

## تعیین عوامل اثرگذار بر روی مقاومت غلتشی به روش تحلیلی

# Determining the effective factors on rolling resistance by analytical method

چکیده:

مقاومت غلتشی به دلیل تأثیر قابل توجه آن بر روی مصرف سوخت خودروهای سواری و باری، در هسته اصلی اهداف توسعه تایر قرار دارد. مقاومت غلتشی در تایر به عوامل بسیار زیادی وابسته است که در قسمت ترد تایر به علت تغییر شکل‌های ناشی از خمش، فشار و برش بیش‌ترین اتلاف انرژی را دارد. به علت طولانی شدن مدت زمان حل مسئله و ناهمگرایی حل‌های عددی و همچنین درک نامناسب از تأثیر پارامترهای متفاوت بر روی مقاومت غلتشی، از حل‌های تحلیلی استفاده می‌شود. در این مقاله سعی شده است با استفاده از روش تحلیلی تأثیر عوامل مختلفی همچون فشار داخلی، مدول یانگ، بار روی تایر، شعاع بلت، عرض ترد، ضخامت ترد، نرخ سطح تماس (csr) و  $\sin \delta$  بر روی مقاومت غلتشی مورد بررسی قرار بگیرد. همچنین در انتها با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی‌کننده Isight Design Gateway مقدار بهینه مقاومت غلتشی تایر در یک تایر باری بدست آمده است.

واژه‌های کلیدی: تایر، مقاومت غلتشی، روش تحلیلی

نوع مقاله: پژوهشی

مرتضی رشیدی مقدم\*

۱- دکترای تخصصی، اداره تحقیقات و توسعه گروه صنعتی بارز، تهران، ایران

ایمیل نویسندگان و عهده‌دار مکاتبات:

\*morteza2046@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۲

شناسه دیجیتال: DOI: 10.22034/irm.2021.136711

## مقدمه

رادپال در این مقاله پیشنهاد داده شده است. این روش بر مبنای محاسبه تنش‌ها و کرنش‌های ناحیه تماس تایر با جاده بیان شده است تا به این صورت، تاثیر پارامترهای مختلف ساختار تایر و عوامل خارجی بر روی مقاومت غلتشی از دیدگاه تحلیلی مورد ارزیابی قرار بگیرد. همچنین در ادامه با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی‌کننده Isight Design Gateway مقدار بهینه مقاومت غلتشی تایر در یک تایر باری بدست خواهد آمد.

## تئوری تحلیلی پیش بینی مقاومت غلتشی

ناحیه ترد تایر یکی از مهم‌ترین و تاثیرگذارترین پارامترها در مقدار مقاومت غلتشی تایر می‌باشد. این ناحیه تحت تاثیر سه پدیده تنشی شامل خمش، برش و فشار می‌گردد. تغییر شکل خمشی در جهت محیطی و در لبه‌های ابتدایی و انتهایی تماس تایر با جاده و تغییر شکل فشاری و برشی در ناحیه تماس اتفاق می‌افتد که این سه نوع تغییر شکل در شکل ۱ نشان داده شده است.

در اینجا یک مدل ساده ارائه شده توسط ریان و کرون<sup>۱</sup> [۷] با در نظر گرفتن تغییر شکل‌ها در نواحی فشاری و برشی در حالت جامع‌تر مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا تنش‌های فشاری و ناحیه فشاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در یک تایر که تحت فشار داخلی  $P$  می‌باشد، آن مقدار تنش فشاری در ناحیه تماس، تقریباً با مقدار فشار داخلی برابر است که در شکل ۲ نمایش داده شده است. البته باید توجه داشت که این رابطه با فرض اینکه هیچ گونه پترنی در داخل ترد نمی‌باشد و ترد کاملاً بدون نقش<sup>۵</sup> می‌باشد. تنش فشاری با کسر حجمی<sup>۶</sup> از رابر رابطه عکس دارد و با افزایش کسر حجمی، مقدار تنش فشاری افزایش پیدا می‌کند. در اینجا پارامتری به عنوان نرخ سطح تماس (CSR) تعریف می‌شود که در واقع عکس کسر حجمی می‌باشد و مقداری بین صفر تا یک می‌تواند داشته باشد و  $CSR=1$  نشان دهنده یک ترد بدون نقش می‌باشد، بنابراین رابطه بین تنش فشاری و فشار داخلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

