

مقاله علمی - پژوهشی

پیش‌بینی سطح تماس چرخ و خاک تحت اثر بار عمودی، میزان فشار باد تایر و سرعت پیشروی در محیط انباره خاک با استفاده از انفیس

محمد یوسفی^۱، سیدرضا موسوی سیدی^{۲*} و محمد عسکری^۳

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشیار؛ و استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۲۲

چکیده

برهمکنش چرخ و خاک بر میزان مصرف انرژی و ویژگی‌های خاک کشاورزی تأثیرگذار است. در این تحقیق، سطح تماس چرخ و خاک که یک پارامتر تعیین‌کننده در معادلات چرخ و خاک است با استفاده از آزمونگر چرخ در محیط انباره خاک اندازه‌گیری شد. آزمون‌ها در ۲ سطح مختلف از سرعت پیشروی (۰/۳۸۶ و ۰/۸۷۹ کیلومتر بر ساعت)، ۳ سطح مختلف از فشار باد تایر (۱۸، ۲۵ و ۳۲ پوند در اینچ مربع) و ۳ سطح مختلف از بار عمودی وارد بر چرخ (۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ کیلوگرم) در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در ۳ تکرار و مجموعاً ۵۴ پیمایش اجرا شد. برای تجزیه و تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار آماری Genstat استفاده شد. با بهره‌گیری از روش استنتاج فازی-عصبی (انفیس) و مدل رگرسیونی، سطح تماس چرخ و خاک پیش‌بینی شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد با افزایش بار عمودی روی چرخ، سطح تماس افزایش می‌یابد و با افزایش فشار باد تایر، سطح تماس کاهش خواهد یافت. سرعت پیشروی در سرعت پایین تأثیری بر سطح تماس ندارد. ضریب همبستگی در پیش‌بینی سطح تماس چرخ و خاک با مدل‌های انفیس (۰/۹۱۸۲) بسیار بیشتر از ضریب همبستگی در پیش‌بینی با مدل رگرسیونی (۰/۳۵۹) بود. این نتیجه به دست آمد که مدل‌های انفیس، نسبت به مدل رگرسیونی، دقت بالاتری دارند.

واژه‌های کلیدی

برهمکنش چرخ و خاک، روش استنتاج فازی-عصبی، مدل رگرسیونی، مصرف انرژی

مقدمه

کاهش چرخه مواد مغذی و مواد معدنی و فعالیت میکروارگانیسم‌ها می‌شود (Raper, 2005). به منظور خنثی‌سازی این اثرهای سوء و بهبود بخشیدن به روش‌های تقابل میان چرخ و خاک، لازم است تا آزمون‌های متعددی توسط متخصصان امر اجرا شود. اگر برهمکنش میان چرخ و خاک به درستی صورت پذیرد، فرورفتگی چرخ درون خاک کاهش و به تبع آن مقاومت غلته‌شی نیز کاهش می‌یابد. از فاکتورهای مهم این برهمکنش می‌توان به سطح تماس چرخ و

برهمکنش چرخ و خاک به دلیل اثرهایی که بر مصرف انرژی و ویژگی‌های خاک به ویژه در بخش کشاورزی دارد، بسیار مورد توجه محققان این بخش قرار گرفته است (Taghavifar et al., 2013). برهمکنش ناصحیح چرخ و خاک، موجب تغییراتی در مکانیک و ساختار فیزیکی خاک و فشردگی آن می‌شود که به کاهش تولید محصول در مزرعه و افزایش هزینه‌های تولید می‌انجامد و همچنین باعث

خاک در سه سطح سرعت و سه سطح لغزش و سه سطح بار چرخ را انجام داده و به این نتیجه رسیدند که میانگین مربعات خطای ریشه (۰/۱۳۸۲) و مقادیر ضریب تبیین (۰/۹۸۶۴) توسط شبکه عصبی موجک بهتر و مطلوب‌تر از شبکه عصبی انتشار مجدد است. مدل پیشنهادی این محققان دارای مهارت یادگیری بالایی بود و دقت پیش‌بینی را افزایش می‌داد. شفایی و همکاران (Shafaei *et al.*, 2019) در تحقیقی به شبیه‌سازی هوشمند لغزش چرخ عقب تراکتور پرداختند و برای این کار از روش داده کاوی شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج فازی-عصبی (ANFIS) به هنگام خاک‌ورزی با سه سرعت رو به جلو (۲، ۴ و ۶ کیلومتر بر ساعت) و عمق شخم (۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر) و در دو حالت رانندگی تراکتور شامل دوچرخ محرک و چهارچرخ محرک استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی ANFIS نشان داد که با زیاد شدن سرعت پیشروی و همزمان افزایش عمق شخم، لغزش چرخ در هر حالت رانندگی به صورت غیرخطی افزایش خواهد یافت. همچنین، شبیه‌سازی با ANFIS باعث گسترش دیدگاه علمی شده و شبیه‌سازی را در زمینه‌های فراهم کرده است که پیش‌تر بی‌پاسخ بود.

فرهادی و همکاران (Farhadi *et al.*, 2020) در مقاله‌ای به بررسی تاثیر متغیرهای بار عمودی، فشار باد و درصد رطوبت خاک بر مقاومت غلتشی چرخ با استفاده از آزمونگر چرخ در محیط انبارۀ خاک پرداختند. خاک مورد استفاده در این آزمایش بافت لومی-رسی داشت. این آزمایش در سه تکرار در طرح کاملا تصادفی با استفاده از آزمون فاکتوریل اجرا شد. برای پیش‌بینی نیز از شبکه عصبی چند لایه پیش‌خور دارای دو لایه پنهان و برای آموزش شبکه

خاک که تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند بار عمودی وارد بر تایر، نوع تایر و فشار باد تایر است، اشاره کرد. بررسی برهمکنش چرخ و خاک به دلیل پیچیدگی و متفاوت بودن متغیرهای حاکم بر رابطه ماشین و خاک و تغییرات غیرقابل کنترل جوی در مزارع تحقیقاتی دشوار است. بنابراین آزمون در شرایط کنترل شده انبارۀ خاک تا حدودی پیچیدگی‌های اجرایی را کاهش می‌دهد.

