

چکیده

در این مقاله، روش‌های مختلفی برای شناسایی ضریب اصطکاک طولی بیشینه μmax برای و سطح جاده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به اهمیت این پارامتر در عملکرد تایر، هدف اصلی ارائه رویکردی دقیق و قابل پیاده‌سازی برای تخمین μmaxدر شرایط واقعی ترمزگیری است. داده‌های تجربی از تست‌های اسکید تریلر استخراج شده و با استفاده از روش‌های فیلتر میانگین متحرک، فیت چندجمله‌ای درجه ۳ و ۵ و تحلیل فرکانسی مبتنی بر سری فوریه پردازش شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که روش تحلیل هارمونیک، به‌ویژه در مؤلفه‌های هفتم و هشتم، عملکرد خوبی در شناسایی نقطه بحرانی اصطکاک داشته و مقدار μmaxرا با دقت بالاتری نسبت به برخی روش‌ها استخراج کرده است. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه الگوریتم‌های هوشمند کنترل دینامیک تایر و اعتبارسنجی تست‌های ترمزگیری مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: ضریب اصطکاک، نسبت لغزش، تحلیل فرکانسی

مقدمه

ضریب اصطکاک طولی جاده (μx) به صورت نسبت نیروی طولی Fxو نیروی عمودی Fzتعریف می‌شود. همچنین در برخی مقالات به آن نیروی کشش نرمال شده normalized traction force گفته می‌شود. برای سادگی، در این مقاله، μابه عنوان ضریب اصطکاک طولی لحظه‌ای جاده نامگذاری شده است و μmaxنشان دهنده حداکثر مقدار μاست. از آنجایی که عوامل زیادی بر ضریب اصطکاک جاده تأثیر می‌گذارند، مانند جنس جاده، شرایط جاده، نوع و فشار لاستیک، سرعت خودرو و غیره، شناسایی دقیق μmaxهمیشه یک رویداد دشوار و چالش برانگیز در حوزه خودرو است.

نیروی مماسی تایر Tire Tangential Forceیکی از سه نیروی اصلی وارد بر تایر خودرو است و نقش مهمی در دینامیک حرکت خودرو دارد. این نیرو در جهت حرکت خودرو عمل می‌کند، یعنی در راستای مماس با سطح چرخش تایر. برخلاف نیروی شعاعی و نیروی جانبی، نیروی مماسی مسئول شتاب‌گیری و ترمزگیری خودرو است. در شتاب‌گیری؛ موتور نیرو تولید می‌کند که از طریق سیستم انتقال قدرت به تایرها منتقل می‌شود. این نیرو به صورت نیروی مماسی باعث حرکت خودرو به جلو می‌شود. در ترمزگیری؛ هنگام ترمز، نیروی مماسی در جهت مخالف حرکت عمل می‌کند تا سرعت خودرو کاهش یابد. در کنترل کشش و پایداری؛ سیستم‌هایی مثل ESCو Traction Control؛ تغییرات نیروی مماسی برای تشخیص لغزش و اصلاح مسیر استفاده می‌کنند.

طبق مطالعات، با افزایش سرعت خودرو، نوسانات نیروی مماسی بیشتر می‌شود. مثلاً در سرعت‌های بالا (مثلاً از ۱۲۰ تا ۲۲۰ کیلومتر بر ساعت)، نوسان این نیرو می‌تواند از حدود ۲۰۰ نیوتن تا بیش از ۹۰۰ نیوتن افزایش پیدا کند. این نوسانات معمولاً به دلیل تغییرات در ساختار تایر، فشار باد، دمای سطح جاده و شرایط محیطی رخ می‌دهند. در طراحی تایرها، این نیرو اهمیت زیادی دارد چون مستقیماً روی عملکرد، ایمنی و راحتی رانندگی تأثیر می‌گذارد. در تایرهای هوشمند، حسگرهایی برای اندازه‌گیری این نیرو نصب می‌شوند تا اطلاعات دقیق‌تری از تعامل تایر با سطح جاده به دست آید.

ضریب اصطکاک طولی جاده Longitudinal Road Friction Coefficientدر مهندسی خودرو و طراحی جاده‌ها بسیار مهم است، چراکه مستقیماً روی ایمنی، عملکرد ترمز و کنترل خودرو تأثیر می‌گذارد. این ضریب نشان‌دهنده‌ی میزان اصطکاک بین تایر خودرو و سطح جاده در جهت حرکت (طولی) است. زمانیکه خودرو شتاب می‌گیرد یا ترمز می‌کند، نیرویی در راستای طولی بین تایر و جاده ایجاد می‌شود. ضریب اصطکاک طولی تعیین می‌کند که این نیرو تا چه حد مؤثر است.

