نشریه صنعت لاستیک ایران
سال۲۵/شماره ۹۹/پاییز ۱۳۹۹

علمی- فنی

# مروری بر شبیه سازی مقاومت غلتشی در صنعت تایر

# Review of rolling resistance simulation in tire industry

**چکیده:**

**مقاومت غلتشی به دلیل تأثیر قابل توجه آن بر مصرف سوخت خودرو در هسته اصلی اهداف توسعه تایر قرار دارد. برخلاف روش تجربی، روش شبیه‌سازی المان محدود یک روش تخمین ارزان و کارآمد است. با این حال، روش المان محدود می‌تواند به عنوان یک راهکار کاملاً پیشرفته مخصوصاً برای تخمین مقاومت در برابر غلتش شناخته شود. در این مقاله گزارش‌های مربوط به مدل سازی المان محدود از چرخش تایر در طی ده سال اخیر جمع آوری شده است. مقاله با معرفی مقاومت غلتشی، مکانیزم مقاومت غلتشی از جنبه مکانیکی و ضریب مقاومت غلتشی شروع و در ادامه مجموعه کاملی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه شبیه‌سازی مقاومت غلتشی به روش المان محدود توسط محققان در طی ده سال اخیر آورده شده است. در نهایت هندسه متقارن دو بعدی و سه بعدی مش‌زده شده از یک سطح مقطع تایر واقعی که در نرم افزار المان محدود شبیه‌سازی شده است به همراه جزییات شبیه‌سازی ارائه شده است.**

**واژه‌های کلیدی: تایر، مقاومت غلتشی، شبیه سازی**

**نوع مقاله:** مروری

**مرتضی رشیدی مقدم**
**۱- دکترای تخصصی،اداره تحقیقات و توسعه گروه صنعتی بارز، تهران، ایران، شماره تماس: ۰۹۱۰۳۱۳۳۱۶۶**

*** عهده دار مکاتبات:**

**morteza_rashidi@alumni.iust.ac.ir**

**تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۳۱**
**تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۹**

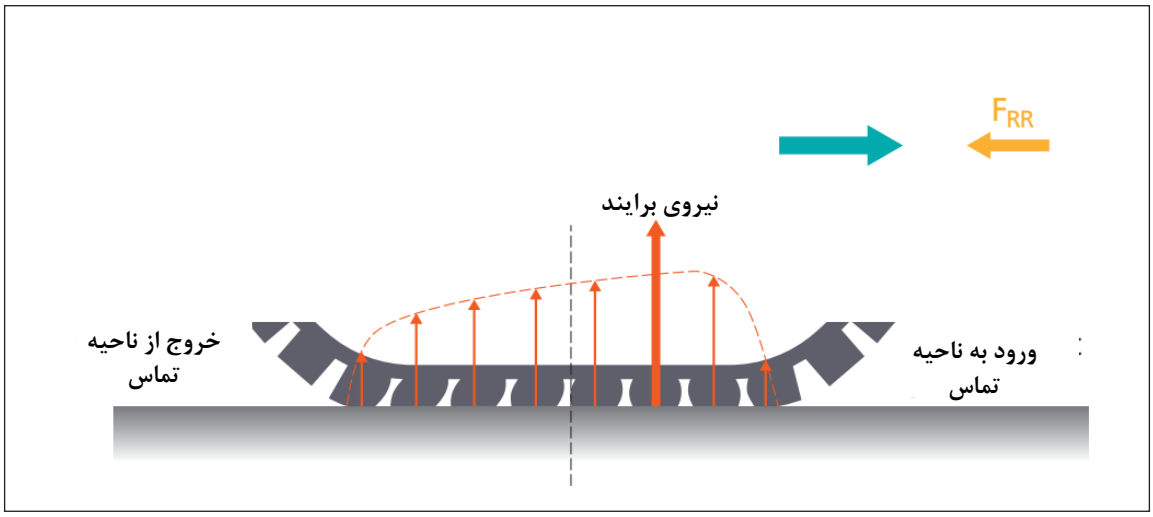
## مقدمه

### معرفی مقاومت غلتشی

تایر یک ساختار بسیار پیچیده می‌باشد و طراحی آن نیاز به دانش کافی در این زمینه nhvn. یکی از مواردی که در طراحی تایر باید در نظر گرفته شود، اتلاف انرژی در اثر حرکت دورانی تایر است. صرف‌نظر از نیرو دراگ آیرودینامیک و اصطکاک بین تایر و سطح جاده، مقاومت غلتشی ناشی از خاصیت‌کشسانی لاستیک عامل بسیار مهم و تأثیرگذار در اتلاف سوخت و انرژی حاصل از آن می‌باشد. مصرف انرژی در خودرو باعث حرکت چرخ‌ها و خودرو می‌شود. در حالی‌که چرخ‌ها حرکت می‌کنند، تایر تحت تاثیر نیروی وزن خودرو تغییر شکل می‌دهد و سطح تماس با جاده را به‌وجود می‌آورد. تمام نیروهای مورد نیاز برای شتاب‌گیری، ترمزگیری و حرکت پیچشی (جانبی) خودرو از طریق این سطح تماس به جاده منتقل می‌شود. تغییر شکل تایر در سطح تماس باعث جذب ناهمواری‌های جاده نیز می‌شود. این تغییر شکل در ناحیه‌ی تماس، از قابلیت‌های تایر است که هم زمین چسبی تایر و هم راحتی سرنشین را فراهم می‌کند [۱].

