., and Yamazaki, S., "Tire Tread Temperature in Actual Contact Areas," *Tire Science and Technology, TSTCA*, Vol. 22, No. 1, PP. 19-41, 1994.
- Rezvani, A., "Measurement of Tire Thermal Properties & Finite Element Analysis of Heat Transfer in Tire," M. S Thesis, Shiraz University, 1998.
- Zukauskas, A., *Convective Heat Transfer in Cross Flow, Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1987.
- Beatty, J. R., "Physical Properties of Rubber Compounds," *Mechanics of Pneumatic Tires*, Washington D.C.: U. S, Department of Transportation, 1975.