

## Finite Element Analysis and Footprint Determination of a Bias Truck Tire under Vertical Static Load Using Global/Local Method

M.H.R. Ghoreishy<sup>\*1</sup>, S. Soltani<sup>1</sup>, and A.H. Etemadi<sup>2</sup>

1. Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14965-115, Tehran, Iran

2. Pars Tire Co., P.O. Box: 14155-5383, Tehran, Iran

Received 27 June 2010, accepted 8 September 2010

### ABSTRACT

A finite element model of a bias truck tire under static vertical load using a global/local technique is designed in two parts. In the first part a previously created model for radial tires is developed to take the constructional variables of bias tires into account. It is shown that the technique can successfully be used for bias tires. The main challenge here is the selection of the initial layout of the tire, which due to the use of nylon fibers in bias tires undergo considerable variation in shapes on being released from mold. Therefore, the selection of the tire layout in the mold as the initial starting point for finite element calculations leads to significant errors in the final results. In the second part, a highly refined mesh has been created from contacting region of the tire tread pattern as a local model. This model is analyzed using the results of the first (global) model as the boundary condition. It is also shown that the developed method is capable of precisely predicting the geometry of the footprint area without any extra computational cost and efforts needed in finite element calculations of full tire models.

#### Key Words:

tire, bias,  
finite element method,  
global/Local,  
footprint area

(\*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [m.h.r.ghoreishy@ippi.ac.ir](mailto:m.h.r.ghoreishy@ippi.ac.ir)

## تحلیل اجزای محدود و تعیین ناحیه جاپای تایر اریبی باری زیر بار عمودی ایستا با استفاده از روش کلی - جزئی

میرحمید رضا قریشی<sup>۱</sup>، صدیقه سلطانی<sup>۱</sup>، امیر هوشنگ اعتمادی<sup>۲</sup>

۱- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۵-۱۴۹۶۵

۲- تهران، شرکت لاستیک پارس، صندوق پستی ۵۳۸۳-۱۴۱۵۵

دریافت: ۸۹/۴/۶، پذیرش: ۸۹/۶/۱۷

### چکیده

در این پژوهش، شبیه‌سازی مکانیکی یک تایر باری سنگین زیر بار عمودی ایستا در قالب یک مدل کلی - جزئی انجام شد. دو فعالیت عمده جدید در این کار مد نظر قرار گرفت. در بخش اول مدل، مکانیکی اجزای محدود پیشتر توسعه داده شده برای تایرهای رادیال به تایرهای با ساختار اریبی توسعه و نشان داده شد که روش یاد شده را می‌توان برای تایرهای مزبور با موفقیت به کار برد. چالش اصلی در استفاده از روش اجزای محدود برای تایرهای اریبی، انتخاب جانمایی اولیه تایر است، چرا که به دلیل استفاده از الیاف نایلون در منجید این نوع تایرها شکل آن پس از خروج از قالب تغییر محسوسی یافته که در نتیجه انتخاب این جانمایی به عنوان شکل هندسی اولیه هنگام شروع محاسبات می‌تواند موجب بروز خطا در نتایج نهایی شود. این موضوع به خوبی با مقایسه بین نتایج محاسباتی و تجربی در تایرهای رادیال و اریبی قابل شناسایی است. در بخش دوم یک مدل اجزای محدود بسیار ریزشده جزئی از ناحیه نقش رویه تایر ایجاد و با استفاده از نتایج مدل اول که به عنوان شرط مرزی انتخاب شده بودند، تحلیل شد. نتایج حاصل در مرحله دوم نشان داد، هندسه ناحیه تماس تایر را می‌توان به کمک مدل جزئی بدون نیاز به منابع محاسباتی یاد شده که غالباً در تحلیل مدل‌های کامل مورد نیاز است، با دقت زیادی مدل کرد.