مسئله گرمایش جهانی امروزه یکی از بزرگترین نگرانی‌های بین‌المللی هست و صنعت حمل و نقل بزرگترین کمک کننده به انتشار گازهای گل خانه‌ای پس از صنعت تولید برق می‌باشد. اجزای لاستیک یک تایر اتومبیل در حالت دوران، دچار تغییر شکل دینامیکی می‌شود و به صورت متناوب تحت یک میدان تنش و کرنش قرار می‌گیرد. در اثر تغییر شکل به علت آنکه تغییرات تنش و کرنش هم فاز نیستند و اجزای لاستیک خاصیت پسماند۲ دارند، اتلاف انرژی در داخل تایر رخ خواهد داد و این اتلاف انرژی در واقع به صورت یک نیروی مقاوم در برابر چرخش تایر می‌باشد. این نیروی ساختگی معمولاً به عنوان مقاومت غلتشی[1] شناخته می‌شود، بنابراین کاهش این نیروی مقاوم در برابر حرکت یکی از بزرگترین مسائل روز صنعت لاستیک است. همچنین مقاومت غلتشی تایر بطور قابل ملاحظه‌ای به ساختار تایر بستگی دارد. بنابراین طراحی تایرهای رادیال باری نوین با مقاومت غلتشی کم و در نتیجه کاهش مصرف سوخت بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۲].

مقاوت غلتشی اساساً ناشی از خاصیت کشسانی درلاستیک های استفاده شده در تایر می‌باشد. هنگامی که یک تایر شروع به چرخش می‌کند در اثر باری که بر روی آن اعمال شده است دچار تغییر شکل می‌شود به طوریکه در ناحیه تماس با جاده به شکل




شکل۱ توزیع نیرو بر روی سطح ترد تایر

1. Rolling Resistance

تخت در می‌آید.

در بعد مفاهیم مکانیکی مقاومت غلتشی می‌توان با در نظر گرفتن یک تایر در حال چرخش و بررسی نیرو عکس العمل عمودی مشاهده کرد که همواره مجموع نیروها در نصف جلوی ناحیه تماس بزرگتر از مجموع نیروها در نصف عقب ناحیه تماس می‌باشد. بنابراین همواره جمع این نیروها (Z-) در ناحیه جلویی سطح تماس قرار می‌گیرد (شکل ۱). محل قرار گیری دو نیروی عکس‌العمل سطح (Z-) و نیروی وزن در محل تماس (Z) باعث ایجاد یک گشتاور می‌شود که این گشتاور در خلاف جهت حرکت چرخ است. در واقع یک نیروی مقاوم در برابر حرکت رو به جلوی چرخ وجود دارد این نیرو همان نمایش مکانیکی اتلاف انرژی به علت تغییر شکل تایر در ناحیه تماس می‌باشد که از آن به عنوان نیروی مقاومت غلتشی ($F_{RR}$) یاد می‌شود (شکل ۲) [۲].

## واحد مقاومت غلتشی

مقاومت غلتشی به عنوان انرژی مصرف شده توسط تایر بر واحد مسافت تعریف می‌شود. بنابراین نوع مقاومت غلتشی از نوع انرژی (نیوتن-متر) می‌باشد که با تقسیم بر واحد مسافت پیموده شده (متر) به واحد نیرو (نیوتن) برای مقاومت غلتشی خواهیم رسید. نیروی مقاومت غلتشی در یک وسیله نقلیه به نوع تایر و وزن آن بستگی خواهد داشت.

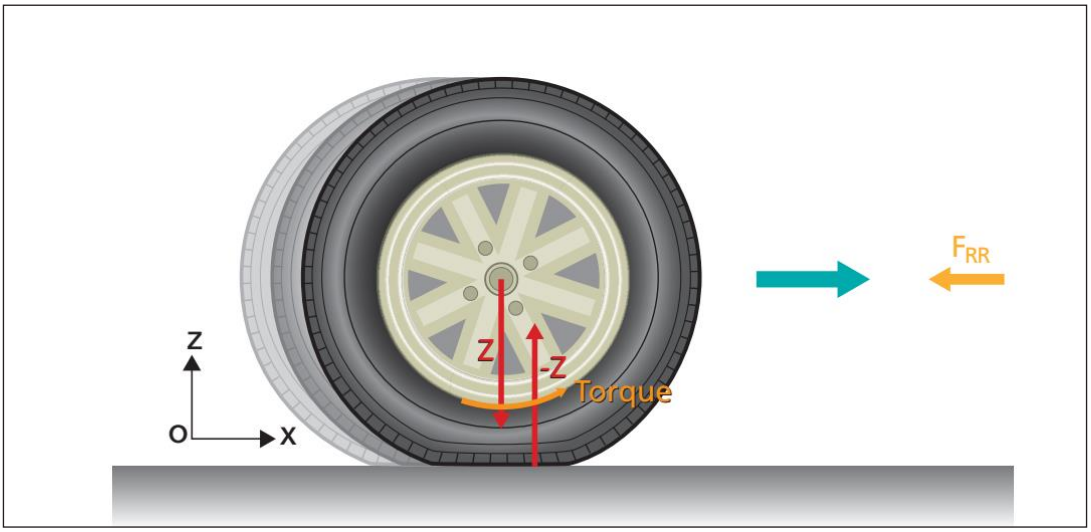
## ضریب مقاومت غلتشی

ضریب مقاومت غلتشی تعریف که با نماد $C_{RR}$ نمایش داده می‌شود و مساوی است با :