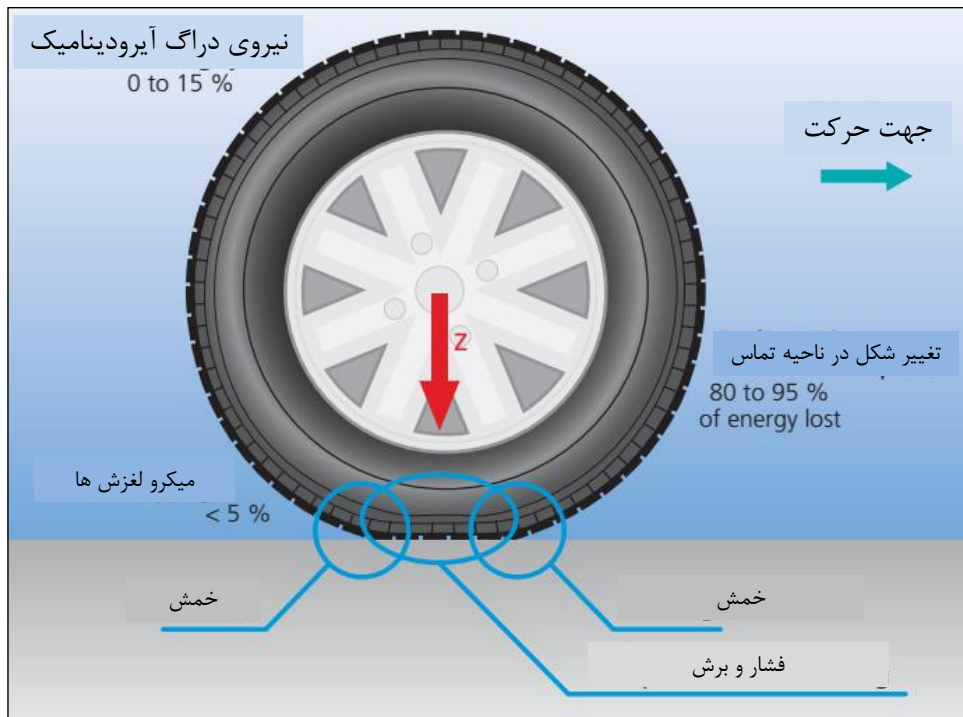
$$\sigma_z = \frac{P}{CSR} \quad (1)$$

مقاومت غلتشی<sup>۱</sup> در تایر به عوامل بسیار زیادی وابسته است که از جمله آن می‌توان به مواردی همچون اتلاف انرژی در رابر و استحکام دهنده‌ها (مانند نخ و سیم) به علت تغییر شکل، وجود نیروی اصطکاک بین سطح جاده و سطح بیرونی تایر و مقاومت هوا اشاره کرد. طبق تحقیقات انجام شده عامل اتلاف انرژی در رابر و استحکام دهنده‌ها، تأثیر به مراتب بسیار بیشتری نسبت به موارد دیگر در مقاومت غلتشی دارد و این تأثیر در حدود ۹۰ درصد می‌باشد. همچنین رابرها به علت خاصیت ویسکوالاستیک که دارند سهم بسیار عمده‌ای در مقاومت غلتشی تایر دارا می‌باشند. مقاومت غلتشی قابل پیش‌بینی می‌باشد و روش‌هایی برای محاسبه این پارامتر پیشنهاد داده شده است که برای مثال این روش‌ها می‌تواند مبتنی بر غیرخطی بودن  $Tan\ delta$  و وابستگی دمایی  $Tan\ delta$  باشد. برای پیش‌بینی مقاومت غلتشی، مدل‌های تحلیلی همچون مدل رینگ الاستیک، مدل رابر ترد و آنالیز المان محدود<sup>۲</sup> اشاره کرد. سهم مقاومت غلتشی بر روی مصرف سوخت به عواملی همچون نوع وسیله نقلیه، نوع سطح جاده و نوع رانندگی اشاره کرد. در نظر داشته باشید که مقاومت غلتشی در زاویه لغزش در حالت پایدار<sup>۳</sup> اندازه‌گیری می‌شود، اگرچه مقاومت غلتشی با یک زاویه لغزش و نرخ لغزش اندازه‌گیری می‌شود و تاثیر مقاومت غلتشی با در نظر گرفتن زاویه لغزش بر روی مصرف سوخت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تکنیک‌هایی برای کاهش مقاومت غلتشی با به کارگیری آنالیز المان محدود به همراه بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است [۲ و ۱].