### واژه‌های کلیدی

تایر، اریبی،  
روش اجزای محدود،  
کلی- جزئی،  
ناحیه جاپا

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

## مقدمه

تایر سازه‌ای پیچیده و متشکل از مواد با خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوت و متناقض (همانند لاستیک، الیاف آلی و فولاد) است که در شرایط سرویس دهی زیر بارگذاری‌های مختلف قرار می‌گیرد. بنابراین، رسیدن به طراحی بهینه‌ای که تأمین‌کننده انتظارات مختلف باشد، مستلزم در نظر گرفتن موارد متعددی است. این امر فرایند طراحی و ساخت تایر را به یکی از منحصربه‌فردترین و در عین حال مشکل‌ترین مسئله پیش رو در مهندسی مواد و سازه بدل ساخته است. فعالیت‌های فراوانی تاکنون در این حوزه انجام شده است. نگاهی اجمالی به تعداد مقالات و منابع منتشر شده بهترین گواه بر این ادعاست که با وجود توسعه‌های بی‌شماری که در زمینه مهندسی تایر انجام شده و با وجود عرضه روز افزون محصولات جدید با قابلیت‌ها و کارایی‌های بسیار زیاد هنوز این صنعت توجه و اشتیاق زیادی به پژوهش و نوآوری دارد و دست‌اندرکاران هم‌چنان شاهد عرضه‌های جدید و بهبود یافته در خصوص طراحی و مهندسی تایر هستند. این کارها از لحاظ نظری که عمدتاً بر پایه توسعه، ایجاد و به‌کارگیری مدل‌های ریاضی است و هم از جنبه تجربی (درون و برون آزمایشگاهی یا میدانی) موجب کمک‌های شایانی به شناخت هرچه دقیق‌تر نحوه رفتار تایر در قبال نیروهای وارد بر آن شده است. در این کار پژوهشی، بحث روی جنبه نخست یعنی توسعه و به‌کارگیری مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی پاسخ تایر در شرایط مختلف بارگذاری است. امروزه، صنعت تایر شبیه‌سازی رایانه‌ای مبتنی بر روش اجزای محدود را به عنوان روشی استاندارد در این زمینه پذیرفته و قریب به اتفاق همه پیشرفت‌های انجام شده از دیدگاه نظری تایر محدود به این روش شده است. در این زمینه توجه خوانندگان به مرجع [۱] جلب می‌شود که در آن به طور جامع فعالیت‌های انجام شده در این حوزه مرور شده است. از لحاظ ساختاری تایرها به دو دسته اریبی و رادیال یا شعاعی تقسیم می‌شوند. به طور اجمالی می‌توان گفت، در تایرهای اریبی نخ‌های تشکیل‌دهنده منجید (carcass) تایر نسبت به خط مرکزی آن زاویه دار است و به شکل اریب یا مورب قرار گرفته تا تأمین‌کننده سفتی لازم در دو جهت طولی و عرضی تایر باشند. اما، در تایرهای رادیال نخ‌ها به شکل عمود بر خط مرکزی با زاویه ۹۰ درجه نسبت به آن قرار دارند و برای جبران کاهش سفتی طولی مورد نیاز از لایه‌های لاستیکی تقویت شده با نخ‌های با استحکام زیاد (مانند فولاد) در زیر ناحیه رویه تایر استفاده می‌شود. نکته قابل تأمل در این باره آن است که چون فناوری تولید تایرهای رادیال امروزه جای‌گزين فناوری تایرهای اریبی شده‌اند، بنابراین، تقریباً تمام فعالیت‌های انجام شده در زمینه شبیه‌سازی مربوط به تایرهای رادیال (سواری و باری سبک و سنگین) است و تنها تعداد بسیار اندکی گزارش در زمینه شبیه‌سازی تایرهای اریبی وجود دارد که به عنوان

مثال می‌توان از مرجع [۲] نام برد. بر این اساس شاید بتوان گفت، شبیه‌سازی تایرهای اریبی به کمک روش اجزای محدود ارزش چندانی ندارد و نمی‌تواند به عنوان کار مهندسی - پژوهشی مورد قبول باشد. اما، وضعیت صنعت تایر در کشور ما به گونه‌ای است که از لحاظ وزنی نزدیک به ۷۰ درصد تولید تایر از نوع اریبی‌اند. در سال‌های اخیر، بیشترین توسعه صنعت تایر در کشور ما روی تایرهای رادیال سواری متمرکز بوده و هنوز فناوری تایرهای اریبی در حوزه تایرهای باری سبک و سنگین سهم بسزایی در سبد تولیدی تایرهای تولید داخل دارد. از این رو، توسعه و گسترش شبیه‌سازی تایر به کمک روش اجزای محدود به تایرهای اریبی به لحاظ تولید زیاد آنها در کشور ما می‌تواند بسیار ثمربخش بوده و موجب کاهش هزینه‌های مربوط به طراحی و بهینه‌سازی شود.

در این پژوهش، شبیه‌سازی رایانه‌ای یک تایر باری سنگین به کمک روش اجزای محدود مورد توجه قرار گرفته و طی آن اثر تغییر در زاویه نخ از حالت خام به پخت شده برای نخستین بار در این نوع تایرها در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی طی دو مرحله انجام شد. در مرحله اول، روش اجزای محدود پیشتر توسعه یافته برای شبیه‌سازی زیر بار عمودی در تایرهای رادیال [۷-۳] به تایرهای اریبی از راه اعمال معادله ارتفاعی (lift equation) بسط داده شد. در مرحله دوم، ابتدا یک مدل اجزای محدود جدید با دقت زیاد از ناحیه نقش رویه (tread pattern) که در تماس با زمین قرار می‌گیرد، ایجاد و سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی زیر بار عمودی (مرحله نخست) به عنوان ورودی به آن اعمال شد. این روش که به نام روش کلی - جزئی خوانده می‌شود، یکی از روش‌های محاسباتی عددی برای حل دقیق مسائلی است که حل کامل آنها نیاز به زمان و منابع رایانه‌ای فراوان دارد. این روش می‌تواند با کاهش منابع یاد شده پاسخ مسئله را در زمان بسیار کوتاه‌تری به دست آورد. کاربرد این روش در مهندسی تایر سابقه دارد و از آن برای پیش‌بینی متغیرهای ناحیه تماس تایر با زمین استفاده شده است [۸، ۹]. در ادامه این مقاله، ابتدا مدل اجزای محدود کلی تایر معرفی و طی آن مدل رفتار مواد و پارامترهای مربوط ارائه شده است. سپس، مدل اجزای محدود جزئی که برای اجزای ناحیه نقش رویه تایر که در تماس با زمین قرار می‌گیرند، معرفی و مشخصات آن شرح داده می‌شود. در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند. خاطر نشان می‌سازد، محاسبات اجزای محدود در این کار به وسیله نرم‌افزار ABAQUS [۱۰] انجام شده است.