$$C_{RR} = \frac{F_{RR}}{Z}$$

طبق تعریف، ضریب در واقع یک کمیت بدون واحد می باشد. برای ضریب مقاومت غلتشی نیز نیروهای $F_{RR}$ و Z (نیروی وزن) هر دو طبق استاندارد بین المللی یا واحد نیوتن بیان می شوند و بنابراین ضریب مقاومت غلتشی یک کمیت بدون واحد خواهد بود. ضریب مقاومت غلتشی بر حسب درصد نیز قابل بیان خواهد بود.

برخی مواقع نیروی $F_{RR}$ برحسب واحد قدیمی کیلوگرم-نیرو (یک کیلوگرم-نیرو معادل نیروی گرانشی وارد بر یک کیلوگرم




شکل۲ ایجاد نیروی مقاومت غلتشی حاصل گشتاور ایجاد شده

جرم می‌باشد (1kgf=9.81 N) و نیروی Z نیز بر حسب واحد تن-نیرو ارائه می شود. در این حالت ضریب مقاومت غلتشی بر حسب واحد کیلوگرم-تن (kg/tonne) بیان می شود. بیان 12kg/t ضریب مقاومت غلتشی در واقع به این معنا است که اگر روی یک تایر بر نیروی معادل یک تن قرار گرفته شده باشد، ۱۲ کیلوگرم- نیرو تقریباً معادل ۱۲۰ نیوتن نیرو، احتیاج است تا سرعت تایر در اثر مقاومت غلتشی کاهش پیدا نکند. این مقدار 12kg/t به این صورت نیز قابل توجیه است که اگر یک وسیله نقلیه دارای تایرها با ضریب مقاومت غلتشی 12kg/t باشد مقدار انرژیی که این وسیله در حین حرکت با سرعت ثابت مصرف می کند دقیقا معادل انرژیی است که این وسیله نقلیه در یک سطح با شیب ۱,۲ ٪ هل داده شود.

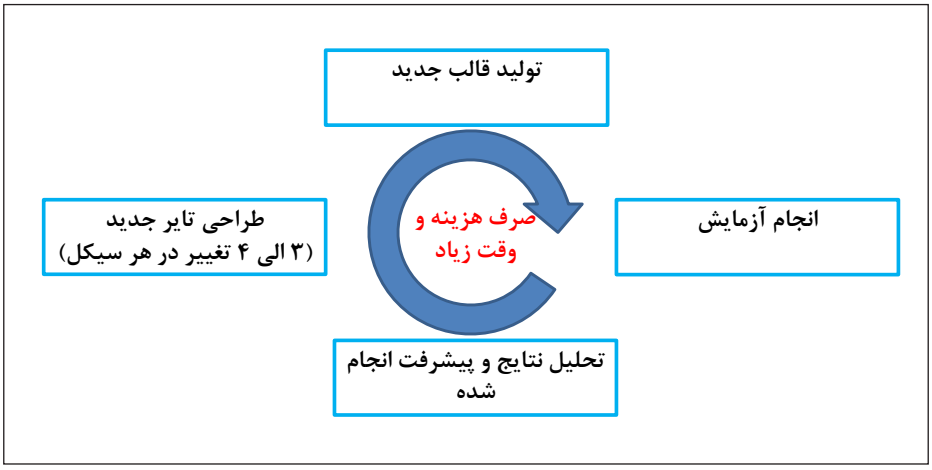
## ویژگی‌های شبیه سازی المان محدود

در سال‌های اخیر، روش المان محدود[1] در حوزه طراحی تایر به شدت مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از این روش به‌علت پیچیدگی ساختار تایر، بسیار سودمند و تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی برای تحلیل حوزه‌های تنش-کرنش و ارتعاشاتی از لحاظ سادگی بسیار اثر بخش بوده است [۳]. در شکل ۳ یک فرایند لازم برای اعمال تغییرات و دیدن نتایج به صورت عملی نشان داده شده است. بعد از آنکه اقدامات اولیه مورد آزمون قرار گرفت، با توجه به نتایج اولیه باید تغییرات جدید اعمال شود و سپس قالب جدید ساخته و در نهایت آزمایش انجام شود. این فرایند معمولاً چندین حلقه را برای بدست آوردن بهترین نتایج طی می‌کند که باعث صرف هزینه و انرژی‌های بسیار زیادی خواهد شد. از طرف دیگر، اگرچه همگرایی این روند تکرار شده از لحاظ ریاضی تضمین نشده است، مهندسان و طراحان معمولا بعد از ۲-۳ حلقه به نتایج بدست آمده اعتماد خواهند کرد [۳].