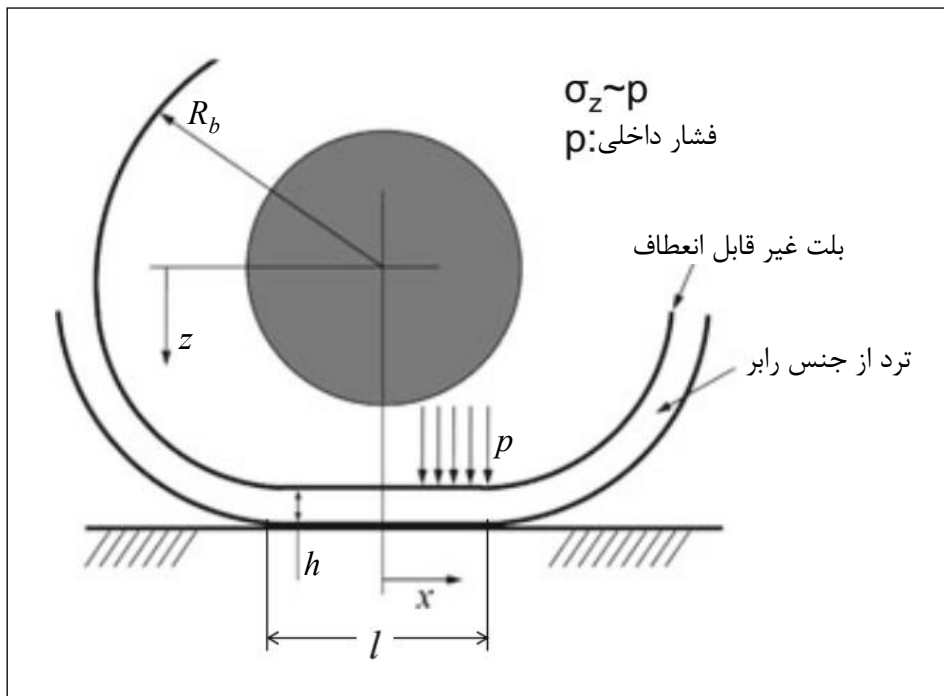
در زمینه تعیین مقاومت غلتشی به علت پیچیدگی این مفهوم، اکثر محققان به سمت استفاده از روش‌های بر پایه المان محدود روی آورده‌اند که مشکل اصلی این روش درک نامناسب از تاثیر پارامترهای متفاوت بر روی مقاومت غلتشی، طولانی شدن مدت زمان حل مسئله و ناهمگرایی می‌باشد [۳-۶].

یک روش تحلیلی برای محاسبه مقدار اتلاف انرژی در یک تایر

1. Rolling Resistance 2. Finite element method 3. Steady state 4. Rhyne & Cron 5. Pattern 6. Volume Friction



شکل ۱- محل تغییر شکل های خمشی، فشاری و برشی در ناحیه تماس تایر



شکل ۲- تنش فشاری در یک مدل دو بعدی تایر

x (جهت طولی) و جهت y (جهت جانبی) صفر در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن روابط مربوط به قانون هوک  $(\epsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)), \tau = G(2\gamma))$  تنش و کرنش برای ترد به صورت زیر حاصل می‌شود:

(۲)

$$(i,j=x,y,z) \sigma_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & G \frac{x}{R_b} \\ 0 & 0 & 0 \\ G \frac{x}{R_b} & 0 & \frac{-p}{csr} \end{bmatrix} \quad \epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{E} & 0 & \frac{x}{2R_b} \\ 0 & \frac{\partial p}{E} & 0 \\ \frac{x}{2R_b} & 0 & \frac{-p}{E*csr} \end{bmatrix}$$

