

اعتبارسنجی شبیه‌سازی مقاومت غلتشی چرخ غیر محرک از طریق اجزاء محدود با آزمون‌های تجربی

نسا دیباگر^{۱*} - عارف مردانی^۲ - اسعد مدرس مطلق^۳ - حجت جعفری^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۱۴

چکیده

در این مطالعه به منظور تحلیل برهم‌کنش تایر متحرک- خاک از دو روش عددی و تجربی استفاده شد تا تأثیر تغییرات سرعت پیشروی، بار دینامیکی و فشار باد تایر روی مقاومت غلتشی آن مورد بررسی قرار گیرد. در روش عددی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود آباکوس (ABAQUS/Explicit) برای شبیه‌سازی خاک به عنوان ماده الاستوپلاستیک از مدل دراکر- پراگر و برای طراحی مؤلفه‌های سازنده تایر به عنوان لاستیک تراکم‌ناپذیر از مدل مواد هایپرلاستیک کرنش محدود و الاستیک استفاده شد. آزمون‌های تجربی نیز با استفاده از آزمونگر تک چرخ و انباره خاک در سطوح مختلفی از سرعت پیشروی، فشار باد تایر و بار دینامیکی انجام گرفتند. مقایسه نتایج حاصل از هر دو روش حاکی از مطابقت خوب نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مقاومت غلتشی در سرعت پیشروی، بار دینامیکی و فشار بادهای مختلف است. در هر دو آزمون با افزایش بار دینامیکی تایر میزان مقاومت غلتشی به طور معنی‌داری افزایش یافت به طوری که ضریب همبستگی بین نتایج تجربی و عددی در کمترین و بیشترین بار به ترتیب برابر ۰/۸ و ۰/۷۸ می‌باشد. تغییرات فشار باد تایر و مقاومت غلتشی آن در هر دو آزمون نسبت معکوسی با هم داشته و در آزمون‌های عددی شیب تغییرات مقاومت غلتشی در برابر فشار باد تایر نسبت به آزمون‌های تجربی کمتر بوده است.

واژه‌های کلیدی: اجزاء محدود، انباره خاک، برهم‌کنش تایر متحرک- خاک، مقاومت غلتشی

مقدمه

درگیر با خاک، در شمار ابزارهایی است که علاوه بر محیط‌های مزرعه‌ای، در محیط‌های نرم‌افزاری نیز قابل بررسی و شبیه‌سازی است به طوری که از دیرباز، علی‌رغم پیچیدگی رفتار خاک و هندسه تایر، مدل کردن حرکت چرخ بر روی خاک مد نظر پژوهشگران بوده است. در توصیف ساده‌ی حرکت چرخ بر روی خاک می‌توان گفت که در اثر حرکت چرخ روی خاک، خاک فشرده گشته و رد اثری متناسب با ابعاد خود ایجاد می‌کند به طوری که عمق این رد متناسب با بار روی چرخ و وضعیت خاک است. از این رو حرکت چرخ بر روی خاک، نیازمند صرف انرژی برای تغییر فرم خاک خواهد بود.

بولارینوا و اولاتون بوسان (Bolarinwa and Olatunbosun, 2004) با شبیه‌سازی دو بعدی تایر توسط نرم افزار اجزاء محدود آباکوس مدل مناسبی به عنوان جایگزین تایر جهت انجام آزمون‌های مخربی چون ترکیدگی ارائه کردند. آنها در این شبیه‌سازی علاوه بر بررسی رفتار تایر با خواص همگن و ارتوتروپیک در برابر فشار بادهای غیر مجاز، تأثیر خواص هندسی و تغییر تعداد لایه‌های داخلی تایر را روی فشار ترکیدگی آن بررسی کردند. افزایش تعداد لایه‌های کارکس از یک به دو لایه، مقاومت ترکیدگی تایر را ۶۴ درصد افزایش داد. محسنی‌منش و همکاران (Mohsenimanesh et al., 2009) با

مواجهه با خاک از دیدگاه مدیریت خاک و تولید محصول، همیشه مورد توجه بسیار بوده و کوشش می‌شود که ابزارها و روش‌های تقابل با خاک، به گونه‌ای طراحی شوند که تا حد امکان از پیامدهای تخریبی خاک و نیز هدر رفت انرژی که خود دربرگیرنده محدودیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی می‌باشد، پیشگیری شود. بهتر کردن روش‌های روبه‌رویی با خاک و اصلاح کیفیت ابزارهای مربوط به آن، مستلزم انجام آزمون‌های مورد اعتمادی است که در شرایط واقعی خاک و ابزار صورت گرفته باشند و این مهم با توجه به پیچیدگی و تنوع متغیرهای حاکم بر تقابل خاک و ماشین دشوار می‌نماید لذا شبیه‌سازی‌های عددی کلید تمام بهینه‌سازی‌هایی است که با حذف آزمایش‌های مزرعه‌ای پر هزینه و کاهش زمان تحقیق مدل‌های مناسبی را ارائه می‌دهند. چرخ به عنوان یکی از عمده‌ترین عوامل

۱- دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
* - نویسنده مسئول: (Email: Ned_441@yahoo.com)

۲ و ۳- استادیار و دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ارومیه

۴- کارشناس ارشد مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه ارومیه

ویسکوالاستیک و هایپر الاستیک و مدل ماده دراگر- پراگر اصلاح شده استفاده گردید. وی مقادیر تنش‌های طولی و جانبی به‌دست آمده در سه بار عمودی مختلف را مورد مطالعه قرار داد و با تحلیل نیروهای بین وجهی و فرورفتگی تماسی به درک جامعی از تقابل برف و جاده رسید. نتیجه‌گیری‌های لی حاکی از آن است که طول تماس با افزایش بار عمودی افزایش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش بار عمودی و زاویه لغزش، در همه شبیه‌سازی‌ها میزان فرورفتگی نیز افزایش یافت. زیبا (Xia, 2011) از روش اجزاء محدود برای شبیه‌سازی برهم‌کنش خاک- تایر و پیش‌بینی تراکم خاک و تحرک تایر استفاده کرد. برای مدل کردن خاک در نرم افزار آباکوس از مدل دراگر- پراگر (ماده الاستیک- پلاستیک) و برای مدل کردن تایر بدون آج از مدل هایپر الاستیک کرنش محدود (ماده الاستیک تقریباً تراکم‌ناپذیر) استفاده شد. در این تحقیق اثرات فشار باد تایر، سرعت زاویه‌ای چرخ و نیز خواص اصطکاکی تایر- خاک روی تراکم خاک بررسی گردید. هدف از این مطالعه دستیابی به الگوی مناسبی از شبیه‌سازی کامپیوتری برای غلشش تایر در خاکی با بافت رسی - لومی است که عمده بافت خاک آذربایجان غربی را تشکیل می‌دهد.