## مروری بر شبیه سازی های المان محدود در زمینه مقاومت غلتشی تایر

رابطه بین مقاومت غلتشی و ویژگی‌های پسماند دینامیکی و کشسانی لاستیک در تایر بسیار پیچیده است. تعیین مقدار کمی نیروی مقاومت غلتشی به علت وجود متغیرهای مختلفی همچون فشار، نیرو، سرعت، تغییر شکل و متغیرهای طراحی تایر و همچنین ویژگی‌های پسماند تنش-کرنش مختلف در مواد متفاوت و تاثیر مواد مختلف بر یکدیگر بسیار مشکل می‌باشد [۴].

در این قسمت تکنیک‌های مختلفی در زمینه شبیه‌سازی چرخش تایر حاصل از تحقیقات محققان مختلف آورده شده




شکل۳ روند تحقیق و توسعه تایر به شیوه آزمایشگاهی [۳]

1. Finite Element Method 2. Padovan 3. Watanable 4. Camber force 5. Steady State

است. برای اولین مدل سازی می‌توان به سال ۱۹۸۴ اشاره کرد که پادوان[۲] و همکارانش [۵] به منظور حل مسئله چرخش تایر، یک مدل بر اساس مختصات لاگرانژ کلی حرکت ابداع کردند. با استفاده از مدل کردن قضیه تماس در رابطه با راهبرد المان محدود، یک حل کلی برای تماس غلتش کشسانی در حالت ثابت و گذرا توسعه دادند. برای اعتبارسنجی، نتایج مربوط به هر دو آزمایش‌های تجربی و تحلیلی را مورد استفاده قرار دادند. در ادامه واتنبی[۳][۶] یک مدل المان محدود برای تحلیل نیروی کمبر[۴] در یک تایربایاس موتورسیکلت استفاده کرد. با به کار بردن مدل المان محدود روی صفحه جاده، نیروهای غالب در ناحیه تماس از یک تایر کج نسبت به صفحه جاده محاسبه شد و مکانیزم عدم تقارن وابسته از نیروی کمبر که تولید شده است، مورد تحلیل قرار گرفت. سپس با چرخش تایر متمایل شده در یک تغییر شکل عمودی ثابت، مکانیزم وابسته به فاصله و چرخش از نیروی کمبر تولید شده بررسی و تحلیل شد.

در این زمینه تحقیقات و مدل‌سازی گسترده‌ای انجام شده است و تمرکز این مقاله بیشتر روی پژوهش‌های انجام شده در ده سال اخیر خواهد بود. کرونووی و همکارانش [۷و۸] یک مدل المان محدود برای تحلیل تایر در حال دوران در حالت پایدار[۵] معرفی کردند. این مدل نسبت به مدل‌های قبلی معرفی شده توسط پژوهشگران، دارای مزایای بیشتری، از جمله زمان کمتر حل مسئله همراه با دقت بالاتر، می‌باشد. آن‌ها یک الگوریتم مرحله به مرحله از تعریف هندسه تا تحلیل Cornering را معرفی کردند.

قوش[۱] و همکارانش [۹ و ۱۰] مقاومت غلتشی مربوط به دو ز تایر رادیال سواری 205/60R15 و 55/70R14 با ترد نانوکامپوزیت را با استفاده از المان محدود بررسی کردند. آن‌ها اتلاف انرژی را با استفاده از محاسبه انرژی کرنشی الاستیک و در نظر گرفتن Tan delta محاسبه کردند که مقدار انرژی کرنشی از طریق مدل سازی حالت پایدار تایر و پارامتر Tan delta از مقادیر آزمایشگاهی حاصل شده بود. نانوکامپوزیت های مورد استفاده آن‌ها از لاستیک استایرن بوتادین محلولی و لاستیک پلی بوتادین با دو ماده پرکننده آلی و دوده و سیلیس تهیه شده بودند.لاستیک نیتریل کربوکسیل[۲] دارند. یک لاستیک قطبی، به عنوان سازگار کننده برای تسهیل پراکندگی رس در ماتریس لاستیک استفاده شده بود. در مقایسه با ترکیبات عمومی آج سیاه یا دوده ، بهبود قابل توجهی از مقاومت غلتشی با شبیه سازی المان محدود با ترکیبات ترد بر پایه نانوکامپوزیت حاوی پرکننده های دوتایی آلی-دوده یا آلی-رس سیلیس پیش بینی شده است.

چو[۳] و همکارانش [۱۱]، مقاومت غلتشی و توزیع دمایی برای یک تایر دارای طرح در حالت سه بعدی که ناشی از دست دادن پسماند مربوط به آمیزه لاستیک کشسان می‌باشد، با استفاده از مدل تایر دارای طرح سه بعدی به صورت عددی پیش‌بینی کردند. آن‌ها این مدل سه بعدی را با کپی کردن یک قطاع مش‌بندی شده در جهت محیطی ایجاد کردند. با استفاده از تحلیل تماس تایر استاتیک سه بعدی، سیکل بارگذاری مربوط به کرنش در طول یک دور چرخش تایر تخمین زده شد. با استفاده از کرنش‌ها در نقاط گوس از المان‌هایی که در طول چرخش تایر تکرار می‌شوند. دامنه کرنش در طول دوران یک دور چرخش تایر با به کار بردن مقادیر اصلی از نیم دامنه برای هر جز از کرنش در حالت کرنش چند محوره محاسبه کردند. کاهش پسماند در طول یک دور چرخش تایر در ترم‌هایی از کاهش مدول آمیزه لاستیک و مقدار اصلی حداکثر مربوط به نیم دامنه از اجزا شش گانه کرنش پیش‌بینی شده است. مقایسه نتایج مربوط به این محاسبات مقاومت غلتشی حاصل از نیم دامنه های کرنش با نتایج آزمایشگاهی نشان از دقت بالای این روش دارد.

