

## بررسی مقاومت غلتشی تایر رادیال باری با استفاده از روش اجزای محدود و تاگوچی

# I Investigating the rolling resistance of Radial Cargo Tire using the finite element method and Taguchi

### چکیده

بررسی اجزای مختلف تایر رادیال باری جهت بهینه کردن تایر برای رسیدن به حد مطلوب در مواردی همچون استحکام، سایش، تولید صدا و مقاومت غلتشی از اهمیت بالایی در طراحی تایرهای رادیال باری و اتوبوسی برخوردار است. در این مقاله تأثیر پارامترهای مختلف همچون عمق گل ترد، استحکام سیم، تعداد سیمها، عرض بلت و نوع اپکس بر روی مقاومت غلتشی، به صورت عددی با استفاده از نرم افزار المان محدود ABAQUS مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور شبیه سازی بلتها و زاویه آنها از مدل Rebar استفاده شده است. به علت تغییر شکل های بزرگ در تایر، شرایط مرزی غیرخطی در مرز تماس تایر با جاده و رفتارهای هایپرلاستیک و ویسکوالاستیک را برها، مدل در نظر گرفته شده شامل تغییر شکل های غیرخطی خواهد بود. با استفاده از روش طراحی آزمایش ها و تاگوچی ساختار بهینه تایر به منظور دستیابی به کمترین مقاومت غلتشی به دست آمده است

کلمات کلیدی: مقاومت غلتشی، المان محدود، طراحی تایر رادیال باری، SUQABA

نوع مقاله: پژوهشی

مرتضی رشیدی مقدم<sup>۱\*</sup>، معین مسجیدی<sup>۲</sup>

۱- گروه صنعتی بارز، اداره نوآوری و ارتباط با مراکز دانش بنیان، کرمان، ایران

۲- گروه صنعتی بارز، اداره تحقیقات و توسعه، کرمان، ایران

morteza2046@gmail.com

ایمیل نویسندگان و عهده دار مکاتبات:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳

## مقدمه

است، همچنین یک حالت بهینه ممکن در راستای کاهش مقاومت غلتشی با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها و تاگوچی پیشبینی شده است.

## شبیه‌سازی اجزای محدود

مبنای نتایج اخذ شده در این مطالعه، شبیه‌سازی اجزای محدود است؛ لذا، به منظور تأیید نتایج، باید از دقت نمونه‌های شبیه‌سازی شده اطمینان حاصل نمود. در این مقاله از تایر ۲۲،۵ R ۸۰/۳۱۵ به عنوان نمونه مطالعاتی استفاده شده است. در مدل دوبعدی و متقارن محوری تایر از المان‌های CGAX4 و CGAX3 برای مدل‌سازی اجزای لاستیکی تایر و از المان‌های SFMGAX1 برای مدل‌سازی لایه‌های تقویت شده مانند بت و کارکاس تایر استفاده شده است. برای ضمیمه کردن لایه‌های تقویت شده به ماتریس لاستیکی از قید embedded استفاده می‌شود. اجزای لاستیکی به صورت ویسکو هایپرالاستیک مدل‌سازی می‌شود. برای شبیه‌سازی رفتار هایپرالاستیک از مدل تابع انرژی کرنش چندجمله‌ای مرتبه سوم استفاده می‌شود رفتار ویسکوز لاستیک به صورت همگن<sup>۴</sup> و با استفاده از سری پرونی<sup>۵</sup> مدل‌سازی می‌شود. مدل سه‌بعدی تایر با استفاده از دستور symmetric model generation و مطابق با مدل متقارن محوری تایر ایجاد می‌گردد. سطح جاده به صورت صفحه صلب شبیه‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی تماس بین تایر و جاده از الگوریتم تماس سطح - به - سطح<sup>۶</sup> استفاده می‌شود. در شکل ۲ و ۳ به ترتیب شماتیکی از مدل دوبعدی و سه‌بعدی تایر شبیه‌سازی شده، نشان داده شده است. در شکل ۳، نمودار تغییر شکل تایر در مقابل نیروی عمودی، بر اساس نتایج تجربی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. مقایسه نتایج حاصل، دقت نمونه شبیه‌سازی را تأیید می‌کند؛ بنابراین از این مدل برای مطالعه مقاومت غلتشی تایر استفاده می‌شود.

