

## اعتبارسنجی مدل ویسمر لوث در رابطه با پیش بینی مقاومت غلتشی چرخ با ورود پارامترهای سرعت پیشروی و تعداد تردد چرخ

سجاد درفش پور<sup>۱\*</sup>، عارف مردانی<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه
  ۲. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه
- (تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۴/۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۵/۱)

### چکیده

در این پژوهش به بررسی عملکرد مدل ویسمر لوث برای تخمین مقاومت غلتشی یک چرخ با لحاظ کردن پارامترهای سرعت پیشروی و تعداد تردد چرخ پرداخته شده است. آزمون‌های تجربی با استفاده از یک آزمونگر تک چرخ و در محیط کنترل شده انباره خاک به انجام رسید. پارامترهای سرعت پیشروی و بار در سه سطح در نظر گرفته شده و با تکرار عبور چرخ در هر مسیر، سطوح تردد چرخ اعمال گردید. نتایج حاکی از دقت مناسب مدل ویسمر در پیش بینی مقاومت غلتشی در همه سطوح بار و سرعت پیشروی بوده است اما در رابطه با پارامتر تردد، دقت پیش بینی در ترددهای تا ۵ عبور بسیار بیشتر از ترددهای بالا دیده شد. یک مدل رگرسیونی بر اساس داده‌های تجربی برای پیش‌بینی مقاومت غلتشی چرخ با اضافه کردن اثر سرعت پیشروی و تردد ارائه گردید. به طور کلی مدل ویسمر با وجود عدم در برداشتن پارامترهای سرعت پیشروی و تردد، توانایی پیش بینی خوبی از مقاومت غلتشی چرخ را از خود نشان داد.

واژه‌های کلیدی: مدل ویسمر- لوث، چرخ، مقاومت غلتشی، تردد، انباره خاک

### مقدمه

پیش‌بینی رفتار چرخ و خاک از دیرباز مورد توجه پژوهشگران بوده است. یکی از فاکتورهای بسیار مهم در ارزیابی تراکتورها و ماشین‌های برون جاده‌ای، عملکرد کششی می‌باشد که نقش به‌سزایی را در بهینه‌سازی مصرف انرژی نیز بر عهده دارد. طی پژوهشی در رابطه با بررسی عملکرد تایرهای شعاعی و بایاس، محققین گزارش نمودند بیشترین اتلاف سوخت مصرفی در بخش کشاورزی آمریکا ناشی از بازده پایین در چرخ‌های ماشین‌های مزرعه‌ای بوده است که در حدود ۵۷۵ میلیون لیتر سوخت اضافی در سال اعلام شده است (Wulfsohn et al., 1988). در یک ماشین درون جاده‌ای، مقاومت حرکتی ممکن است شامل مقاومت غلتشی تایر، مقاومت هوا و مقاومت ناشی از شتاب‌گیری باشد در حالی که در رابطه با چرخ‌های درگیر با خاک، بخش عمده مقاومت حرکتی مربوط به تغییر شکل خاک است. عمدتاً مقاومت‌های ایجاد شده سبب کاهش بازده کششی و افزایش انرژی مصرفی می‌گردند از این رو عملکرد تایر نقش مهمی را در بازده کششی و مصرف انرژی ایفا می‌کند (Sina et al., 2015). ویژگی‌های عملکردی از چرخ معمولاً به‌وسیله‌ی نیروی کششی، مقاومت غلتشی، نشست و لغزش توصیف

می‌گردد. پارامتر مقاومت غلتشی به عنوان فاکتور بسیار مهم از چرخ نیوماتیکی محسوب می‌شود که تحت تأثیر تایر طراحی شده، ویژگی‌های زمین و پارامترهای سیستم قرار می‌گیرد. مقاومت غلتشی بیشتر در قالب انعطاف پذیری تایر و تغییر شکل ایجاد شده در خاک پدیدار می‌شود (Pranav and Pandey, 2008). یک چرخ ممکن است تنها وظیفه تحمل بخشی از وزن یک ماشین را بر دوش داشته باشد و یا اینکه علاوه بر این وظیفه، تامین کشش و راه‌اندازی ماشین را هم بر عهده داشته باشد. عوامل موثر بر عملکرد یک چرخ، سالها پس از ساخته شدن چرخ‌های نخستین مورد توجه قرار گرفته است و شاید در آغاز، صرفاً گرد بودن و استحکام کافی داشتن برای یک چرخ کافی بوده باشد اما امروزه طراحی و به‌کارگیری چرخ‌ها با وسواس قابل ملاحظه‌ای دنبال می‌شود. عملکرد یک چرخ، طی فرایند درگیری با زمین، علاوه بر شرایط بارگذاری و چگونگی سطح زیرین چرخ، تحت تأثیر هندسه و ساختار فیزیکی چرخ هم قرار دارد. پیشگویی صحیح از عملکرد کششی ماشین‌های برون جاده‌ای وابسته به به‌کارگیری صحیح مدل‌های ارائه شده در این زمینه می‌باشد. درجه پیچیدگی این مدل‌ها بر اساس کاربرد، دقت و روش محاسباتی توسعه آن مبتنی گشته است. در کل می‌توان این مدل‌ها را به سه دسته اصلی مدل‌های تجربی، مدل‌های نیمه تجربی و مدل‌های تحلیلی تقسیم نمود. مدل‌های