که E مدول یانگ، G مدول برشی و  $\nu$  نسبت پواسون می‌باشد. مقدار انرژی کرنشی هدر رفته بر واحد حجم ترد در یک سیکل

از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_{loss} = \int_0^{2\pi} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} = \int_0^{2\pi/\omega} \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dt \quad (۳)$$

مقدار تنش‌ها و کرنش‌های در داخل تایر به صورت سینوسی  $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta)$  و  $\epsilon = \epsilon_0 \sin(\omega t)$  در نظر گرفته می‌شود که  $\epsilon_0$  و  $\sigma_0$  نصف حداکثر تنش و کرنش می‌باشد و  $\delta$  نشان دهنده

برای تنش برشی، از آنجایی که بلت در داخل تایر به عنوان یک جز غیرقابل انعطاف در برابر ترد از جنس رابر در نظر گرفته می‌شود، در ناحیه تماس تایر با سطح جاده به علت حرکت نسبی ترد نسبت به بلت یک کرنش برشی به وجود می‌آید که مقدار این کرنش در مرکز سطح تماس ( $x=0$ ) صفر می‌باشد و با حرکت به سمت لبه‌های سطح تماس به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد (شکل ۳). این تقریب به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

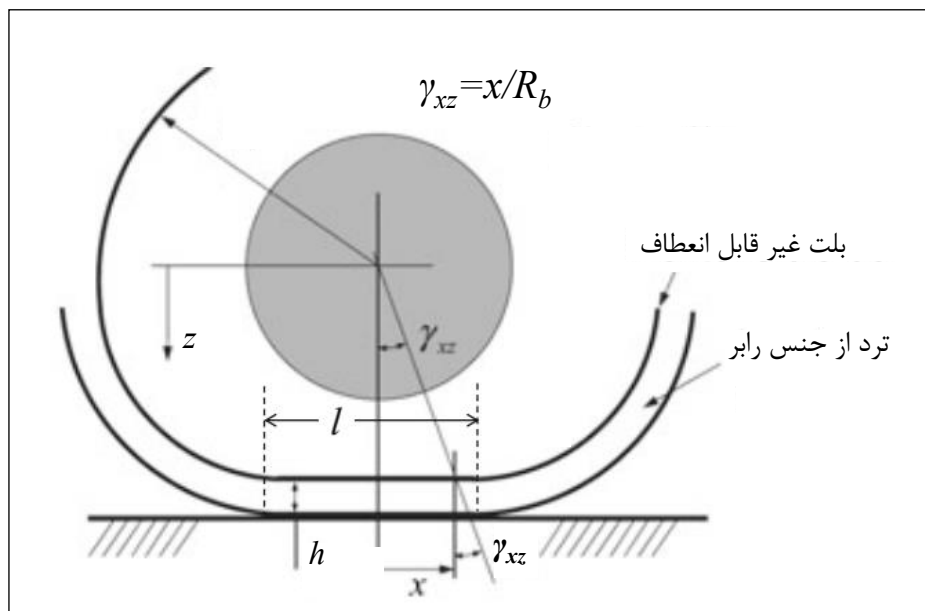
$$\gamma_{xz} = \frac{x}{R_b} \quad (۲)$$

که x فاصله از مرکز سطح تماس،  $R_b$  شعاع بلت می‌باشد و ماکزیمم کرنش برشی در  $x=l/2$  اتفاق خواهد افتاد که مقدار آن به صورت زیر است:

$$\gamma_{xz,max} = \frac{l}{2R_b} \quad (۳)$$

که l طول ناحیه تماس است.

با فرض اینکه مقدار تنش‌های نرمال در جهت z فقط وجود دارد  $(\sigma_z = \frac{P}{csr})$  و مقدار تنش‌های نرمال در دو جهت



شکل ۳- کرنش برشی در یک مدل دو بعدی تایر

1. Longitudinal direction 2. Lateral direction

بدست می‌آید.