تایر یک ساختار بسیار پیچیده است و برای طراحی آن نیاز به دانش کافی در این زمینه است. یکی از مواردی که در طراحی تایر باید در نظر گرفته شود، اتلاف انرژی در اثر حرکت دورانی تایر است. در سال‌های اخیر کاهش مصرف سوخت در حوزه محیط‌زیست و تولید تایر بسیار اهمیت پیدا کرده است. صرف‌نظر از نیرو دراگ آیرودینامیک و اصطکاک بین تایر و سطح جاده، مقاومت غلتشی<sup>۱</sup> ناشی از خاصیت ویسکوالاستیک لاستیک عامل بسیار مهم و تأثیرگذار در اتلاف سوخت و انرژی حاصل از آن است [۱-۲]. همچنین مقاومت غلتشی تایر به طور قابل‌ملاحظه‌ای به ساختار تایر بستگی دارد؛ بنابراین طراحی تایرهای رادیال باری نوین با مقاومت غلتشی کم و در نتیجه کاهش مصرف سوخت بسیار حائز اهمیت است [۳-۶].

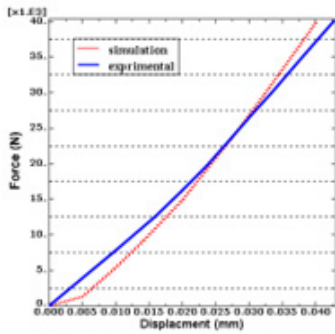
برای محاسبه مقاومت غلتشی تایر روش‌های تجربی و عددی گوناگونی وجود دارد. مثال‌های زیادی از نحوه محاسبه مقاومت غلتشی در مرجع [۷] وجود دارد. همانند بسیاری از مسائل مهندسی و علوم، استفاده از روش اجزای محدود به منظور شبیه‌سازی پدیده مقاومت غلتشی تایر یکی از روش‌های کاربردی و موثر است. برای مثال چو<sup>۲</sup> و همکارانش [۸] با استفاده از روش اجزای محدود تأثیر انواع مختلف پترن‌های ترد بر روی مقاومت غلتشی تایرهای سواری را بررسی کردند. همچنین گاش<sup>۳</sup> و همکارانش [۹] با بررسی نحوه توزیع مقدار انرژی کرنشی مستقیماً به محاسبه اتلاف انرژی حاصل از مقاومت غلتشی پرداختند.

در این مقاله با بررسی پارامترهای ساختاری تایرهای رادیال باری و تغییر پارامترهایی مانند عمق گل ترد، استحکام سیم، تعداد سیم‌ها، عرض بت و نوع اپکس، تأثیر هر کدام از این پارامترها بر روی مقاومت غلتشی تایرهای رادیال باری با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS بررسی گردیده

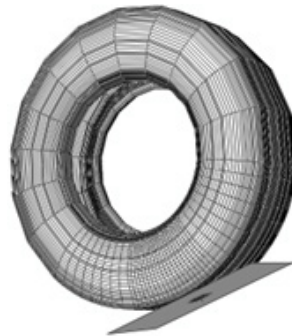
1. Rolling Resistance 2. Cho 3. Ghosh 4. Isotropic 5. Prony Series 6. Surface-to-surface

روش طراحی آزمایش‌ها و تاگوچی

به‌طور کلی طرح‌های آزمایشی به دو گروه بزرگ، طرح‌های عاملی کامل<sup>۱</sup> و طرح‌های عاملی کسری<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند. منظور



شکل ۳: تغییر شکل تایر در مقابل نیروی عمودی



شکل ۲: مدل سه بعدی تایر.