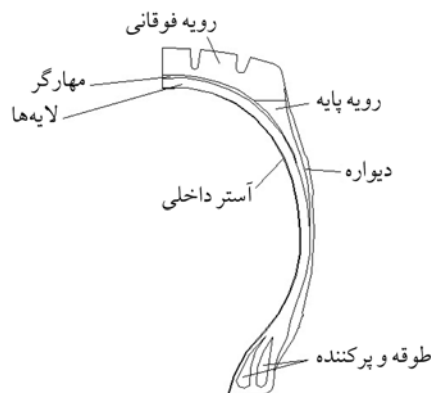
## مدل اجزای محدود کلی

تایر مورد مطالعه یک تایر اریبی نخی در اندازه ۲۴-۱۲ ساخت داخل بود

تشکیل شده است. از این مدل برای پیش بینی شکل باد شده تایلر زیر فشار باد داخلی استفاده شد. برای شبیه سازی تایلر زیر بار عمودی ایستا نیاز به مدل سه بعدی کامل تایلر است. بدین منظور مدل دوبعدی یاد شده به اندازه  $360^\circ$  درجه حول محور مرکزی تایلر دوران داده و مدل سه بعدی آن ایجاد شد که در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، برای حصول به دقت بیشتر در منطقه تماس تایلر با زمین از تعداد اجزای بیشتر نسبت به سایر نواحی استفاده شد. شبکه اجزای محدود این تایلر از ۱۱۱۶۱ جزء به همراه  $12602$  گره تشکیل شده است. شایان ذکر است، برای ناحیه تماس تایلر با زمین از اجزای استوانه ای CCL12H و SFMCL6 (۱۲ و ۶ گره ای) و برای سایر نواحی تایلر که در تماس با زمین قرار نمی گیرند، از اجزای C3D8H و SFM3D4R به ترتیب برای اجزای لاستیکی و تقویت کننده استفاده شد. اجزای استوانه ای (CCL12H و SFMCL6) دارای فرمول بندی خاصی در جهت محیطی هستند به نحوی که می توان انحنای موجود در آن را در نظر گرفت. این موضوع در تقابل با اجزای ساده سه بعدی است که در آن انحنای جهت محیطی با خطوط صاف مدل می شود. بنابراین، اجزای انتخابی برای جهت محیطی از دقت بیشتری نسبت به اجزای معمولی برخوردار هستند [۱۱].

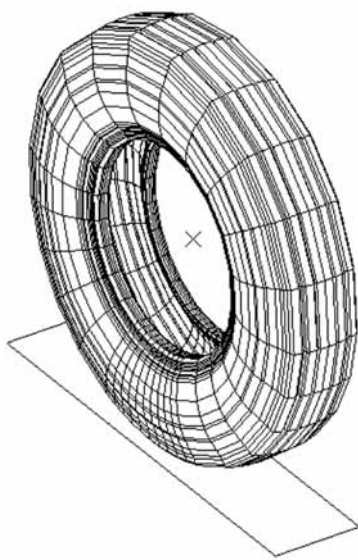
### مدل رفتار مواد

رفتار مکانیکی اجزای لاستیکی شامل رویه (فوقانی و پایه)، دیواره، آمیزه لاستیکی لایه ها و مهارگر، پرکننده طوقه و آستر داخلی از مدل

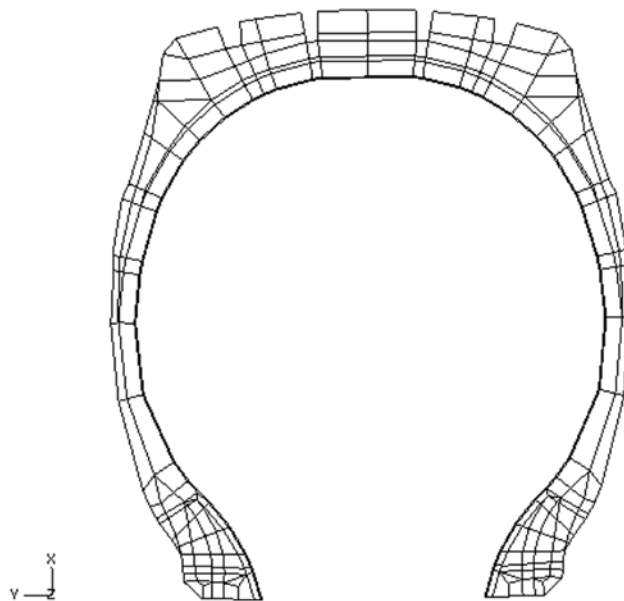


شکل ۱ - جانمایی تایلر به همراه معرفی اجزای آن.