\* نویسنده مسئول: s.derafshpour@gmail.com

است. با وجود محدودیت‌های موجود در این مدل، این معادلات می‌توانند جایگزین بسیاری از آزمایش‌های عملی گردند. یکی از فاکتورهای تجربی که محققان به‌طور گسترده از آن استفاده می‌کنند عدد چرخ می‌باشد. عدد چرخ به عنوان یک متغیر بی بعد، تابعی از شرایط خاک، بار تایلر و خواص هندسی تایلر شامل عرض، قطر و ارتفاع مقطع می‌باشد. همه‌ی این پارامترها، متغیرهای مختلفی برای این عدد بی بعد محسوب می‌شوند. به هر حال بسیاری از آنها با ضرب عدد چرخ ( $C_n$ ) در یک ضریب ثابت ( $K_x$ ) به دست می‌آیند که این ضریب با توجه به مقادیر ارائه داده شده توسط محققین مختلف متفاوت می‌باشد (رابطه‌ی ۱).

$$C_n = (CI \cdot b \cdot d) / W (K_x) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه، CI، شاخص مخروطی خاک، b، عرض تایلر، d، قطر تایلر و W، بار روی چرخ می‌باشد. مدل‌های تجربی متنوعی توسط محققین برای شرایط مختلف در طول سال‌های متوالی ارائه شده است. جدول (۱) برخی از ضریب‌های مرسوم تعیین شده که محققان برای محاسبه عدد چرخ استفاده کرده‌اند را نشان می‌دهد (Taheri et al., 2015). در جدول نشان داده شده  $\delta$  و h به ترتیب خوابیدگی تایلر و ارتفاع مقطع تایلر است.

نیمه تجربی عمدتاً از روابط تجربی توسعه یافته توسط بکر (Bekker, 1960) و وانگ (Wang, 2010) سرچشمه گرفته است. در این روابط، تنش‌های برشی و نرمال در سطح تماس تایلر به عنوان تابعی از متغیرهای سینتیک و سینماتیک تایلر بیان می‌شوند. در این مدل‌ها با وجود اینکه عملکرد تراکتور بر حسب ظرفیت تولید واکنش سطح تماس محاسبه می‌شود ولی استفاده از این مدل‌ها در تحلیل عملکرد و کشش ماشین به جهت نیازمندی این مدل‌ها به فراهم کردن داده‌های مربوط ویژگی‌های خاک و معادلات تغییر شکل، با مشکل مواجه می‌شود. مدل‌های تحلیلی، روش‌های تحلیلی و اصول فیزیکی را برای نمایش ترکیب تایلر و خاک و همچنین تقابل آنها ادغام کرده است. این مدل‌های چند رشته‌ای، ریاضیات کاربردی، آنالیز عددی، فیزیک محاسباتی و حتی گرافیک کامپیوتری را برای ارزیابی عملکرد ماشین‌های چرخ دار به کار گرفته است. نیاز بالا به زمان محاسباتی و تحلیل روش‌های FEM و DEM نیز مشکلی برای این مدل‌ها تلقی می‌گردد. مدل‌های تجربی معمولاً برای ارزیابی ساده‌ای از ماشین در جایگاه‌های در حال حرکت یا ایستا استفاده می‌شود. این مدل‌ها به‌طور کلی بر اساس تست‌های آزمایشگاهی یا تست‌های مزرعه‌ای پایه‌ریزی شده

جدول ۱. عدد حرکت پذیری چرخ پیشنهاد شده توسط محققین مختلف

عدد تحرک پذیری چرخ	محقق
$K_w = 1$	ویسمر و لوث
$K_F = \sqrt{\frac{\delta}{h}}$	فریناژ
$K_T = \sqrt{\frac{\delta}{h} \frac{1}{1+b/2d}}$	تورناژ
$K_B = \frac{(1+5\delta/h)}{(1+3b/d)}$	بریکسیوس
$K_M = \frac{\delta^{0.4}}{b^{0.2} d^{0.2}}$	مک لورین
$K_T = \sqrt{\frac{\delta}{h} \frac{d^{0.15}}{b^{0.15}}}$	رونلد و پیل
$K_{HS} = \sqrt{\frac{h-\delta}{d}}$	هگازی و ساندو

داخلی ( $CMR_{int}$ ) و لغزش چرخ (i) نشان داد (Lyasko, 2010) رابطه‌ی (۲) مقاومت حرکتی کل چرخ بر حسب دو مؤلفه‌ی مقاومت حرکتی خارجی و مقاومت حرکتی داخلی را بیان می‌کند. ضریب مقاومت حرکتی داخلی و خارجی نیز مطابق روابط (۳) و (۴) ارائه شده است.

مطالعات متعددی جهت تخمین مقاومت غلتشی و پیش بینی عملکرد کششی بر اساس این روابط صورت گرفته است. پارامترهای عملکردی کشش ماشین را می‌توان بر اساس چهار ضریب بی بعد به قرار ضریب کشش مالبندی ( $CTF^1$ )، ضریب مقاومت حرکتی خارجی ( $CMR_{ext}$ )، ضریب مقاومت حرکتی

(شکل ۱). رطوبت خاک کانال ۸/۷ درصد و دارای بافت لومی رسی با وزن مخصوص خشک ۱/۴۹ گرم بر سانتیمتر مکعب بود. آزمونگر تک چرخ از نوع چهار بازویی با قابلیت اعمال بار عمودی است (شکل ۳). تایر مورد استفاده در این تحقیق، یک تایر استاندارد با مشخصات P.R HLF (8) 8.25-16 Barez است که در آن مطابق کاتالوگ ارائه شده، عرض مقطع تایر ۲۲۰ میلیمتر، نسبت شکل معادل ۸۰ (نسبت بین ارتفاع مقطع و عرض مقطع بر حسب درصد)، ساختار تایر بایاس و قطر رینگ ۱۶ اینچ است.

