

پیش‌بینی مقاومت غلتشی لاستیک با استفاده از مدل رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

پیام فرهادی^۱، عبدالله گل محمدی^{۲*}، احمد شریفی مالواجردی^۳ و غلامحسین شاهقلی^۴

۱، ۲ و ۴- به ترتیب: دانشجوی دکتری مهندسی بیوسیستم؛ و دانشیاران گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۳- دانشیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۷

چکیده

در این تحقیق از یک آزمونگر تک چرخ به منظور بررسی تأثیر متغیرهای بار عمودی، فشار باد و درصد رطوبت خاک بر پارامتر مقاومت غلتشی لاستیک در انباره خاک استفاده شد. لاستیک مورد استفاده ۲۸-۱۲/۴ و خاک مورد آزمون دارای بافت لومی-رسی بود. آزمایش‌ها به صورت آزمون فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار برای هر آزمون اجرا شد. ضریب تبیین مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی مقاومت غلتشی لاستیک با استفاده از متغیرهای بار عمودی، فشار باد و درصد رطوبت خاک برابر با $R^2=0/۸۵۰$ به دست آمد. از یک شبکه عصبی مصنوعی چند لایه پیش‌خور با الگوریتم توزیع معکوس و تابع آموزشی لونیگ-مارکوآرت برای آموزش شبکه و از دو لایه پنهان در معماری شبکه عصبی مصنوعی استفاده گردید. از دو معیار ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و مربع ضریب همبستگی (R^2) برای ارزیابی نتایج به دست آمده استفاده شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با توجه به متغیرهای مورد آزمون، فشار باد لاستیک، پارامتر کنترل‌کننده مقاومت غلتشی لاستیک در سطوح رطوبتی پایین است؛ و درصد رطوبت خاک، تأثیرگذارترین پارامتر بر مقاومت غلتشی لاستیک در مدل رگرسیونی است. ضریب تبیین به دست آمده با استفاده از شبکه عصبی $R^2=0/۹۷۷$ برتری استفاده از این مدل را نسبت به مدل رگرسیونی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

آزمون فاکتوریل، آزمونگر تک‌چرخ، انباره خاک، برهمکنش لاستیک-خاک

مقدمه

متقابل لاستیک و سطح جاده بر یکدیگر تحقیقات زیادی شده است. از جمله تأثیرات متقابل (برهمکنش‌های) لاستیک و سطح جاده می‌توان به مقاومت غلتشی، هدر رفت انرژی و لغزش اشاره کرد. بررسی برهمکنش لاستیک و خاک در زمین‌های کشاورزی از این جهت با اهمیت است که خاک دارای بافتی تغییرشکل‌پذیر است. دانستن اینکه بازده لاستیک‌های بادی در سطوح بتنی حدود ۹۰

لاستیک هر وسیله نقلیه باید اهداف گوناگون از جمله تحمل وزن خودرو، چسبندگی با سطح جاده، ایجاد کشش مناسب و کنترل، فرمانگیری و پایداری مناسب را فراهم کند (Wong, 2001). لاستیک‌های بادی توانایی مناسبی در برآورده کردن این نیازها دارند و از این‌رو به صورتی گسترده از آنها استفاده می‌شود. به همین دلیل و به منظور بررسی اثر

سرعت و سه عبور لاستیک با سه تکرار در خاک لومی-رسی بررسی کرده‌اند. آنها آزمون‌ها را با استفاده از یک آزمونگر لاستیک در شرایط کنترل شده انبساط خاک^۱ دنبال کردند. نتایج حاصل از پژوهش این محققان نشان می‌دهد که فرورفتگی خاک رابطه‌ای مستقیم با تعداد عبور دارد به طوری که افزایش تعداد عبور لاستیک و همچنین کاهش سرعت پیشروی لاستیک موجب افزایش فرورفتگی می‌شود و بار عمودی بیشتر، به فرورفتگی بیشتر خاک می‌انجامد.

در تحقیقات زیادی نرم‌افزارهای المان محدود^۲ (FEM) که مبتنی بر آنالیزهای تئوری هستند، برای پیش‌بینی برهمکنش لاستیک و خاک به کار گرفته شده‌اند. در بعضی از تحقیقات، تنها از مدل‌های المان محدود برای آنالیز این برهمکنش استفاده شده است (González Cueto *et al.*, 2013; 2016) و در تعدادی دیگر نیز ترکیبی از مدل المان محدود برای مدل‌سازی لاستیک و همچنین خاک در عمق پایین و مدل المان گسسته^۳ (DEM) برای مدل‌سازی خاک سطحی استفاده شده است (Nakashima & Oida, 2004; Michael *et al.*, 2015). تعدادی از محققان برهمکنش لاستیک با خاک و تأثیر آن بر مقاومت غلتشی را به عنوان نیرویی بررسی کرده‌اند که موجب هدررفت انرژی می‌شود. تقوی‌فر و مردانی (Taghavifar & Mardani, 2013) تأثیر سرعت، فشار باد و بار عمودی را بر مقاومت غلتشی لاستیک در خاک لومی-رسی در انبساط خاک بررسی کرده و نشان داده‌اند که مقاومت غلتشی کمترین تأثیر را از سرعت حرکت و بیشترین تأثیر را از فشار باد لاستیک و بار عمودی روی لاستیک می‌گیرد، به طوری که افزایش بار عمودی موجب افزایش

درصد و در زمین‌های کشاورزی حدود ۵۰ درصد است، لزوم توجه به صرفه‌جویی در مصرف سوخت و بهینه کردن آن با استفاده از بررسی چگونگی تغییرات، این برهمکنش را نمایان می‌سازد (Gill & Vander-Berg, 1968; Wulfsohn *et al.*, 1988; Döll, 1999). مقاومت غلتشی به نیرویی اطلاق می‌شود که از سطح جاده به لاستیک در حال دوران وارد می‌شود. دلیل اصلی ایجاد مقاومت غلتشی را می‌توان تغییر شکل لاستیک و سطح جاده دانست. پارامترهایی متنوع که مقاومت غلتشی را تحت تأثیر قرار می‌دهند عبارت‌اند از: باد لاستیک؛ بار روی لاستیک؛ قطر، پهنا و ساختار لاستیک؛ شکل آج؛ سرعت حرکت؛ چسبندگی لاستیک؛ و لغزش بین لاستیک و سطح تماس (Wong, 2001). می‌توان بازده کششی را مهم‌ترین پارامتر در ارزیابی تراکتور دانست و عوامل مؤثر بر بازده کششی و میزان سوخت مصرفی را این‌گونه برشمرد: مقاومت غلتشی، فشار باد لاستیک، اندازه لاستیک محرک و شرایط فیزیکی و مکانیکی خاک (Hauck *et al.*, 1984) که می‌توان با مدیریت و تلاش در جهت بهینه‌سازی مصرف سوخت از طریق بهبود بازده کشش و کاهش مقاومت غلتشی تا حدودی به این هدف رسید. هدررفت سالانه تقریباً ۵۷۵ میلیون لیتر سوخت در صنعت کشاورزی آمریکا، به دلیل استفاده نادرست از لاستیک کشاورزی را می‌توان نمونه بارز این موضوع دانست (Wulfsohn *et al.*, 1988).

