17 Conference And 9 Exhibition Rubber And Related Industries
17 همایش و 9 نمایشگاه لاستیک و صنایع وابسته
Iranmall
ایران مال
January 6-7 2026
۱۶ تا ۱۸ دی ماه ۱۴۰۴

ارائه یک مدل مکانیکی جهت پیش بینی سفتی ترد با استفاده از آزمون تجربی و روش اجـزای محدود

احسان مقدم[1]، سیدعلی ضیاءتبار[2]
1. کارشناس آنالیز و شبیه سازی تایر شرکت کویرتایر- ehsan_moghaddam73@yahoo.com
2. مدیر اداره تکنولوژی و تحقیقات شرکت کویرتایر

چکیده:

تایر به عنوان یکی از مهمترین اجزای سیستم تعلیق خودرو نقش موثری در جذب ارتعاشات جاده و راحتی سرنشین ایفا می‌کند. در این پژوهش، یک مدل مکانیکی تحلیلی تیر اولر-برنولی clamped-guided جهت تعیین سفتی ترد در معرض نیروها و گشتاورهای وارده بر تایر ارائه شده‌است. آزمون تجربی و روش اجزای محدود برای تعیین مقادیر سفتی شعاعی تایر سایز 185/55R15 در دو حالت 100% و 70% بار ماکزیمم انجام شده است. در این پژوهش نتایج اجزای محدود انطباق بالایی با نتایج تجربی داشته و درصد خطای 8 و 7 درصد محاسبه شده برای نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود برای 2 حالت 100% و 70% بار ماکزیمم این موضوع را صحه‌گذاری می‌کند. مدل تیر پیشنهادی اولر- برنولی نتایج $\frac{Ebh}{L}\left(\frac{h^2}{L^2+3h^2}\right)$ ، $\frac{Ebh}{L}\left(\frac{b^2}{L^2+3b^2}\right)$ ، $\frac{EA}{L}$ و $\frac{Gbh(b^2+h^2)}{L}$ برای سفتی جانبی، طولی، شعاعی و پیچشی ارائه نموده که تقریب قابل قبولی برای پیش‌بینی رفتار غیرخطی استاتیکی ترد در معرض نیرو و گشتاورهای وارده بر تایر است.

واژه‌های کلیدی: سفتی - ترد - روش اجزای محدود - مدل تیر clamped-guided
محور مقاله: فناوری‌های تولید - تحقیقات و نوآوری

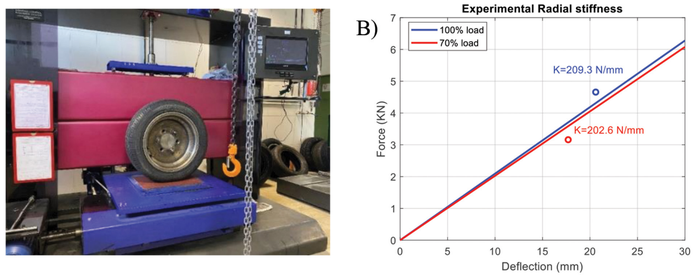
1. مقدمه:

تایر به عنوان یکی از مهمترین اجزای سیستم تعلیق خودرو نقش موثری در جذب ارتعاشات جاده و راحتی سرنشین ایفا می‌کند. بنابراین شناسایی سفتی و تغییرشکل‌های غیرخطی تایر در معرض نیروها و گشتاورهای وارده، اهمیت زیادی در تعیین رفتار استاتیکی و دینامیکی تایر و بهبود عملکرد آن را دارد. در یک پژوهش صورت‌گرفته، کاراکوس و همکاران [1] به تحلیل ارتعاشات آزاد و تعیین فرکانس‌های طبیعی تایر با استفاده از روش اجزای محدود پرداختند. آنها تاثیر عوامل مختلفی مانند فشار باد، بار عمودی و ضریب اصطکاک را در تعیین فرکانس‌های تایر در تماس با بلوک بتونی بررسی کردند. لئو و همکاران [2]، رفتار دینامیکی تایر هنگام پیچیدن و ترمزگرفتن را با استفاده از روش اجزای محدود محاسباتی صریح و ضمنی شبیه‌سازی کردند. آنها نتیجه گرفتند که الگوریتم محاسباتی اولر-لاگرانژ بر مبنای روش اجزای محدود، روش موثری برای شبیه‌سازی رفتار پایای تایر می‌باشد. در یک پژوهش انجام شده توسط خوان لی و همکاران [3]، اثر طول لایه نایلونی روی سفتی جانبی و طولی تایر بررسی شد. نتایج مطالعه آنها نشان داد که با افزایش طول لایه نایلونی، میزان سفتی طولی و جانبی افزایش می‌یابد. آنها همچنین اثبات کردند که با افزایش طول پایداری خودرو افزایش یافته اما راحتی در رانندگی کاهش می‌یابد. ویدونگ لیو و همکاران [4] یک تایر غیربادی (airless) با ظرفیت تحمل بار بالا را با هدف رفع عیوب متداول در تایر مانند نشت هوا، سوراخ شدن و ترکیدن، طراحی و تولید کردند. آنها آزمون تجربی و شبیه‌سازی با استفاده از روش اجزای محدود را جهت تعیین سفتی استاتیکی تایر پیاده‌سازی کردند. در پژوهش حال حاضر علاوه بر آزمون تجربی و روش اجزای محدود، یک مدل مکانیکی تیر اولر- برنولی clamped-guided جهت پیش‌بینی سفتی ترد در معرض نیروها و گشتاورهای وارده بر تایر ارائه شده‌است.

