

شبیه سازی عددی سایش تایر خودرو سرپیچ جاده به روش اجزا محدود

N Numerical simulation of tire wear in cornering

چکیده

از گذشته، تایر به عنوان یکی از اجزای اولیه خودرو، مورد توجه طراحان صنعت خودرو سازی بوده است. پاسخ مکانیکی تایر در رفتار کل خودرو اثرگذار است. از همین رو بررسی عملکرد و دوام آن از جمله موضوعات در حوزه تایر بوده است. با ورود رایانه و نرم افزارهای المان محدود عرصه جدیدی در تحقیق و پژوهش تایر ایجاد شد. توسعه روش المان محدود این امکان را فراهم آورد تا بادقت بالاتری به بهینه سازی این جز مؤثر خودرو پرداخته شود از آسیب هایی که به تایر وارد می شود از دست دادن آج است. سایش آج موجب از دست رفتن کیفیت تماس با جاده می شود و همین موضوع تعیین کننده عمر تایر است. در این مطالعه، سایش تایر برای یک وسیله نقلیه در حال پیچش به صورت سه بعدی شبیه سازی شده است. برای این منظور، یک مدل المان محدود در نرم افزار تجاری ABAQUS توسعه داده شده است. فرایند سایش با استفاده از قضیه سایش خطی و با نوشتن یک زیر روال مدل سازی شده است. از تکنیک شبکه تطبیقی برای شبکه بندی مجدد در ناحیه تماس تایر و جاده استفاده شده است. از تکنیک انتقال حالت پایدار برای شبیه سازی حرکت بلند مدت استفاده شده است که به طور قابل توجهی هزینه زمانی را کاهش می دهد. نتایج نشان می دهد که در پیچش خودرو، سایش تایر به یک طرف پیشروی می کند. علاوه بر این در سرعت خطی 8 m/s ، سایش تایر سرپیچ در مقایسه با سایش تایر برای حرکت مستقیم خودرو به طور قابل توجهی افزایش می یابد. پیشانی تایر در ناحیه تماس و داخل دایره پیچش جاده است. پیشانی تایر با توجه به افزایش فشار و رابطه Archard، سایش بیشتری نسبت به سایر نقاط تحمل می کند.

کلمات کلیدی: تایر، خودرو، سایش، شبیه سازی

نوع مقاله: پژوهشی

علی شکوهنده^۱، حامد سعیدی گوگرچین^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران

hsaeidi@iust.ac.ir

ایمیل نویسندگان و عهده دار مکاتبات:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

۱- مقدمه

از گذشته، تایر به عنوان یکی اجزای اولیه خودرو، مورد توجه طراحان صنعت خودروسازی بوده است. پاسخ مکانیکی تایر در رفتار کل خودرو اثرگذار است. از همین رو بررسی عملکرد و دوام آن از جمله موضوعات در حوزه تایر بوده است. با ورود رایانه و نرم افزارهای المان محدود عرصه‌ی جدیدی در تحقیق و پژوهش تایر ایجاد شد. توسعه روش المان محدود این امکان را فراهم آورد تا بادقت بالاتری به بهینه‌سازی این جز مؤثر خودرو پرداخته شود. از آسیب‌هایی که به تایر وارد می‌شود از دست‌دادن آج است. سایش آج موجب از دست رفتن کیفیت تماس با جاده می‌شود و همین موضوع تعیین کننده عمر تایر است. زمانی که یک تایر دچار سایش می‌شود، حتی قبل از آن که کاملاً فرسوده شود، به محیط‌زیست آسیب می‌زند، چراکه با جدا شدن لاستیک آج و اضافه شدن به محیط‌زیست آلودگی زیادی ایجاد می‌شود. به همین سبب کاهش سایش تایر چه از نظر هزینه مصرف و چه از نظر ملاحظات محیط‌زیستی از اهمیت بالایی برخوردار است. پیش از این محققان دیگری نیز در صدد بررسی این پدیده پرداخته‌اند (پارک و یو، ۲۰۰۶). ایشان با انجام آزمایش‌هایی توزیع فشار در ناحیه نقش پا یک نمونه تایر را در نرم‌افزار LS-Dyna شبیه‌سازی نمودند و با مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مدل اجزا محدود معتبری ارائه نمودند. وی برای انجام آزمایش از مدل یک‌چهارم سامانه تعلیق استفاده کرده است. اثرات دینامیکی سامانه تعلیق در سایش غیریکنواخت تایر نیز مورد مطالعه قرار گرفته است (وین، ۲۰۰۷). بدین منظور با استفاده از یک مدل یک‌چهارم خودرو و نرم‌افزار Matlab Simulink اثر خود - تحریکی ارتعاشی را مدل‌سازی و سایش را به وسیله این نیرو شبیه‌سازی کرده است.