مواد و روش‌ها

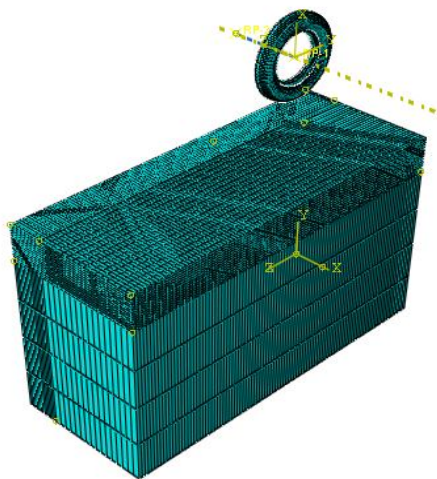
آزمایش‌های عملی تایر در این تحقیق با استفاده از مخزن خاک واقع در دانشگاه ارومیه انجام شد (شکل ۱). این سیستم مشتمل بر بخش‌های متنوعی از جمله انباره خاک به ابعاد $1 \times 2 \times 22$ متر، حامل یا کشنده ابزار، تجهیزات فراوری خاک، سیستم محرک، ابزارهای اندازه‌گیری و سیستم‌های کنترل است. نیروی محرکه این سیستم توسط الکتروموتور صنعتی سه فاز با توان ۲۲ کیلو وات تأمین می‌گردد.

استفاده از نرم افزار انسیس، مدل اجزاء محدود غیرخطی از اثر متقابل یک تایر تراکتور با سطح خاک ارائه کردند. در این مطالعه با در نظر گرفتن ساختار هندسی و خواص ناهمسانگرد چندلایه‌ای تایر و خاک، نحوه توزیع فشار مماسی در بارهای عمودی و فشارهای باد مختلف با استفاده از تحلیل فشار استاتیکی غیر خطی به‌دست آمد و با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی مقایسه گردید. حداکثر فشار مماسی بین تایر- خاک در روش عددی بین ۳۲ تا ۵۳ درصد کمتر از مقدار به‌دست آمده در آزمون‌های تجربی و در شرایط مشابه بود. همبلتون و درسچر (Hambleton and Drescher, 2008) رد تایر را به‌روش عددی و روی خاکی با یک ساختار ساده الاستیک- پلاستیک (شامل یک قسمت الاستیک خطی و یک قسمت کاملاً پلاستیک با شرایط تسلیم موهر- کولمب) مدل‌سازی کردند. در این تحقیق تایر به شکل استوانه‌ای صلب با چرخش و حرکت افقی مدل‌سازی شده و با تحلیلی کاملاً دینامیکی توسط نرم افزار آباکوس و به روش فرمول‌بندی لاگرانژین- اویلرین اثر پارامترهایی چون مقاومت خاک (رسی و شنی)، اتساع و هندسه تایر (تغییرات عرض نسبت به قطر) در رابطه بین نیروی بارگذاری چرخ مورد بررسی قرار گرفت. کایمینگ (Kaiming, 2010) با ارائه یک مدل توسط نرم افزار آباکوس برهم‌کنش متقابل چرخ و خاک را به‌طور عددی تحلیل کرد. وی با شبیه‌سازی تایر و خاک به‌عنوان دو مؤلفه تغییر شکل‌پذیر در مدل اصلی اثر تغییرات فشار باد تایر، سرعت زاویه‌ای چرخ و خواص اصطکاکی در سطح تماس تایر و خاک را روی این برهم‌کنش مورد مطالعه قرار داد. از جمله نتایج به‌دست آمده در این تحقیق تأثیر افزایش فشار باد تایر روی تغییر شکل هایپر الاستیکی تایر تحت بار ثابت است. لی (Lee, 2011) شبیه‌سازی برهم‌کنش تایر بادی- برف را با مقاومت کم توسط نرم افزار آباکوس انجام داد. برای شبیه‌سازی اجزاء محدود سه بعدی تایر و برف به‌ترتیب از مدل ماده‌ی الاستیک،



شکل ۱- آزمونگر تک چرخ و انباره خاک مورد استفاده در آزمون‌های تجربی
Fig.1. One-wheel tester and soil-bin used in experimental tests

هایپر الاستیک تراکم‌ناپذیر با ثوابت مونی-ریولین (Mooney-Rivlin) در نظر گرفته شده است می‌توان آن را معروف‌ترین مدل ساختاری مواد ابر الاستیک دانست چرا که به‌خصوص برای مدل‌سازی لاستیک‌های طبیعی تراکم‌ناپذیر کاربرد فراوانی دارد (Karaytug, 2009; Mohsenimanesh *et al.*, 2009). برای طراحی لاستیک داخلی مدل تایر که خود متشکل از تسمه‌ها و کارکس می‌باشد خواص لاستیک چندلایه تقویت‌شده و برای طراحی رینگ خواص فلز صلب در نظر گرفته شده است. ابعاد مدل تایر کاملاً منطبق با ابعاد تایر واقعی است. با توجه به تقارن هندسی فقط نصف تایر شبیه‌سازی و به‌طور دینامیکی تحلیل شده است تا زمان تحلیل به نصف کاهش یابد. یک نقطه مرجع در مرکز تایر تعریف شده تا سرعت و بار روی تایر از طریق این نقطه وارد شوند. تلاش گردیده تا شرایط مرزی، بارگذاری و خواص مواد مطابق با شرایط واقعی وارد نرم افزار شود. شکل ۲ مدل مش‌بندی شده نهایی را نشان می‌دهد. المان‌های خاک و آج تایر از نوع المان‌های مکعبی خطی هشت گرهی با انتگرال کاهش‌یافته و کنترل ساعت شنی (DC3D8R) و المان‌های لاستیک داخلی از نوع المان‌های ورقه‌ای ظریف منحنی دو جهته چهار گرهی با کرنش پوسته‌ای محدود (S4R) است.



شکل ۲- مدل اجزاء محدود نهایی تایر- خاک
Fig.1. Final finite element tire-soil model

به برخی از خواص استخراج شده از پایان‌نامه کارایتوق (Karaytug, 2009) که در شبیه‌سازی مدل این تحقیق استفاده شده است، در جداول ۵-۱ اشاره شده است.