2. روش تجربی:

مطابق با شکل 1، آزمون غیرمخرب تعیین سفتی شعاعی، جانبی، مماسی و پیچشی بر روی یک حلقه تایر سایز 185/65R15 (با نماد سرعت V و شاخص تحمل بار 82) انجام شده‌است [5]. این آزمون در دمای محیط 25°C ، فشار باد 250 kPa، رینگ استاندارد 6J- 15″ و شرایط 70 و 100 درصد بار ماکزیمم برای تست سفتی شعاعی و 70 درصد بار ماکزیمم برای تست‌های سفتی جانبی، طولی و پیچشی صورت گرفته است. دستگاه آزمون سفتی تایر شامل یک فیکسچر برای نگهداشتن تایر - یک سیلندر پنوماتیکی تحریک کننده برای اعمال نیروی شعاعی، جانبی، طولی و گشتاور پیچشی - لودسل برای اندازه‌گیری نیرو - ترنسدیوسر برای اندازه‌گیری خیز یا جابجایی و سیستم اکتساب داده DAQ متصل به رایانه برای ضبط، تحلیل داده و محاسبه سفتی است.

نتایج تست سفتی به همراه نتایج تست جاپای تایر در جداول 1 و 2 ارائه شده‌است.



شکل 1: A) دستگاه آزمون سفتی تایر. B) نمودار نیرو برحسب جابجایی جهت تعیین سفتی شعاعی تایر در 2 حالت 70 و 100% بار ماکزیمم

جدول1: نتایج آزمون جاپای تایر185/55R15

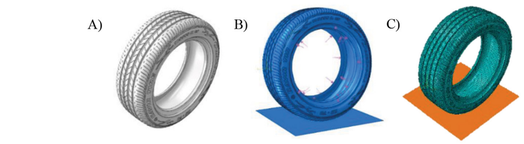
1	بار وارده kgf	475
2	فشارباد kPa	250
3	عرض تماس	145
4	طول تماس	135
5	نسبت پر به خالی	2.13

جدول2: نتایج آزمون سفتی تایر 185/55R15

R	سفتی	آزمون 1	آزمون 2	آزمون 3
1	شعاعی 100٪ (N/mm)	209.3	199.5	205.7
2	شعاعی 70٪ (N/mm)	202.6	194.7	198.8
3	جانبی(N/mm)	92	90	93
4	مماسی(N/mm)	268.3	271.1	266.5
5	پیچشی(N. m/G)	44.8	45.2	46.3

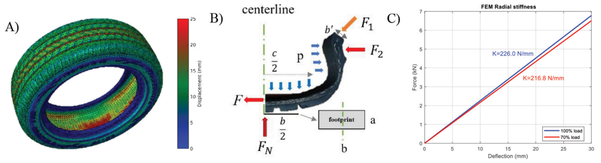
3. روش اجزای محدود:

در این پژوهش طراحی دوبعدی مقطع تایر 185/65R15 با استفاده از نرم‌افزار Autodesk AutoCAD 2024 و مدل‌سازی سه‌بعدی آن با Siemens NX 2021 انجام شده‌است. تحلیل اجزای محدود نیز با SIMULIA Abaqus 2021 صورت گرفته‌است. تعیین سفتی شعاعی از طریق یک تحلیل استاتیکی غیرخطی تایر بر روی یک پوسته صلب در فشار باد 250 kPa و بار ماکزیمم 475 kg انجام شده‌است. خواص ماده هایپرالاستیک بر اساس مدل Mooney-Rivlin و از طریق آزمون تجربی روی نمونه پخت شده آمیزه فاینال تایر با استفاده از دستگاه RPA در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران تعیین گردیده‌است. نتایج این آزمون در سه حالت axial، planar و volumetric حاصل و به مدل تخصیص داده شده‌است. با تعریف یک step استاتیکی غیرخطی، شرایط مرزی تایر در محل تماس ترد با پوسته به همراه اثر متقابل رینگ بر بید تایر و فشار باد در نرم افزار تعریف شده‌اند [6]. در گام آخر یک مش حجمی با استفاده المان غیرخطی 10 گره‌ای تتراهدرال مربعی از نوع C3D10 به مدل تخصیص داده شده و تعداد 402805 المان ایجاد گردیده است. آنالیز کیفیت مش بر روی مدل اجزای محدود انجام شد و مش با صفر خطا صحه‌گذاری گردید.