سیستم‌های کنترل الکترونیکی ایمنی فعال خودرو مانند سیستم ترمز ضد قفل (ABS)، کنترل کشش (TCS)و کنترل پایداری الکترونیکی (ESC)وظیفه تنظیم نیروی مماسی تایرها را دارند تا خودرو به صورت ایمن حرکت کند. این نیروها به توانایی تایر در ایجاد اصطکاک با سطح جاده بستگی دارد. به همین دلیل، عملکرد این سیستم‌ها بسیار وابسته به مقدار اصطکاک موجود بین تایر و جاده است که با حداکثر ضریب اصطکاک جاده (μmax)نشان داده می‌شود. اما نکته مهم این است که مقدار μmaxهمچنین نقطه بهینه نسبت لغزش (sop)که مربوط به بیشترین اصطکاک است، بسته به نوع جاده (مثل آسفالت، خاک، برف) و شرایط آن (خشک، خیس، یخ‌زده) تغییر می‌کند. بنابراین، برای اینکه سیستم‌های ایمنی فعال عملکرده دقیق و بهینه داشته باشند، باید بتوانند مقدار واقعی μmaxو sopرا بر اساس شرایط متغیر جاده به درستی تشخیص دهند.[1]

شناسایی ضریب اصطکاک بیشینه تایر با استفاده از اسکید تریلر

نام نویسنده: سعید امراللهی

سمت و محل کار نویسنده: مسئول فنی شرکت آزمون میدانی تایر مدبران (کارشناس تکنیکال صنایع لاستیک یزد)

بنابراین شناسایی حداکثر ضریب اصطکاک جاده و نسبت لغزش بهینه برای دینامیک و کنترل خودرو بسیار مهم است. رویکردهای مختلفی برای تخمین μmaxتوسعه یافته‌اند که به‌طور کلی در دو دسته (مبتنی بر علت) و (مبتنی بر معلول) طبقه‌بندی می‌شوند. دسته اول با استفاده از حسگرهای فیزیکی به بررسی ویژگی‌های سطح تماس تایر و جاده می‌پردازد. این روش‌ها شامل استفاده از حسگرهای نوری برای تشخیص رطوبت سطح جاده، اندازه‌گیری جابجایی بدنه تایر توسط واحدهای LED، یا تحلیل بازتاب‌های مایکروویو هستند. با وجود دقت بالا، این روش‌ها به‌دلیل نیاز به تجهیزات اضافی و هزینه‌های بالا، در خودروهای تولید انبوه کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.[1]

در مقابل، روشهای مبتنی بر اثر برای شناسایی μmaxاز طریق تخمین پاسخ پارامتر دینامیکی خودرو که از شرایط مختلف اصطکاک جاده ایجاد می‌شود، به کار گرفته شده است. در این زمینه، محققان حداقل چهار نوع رویکرد شناسایی μmaxرا دنبال کرده‌اند: روش‌های آکوستیک، روش‌های تغییر شکل آ لاستیک، روش‌های مبتنی بر لغزش و روش‌های مبتنی بر مدل. در روش آکوستیک از حسگرهای نوری و نویز برای تحلیل صدایی که لاستیک تولید می‌کند و از این طریق μmaxرا استنباط می‌کند. در روش‌های تغییر شکل تایر، از یک حسگر مغناطیسی تعبیه شده در آج تایر برای اندازه‌گیری کرنش موضعی تایر و همچنین تنش استفاده کردند، زیرا سیگنال‌های شناسایی شده از سطح داخلی تایر، اطلاعات μmaxرا منعکس می‌کردند.

روش‌های مبتنی بر لغزش در شناسایی μmaxبسیار محبوب بودند. فردریک [2] ابتدا رویکرد تخمین μmaxرا بر اساس نسبت لغزش پیشنهاد داد، متعاقباً روش‌های زیادی بر اساس این نظریه ظهور کردند. به طور کلی، این روش‌ها از فیلتر کالمن یا روش حداقل مربعات بازگشتی برای تخمین محدوده ضریب اصطکاک جاده در مقابل منحنی نسبت لغزش تحت یک بازه کوچک نسبت لغزش استفاده کردند، سپس حداکثر ضریب اصطکاک جاده بر اساس مقدار محدوده لغزش شناسایی شده است.