شبیه‌سازی‌های عددی این تحقیق نیز با استفاده از بسته نرم افزار اجزاء محدود آباکوس (ABAQUS / Explicit) انجام شده است. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان تغییر شکل‌های بزرگ را با تحلیل لاگرانژی-اویلرین مدل کرد. در آباکوس (ABAQUS / Explicit)، شرط تسلیم موهر-کولمب توسط شرط تسلیم دراگر-پراگر تقریب زده شده است و مدل‌های توسعه‌یافته دراگر-پراگر برای مدل کردن مواد اصطکاکی (مواد گرانوله مانند خاک) توسعه یافته‌اند. برای این شبیه‌سازی، ابتدا مدل‌های خاک و قسمت‌های مختلف تایر به‌طور جداگانه طراحی شدند. مشکانی (Meshkani, 2011) برای به‌دست آوردن خواص خاک مورد تحقیق، نخست سه نمونه خاک از انباره خاک آزمایشی گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه ارومیه، از عمق صفر تا بیست سانتی‌متری تهیه کرد سپس برای تعیین نوع خاک، آزمایش دانه‌بندی براساس استاندارد ASTM-C131 و برای تعیین خصوصیات موهر-کولمب آن، آزمون برش مستقیم روی نمونه‌ها انجام شد. این خاک دارای ۷۹/۳۱٪ ماسه (شن ریز) به قطر ۴/۷۵-۰/۱۵ میلی‌متر، ۱۳/۸٪ ماسه به قطر ۹/۵-۴/۷۵ میلی‌متر و ۶/۸۹٪ رس بوده و بافت آن، ماسه‌ای با دانه‌بندی ریز همراه با رس لای‌دار تعیین شد. به‌منظور طراحی مدل تحقیق، خاک به‌صورت یک ماده تک لایه با ساختار الاستیک-پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است. پارامترهای مربوط به آن (دو پارامتر الاستیک: مدول یانگ E و ضریب پواسون ν ; دو پارامتر پلاستیک: زاویه اصطکاک ϕ ، چسبندگی c) از طریق پوش گسیختگی حاصل از آزمون برش مستقیم روی نمونه‌های خاک گرفته شده از انباره خاک به‌دست آمده‌اند. در این آزمون‌ها، زوایای اتساع و اصطکاک داخلی خاک ۳۱ درجه، ضریب چسبندگی خاک ۰/۰۰۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، چگالی ۱۶۰۰ کیلوگرم بر متر مربع، وزن مخصوص تر ۱۶۲۰ و وزن مخصوص خشک خاک ۱۴۹۰ کیلوگرم بر متر مربع تعیین شد. ابعاد پروفیل خاک ۱/۸۴ × ۱/۲ × ۳ در نظر گرفته شد تا تأثیری در نتایج و نشست تایر نداشته باشد. تایر مورد استفاده نیز چرخ غیر محرک کشاورزی از نوع 14 L 9.5 با عرض ۲۶ سانتی‌متر، قطر خارجی ۷۰ سانتی‌متر با ساختار شعاعی (رادپال) و محصول کارخانه گودبیر می‌باشد. شبیه‌سازی مدل تایر نیز همانند خاک مستلزم تعیین مختصات هندسی و خواص فیزیکی اجزای مختلف به‌کار رفته در آن و اعمال آنها به نرم افزار است. از آنجایی که چشم‌پوشی از جزئیات طرح آج به‌عنوان قسمتی از تایر که در تماس با خاک است اثرات بسیار جزئی روی برخی از تغییرات بزرگ از قبیل تغییر شکل و بارگذاری دینامیکی تایر دارد (Ghoreishy, 2009) تایر شبیه‌سازی شده در این تحقیق کاملاً ساده‌سازی شده و شامل آج، لاستیک چند لایه تقویت‌شده و رینگ است. برای طراحی آج تایر، خواص ماده

جدول ۱- خواص فیزیکی اجزای آج
Table 1- Material properties of tread

| ماده الاستیک Rubber material | C10 (kPa) | C01(MPa) |
|---------------------------------|-----------|----------|
| آج Tread | 806.1 | 1.805 |

جدول ۲- مدول یانگ تسمه و کارکس در راستای X و Y
Table 2- Estimated Young's modulus in the principal (x) and (y) directions

| | تسمه Belt | | کارکس Carcass | |
|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | E _x (kPa) | E _y (kPa) | E _x (kPa) | E _y (kPa) |
| برآورد شده Estimated | 11.68 | 28.91 | 13.8 | 1124 |

جدول ۳- خواص فیزیکی برآورد شده اجزای تسمه و کارکس
Table 3- Estimated material properties and constants for the belt and carcass plies

| ماده Material | مدول یانگ طولی Longitudinal Young's modulus E ₁ (kPa) | مدول یانگ عرضی Transverse Young's modulus E ₂ (kPa) | درجه ناهمسانگردی Degree of anisotropy E ₁ /E ₂ |
|--|---|---|---|
| نایلون- لاستیک (کارکس) Nylon-Rubber (Carcass) | 1124 | 13.8 | 80 |
| ریون- لاستیک (تسمه) Rayon-Rubber (Belt) | 1745 | 13.8 | 125 |

جدول ۴- زاویه کابل، مدول برشی و ضریب پواسون لایه کارکس
Table 4-Measured cord angle, shear modulus and Poisson's ratio

| زاویه کابل‌ها Cord angle (°) | مدول برشی G _{xy} , G _{yz} , G _{xz} Shear modulus (Mpa) | ضریب پواسون ν _{xy} , ν _{yz} , ν _{xz} Poisson's ratio | ضخامت لایه Layer thickness (mm) |
|---------------------------------|---|---|------------------------------------|
| 90 | G _{xy} = 3.58 G _{yz} = 3.23 G _{xz} = 3.58 | ν _{xy} = 0.0053 ν _{yz} = 0.49 ν _{xz} = 0.0053 | 1.7 |

جدول ۵- خواص ماده لایه کارکس
Table 5- Measured material properties and constant

| همسانگرد یا ناهمسانگرد Isotropic/Anisotropic | مدول یانگ Principle Young's modulus E _x (MPa) | مدول یانگ Principle Young's modulus E _y (MPa) | مدول یانگ Principle Young's modulus E _z (MPa) |
|---|--|--|--|
| ناهمسانگرد Anisotropic | 1269 | 16.6 | 16.6 |

نتایج و بحث

در جدول ۱، C₁₀ و C₀₁ ثوابت مادی به کارگرفته شده در مدل مونی- ریولین (Mooney-Rivlin) است.

در این تحقیق آزمون‌های تجربی و عددی در سطوح متفاوتی از

عددی در پنج سطح از سرعت (شکل ۴) مورد تحلیل قرار گرفته‌اند تا بتوان چگونگی تغییرات را در محدوده بیشتر و با امکان اعتماد بیشتر به روند به‌دست آمده دنبال کرد. نتایج آزمون‌های عددی و تجربی در سرعت‌های مختلف پیشروی، فشار باد ۱۰۰ کیلو پاسکال و بار دینامیکی ۲۰۰۰ نیوتن در شکل ۵ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت پیشروی روند خاصی برای تغییرات مقاومت غلتشی پیش‌بینی نشده است و تغییرات تقریباً یکنواخت می‌باشند به‌طوری‌که ضریب همبستگی تغییرات مقاومت غلتشی و سرعت پیشروی در فشار بادهای حداقل و حداکثر به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۰۱۶ بوده و صحت این ادعا را تأیید می‌کند.

سرعت پیشروی، بار دینامیکی و فشار باد تایلر انجام گرفتند (جدول ۶). سپس به‌منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده برای تایلر متحرک-خاک، نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمون آزمایشگاهی برای تخمین مقاومت غلتشی مقایسه شدند. بررسی‌ها نشان داد که نتایج آزمون‌های انجام شده توسط نرم افزار آباکوس تطابق خوبی با نتایج حاصل از آزمون انبار خاک داشتند.