روش‌های پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی در تحقیقات علمی به سه دسته کلی معادله‌های ریاضی و رگرسیون به اضافه مدل‌های کامپیوتری و برنامه‌های شبیه‌سازی تقسیم می‌شوند. دسته سوم به دلیل پیشرفتی که داشته‌اند و نیز به علت اجرا نشدن عملیات وقت‌گیر و پرهزینه مزرعه‌ای، بسیار مورد توجه محققان بخش مکانیک خاک قرار گرفته و آنان توانسته‌اند مدل‌ها و پیش‌بینی‌های خوبی از برهمکنش چرخ و خاک داشته باشند. در میان روش‌های نوین مدل‌سازی، روش استنتاج فازی-عصبی (انفیس) جایگاهی ویژه دارد و به صورت دائمی برای بررسی انواع پدیده‌های بیولوژیک و غیربیولوژیک به کار می‌رود (Tao *et al.*, 2010).

تحقیقات متعددی در زمینه تقابل چرخ و خاک انجام شده که تعدادی از آنها به این شرح است: علی‌آبادی و همکاران (Aliabadi *et al.*, 2010) در تحقیقی سطح تماس چرخ با خاک را در محیط انبارۀ خاک با اعمال سه سطح مختلف از بار عمودی روی چرخ و در سه سطح مختلف از فشار باد تایر اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که سطح تماس با بار اعمال شده رابطه مستقیم و با فشار باد تایر رابطه معکوس دارد. تقوی‌فر و مردانی (Taghavifar & Mardani, 2014) فشار تماسی بین زمین و چرخ را اندازه گرفتند. ایشان آزمایش کنترل

هدف از تحقیق حاضر اندازه‌گیری سطح تماس بین چرخ و خاک در اثر متغیرهای مستقل بار عمودی وارد بر تایر، میزان فشار باد تایر و سرعت حرکت تایر در شرایط کنترل شده انبار خاک و پیش‌بینی آن با استفاده از روش استنتاج فازی-عصبی (انفیس) است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها با آزمونگر چرخ در محیط انبار خاک (۶ در ۱/۶ متر) در هانگار دانشکده مهندسی زراعی واقع در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شد. در ابتدا و انتهای مسیر، حامل چرخ با برخورد فیزیکی آرام به میکروسویچ‌های تعبیه شده، متوقف می‌شد. در شکل ۱ نمای کلی و اجزای تشکیل‌دهنده مجموعه انبار خاک و حامل چرخ نشان داده شده است.

نیز از تابع لئونبرگ - مارکوآرت و مدل رگرسیونی استفاده کردند. ضریب تبیین به دست آمده در مدل رگرسیونی ۰/۸۵۰ به دست آمد، اما ضریب تبیین به دست آمده در شبکه عصبی ۰/۹۷۷ بود، که نشان از برتری مدل شبکه عصبی نسبت به مدل رگرسیونی است. فرهادی و همکاران (Farhadi *et al.*, 2019) در تحقیقی دیگر فشار تماسی و مقاومت به نفوذ خاک را با اندازه‌گیری مساحت تماسی لاستیک و هدایت الکتریکی ظاهری خاک پیش‌بینی کردند. آزمون مورد نظر در سه سطح بار عمودی، سه سطح فشار باد و سه سطح رطوبتی دنبال شد. این محققان به این نتیجه رسیدند فشار تماسی متوسط با پارامترهای بار عمودی، فشار باد و رطوبت رابطه مستقیم دارد. مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی فشار تماسی با ضریب تبیین مناسب (۰/۹۴۶) به دست آمد.



شکل ۱- اجزای تشکیل‌دهنده انبار خاک

Fig. 1- Components of soil storage

استفاده شد. قدرت با واسطه پولی و تسمه از الکتروموتور به جعبه دنده منتقل می‌شد در نتیجه با جابه‌جایی پولی‌های جعبه دنده و الکتروموتور که اندازه‌های متفاوتی داشتند (شکل ۲)، سرعت پیشروی حامل و در نتیجه چرخ آزمونگر در دو حالت قابل تغییر بود.

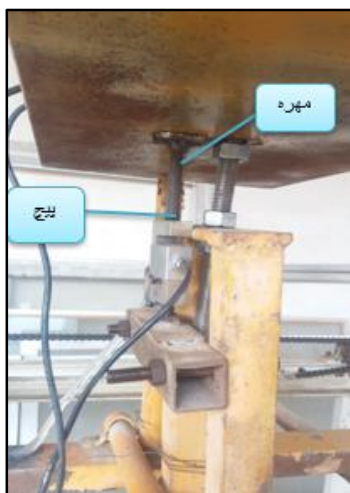
به منظور راه‌اندازی انباره خاک و تأمین توان مورد نیاز حامل از یک الکتروموتور صنعتی سه فاز با قدرت ۴ اسب بخار و سرعت دورانی ۱۴۳۰ دور بر دقیقه استفاده شد. همچنین، از یک جعبه دنده حلزونی سری VF110 برای کاهش سرعت دورانی موتور الکتریکی در مسیر انتقال قدرت به حامل



شکل ۲- پولی‌های جعبه دنده و موتور الکتریکی
Fig. 2- Gearbox and electric motor pulleys

خاک موجود در انباره و اعمال نیروی عمودی و فشار باد تایر مورد نظر، با زدن کلید شروع روی جعبه کنترل، چرخ متصل به حامل (شاسی متحرک) در طول انباره خاک حرکت کرده در انتهای مسیر متوقف می‌شد. برای اندازه‌گیری سطح تماس چرخ و خاک به دو عامل طول و عرض برخورد تایر با خاک نیاز بود. طول تماس، به صورت پیش‌فرض، عدد ثابت ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و عرض آن، با هر بار عبور چرخ، با خط‌کش اندازه‌گیری می‌شد (شکل ۶).

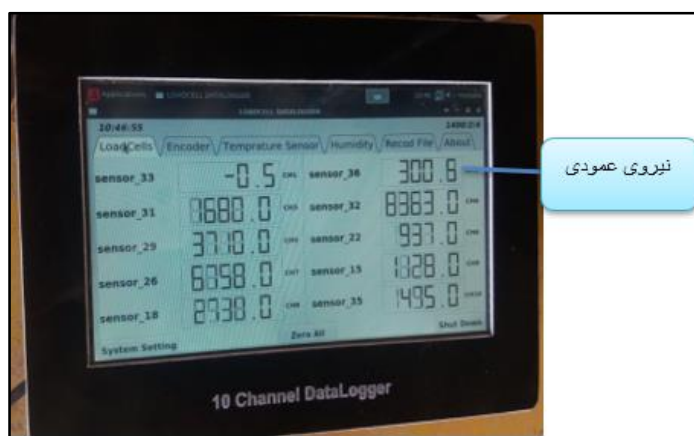
آزمون‌ها در ۲ سرعت پیشروی چرخ (۰/۳۸۶ و ۰/۸۷۹ کیلومتر بر ساعت)، ۳ سطح مختلف از فشار باد تایر (۱۸، ۲۵ و ۳۲ پوند در هر اینچ مربع)، ۳ سطح مختلف از بار عمودی وارد بر چرخ (۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ کیلوگرم)، ۳ تکرار و مجموعاً ۵۴ پیمایش اجرا شد. سطوح مختلف بار عمودی وارد بر چرخ به کمک یک لودسل ۵۰۰ کیلوگرمی و از طریق پیچ قدرت بر چرخ اعمال می‌شد (شکل‌های ۳ و ۴).
باد با پمپ باد به تایر تزریق و میزان آن با مانومتر اندازه‌گیری شد. پس از آماده‌سازی بستر