مرجع [4] رابطه متناظر بین حداکثر ضریب اصطکاک جاده و دامنه لغزش را ارائه کرده است. رویکردهای مبتنی بر مدل را بر اساس منحنی‌های ضریب اصطکاک طولی جاده در مقابل نسبت لغزش جاده‌های معمولی، مانند مدل بورکهارت و فرمول جادویی شرح دادند و حداکثر ضریب اصطکاک جاده با تخمین پارامترهای برازش چنین مدل‌هایی شناسایی می‌شود. در سال‌های اخیر، استفاده از الگوریتم‌های تخمین و فیلترهای تطبیقی مانند فیلتر کالمن، روش‌های حداقل مربعات بازگشتی recursive least squareو شبکه‌های عصبی نیز در این زمینه رایج شده‌اند. این روش‌ها با بهره‌گیری از داده‌های موجود در سیستم‌های کنترل خودرو، امکان تخمین بلادرنگ و بدون نیاز به حسگرهای خارجی را فراهم می‌سازند.[1]

به جز چهار رویکرد معرفی شده در بالا، رویکردهای دیگری نیز برای شناسایی μmaxوجود داشت. مراجع [5-7]جهت مطالعه بیشتر در قسمت مراجع ارائه شده است. مرجع [5] از یک معادله غیرخطی برای برازش داده‌های آزمایش ضریب اصطکاک جاده استفاده کرده اند و مقدار اوج منحنی برازش را به عنوان μmaxتخمینی در نظر گرفتند. مرجع [6] روشی را با استفاده از شدت ترمز اعمال شده برای شناسایی μmaxارائه کرده است. مرجع [7] از یک سیستم GPS برای تخمین زاویه لغزش جانبی لاستیک استفاده کردند و حداکثر ضریب اصطکاک جانبی جاده بر اساس دینامیک جانبی خودرو شناسایی شده که در هنگام فرمان دادن مؤثر است. با این حال، بسیاری از این روش‌ها در شرایط عملیاتی پیچیده خودرو دچار افت دقت می‌شوند یا نیازمند تنظیمات حساس هستند. از این‌رو، توسعه روش‌هایی که بتوانند به‌صورت مداوم، تطبیقی و با قابلیت پیاده‌سازی در زمان واقعی μmaxرا تخمین بزنند، همچنان یکی از اهداف کلیدی پژوهش‌های نوین در این حوزه است.

بخش تجربی

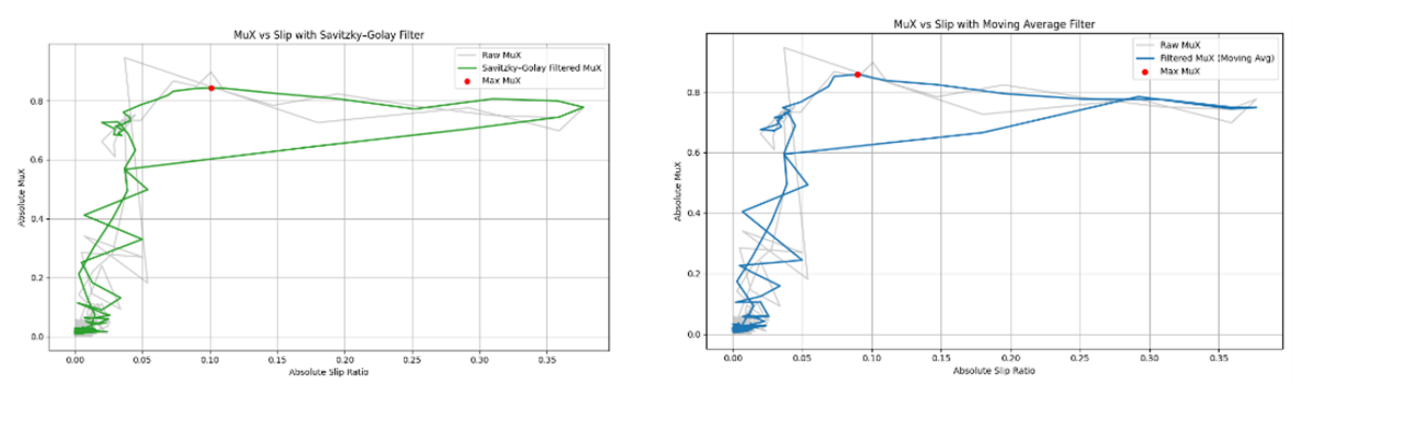
این مقاله تلاش می‌کند تا چند نوع رویکرد مؤثر برای شناسایی μmaxو sop(نسبت لغزش بهینه) بر اساس تحلیل سیگنال‌های دینامیکی را بررسی کند. با تمرکز بر دیتای واقعی استخراج شده از داده های ترمزگیری بر روی تایر با استفاده از دستگاه اسکید تریلر، روشی مبتنی بر پردازش هارمونیک و تحلیل فرکانسی ارائه شده است که با استفاده از کدهای پایتون، ضریب اصطکاک بیشینه را از داده‌های تجربی استخراج می‌کند. این رویکرد امکان تخمین μmaxرا بدون نیاز به حسگرهای خارجی، بلکه با بهره‌گیری از ویژگی‌های فرکانسی سیگنال‌های ثبت‌شده فراهم می‌سازد که به درک عمیق‌تری از رفتار تایر در شرایط مختلف آزمون های ترمزگیری منجر می‌شود.