شکل ۱: مدل دو بعدی مقطع تایر.

از یک طرح عاملی کامل این است که در هر تکرار آزمایش تمام ترکیب‌های ممکن از سطوح عامل‌ها بررسی شوند [۱۰]. در استفاده از طرح‌های عاملی کامل وقتی که تعداد زیادی متغیر وجود دارد، زمان و هزینه زیادی صرف اجرای آزمایش‌ها می‌شود. به همین دلیل کاهش تعداد آزمایش‌ها امری ضروری به نظر می‌آید. بنابراین استفاده از طرح‌های عاملی کسری می‌تواند مفید باشد. یکی از انواع طرح‌های عاملی کسری طرح تاگوچی<sup>۳</sup> است که در مسائل مهندسی کاربرد زیادی دارد. در این مطالعه، طرح تاگوچی به عنوان ملاک طراحی متغیرهای ساختاری تایرهای رادیال باری در نظر گرفته شده است. روش تاگوچی این امکان را فراهم کرده است که اطلاعات حیاتی از سیستم با تعداد تجربه و آزمایش کمتری فراهم شود. دست‌های از طرح‌های عاملی کسری را توسعه داد که در کاربردهای مختلف بکار گرفته می‌شوند. وی برای انجام آزمایش‌ها، جدول‌های استاندارد را فراهم نمود و آنها را جانشین طرح‌های عاملی کامل کرد. روش تاگوچی با فرم کلی  $L_N(n^k)$ ، برای طرح آزمایش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این رابطه  $L$ ، نماد طرح تاگوچی،  $N$ ، تعداد کل آزمایش‌ها،  $n$

سطوح مربوط به هر متغیر و  $k$ ، تعداد متغیرها است [۱۱]. در راستای طراحی و تعیین ترکیب آزمایش‌های مورد نیاز، برای ۵ متغیر ورودی دو سطح تعیین می‌شود. نوع چیفر، عرض بت، نوع اپکس، عمق شیار محیطی رویه تایر و قطر سیم بت به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ سطوح هر متغیر آورده شده است. برای ۵ فاکتور با سطوح تعیین شده، مدل تاگوچی از میان تعداد متنوعی از ترکیب‌های ممکن برای مقادیر پارامتری، با استفاده از نرم‌افزار مینیتب<sup>۴</sup>، به صورت  $L_8(2^5)$  بدست می‌آید. سپس این ۸ حالت با استفاده از تحلیل اجزای محدود بوسیله نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و مقادیر مربوط به نیروی طولی (نیروی بین جاده و تایر در راستای جهت حرکت) محاسبه می‌شود. در جدول ۲ مقدار متغیر پاسخ برای هر آزمایش نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

در شکل ۴ تاثیر نوع چیفر، عرض بت، نوع اپکس، عمق شیار محیطی رویه تایر و قطر سیم بت بر نیروی  $F_x$  به عنوان شاخصی از مقاومت غلتشی تایر نشان داده شده است. با توجه

1. Full Factorial Experimental

2. Fractional Factorial Experiment

3. Taguchi

4. Minitab

به این شکل عرض بت و نوع اپکس در مقایسه با سه عامل دیگر تاثیری قابل توجهی بر مقاومت غلتشی تایر رادیال باری

جدول ۱: حدود پارامترهای مسیر بارگذاری.