شکل2: مراحل تحلیل اجزای محدود: A) مدل‌سازی سه‌بعدی تایر. B) تعریف شرایط مرزی و نیروهای وارده بر تایر. C) مش‌بندی مدل

نتایج شبیه‌سازی تست سفتی شعاعی تایر در 2 حالت 70 و 100% بار ماکزیمم در شکل 3 ارائه شده است.



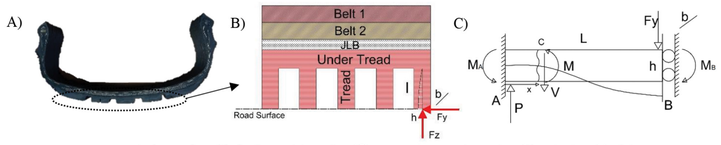
شکل3: A) نتایج اجزای محدود B) نیروهای وارده بر مقطع تایر درحالت تعادل استاتیکی C) نمودار تعیین سفتی شعاعی در حالت 70 و 100% بار ماکزیمم

همانطور که در نمودار بالا دیده می‌شود نتایج اجزای محدود انطباق بالایی با نتایج تجربی داشته و درصد خطای 8 و 7 درصد برای 2 حالت 100% و 70% بار ماکزیمم، گواهی بر این موضوع است.

4. روش تحلیلی و نتایج:

به منظور ارائه یک مدل تحلیلی مکانیکی برای ترد، شناسایی رفتار استاتیکی، دینامیکی و تغییرشکل‌های آن در معرض نیروها و گشتاورهای وارده بر تایر شامل نیروی عمودی، نیروی جانبی، نیروی طولی، گشتاور خود تنظیمی، گشتاور واژگونی و گشتاور مقاومت غلتشی از اهمیت بسیاری برخوردار است.

در این پژوهش مطابق شکل 4، رفتار تقریبی استاتیکی ترد در معرض نیروها و گشتاورهای وارده، با استفاده از یک مدل تقریبی تیر اولر- برنولی clamped-guided تخمین زده شده‌است. با پیاده‌سازی روابط حاکم بر تیر اولر-برنولی و نوشتن معادلات تعادلی برای یک المان تیر و همچنین اعمال شرایط مرزی clamped-guided، خیز یا تغییرشکل تیر بدست می‌آید. سفتی جانبی و طولی در دو حالت خمشی (flexural stiffness) و برشی (shear stiffness) از روابط خیز بدست آمده، محاسبه می‌گردد. همچنین سفتی شعاعی با محاسبه تغییرشکل در راستای عمودی و سفتی پیچشی با محاسبه تغییر زاویه پیچش المان تیرحاصل می‌گردد.



شکل4: A) مقطع تایر. B) شماتیک ناحیه مشخص شده. C) مدل تیر اولر-برنولی clamped-guided بلوک ترد

مطابق شکل 4C، با نوشتن معادله تعادل استاتیکی نیرو در راستای y و همچنین معادله گشتاور حول نقطه A، نیرو و گشتاورهای تکیه‌گاهی محاسبه می‌شود. سپس با برش زدن تیر در نقطه C (نقطه ای در فاصله x از مبدا) و نوشتن معادلات تعادلی و اعمال شرایط مرزی دو طرف تیر، خیز تیر (δ_y) بدست می‌آید. سفتی جانبی خمشی از روی میزان خیز تیر در فاصله B مطابق بخش 4.1 حاصل می‌شود. لازم به ذکر است که سفتی طولی خمشی نیز با همین روش ولی با ممان اینرسی متفاوت سطح محاسبه می‌گردد. سفتی شعاعی از روی تغییر شکل عمودی و سفتی برشی نیز از روی تغییر زاویه المان تیر ($\gamma = \frac{\tau}{G}$) در اثر نیروی برشی (نیروی جانبی و طولی) بدست می‌آید:

$$\delta_y = \frac{P}{EI_1}\left(\frac{x^3}{6} - \frac{Lx^2}{4}\right) \rightarrow K_{\text{جانبی خمش}} = \frac{F_y}{\delta_y(L)} = \frac{12EI_1}{L^3} = \frac{Ebh^3}{L^3}$$

$$K_{\text{طولی خمش}} = \frac{F_x}{\delta_x(L)} = \frac{12EI_2}{L^3} = \frac{Ehb^3}{L^3}$$

$$\delta_z(L) = \frac{F_zL}{EA} \rightarrow K_{\text{شعاعی}} = \frac{F_z}{\delta_z(L)} = \frac{EA}{L}$$

