

بررسی تجربی و تحلیلی تأثیر دما و فشار باد بر مقاومت غلتشی تایر خودرو

عادل توفیقی^{۱*} و امیرحسین منصورفر^۲

۱- سرپرست مرکز آزمون تایر، شرکت مهندسی و تحقیقات صنایع لاستیک

۲- مدیر راهبرد، شرکت مهندسی و تحقیقات صنایع لاستیک

Adel.tofighi69@gmail.com

چکیده: مقاومت غلتشی تایر یکی از عوامل کلیدی در عملکرد وسایل نقلیه و مصرف سوخت است. این مقاومت ناشی از تغییر شکل تایر در حین تماس با سطح جاده و انرژی تلف شده در لاستیک است. تحقیقات نشان می‌دهند که افزایش دما معمولاً باعث کاهش ویسکوزیته مواد لاستیک و در نتیجه کاهش مقاومت غلتشی می‌شود، درحالی‌که کاهش فشار باد تایر منجر به افزایش سطح تماس تایر با جاده و افزایش مقاومت غلتشی خواهد شد. در این مقاله، ضمن بررسی مبانی نظری مقاومت غلتشی، اثرات دما و فشار باد بر ضریب مقاومت غلتشی (CRR) با استفاده از روابط تحلیلی و داده‌های تجربی و نتایج آزمایشگاهی مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین، نمودارهای تحلیلی قابل‌ویرایش برای نشان دادن وابستگی CRR به دما و فشار ارائه شده و اهمیت این پارامترها در کاهش مصرف سوخت و افزایش کارایی تایرها بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب بهینه فشار باد و کنترل دمای تایر می‌تواند نقش مهمی در کاهش مقاومت غلتشی و بهبود بهره‌وری انرژی خودروها داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت غلتشی تایر، فشار باد تایر، دمای تایر، ضریب مقاومت غلتشی (CRR)، ویسکوالاستیسیته لاستیک، مصرف سوخت

مقدمه

در دهه‌های اخیر، با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و ضرورت کاهش مصرف سوخت در وسایل نقلیه، پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی رفتار تایر و عوامل مؤثر بر مقاومت غلتشی آن انجام گرفته است. مقاومت غلتشی تایر (Rolling Resistance) یکی از پارامترهای کلیدی در تحلیل دینامیک خودرو و بهینه‌سازی مصرف انرژی به‌شمار می‌آید. عوامل متعددی بر مقاومت غلتشی تأثیرگذارند که از جمله می‌توان به فشار باد تایر، دمای کارکرد، ترکیب مواد لاستیک، نوع سطح جاده، سرعت خودرو، بار وارده بر تایر، ساختار و هندسه تایر اشاره کرد. از میان این عوامل، فشار باد و دما بیشترین تأثیر را دارند زیرا مستقیماً بر سختی جانبی و عمودی تایر و رفتار دینامیکی مواد تأثیر می‌گذارند.

در دماهای پایین، لاستیک رفتاری سفت‌تر دارد و انرژی بیشتری برای تغییر شکل موردنیاز است، در نتیجه مقاومت غلتشی افزایش می‌یابد. برعکس، در دماهای بالا، مواد لاستیکی نرم‌تر شده و بخشی از انرژی اتلافی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، فشار باد کم موجب افزایش سطح تماس تایر با زمین می‌شود و تغییر شکل بیشتری را در ناحیه تماس به‌همراه دارد که این امر افزایش مقاومت غلتشی را در پی دارد.

مبانی نظری مقاومت غلتشی تایر

۱. تعریف مقاومت غلتشی

مقاومت غلتشی نیرویی است که در جهت مخالف حرکت غلتشی تایر بر سطح جاده عمل می‌کند و موجب اتلاف انرژی مکانیکی می‌شود. این پدیده در اثر تغییر شکل الاستیکی و ویسکوالاستیکی مواد تایر در ناحیه تماس با سطح جاده ایجاد می‌شود. هنگامی که تایر در تماس با زمین است، قسمت جلویی آن فشرده شده و قسمت پشتی به حالت اولیه بازمی‌شود. این فرایند باعث تأخیر زمانی بین بارگذاری و بازگشت تغییر شکل (هیستریزیس) می‌شود که انرژی را به‌صورت گرما تلف می‌کند.