سطح	نوع چیفر	عرض بت	نوع اپکس	عمق شیار محیطی (mm)	قطر سیم بت (mm)
۱	سیم	L	نرم	۱۵	۱۶۲
۲	نخی	۵۰٪ L	نرم - سخت	۱۴	۱۱۳

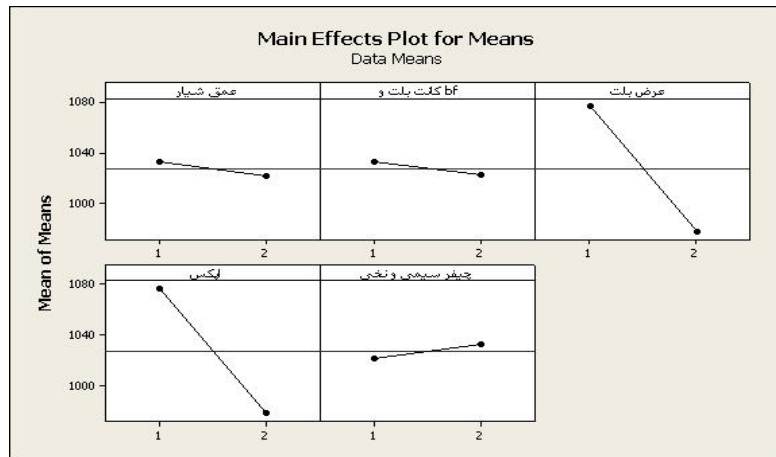
جدول ۲: جدول طرح آزمایش‌ها و مقدار متغیر پاسخ.

شماره آزمایش	$F_x$	شماره آزمایش	$F_x$
۱	۱۰۹۷۸۳	۵	۱۰۴۸۶۷
۲	۱۰۷۶۹۱	۶	۹۰۵۵۰
۳	۱۰۵۵۰۰	۷	۱۱۰۴۱۰
۴	۹۰۱۵۳	۸	۱۰۲۸۳۰

باری می‌شود. اپکس نرم تنها از یک قسمت تشکیل شده است اما در اپکس دوبل ناحیه متصل به طوقه تایر سخت‌تر از ناحیه بالای اپکس است. بنابراین باعث افزایش سفتی دیواره کناری و کاهش انعطافپذیری آن می‌شود. از اینرو منجر به کاهش تغییر شکل تایر و کاهش مقاومت غلتشی آن می‌شود. علاوه بر این با توجه به اینکه تایرهای رادیال باری باید قادر به تحمل بار زیادی باشند. به منظور افزایش استحکام در ناحیه بید تایر از چیفر استفاده می‌شود. که توسط نخ یا سیم تقویت شده است. در این مطالعه تاثیر نوع چیفر بر مقاومت غلتشی تایر رادیال باری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از چیفر سیمی در مقایسه با چیفر نخی می‌تواند منجر به کاهش مقاومت غلتشی تایر شود. با توجه به اینکه به دلیل وجود بار کششی، یکی از نواحی بحرانی تایر قسمت پایین دیواره کناری آن است. استفاده از چیفر سیمی در مقایسه با چیفر نخی منجر به افزایش سختی دیواره کناری تایر و کاهش تغییر شکل تایر در این ناحیه می‌شود. بنابراین می‌تواند منجر به کاهش مقاومت غلتشی تایر شود. اما در مقایسه با نوع اپکس تاثیر کمتر بر مقاومت غلتشی تایر دارد.

دارد. کاهش عمق شیاری محیطی به مقدار یک میلی متر می‌تواند منجر به کاهش مقاومت غلتشی شود. که می‌تواند ناشی از کاهش وزن رویه تایر باشد. همچنین کاهش عمق رویه تایر می‌تواند منجر به افزایش سفتی و کاهش حرکت آج تایر در حین غلتش در ناحیه تماس تایر و جاده شود. که می‌تواند دلیل دیگری بر کاهش مقاومت غلتشی تایر رادیال باری با کاهش عمق شیار محیطی باشد. کاهش قطر سیم با ثابت نگه داشتن فاکتور ایمنی تایر منجر به افزایش شمارش سیمها در بت تایر می‌شود. اما در مجموع منجر به کاهش وزن تایر و در نتیجه کاهش مقاومت غلتشی تایر می‌شود.