استفاده از تحلیل هارمونیک به‌عنوان ابزاری برای استخراج ویژگی‌های پنهان در داده‌های دینامیکی، امکان شناسایی الگوهای اصطکاک را فراهم می‌کند. در ادامه، ضمن مرور روش‌های موجود، ساختار الگوریتم پیشنهادی و نتایج تجربی حاصل از پیاده‌سازی آن با استفاده از داده‌های واقعی ارائه خواهد شد. هدف نهایی، ارائه روشی قابل اعتماد، جهت تحلیل پایداری تایر است و بتواند μmaxرا در شرایط عملیاتی واقعی با دقت بالا تخمین بزند.

روش نرم‌افزار و مقایسه با روش‌های دقیق‌تر

در بررسی رفتار اصطکاکي تایر، نرم‌افزار مورد استفاده دستگاه اسکید تریلر، از یک فیلتر میانگین متحرک ۵ نقطه‌ای برای صاف‌سازی نمودار ضریب اصطکاک (μx) نسبت به (slip ratio) نسبت لغزش بهره می‌برد. پس از اعمال این فیلتر، مقدار بیشینه‌ی نمودار حاصل به‌عنوان ضریب اصطکاک نهایی توسط نرم افزار گزارش می‌شود. این روش با وجود سادگی، ممکن است در برخی موارد باعث افت دقت در تشخیص قله‌های واقعی شود یا نوسانات لحظه‌ای را به‌درستی بازتاب ندهد. از نتایج حاصل شده در یک نمونه آزمون معتبر، ضریب اصطکاک نهایی برابر با ۰/۸۵۸ و نسبت لغزش متناظر آن برابر با ۰/۹- گزارش شده است که این مقادیر با اعمال فیلتر میانگین متحرک ۵ نقطه‌ای به داده‌ها به‌دست آمده‌اند. نمودار مربوط به این نمونه آزمون در ادامه آمده است.

در مقایسه، استفاده از فیلترهای پیشرفته‌تر مانند فیلتر Savitzky-Golayکه براساس برازش چندجمله‌ای عمل می‌کند، نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. این فیلتر ضمن حذف نویز، شکل واقعی منحنی را حفظ کرده و قله‌های اصطکاکي را با دقت بالاتری شناسایی می‌کند. بنابراین، استفاده از روش‌های جایگزین می‌تواند به بهبود اعتبار نتایج و تحلیل دقیق‌تر رفتار تایر در شرایط بحرانی کمک کند. در همان نمونه آزمون، ضریب اصطکاک نهایی برابر با ۰/۸۴۳ و نسبت لغزش متناظر آن برابر با ۰/۱۰۱- حاصل شده است.



نمودار ۱: سمت راست فیلتر شده با روش میانگین متحرک. سمت چپ فیلتر شده با روش Savitzky-Golay

همچنین برای تحلیل رفتار اصطکاک و شناسایی نقطه بحرانی در سیستم‌های ترمزگیری، روش‌های متنوعی وجود دارد که هرکدام از زاویه‌ای خاص به مسئله نگاه می‌کنند. در جدول زیر خلاصه ای از این روش ها ارائه شده است:

جدول ۱: روش‌های تحلیلی مناسب برای تحلیل رفتار اصطکاک

مناسب برای	نیاز به داده زیاد	پیچیدگی	دقت	روش
مدل‌سازی کلی	نه	کم	متوسط	Polynomial Fit
تحلیل فرکانسی	نه	متوسط	بالا	FFT
نوسانات گذرا	نه	بالا	بالا	Wavelet
منحنی‌های پیچیده	نه	متوسط	بالا	Spline
تخمین حالت	نه	بالا	بالا	Kalman Filter
پیش‌بینی هوشمند	بله	بسیار بالا	بسیار بالا	Machine Learning

برای استخراج نقطه بحرانی ضریب اصطکاک μmaxاز داده‌های تست ترمزگیری، چندین روش مختلف مورد استفاده قرار گرفت. با اینکه این روش‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت، اما با توجه به خصوصیات داده‌های موجود، روش تحلیل هارمونیک بهترین نتایج را ارائه داد و ضریب اصطکاک بیشینه‌ای نزدیک‌تر به واقعیت به دست آورد. بنابراین در ادامه نتایج تحلیل هارمونیک ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بررسی رفتار دینامیکی سیستم ترمزگیری از طریق تحلیل سیگنال اصطکاک
μmaxبا استفاده از **تحلیل فرکانسی با سری فوریه (FFT)**:

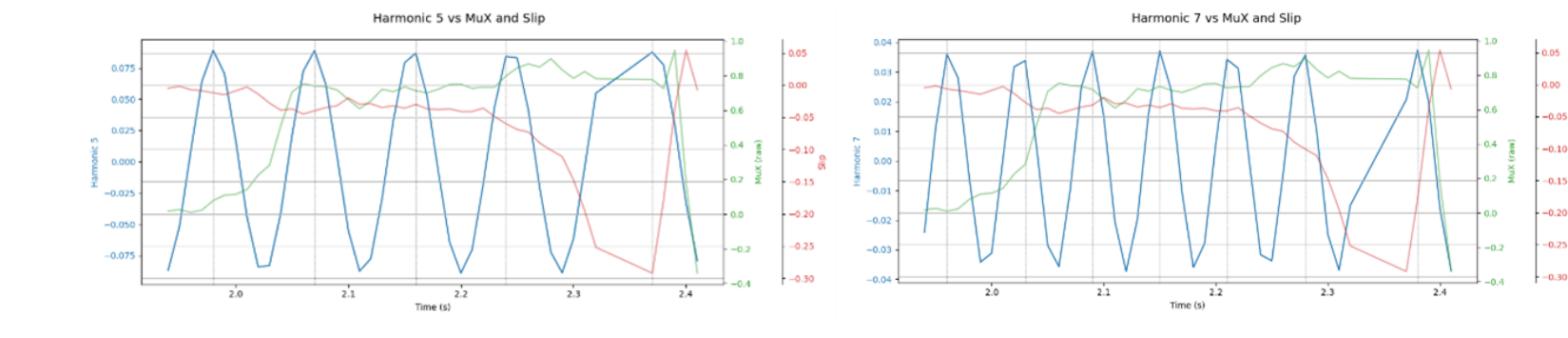
مراحل: استخراج داده‌های خام از تست اسکید تریلر. داده‌ها شامل زمان، ضریب لغزش (Slip)، ضریب اصطکاک (μx)، و فشار ترمز. تنها داده‌هایی انتخاب شدند که فشار ترمز فعال بوده و Slipدر بازه فیزیکی معتبر قرار داشت.

تحلیل فرکانسی با FFT: سیگنال μmaxبا سری فوریه تجزیه شد. برای هر هارمونیک (از ۱ تا ۱۰)، فقط مؤلفه فرکانسی متناظر نگه داشته شد. سیگنال بازسازی‌شده با استفاده از Ifft به‌دست آمد.



شناسایی قله‌ها در هر هارمونیک: با استفاده از تابع find peaks، نقاط بیشینه در هر سیگنال هارمونیکی پیدا شد. برای هر قله، زمان وقوع، مقدار واقعی μx و مقدار Slipاز داده خام استخراج شد.

رسم نمودار ترکیبی: برای هر هارمونیک، نموداری رسم شد که شامل: سیگنال هارمونیک، μx واقعی، Slipواقعی، خطوط عمود نقطه‌چین از قله‌ها تا محور زمان.



نمودار ۲: نمونه‌هایی از هارمونیک های ۷ و ۵ رسم شده بر روی نمودار ضریب اصطکاک و نسبت لغزش در زمان ترمزگیری برای هر هارمونیک، بیشترین مقدار μxو زمان وقوع آن ثبت شد. جدول نهایی نشان داد که کدام هارمونیک بیشترین اصطکاک را آشکار کرده و در چه شرایطی.