نانندی[۴] و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۱۴ نشان دادند که محاسبه اتلاف انرژی کشسان با در نظر گرفتن مدل کشسان خطی برای کرنش‌های محدود دقیق نیست. با استفاده از مدل چارچوب رئولوژیکی موازی[۵] (PRF) در نرم‌افزار آباکوس[۶] (یک مدل کشسان غیرخطی)، محاسبات مربوط به اتلاف انرژی کشسان

1. Ghosh 2. Carboxylated nitrile rubber 3. Cho 4. Nandi 5. Parallel rheological framework 6. ABAQUS

نسبت به حالت‌های قبل از دقت بیشتری برخوردار خواهد بود. آن‌ها به بررسی انواع مدل‌های کشسان خطی و غیر خطی در نرم افزار آباکوس پرداختند. آن‌ها همچنین به بررسی روش کالیبره‌کردن پارامترهای مربوط به PRF از اطلاعات مربوط به خواص ماده و علاوه بر محاسبه اتلاف انرژی کشسان بر اثر چرخش تایر، به صورت مختصر به بررسی توزیع دما در تایر به علت اتلاف انرژی پرداختند.

اندرسون و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۱۵ به بررسی مقاومت غلتشی انجام شده توسط محققان در زمینه های چگونگی اندازه‌گیری و تکنیک‌های آن و همچنین مدل‌سازی سطح تماس و سطح جاده و انواع مدل‌های تایر و مدل‌های ماکرو در زمینه مقاومت غلتشی پرداختند.

همچنین یک مدل ریاضی جامع توسط ریدروس و همکارنش [۱۴] منتشر شد که در آن مقاومت غلتشی به صورت تحلیلی بر اساس سرعت، بار، اندازه تایر و فشار داخلی بیان شده بود، البته در این مدل لغزش طولی در نظر گرفته نشده بود. در اعتبار سنجی این مدل، آن‌ها نشان دادند که مدل مورد نظر برای افزایش ۸,۳ درصدی شعاع خارجی تایر از ۶۰ سانتی متر به ۶۵ سانتیمتر، یک کاهش ۴/۸ ٪ در مقاومت غلتشی پیش بینی می‌کند که نتایج واقعی آزمایشگاهی این کاهش را ۵٪ نشان می‌داد.

گل بخشی [۴] و همکاران برای برطرف کردن مشکل طولانی شدن حل‌های عددی با درنظر گرفتن دینامیک گذرا و نوسانات بسیار زیاد عددی در این نوع حل‌ها، از تکنیک اضافه کردن بارهای معادل به تعامل استاتیکی تایر با جاده و از این تکنیک برای محاسبه مقاومت غلتشی استفاده کردند.

هوور[1] و همکارانش [۱۵] به بررسی تاثیر نوع سطح جاده و طرح ترد تایر بر روی مقاومت غلتشی پرداختند. آن‌ها یک مدل تماسی بین سطح جاده و تایر برای محاسبه اتلاف انرژی به علت تغییر شکل های ترد در مقیاس کوچک در انواع شکل‌های طرح توسعه دادند. برای محاسبه اتلاف انرژی در اثر چرخش تایر از نیروهای تماسی و ارتعاشات تایر برای تقابل بین تایر و جاده تحت غلتش حالت پایدار استفاده کردند. مقاومت غلتشی برای مجموعه ای از ترکیبات مختلف جاده و تایر محاسبه شده بود. آن‌ها نتایج را با اندازه‌گیری‌های تجربی مربوط به مقاومت غلتشی مقایسه کردند و دریافتند که انطباق خوبی بین شبیه سازی و نتایج واقعی وجود دارد. آن‌ها دریافتند که ساختار تایر و تغییرشکل‌های سطح ترد در مقیاس کوچک، هر دو در اتلاف انرژی ناشی از چرخش تایر سهیم می‌باشند. اثر تغییر شکل‌های مربوط به ساختار تایر در اتلاف انرژی با تغییر پروفایل سطح جاده چندان تغییری نمی‌کند اما این تغییر شکل‌های کوچک مربوط به سطح ترد شدیدا به نوع پروفایل جاده وابسته هستند. عمق متوسط پروفایل سطح جاده با مقاومت غلتشی بسیار در ارتباط است. برای سطوح هموار درصد سهم تغییرشکل‌های سطح ترد در اتلاف انرژی در حدود ۰ تا ۲۵ درصد می‌باشد اما برای جاده های ناهموار تا ۵۰ درصد قابل تغییر است. بنابراین برای سطوح ناهموار جاده سطح ترد تایر اهمیت بسیار ویژه ای دارد و در حالت سطوح هموار اهمیت تغییر شکل در ساختار تایر در مقاومت غلتشی اهمیت بسیار زیادی پیدا می‌کند.