مدل‌سازی تأثیر جلو برندگی آج تایر ناشی از ضربه اصطکاک نیز مورد مطالعه قرار گرفته است (هینریچ و کلاپل،

۲۰۰۸). ایشان با در نظر گرفتن چسبندگی اصطکاکی آج و مدل هیستریزیس ناحیه تماس، نیروی جلو برندگی را بررسی کرده است. وی در تحلیل‌های خود از روش انرژی اصطکاکی اتلافی بهره برده است. در نهایت با بسط فرمول‌های نظریه مبتنی بر مدل جاروبکی^۱ سایش تایر در ناحیه تماس را پیش‌بینی کرده است.

با تهیه یک مدل تایر و فرمول‌بندی آن به کمک نظریه مبتنی بر مدل جاروبکی، بهینه‌سازی رفتار سایش تایر بررسی شده است (هیبینگ و ارسوی، ۲۰۱۰). در این مطالعه، با بررسی تحلیل حساسیت نسبت به متغیرهایی مانند وزن و سرعت، سایش پیش‌بینی شده است. همچنین حرکت پایا و گذرای تایر مدل‌سازی شده تا سایش غیریکنواخت ناشی از عواملی همچون روش رانندگی و خواص ذاتی تایر شبیه‌سازی گردد. در مطالعه‌ای دیگر، با استفاده از نرم‌افزار Adams رفتار یک تایر با شکل آج غیریکنواخت شبیه‌سازی شده است و با استفاده از نظریه انرژی اصطکاکی، اتلاف سایش پیش‌بینی می‌شود (چو و همکاران، ۲۰۱۱). آنها برای اعتبارسنجی مدل خود از یک آزمایش سایش تایر بهره گرفته‌اند.

همچنین محققین با استفاده از رابطه Archard، سایش آج‌های پیچیده تایر در حرکت غلتش مستقیم و ترمزگیری مستقیم را مدل‌سازی نموده‌اند (جین و همکاران، ۲۰۱۱). آنها برای مدل‌سازی المان محدود از نرم‌افزار ABAQUS بهره گرفتند. همچنین عمق ساییدگی و مقدار جرم ساییده شده را به عنوان عامل سایش مورد تأکید قرار دادند. آنها از نرم‌افزار Adams برای شبیه‌سازی دینامیکی حرکت تایر استفاده کرده‌اند.

با انجام یک‌رشته آزمایش بر تایرهای مشابه سعی شده است که ارتباطی بین هندسه تماس تایر و سایش پذیری آن ارائه گردد (چن، ۲۰۱۳). آنها با تعریف متغیری از زوایای شکل نقش پا، و بررسی توزیع فشار تماس توانستند ارتباطی منطقی برای سایش تایرهای اتوبوسی ارائه کنند.