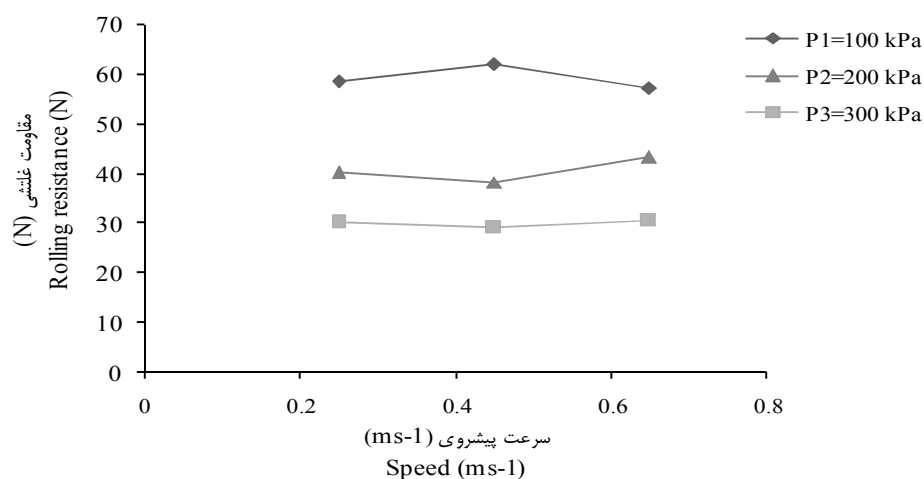
مقایسه‌ی تأثیر سرعت پیشروی تایلر بر مقاومت غلتشی آن در آزمون‌های عددی و تجربی

در این تحقیق به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق و قابل استناد، آزمون‌های تجربی در سه سطح از سرعت (شکل ۳) ولی آزمون‌های

جدول ۶- سطوح متفاوتی از سرعت پیشروی، بار دینامیکی و فشار باد آزمایش شده در آزمون‌های تجربی و عددی

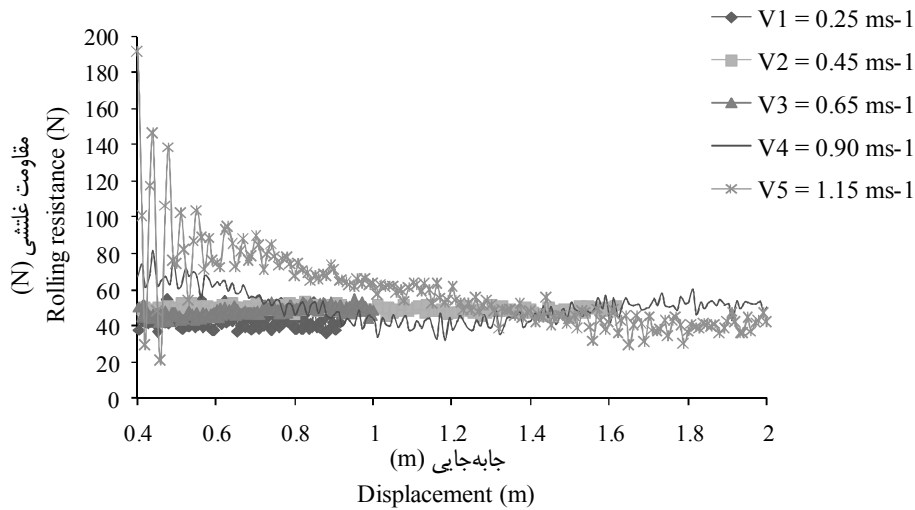
Table 6- Different values of speed, dynamic load and inflation pressure applied in experimental and numerical tests

| سرعت پیشروی Speed (m s ⁻¹) | V ₁ = 0.25 | V ₂ = 0.45 | V ₃ = 0.65 | V ₄ = 0.90 | V ₅ = 1.15 |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| بار دینامیکی Dynamic load (kN) | W ₁ = 1 | W ₂ = 2 | W ₃ = 3 | W ₄ = 4 | W ₅ = 5 |
| فشار باد Inflation pressure(kPa) | P ₁ = 100 | P ₂ = 200 | P ₃ = 300 | - | - |

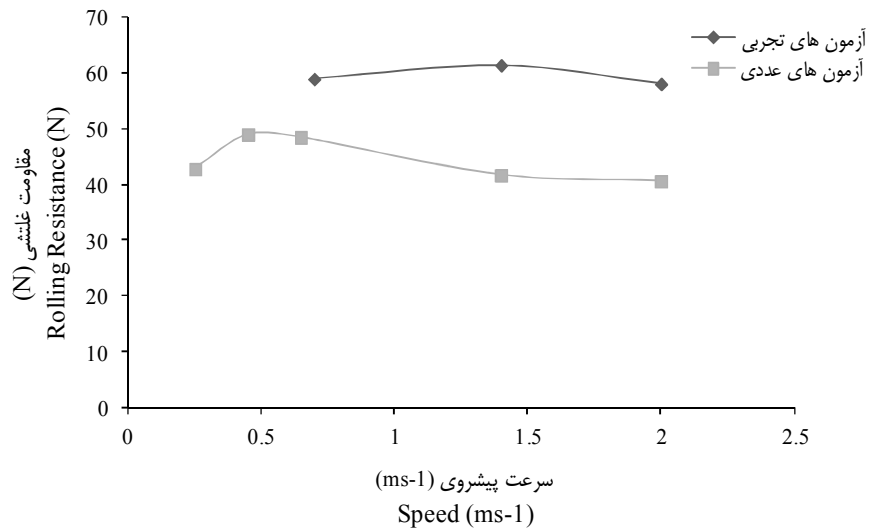


شکل ۳- تأثیر سرعت پیشروی بر مقاومت غلتشی تایلر در فشار بادهای مختلف و بار دینامیکی ۲۰۰۰N در آزمون تجربی

Fig.3. The effect of forward speed on tire rolling resistance under different values of inflation pressure and dynamic load of 2000 N in experimental tests



شکل ۴- تغییرات مقاومت غلتشی در سرعت‌های مختلف، فشار باد ۱۰۰ kPa و بار عمودی ۲۰۰۰ N در آزمون عددی
Fig.4. Tire rolling resistance changes under different values of forward speed, inflation pressure of 100 kPa and dynamic load of 2000 N in numerical tests



شکل ۵- نتایج آزمون‌های عددی و تجربی در سرعت‌های مختلف، فشار باد ۱۰۰ kPa و بار دینامیکی ۲۰۰۰ N
Fig.5. Numerical and experimental results under different values of forward speed, inflation pressure of 100 kPa and dynamic load of 2000 N