در سال‌های اخیر، تحقیقاتی متنوع در زمینه رابطه لاستیک با خاک و بررسی تأثیرات این رابطه انجام گرفته است. تقوی‌فر و مردانی (Taghavifar & Mardani, 2014c) مقاومت به نفوذ و میزان فرورفتگی را به عنوان شاخص‌هایی برای تخمین فشردگی خاک در سه سطح بار عمودی، سه سطح

1- Soil Bin
2- Finite Element Method

3- Discrete Element Method

چند لایه^۱ پیش‌خور را به‌کار بردند. مدل به دست آمده نشان داد که روش شبکه^۲ عصبی مصنوعی روشی قدرتمند برای پیش‌بینی شاخص‌های بازدهی انرژی است. با دقت شدن در منابع ارائه شده می‌توان دید که اثر رطوبت خاک بر متغیر وابسته مقاومت غلتشی لاستیک نادیده گرفته شده است.

خاک که اصلی‌ترین جزء در تحقیقات کشاورزی شناخته می‌شود در این تحقیقات کاملاً حذف شده است و اصولاً نتایج حاصل از چنین تحقیقاتی را نمی‌توان به خاک نسبت داد و در تحقیقات کشاورزی به‌کار برد. از این‌رو بررسی تغییرات رطوبت خاک و تأثیر دو متغیر دیگر بار عمودی و فشار باد لاستیک، در شرایط رطوبتی مختلف بر متغیر وابسته مقاومت غلتشی به‌عنوان ضرورتی مهم شناخته می‌شود. در این پژوهش، با توجه به بررسی منابع، هدف‌های زیر مورد نظر خواهد بود:

۱- اندازه‌گیری مقاومت غلتشی لاستیک تحت تأثیر متغیرهای بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک در شرایط کنترل شده^۳ انباره^۴ خاک با استفاده از سامانه^۴ آزمونگر تک چرخ (SWT).

۲- پیش‌بینی مقاومت غلتشی به کمک مدل شبکه^۲ عصبی مصنوعی چند لایه^۱ پرسپترون^۴ (MLP) و مدل رگرسیونی چندگانه با استفاده از متغیرهای مستقل بار عمودی، فشار باد لاستیک و درصد رطوبت خاک و مقایسه^۳ نتایج به دست آمده از این دو روش.

مواد و روش‌ها

آزمون‌ها با استفاده از انباره^۴ خاک موجود در موسسه^۴ تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی و با استفاده از آزمونگر تک چرخ نصب شده روی این انباره^۴ خاک اجرا شد. انباره^۴ خاک ۲۰ متر طول، ۱/۷ متر پهنا و

مقاومت غلتشی می‌شود. استفاده از شبکه^۲ عصبی مصنوعی^۱ در تحلیل داده‌ها در سال‌های اخیر افزایش یافته است. علیمردانی و همکاران (Alimardani et al., 2009) با استفاده از مدل شبکه^۲ عصبی مصنوعی نیروی کششی مورد نیاز یک زیرشکن را مدل‌سازی کردند. آنها سه الگوریتم متفاوت را برای آموزش شبکه به‌کار گرفتند و با توجه به دقت بالاتر الگوریتم لونیبرگ-مارکوآرت^۲ (LM) نسبت به الگوریتم‌های دیگر در آموزش شبکه، از این الگوریتم استفاده کردند. این محققان همچنین نتایج به دست آمده از مدل شبکه^۲ عصبی را با نتایج استخراج شده از مدل رگرسیونی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از مدل شبکه^۲ عصبی، نسبت به مدل رگرسیونی، در پیش‌بینی نیروی کششی مورد نیاز در عملیات زیرشکنی برتری دارد. تقوی‌فر و همکاران (Taghavifar et al., 2013) از شبکه^۲ عصبی مصنوعی پیش‌خور^۳ با یک لایه^۱ پنهان و ورودی‌های بار عمودی، فشار باد و سرعت پیشروی برای تخمین مقاومت غلتشی در خاک لومی-رسی استفاده کردند. این محققان نتیجه گرفتند که با افزایش بار عمودی و فشار باد لاستیک مقاومت غلتشی به‌ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد و سرعت پیشروی به‌عنوان فاکتوری بدون تأثیر بر مقاومت غلتشی لاستیک شناخته می‌شود. آنها همچنین نتیجه گرفتند که مدل شبکه^۲ عصبی مصنوعی مدلی کارآمد در پیش‌بینی مقاومت غلتشی لاستیک در خاک لومی-رسی است. تقوی‌فر و مردانی (Taghavifar & Mardani, 2014b) از شبکه^۲ عصبی مصنوعی با دو لایه^۱ پنهان به منظور پیش‌بینی شاخص‌های ضریب کشش و بازدهی توان کششی چرخ محرک تحت تأثیر متغیرهای بار روی لاستیک، سرعت پیشروی و لغزش استفاده کردند و برای این‌کار شبکه^۲ عصبی

1- Artificial Neural Network
2- Lavenberg-Marquardt

3- Feed Forward
4- Multilayer Perceptron

۱/۳ متر عمق دارد. ساختار خاک مورد آزمون در انبارۀ خاک بر اساس سیستم دسته‌بندی USDA^۱ از نوع لومی-رسی و بر اساس سیستم دسته‌بندی USCS^۲ به عنوان خاک CL-ML یا به عبارتی خاک غیرارگانیک رسی-سیلتی با پلاستیسیته پایین است (Anon, 1985; Naderi-Boldaji et al., 2014). ترکیب ساختاری خاک و بعضی از خصوصیات مکانیکی آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ترکیب ساختاری و خصوصیات مکانیکی خاک مورد آزمون

Table 1- Physical and mechanical properties of tested soil	
gg ⁻¹	Feature خصوصیت
0.29	رس Clay
0.33	سیلت Silt
0.38	شن Sand
0.017	Organic matter ماده آلی
0.006	کربن Carbon
0.242	Plastic Limit (PL) حد پلاستیک (PL)
0.322	Liquid limit (LL) حد روانی (LL)
0.108	Shrinkage limit (SL) حد انقباض (SL)

الکتروموتور با توان ۲/۲ کیلو وات و یک گیربکس با نسبت کاهشی ۲:۳ استفاده شد. یک مبدل نیرو (Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.; CLP-30KNB) با ظرفیت ۳۰ کیلو نیوتن برای اندازه‌گیری بار عمودی وارد شده بر لاستیک در زیر سیلندر هیدرولیک قرار داده شد. سرانجام، برای اندازه‌گیری سرعت واقعی سامانه آزمونگر، از یک چرخ کمکی متصل به یک شمارنده دیجیتال (RS Components RS-58) استفاده شد (شکل ۱).