که منجید آن از ۱۲ لایه لاستیکی تقویت شده با الیاف نایلون  $1260$  دنیر و ۲ لایه لاستیکی مهارگر (breaker) تقویت شده با الیاف نایلون  $840$  دنیر ساخته شده بود. شکل ۱ جانمایی (layout) تایلر مزبور به همراه اجزای تشکیل دهنده آن را نشان می دهد. این جانمایی ابتدا به شکل دوبعدی در نرم افزار AutoCAD ترسیم و سپس به محیط نرم افزار ABAQUS/CAE منتقل شد. به دنبال آن جانمایی یاد شده به شبکه اجزای محدود دوبعدی متقارن محوری تبدیل شد. برای این کار از اجزای دوبعدی چهارگه ای CGAX4H و اجزای میله ای دوبعدی قرار داده شده در اجزای صفحه ای SFMGAX1 (از مجموعه کتابخانه اجزای نرم افزار ABAQUS) برای اجزای لاستیکی و تقویت کننده استفاده شد که در شکل ۲ نشان داده شده است. شبکه مزبور از ۳۷۲ جزء به همراه ۳۱۶ گره



شکل ۳ - شبکه اجزای محدود سه بعدی تایلر (مدل کلی) به همراه صفحه صلب تعریف شده.



شکل ۲ - شبکه اجزای محدود دوبعدی تایلر.

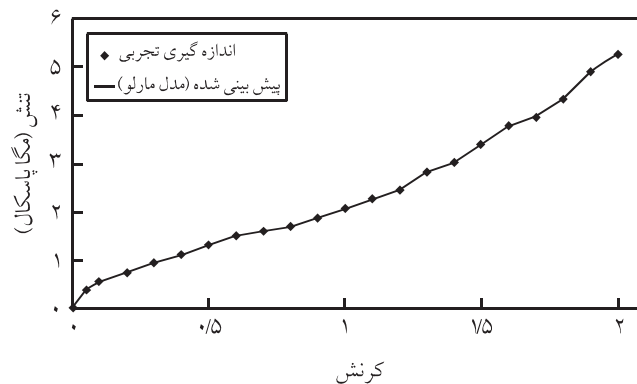
که در این معادلات  $\alpha_0$  و  $\alpha$  زوایای برش و پخت نسبت به خط محیطی تایلر،  $r_0$  شعاع اولیه یا شعاع استوانه ماشین تایلر سازی و فاصله شعاعی هر نقطه تا محور دوران،  $e$  مقدار کشیدگی نخ و  $S_0$  و  $S$  فاصله بین الیاف در دو حالت اولیه و پس از پخت است.

### شرایط مرزی و بارگذاری

بارگذاری تایلر در حالت ایستا همانند مدل های پیشین [۵،۷] طی دو مرحله انجام شد. در مرحله نخست تایلر زیر بار متقارن محوری فشار باد داخلی معادل  $0.77 \text{ MPa}$  قرار گرفت و شکل باد شده تایلر به دست آمد. سپس، در مرحله دوم با تعریف یک سطح صلب به عنوان نمادی از جاده یا زمین بار عمودی ایستا اعمال شد. در این مرحله با صفر فرض کردن تغییر مکان های ناحیه طوقه، ابتدا صفحه یاد شده به مقدار  $10 \text{ mm}$  به سمت سطح رویه تایلر حرکت داده شد تا یک تماس اولیه ایجاد شود. به دنبال آن، بار عمودی معادل  $27440 \text{ N}$  ( $2800 \text{ kg}$ ) به آن وارد شد تا در نهایت تایلر به طور کامل با زمین تماس حاصل کند. در این مرحله، شبیه سازی در دو حالت بدون در نظر گرفتن اصطکاک بین تایلر و زمین و با در نظر گرفتن آن توسط معادله ساده کولمب (Coulomb) و ضریبی معادل  $0.7$  انجام شد.

### مدل اجزای محدود جزئی (local)

همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده مدل مورد بحث در بخش پیشین از یک شبکه اجزای محدود با درجه ریزشدهگی (refinement) متوسط تشکیل شده است. این مقدار ریزشدهگی اگرچه مناسب است و نتایج خوبی می دهد، اما چون در مدل یاد شده از نقش رویه تایلر صرف نظر شده است، بنابراین مدل سه بعدی بدون در نظر گرفتن اجزای نوار آج (tread rib) ایجاد شده بود. از این نوع مدل ها می توان برای سنجش عملکرد کلی تایلر به خوبی استفاده کرد. اما، همان طور که در مرجع [۷] گفته شده برای تعیین دقیق متغیرهای ناحیه جاپای باید نقش رویه در مدل لحاظ شود. این کار معمولاً به دو روش انجام می گیرد. در روش اول، مدل از ابتدا با جزییات مربوط به نقش رویه ساخته شده و محاسبات بر اساس آن انجام می شود [۶،۷]. در روش دوم که به نام کلی - جزئی خوانده می شود، ابتدا یک مدل کلی از تایلر (نظیر آن چه که در بخش پیشین شرح داده شد) ایجاد و سپس نتایج حاصل از شبیه سازی آن به عنوان شرط مرزی برای مدل جزئی به کار برده می شود. مدل اخیر (مدل جزئی) یک مدل اجزای محدود با تعداد اجزای بسیار زیاد یا درجه ریزشدهگی زیاد است که صرفاً آن ناحیه از مدل اصلی (مدل کلی) را شامل می شود که هدف بررسی دقیق تر آن است. در این مدل، بخش مورد بحث ناحیه ای از رویه تایلر است که در تماس با زمین قرار می گیرد.