وی[2] و همکارانش [۱۶] به پیش‌بینی مقاومت غلتشی بر روی جاده ناهموار از طریق شبیه‌سازی پرداختند. ناهمواری جاده با استفاده از روش تبدیل فوریه گسسته معکوس[3] ایجاد شد. آن‌ها اثرات مختلف ناهمواری‌های جاده و سرعت‌های مختلف حرکت در مقاومت غلتشی را بررسی کردند. آن‌ها برای تحلیل ویژگی‌های دینامیک گذرا از برنامه صریح[4] المان محدود استفاده کردند که مقدار مقاومت غلتشی به وسیله پاسخ دینامیک طولی محاسبه شده است. آن‌ها مشاهده کردند که در حالت شبیه‌سازی پایدار پسماند مواد نقش بسیار مهمی در مقاومت غلتشی تایر دارد، درحالیکه در حالت جاده ناهموار این پارامتر تاثیر کمرنگی خواهد داشت و عامل مهم تر نیروهای تماسی گذرا طولی می‌باشد.

هرناندز [۱۷] و همکارانش مقدار مقاومت غلتشی برای مقادیر مختلف نیروی وارد بر تایر، فشار داخلی، سرعت و دمای محیط را پیش بینی کردند و با رگرسیون بر روی این اطلاعات، توانستند

1. Hoever 2. Wei 3. Inverse Discrete Fourier Transform 4. Explicit

مقاومت غلتشی را به صورت تابعی از این پارامترها بدست آورند. آن‌ها مشاهد کردند که دما و نیروی وزن بیشترین اثر را روی مقاومت غلتشی تایر دارا می‌باشند، در حالیکه فشارداخلی و سرعت به طور قابل ملاحظه مقدار مقاومت غلتشی را تغییر نمی‌دهند. آن‌ها همچنین نشان دادند که لاستیک های مربوط به قسمت‌های سایدوال و زیرترد تایر بیشترین اثر را در مقدار مقاومت غلتشی تایر برای سطوح هموار دارا می‌باشند.

الدهوفیری[1] و همکارانش به مطالعه رفتارهای کشسان مواد در المان محدود در دو حالت خطی و غیرخطی، به ترتیب با استفاده از سری پرونی و چارچوب رئولوژیکی موازی[2] (PRF) برای محاسبه مقاومت غلتشی تایر و میزان دقت مدل پرداختند. آن‌ها یک روش واحد برای تخمین مقاومت غلتشی بر اساس ضرایب انرژی پسماند تایر معرفی کردند. آن‌ها دریافتند که انتخاب PRF غیرخطی باعث می‌شود که محاسبات مربوط به مقاومت غلتشی با نتایج آزمایشگاهی و تحقیقات مربوط به موارد فشار و نیروی عمودی مختلف انطباق خوبی داشته باشد، در حالی که سری پرونی برای تغییرشکل تایر نتایج قابل قبول و قابل اعتمادی ارائه نمی‌دهد [۱۸].

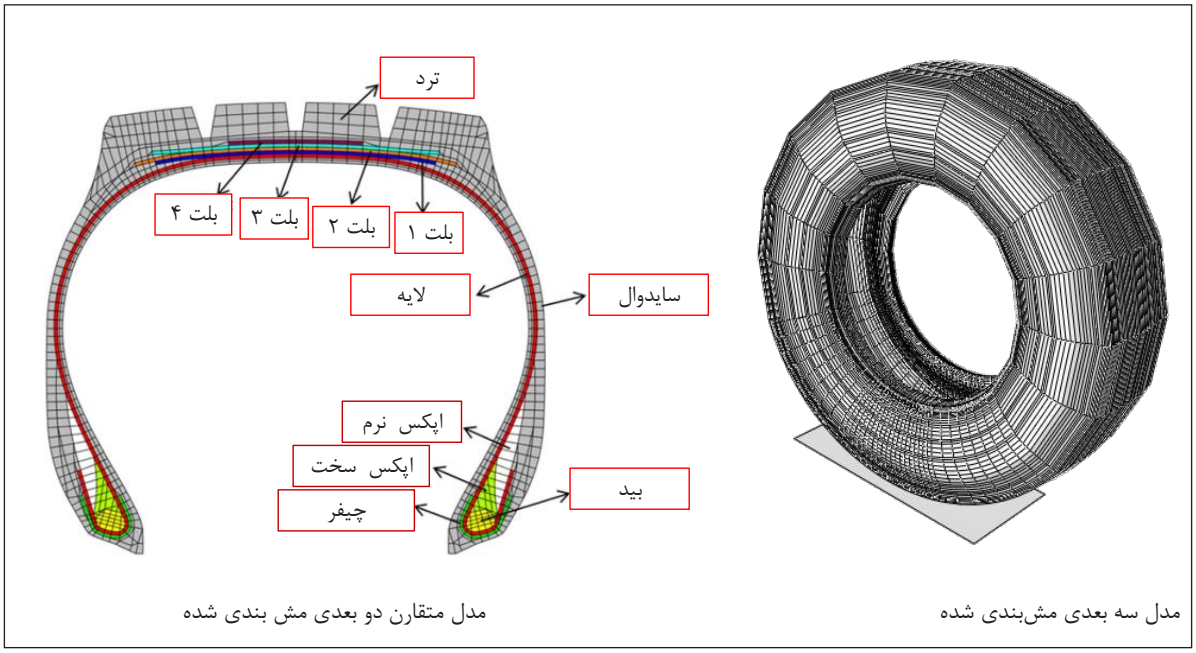
مشدی و همکارانش [۱۹] برای دست‌یابی به یک تخمین عددی از مقاومت غلتشی یک مدل جامع برای پیش بینی تغییرات نیروی مقاومت غلتشی بر حسب سرعت ارائه دادند. آن‌ها از یک مدل سه بعدی به همراه خاصیت هایپر-ویسکوالاستک لاستیک در یک تایر باد شده و تحت نیروی عمودی سطح استفاده کردند. آن‌ها نمودار تغییرات نیروی مقاومت غلتشی بر حسب سرعت و فشار داخلی و یک فرمول کلی برای پیش بینی مقاومت غلتشی بر حسب فاکتورهای موثر همچون سرعت، فشار داخلی و بار روی تایر بدست آوردند. آن‌ها نشان دادند که بدست آوردن یک ارتباط بین پارامترهای موثر با نیروی مقاومت غلتشی و صحت آن می‌تواند از انجام بسیاری از آزمایش‌های مقاومت غلتشی با هزینه‌های زیاد جلوگیری کند.