ضریب مقاومت غلتشی C_{rr} به‌صورت روبه‌رو تعریف می‌شود:

$$C_{rr} = \frac{F_{rr}}{N}$$

که در آن:

F_{rr} : نیروی مقاومت غلتشی (N) N : نیروی عمودی وارد بر تایر (N)

۲. عوامل مؤثر بر مقاومت غلتشی

ضریب مقاومت غلتشی تابع پارامترهای متعددی است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

- فشار باد تایر (P): کاهش فشار موجب افزایش تغییر شکل و افزایش C_{rr} می‌شود.
- دمای کاری تایر (T): افزایش دما معمولاً ویسکوزیته لاستیک را کاهش داده و C_{rr} را کم می‌کند.
- سرعت حرکت (v): در سرعت‌های بالا، تغییرات دما و سختی مواد بر رفتار تایر اثرگذارتر می‌شود.
- نوع ترکیب لاستیکی و ساختار تایر: استفاده از مواد با تلفات انرژی پایین (Low Hysteresis Compounds) مقاومت غلتشی را به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد.
- بار وارده (N): افزایش بار تا حدی باعث افزایش C_{rr} می‌شود، اما در مقادیر زیاد اثرات غیرخطی پدید می‌آیند.

۳. روابط تحلیلی مقاومت غلتشی

یکی از روابط تجربی پرکاربرد برای مقاومت غلتشی تایر عبارت است از:

$$C_{rr} = a + b \times P^{-1} + c \times T^{-1}$$

که در آن:

a و b : ضرایب تجربی وابسته به نوع تایر هستند.

P : فشار باد (kPa)

T : دمای تایر (°C)

این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش فشار باد یا دمای تایر، مقدار C_{rr} کاهش می‌یابد.

تأثیر مواد و ساختار تایر

مواد مورد استفاده در تایر شامل لاستیک طبیعی، لاستیک مصنوعی (مانند SBR و BR)، دوده، سیلیس، گوگرد و افزودنی‌های شیمیایی است. ترکیب این مواد، مدول یانگ و ضریب اتلاف انرژی را تعیین می‌کند.

کلیدی در بهینه‌سازی مصرف سوخت، افزایش دوام تایر و بهبود ایمنی خودرو دارد.

مطالعات تجربی نشان داده‌اند که ضریب مقاومت غلتشی C_{rr} با فشار تایر رابطه معکوس دارد. رابطه عمومی آن به شکل زیر است:

$$C_{rr}(P) = C_{rr,ref} \left(\frac{P_{ref}}{P} \right)^n$$

که در آن:

$C_{rr,ref}$: ضریب مقاومت غلتشی در فشار مرجع

P_{ref} : فشار مرجع تایر (kPa)

P : فشار فعلی تایر (kPa)

n : ضریب تجربی (بین ۰.۳ تا ۰.۶ برای تایرهای معمولی)

این رابطه نشان می‌دهد که افزایش فشار باد باعث کاهش C_{rr} می‌شود، اما میزان تأثیر آن غیرخطی است.

نتایج تجربی و داده‌های آزمایشگاهی در خصوص تأثیر فشار باد

در محیط آزمایشگاهی شرکت یک تایر مشخص با دو شرایط مختلف فشار باد تست شد و نتایج ضریب مقاومت غلتشی آن مطابق شکل ۲ و ۳ است:

Test Load :	Inflation:	Speed:
4.393 kN 448 Kg	30.5 PSI	80
Drum Diameter :	Type of	
	2.0 m	
Speed [Km/h]	80.00	
Parasitic Loss FPI [N]	18.69	
Rolling Resistance Force [N]	45.24	
RR Coefficient Cr [N/kN]	10.30	
RR Temp. Fr25 [N]	45.08	
RR Coefficient Cr25 [N/kN]	10.26	
Power [KW]	1.01	
Rolling Circumference [mm]	1886.95	
Rolling Radius [mm]	300.32	
% of Initial Circumference [%]	188.69	
0.4 m Ambient Temperature [°C]	24.40	
RR Coefficient Cr aligned [N/kN]	10.26	