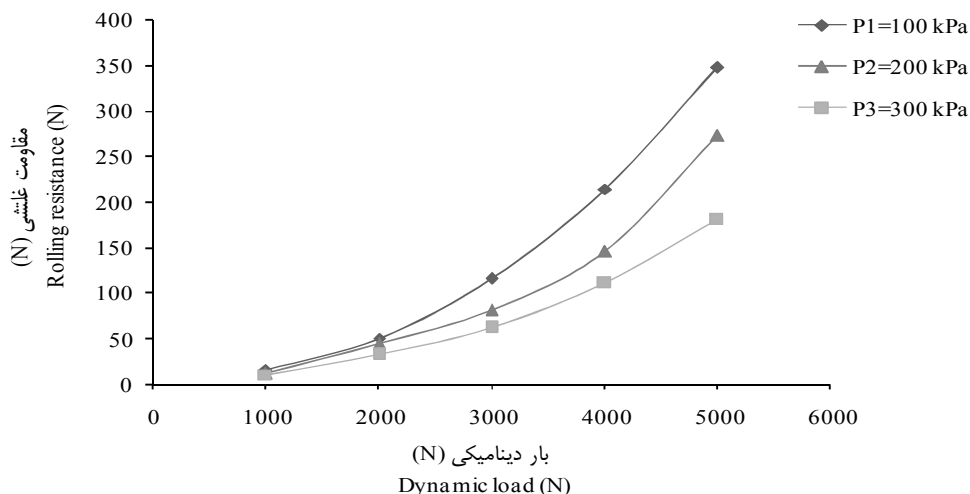
میزان ضریب مقاومت غلتشی روند افزایشی از خود نشان داد.

مقایسه‌ی تأثیر بار دینامیکی تایر بر مقاومت غلتشی تایر
 تأثیر بار دینامیکی روی مقاومت غلتشی تایر متحرک در فشارهای باد مختلف و سرعت پیشروی ۰/۶۵ متر بر ثانیه در آزمون‌های عددی و تجربی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. به‌منظور مقایسه بهتر، نتایج این دو آزمون در بارهای دینامیکی

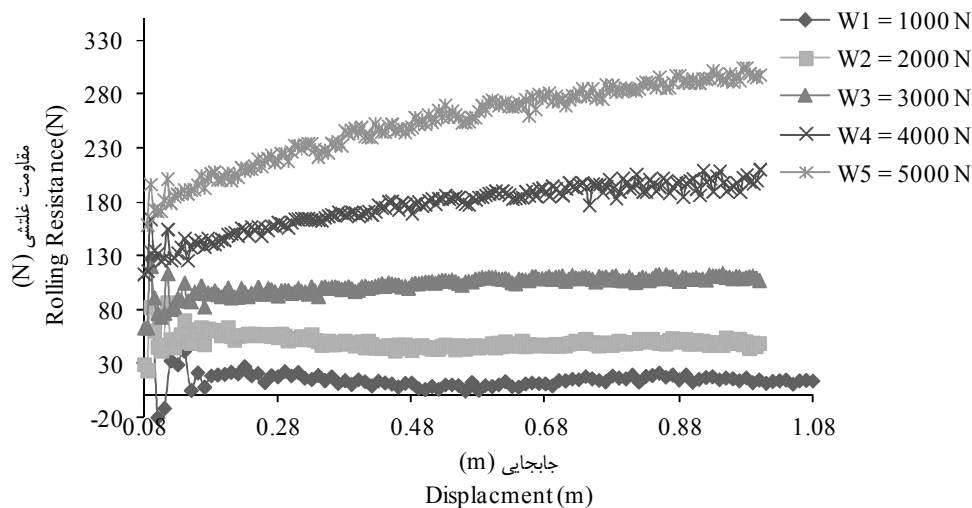
از طرفی معنی‌دار نبودن تأثیر سرعت پیشروی در مدل‌های تجربی همانند مدل‌های WES و ویسمر-لوت نیز گزارش شده است. ژنت و والتر (Gent and Walter, 2006) اثر تغییرات سرعت را روی ضریب مقاومت غلتشی برای تایرهای روی جاده (on-road) بررسی کردند. تغییرات ضریب مقاومت غلتشی از سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت (۵/۵۵ متر بر ثانیه) تا ۸۰ کیلومتر بر ساعت (۲۲/۲۲ متر بر ثانیه) تقریباً یکنواخت بود ولی از سرعت ۸۰ کیلومتر بر ثانیه به بعد

(Gent and Walter, 2006) اثر بار دینامیکی را روی مقاومت غلتشی برای تایرهای ماشین روی جاده (on-road) بررسی کردند. روند تغییرات ضریب مقاومت غلتشی در برابر بارهای دینامیکی مختلف تقریباً خطی بود. تأثیر دو بار دینامیکی مختلف تایر روی تغییر شکل و تنش خاک در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

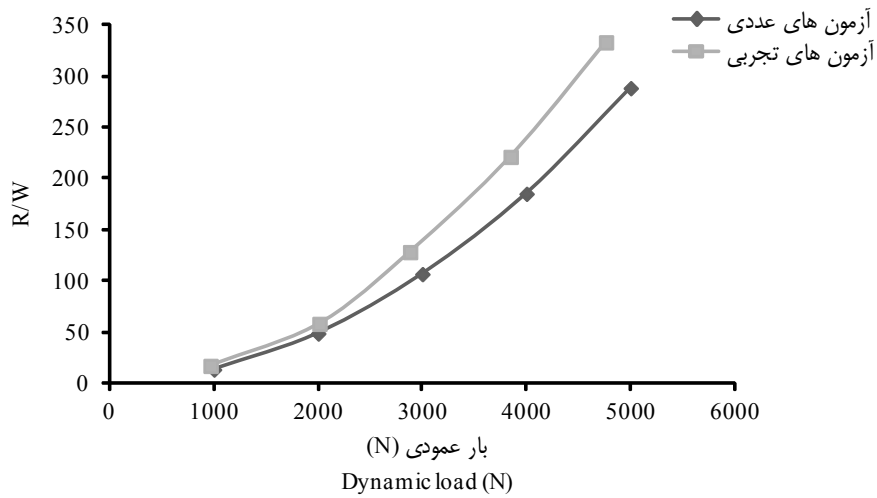
متفاوت، فشار باد ۱۰۰ کیلوپاسکال و سرعت پیشروی ۰/۶۵ متر بر ثانیه در شکل ۸ به تصویر کشیده شده است. نتایج حاصل از آزمون‌های عددی و تجربی و روند تغییراتشان بسیار نزدیک به هم بوده و ضریب همبستگی بین داده‌های تجربی و عددی در کمترین و بیشترین بار دینامیکی به ترتیب برابر ۰/۸ و ۰/۸۷ می‌باشد. در تمام بارهای دینامیکی میزان ضریب مقاومت غلتشی تایر در آزمون‌های عددی بیشتر از آزمون‌های تجربی بودند. ژنت و والتز