1. Brush Model

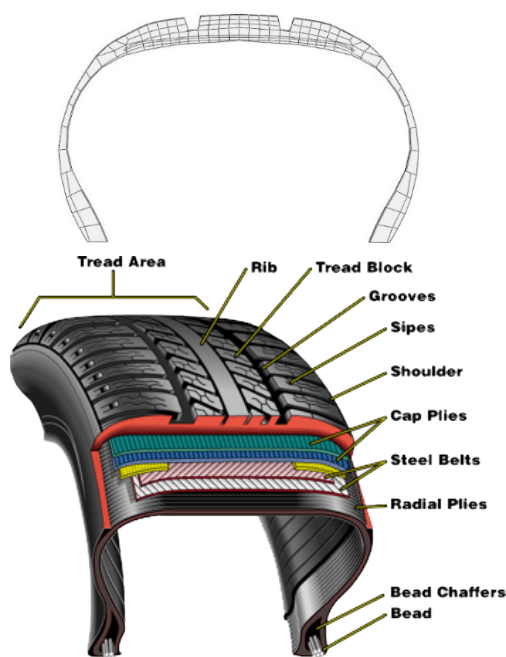
محدود برای سایش تایر با استفاده از زیر روال Umesh-motion و شبکه‌بندی تطبیقی دلخواه اوپلر - لاگرانژی در نرم‌افزار ABAQUS که مبتنی بر نظریه Archard است، ارائه شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۳). نتایج تجزیه و تحلیل نشان داده است که سایش بر ویژگی‌های اتصال به زمین تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، همبستگی‌های آماری معنی‌داری بین عامل‌های اتصال به زمین و ویژگی‌های پیچیدن وجود دارد. در بررسی ویژگی‌های پیچش تایر با در نظر گرفتن سایش آج مدل UniTire ارائه شده است (لو و همکاران، ۲۰۲۲). به منظور مطالعه تأثیر سایش بر خواص مکانیکی تایر، بر اساس مدل توزیع فشار نقش پای تایر و نظریه مدل Brush، همراه با نظریه مدل Brush و نظریه تغییر شکل سفتی برشی بلوک لاستیکی، مدل سفتی پیچیدن تایر در شرایط مختلف سایش ایجاد می‌شود. مدل توزیع فشار نقش پای تایر بر اساس نتایج آزمایش نقش پای تایر در شرایط مختلف سایش ساخته می‌شود و با ترکیب نتیجه آزمایش با شرایط مختلف سایش آج و نظریه مبتنی بر مدل جاروبکی، مدل جاروبکی تایر با در نظر گرفتن شرایط سایش آج ساخته می‌شود. همچنین تأثیر هندسه آج، جنس آج، هندسه خودرو، سرعت خودرو، هندسه مسیر آزمایش و غیره بر سایش تایر مورد بررسی قرار گرفته است (بدی و همکاران، ۲۰۲۴). ایشان از یک رمز المان محدود تجاری، Abaqus، برای شبیه‌سازی ساختاری تایر استفاده کردند و انرژی اصطکاکی به عنوان یک شاخص کلیدی برای تخمین تمایل به سایش تایر در نظر گرفته شد. یک روش تجربی برای مطالعه سازوکار سایش لاستیک خودرو ارائه شده است (لیچر و همکاران، ۲۰۲۳). این روش مبتنی بر تشخیص حرکات میکروسکوپی مرتبط با آسیب مواد (ترک خوردگی) روی آج لاستیک است. برای اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل حرکات میکروسکوپی، یک روش جدید مبتنی بر دوربین با تطبیق نقطه ویژگی با استفاده از تثبیت‌کننده ویدئو توسعه داده شد.

همچنین مدلی نظری برای پیش‌بینی سایش آج تایر بر مبنای سختی جاده و دینامیک خودرو به صورت عددی و کیفی ارائه شده است (هوانگ، ۲۰۱۵) که در آن دیاگرام‌هایی برای نشان دادن الگوی سایش در راستای عرضی و دورانی تایر بر مبنای شاخص زبری جاده و خواص دینامیکی گزارش کرده‌اند. نتایج عددی نشان داد عیوب ذاتی خودرو مانند شکل مود ارتعاشی تا چه اندازه می‌تواند در سایش مؤثر باشد. آنها مدل خود را بر مبنای انرژی اصطکاکی اتلاف شده گسترش دادند و برای این کار از نظریه مبتنی بر مدل جاروبکی بهره گرفتند تا اجزای آج را در مقیاس اجزای ریز شده تحلیل کنند. نتایج نشان داد نسبت لغزش، سفتی طولی، سرعت و نیروی عمودی بیشترین تأثیر را در انرژی اصطکاکی دارد. همچنین به بررسی سایش تایر با استفاده از نظریه مبتنی بر مدل جاروبکی پرداخته شده و اثر عامل‌های مختلف در سایش تایر مورد بررسی قرار گرفته است (سلمین، ۲۰۱۴). در این تحقیق با استفاده از روابط کلاسیک و با بهره‌گیری از نرم‌افزار Matlab نشان داده‌اند که اثر لغزش در سایش بیشتر از هر متغیر دیگری است. محققین با ارائه یک مدل المان محدود و با بهره‌گیری از نرم‌افزار ABAQUS میزان سایش در غلتش یک تایر را پیش‌بینی نمودند (ژو و همکاران، ۲۰۱۴). آنها با استناد به یک تایر واقعی و با استفاده از خواص دینامیکی آن، مدل خود را اعتبار بخشیدند. همچنین با اضافه کردن یک مرحله تحلیل شتاب گیری به تحلیل پایای مستقل از زمان، شتاب غیریکنواخت را برای حرکت تایر مدل نموده و با استفاده از برون‌یابی مقدار سایش برای المان‌ها را پیش‌بینی کردند. آنها با بهره‌گیری از زیر - برنامه UMESHMOTION سایش را برای حرکت مستقیم تایر پیش‌بینی کردند؛ اما در مورد سایر انواع حرکت‌های تایر نتایجی ارائه نکرده‌اند. در این تحلیل از مدل سایش Archard بهره گرفته شد. همچنین به منظور شبیه‌سازی سایش تایر، یک مدل المان