شکل ۲- نتیجه آزمون با فشار باد ۳۰.۵ PSI

Test Load :	Inflation:	Speed:
4.393 kN 448 Kg	36 PSI	80
Drum Diameter :	Type of	
	2.0 m	
Speed [Km/h]	79.97	
Parasitic Loss FPI [N]	18.31	
Rolling Resistance Force [N]	42.15	
RR Coefficient Cr [N/kN]	9.59	
RR Temp. Fr25 [N]	42.29	
RR Coefficient Cr25 [N/kN]	9.62	
Power [KW]	0.94	
Rolling Circumference [mm]	1893.10	
Rolling Radius [mm]	301.30	
% of Initial Circumference [%]	189.31	
0.4 m Ambient Temperature [°C]	25.55	
RR Coefficient Cr aligned [N/kN]	9.62	

شکل ۳- نتیجه آزمون با فشار باد ۳۶ PSI

نتایج به‌دست‌آمده از تایر با فشار بادهای مختلف نشان می‌دهد که ضریب مقاومت غلتشی تایر با باد ۳۰.۵ psi برابر با ۱۰.۲۶ (شکل ۲) و ضریب مقاومت غلتشی تایر با باد ۳۶ psi برابر با ۹.۶۲ (شکل ۳) شده است در نتیجه فشار باد بیشتر باعث کاهش ضریب مقاومت غلتشی می‌شود و این دو پارامتر رابطه عکس با یکدیگر دارند.

از این‌رو فشار باد نقش کلیدی در کنترل مقاومت غلتشی دارد. افزایش فشار باد تا حد مجاز باعث کاهش تغییر شکل، کاهش اتلاف انرژی و بهبود بهره‌وری سوخت می‌شود. با این حال، فشار بیش‌ازحد می‌تواند پایداری و راحتی سواری را کاهش دهد. بنابراین، تنظیم فشار در محدوده بهینه تعیین‌شده توسط سازنده تایر برای دستیابی به حداقل CRR و بیشینه عمر تایر ضروری است.

افزایش درصد سیلیس در کامپاند لاستیکی می‌تواند باعث کاهش تلفات هیستریزس و در نتیجه کاهش مقاومت غلتشی شود.

تأثیر دما بر مقاومت غلتشی تایر

دمای تایر یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار دینامیکی و انرژی اتلاقی تایر است.

دمای داخلی تایر ناشی از سه منبع اصلی است:

- گرمای تولیدشده در اثر هیستریزس مواد لاستیکی.
- انتقال حرارت از سطح جاده به تایر.
- گرمای ناشی از اصطکاک تماس تایر و جاده.

افزایش دما معمولاً موجب نرم‌تر شدن مواد لاستیکی، کاهش مدول الاستیسیته و کاهش مقاومت غلتشی می‌شود. با این حال، در دماهای بسیار بالا، ساختار پلیمرها ممکن است دچار تخریب حرارتی شود و در نتیجه مقاومت غلتشی دوباره افزایش یابد. بنابراین، تأثیر دما غیرخطی و وابسته به محدوده حرارتی کارکرد تایر است.

نتایج تجربی و داده‌های آزمایشگاهی در خصوص تأثیر دما

اگر اندازه‌گیری‌ها در دمای ۲۵ °C امکان‌پذیر نباشد تصحیح دمایی با استفاده از فرمول زیر انجام می‌شود.

(اندازه‌گیری فقط در دماهای بین ۲۰ °C تا ۳۰ °C قابل قبول است.)

$$F_{r25} = F_r [1 + K(t_{amb} - 25)]$$

F_r : مقاومت غلتشی بر حسب N

t_{amb} : دمای محیط بر حسب °C

و K برای تایرهای رده‌های C1 برابر ۰.۰۰۸ برای تایرهای C2 و C3 با شاخص بار کمتر از ۱۲۱ برابر ۱۲۱ برابر با ۰.۰۱ و برای تایرهای C3 با شاخص بار بیشتر از ۱۲۱ برابر با ۰.۰۰۶ است.

باتوجه به مطالب بالا ضریب مقاومت غلتشی یک تایر C1 (سواری) با اندازه 185/65R15 در محیط آزمایشگاهی شرکت اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل ۱ قابل مشاهده است.