همچنین کاهش ۵۰ درصدی عرض بت چهارم منجر به کاهش قابل توجه مقاومت غلتشی تایر رادیال باری می‌شود. که می‌تواند ناشی از کاهش قابل توجه وزن تایر باشد. در مقایسه با قطر سیم، کاهش عرض بت چهارم تاثیر بسیار بیشتری بر مقاومت غلتشی تایر رادیال باری دارد. در ناحیه بید تایر تغییر نوع اپکس در مقایسه با نوع چیفر تاثیر بیشتری بر مقاومت غلتشی تایر دارد. بطوریکه تغییر اپکس از حالت نرم به نرم-سخت منجر به کاهش قابل توجه مقاومت غلتشی تایر رادیال



شکل ۴: نمودار حاصل از تاثیر متغیرهای ورودی بر مقاومت غلتشی تایر رادیال باری.

## منابع:

1. H. B. Pacejka, Tyre and vehicle dynamics, 2002, ButterworthHeinemann, ISBN 0, 7506 (5141) (2006).
2. A. Zouaghi, M. Chafra, and Y. Chevalier, Modeling of composite multilayer rubber-steel: vibro-acoustic insulation of vehicle brake system, *Mechanics & Industry*, 13 (03) (2012) 185-195.
3. V. Hublau, and A. Barillier, The Equations of the Rolling Resistance of a Tire Rolling on a Drum, *Tire Science and Technology*, 36 (2) (2008) 146-155.
4. J. R. Cho, H. W. Lee, W. B. Jeong, K. M. Jeong, and K. W. Kim, Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire, *International Journal of Solids and Structures*, 50 (1) (2013) 86- 96.
5. H. Bettaieb, Improvement of the railway vehicle performance in circulation in curve, *Mechanics & Industry*, 9 (04) (2008) 335-346.
6. H. Golbakhshi, M. Namjoo, An Efficient Numerical Scheme for Evaluating the Rolling Resistance of a Pneumatic Tire, 2015.
7. Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy: Informing Consumers, Improving Performance, type TRB Special Report 286, Transportation Research Board, 2006.
8. J. Cho, H. Lee, W. Jeong, K. Jeong, K. Kim, Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire, *International Journal of Solids and Structures* 50 (2013) 86–96.
9. P. Ghosh, A. Saha, R. Mukhopadhyay, Prediction of tyre rolling resistance using FEA, in: J. Busfield, A. Muhr (Eds.) , *Constitutive Models for Rubber III*, Swets & Zeitlinger, Lisse, 2003.
10. Kadkhodayan, M., Erfani-Moghadam, A., "Optimization of load paths in X- and Y-shaped hydroforming", *Material Forming* , Vol. 6, 75–91, 2013.
11. غلامحسین شاهکار، طرح و تحلیل آزمایشها، تألیف داگلاس مونتگمری، چاپ اول، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۸۰.

***IRM***

# Investigating the rolling resistance of Radial Cargo Tire using the finite element method and Taguchi

Morteza Rashidi Moghadam<sup>1\*</sup>, Moein Masjedi<sup>2</sup>

1- Barez Industrial Group, Innovation and Relations with Knowledge-Based Centers Department, Kerman, Iran

2- Barez Industrial Group, Research and Development Department, Kerman, Iran

\*Corresponding author Email: [morteza2046@gmail.com](mailto:morteza2046@gmail.com)

## Abstract

In the design of radial and bus tires, the examination of various components of truck radial tire for achieving desirable properties such as strength, wear, noise and rolling resistance to optimize the tire are important. In this article, the influence of various parameters such as tread depth, wire strength, number of wires, belt width, and apex type on the rolling resistance is numerically investigated by using finite element software (ABAQUS). In order to simulate the belts and their angles, the Rebar model is used. Due to large deformations in the tire, non-linear boundary conditions at the tire-road contact boundary and hyper-elastic and viscoelastic behaviors of the rubbers, the considered model will include non-linear deformations. By using the method of experimental design and Taguchi, the optimized tire structure optimization is achieved in order to minimize the rolling resistance.

**Key words:** Rolling resistance, ABAQUS, Finite Element, Design of truck radial tire