شکل ۴- اعمال بار عمودی به کمک پیچ قدرت
 Fig. 3- Imposed vertical force using power knob



شکل ۳- لودسل ۵۰۰ کیلوگرمی
 Fig. 3- 500 kg loadcell



شکل ۵- نمایش بار عمودی (۳۰۰ کیلوگرم) تنظیم شده با استفاده از دیتالاگر
 Fig. 5- Indicating the adjusted vertical load (300 kg) using Data Logger



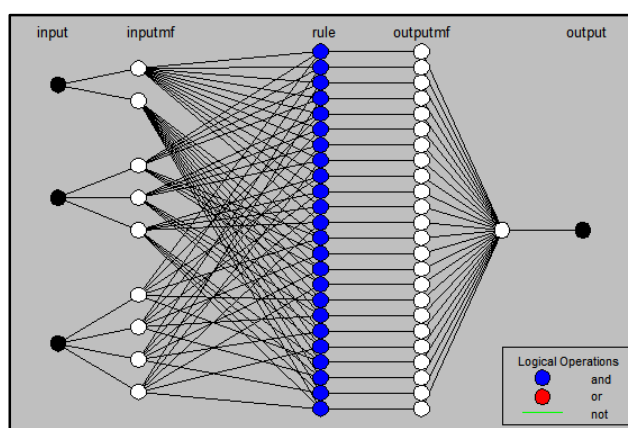
شکل ۶- اندازه‌گیری عرض تماس چرخ با خاک
 Fig. 6- Measuring the width of soil-wheel contact area

انفیس در بستر نرم‌افزار متلب (MATLAB) بهترین انتخاب برای تحلیل آنها خواهد بود (Pentos & Pieczarka, 2017). توابع عضویت^۱ در فرآیند آموزش سیستم انفیس تغییر می‌یابند و به واسطه یک بردار گرادیان تطبیق می‌شوند. بردار گرادیان مقیاسی برای ارزیابی عملکرد مدل انفیس است. شماتیکی از مدل انفیس با سه متغیر مستقل دارای سطوح متفاوت در ورودی و یک متغیر وابسته در خروجی در شکل ۸ ارائه شده است.

این تحقیق با آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار با ۵۴ تیمار اجرا شد. برای تجزیه و تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار آماری Genstat و برای رسم نمودارها از نرم افزار اکسل (Excel) استفاده شد.

سیستم استنتاج فازی-عصبی (انفیس)

اگر داده‌های ورودی مبهم یا دارای عدم قطعیت باشند، ترکیب یک سیستم عصبی- فازی مانند



شکل ۸- ساختار سیستم استنتاج عصبی فازی (انفیس)

Fig. 8- Fuzzy Neural Inference System (ANFIS)

از دو عامل میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب همبستگی (R^2) برای ارزیابی سیستم‌های انفیس استفاده شد که در روابط ۱ و ۲ ارائه شده‌اند:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{pr} - Y_{ac})^2 \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{pr} - Y_{ac})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{pr} - Y_{me})^2} \quad (2)$$

که در آنها،

Y_{pr} ، Y_{ac} و Y_{me} به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری

در این تحقیق در مجموع ۵۴ داده در دسترس برای متغیرهای مستقل در ورودی (بار عمودی، فشار باد تایر و سرعت پیشروی) و یک متغیر در خروجی (سطح تماس چرخ و خاک) وجود داشت. تعداد زیادی از مدل‌های انفیس با توابع عضویت متفاوت ($Pimf$ ، $Trimf$ ، $dsigmf$ و ...) به منظور یافتن بهترین مدل انفیس برای پیش‌بینی خروجی مذکور بررسی شدند. داده‌های در دسترس به دو مجموعه داده ۴۴ تایی و ۱۰ تایی تقسیم شدند. مجموعه اول برای آموزش شبکه و مجموعه دوم برای آزمون مدل خروجی استفاده شد. آزمون مدل خروجی به منظور همپوشانی نشدن خروجی‌ها اعمال گردید.

شده، پیش‌بینی شده و میانگین مدل‌های توسعه یافته. سطح تماس چرخ و خاک معنی‌دار است که با نتایج تحقیقات سایر محققان همخوانی دارد (Diserens, 2009; Sharifi Malvajerdi *et al.*, 2011; Diserens *et al.*, 2013). تنها مورد استثنا اثر سه‌گانه سرعت پیشروی، فشار باد تایر و بار عمودی است که بر سطح تماس چرخ و خاک معنی‌دار نیست.

شده، پیش‌بینی شده و میانگین مدل‌های توسعه یافته.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس اثر تغییر متغیرهای تحت بررسی بر سطح تماس چرخ و خاک در جدول ۱ ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد اثر تغییر متغیرها بر