شکل ۴ - نمودار تغییرات تنش بر حسب کرنش اندازه گیری شده برای آمیزه رویه فوقانی به همراه مقادیر برازش شده به کمک مدل مارلو.

ابركشسان مارلو (Marlow) استفاده شد. این مدل در حالتی که تنها یک مجموعه داده حاصل آزمون کششی در دسترس بوده و امکان انجام آزمون های دو و چندجهتی میسر نباشد، انطباق بسیار خوبی بین داده های اندازه گیری شده با مقادیر پیش بینی شده برقرار می سازد. از آن جا که عملاً در صنعت به دلیل هزینه بر بودن تنها از آزمون ساده کششی (ASTM D412) برای تعیین رفتار مکانیکی لاستیک ها استفاده می شود، بنابراین مارلو بهترین گزینه به شمار می آید [۱۲،۱۳]. برای نمونه نمودار تنش - کرنش برای آمیزه رویه فوقانی به همراه مقادیر پیش بینی شده با مدل مارلو در شکل ۴ نشان داده شده که مشاهده می شود، انطباق بسیار خوبی بین داده ها برقرار است. برای الیاف تقویت کننده از مدل مکانیکی کشسان خطی استفاده شد. برای این منظور، نمودار تنش بر حسب کرنش به کمک آزمون کششی تعیین و با تعیین ضریب زاویه خط مماس بر بخش های ابتدایی نمودار یاد شده، ضریب کشسانی به دست آمد که برای نایلون  $1260$  و  $840$  دینر به ترتیب برابر  $2500$  و  $2000 \text{ MPa}$  بود. هم چنین، مقدار نسبت پواسون نیز برابر  $0.3$  در نظر گرفته شد.

افزون بر خواص مکانیکی یاد شده مشخصات ساختاری و هندسی منجید تایلر نیز باید در مدل تعریف شود. این مهم با ورود اطلاعات مربوط شامل زاویه و فاصله بین نخ ها، شعاع استوانه ماشین تایلر سازی و مقدار کشیدگی نخ انجام می شود. داده های فوق با استفاده از معادلات ارتفاعی به مقادیر مورد نیاز برای محاسبات مکانیکی چندسازه ای تبدیل می شوند. این معادلات به شکل زیر داده شده اند [۱۴]:

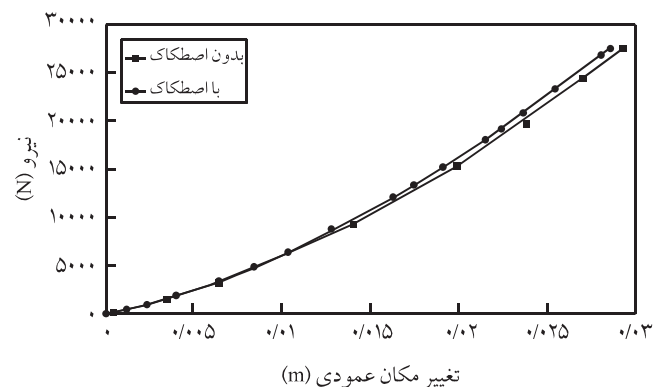
$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{r \cos \alpha_0}{r_0 (1 + e)} \right) \quad (1)$$

$$s = s_0 \frac{r \sin \alpha}{r_0 \sin \alpha_0} \quad (2)$$

## نتایج و بحث

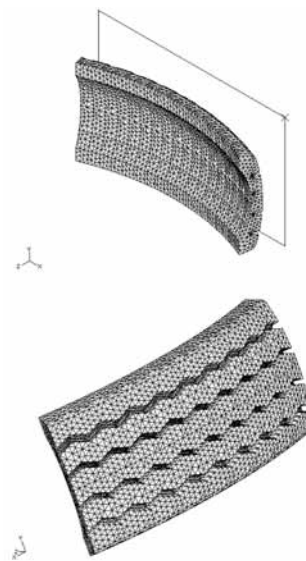
شبیه سازی ها با نرم افزار ABAQUS/Standard روی مدل های کلی و جزئی انجام شد. در شبیه سازی اول، مدل کلی ابتدا زیر فشار باد داخلی و بار عمودی ایستا تحلیل شد و به دنبال آن در مرحله دوم نتایج حاصل به عنوان ورودی به مدل جزئی اعمال و تحلیل شد. بر این اساس، ابتدا نتایج مدل کلی ارائه و سپس نتایج مدل جزئی بررسی شد.