آزمون‌های مورد نظر با استفاده از لاستیک ۱۲/۴-۲۸ ساخت شرکت گوودیر^۳ در سه سطح بار عمودی ۹، ۱۲ و ۱۶ کیلونیوتن، سه سطح فشار باد ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ کیلوپاسکال و سه سطح رطوبتی ۱۱/۲۰، ۱۴/۸۶ و ۱۸/۶۸ درصد بر مبنای وزن خشک و با سرعت پیشروی ۰/۴۵ متر بر ثانیه دنبال شد. جزئیات متغیرهای مورد آزمون در جدول ۲ آورده شده است. درصد رطوبت عبارت است از نسبت وزن آب موجود در یک توده از خاک به وزن خشک همان توده که به صورت

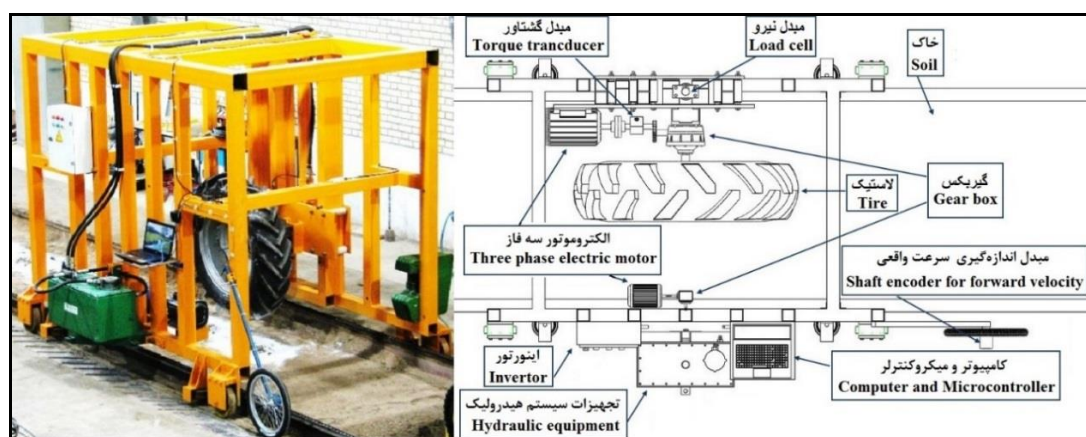
سامانه آزمونگر تک چرخ دارای ابعاد ۳/۱۰ متر طول، ۱/۹۰ متر عرض و ۲/۲۳ متر ارتفاع برای آزمون لاستیک در انبارۀ خاک است. برای تأمین توان حرکتی لاستیک، از یک الکتروموتور سه فاز با توان ۱۱ کیلووات و به منظور کاهش سرعت دورانی الکتروموتور و افزایش گشتاور تحویلی به لاستیک از یک گیربکس با نسبت کاهشی ۱:۱۰۴ استفاده گردید. از یک اینورتور (AC motor speed controller; LS600-2020) به منظور تولید سرعت‌های مختلف برای رسیدن به سرعت پیشروی مورد نظر استفاده شد. یک مبدل گشتاور (Datum Electronics, PTO shaft torque and power system; Series 420 PTO system) ۱۸۰۰ نیوتن-متر برای اندازه‌گیری سرعت دورانی، گشتاور و توان تحویلی به چرخ به صورت واسط بین الکتروموتور و گیربکس قرار داده شد. یک سیستم هیدرولیک با فشار خروجی ۱/۵ مگاپاسکال برای تأمین بار عمودی روی لاستیک به کار گرفته شد. به منظور تأمین توان سیستم هیدرولیک نیز از یک

1- United States Department of Agriculture Soil Classification System

2- Unified Soil Classification System

3- Goodyear

درصد بیان می‌شود. برای تعیین درصد رطوبت از دو عمق متفاوت ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متر، نمونه‌هایی انتخاب شد. نمونه‌های خاک در آون Sana SL-908 (با دقت ۱ درجه سلسیوس و در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید (Anon, 1999). برای اندازه‌گیری وزن نمونه‌های خاک از ترازوی SF-400C با دقت ۰/۰۱ گرم استفاده شد.



شکل ۱- سامانه آزمونگر نصب شده بر روی انباره خاک (چپ)؛ نمای شماتیکی سامانه همراه با اجزا (راست)

Fig. 1- The single tire tester installed on the soil bin (Left); Schematic view of single tire tester and its components (Right)

جدول ۲- جزئیات متغیرهای مورد آزمون

Table 2- Details of test variables

Soil moisture content (%d.b) رطوبت خاک (%d.b)	Tire inflation pressure (kPa) فشار باد لاستیک (kPa)			Vertical load (kN) بار عمودی (kN)	
	Actual inflation pressures used فشار باد مورد آزمون		Recommended inflation pressure ¹ فشار باد توصیه شده ¹		
11.20	160 (بیش بادی- Overinflated)	120 (بیش بادی- Overinflated)	80 (بیش بادی- Overinflated)	89	6
14.86	160 (بیش بادی- Overinflated)	120 (بیش بادی- Overinflated)	80 (کم بادی- Underinflated)	109	9
18.68	160 (کم بادی- Underinflated)	120 (کم بادی- Underinflated)	80 (کم بادی- Underinflated)	181	12

1- For tire used as a single tire at a maximum speed of 40 km/h

۱- مقادیر ارائه شده برای استفاده لاستیک منفرد در بیشینه سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت است (Anon, 2017).

هر آزمون آماده شد. نیروهای وارد بر لاستیک محرک در شکل ۲ نمایش داده شده است.

نیروی مقاومت غلتشی چرخ (R_R) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$R_R = GT - NT \quad (1)$$

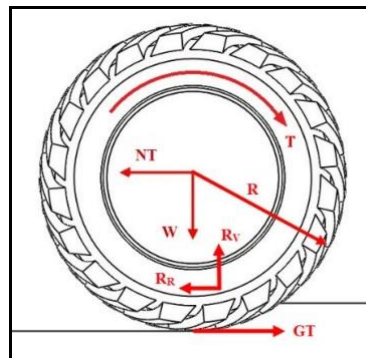
که در آن،

GT = نیروی کشش ناخالص^۱ و NT = نیروی کشش خالص^۲ است (Anon, 2009).