که بازه تغییرات این اعداد در منابع گسترده است؛ اما در این پژوهش هدف بررسی اثر کیفی و نسبی شرایط کاری تایر است

۳- شبیه سازی

در این شبیه سازی، ابتدا مقطع تایر از مدل متقارن محوری ایجاد شده است. سپس مدل سه بعدی با استفاده از دستور مدل متقارن در نرم افزار ABAQUS ایجاد شده است. در شکل ۱ (الف) تصویر مدل متقارن محوری تایر مشاهده می شود. در این تحلیل، ناحیه آج تایر برای تحلیل اولیه - لاگرانژ انتخاب شده است. تسمه های تایر به صورت جاسازی شده^۱ مدل سازی شده اند. همچنین در شکل ۱ (ب)، شماتیک ساختمان اجزاء مقطع عرضی یک تایر رادیال معمولی نمایش داده شده است.



شکل ۱ الف: مقطع متقارن محوری تایر ۶۵R۱۵/۱۹۵
ب: شماتیک ساختمان اجزاء مقطع عرضی یک تایر رادیال معمولی

۳-۱- مش تطبیقی

در طول اجرای فرایند شبیه سازی، آج تایر ساییده می شود؛ شکل و تنش تماسی تغییر می کند. برای همین منظور لازم

فرایند سایش تایر خودروهای سنگین باتوجه به شرایط خاص کاری آنها، فناوری های جدید تشخیص سایش و در نهایت کنترل این پروسه نیز مورد بررسی قرار گرفته است (احمدی و همکاران، ۲۰۲۱).

۲- بیان مسئله

سایش تایر یکی از عامل های تعیین کننده ی عمر تایر است. سایش تایر در مسیرهای پرپیچ و خم بیشتر است. در این پژوهش اثر شعاع پیچش جاده در سایش تایر بررسی شده است. فرض بر این است که راننده برای عبور از پیچ جاده سرعت خود را کم کند؛ بنابراین حین عبور از پیچ ترمز می گیرد.

در این پژوهش، سایش تایر با استفاده از نظریه سایش Archard انجام شده است. این نظریه با این که از قدمت زیادی برخوردار است؛ ولی همچنان بهترین مدل سایش محسوب می شود. برای پیش بینی سایش تایر می بایست حرکت در مسافت زیادی شبیه سازی شود و این موضوع موجب هزینه زمانی زیادی برای شبیه سازی است. از این رو، از روش دیگری برای شبیه سازی حرکت بهره گرفته شده است. سایش در این مدل به سختی سطح سایش پذیر، مسافت تحت سایش و ضریب سایش پذیری بستگی دارد. ضریب سایش پذیری، k ، از آزمایش قابل استخراج است، اما در این پژوهش بر مبنای مقادیر ذکر شده در مرجع تعیین می گردد (اسمیت، ۲۰۱۶). مطابق با نظریه Archard برای محاسبه نرخ سایش خواهیم داشت