شکل ۱. انباره خاک و آزمونگر تک چرخ



داده برداری و ایجاد ترکیبات تیماری در کرت‌های مختلف قبل از انجام آزمایش‌ها، خاک داخل کانال با استفاده از دنباله‌بندهای ویژه انباره خاک در اتصال به کشنده آن (شامل چنگه، لولر و غلتک) مورد فراوری قرار گرفته و به صورت یکنواخت آماده سازی، تسطیح و در سطوح معین متراکم شد (شکل ۲). مجموعه‌ی کانال به ۹ کرت به ابعاد ۰/۵ × ۳ متر تقسیم‌بندی گردید. این کار با هدف تشکیل کرت‌های آزمایش، شامل سطوح مختلف سرعت و بار در هر کرت و صرفاً با یک بار آماده‌سازی خاک صورت گرفت. آزمایش‌ها تحت سه سطح مختلف بار و سه سطح مختلف سرعت مطابق (جدول ۲) پایه‌ریزی گردید. تامین سطوح سرعت پیشروی، توسط تابلو فرمان مجموعه انباره خاک صورت پذیرفت که با کنترل الکتروموتور اصلی کشنده انباره خاک، سطوح متنوع سرعت کشنده را مهیا کرده است. برای بررسی پارامتر تردد، تایر در هر مسیر تعداد ۲۰ تردد انجام داد و اثر بار، سرعت و تردد بر روی متغیرهای وابسته مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳).

$$MR = (c [MR]_{ext} + [cMR]_{int}).W = ((1 - i).pull)/TE \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$c [MR]_{ext} = MR/W \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$cMR_{int} = \frac{MR}{W} \quad (\text{رابطه ۴})$$

یکی از ساده‌ترین و متداول‌ترین این مدل‌ها برای پیش بینی مقاومت غلتشی مدلی است که توسط ویسمر و لوث (WismerLuth, 1973). مطابق رابطه‌ی (۵) گزارش گردیده است. شاخص مخروطی به عنوان نماینده‌ای از شرایط خاک می‌باشد.

$$R_{wismer} = \frac{1.2}{C_n} + 0.04 \quad (\text{رابطه ۵})$$

در رابطه‌ی (۵)، مقاومت غلتشی بر اساس عدد چرخ گزارش گردیده که عدد چرخ نیز تابعی از ابعاد چرخ و شاخص مخروطی می‌باشد که در رابطه‌ی (۱) نیز بیان شده است. سرعت پیشروی فاکتور دیگری است که تحقیقات متعددی پیرامون تاثیر آن صورت گرفته است. در یک تحقیق، تاثیر بار دینامیکی روی چرخ با در نظر گرفتن سرعت پیشروی، لغزش و پارامتر شاخص مخروطی خاک مورد بررسی قرار گرفت (Self et al., 1988). بر اساس تحقیق مزبور، مقاومت غلتشی چرخ، به صورت معنی داری تحت تاثیر سرعت پیشروی و همچنین بار دینامیکی روی چرخ قرار دارد. ضریب کشش دینامیکی هم در این تحقیق، به صورت معنی داری، متاثر از سرعت پیشروی، لغزش و بار دینامیکی روی چرخ بوده است. بازده کششی چرخ هم شرایط مشابهی داشته و اثر معنی دار سرعت پیشروی، بار دینامیکی و لغزش چرخ بر روی این پارامتر، تایید شده است. در پژوهشی دیگر اثر سرعت پیشروی بر مقاومت غلتشی چرخ بیشتر در سرعت های بالا قابل ملاحظه گزارش شده است (Nguyen et al., 2008). با توجه به اینکه در غالب مدل تجربی از جمله مدل ویسمر، فاکتور سرعت پیشروی و تعدد عبور چرخ در نظر گرفته نشده است، در این تحقیق، تاثیر سرعت پیشروی و همچنین تکرار تردد چرخ بر مقاومت غلتشی مورد بررسی قرار گرفته است و به عبارتی مدل ویسمر به نمایندگی از مدل‌های (WES) مبتنی بر شاخص مخروطی خاک) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## مواد و روش‌ها

این تحقیق با استفاده از انباره خاک آزمایشگاه ترامکانیک گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه توسط یک آزمونگر تک چرخ به انجام رسید. کانال انباره خاک دارای ابعاد ۲ × ۲۴ متر و عمق لایه‌ی خاک آن برابر ۷۰ سانتیمتر بود

دستگاه بعد از اندازه‌گیری سختی خاک، داده‌ها را در حافظه‌ی خود نگاه داشته و سپس داده‌ها به کامپیوتر انتقال داده شد و بعد از متوسط‌گیری از داده‌های مربوط به هر آزمایش، در جداول مربوط به داده‌ها قرار گرفت.