آزمایش‌ها به صورت آزمون فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) با سه تکرار برای هر آزمون اجرا شد. به منظور ایجاد مدل شبکه عصبی، نرم‌افزار MATLAB R2014b و برای ایجاد مدل رگرسیونی داده‌های حاصل از آزمون‌های اجرا شده، نرم‌افزار آماری SPSS 23 استفاده شد. برای آزمون در انباره خاک، ابتدا خاک موجود در آن با استفاده از سامانه آماده‌ساز خاک، تا عمق ۵۰ سانتی‌متری برای

1- Gross Traction

2- Net Traction



شکل ۲- دیاگرام نیروهای وارد بر لاستیک

Fig. 2- Diagram of the forces applied to the tire

گرفته شدند. برای مراحل آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش به ترتیب ۷۰، ۱۵ و ۱۵ درصد داده‌ها اختصاص داده شد. شکل ۳ ساختار کلی شبکه عصبی چند لایه پرسپترون استفاده شده در این تحقیق را با یک لایه ورودی شامل نورون‌های بار عمودی، فشار باد لاستیک و درصد رطوبت خاک و دو لایه پنهان و همچنین یک لایه خروجی با یک نورون خروجی مقاومت غلتشی نمایش می‌دهد. در مرحله آموزش شبکه از عملگر آموزشی *trainlm* استفاده شد که مقادیر وزن و بایاس را بر اساس الگوریتم لونیگ-مارکوآرت (LM) بهینه می‌کند، الگوریتمی که اغلب به عنوان سریعترین الگوریتم توزیع معکوس (BP) و گزینه‌ای مناسب توصیه می‌شود (Anon, 2014).

افزایش تعداد لایه‌های پنهان شبکه عصبی موجب بالا رفتن بازده سیستم می‌شود (Taghavifar & Mardani, 2014b) بنابراین در شبکه‌های مورد استفاده در این تحقیق از دو لایه پنهان در معماری شبکه استفاده شد. از طرفی، تعیین تعداد نورون‌های موجود در لایه‌های پنهان نیز مرحله‌ای بسیار مهم در طراحی شبکه عصبی کارآمد به‌شمار می‌رود. برای تعیین تعداد بهینه نورون‌ها در هر لایه پنهان مقدار آن از ۱ تا ۱۰ افزایش داده شد. برای ارزیابی کارایی مدل‌های شبکه عصبی مورد استفاده نیاز به

نیروی کشش خالص وارد بر سامانه آزمونگر برابر صفر است (نیروی لازم برای به حرکت در آوردن شاسی در این تحقیق لحاظ نشده است) و بنابراین نیروی مقاومت غلتشی را می‌توان با اندازه‌گیری گشتاور لازم برای به حرکت در آوردن چرخ محاسبه کرد. نیروی مقاومت غلتشی لاستیک با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$R_R = \frac{EMT \times 104 \times GE}{R} \quad (1)$$

که در آن،

R_R = نیروی مقاومت غلتشی (بر حسب نیوتن)؛
 EMT = گشتاور الکتروموتور^۱ (بر حسب نیوتن. متر)؛
 ۱۰۴ نسبت کاهش‌دهنده گیربکس؛ GE = بازده گیربکس^۲؛
 R = شعاع لاستیک مورد آزمون (بر حسب متر) در حالت بی‌باری (Anon, 2009).

به ازای هر تیمار مورد آزمون، مقاومت غلتشی در فاصله‌ای به طول تقریبی ۴ متر اندازه‌گیری شد. شبکه عصبی مصنوعی چند لایه پرسپترون (MLP) برای پیش‌بینی مقاومت غلتشی، با استفاده از متغیرهای مستقل بار عمودی، فشار باد لاستیک و درصد رطوبت ایجاد شد. داده‌های به دست آمده برای مقاومت غلتشی به صورت تصادفی برای سه مرحله آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش در هر شبکه به کار

1- Electromotor Torque

2- Gearbox Efficiency

همگرایی سریع به کمترین مقدار $RMSE$ متغیرهای مربوط به هر ورودی با استفاده از رابطه (۴) در محدوده ۱ و -۱- نرمال شدند (Taghavifar & Mardani, 2014a).

$$X_n = 2 \frac{X_r - X_{r,min}}{X_{r,max} - X_{r,min}} - 1 \quad (۴)$$

که در آن،

X_n = متغیر ورودی نرمال شده؛ X_r = مقدار اولیه هر متغیر؛ $X_{r,min}$ = مقدار کمینه؛ و $X_{r,max}$ = مقدار بیشینه هر پارامتر ورودی. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، در دو لایه پنهان از تابع انتقال تانژانت هیپربولیک سیگموئید ($tansig$) و در لایه خروجی از تابع انتقال خطی ($purelin$) استفاده گردید. تابع انتقال سیگموئید دارای مقادیر خروجی در محدوده -۱ و ۱ است و تابع انتقال خطی خروجی‌هایی را در محدوده $-\infty$ تا $+\infty$ ایجاد می‌کند.

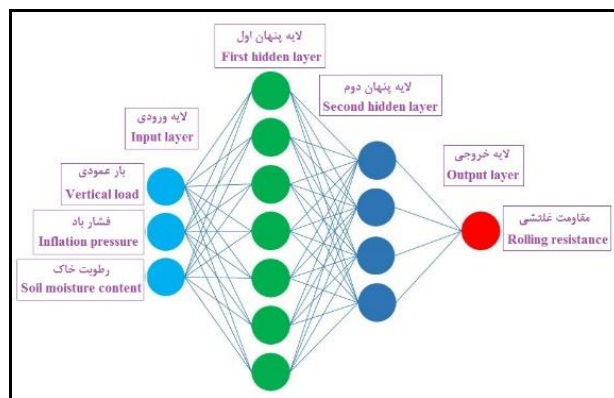
شاخص‌هایی است که بتوان کارکرد مدل‌ها را در مقایسه با مجموع داده‌ها و نتایج تجربی قضاوت کرد. از این‌رو برای ارزیابی نتایج به دست آمده، از شاخص‌های ریشه میانگین مربع خطا ($RMSE$) و مربع ضریب همبستگی (R^2) استفاده شد. در نهایت، شبکه با کمترین مقدار پارامتر ریشه میانگین مربع خطا ($RMSE$) انتخاب شد (روابط ۳ و ۴).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{predicted} - Y_{actual})^2} \quad (۲)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{predicted} - Y_{actual})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{predicted} - Y_{mean})^2} \quad (۳)$$

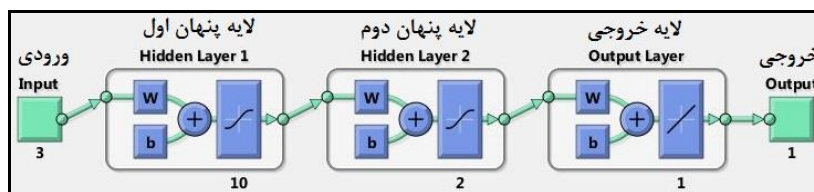
که در آنها،

$Y_{predicted}$ = مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل؛ و Y_{actual} = مقادیر اندازه‌گیری شده. از آن‌جا که محدوده متغیرهای ورودی متفاوت هستند، برای



شکل ۳- ساختار کلی شبکه عصبی چند لایه پرسپترون پیش‌خور با دو لایه پنهان استفاده شده در این تحقیق