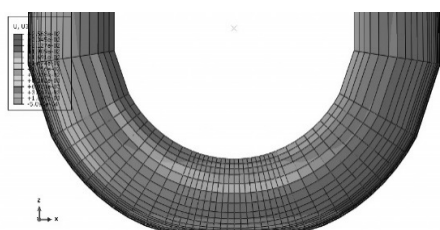
$$\dot{q} = \frac{k}{H} P A \dot{Y} \quad (۱)$$

در جایی که نرخ سایش یا حجم ساییده شده است و k ضریب بی بُعد سایش، H سختی ماده، P فشار عمودی سطح تماس، A ناحیه تماس و نرخ لغزش است. در اینجا می توان عبارت را به مثابه نرخ انرژی مستهلک شده دانست. برای لاستیک تایر ضریب سایش k عدد ۰/۰۰۰۱۱۱ (اسمیت، ۲۰۱۶) و سختی ماده H برابر ۲ GPa (اسمیت، ۲۰۱۶) باشد. شایان ذکر است

1. Embed

برای شبیه‌سازی سایش تایر از یک زیر - برنامه به نام Umesh-motion بهره گرفته شده است. به این منظور شرایط تماسی شبیه‌سازی شده در غلتش تایر برگرفته و سپس با استفاده از نظریه سایش Archard جدا شدن ماده از آج را شبیه‌سازی کرده و با استفاده از روش مش تطبیقی سطح آج بهینه‌شده و شکل ساییده شده آن را ایجاد کرده است.

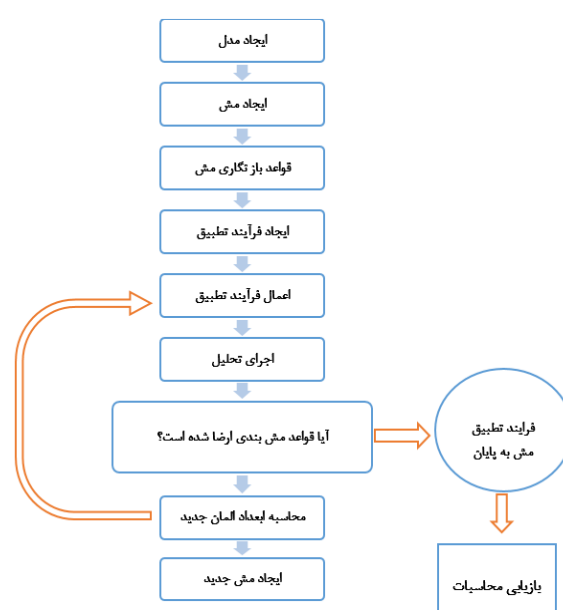
تایر 195/65R15 برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. این تایر متعلق به خودروهای سواری است و می‌تواند تا حدود KN ۵ بار تحمل کند. در این شبیه‌سازی ابتدا یک مدل نیمه متقارن محوری از تایر ساخته شده است. در تصویر زیر این مدل رؤیت می‌شود. ماتریس لاستیک با المان‌های CGAX4 و CGAX3 مدل شده است. لایه‌های تسمه‌ای با المان SFMGAX1 که شامل Rebar layer هستند، مدل شده است. باقی تایر با ماده هایپرلاستیک مدل شده است. برای ناحیه آج تایر المان‌های ریزتری در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی فرایند سایش مدت زمان هزار ساعت حرکت در مسیر مستقیم و سرپیچ جاده در نظر گرفته شده است. سرعت خطی تایر 8 m/s در نظر گرفته شده است



شکل ۳- مش بندی موضعی در تایر مدل

برای شبیه‌سازی تایر در سرپیچ لغزش جانبی تایر در شبیه‌سازی‌های جداگانه افزایش داده شد تا اثر پیچش در سرپیچ جاده در سایش بررسی شود. برای بررسی میزان ساییدگی در تایر، داده‌ها بر روی مسیری از نقاط در شکل ۴ گزارش شده است. در هر مسیر موازی در ناحیه تماس تایر با جاده نتایج یکسان خواهد بود.