در بیشتر پژوهش های انجام شده نوع شبیه سازی تایر در نرم افزارهای المان محدود به صورت کلی بدین صورت می‌باشد که بدنه تایر از یک لایه از جنس فولاد و ناحیه بلت‌ها شامل چهار بلت از جنس فولاد می‌باشد. در ابتدا یک مدل متقارن محوری برای آنالیز فشار داخلی و حلقوی کردن استفاده می‌شود. در این مدل‌ها از المان CAX4H برای نمایش همه قسمت‌های لاستیک استفاده می‌شود. این المان از نوع غیرخطی چهار گره‌ای، به همراه قابلیت پیچش و فشار ثابت برای در نظر گرفتن ویژگی غیر قابل تراکم‌پذیر بودن لاستیک می‌باشد. اجزای استحکام دهنده تایر همچون لایه، بلت، چیفر سیمی و سیم‌های ناحیه بید با استفاده از یک ویژگی به نام Rebar به همراه المان سطحی SFMAX1 مدل سازی شده است که این المان از نوع المان سطحی متقارن محوری خطی دو گره‌ای است. در این شبیه سازی‌ها در ابتدا مدل دوبعدی در قسمت پاشنه بید به اندازه مورد نظر به سمت مرکز تایر حرکت داده می‌شود تا فرایند حلقوی کردن شبیه سازی شود و بعد از آن تحت بارگذاری فشار داخلی ثابت قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از دستور revolve، مدل سه بعدی حاصل از این مدل دو بعدی حول محور تقارن خود حاصل می‌شود. در این مدل سه بعدی در ناحیه تماس با سطح جاده، اندازه المان‌ها برای افزایش دقت تا حد ممکن کوچک در نظر گرفته می‌شود. این مدل دو بعدی و سه بعدی برای نمونه در شکل ۴ نشان داده شده است.

## نتیجه‌گیری

بیشتر از ۷۰ درصد تایر از لاستیک تشکیل شده است. لاستیک‌ها به علت داشتن خواص کشسانی، در داخل تایر بر اثر حرکت دورانی دچار تغییر شکل‌های کششی و فشاری متناوب می‌شوند که نتیجه آن اتلاف انرژی در محدوده ۱۰-۳۰ ٪ می‌باشد. بنابراین محاسبه این نوع اتلاف انرژی در حوزه صنعت تایر بسیار حایز اهمیت می‌باشد و به همین دلیل در حوزه شبیه سازی مقاومت غلتشی در طی ده سال اخیر تحقیقات بسیار گسترده‌ای انجام شده

1. Aldghufairi 2. Parallel rheological framework




شکل۴ مدل دو بعدی و سه بعدی حاصل از تایر رادیال باری 315/80R22.5 [۲۰]

است. وجود عوامل مختلف خارجی و داخلی (همچون فشار داخلی، سرعت، دمای محیط، ساختار تایرو جنس مواد تشکیل دهنده تایر) که بر روی مقاومت غلتشی اثرگذار می‌باشند، باعث شده است که شبیه‌سازی این پارامتر در تایر از پیچیدگی‌های خاص خود برخوردار باشد. در این مقاله مجموعه کاملی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه شبیه‌سازی مقاومت غلتشی به روش المان محدود توسط محققان در طی ده سال اخیر آورده شد.

**سپاسگزاری**

نویسنده از حمایت‌های اداره تحقیقات و توسعه گروه صنعتی بارز صمیمانه تشکر می‌کند IRM

**مراجع**

[۱] فریبرز تاجدینی، مقاومت غلتشی و صرفه جویی در مصرف سوخت، نشریه علمی صنعت لاستیک ایران، دوره ۲۱، شماره ۸۴؛ زمستان ۹۵، صفحه ۴۴-۴۸

[2] The tire rolling resistance and fuel savings, Société de Technologie Michelin 23, rue Breschet, 63000 Clermont-Ferrand, 2003.