$$K_{\text{جانبی برش}} = K_{\text{طولی برش}} = \frac{GA}{L} = \frac{EA}{2(1+\upsilon)L} \overset{\upsilon=0.5}{\cong} \frac{Ebh}{3L}$$

$$K_{\text{پیچشی}} = \frac{GJ}{L} = \frac{Gbh(b^2+h^2)}{L}$$

$$\frac{1}{K_{\text{جانبی}}} = \frac{1}{K_{\text{جانبی خمش}}} + \frac{1}{K_{\text{جانبی برش}}} \rightarrow K_{\text{جانبی}} = \frac{Ebh}{L}\left(\frac{h^2}{l^2+3h^2}\right)$$

$$\frac{1}{K_{\text{طولی}}} = \frac{1}{K_{\text{طولی خمش}}} + \frac{1}{K_{\text{طولی برش}}} \rightarrow K_{\text{طولی}} = \frac{Ebh}{L}\left(\frac{b^2}{L^2+3b^2}\right)$$

در روابط بالا، δ خیز تیر در جهت تعیین شده، E مدول یانگ، $I_1 = \frac{bh^3}{12}$ و $I_2 = \frac{hb^3}{12}$ ممان اینرسی حول محورهای x و y ، J ممان اینرسی قطبی ، υ نسبت پواسون، L عمق شیار، A سطح مقطع المان، G مدول برشی، b طول بلوک ترد و h عرض بلوک ترد است.

5. بحث و جمع بندی:

دراین پژوهش یک مدل مکانیکی تیر اولر- برنولی clamped-guided جهت پیش‌بینی تغییرشکل و سفتی شعاعی، جانبی، طولی و پیچشی ترد تایر سایز 185/55R15 ارائه شده‌است. آزمون تجربی غیرمخرب جهت تعیین مقادیر سفتی شعاعی در دو حالت 100% و 70% بار ماکزیمم انجام شده است. روش اجزای محدود برای تخمین رفتار غیرخطی تایر بر روی یک پوسته صلب ثابت در معرض نیروی عمودی صورت گرفت. در این پژوهش، چون رفتار استاتیکی تایر قویاً به تخصیص خواص ماده واقع گرایانه وابسته است. خواص ماده هایپرالاستیک تایر از طریق آزمون تجربی روی آمیزه فاینال پخت شده تایر در سه حالت axial، planar و volumetric حاصل گردیده و به مدل تخصیص داده شده‌است. فشار باد، شرایط مرزی تایر با جاده و اثر متقابل رینگ بر بید در معرض ماکزیمم بار وارده، محاسبه و در نرم‌افزار اجزای محدود تعریف شده‌اند. المان غیرخطی 10 گره‌ای تتراهدرال مربعی از نوع C3D10 برای مش‌بندی مدل انتخاب شده‌است. در این پژوهش نتایج اجزای محدود انطباق بالایی با نتایج تجربی داشته و درصد خطای 8 و 7 درصد برای سفتی شعاعی برای 2 حالت 100% و 70% بار ماکزیمم محاسبه شده‌است. مدل تیر مکانیکی پیشنهادی با نتایج $\frac{Ebh}{L}\left(\frac{b^2}{L^2+3b^2}\right)$ ، $\frac{Ebh}{L}\left(\frac{h^2}{L^2+3h^2}\right)$ ، $\frac{EA}{L}$ و $\frac{Gbh(b^2+h^2)}{L}$ برای سفتی جانبی، سفتی طولی، سفتی شعاعی و سفتی پیچشی به عنوان ابزار موثری برای پیش‌بینی رفتار غیرخطی استاتیکی ترد در معرض نیرو و گشتاورهای وارده بر تایر معرفی شده‌است.

6. مراجع:

1. Karakus, Murat, Aydin Cavus, and Mehmet Colakoglu. "Vibration analysis of a tire in ground contact under varied conditions." (2017).
2. Narasimha Rao, K. V., and R. Krishna Kumar. "Simulation of tire dynamic behavior using various finite element techniques." International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics 8.5 (2007): 363-372.
3. Li, Juan, et al. "Simulation the effect of cap ply layer length on the longitudinal stiffness and lateral stiffness of the tire and the stability of the car." Ain Shams Engineering Journal 15.2 (2024): 102354.
4. Liu, Weidong, et al. "Static stiffness properties of high load capacity non-pneumatic tires with different tread structures." Lubricants 11.4 (2023): 180.
5. PF Sun, GY Feng, ST Zhou, CZ Qiu, JW Fan. Experimental Analysis of Radial Tire Stiffness and Grounding Characteristics IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019.
6. Nan Xu · Hassan Askari · Amir Khajepour. Intelligent Tire Systems. Synthesis Lectures on Advances in Automotive Technology.