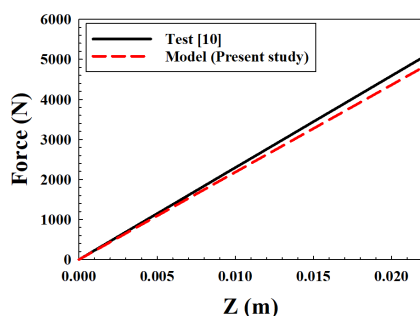
است مش بندی در ناحیه تماس تصحیح شود. برای این کار از تکنیک مش تطبیقی استفاده شده است. مش بندی تطبیقی دو کاربرد اساسی را در مش بندی خودکار و بهینه در ناحیه تماس و بازسازی هندسه در سایش دارد. در این شبیه‌سازی مش بندی به صورت دلخواه تعیین شده است و از قابلیت بازسازی هندسه استفاده شده است. در شکل ۲ الگوریتم اجرایی مش تطبیقی مشاهده می‌شود.



شکل ۲- الگوریتم اجرایی تکنیک مش تطبیقی

با استفاده از روش اویلر - لاگرانژ، به جای شبیه‌سازی دوران مش تایر، جریان مواد در طول مش‌ها جریان یافته‌اند. برای استفاده از این روش می‌بایست ابتدا مدل متقارن محوری ساخته می‌شود و سپس این مقطع با استفاده از دستور ایجاد مدل سه‌بعدی، حول محور اصلی تایر دوران یافته باید تا هم مدل سه‌بعدی ایجاد شود و هم خطوط جریانی به این وسیله با استفاده از نقاط مقطع متقارن محوری ایجاد گردد تا مسیر جریان مواد داخل تایر ساخته شود. پس از آن با شبیه‌سازی غلتش تایر، برای یک لحظه شرایط تماسی تایر شبیه‌ساز شده و سپس مواد داخل مش‌ها جریان یافته و مجدداً شرایط را به صورت دوره‌ای تجربه می‌کنند.

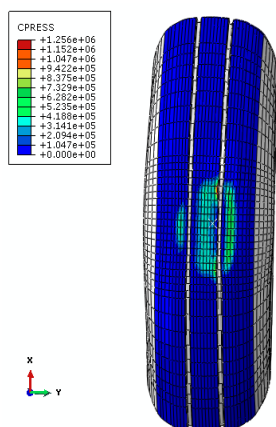
و همکاران، ۲۰۱۴) نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش نیروی وارد بر تایر خیز آن افزایش می یابد.



شکل ۵- نمودار اعتبارسنجی مدل المان محدود با نتایج آزمون ۱۰

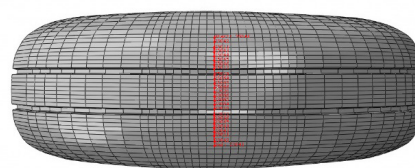
۵- نتایج

در شکل ۶ کانتور فشار تماسی در ناحیه تماس تایر با سطح جاده نمایش داده شده است. همان طور که در این کانتور مشخص است فشار در یک سمت تایر بیشتر است. نقطه ای در لبه ی شیار تایر به عنوان جلودار تایر بیشترین مقدار فشار را در ترمزگیری در پیچ جاده تحمل می کند.



شکل ۶- کانتور فشار در بار $P=3\text{KN}$ و $Sy=0.1$

در شکل ۷ نمودار مقایسه سایش در مسیر مستقیم با مسیر منحنی جاده مقایسه شده است. در حالت کلی اکثر نقاط آج در مسیر منحنی مقدار بیشتری ساییده می شوند ضمن آن که یک سمت آج سایش شدیدتری را تجربه خواهد کرد.



شکل ۴- مسیر منتخب برای برداشت داده های نتایج

در تحلیل سایش چنانچه در ناحیه اولیری یعنی آج تایر، ماده به به صورت هایپرالاستیک مدل شود، نتایج دچار خطا خواهد شد و نیروهای تماسی اشتباه خواهد بود. به همین دلیل این ناحیه به صورت الاستیک مدل سازی شده است. در جداول ۱ تا ۳ ثوابت مادی مربوط خواص هایپرالاستیک، ویسکوالاستیک و چگالی مواد ارائه شده است (اسمیت، ۲۰۱۶).