(۸)

$$RRC = 1000\pi \left( \frac{p^2 b}{4EF_z \cdot csr} + \frac{GF_z \cdot csr}{4p^2 R_b^2 b} \right) h \cdot \sin \delta$$

### بررسی تاثیر عوامل اثرگذار بر روی مقاومت غلتشی

معادله (۸) شامل دو قسمت می‌باشد که قسمت اول که از ضرب تنش فشاری در کرنش فشاری می‌باشد، مربوط به تنش فشاری و قسمت دوم مربوط به تنش برشی می‌باشد. از آنجایی که برای رابرها نسبت پواسون تقریباً  $\nu = 0.5$  در نظر گرفت و با توجه به رابطه بین مدول برشی و مدول یانگ با فرض همگن بودن ماده  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

(۹)

$$RRC = 1000\pi \left( \frac{p^2 b}{4EF_z \cdot csr} + \frac{EF_z \cdot csr}{12p^2 R_b^2 b} \right) h \cdot \sin \delta$$

معادله (۹) نشان می‌دهد که ضریب مقاومت غلتشی رابطه مستقیم با ضخامت ترد و  $\sin \delta$  دارد و افزایش این پارامترها، باعث افزایش مقاومت غلتشی خواهد شد.  $\sin \delta$  دقیقاً نشان‌دهنده یک پارامتر مرتبط با مقاومت غلتشی می‌باشد و ضخامت ترد ( $h$ ) نیز با افزایش آن، حجم رابر افزایش پیدا می‌کند و باعث افزایش اتلاف انرژی می‌شود. همچنین با افزایش شعاع بلت، مقدار ضریب مقاومت غلتشی کاهش پیدا می‌کند، بنابراین به صورت کلی، تایرهای باری (TBR) مقاومت غلتشی کمتری در برابر تایرهای سواری (PCR) دارد. همچنین این معادله نشان می‌دهد که تاثیر فشار داخلی، عرض ترد، مدول الاستیسته، نیروی اعمالی بر تایر و  $csr$  بر روی مقاومت غلتشی می‌تواند مثبت یا منفی باشد.

در شکل ۴ مقدار ضریب مقاومت غلتشی بر حسب فشار داخلی برای تایر R22.5 HS850 315/80 با مشخصات موجود در جدول ۱ نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش فشار تا یک مقداری باعث کاهش ضریب مقاومت غلتشی می‌شود و از یک مقدار معین، افزایش فشار، باعث افزایش مقاومت غلتشی

اختلاف فاز بین تنش و کرنش می‌باشد. بنابراین کرنش‌ها و تنش‌های در معادله (۲) به صورت زیر نوشته می‌شود:

(۴)

$$\sigma_{zz} = \left( \frac{-p}{2csr} \right) \sin(\omega t + \delta) \quad \sigma_{xz} = \left( \frac{Gl}{2R_b} \right) \sin(\omega t + \delta)$$

$$\varepsilon_{zz} = \left( \frac{-p}{2E * csr} \right) \sin(\omega t) \quad \varepsilon_{xz} = \left( \frac{l}{4R_b} \right) \sin(\omega t)$$

با جانشین کردن مقادیر معادله (۴) در معادله (۳) رابطه زیر بدست خواهد آمد:

(۵)

$$E_{loss} = \int_0^{2\pi/\omega} \sigma_{zz} \dot{\varepsilon}_{zz} dt + 2 \int_0^{2\pi/\omega} \sigma_{xz} \dot{\varepsilon}_{xz} dt =$$

$$\pi \left( \frac{p^2}{4E * csr^2} + \frac{Gl^2}{4R_b^2} \right) \sin(\delta)$$

حجم ترد در تماس با سطح جاده از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$Vol = 2\pi R_b b h \cdot csr \quad (6)$$

که  $b$  عرض ترد و  $h$  ضخامت ترد می‌باشد. اگر ناحیه تماس فرض شود که به صورت مستطیلی می‌باشد، رابطه بین فشار داخلی، طول تماس، عرض ترد و نیروی تایر  $F_z$  در رابطه زیر آورده شده است.