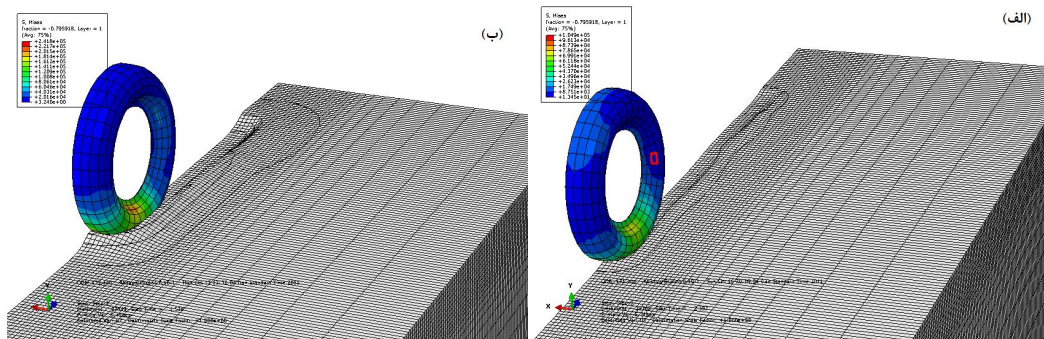
شکل ۶- تأثیر بار دینامیکی تایر بر مقاومت غلتشی در فشارهای باد مختلف و سرعت پیشروی ۰/۶۵ m s⁻¹ در آزمون تجربی
Fig.6. The effect of dynamic load on tire rolling resistance under different values of inflation pressure and forward speed of 0.65 m s⁻¹ in experimental tests



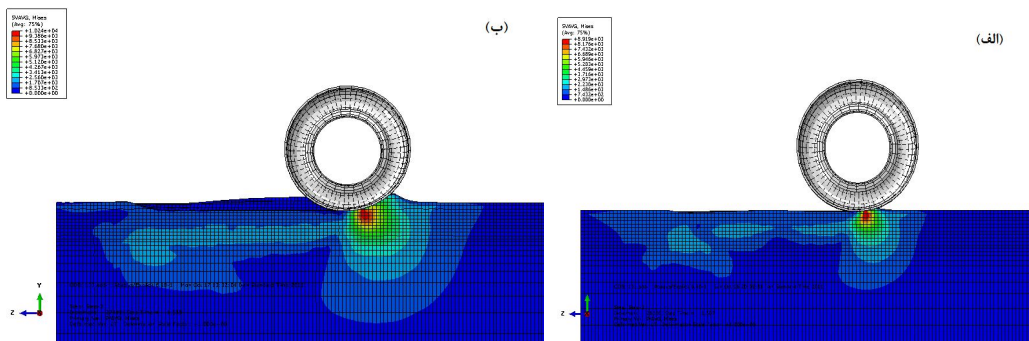
شکل ۷- تغییرات مقاومت غلتشی در بارهای دینامیکی مختلف، فشار باد ۱۰۰ kPa و سرعت ۰/۶۵ m s⁻¹ در آزمون عددی
Fig.7. Rolling resistance changes under different values of dynamic load, inflation pressure of 100 kPa and forward speed of 0.65 m s⁻¹



شکل ۸- ضریب مقاومت غلتشی آزمون‌های عددی و تجربی در بارهای دینامیکی مختلف، فشار باد ۱۰۰ kPa و سرعت پیشروی 0.65 m s^{-1} .
Fig.8. Rolling resistance coefficient of numerical and experimental tests under different values of dynamic load, inflation pressure of 100 kPa and forward speed of 0.65 m s^{-1}



شکل ۹- غلتش تایر روی خاک در فشار باد ۱۰۰ kPa، سرعت 0.65 m s^{-1} و بار دینامیکی الف) ۱۰۰۰ N و ب) ۳۰۰۰ N
Fig.9. Simulated tire rolling on soil surface under inflation pressure of 100 kPa, forward speed of 0.65 m s^{-1} and dynamic load of a) 1000 N & b) 3000 N

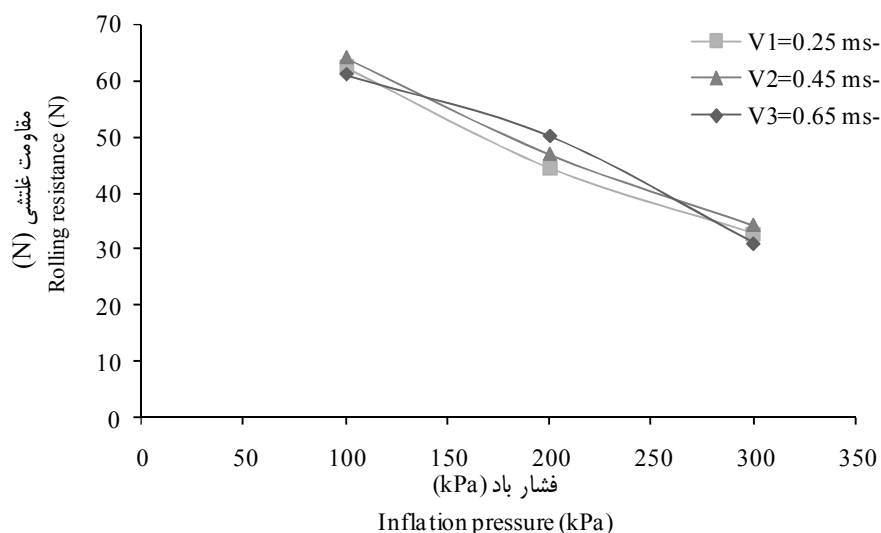


شکل ۱۰- توزیع تنش خاک در اثر غلتش تایر در فشار باد ۱۰۰ kPa، سرعت پیشروی 0.65 m s^{-1} و بار دینامیکی الف) ۱۰۰۰ N و ب) ۳۰۰۰ N در دید افقی

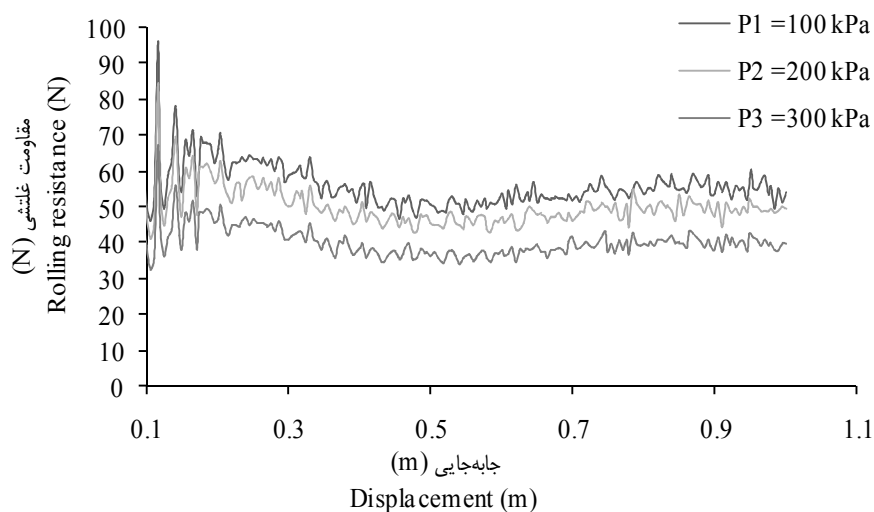
Fig.10. Soil stress distribution under inflation pressure of 100 kPa, forward speed of 0.65 m s^{-1} and dynamic load of a) 1000N & b) 3000 N