[3] Jani K. Ojala., “Using ABAQUS in tire development process”. Nokian Tyres plc., R&D/Tire Construction.

[4] Golbakhshi, H. and Namjoo, M., “An Efcient Numerical Scheme for Evaluating the Rolling Resistance of a Pneumatic Tire,” International Journal of Automotive Engineering, 5(2):1009-1015,2015.

[5] Padovan J, Paramadilok O, “Transient and steady state viscoelastic rolling contact,” Comput Struct, 20, 545-553, 1984.

[6] Watanabe Y, “Mechanism of camber thrust generation in a bias-ply motorcycle tire,” Vehicle Sys Dyn,13, 173-186, 1984.

[7] Korunović, N., Trajanović, Stojković M., “ Steady state rolling analysis of tires: a cavity shape study” mechanical engineering, 10-11. 10, 2007a.

[8] Korunović N., Trajanović M., Stojković M. “ FEA of tires subjected to static loading, Journal of the Serbian Society for Computational mechanics”, Vol. 1, No 1, 2007b , pp 87-98, 2007b

[9] S. Ghosh, R.A. Sengupta, and G. Heinrich, Investigations on Rolling Resistance of Nanocomposite Based Passenger Car Radial Tyre Tread Compounds Using Simulation Technique. Tire Sci. Technol. Vol 39 (3): 210-222, 2011.

[10] Ghosh, S., “Investigation on Role of Fillers on Viscoelastic Properties of Tire Tread Compounds,” Doctor of Philosophy, Maharaja Sayajirao University of Baroda, India, 2011.

[11] Cho, J., Lee, H., Jeong, W., Jeong, K., and Kim, K., “Numerical Estimation of Rolling Resistance and Temperature Distribution of 3-D Periodic Patterned Tire,” International Journal of Solids and Structures 50(1):86-96, 2013.

[12] Nandi, B., Dalrymple, T., Yao, J., and Lapczyk, I. (eds.), “Importance of Capturing Non-Linear Viscoelastic Material Behavior in Tire Rolling Simulations,” in Te Meeting of the Tire Society, USA, September 8-10, 2014.

[13] Andersen, L.G., Larsen, J.K., Fraser, E.S., Schmidt, B., and Dyre, J.C., “Rolling Resistance Measurement and Model Development,” Journal of Transportation Engineering Vol 141(2):04014075, 2014.

[14] Redrouthu, B.M. and Das, S., Tyre Modelling for Rolling Resistance (Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2014.

[15] Hoever, C., Kropp, W., “A model for investigating the influence of road surface textureand tyre tread pattern on rolling resistance” Journal of Sound and Vibration Vol. 351 No 161–176, 2015.

[16] Wei, C., Olatunbosun, O.A., and Behroozi, M., “Simulation of Tyre Rolling Resistance Generated on Uneven Road,” International Journal of Vehicle Design, Vol 70(2):113-136, 2016.

[17] Hernandez, J.A., Al-Qadi, I.L., and Ozer, H., “Baseline Rolling Resistance for Tires’ On-Road Fuel Efciency Using Finite Element Modeling,” International Journal of Pavement Engineering, Vol 18(5):424-432, 2017.

[18] Aldhufairi,H. S., Olatunbosun, O., Essa K., “Determination of a Tyre’s Rolling Resistance Using Parallel Rheological Framework,” SAE International by Lund University, Sunday, September 08, 2019.

[19] Mashadi, B., Ebrahimi-Nejad, S., Abbaspour, M., “A rolling resistance estimate using nonlinear finite element numerical

analysis of a full three-dimensional tyremodel”Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 1, No 1, 2019.

[۲۰] مرتضی رشیدی مقدم ،آرش عبدالهی، تحلیل مقاومت غلتشی تایر با استفاده از نرم افزار ABAQUS، کنفرانس بین المللی تایر و صنایع وابسته، ۱۳۹۷، تهران، هتل المپیک

# Review of rolling resistance simulation in tire industry

M. Rashidi Moghadam

1. PhD, Research and Development Department of Barez Industrial Group, Tehran, Iran, Contact Number:09103133166

*Corresponding author Email: morteza_rashidi@alumni.iust.ac.ir

**Abstract:** Rolling resistance sits at the core of tyre development goals because of its considerable efect on the car's fuel economy. In contrast to the experimental method, the fnite element (FE) method ofers an inexpensive and efficient estimation technique. However, the FE technique is to be a fully developed product particularly for rolling-resistance estimation. The review of the publications on the finite element modelling of rolling tyres performed during the past ten years are collected. Starting with the introduction of rolling resistance, the mechanical manifestation of rolling resistance and rolling resistance coefficient, a brief history of the finite element simulation features is given. Then, a complete review on the published works during the past ten years on modelling techniques of the simulation of the rolling resistance is presented. Finally, a meshed 2D and 3D axisymmetric geometry was shown in FE software based on a cross-sectional specimen cut from the real tyre.

**Keywords:** Tire, Rolling Resistance, Simulation