$$l = \frac{F_z}{pb} \quad (7)$$

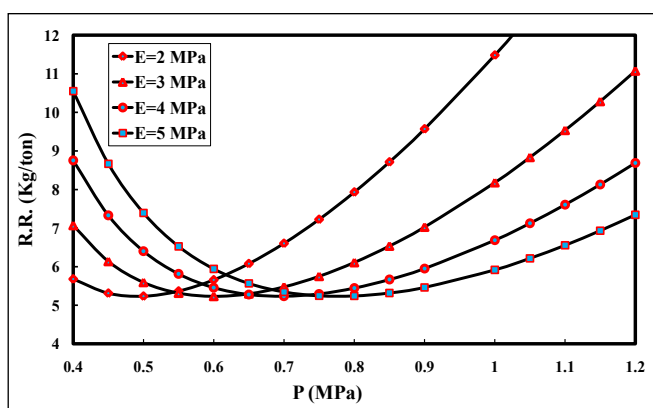
با جانشین کردن دو معادله آخر مربوط به طول تماس و حجم رابر در سطح تماس در معادله (۵)، مقدار نیروی مقاومت غلتشی  $F_R$  به صورت زیر حاصل می‌شود:

(۷)

$$F_R = \frac{E_{loss} Vol}{2\pi R_b} = \pi \left( \frac{p^2 b}{4E \cdot csr} + \frac{GF_z^2 \cdot csr}{4p^2 R_b^2 b} \right) h \cdot \sin \delta$$

ضریب مقاومت غلتشی تایر (RRC) با نرمالیزه کردن معادله بالا نسبت به  $F_z$  و ضرب در ۱۰۰۰ با واحد  $kg/ton$  به صورت زیر

خواهد شد. اگر به معادله ضریب مقاومت غلتشی (۶)، از دیدگاه قسمت اول شامل تنش فشاری و قسمت دوم تنش برشی نگاه شود، ملاحظه می‌شود که مقدار مربوط به تنش فشاری در معادله ضریب مقاومت غلتشی با فشار داخلی رابطه مستقیم توان دوم دارد که با افزایش فشار افزایش پیدا می‌کند، ولی تنش برشی رابطه عکس دارد که با افزایش فشار کاهش پیدا می‌کند.

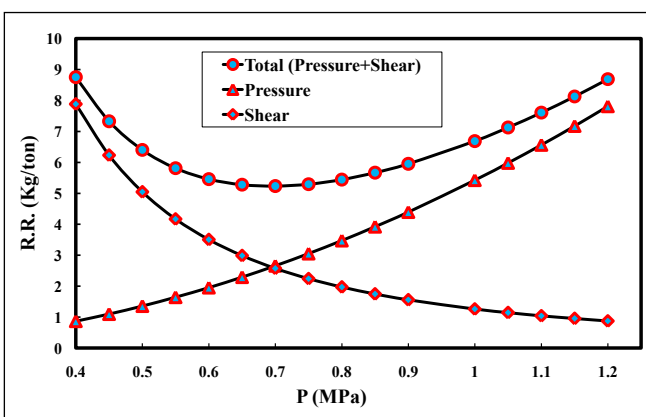


شکل ۵- تغییرات مقاومت غلتشی بر حسب فشار داخلی در مدول الاستیسیته متفاوت در تایر TBR

در شکل ۶ اثر CSR بر روی مقاومت غلتشی بر حسب فشار داخلی نشان داده شده است. پارامتر CSR بر روی محل حداقل مقاومت غلتشی تاثیر زیادی ندارد، اما در فشار استاندارد تایر مورد نظر ( $P=0.9 \text{ MPa}$ ) با افزایش CSR، چون توزیع تنش یکنواخت تر می‌شود، مقدار مقاومت غلتشی کاهش پیدا می‌کند. همچنین در شکل ۷ اثر بار روی تایر بر روی مقاومت غلتشی مورد بحث قرار گرفته است که در فشار استاندارد تایر مورد نظر ( $P=0.9 \text{ MPa}$ ) با افزایش نیروی وارد بر تایر، مقدار مقاومت غلتشی به علت کاهش تغییر شکل کاهش پیدا می‌کند.