یکی از مهم ترین نتایجی که از اجرای شبیه سازی تایلر زیر بار عمودی ایستا به دست می آید، نمودار بار بر حسب تغییر مکان است که برای مدل مورد بحث در دو حالت با نظر گرفتن اصطکاک و بدون آن در شکل ۶ نشان داده شده است. مقدار تغییر مکان عمودی پیش بینی شده به کمک مدل بدون اصطکاک ۲۹۷۳ mm و در حالت در نظر گرفتن پدیده اصطکاک معادل ۲۸۷۶ mm به دست آمد. در همین حال، مقدار تغییر مکان عمودی اندازه گیری شده در آزمایشگاه ۲۴-۲۶ mm در نوسان است که با توجه به ساده سازی های انجام شده و نیز خطاهای محاسباتی و اندازه گیری شده از دقت نسبتاً خوبی برخوردار است. در مقام مقایسه بین دقت مقادیر پیش بینی شده تغییر شکل عمودی در تایرهای رادیال [۳-۵] و اریبی می توان گفت که این دقت در باره محاسبات تایلر اریبی کمتر است. دو دلیل عمده برای این مطلب وجود دارد. نخست این که در تایرهای اریبی زاویه الیاف منجید تغییرات زیادی از ناحیه طوقه تا تاج تایر دارد (در تایرهای رادیال این مقدار ثابت است) که اگر چه این تغییرات در محاسبات لحاظ می شود، اما به دلیل آن که تغییرات یاد شده در طول اجزا ثابت فرض می شوند. بنابراین، خطای ناشی از آن موجب بروز خطا در مقادیر نهایی تغییر شکل می شود. افزون بر این، ناحیه رویه در تایرهای اریبی از انحنای بیشتری نسبت به تایرهای رادیال برخوردار هستند. همین امر موجب می شود، زاویه الیاف ناحیه مهارگر تایرهای



شکل ۶ - نمودار بار - تغییر مکان عمودی تایلر برای مدل کلی در دو حالت با در نظر گرفتن اصطکاک و بدون آن.

مزیت روش اول در جامع و کامل بودن مدل بوده و نتایج به دست آمده از آن دقیق است. از سوی دیگر، روش دوم به دلیل صرف نظر کردن از برهم کنش های بین اجزای مختلف (به ویژه ارتباط مکانیکی متقابل بین منجید و رویه تایلر) می تواند موجب بروز خطا در نتایج محاسباتی به ویژه نتایج مربوط به نیروها و تنش ها شود. در مقابل زمان و منابع محاسباتی مورد نیاز در روش اول بسیار زیاد است، در حالی که با روش دوم در مدت زمان کمتری می توان محاسبات مورد نظر را انجام داد. در کار پیشین تیم پژوهشی حاضر [۶،۷] روش نخست برای یک تایلر رادیال سواری به کار برده شده بود. در این طرح، از روش دوم برای یک تایلر باری سنگین با ساختار اریبی و نقش رویه نوار آج استفاده شد و نتایج به دست آمده مورد سنجش قرار گرفت. بر این اساس، ناحیه نقش رویه تایلر مزبور به طور جداگانه انتخاب و به کمک اجزای چهاروجهی ۱۰- گره ای C3D10MH شبکه بندی شد. علت انتخاب اجزای چهاروجهی در برابر اجزای شش وجهی و جبهی که از آن در ساخت مدل کلی استفاده شده بود، پیچیدگی طرح نقش رویه تایلر و یک پارچگی آن است که ناشی از نوار آجی بودن آن است. به عبارت دیگر، وجود طرح پیچیده مانع از امکان پذیری شبکه بندی به کمک اجزای شش وجهی می شود و به ناچار باید از اجزای چهاروجهی استفاده شود. از سوی دیگر، به منظور جلوگیری از کاهش دقت به هنگام استفاده از این نوع اجزا، نوع درجه بالای آن یعنی ۱۰ گره ای استفاده شد تا حداکثر دقت از این راه حاصل شود. شکل ۵ شبکه اجزای محدود مدل کلی را به همراه صفحه صلب انتخابی نشان داده که متشکل از ۵۳۳۶۲ جزء و ۸۶۵۸۶ گره است.



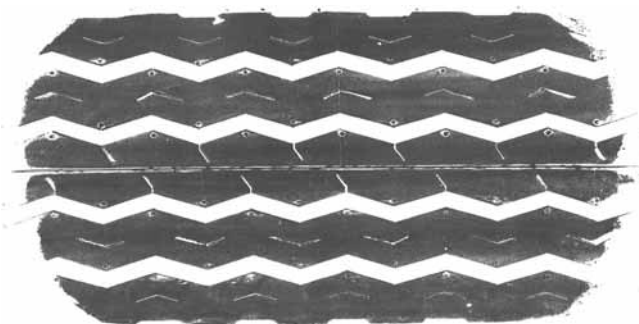
شکل ۵ - شبکه اجزای محدود مدل جزئی ناحیه تماس رویه تایلر از دو نمای مختلف به همراه صفحه صلب.



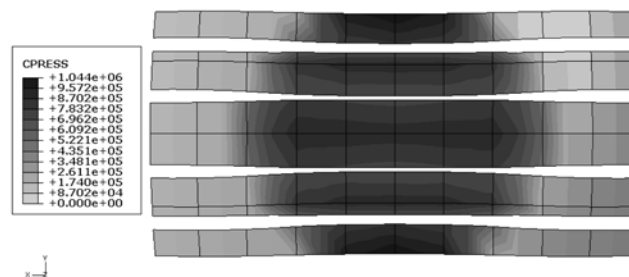
شکل ۹- ناحیه جاپای پیش بینی شده تایر با زمین به وسیله مدل جزئی.