جدول ۱ - خواص هایپرالاستیک (اسمیت، ۲۰۱۶)

6+C10=1e C01=0 008-D1=2E	elastic hyper LONG=moduli TERM	لاستیک
6+6E=E 0.49=v	elastic Linear	آج
C10=1.085 C10=0.2712	elastic Hyper Rivlin-Mooney	تسمه

جدول ۲- خواص ویسکوالاستیک (اسمیت، ۲۰۱۶)

نام ماده	نوع مدل	ضرایب
لاستیک	PRONY	۰/۱ و ۰/۱
آج	PRONY	۰/۳ و ۰/۱

جدول ۳- چگالی مواد (اسمیت، ۲۰۱۶)

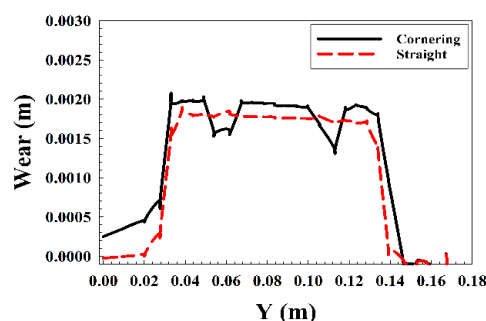
نام ماده	چگالی m^3/Kg
تسمه	۵۹۰۰
لاستیک	۱۱۰۰
آج	۱۱۰۰

۴- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی تایر از سفتی استاتیکی آن استفاده شده است. در شکل ۵ نمودار مقایسه سفتی استاتیکی مدل با آزمایش (ژو

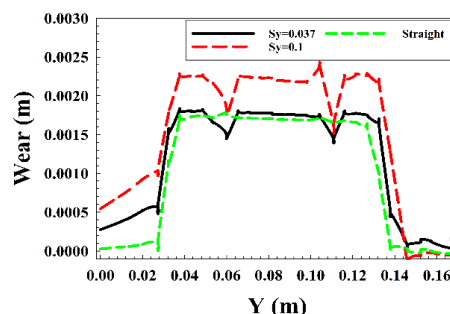
۶- جمع بندی

در این پژوهش، سایش تایر در حال پیچش به کمک یک مدل المان محدود شبیه سازی گردید. برای شبیه سازی سایش تایر از یک زیر - برنامه به نام Umeshmotion بهره گرفته شده است. به این منظور شرایط تماسی شبیه سازی شده در غلتش تایر برگرفته و سپس با استفاده از نظریه سایش Archard جدا شدن ماده از آج را شبیه سازی کرده و با استفاده از روش مش تطبیقی سطح آج بهینه شده و شکل ساییده شده آن را ایجاد کرده است. نتایج نشان می دهد که در پیچش خودرو، سایش تایر به یک طرف پیشروی می کند. علاوه بر این، سایش در مقایسه با سایش تایر برای حرکت مستقیم خودرو به طور قابل توجهی افزایش می یابد. پیشانی تایر در ناحیه تماس و داخل دایره پیچش جاده است. پیشانی تایر باتوجه به افزایش فشار و رابطه Archard، سایش بیشتری نسبت به سایر نقاط تحمل می کند.



شکل ۷- مقایسه سایش در مسیر مستقیم و سرپیچ

در شکل ۸ اثر تغییر شعاع پیچش جاده به وسیله تغییر زاویه لغزش تایر در سایش تایر نمایش داده شده است. همان طور که از نمودار مشخص است در مسیرهای مستقیم سطوح تماس به صورت یکسانی ساییده می شوند؛ اما در پیچ جاده یا کوتاه شدن شعاع پیچش تایر میزان ساییدگی به شدت افزایش یافته است. میزان ساییدگی باتوجه به کاهش شعاع پیچش جاده و یا به عبارت دیگر با افزایش زاویه لغزش γ ، تایر، S_y ، افزایش می یابد.