همچنین در ادامه با استفاده از نرم افزار Isight Design Gateway با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی فشار داخلی، مدول یانگ، بار روی تایر، شعاع بلت، عرض ترد، ضخامت ترد، نرخ سطح تماس (CSR) و  $\sin \delta$  به عنوان ورودی نرم‌افزار، و در نظر گرفتن محدوده برای این ورودی‌ها (جدول ۲) مقدار مقاومت غلتشی بر اساس

نکته بعدی مربوط به اثر مدول الاستیسیته بر ناحیه حداقل ضریب مقاومت غلتشی بر حسب فشار می‌باشد که این امر را در شکل ۵ نشان داده شده است که با افزایش مدول الاستیسیته مقدار حداقل مقاومت غلتشی تغییر نمی‌کند ولی با کاهش مدول الاستیسیته،



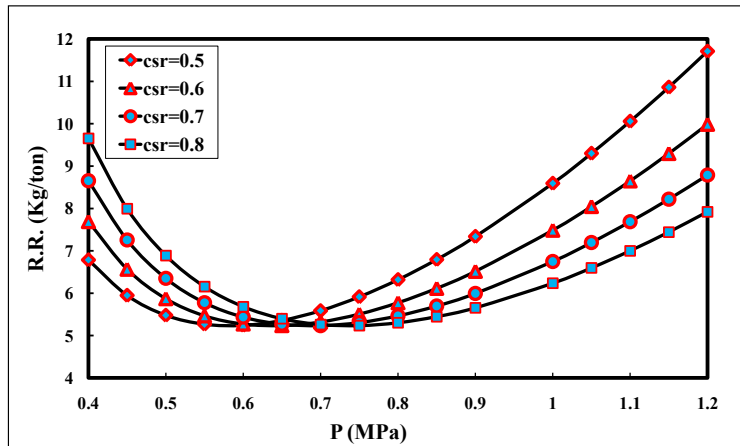
شکل ۴- تغییرات مقاومت غلتشی ناشی از فشار و برش در ناحیه ترد تایر TBR بر حسب فشار داخلی

جدول ۱- ویژگی‌های تایر R 22.5 HS 850 315/80

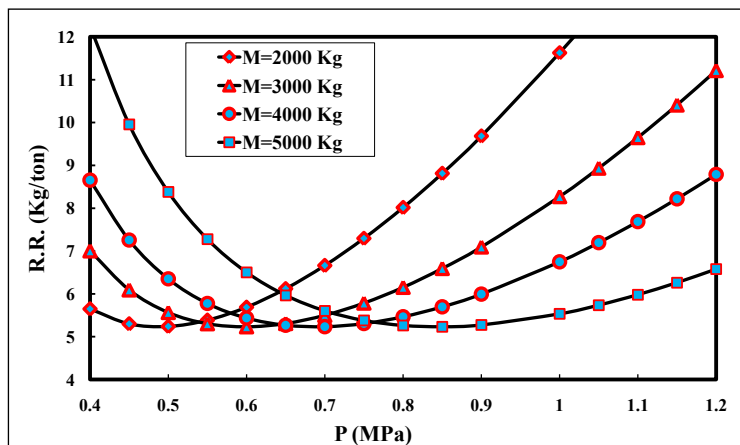
مقدار	واحد	پارامتر
فشار داخلی	$P$ (Mpa)	0.896318449
مدول یانگ	$E$ (Mpa)	4
بار روی تایر	$F_z$ (N)	39240
شعاع بلت	$R_b$ (mm)	520
$\sin \delta$	-	0.2
عرض ترد	$b$ (mm)	256.6
ضخامت ترد	$h$ (mm)	15
نرخ سطح تماس	-	0.71

نرخ سطح تماس

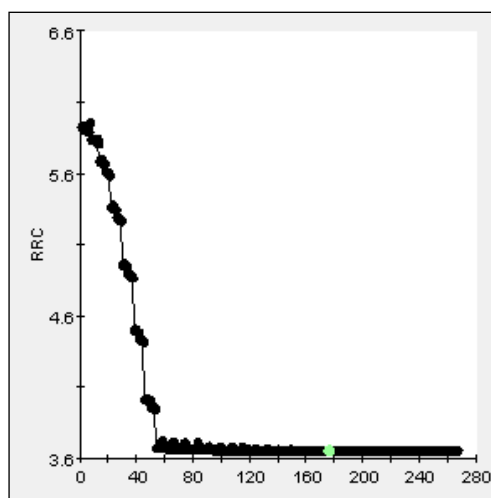
فرمول شماره (۹) با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی Hook-Jeeves مقدار در  $\sin\delta_{min}$ ،  $Rb_{max}$ ،  $b_{min}$ ،  $F_{max}$ ،  $csr_{max}$ ،  $b_{min}$ ،  $E_{max}$ ،  $P_{min}$  اتفاق  
 طبق شکل شماره ۸،  $RRC=3.65$  بدست خواهد آمد که این می‌افتد.