اصطکاک (شکل ۷) بیشینه فشار مربوط به نواحی گوشه‌های جاپا و متمایل به سمت شانه‌های تایر است، در حالی که در مدل با اصطکاک بیشترین توزیع فشار در ناحیه مرکز جاپا مشاهده می‌شود. علت این امر آن است که وقتی از اصطکاک صرف نظر می‌شود، اجزای سطح رویه آزادانه حرکت کرده تا جایی که در گوشه‌های ناحیه سطح تماس به دلیل تغییر ناگهانی در انحنای نیم‌رخ خارجی متوقف و از این رو بیشترین فشار را نشان می‌دهند. از سوی دیگر، در مدل با اصطکاک اجزای رویه در مرکز جاپا به محض تماس با زمین با مقاومت حرکتی در جهت مماسی روبه‌رو شده و در نتیجه همان ناحیه بیشترین فشار را با افزایش اعمال بار متحمل می‌شود. هم‌چنین، مقایسه کیفی توزیع فشار به دست آمده با توزیع فشار محاسبه شده در تایرهای رادیال [۷-۳] مبین آن است که به دلیل تغییر زاویه الیاف در تایرهای اریبی، توزیع فشار ناهمگن‌تر است که به نوبه خود می‌تواند روی رفتار عملکرد اصلی تایر هم چون ساییش و پایداری اثر قابل ملاحظه‌ای بگذارد.

همان‌طور که پیشتر نیز عنوان شد، برای تعیین دقیق متغیرهای ناحیه جاپا باید نقش رویه تایر در مدل لحاظ شود. مدل جزئی توسعه داده شده در این کار با هدف مزبور انتخاب شد. نتایج حاصل از مدل کلی به عنوان شرط مرزی انتخاب و مدل جزئی تحلیل شد. شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب ناحیه جاپای تایر پیش‌بینی شده توسط مدل مزبور و اندازه‌گیری شده به روش تماس مستقیم تایر با سطح زمین را نشان می‌دهند. مقدار طول و



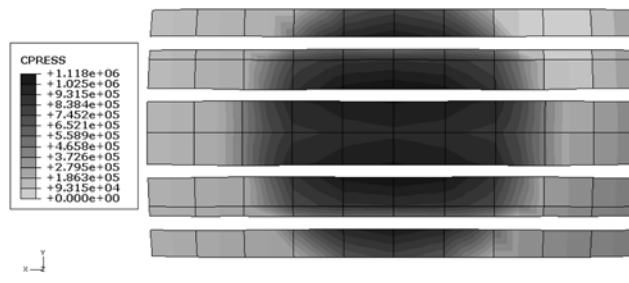
شکل ۱۰- ناحیه جاپای اندازه‌گیری شده به روش تماس مستقیم تایر با زمین.



شکل ۷- توزیع فشار ناحیه تماس در حالت ایستا و بدون در نظر گرفتن اصطکاک.

اریبی تغییرات بیشتری نسبت به تغییرات زاویه الیاف ناحیه تسمه در تایرهای رادیال داشته باشد که این موضوع مزید بر علت می‌شود. دومین علت مربوط به استفاده از الیاف نایلون در تایرهای اریبی است که برخلاف فولاد و سایر الیاف آلی مصرفی در تایرهای رادیال (همانند پلی‌استر) بشدت از لحاظ تغییرات ابعاد به دما وابسته است و ابعاد و به عبارت بهتر جانمایی تایر پس از تکمیل فرایند پخت تغییرات محسوسی با جانمایی اولیه آن در قالب خواهد داشت. در تایرهای رادیال صرف نظر کردن از تغییرات ابعادی بین جانمایی تایر در قالب و شکل اولیه تایر باد نشده که به عنوان مبنای محاسبات اجزای محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد، خطای چندانی ایجاد نمی‌کند، چرا که اساساً این تغییرات بسیار ناچیز هستند. اما، در تایرهای اریبی این اختلاف باید در محاسبات لحاظ شود. نکته مهم در دست نبودن یا به عبارت بهتر امکان ناپذیری تعیین دقیق اطلاعات اولیه مورد نیاز برای این کار مانع از انتخاب صحیح شکل جانمایی مناسب برای شروع محاسبات اجزای محدود شده که رسیدن به آن می‌تواند به عنوان موضوع جدید پژوهشی مطرح باشد.

از پارامترهای بسیار مهم هنگام تحلیل اجزای محدود تایر، توزیع فشار ناحیه تماس است. شکل‌های ۷ و ۸ توزیع فشار ناحیه تماس را در دو حالت بدون اصطکاک و با در نظر گرفتن پدیده اصطکاک نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اولاً به دلیل ساختار پیچیده تر تایرهای اریبی و نیز انحنای رویه توزیع فشار ناهمگن است. ثانیاً در مدل بدون



شکل ۸- توزیع فشار ناحیه تماس در حالت ایستا و با در نظر گرفتن اصطکاک.