شکل ۸- نمودار ساییدگی آج در مسیر منتخب

منابع

1. Park, S., Yoo, W., Cho, J., & Kang, B. (2007). Pressure-sensing pad test and computer simulation for the pressure distribution on the contact patch of a tyre. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 221(1), 25-31.
2. van der Veen, J. (2007). *An Analytical Approach to Dynamic Irregular Tyre Wear* (Doctoral dissertation, Eindhoven University of Technology, Department Mechanical Engineering).
3. Heinrich, G., & Klüppel, M. (2008). Rubber friction, tread deformation and tire traction. *Wear*, 265(7-8), 1052-1060.
4. Heißing, B., & Ersoy, M. (Eds.). (2010). *Chassis handbook: fundamentals, driving dynamics, components, mechatronics, perspectives*. Springer Science & Business Media...
5. Cho, J. R., Choi, J. H., & Kim, Y. S. (2011). Abrasive wear amount estimate for 3D patterned tire utilizing frictional dynamic rolling analysis. *Tribology International*, 44(7-8), 850-858.
6. Chang, J., Chenyuan, H., & Xiaoxiong, J. (2011). FE simulation of tire wear with complicated tread pattern. *Procedia Engineering*, 15, 5015-5019.
7. Liang, C., Wang, G., An, D., & Ma, Y. (2013). Tread wear and footprint geometrical characters of truck bus radial tires. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 26(3), 506-511.
8. Huang, H., Chiu, Y., Wang, C., & Jin, X. (2015). Three-dimensional global pattern prediction for tyre tread wear. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of automobile engineering*, 229(2), 197-213.
9. Salminen, H. (2014). Parametrizing tyre wear using a brush tyre model.
10. Zuo, S. G., Ni, T. X., Wu, X. D., Wu, K., & Yang, X. W. (2014). Prediction procedure for wear distribution of transient rolling tire. *International Journal of Automotive Technology*, 15(3), 505-515.
11. Zhang, S., Liu, Y., Zhou, H., Zhang, W., Chen, Y., & Zhu, H. (2023). Analysis of the effect of wear on tire cornering characteristics based on grounding characteristics. *World Electric Vehicle Journal*, 14(7), 166.
12. Lu, L., Lu, D., Wu, H., Li, L., Wang, W., & Lyu, M. (2022). Research and modeling of tire cornering characteristics considering tread wear based on UniTire model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 236(6), 1155-1169...
13. Bedi, V. K., Rana, K., Mahata, P., Ghosh, P., & Mukhopadhyay, R. (2024). A predictive approach to estimate tyre wear characteristics. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility* 348176, 6(6), 2739-2747.

14. Licher, J., Schmerwitz, F., Soleimani, M., & Junker, P. (2023). Experimental investigation of the tire wear process using camera-assisted observation assessed by numerical modeling. *Tribology International*, 189, 108918.
۱۵. احمدی، ع.، مسیح طهرانی، م.، ابراهیمی نژاد رفسنجانی، س.، & سلمان. (۲۰۲۱). بررسی فرایند سایش تایر خودروهای سنگین و خارج جاده‌ای. *صنعت لاستیک ایران*، ۲۵(۱۰۲)، ۳۷-۴۸.
16. Smith, M. (2009). *ABAQUS/standard user's manual*, version 6.9.



Numerical simulation of tire wear in cornering

Ali Shokouhandeh¹, Hamed Saeidi Googerchin^{*2}

1- Master of Science, Faculty of Automotive Engineering, Iran university of science and technology

2- Associate Professor, Faculty of Automotive Engineering, Iran university of science and technology

*Corresponding author Email: hsaeidi@iust.ac.ir

Abstract

Since the past, tires, as one of the primary components of a vehicle, have been the focus of automotive designers. The mechanical response of the tire affects the behavior of the entire vehicle. Therefore, examining its performance and durability has been one of the topics in the tire field. With the advent of computers and finite element software, a new field was created in tire research and development. The development of the finite element method made it possible to optimize this effective component of the vehicle with greater precision. One of the damages that occurs to the tire is the loss of tread. Tread wear causes a loss of contact quality with the road, and this is what determines the life of the tire. In this study, tire wear for a cornering vehicle has been three-dimensionally simulated. For this purpose, a finite element model has been developed in the commercial software ABAQUS. The wear process has been modelled with a linear wear theorem by scripting a subroutine. The adaptive mesh technique has been used for re-meshing in the tire-road contact area. The steady-state transport technique has been used to simulate the long-term motion, significantly reducing time cost. The results indicate that, in vehicle cornering, tire wear would advance to one side. Moreover, the wear would significantly increase in comparison the tire wear for a straight forward motion of vehicle with 8 m/s linear velocity. The front of the tire is in the contact patch and inside the curve. The front of the tire experiences more wear than other areas due to increased pressure and the Archard relationship.

Keywords: Tire, Automotive, Wear, Simulation