جدول ۲: ضریب اصطکاک بیشینه و نسبت لغزش در زمان ترمز گیری

Slip	μx	Time (s)	Harmonic
-0.04100	0.75100	2.200	1
-0.29200	0.77600	2.370	3
-0.06000	0.79700	2.240	5
-0.10100	0.89700	2.280	7

نتیجه: هارمونیک‌های پایین‌تر (۱-۳): رفتار کلی و پایدار سیستم را نشان دادند. هارمونیک‌های میانی (۴-۷): نوسانات موضعی و تغییرات لحظه‌ای را برجسته کردند. هارمونیک‌های بالاتر (۸-۱۰): نقاط بحرانی با اصطکاک بالا و لغزش شدید را آشکار کردند.

تحلیل مؤلفه‌های فرکانسی سیگنال اصطکاک با استفاده از سری فوریه، امکان شناسایی دقیق‌تر نقاط بحرانی در سیستم ترمزگیری را فراهم ساخت. هر هارمونیک رفتار خاصی از سیستم را برجسته کرد؛ از پایداری کلی تا نوسانات موضعی و شرایط بحرانی. این روش می‌تواند در طراحی کنترلرهای هوشمند، مدل‌سازی دینامیک تایر، و بهینه‌سازی سیستم‌های ABSمورد استفاده قرار گیرد.

بحث و نتیجه گیری

در تحلیل فرکانسی، هرچه سیگنال نوسان بیشتری داشته باشد، مؤلفه‌های فرکانسی واضح‌تر و قابل تفکیک‌تر می‌شوند. با افزایش دامنه نوسان، می‌توان هارمونیک‌های بالاتر و نقاط بحرانی رو دقیق‌تر شناسایی کرد. بنابراین محدود کردن اعتبار تست‌ها به لغزش (slip ratio) بالای ۲۰٪ در پیش شرط های معتبر خواندن نتایج ترمز گیری اسکید تریلر، ممکن است با هدف افزایش دامنه نوسان سیگنال اصطکاک انجام شده باشد. این کار باعث می‌شود مؤلفه‌های فرکانسی در تحلیل‌هایی مانند FFTبا استخراج هارمونیک‌ها واضح‌تر باشند و نقطه بحرانی اصطکاک با دقت بیشتری شناسایی شود. اگرچه این رویکرد ممکن است برخی تست‌های واقعی را حذف کند، اما از منظر تحلیل فرکانسی، می‌تواند به بهینه‌سازی نتایج کمک کند.

یکی از مسیرهای خوب برای ادامه‌ی این تحقیق، ساختن الگوریتمی است که بتواند هارمونیک‌های مهم را بر اساس رفتار واقعی سیستم انتخاب کند. به جای اینکه فقط به مقدار انرژی طیف بسنده کنیم، این الگوریتم هارمونیک‌هایی را پیدا می‌کند که علاوه بر پرقدردت بودن، با اتفاقات مهم فیزیکی مثل بیشینه اصطکاک، تغییرات لغزش یا فشار ترمز هم ارتباط دارند. این کار کمک می‌کند مدل‌های فرکانسی دقیق‌تر و قابل فهم‌تری برای تحلیل تعامل تایر و جاده ساخته شود.

مراجع

[1] GUAN Hsin, et al. Identification of Maximum Road Friction Coefficient and Optimal Slip Ratio Based on Road Type Recognition. July 25, 2014

[2] FREDRIK G. Slip-based tire-road friction estimation[J]. Auromaricu, 1997, 33(6): 1087–1099.

[3] CHANKU L, et al. Real-time slip-based estimation of maximum tire-road friction coefficient[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2004, 9(2): 454-458.

[4] RAJESH R, et al. Algorithms for real-time estimation of individual wheel tire-road friction coefficients[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 17(6): 1–13

[5] HEDRICK K, et al. Monitoring of the friction coefficient between tyre and road surface[C]// Proceedings of IEEE Conference on Control Applications, Glasgow, UK, 1994: 613–618.

[6] ONO E, et al. Estimation of automotive tire force characteristics using wheel velocity[J]. Control Engineering Practice, 2003, 13(11): 1361–1370.

[7] HAHN J, et al. GPS-based real-time identification of tire-road friction coefficient[J]. IEEE Transactions in Control Systems Technology, 2002, 10(3): 331–343