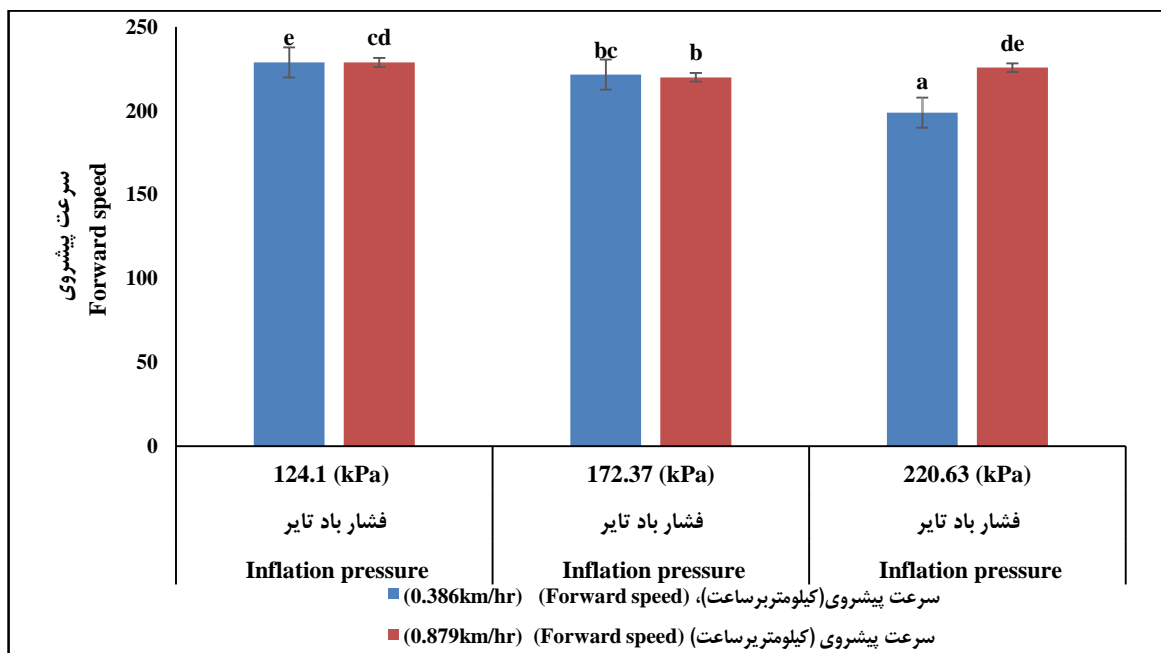
جدول ۱- تجزیه واریانس اثر متغیرهای تحت بررسی بر سطح تماس چرخ و خاک

Table 1- ANOVA of the effect of studied variables on the soil-wheel contact area

میانگین مربعات	درجه آزادی (df)	منابع تغییر
640.67**	1	سرعت پیشروی
920.89**	2	فشار باد تایر
141.56**	2	بار عمودی
1360.89**	2	سرعت پیشروی × فشار باد تایر
84.67*	2	سرعت پیشروی × بار عمودی
207.78**	4	فشار باد تایر × بار عمودی
38.89 ^{ns}	4	سرعت پیشروی × فشار باد تایر × بار عمودی
16.44	36	خطا
	53	کل

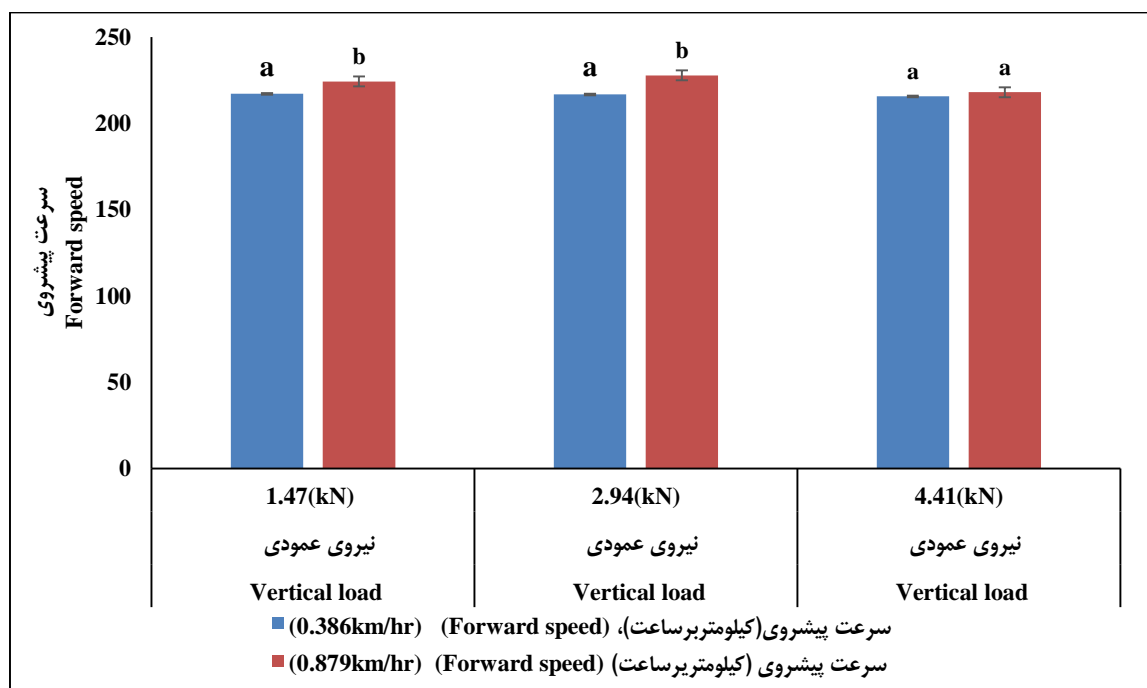
** معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد، * معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، ns نبود معنی‌دار

** : Statistically Significant (P<0.01), * : Statistically Significant (P<0.05), ns: Not Significant



شکل ۹- اثر متقابل سرعت پیشروی و فشار باد تایر بر سطح تماس چرخ و خاک

Fig. 9- The interaction effect of forward speed and inflation pressure on the soil-wheel contact area



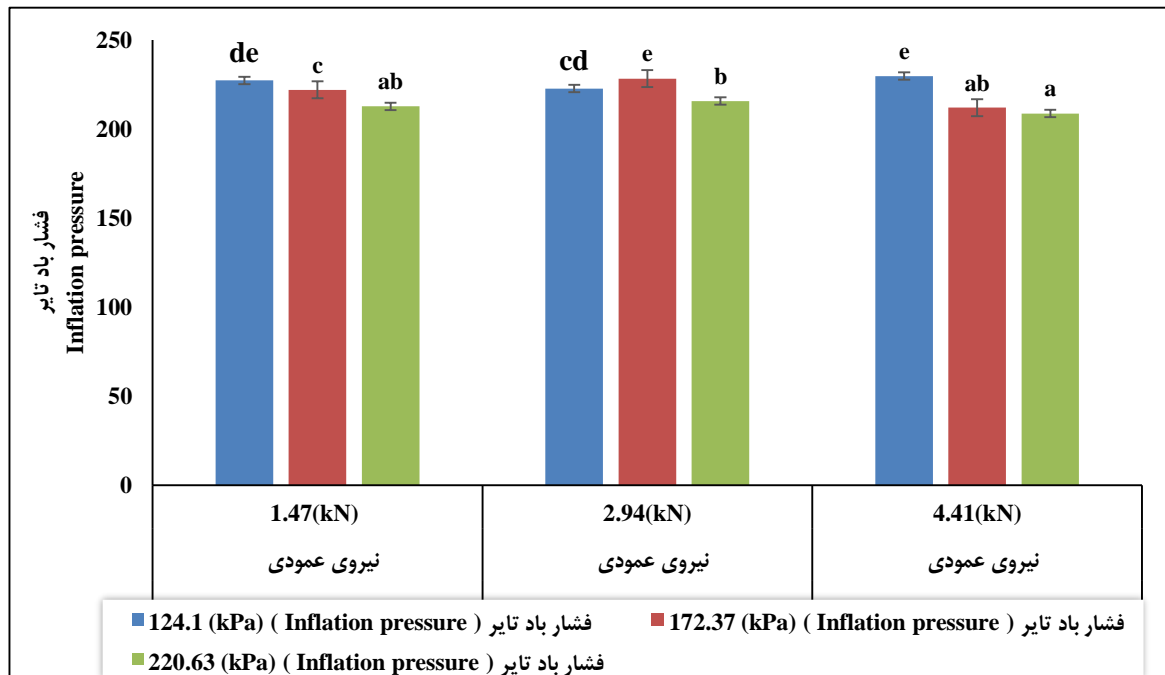
شکل ۱۰- اثر متقابل سرعت پیشروی و نیروی عمودی بر سطح تماس چرخ آزمونگر با خاک