Fig. 3- The general multi-layered perceptron feed-forward ANN configuration with two hidden layers used in this research



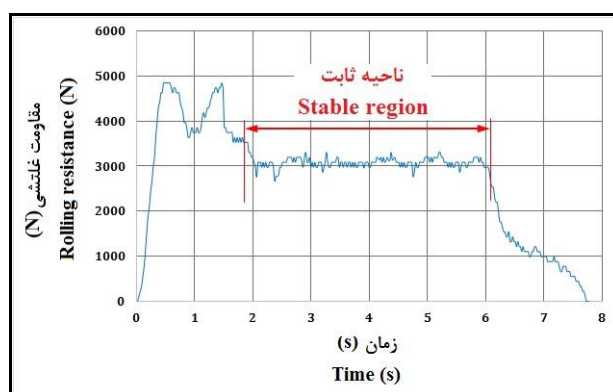
شکل ۴- معماری شبکه عصبی استفاده شده

Fig. 4- Architecture of created ANN model

نتایج و بحث

متغیر در ناحیه پایدار در نظر گرفته شد زیرا هدف از این تحلیل بررسی تأثیر متغیرهای بار عمودی، فشار باد لاستیک و درصد رطوبت خاک بر مقاومت غلتشی لاستیک در حالت حرکت پایدار است.

نمونه‌ای از نیروی مقاومت غلتشی اندازه‌گیری شده در شکل ۵ ارائه شده است. برای بررسی و تحلیل داده‌های مقاومت غلتشی، مقدار میانگین این



شکل ۵- مقاومت غلتشی اندازه‌گیری شده

Fig. 5- Measured rolling resistance

جدول ۳ ارائه شده است؛ عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک بر مقاومت مشاهده می‌شود که اثر مستقل و متقابل متغیرهای بار غلتشی لاستیک بسیار معنی‌دار است.

جدول ۳- نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) با متغیرهای بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت برای متغیر مقاومت غلتشی

Table 3- Results of variance analysis (ANOVA) with variables of vertical load, inflation pressure, and moisture content for the parameter of rolling resistance

F	Mean of squares میانگین مربعات	Sum of squares مجموع مربعات	Degree of freedom درجه آزادی	Variation Source منبع تغییر
307.79**	4033452.26	8066904.52	2	Vertical load بار عمودی
343.69**	4503768.36	9007536.72	2	Inflation pressure فشار باد لاستیک
1234.17**	16172871.10	32345742.19	2	Moisture content رطوبت
18.31**	239875.61	959502.46	4	Vertical load×inflation pressure بار عمودی × فشار باد لاستیک
41.72**	546711.12	2186844.47	4	Vertical load×moisture content بار عمودی × رطوبت
39.89**	522784.27	2091137.10	4	Inflation pressure×moisture content فشار باد لاستیک × رطوبت
4.26**	55884.86	447078.85	8	Vertical load×inflation pressure×moisture content بار عمودی × فشار باد لاستیک × رطوبت
	13104.19	707626.43	54	Error خطا

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ^{n.s} معنی‌دار نبودن

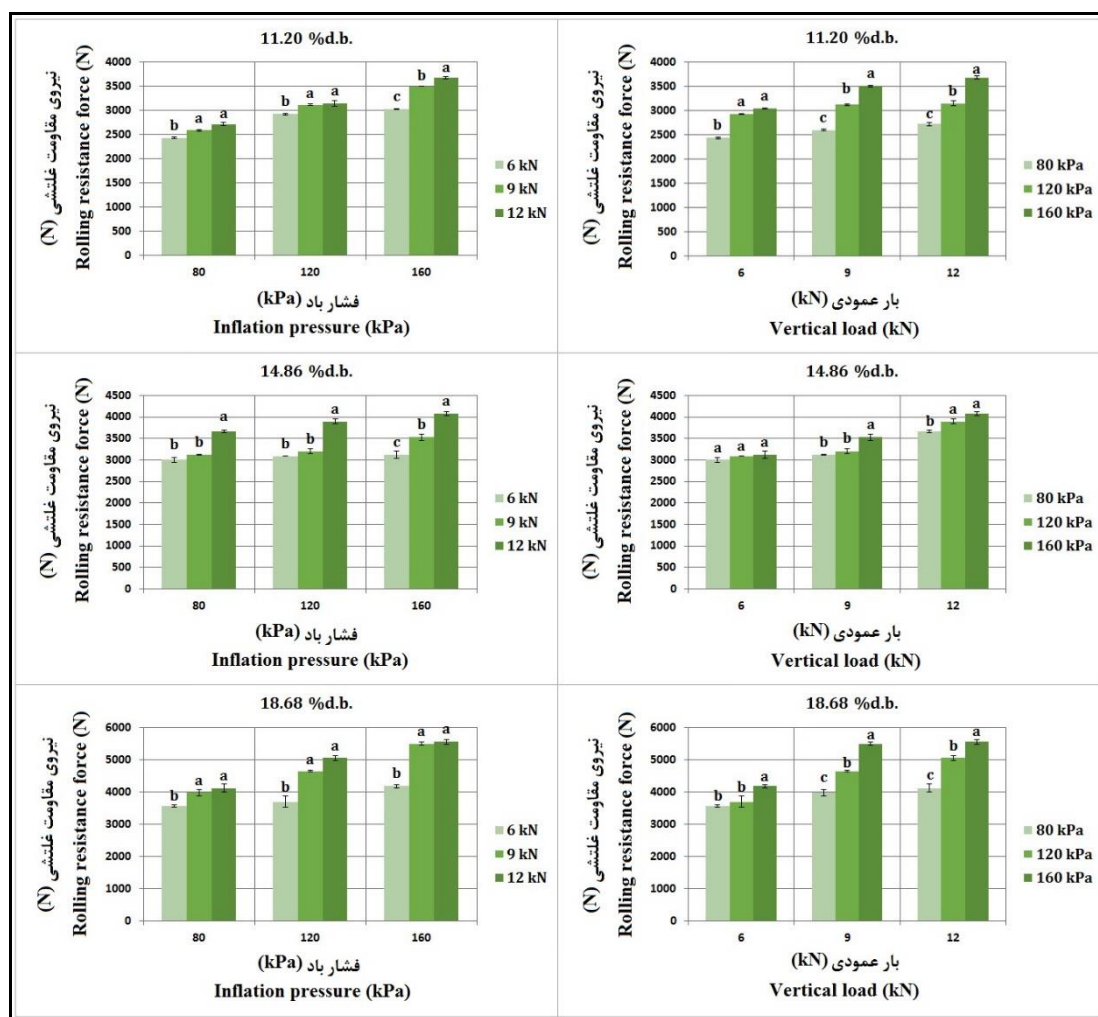
**Statistically significant ($P < 0.01$), *Statistically significant ($P < 0.05$), ^{n.s} Not significant

رطوبتی ۱۴/۸۶ درصد، نسبت به سطح رطوبتی ۱۱/۲۰ درصد، قابل مشاهده است. در این سطح رطوبتی به دلیل کاهش مقاومت خاک در برابر تغییر شکل، با افزایش بار عمودی مقاومت غلتشی افزایش می‌یابد.