شکل ۶- تغییرات مقاومت غلتشی بر حسب فشار داخلی در متفاوت CSR در تایر TBR



شکل ۷- تغییرات مقاومت غلتشی بر حسب فشار داخلی در نیروهای متفاوت اعمالی بر تایر TBR



شکل ۸- تغییرات مقاومت غلتشی بر حسب فشار داخلی در نیروهای متفاوت اعمالی بر تایر TBR

جدول ۲- دامنه تغییر ویژگی های تایر 315/80 R 22.5 HS 850

دامنه تغییر پارامتر	واحد	مقدار
0.85-0.95	$P$ (Mpa)	فشار داخلی
3.5-4.5	$E$ (Mpa)	مدول یانگ
24525-39240	$F_z$ (N)	بار روی تایر
500-530	$R_b$ (mm)	شعاع بت
0.15-0.25	-	$\sin \delta$
240-260	$b$ (mm)	عرض ترد
14-16	$h$ (mm)	ضخامت ترد
0.65-0.75	-	نرخ سطح تماس

### نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله از یک روش تحلیلی به بررسی تاثیر عوامل مختلفی همچون فشار داخلی، مدول یانگ، بار روی تایر، شعاع بت، عرض ترد، ضخامت ترد، نرخ سطح تماس (CSF) و  $\sin \delta$  بر روی مقاومت غلتشی پرداخته شد و نشان داده شد که ضریب مقاومت غلتشی رابطه مستقیم با ضخامت ترد و  $\sin \delta$  دارد و افزایش این پارامترها، باعث افزایش مقاومت غلتشی خواهد شد و با افزایش شعاع بت، مقدار ضریب مقاومت غلتشی کاهش پیدا می کند. همچنین بر طبق این معادله تاثیر فشار داخلی، عرض ترد، مدول الاستیسته،

نیروی اعمالی بر تایر و CSF بر روی مقاومت غلتشی می تواند مثبت یا منفی باشد که بستگی به مقدار فشار داخلی تایر دارد. همچنین در انتها با استفاده از نرم افزار بهینه سازی کننده Isight Design Gateway مقدار بهینه مقاومت غلتشی تایر در یک تایر باری بدست آمده است.

### سپاسگزاری

IRM ...

### مراجع

1. H.B. Pacejka, Tyre and Vehicle Dynamics, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2006.
2. Tires and passenger vehicle fuel economy: informing consumers, improving performance, Committee for the National Tire Efficiency Study, Transportation Research Board of the National Academies, 2006, ISBN 0-309-09421-6.
3. Zepeng Wang, Jiana Ke, Liangxiang Ma, Analytical Method of the Rolling Resistance of Radial Tire Base on ANSYS. Key Engineering Materials Vol. 501 (2012) pp 259-262.
4. Golbakhshi, H. and Namjoo, M., "An Efficient 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. 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.
7. T.B. Rhyne, S.M. Cron, A study on minimum rolling resistance. Tire Sci. Technol. 40(4),
8. 220–233, 2012.



D

## Determining the effective factors on rolling resistance by analytical method

M.Rashidi Moghadam

1. PhD, Research and Development Department of Barez Industrial Group, Tehran, Iran

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

**Abstract:** Rolling resistance sits at the core of tyre development goals because of its considerable effect on the car's fuel economy. Rolling resistance depends many factors in a tire. The tread of tire have the most contributions in energy loss due to deformations caused by bending, pressure and shearing. Due to the long time of problem solving and the heterogeneity of numerical solutions as well as the inadequate understanding of the effect of different parameters on the rolling resistance, analytical solutions are used. . In this paper, by using the analytical method, the effect of various factors such as internal pressure, Young's modulus, tire load, belt radius, tread width, tread thickness, contact surface rate (csr) and  $\sin\delta$  on rolling resistance are investigated. . Finally, by using the Isight Design Gateway optimizer software, the optimal value of the tire rolling resistance in a TBR tire is obtained.

**Keywords:** Tire, Rolling resistance, Analytical Method