Fig. 10- The interaction effect of forward speed and vertical force on the soil-wheel contact area

در شکل ۱۰ دیده می‌شود سرعت پیشروی، به خصوص در ۰/۳۸۶ کیلومتر بر ساعت، تأثیری بر سطح تماس چرخ و خاک ندارد اما افزایش نیروی عمودی در این سرعت موجب افزایش نامحسوس سطح تماس شده است. همچنین، سطح تماس در سرعت ۰/۸۷۹ کیلومتر بر ساعت، به استثنای بار عمودی ۴۵۰ کیلوگرم، با افزایش بار عمودی افزایش یافته است. در نتیجه می‌توان گفت که افزایش بار عمودی بر چرخ موجب تماس بیشتر چرخ با خاک و در نتیجه باعث افزایش سطح تماس چرخ با خاک می‌شود که با نتایج تحقیقات سایر محققان مطابقت دارد (Aliabadi et al., 2010, Taghavifar et al., 2013).

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که در فشارهای باد مختلف با افزایش بار عمودی روی چرخ، سطح تماس چرخ و خاک افزایش می‌یابد و در بارهای عمودی مختلف با افزایش فشار باد تایر، سطح تماس چرخ آزمونگر با خاک کاهش پیدا می‌کند و بیشترین رشد اندازه سطح تماس تحت افزایش بار عمودی، در فشار باد پایین دیده می‌شود. نتیجه به دست آمده با نتیجه تحقیق خرمی‌فر (Khoramifar, 2015) مطابقت دارد. اثر سه‌گانه متغیرهای تحت بررسی بر سطح تماس چرخ و خاک نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

شکل ۱۰ دیده می‌شود سرعت پیشروی، به خصوص در ۰/۳۸۶ کیلومتر بر ساعت، تأثیری بر سطح تماس چرخ و خاک ندارد اما افزایش نیروی عمودی در این سرعت موجب افزایش نامحسوس سطح تماس شده است. همچنین، سطح تماس در سرعت ۰/۸۷۹ کیلومتر بر ساعت، به استثنای بار عمودی ۴۵۰ کیلوگرم، با افزایش بار عمودی افزایش یافته است. در نتیجه می‌توان گفت که افزایش بار عمودی بر چرخ موجب تماس بیشتر چرخ با خاک و در نتیجه باعث افزایش سطح تماس چرخ با خاک می‌شود که با نتایج تحقیقات سایر محققان مطابقت دارد.



شکل ۱۱- اثر متقابل فشار باد تایر و نیروی عمودی بر سطح تماس چرخ آزمونگر با خاک

Fig. 11- The interaction of inflation pressure and vertical load on the soil-wheel contact area

جدول ۲- اثر متقابل سه‌گانه متغیرها بر سطح تماس چرخ و خاک

Table 2- Triple interaction of effective variables on the soil-wheel contact area

سطح تماس چرخ و خاک (سانتی‌متر مربع)	نیروی عمودی (کیلوگرم)	فشار باد تایر (پوند در هر اینچ مربع)	سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت)
231.3 ^{ghi}	150		
223.3 ^{cdef}	300	18	
232 ^{hi}	450		
220 ^{cde}	150		0.386
228.7 ^{fghi}	300	25	
216 ^c	450		
200 ^a	150		0.879
198 ^a	300	32	
198.7 ^a	450		
223.3 ^{cdef}	150		0.879
222 ^{cdef}	300	18	
227.3 ^{efghi}	450		
224 ^{defg}	150		0.879
228 ^{fghi}	300	25	
208 ^b	450		
225.3 ^{defgh}	150		0.879
233.3 ⁱ	300	32	
218.7 ^{cd}	450		

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف لاتین متفاوت، در سطح احتمال ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار دارند.

Means in each column with different letters are significantly at 5% level.

تماس چرخ و خاک با روش گام به گام توسعه داده شد. این مدل به همراه ضریب تبیین و میانگین مطلق خطای مربوط در جدول ۳ ارائه شده است.

مدل پیش‌بینی رگرسیون چند متغیره مدل رگرسیونی چندمتغیره شامل پارامترهای تحت بررسی (بار عمودی، فشار باد تایر و سرعت پیشروی) به منظور پیش‌بینی سطح