### اندازه‌گیری مقاومت غلتشی

با توجه به شرایط غیر محرک بودن چرخ، نیروی لازم برای حرکت چرخ بر روی سطح خاک، مقاومت حرکتی کل خواهد بود. بدین منظور در مجموعه‌ی آزمونگر تک چرخ، مجموع نیروهای چهار بازوی افقی متصل به چرخ به عنوان نیروی افقی کلی وارد بر چرخ در نظر گرفته شد که به عبارتی همان مقاومت حرکتی کل وارده بر چرخ است. لودسل‌های نصب شده در بازوهای آزمونگر چرخ از نوع بونگشین با ظرفیت ۲۰۰ کیلوگرم بوده و قبل از استفاده کالیبره شدند (شکل ۳). با حرکت چرخ بر روی سطح خاک، دیتالاگر مقادیر نیروی هر یک از بازوها را ثبت و درحافظه جانبی خود ذخیره نمود. سپس مقادیر ثبت شده جهت تشکیل ماتریس داده‌های آزمایشی و همچنین تجزیه و تحلیل، به کامپیوتر انتقال داده شدند (شکل ۳).

جدول ۲. سطوح متغیرهای اعمال شده

سطوح	سرعت پیشروی ( $ms^{-1}$ )	بار (kN)
۱	۰/۵	۲
۲	۱	۳
۳	۱/۵	۴

### اندازه‌گیری سختی خاک

پارامتر شاخص مخروطی خاک در واقع شاخصی از وضعیت خاک است که باید در مدل‌های تجربی چرخ و خاک وارد شود. بیشتر مدل‌های کاربردی و مرسوم مربوط به تقابل چرخ و خاک، برگرفته از روش WES است که وضعیت خاک را صرفاً در قالب یک پارامتر موسوم به شاخص مخروطی تعریف می‌کنند. این پارامتر به وسیله یک مخروط استاندارد، طی نفوذ در سطح خاک مورد نظر به دست می‌آید. در این پژوهش از یک پنترومتر مدل RIMIK C20 برای تعیین شاخص مخروطی خاک استفاده گردید. این دستگاه مطابق استانداردهای مربوطه دارای میله‌ای به طول ۹۰ سانتی متر است که مخروط ویژه آن با زاویه راس ۳۰ درجه به نوک میله متصل شده و میله نیز بر روی دستگاه سوار می‌شود. در این تحقیق، فواصل عمقی جهت اندازه‌گیری مقاومت نفوذ پذیری خاک، برابر ۲/۵ سانتی‌متر تنظیم شده و حداکثر عمق اندازه‌گیری مقاومت نیز ۲۵ سانتی متر اعمال شد.



شکل ۲. فرآوری خاک انباره خاک پیش از آزمایشات (چنگه، لولر و غلتک)



آزمونگر چرخ و سیستم تحویل داده



شکل ۳. تکرار عبور چرخ در مسیرهای معین مربوط به هر کرت و مجموعه

## تجزیه و تحلیل داده‌ها

اساس این تحقیق به صورت آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی (CRD) با هدف بررسی اثر شدت تردد، سرعت پیشروی و بار روی چرخ در یک طرح  $3 \times 3 \times N$  پایه ریزی گردید که N تعداد تردد در هر مسیر بود. در هر مسیر، ۲۰ تردد پی در پی همراه با داده برداری صورت پذیرفت. آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم افزار spss 22 صورت گرفت.

## نتایج

### بررسی نتایج تجربی

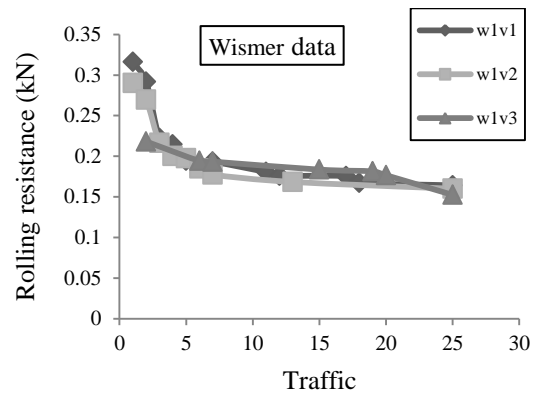
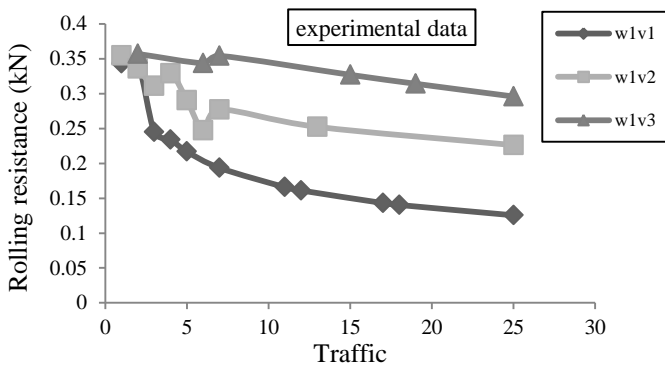
شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) بر گرفته از نتایج تجربی، تأثیر سرعت پیشروی را بر تغییرات مقاومت غلتشی در تطابق با معادله‌ی ویسمر طی افزایش تردد نشان داده است. در نمودارهای مذکور برای داده‌های تجربی، سرعت پیشروی در سه سطح سرعت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه و بار روی چرخ نیز در سه سطح تنظیم سرعت پیشروی و اثر تردد گزارش شده است که البته تاثیر تردد در قالب تغییرات شاخص مخروطی خاک پوشش داده شده است. در نمودارهای شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) مربوط به نتایج مدل ویسمر، این موضوع قابل مشاهده است به طوری که با تغییر سرعت پیشروی، تغییری در روند داده‌ها صورت نگرفته است در حالی که در داده‌های تجربی، مقدار سرعت پیشروی به عنوان فاکتور مستقل تأثیر خود را در تغییرات داده‌های مقاومت غلتشی نشان داده است. نکته‌ی قابل توجه دیگر، اثر تردد می‌باشد. هرچند در معادله‌ی ویسمر، مقدار مقاومت غلتشی به صورت تابعی از شاخص مخروطی به عنوان نماینده‌ی اثر تردد گزارش شده است اما پارامتر تعداد تردد در این مدل به صورت مستقیم لحاظ نگردیده است. در داده‌های گزارش شده شامل داده‌های حاصل از آزمایشات تجربی و رابطه‌ی ویسمر، اثر تردد نقش تعیین کننده‌ی را در مقدار مقاومت غلتشی نشان داده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تردد، مقدار مقاومت غلتشی کاهش پیدا کرده است چراکه مقدار شاخص مخروطی با افزایش تردد بیشتر می‌شود. شاخص مخروطی با مقاومت غلتشی گزارش شده در رابطه‌ی ویسمر رابطه‌ی معکوسی دارد که این موضوع را می‌توان در نمودارهای شامل داده‌های تجربی هم مشاهده نمود. جدول (۳) درصد کاهش مقاومت غلتشی طی تکرار عبور چرخ را بر اساس مدل ویسمر و داده‌های تجربی برای سطوح بار ۲ kN (سطح بار اول) و سرعت