تلفیق اجزای توپر لاستیکی با اجزای میله‌ای قرار داده شده در اجزای صفحه‌ای را می‌توان با موفقیت برای تایرهای اریبی نیز به کار گرفت. هم‌چنین، با استفاده از روش تحلیل کلی - جزئی می‌توان ناحیه جاپای تایر را از لحاظ هندسی با دقت بسیار زیاد مدل و بدین ترتیب از انجام مدل‌سازی کال که نیاز به منابع محاسباتی زیاد دارد، اجتناب ورزید. از سوی دیگر، روش یاد شده نمی‌تواند برای پیش‌بینی متغیرهای مکانیکی همانند توزیع فشار و نیرو به کار رود. افزون بر این، برای شبیه‌سازی دقیق تایرهای اریبی باید با استفاده از یک روش مبتنی بر تحلیل عددی یا اندازه‌گیری تجربی نسبت به تعیین دقیق جانمایی اولیه تایر اقدام کرد.

### قدردانی

از مدیریت و معاونت تحقیق و توسعه تکنولوژی شرکت لاستیک پارس به دلیل حمایت مادی و معنوی از اجرای این طرح تشکر می‌شود.

### مراجع

- Ghoreishy M.H.R., A State of the Art Review of the Finite Element Modelling of Rolling Tyres, *Iran. Polym. J.*, **17**, 571-597, 2008.
- Ghoreishy M.H.R. and Soltani S., Finite Element Analysis of the Steady Rolling Behavior of a Truck Tire, *ISPST 2007*, Tehran, Iran, 2007.
- Ghoreishy M.H.R., Finite Element Analysis of a Steady Rolling Tyre with Slip Angle: Effect of Belt Angle, *Plast. Rubber Compos. Macromol. Eng.*, **35**, 83-90, 2006.
- Ghoreishy M.H.R., Steady State Rolling Analysis of a Radial Tyre: Comparison with Experimental Results, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part D: J. Automobile Eng.*, **220**, 713-721, 2006.
- Ghoreishy M.H.R., Finite Element Analysis of a Steel-Belted Radial Tyre with Tread Pattern under Contact Load, *Iran. Polym. J.*, **15**, 667-674, 2006.
- Ghoreishy M.H.R., Malekzadeh M., and Rahimi H., A Parametric Study on the Steady State Rolling Behaviour of a Steel-Belted Radial Tyre, *Iran. Polym. J.*, **16**, 539-548, 2007.
- Ghoreishy M.H.R. and Abtahi M., A Theoretical and Experimental Study on the Footprint Analysis of a 185/65R14 Radial Tyre with Tread Pattern Using Finite Element Method, *Iran. J.*

عرض پیش‌بینی شده ناحیه جاپا به ترتیب برابر ۲۹۴ و ۲۰۴ mm و مقادیر تجربی آنها معادل  $295 \pm 5$  و  $210 \pm 3$  mm است. انطباق بسیار خوب بین مقادیر یاد شده حاکی از کاربردی بودن روش ارائه شده است. اما، در مقابل توزیع فشار این ناحیه که از روش یاد شده پیش‌بینی می‌شود، تفاوت فاحشی با مقادیر پیش‌بینی از مدل کلی دارد که علت این امر نیز در صرف نظر کردن از مقادیر سفتی منجید تایر و برهم‌کنش بین نواحی رویه و منجید است و از معایب این روش به شمار می‌آید.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل‌سازی تایر به کمک روش اجزای محدود که برای تایرهای رادیال ایجاد شده برای شبیه‌سازی تایر اریبی باری سنگین به کار گرفته شد. در این کار نشان داده شد، روش اجزای محدود مبتنی بر

*Polym. Sci. Technol., (In Persian)*, **20**, 589-598, 2008.

- Seta E., Nakajima Y., Kamegawa T., and Ogawa H., Hydroplaning Analysis by FEM and FVM: Effect of Tire Rolling and Tire Pattern on Hydroplaning, *Tire Sci. Technol.*, **28**, 140-156, 2000.
- Han Y.H., Becker E.B., Fahrenthold E.P., and Kim D.M., Fatigue Life Prediction for Cord-Rubber Composite Tires Using a Global-Local Finite Element Method, *Tire Sci. Technol.*, **32**, 23-40, 2004.
- ABAQUS/Standard Theory Manual, Version 6.8, 2008.
- Danielson K.T. and Noor A.K., Finite Elements Developed in Cylindrical Coordinates for Three-dimensional Tire Analysis, *Tire Sci. Technol.*, **25**, 2-28, 1997.
- Marlow R.S., A General First-Invariant Hyperelastic Constitutive Model, in *Constitutive Models for Rubber III*, Busfield J. and Muhr A.H., (Eds.), Swets and Zeitlinger, Lisse, 2003.
- Ghoreishy M.H.R., A Parametric Study on the Effect of the Rim Diameter in a Radial Tire Performance Using Finite Element Method, *Iran. Rubber Magaz.*, **13**, 4-12, 1387.
- De Eskinazi J. and Ridha R.A., Finite Element Analysis of Giant Earthmover Tires, *Rubber Chem. Technol.*, **55**, 1044-1054, 1982.