جدول ۳- مدل پیش‌بینی رگرسیونی برای سطح تماس چرخ و خاک

Table 3- Regression predicting model for contact area between soil and wheel

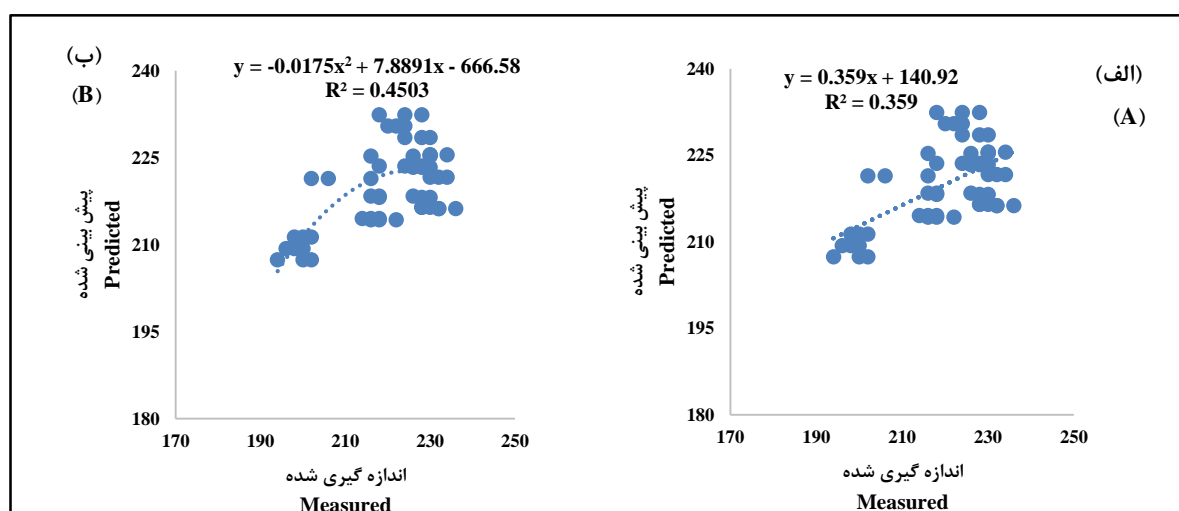
مدل	ضریب تبیین خطی	میانگین مطلق خطا
$240.336 + 13.973 FS - 1.013 W - 1.016 P$	0.359	0.0931

FS- سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت)، W- بار عمودی (کیلوگرم)، P- فشار باد تایر (Psi)

FS- forward speed (Km/hr), W- Vertical load (Kg), P-inflation pressure FS-forward speed and P- inflation pressure (Psi)

ارائه شده، سطح تماس چرخ و خاک را با دقت پایین ($R^2 < 0.36$) تحت ترندلاین خط پیش‌بینی می‌کند (شکل ۱۲، الف). بیشترین ضریب همبستگی برای این مدل در ترندلاین چندجمله‌ای 0.4503 به دست آمده است (شکل ۱۲، ب).

اعتبارسنجی معادله رگرسیونی داده‌های سطح تماس چرخ و خاک حاصل از پیش‌بینی توسط معادله رگرسیونی، در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده در انبار خاک رسم شده در شکل ۱۲ ارزیابی شدند. این شکل نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی



شکل ۱۲- همبستگی داده‌های پیش‌بینی شده توسط رگرسیون و داده‌های اندازه‌گیری شده در ترندلاین‌های

الف) خطی و ب) چندجمله‌ای

Fig. 12- The correlation between measured and predicted data using regression in A) linear and B) polynomial trends.

نتایج بخش انفیس

عضویت در ورودی بهترین نتیجه را با کمترین مربعات خطا و بیشترین ضریب همبستگی به دست می‌دهد.

جدول ۴ نشان می‌دهد که در خروجی مورد نظر (سطح تماس چرخ و خاک)، کدام تابع

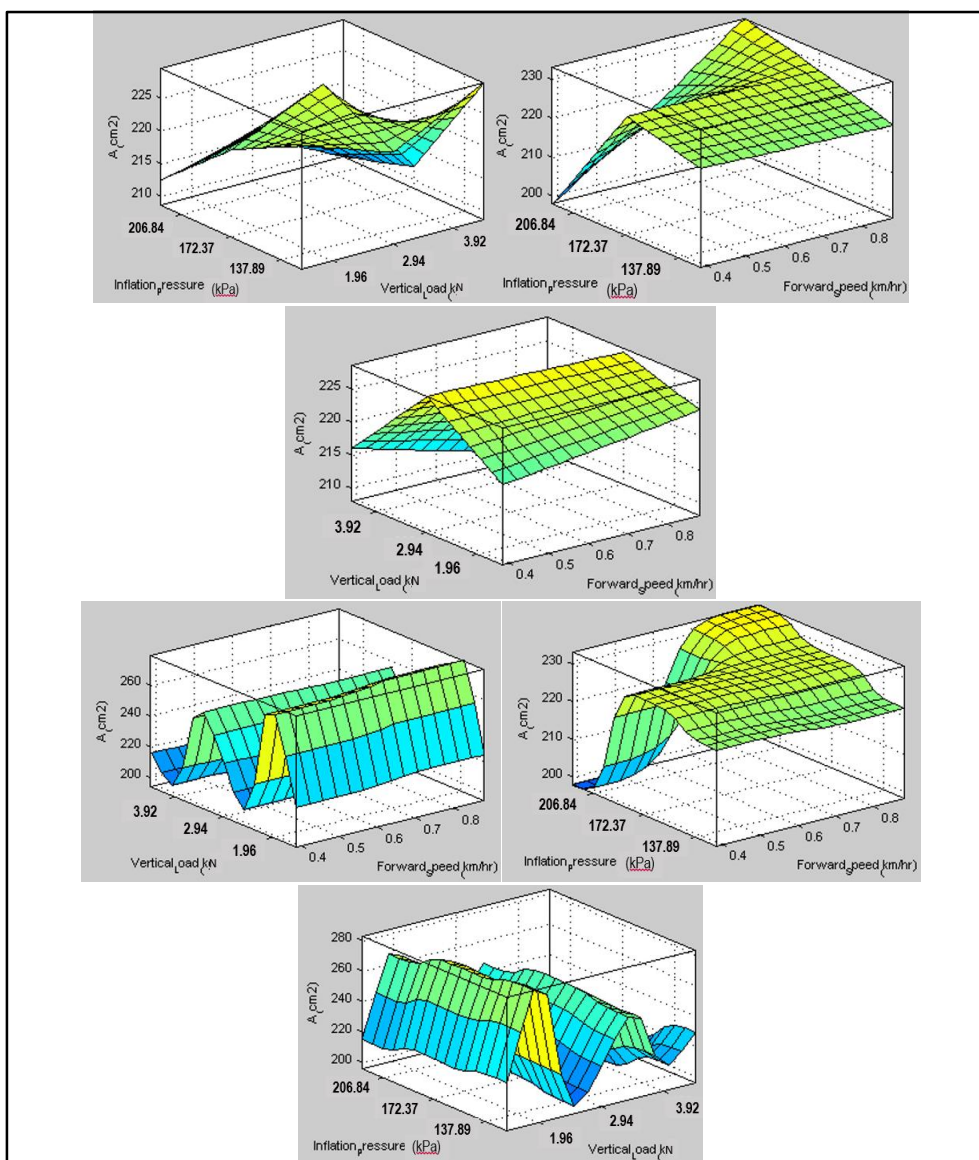
جدول ۴- مدل‌های مختلف انفیس در مورد سطح تماس چرخ و خاک