در سطح رطوبتی ۱۸/۶۸ درصد که مقاومت خاک در برابر تغییر شکل نسبت به دو سطح رطوبتی دیگر کمتر است، با افزایش بار عمودی از ۶ به ۹ کیلونیوتن در تمامی سطوح فشار باد لاستیک افزایش معنی‌دار مقاومت غلتشی حاصل می‌شود و با افزایش بیشتر بار عمودی تغییر معنی‌داری به دست نمی‌آید. از طرفی، با بیشتر شدن فشار باد لاستیک، سختی لاستیک و همچنین توانایی آن برای تغییر شکل بیشتر خاک افزایش پیدا می‌کند و به همین دلیل موجب افزایش مقاومت غلتشی می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که رطوبت خاک بیشترین تأثیر را بر کاهش مقاومت خاک و در نتیجه افزایش مقاومت غلتشی دارد، زیرا با افزایش رطوبت، مقدار نفوذ لاستیک در خاک افزایش پیدا می‌کند (Wong, 2001). با توجه به این‌که متغیر وابسته مقاومت غلتشی لاستیک با تغییر متغیرهای بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک دچار تغییر می‌شود، بنابراین می‌توان مدلی رگرسیونی برای ایجاد ارتباط بین این دو نوع متغیر ارائه داد. مدل رگرسیونی چندمتغیره با استفاده از متغیرهای بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک با استفاده از نرم‌افزار SPSS 23 به دست آمد. مدل رگرسیونی به دست آمده برای پیش‌بینی مقاومت غلتشی در رابطه ۶ ارائه شده است. جدول ۴ نشان‌دهنده آنالیز واریانس (ANOVA) مدل ارائه شده با مقدار ضریب تبیین (مقدار مربع ضریب همبستگی چندگانگی) $R^2 = 0/850$ و خطای استاندارد ۳۲۹/۸۸ است.

با در نظر گرفتن عناصر لاستیک و خاک، یعنی دو عنصر سیستمی جدا، تأثیر پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت غلتشی لاستیک در هر سطح رطوبتی به‌صورت جداگانه بررسی شد. تغییرات مقاومت غلتشی نسبت به سطوح مختلف بار عمودی و فشار باد لاستیک در سه سطح رطوبتی متفاوت همراه با نتایج حاصل از آزمون مقایسه میانگین دانکن در شکل ۶ نشان داده شده است. مقاومت غلتشی با افزایش متغیرهای بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک افزایش پیدا می‌کند. در سطح رطوبتی ۱۱/۲۰ درصد، برای بار عمودی ۹ و ۱۲ کیلونیوتن، تغییر در فشار باد موجب تغییر معنی‌دار مقاومت غلتشی می‌شود.

برای بار عمودی ۶ کیلونیوتن، افزایش فشار باد لاستیک از ۸۰ به ۱۲۰ کیلوپاسکال موجب افزایش معنی‌دار ۱۶/۵۵ درصد در مقاومت غلتشی و افزایش بیشتر فشار باد لاستیک از ۱۲۰ به ۱۶۰ کیلوپاسکال تغییر معنی‌داری را ایجاد نمی‌کند که دلیل آن را می‌توان عدم توانایی بار عمودی ۶ کیلونیوتن برای تغییر شکل بیشتر خاک و در نتیجه افزایش مقاومت غلتشی لاستیک دانست. تنها در حالت بیش‌بادی، بار عمودی موجب تغییر معنی‌دار مقاومت غلتشی لاستیک در هر سه سطح می‌شود. در فشار باد لاستیک ۸۰ و ۱۲۰ کیلوپاسکال، افزایش بار عمودی از ۶ به ۹ کیلونیوتن موجب می‌شود به‌طور میانگین ۷ درصد در مقاومت غلتشی لاستیک افزایش حاصل شود و با افزایش بیشتر بار عمودی، مقاومت غلتشی لاستیک به‌طور میانگین ۲/۴۰ درصد افزایش می‌یابد که معنی‌دار نیست. بنابراین علت این تغییرات را می‌توان در مقاومت بالای خاک در برابر تغییر شکل در این سطح رطوبتی دانست. تأثیر بار عمودی و فشار باد لاستیک در افزایش مقاومت غلتشی در سطح



شکل ۶- تغییرات نیروی مقاومت غلتشی با توجه به تغییرات بار عمودی و فشار باد لاستیک در سطوح رطوبتی مختلف همراه با نتایج آزمون مقایسه میانگین دانکن؛ نوار خطی بالای هر ستون نشان‌دهنده خطای استاندارد است

Fig. 6- Rolling resistance graph for Duncan's multiple range test for three different soil moisture contents. Error bar values in on each column indicate the standard error of the replications

جدول ۴- جدول آنالیز واریانس (ANOVA) مدل رگرسیونی چند متغیره برای پیش‌بینی مقاومت غلتشی

Table 4- Analysis of variance (ANOVA) of the multiple regression model for rolling resistance

F	Mean of squares میانگین مربعات	Sum of squares مجموع مربعات	Degree of freedom درجه آزادی	Variation Source منبع تغییر
145.29**	15811025.45	47433076.34	3	Regression رگرسیون
	108822.03	8379296.41	77	Residual باقیمانده
		55812372.75	80	Total جمع

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

**Statistically significant ($P < 0.01$)

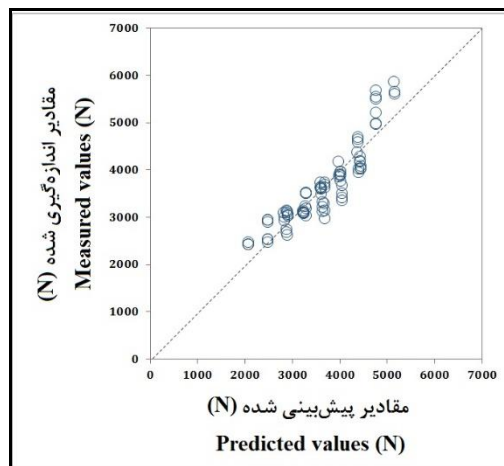
رگرسیون ارائه شده، رابطه منفی مقاومت غلتشی با فشار باد لاستیک را که تقوی‌فر و مردانی (Taghavifar & Mardani, 20130) به‌دست آورده‌اند رد می‌کند زیرا در سطوحی مانند خاک که قابلیت تغییر شکل دارند، با افزایش فشار باد لاستیک نفوذ لاستیک در خاک بیشتر می‌شود و در نتیجه افزایش مقاومت غلتشی حاصل می‌آید، هرچند این افزایش با توجه به رطوبت‌های مختلف متفاوت است.