شده است. با توجه به نمودارها، با افزایش تردد، مقاومت غلتشی در سطوح مختلف بار و سرعت کاهش می‌یابد که این نتیجه در داده‌های حاصل از معادلات ویسمر نیز مشهود است. افزایش تعداد تردد منجر به افزایش تراکم خاک شده و عبور چرخ را در تردد بعدی تسهیل می‌کند. از دیدگاه مدل ویسمر نیز تردد باعث افزایش شاخص مخروطی خاک شده و عدد چرخ را افزایش می‌دهد که به نوبه خود منجر به کاهش ضریب مقاومت غلتشی چرخ خواهد گردید. در نمودارهای نشان داده شده همانطور که مشاهده می‌شود، روند مشابهی از نظر کاهش مقاومت غلتشی با افزایش تردد بین داده‌های حاصل از آزمایشات تجربی و داده‌های حاصل از ویسمر وجود دارد. هرچند داده‌های حاصل از مدل ویسمر که بر اساس رابطه‌ی (۵) به دست آمده است. در بیشتر نمودارها، مقدار مقاومت غلتشی بیشتری را در هر سه سطح از سرعت و بار پیش بینی کرده است. در معادله‌ی ویسمر، مقدار مقاومت غلتشی به صورت مستقل از پیشروی  $0.5 \text{ ms}^{-1}$  (سطح سرعت اول) به عنوان نمونه نشان داده است.

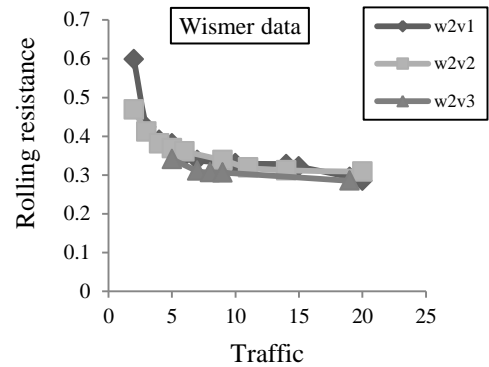
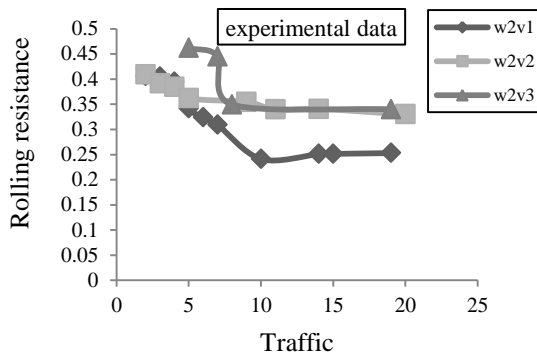
جدول ۳. درصد کاهش مقاومت غلتشی با افزایش تردد برای داده‌های ویسمر

داده‌های تجربی		تردد
درصد کاهش مقاومت غلتشی	ویسمر	
۳۷	۳۸	۱-۵
۲۳	۷	۵-۱۱
۲۴	۹	۱۱-۲۵