Table 4- Different ANFIS models about contact area between soil and wheel

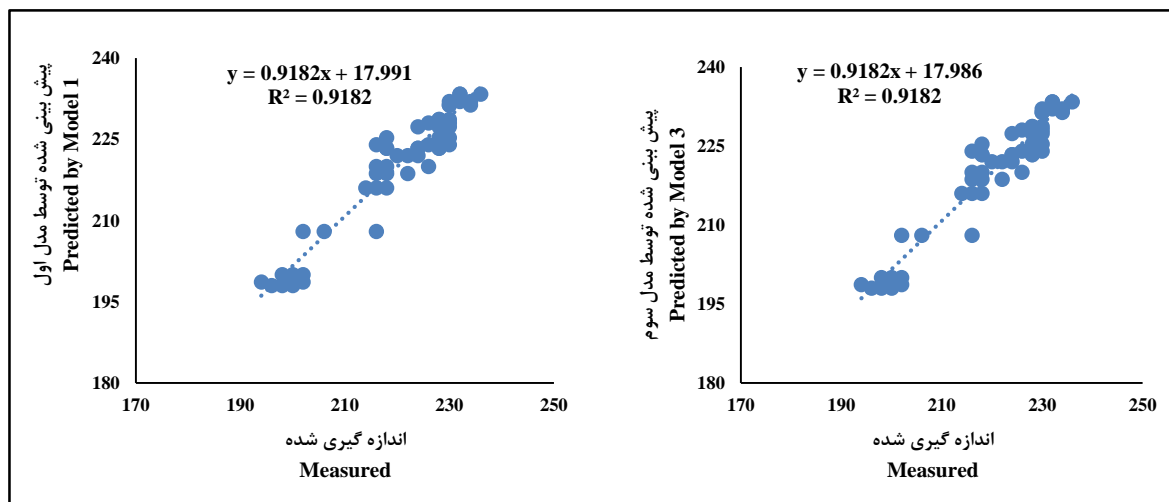
مدل	نوع تابع عضویت		تعداد توابع عضویت		ضریب همبستگی (R ²)
	ورودی	خروجی	ورودی	تکرار	
1	Trimf	Linear	2,3,3	30	0.9182
2	Gaussmf	Linear	2,3,3	30	0.9088
3	Pimf	Hybrid	2,3,3	30	0.9182
4	dsigmf	Hybrid	2,3,3	30	0.8912
5	Tramf	Linear	2,3,3	30	0.8838

داده‌برداری نشده است. با مقایسه سطح تماس به دست آمده از آزمون‌ها و داده‌های پیش‌بینی شده با مدل‌های انفیس (شکل ۱۴) همچنین داده‌های جدول ۴ مشخص شد که این دو دسته داده ضرایب همبستگی بالایی دارند ($R^2 > 0.91$). بالا بودن ضرایب همبستگی نشان می‌دهد که مدل‌های انفیس توانسته‌اند با دقت بسیار بالا با استفاده از ورودی‌های اندازه‌گیری شده در انبار خاک شامل بار عمودی وارد بر تایر، فشار باد تایر و سرعت پیشروی، سطح تماس چرخ و خاک را پیش‌بینی کنند.

همان‌گونه که در جدول ۴ دیده می‌شود، مدل‌های ۱ و ۳ دارای ضریب همبستگی برابرند اما مدل ۱ میانگین مربعات خطای کمتری دارد. تغییرات سطح تماس چرخ و خاک تحت تأثیر نیروی عمودی وارد بر تایر، فشار باد تایر و سرعت پیشروی حاصل از دو مدل بهینه انفیس در شکل ۱۳ نشان داده شده است. سه سطح نشان داده شده در قسمت بالایی شکل ۱۳ مربوط به مدل اول و سه سطح نشان داده شده در پایین این شکل مربوط به مدل سوم است. با استفاده از سطوح این شکل‌ها، می‌توان خروجی مدل را برای ورودی خاص محاسبه کرد که



شکل ۱۳- تغییرات سطح تماس چرخ و خاک با توجه به تغییرات فشار باد تایر، بار عمودی وارد بر تایر و سرعت پیشروی در مدل‌های ۱ و ۳ پیش‌بینی انفیس (A = سطح تماس، Inflation Pressure= فشار باد تایر (کیلوپاسکال)، Vertical Load= بار عمودی وارد بر تایر (کیلو نیوتن) و Forward Speed= سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت))



شکل ۱۴- همبستگی میان داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده توسط مدل‌های اول و سوم انفیس
 Fig. 14- The correlation between measured and predicted data using ANFIS 1 and 3 models

نتیجه‌گیری

- سرعت پیش‌روی، به خصوص در سرعت ۰/۳۸۶ کیلومتر بر ساعت، تأثیری بر سطح تماس چرخ و خاک ندارد اما افزایش نیروی عمودی در این سرعت موجب افزایش نامحسوس سطح تماس می‌شود. سطح تماس در سرعت ۰/۸۷۹ کیلومتر بر ساعت به استثنای بار عمودی ۴۵۰ کیلوگرم، با افزایش بار عمودی افزایش می‌یابد.

- مدل رگرسیونی چندگانه به منظور پیش‌بینی سطح تماس چرخ و خاک ارائه و مشخص شد که این مدل نمی‌تواند پارامتر تحت بررسی را با دقت بالا ($R^2 < 0.36$) پیش‌بینی کند.

- در بخش انفیس، مدل‌های ۱ و ۳ با توابع عضویت Trimf و Pimf به ترتیب با میانگین مربع خطای ۰/۰۲۳۱ و ۰/۰۲۴۵ و ضریب همبستگی یکسان ۰/۹۱۸۲ با اولویت مدل ۱، بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی هستند.

- با استفاده از سطوح شکل‌های خروجی در مدل‌های انفیس می‌توان خروجی مدل را برای یک ورودی خاص (غیر از ورودی‌های اندازه‌گیری شده) محاسبه کرد.

در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت با استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی (انفیس) می‌توان سطح تماس بین چرخ و خاک را در اثر متغیرهای مستقل بار عمودی وارد بر تایر، میزان فشار باد تایر و سرعت حرکت تایر در شرایط کنترل شده انباره خاک با دقت بسیار مناسبی اندازه‌گیری و پیش‌بینی کرد. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر بیانگر نکات مهم زیر است:

- بار عمودی وارده، میزان فشار باد تایر و سرعت پیش‌روی به همراه اثرهای دوگانه آنها بر سطح تماس چرخ و خاک بسیار معنی‌دار ($p < 0.01$) هستند. اما اثر سه‌گانه پارامترهای مذکور بر سطح تماس چرخ و خاک بی‌معنی است.