مدل رگرسیونی ارائه شده با هر سه متغیر بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک دارای رابطه مثبت است. همبستگی مدل ارائه شده با پارامترهای بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک به ترتیب برابر با ۰/۶۹۸، ۰/۷۲۰ و ۰/۸۸۶ است. مقادیر همبستگی ارائه شده نشان می‌دهند که تأثیرگذارترین پارامترها بر مقاومت غلتشی در این تحقیق به ترتیب رطوبت خاک، فشار باد لاستیک و بار عمودی هستند. مدل

$$R_R = 128.138W + 10.210P + 200.756M - 1731.301 \quad (5)$$

مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل ارائه شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل ۷ نمایش داده شده است ($R^2 = 0/850$).

که در آن، R_R = مقاومت غلتشی (نیوتن. متر)؛ W = بار عمودی روی لاستیک (کیلونیوتن)؛ P = فشار باد لاستیک (کیلوپاسکال)؛ و M = رطوبت خاک (درصد).



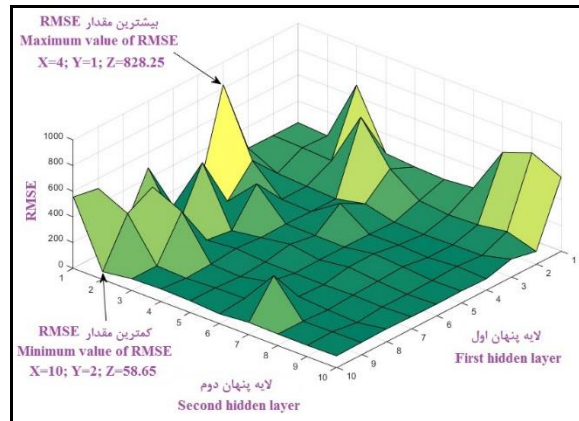
شکل ۷- مقادیر پیش‌بینی شده مقاومت غلتشی با استفاده از مدل رگرسیونی ارائه شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده

Fig. 7- Predicted values versus measured values utilizing the regression model for rolling resistance

تشخیص و تعیین بهینه تعداد نورون در دو لایه پنهان، از معیار $RMSE$ استفاده شد. شکل ۸، تغییرات این پارامتر را نسبت به آرایش متفاوت نورون‌ها در دو لایه پنهان نشان می‌دهد. دیده می‌شود که بیشترین مقدار $RMSE$ در

شبکه عصبی مورد استفاده در این تحقیق از سه نورون بار عمودی، فشار باد لاستیک و درصد رطوبت خاک در لایه ورودی و یک نورون مقاومت غلتشی لاستیک در لایه خروجی و دو لایه پنهان تشکیل شده است. برای

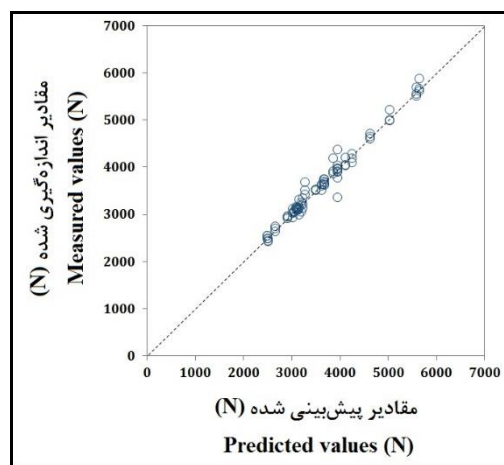
شبکه‌ای با معماری ۱-۴-۳ و کمترین مقدار آن لونیبرگ- مارکوآرت به دست آمده است. بنابراین در شبکه‌ای با معماری ۱-۲-۱۰-۳ و به ترتیب برابر با ۸۲۸/۲۵ و ۵۸/۶۵ برای الگوریتم آموزشی عصبی انتخاب شد.



شکل ۸- تغییرات پارامتر RMSE نسبت به تغییر تعداد نرون‌ها در دو لایه پنهان
 Fig. 8- Changes of RMSE versus changes on number of neuron in two layers

توزیع داده‌های پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل ۹ نمایش داده شده است. نزدیکی داده‌های نشان داده شده نسبت به خط با شیب واحد نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل استفاده شده است. ضریب همبستگی برای مراحل آموزش، اعتبارسنجی و آزمون شبکه به ترتیب ۰/۹۹۷، ۰/۹۸۴ و ۰/۸۲۷ به دست آمده است. ضریب تبیین $R^2 = 0.977$ و $RMSE = 125/44$ با استفاده از مدل شبکه عصبی ۱-۲-۱۰-۳ برای پیش‌بینی کل به دست آمد که نسبت به مقدار این ضریب، که با استفاده از مدل رگرسیونی حاصل شد ($R^2 = 0.850$)، دقت بسیار مناسب‌تری را نشان می‌دهد.

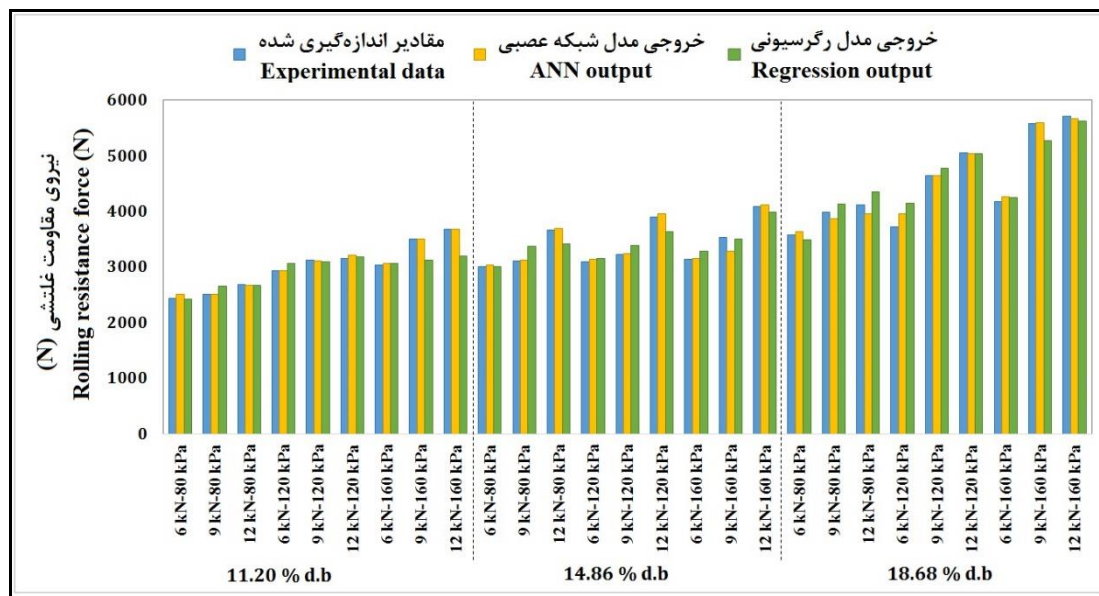
توزیع داده‌های پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل ۹ نمایش داده شده است. نزدیکی داده‌های نشان داده شده نسبت به خط با شیب واحد نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل استفاده شده است. ضریب همبستگی برای مراحل آموزش، اعتبارسنجی و آزمون شبکه به ترتیب ۰/۹۹۷، ۰/۹۸۴ و ۰/۸۲۷ به دست آمده است. ضریب تبیین $R^2 = 0.977$ و $RMSE = 125/44$ با استفاده از مدل رگرسیونی حاصل شد ($R^2 = 0.850$)، دقت بسیار مناسب‌تری را نشان می‌دهد.