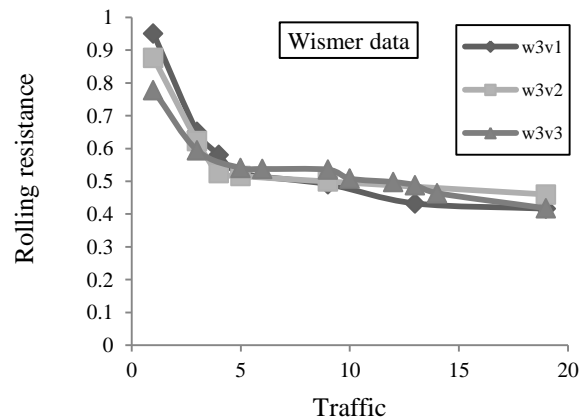
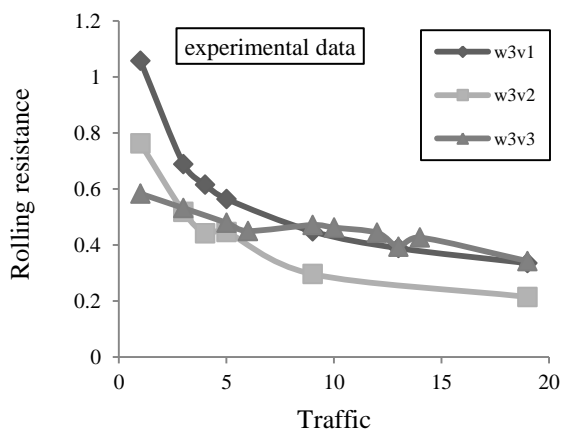
مطابق جدول (۳) تا تردد پنجم مقدار مقاومت غلتشی، ۳۷ درصد بر اساس داده‌های تجربی و ۳۸ درصد بر اساس داده‌های ویسمر کاهش پیدا کرده است که حاکی از دقت قابل قبول مدل در پیش بینی مقاومت غلتشی طی تردهای کمتر از ۵ عبور است. از طرفی بر اساس مدل ویسمر، درصد کاهش مقاومت غلتشی از تردد پنجم تا یازدهم برابر ۷ درصد می‌باشد که مقدار تجربی آن را برابر ۲۳ درصد نشان داده است و می‌توان دریافت که رابطه‌ی ویسمر در افزایش تردد نمی‌تواند در دامنه وسیعی از تعداد تردد، معتبر باشد به عبارت دیگر بر اساس این مشاهدات، تردد به عنوان یک عامل مستقل نمی‌تواند به خوبی در بدنه ریاضی مدل ویسمر وارد گردد چرا که پیش بینی با دقت متفاوتی را در سطوح مختلف تردد از خود نشان داده است.



شکل ۴. اثر سرعت بر روی مقاومت غلتشی با افزایش تردد حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های ویسمر در سطح بار اول



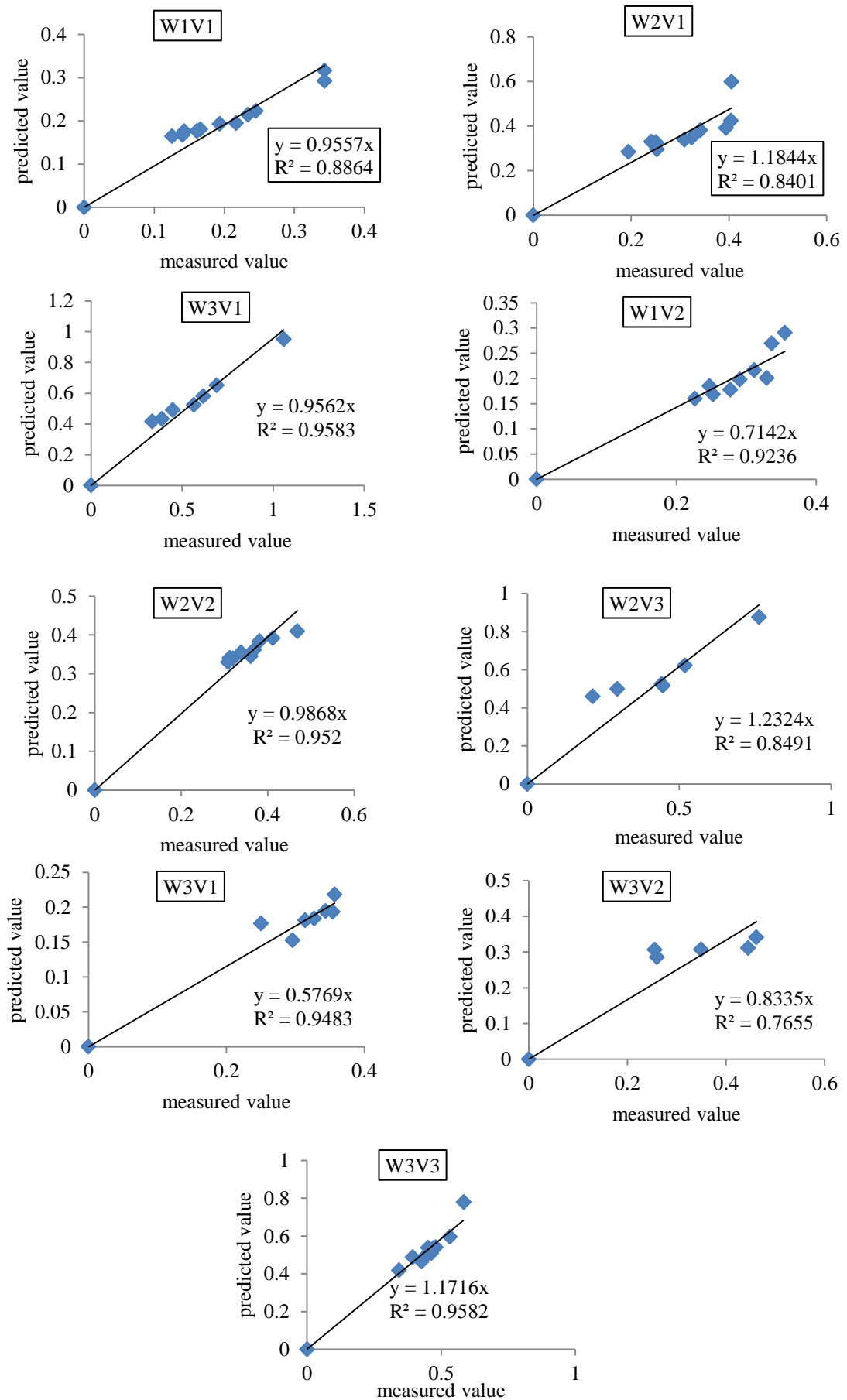
شکل ۵. اثر سرعت بر روی مقاومت غلتشی با افزایش تردد حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های ویسمر در سطح بار دوم