مقایسه‌ی تأثیر فشار باد تایر بر مقاومت غلتشی تایر
 تأثیر فشار باد تایر تحقیق روی مقاومت غلتشی آن در شرایط مختلفی از پارامترهای آزمون‌های عددی و تجربی در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

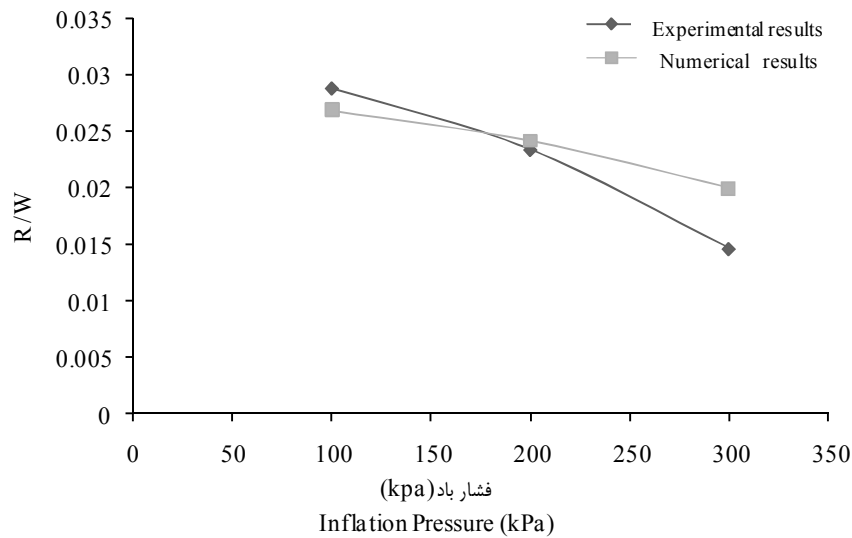
شکل ۱۰ غلتش تایر و تأثیر آن بر روی خاک را در دو بار دینامیکی مختلف ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ نیوتن، فشار باد ۱۰۰ کیلو پاسکال و سرعت ۰/۶۵ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان تنش، تغییر شکل و فشردگی خاک در بار دینامیکی ۳۰۰۰ نیوتن بیشتر از بار دینامیکی ۱۰۰۰ نیوتن است.



شکل ۱۱- تأثیر فشار باد تایر بر مقاومت غلتشی آن در سرعت‌های مختلف و بار دینامیکی ۲۰۰۰ N در آزمون تجربی
Fig.11. The effect of inflation pressure on tire rolling resistance under different values of forward speed and dynamic load of 2000N in experimental tests



شکل ۱۲- تغییرات مقاومت غلتشی در فشارهای باد مختلف، بار دینامیکی ۲۰۰۰N و سرعت ۰/۶۵ m s⁻¹ در آزمون عددی
Fig.12. Rolling resistance changes under different values of inflation pressure dynamic load of 2000 N and forward speed of 0.65 m s⁻¹ in numerical tests



شکل ۱۳- نتایج آزمون‌های عددی و تجربی در فشارهای باد مختلف و بار دینامیکی ۲۰۰۰ N و سرعت پیشروی 0.65 m s^{-1}
Fig.13. Numerical and experimental results under different values of inflation pressure, dynamic load of 2000 N and forward speed of 0.65 m s^{-1}

روند یکنواختی داشت.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل اجزاء محدود سه بعدی جدید از تایر ارائه شد و نتایج آزمایش‌های عملی نشان داد که می‌توان به نتایج این مدل‌سازی تا حد خوبی اطمینان کرد. به‌منظور انجام شبیه‌سازی دقیق، ضرایب مکانیکی خاک به دقت اندازه‌گیری شدند و شرایط آزمایش‌های عملی تا حد ممکن تأثیر داده شدند. بررسی‌ها نشان داد که اثر سرعت پیشروی چرخ روی نیروی مقاوم غلتشی آن معنی‌دار نبوده و آزمون‌های تجربی در تمام سطوح فشار باد و بار دینامیکی و آزمون‌های عددی در فشار باد ۱۰۰ کیلوپاسکال و بار دینامیکی ۲۰۰۰ نیوتن صحت این مطلب را تأیید کردند. تغییرات مقاومت غلتشی بر اثر افزایش بار دینامیکی تایر در هر دو آزمون تجربی و عددی دارای روند مشابه بود و در هر دو آزمون با افزایش بار دینامیکی تایر میزان مقاومت غلتشی نیز افزایش یافت. تغییرات فشار باد تایر و مقاومت غلتشی چرخ نیز با یکدیگر نسبت عکس داشتند به‌طوری‌که با افزایش فشار باد تایر مقاومت غلتشی به مقدار کم کاهش یافت. در آزمون‌های تجربی در بارهای دینامیکی کم، فشار باد تایر تأثیر کمتری در مقاومت غلتشی داشت ولی در بارهای دینامیکی بالاتر با افزایش فشار باد تایر مقاومت غلتشی به‌طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کرد.

به‌منظور بررسی بهتر و دقیق‌تر روند تغییرات، نتایج آزمون‌های عددی و تجربی در فشارهای باد مختلف و بار دینامیکی ۲۰۰۰ نیوتن و سرعت پیشروی 0.65 m s^{-1} بر ثانیه در شکل ۱۳ مورد مقایسه قرار گرفتند.

نتایج آزمون‌های شبیه‌سازی و تجربی در فشارهای باد مختلف نیز بسیار نزدیک به هم هستند به‌طوری‌که ضریب همبستگی بین داده‌های هر دو آزمون در فشار باد حداقل و حداکثر برابر با 0.73 و 0.97 است. شیب تغییرات در روش عددی نسبت به روش تجربی کمتر می‌باشد به‌طوری‌که با افزایش فشار باد تایر، اختلاف بین نتایج تجربی و عددی افزایش می‌یابد که می‌تواند به‌علت اختلاف خواص واقعی تایر با خواص تعریف شده باشد. در آزمون‌های تجربی در بارهای عمودی کم، فشار باد تایر تأثیر کمتری در میزان مقاومت غلتشی داشته ولی در بارهای عمودی بزرگ‌تر با افزایش میزان فشار باد تایر، مقاومت غلتشی به‌طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. ژنت و والتر (Gent and Walter, 2006) تأثیر فشار باد را روی مقاومت غلتشی تایرهای ماشین مسافرتی و تایرهای کامیون بررسی کردند. میزان مقاومت غلتشی در فشارهای باد کمتر از ۱۰۰ کیلوپاسکال خیلی بالا بودند، با افزایش فشار باد تایر میزان مقاومت غلتشی هم در یک روند نزولی کاهش یافت و از فشار باد ۲۵۰ کیلوپاسکال به بعد شیب کاهش مقاومت غلتشی به‌کندی گرایید. ولی در تایرهای کامیون، میزان کاهش مقاومت غلتشی با افزایش فشار باد تایر تقریباً