Test Load :	Inflation:	Speed:	Room temperature:
4.393 kN 448 Kg	30.5 PSI	80 - 80 Km/h	min: 24.4 °C max: 24.4 °C
Drum Diameter :	Type of Tire :		
	2.0 m		
Speed [Km/h]	80.00		80.00
Parasitic Loss FPI [N]	18.69		18.69
Rolling Resistance Force [N]	45.24		45.24
RR Coefficient Cr [N/kN]	10.30		10.30
RR Temp. Fr25 [N]	45.08		45.08
RR Coefficient Cr25 [N/kN]	10.26		10.26
Power [KW]	1.01		1.01
Rolling Circumference [mm]	1886.95		1886.95
Rolling Radius [mm]	300.32		300.32
% of Initial Circumference [%]	188.69		188.69
0.4 m Ambient Temperature [°C]	24.40		24.40
RR Coefficient Cr aligned [N/kN]	10.26		10.26

شکل ۱- تأثیر دمای محیط بر ضریب مقاومت غلتشی

باتوجه به نتایج آزمون می‌توان نتیجه گرفت که در دمای ۲۴.۴ °C نتیجه ضریب مقاومت غلتشی ۱۰.۳۰ ولی با تصحیح دمایی به ۲۵ °C نتیجه مقاومت غلتشی برابر با ۱۰.۲۶ شده است که می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دمای محیط و تایر نتیجه نیرو و ضریب مقاومت غلتشی کاهش می‌یابد.

تأثیر فشار باد تایر بر مقاومت غلتشی

فشار باد تایر یکی از مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر عملکرد حرکتی و مصرف انرژی خودرو است. کاهش فشار باد تایر منجر به افزایش سطح تماس تایر با جاده، تغییر شکل بیشتر دیواره‌ها و در نتیجه افزایش مقاومت غلتشی می‌شود. از طرف دیگر، فشار بیش‌ازحد باعث کاهش ناحیه تماس و افزایش سایش ناهمگون و کاهش چسبندگی می‌شود. بنابراین، تنظیم دقیق فشار تایر، نقشی

اثرات کاهش مقاومت غلتشی

کاهش مقاومت غلتشی تأثیر مستقیمی بر رانندگی کلی خودرو دارد. مطالعات SAE (۲۰۲۰) و Michelin (۲۰۲۱) نشان داده‌اند:

- هر کاهش ۱۰٪ در C_{rr} می‌تواند مصرف سوخت را تا ۲٪ کاهش دهد.
- در خودروهای الکتریکی، کاهش C_{rr} باعث افزایش برد حرکتی تا ۴٪ می‌شود.
- کاهش مقاومت غلتشی هم‌چنین موجب کاهش انتشار CO_2 به میزان حدود ۳ گرم در هر کیلومتر می‌شود.

این اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی، اهمیت طراحی تایرهای کم‌مصرف (Low Rolling Resistance Tires) را برجسته می‌سازد.

نتیجه‌گیری

مقاومت غلتشی تایر به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در مصرف انرژی خودرو، به‌شدت تحت تأثیر دما و فشار است. تنظیم فشار بهینه و انتخاب مواد مناسب می‌تواند تا ۲۰٪ مقاومت غلتشی را کاهش دهد، که این امر تأثیر چشم‌گیری بر مصرف سوخت، برد خودروهای برقی و دوام تایر دارد. بنابراین، هم از دیدگاه علمی و هم صنعتی، توجه به رابطه پیچیده بین دما، فشار و رفتار ویسکوالاستیک تایر، مسیر اصلی برای دستیابی به خودروهای کم‌مصرف‌تر و پایدارتر است.

مراجع

- [۱] جعفری، م، احمدی، س، و رضایی، ۱۳۹۹. بررسی تجربی مقاومت غلتشی تایر در شرایط مختلف دما و فشار باد. مجله مهندسی مکانیک ایران، ۵۱ (۴)، ۲۲۵-۲۳۶.
- [۲] قنبری، ن، و نیک‌نام، ر. ۱۴۰۰. تحلیل اثر فشار باد تایر بر مصرف سوخت خودروهای سواری. نشریه صنعت حمل‌ونقل، ۱۲ (۲)، ۸۵-۹۵.
- [۳] INSO 15877، و ۱۴۰۲. مقاومت غلتشی تایرهای رادیال، ۱۰۷-۱۲۷.
- [4] Pacejka, H. B. (2012). Tire and Vehicle Dynamics (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- [5] SAE International. (2020). Rolling Resistance Measurement Procedure for Passenger Car Tires (J1269). Society of Automotive Engineers.
- [6] Michelin Research Group. (2019). Effect of Tire Inflation and Temperature on Rolling Resistance and Fuel Efficiency. Technical Report No. MRG-2019/11.
- [7] ISO 8767. (2018). Tyre Rolling Resistance — Measurement Methods. International Organization for Standardization.