شکل ۶. اثر سرعت بر روی مقاومت غلتشی با افزایش تردد حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های ویسمر در سطح بار سوم

خوبی بین داده‌های حاصل از مدل ویسمر و داده‌های تجربی ایجاد شده است که در بیشتر ترکیب‌های تیماری، ضریب همبستگی بین داده‌های تجربی و مدل ویسمر بیشتر از ۰/۸۴ می‌باشد. مبتنی بر این نتایج، با وجود این‌که در مدل ویسمر

برازش منحنی داده‌های تجربی در مقابل داده‌ی مدل ویسمر شکل (۷) برازش منحنی را برای مقاومت غلتشی حاصل از مدل ویسمر در مقابل داده‌های تجربی در سه سطح از بار و سه سطح از سرعت نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود برازش



شکل ۷. همبستگی بین داده‌های حاصل از مدل ویسمر و داده‌های تجربی مقاومت غلتشی در سطوح مختلف

است مستقل از سطوح سرعت پیشروی، پیش‌بینی مناسبی را از حاکی از آن است که مدل ویسمر در ارائه‌ی نتایج در مقایسه با داده‌ی تجربی موفق بوده است. شکل (۸) توزیع کلی داده‌های به‌دست آمده از نتایج آزمایشگاهی را در مقابل داده‌های مدل ویسمر نشان می‌دهد. مبتنی بر این شکل، ضریب همبستگی بین دو سری داده برابر ۰/۷۶ می‌باشد و حاکی از آن است که تطابق نسبی بین این دو سری داده برقرار است. این نتایج بر اساس کلیه سطوح سرعت پیشروی و تردد به دست آمده است.

پارامتر سرعت پیشروی جایگاهی ندارد این مدل باز هم توانسته مقاومت غلتشی چرخ ارائه نماید. عدم تاثیرپذیری مقاومت غلتشی از سرعت پیشروی در برخی گزارش‌های تحقیقی نیز به ویژه در سطوح پایین سرعت گزارش شده است.

#### آزمایش اعتبار سنجی مدل ویسمر با ANOVA

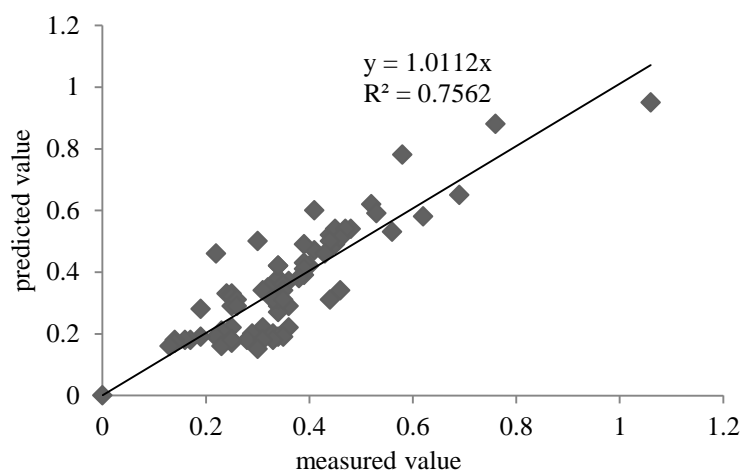
روش ANOVA برای اعتبار سنجی مدل ویسمر در نرم افزار SPSS به‌کار گرفته شد. تست در ۹۵٪ فاصله‌ی اطمینان انجام شد. نتایج به‌دست آمده در جداول (۴) و (۵) گزارش شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار sig کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد و

جدول ۴. خلاصه مدل پیش‌بینی شده

R	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل شده	خطای استاندارد برآورد
۰/۹۷۷	۰/۹۵۴	۰/۹۵۳	۰/۰۸۷

جدول ۵. نتایج تست ANOVA

Sig.	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	
۰/۰۰۰	۱۵۲۰/۴۷۷	۱۱/۵۰۳	۱	۱۱/۵۰۳	رگرسیون
		۰/۰۰۸	۷۴	۰/۵۶۰	باقیمانده
			۷۵	۱۲/۰۶۳	کل



شکل ۸. مقایسه بین داده‌های تجربی و داده‌های مدل ویسمر در ارزیابی مقاومت غلتشی

نیست. به عبارت دیگر، فاکتور سرعت به عنوان پارامتر مستقل تاثیر بسزایی در روند مقاومت غلتشی نداشته است. رابطه‌ی (۶) مقاومت غلتشی را بر حسب سه پارامتر بار، سرعت و تعداد تردد بیان می‌کند. این رابطه، مقدار مقاومت غلتشی چرخ را با در نظر گرفتن نقش پارامترهای سرعت پیشروی و تردد در کنار بار روی چرخ ارائه کرده است.