- در فشارهای باد مختلف با افزایش بار عمودی روی چرخ، سطح تماس چرخ و خاک افزایش می‌یابد و در بارهای عمودی مختلف با افزایش فشار باد تایر، سطح تماس چرخ آزمونگر با خاک کاهش خواهد یافت. بیشترین رشد اندازه سطح تماس تحت افزایش بار عمودی، در فشار باد پایین دیده می‌شود.

- ضریب همبستگی (R^2) در پیش‌بینی توسط مدل رگرسیونی به میزان ۰/۳۵۹ و بسیار کمتر از ضریب همبستگی در پیش‌بینی توسط مدل‌های انفیس به میزان ۰/۹۱۸۲ است. این امر نشان می‌دهد مدل‌های انفیس، نسبت به مدل رگرسیونی، می‌توانند پارامتر خروجی (متغیر وابسته؛ در این تحقیق سطح تماس چرخ و خاک) را با دقت بسیار بالاتری پیش‌بینی کنند.

بنابراین می‌توان این نتایج را در زمین‌های زراعی با دقت قابل قبول برای کشش مناسب تراکتورهایی با وزن‌های مشابه و خاک‌های متناسب به منظور افزایش راندمان کششی مطلوب‌تر به کار گرفت.

قدردانی

این مطالعه در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شده است. از پرسنل دانشکده مهندسی زراعی به ویژه آقای دکتر رمضان هادی‌پور کارشناس گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم برای همکاری ایشان در اجرای عملیات داده‌برداری قدردانی می‌شود.

مراجع

- Aliabadi, H., Roshan, B., Mirza Hosseini, M., & Mardani, A. (2010). *Measurement of the contact surface of the soil wheel in the meadow environment between under and different wind pressures. Proceedings of the Sixth National Congress of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization*. Sep. 15. University of Tehran, Tehran, Iran. (in Persian)
- Diserens, E. (2009). Calculating the contact area of trailer tires in the field. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 302-309.
- Diserens, E., Defosse, P., Dubois, A., & Alaoui, A. (2011). Prediction of the contact area of agricultural traction tyres on firm soil. *Biosystems Engineering*, 110, 73-82.
- Farhadi, P., Golmohammadi, A., Sharifi Malvajardi, A., & Shahgholi, G. (2019). Predicting contact pressure and soil penetration resistance by measuring rubber contact area and apparent electrical conductivity of soil. *Agricultural Systems Research and Mechanization*, 72, 19-36. (in Persian)
- Farhadi, P., Golmohammadi, A., Sharifi Malvajardi, A., & Shahgholi, G. (2020). Prediction of tire rolling resistance using regression model and artificial neural network. *Agricultural Systems Research and Mechanization*, 74, 1-16. (in Persian)
- Gheshlaghi, F., & Mardani, A. (2016). Prediction of wheel rolling resistance regarding important motion parameters using the artificial neural network. *Journal of Agricultural Machinery*, 1, 259-270. (in Persian)
- Khoramifard, A. (2015). Investigating the relationship between moving wheel pressure and tire pressure using a single wheel tester in soil storage (*M. Sc. Thesis*), Jiroft University, Jiroft, Iran. (in Persian)
- Pentos, K., & Pieczarka, K. (2017). Applying an artificial neural network approach to the analysis of tractive properties in changing soil conditions. *Soil & Tillage Research*, 165, 113-120.
- Raper, R. L. (2005). Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics*, 42(3-4), 259-280.

- Shafaei, S. M., Loghavi, M., & Kamgar, S. (2019). Feasibility of implementation of intelligent simulation configurations based on data mining methodologies for prediction of tractor wheel slip. *Information Processing in Agriculture*, 6, 183-199.
- Sharifi Malvajerdi, A., Younesi Alamouti, M., & Mohseni Manesh, A. (2013). Effect of load and air pressure of hard meat rubber on some factors related to soil compaction measured in soil reservoir. *Journal of Agricultural Machinery*, 1(3), 1-8. (in Persian)
- Taghavifar, H., & Mardani, A. (2014). Wavelet neural network applied for prognostication of contact pressure between soil and driving wheel. *Information Processing in Agriculture*, 1, 51-56.
- Taghavifar, H., Mardani, A., Karim-Maslak, H., & Kalbkhani, H. (2013). Artificial neural network estimation of wheel rolling resistance in clay loam soil. *Applied Soft Computing*, 13(8), 3544-3551.
- Tao, C. W., Taur, J., Chang, J. H., & Su, S. F. (2010). Adaptive fuzzy switched swing-up and sliding control for the double- pendulum- and-cart system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 40(1), 241-252.

Research Paper

Predicting the Soil-Wheel Contact Area under the Effect of Vertical Load, Tire Inflation Pressure and Forward Speed at Soil Bin using ANFIS

M. Yousefi, S. R. Mousavi Seyedi* and M. Askari

*Corresponding Author: Associate Professor, Department of Mechanics of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: mousavi22@yahoo.com

Received: 30 November 2021, Accepted: 12 June 2022

[http://doi: 10.22092/AMSR.2022.356908.1404](http://doi:10.22092/AMSR.2022.356908.1404)

Abstract

Soil-wheel interaction is very attractive topic for agricultural researchers for its effect on the energy consumption and soil properties especially in agriculture. The purpose of this research is measuring soil-wheel contact area under the effect of independent variables of vertical load on the tire, tire inflation pressure and tire forward speed at controlled condition of soil bin also its prediction using adaptive neuro-fuzzy inference system. The tests were accomplished at two forward speeds (0.386 and 0.879 km/h), three inflation pressures (18, 25 and 32 psi), three vertical loads (150, 300 and 450 kg) plus 3 replications and totally 54 passes. All data analysis was done using Genstat software. Results showed that increase of vertical load on the wheel caused to increase of soil-wheel contact area and increment of inflation pressure caused to decrease of it. Low forward speed had not effect on the soil-wheel contact area. Furthermore, correlation coefficient (R^2) of ANFIS models (0.9182) was very more than regression one (0.359). Thus, ANFIS models could predict the soil-wheel contact area with high accuracy using measured input variables included vertical load, tire inflation pressure and forward speed at soil bin.

Keywords: Energy Consumption, Model of Neural-Adaptive Fuzzy Inference System, Regression Model, Soil-Wheel Interaction



© 2022 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)