1. Bolarinwa, E. O., and O. A. Olatunbosun. 2004. Finite element simulation of the tyre burst test. School engineering: University of Birmingham, Edgaston, UK.
2. Gent, A. N., and J. D. Walter. 2006. The Pneumatic Tire, National highway traffic safety administration, Department of Transportation, US.
3. Goreishy, M. H. R. 2003. Modeling of the non-linear deformation in steel-belted radial tyres under inflation loading. Journal of Iranian Polymer 12: 57-65.
4. Goreishy, M. H. R. 2007. Finite element of the steel-belted radial tyre with tread pattern under contact load. Journal of Iranian Polymer 15: 667-674.
5. Hambelton, J. P., and A. Drescher. 2008. Modeling wheel - induced rutting in soils: Indentation. Journal of Terramechanics 45: 201-211.
6. Kaiming, X. 2010. Finite element modeling of tire/terrain interaction: Application to predicting soil compaction and tire mobility. Journal of Terramechanics 37: 349-412.
7. Karaytu, B. 2009. Footprint analysis of radial passenger tire. Cukurova University, Cukurova.
8. Lee, J. H. 2011. Finite element modeling of interfacial forces and contact stresses of pneumatic tire on fresh snow for combined longitudinal and lateral slips. Journal of Terramechanics 48: 171-197.
9. Meshkani, M. 2011. A study of interaction between soil (Urmia soil) and cutting blade (wide and narrow) using discrete element method. Factuality of agriculture, Urmia University, Urmia.
10. Mohsenimanesh, A., S .M. Ward, O. M. Owendeph, and A. Javadi. 2008. Modeling of pneumatic tractor tyre interaction with multi-layered soil. Biosystems Engineering 1-8.
11. Mohsenimanesh, A., S. M. Ward, and M. D. Gilchrist. 2009. Stress analysis of a multi- laminated tractor tyre using non-linear 3D finite element analysis. Materials and design 30: 1124-1132.
12. Regli, G., A. Handke, and M. Bütikofer. 1993. Material laws as a basis for simulation models for the calculation of wheel-soil interaction examination using the finite element method. Journal of Terramechanics 30: 165-179.
13. Xia, K. 2011. Finite element modeling of tire/terrain interaction: Application to predicting soil compaction and tire mobility. Journal of Terramechanics 48: 113-123.

Validation of the finite element simulation to estimate the rolling resistance of a non-driving wheel with experimental tests

N. Dibagar^{1*} - A. Mardani² - A. Modarres Motlagh³ - H. Jafari⁴

Received: 21-11-2013

Accepted: 03-02-2014

Introduction: Encountering soil from the viewpoint of management and product manufacturing has always been considered important, and an attempt is always made that the tools and contrasting methods of soil be designed in such a way that itself prevents, as much as possible, the destructive consequences or energy waste that include economical or environmental limitations. Enhancing the soil encountering methods, quality reformation, and its related equipment, requires performing reliable tests in actual soil conditions. Considering the complexity and variety of variables in soil and machine contrast, this is a hard task. Hence, the numeral simulations are the key of all optimizations that illustrate efficient models by removing the costly farm tests and reducing research time. Tire is one of the main factors engaged with soil, and it is one of those tools that are discussable in both farms, and software environments. Despite the complexities in soil behavior, and tire geometry, modeling, tire movement on the soil has been the researchers' objective from the past.

Materials and methods: A non-linear finite element (FE) model of the interaction of a non-driving tire with soil surface was developed to investigate the influence of the forward speed, tire inflation pressure and vertical load on rolling resistance using ABAQUS/Explicit code. In this research numerical and experimental tests were done under different conditions in order to estimate tire rolling resistance. In numerical tests, the soil part was simulated as a one-layer viscous-elastic material with a Drucker-Prager model by considering realistic soil properties. These properties included elastic and plastic properties which were obtained in the soil laboratory using relevant tests. The soil samples were prepared from the soil which was inside the soil bin. The same soil was utilized in experimental tests. Finite strain hyper elasticity model is developed to model nearly incompressible rubber materials for the tire. Tire model consisted of three components: tread, rubber and ring. Using a soil bin and one wheel tester with their related equipment, experimental tests were carried out in the workstation of mechanics of bio system engineering department of the Urmia University. This system includes various sections such as soil storage in dimensions of 22×2×1 meter, tools carrier or tracker, soil processing equipment, dynamic system, evaluation tools and controlling systems. In order to launch the collection and supply required power for wheel carrier, an industrial three phase electromotor with 22 kW (30 hp) was used. Both numerical and experimental tests were done at three levels of wheel dynamic load (1, 2, 3, 4 and 5) kN, tire inflation pressure (100, 200 and 300) kPa and four levels of speed (0.25, 0.45, 0.65, 0.9 and 1.15) m s⁻¹ to obtain the rolling resistance of the tire.

Results and discussion: In order to evaluate the performance of final non driving tire-soil model to estimate the rolling resistance, numerical results were compared with preliminary experimental data obtained from the soil-bin tests. The comparison showed reasonably good agreement between the computed and measured general pattern of the rolling resistance at the tire-soil interface under different speeds, vertical loads and inflation pressures. In both tests, a specified relation was not seen between tire velocity and its rolling resistance, as it was not seen in empirical models such as Wismar and Luce. Correlation coefficient between experimental and numerical data, in the minimum and maximum value of tire inflation pressure was computed to be 0.06 and 0.016 percent, respectively. The amount of tire rolling resistance significantly increased with increase of tire vertical load. Correlation coefficient between experimental and numerical data, in the minimum and maximum vertical loads was computed to be 80 and 87 percent, respectively. Gent and Walter obtained the same results. The tire inflation pressure and rolling resistance variables had inverse relation to each other in both numerical and experimental tests. Correlation coefficient between experimental and numerical data was computed to be 97 and 73 percent in the minimum and maximum tire inflation pressure, respectively. The gradient of changes in tire inflation pressure - rolling resistance diagram was less in numerical tests. This was because of differences between real properties and the properties entered into the software.

1- PhD Student of Mechanics of Biosystem Engineering, Hamedan University

2, 3- Assistant and Associate professors of Mechanics of Biosystem Engineering Department, Urmia University

4- Graduated student, Agricultural Machinery Engineering Department, Urmia University

(* - Corresponding Author Email: Ned_441@yahoo.com)

Conclusions: To conclude, in this investigation a new 3D tire-soil model was simulated which has specific features. The experimental results showed that the numerical data of estimation of non-driven tire rolling resistance were reliable. In both tests, the effect of changes in tire forward speed on rolling resistance was not significant. The amount of the tire rolling resistance significantly increased with increasing tire vertical load. Changes in tire inflation pressure and rolling resistance had an inverse relation with each other in both numerical and experimental tests. The slope of rolling resistance - inflation pressure diagram in numerical tests was less than the same diagram in the experimental tests.

Keywords: ABAQUS, Finite element, Rolling resistance, Soil-bin, Tire/terrain interaction