#### رگرسیون خطی چندگانه (MLR)

در بررسی دیگری، به منظور پیش‌بینی مقدار مقاومت غلتشی بر اساس متغیرهای بار، سرعت و تردد، رگرسیون خطی چندگانه انجام گرفت. نتایج حاصل از این تحلیل در جدول (۶) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار sig برای متغیرهای بار و تردد معنی دار بوده و این مقدار برای پارامتر سرعت معنی دار



موضوع نتایج حاکی از آن بود که شاخص مخروطی مربوط به همان گذر را نیز می‌توان در مدل ویسمر به جای تردد به کار برد. مدل ویسمر در گذرهای اولیه از اعتبار بالایی برخوردار بوده و با رسیدن به ترددهای بالا، مقدار مقاومت غلتشی پیش‌بینی شده با مقدار تجربی آن اختلاف زیادی پیدا نمود. سرعت به عنوان فاکتور دیگر نقش چندانی در تغییر مقاومت غلتشی نداشته و این امر نیز در مدل ویسمر مشهود است بطوریکه به فاکتور سرعت در مدل ویسمر به نمایندگی مدل‌های WES اشاره نشده است. در پایان مدلی برای مقاومت غلتشی که تابعی از سه پارامتر بار، سرعت و تردد بود ارائه گردید.

$$R = -0.01 n + .102 W + 0.02 V + 0.214 \quad (\text{رابطه ۶})$$

### نتیجه گیری

بر اساس نتایج تحقیق، روند مشابهی بین داده‌های تجربی و داده‌های حاصل از مدل ویسمر برقرار بود. با افزایش تردد، مقاومت غلتشی به عنوان تابعی از این فاکتور کاهش یافت که این موضوع را می‌توان در افزایش عمق نشست خاک و نرم شدن بیش از حد آن تفسیر کرد. در تحلیل رگرسیون چندگانه، اثر تردد بر روی مقاومت غلتشی معنی دار بود و فاکتور تردد در مدل ویسمر وجود ندارد. هرچند شاخص مخروطی که در مدل ویسمر بیان شده است نیز در ارتباط با تردد چرخ می‌باشد ولی

جدول ۶. ضرایب همبستگی مدل پیش بینی شده

مدل	ضرایب استاندارد		t	Sig.	۹۵٪ فاصله اطمینان برای B			
	B	Beta			کران بالا	کران پایین		
(ضریب)	۰/۳۱۴	۰/۰۳۹			۵/۴۹۹	۰/۲۹۲	۰/۱۳۶	۰/۰۰۰
n	-۰/۰۱۰	۰/۰۰۲	-۰/۴۵۴		-۶/۰۴۵	-۰/۰۰۷	-۰/۰۱۳	۰/۰۰۰
w	۰/۱۰۲	۰/۰۱۴	۰/۵۷۱		۷/۵۵۲	۰/۱۲۹	۰/۰۷۵	۰/۰۰۰
v	۰/۰۲۰	۰/۰۱۳	-۰/۱۱۱		۱/۴۷۱	۰/۰۴۶	-۰/۰۰۷	۰/۱۴۶

### REFERENCES

- Bekker, M. G. (1960). Off-the-road locomotion: research and development in terramechanics. *University of Michigan Press Ann Arbor*.
- Lyasko, M. (2010). Multi-pass effect on off-road vehicle tractive performance. *Journal of Terramechanics* 47: 275-294.
- Nguyen, V N., T. Matsuo, S. Inaba and T. Koumoto. (2008). Experimental analysis of vertical soil reaction and soil stress distribution under off-road tires. *Journal of Terramechanics* 45: 25-44.
- Pranav, P. K. and K. P. Pandey. (2008). Computer simulation of ballast management for agricultural tractors. *Journal of Terramechanics* 45: 185-192.
- Self, K., J. Summers, J. Greenlee and G. McLaughlin. (1988). A mobile off-road tire test apparatus. *Applied Engineering in Agriculture* 4: 2-4.
- Sina, N. and S. Nasiri and V. Karkhaneh. (2015). Effects of resistive loads and tire inflation pressure on tire power losses and CO2 emissions in real-world conditions. *Applied Energy* 157: 974-983.
- Taheri, S., C. Sandu, S. Taheri, E. Pinto and D. Gorsich. (2015). A technical survey on Terramechanics models for tire-terrain interaction used in modeling and simulation of wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics* 57: 1-22.
- Wang, J. (2010). *Terramechanics and offroad vehicle engineering*: Elsevier, Oxford.
- Wisner, R. and H. Luth. (1973). Off-road traction prediction for wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics* 10: 49-61.
- Wulfsohn, D. and S. Upadhyaya and W. Chancellor. (1988). Tractive characteristics of radial ply and bias ply tyres in a California soil. *Journal of Terramechanics* 25: 111-134.