شکل ۹- مقادیر پیش‌بینی شده مقاومت غلتشی با استفاده از مدل شبکه عصبی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده
 Fig. 9- Predicted values versus measured values utilizing the ANN model for rolling resistance

بیشتری با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمون آزمایشگاهی دارد. بنابراین، برتری استفاده از مدل شبکه عصبی نسبت به مدل رگرسیونی در پیش‌بینی مقاومت غلتشی با استفاده از متغیرهای ورودی بار عمودی، فشار باد و رطوبت به خوبی قابل مشاهده است.

شکل ۱۰، مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از دو مدل رگرسیونی و شبکه عصبی را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل شبکه عصبی، در مقایسه با مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل رگرسیونی، تطابق



شکل ۱۰- مقادیر پیش‌بینی شده مقاومت غلتشی با استفاده از دو مدل رگرسیونی و شبکه عصبی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده

Fig. 10- Comparison between measured and predicted values of contact volume by using of regression and ANN models

شناخته می‌شود. از طرفی، در سطوح رطوبتی بالا بار عمودی تغییرات مقاومت غلتشی را با تأثیر بیشتری نسبت به فشار باد لاستیک کنترل می‌کند. در این تحقیق، درصد رطوبت خاک تأثیرگذارترین پارامتر بر مقاومت غلتشی در مدل رگرسیونی شناخته شد؛ زیرا مقاومت خاک در برابر تغییر شکل را کاهش می‌دهد و نفوذ بیشتر لاستیک در خاک را به‌دنبال دارد که عامل اصلی در ایجاد مقاومت غلتشی در سطوح تغییرشکل‌پذیر است، پس از رطوبت خاک، متغیرهای بار عمودی و فشار باد لاستیک متغیرهای تأثیرگذار بعدی بر مقاومت غلتشی شناخته شدند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر بار عمودی، فشار باد لاستیک و رطوبت خاک بر مقاومت غلتشی لاستیک در شرایط کنترل شده انبساط خاک بررسی شد. داده‌های حاصل از آزمون با استفاده از دو مدل رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی به منظور بررسی پتانسیل شبکه عصبی برای پیش‌بینی داده‌های مقاومت غلتشی تحلیل شدند. نتایج به دست آمده به صورت خلاصه در زیر ارائه شده است:

- فشار باد لاستیک تغییر شکل لاستیک را تحت تأثیر قرار می‌دهد و از این‌رو پارامتر کنترل‌کننده مقاومت غلتشی لاستیک در سطوح رطوبتی پایین

- ضریب تبیین مدل رگرسیونی و شبکه عصبی به ترتیب برابر ۰/۸۵۰ و ۰/۹۷۷ به دست آمد که می‌توان برتری استفاده از مدل شبکه عصبی را در پیش‌بینی داده‌های مقاومست غلتشی نسبت به مدل رگرسیونی به‌خوبی مشاهده کرد.

قدردانی

از آقایان حسین سراج، نقی محبی و مهدی نظیری، کارکنان آزمایشگاه دینامیک خاک مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، برای همکاری‌هایشان در اجرای این تحقیق، سپاسگزار می‌شود.

مراجع

- Alimardani, R., Abbaspour-Gilandeh, Y., Khalilian, A., Keyhani, A., & Sadati, S. H. (2009). Prediction of draft force and energy of subsoiling operation using ANN model. *International Journal of Food, Agriculture & Environment (JFAE)*, 7, 537-542.
- Anon. (1985). ASTM D 2487-83. Classification of soils for engineering purposes. American Society for Testing and Materials: Annual Book of ASTM Standards., pp. 395-408.
- Anon (1999). Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. ASTM D 2216-98, Annual book of ASTM Standards.
- Anon. (2009). General Terminology for Traction of Agricultural Traction and Transport Devices and Vehicles. ANSI/SAE S296.5 DEC2003 (R2009) Standard. ASABE, USA.
- Anon. (2014). Artificial neural network toolbox user's guide, for the use of Matlab.
- Anon. (2017). Goodyear Tires. Available at: <http://tiregroup.com>.
- Döll, H. (1999). *Lohnen Zwillingsräder an Mähreschern*. Landwirtschaft ohne Pflug Sonderaufgabe Agritechnica.
- Gill, W. R., & Vanden-Berg, G. E. (1968). Soil dynamics in tillage and traction. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.
- González-Cueto, O., Iglesias-Coronel, C. E., Recarey-Morfa, C. A., Urriolagoitia-Sosa, G., Hernández-Gómez, L. H., Urriolagoitia-Calderón, G., & Herrera Suárez, M. (2013). Three dimensional finite element model of soil compaction caused by agricultural tire traffic. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99, 146-152.
- González-Cueto, O., Iglesias-Coronel, C. E., López-Bravo, E., Recarey-Morfa, C. A., & Herrera-Suárez, M. (2016). Modelling in FEM the soil pressures distribution caused by a tyre on a Rhodic Ferralsol soil. *Journal of Terramechanics*, 63, 61-67.
- Hauck, D., Hofman, V., & Kucera, H. (1984). Traction-horsepower demonstration. Paper/ASAE 84, 1061.
- Michael, M., Vogel, F., & Peters, B. (2015). DEM-FEM coupling simulations of the interactions between a tire tread and granular terrain. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 289, 227-248.

- Naderi-Boldaji, M., Alimardani, R., Hemmat, A., Sharifi, A., Keyhani, A., Tekeste, M. Z., & Keller, T. (2014). 3D finite element simulation of a single-tip horizontal penetrometer–soil interaction. Part II: Soil bin verification of the model in a clay-loam soil. *Soil and Tillage Research, 144*, 211-219.
- Nakashima, H., & Oida, A. (2004). Algorithm and implementation of soil–tire contact analysis code based on dynamic FE-DE method. *Journal of Terramechanics, 41*, 127-137.
- 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*, 3544-3551.
- Taghavifar, H., Mardani, A. (2013). Investigating the effect of velocity, inflation pressure, and vertical load on rolling resistance of a radial ply tire. *Journal of Terramechanics, 50*, 99-106.
- Taghavifar, H., & Mardani, A. (2014a). Application of artificial neural networks for the prediction of traction performance parameters. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 13*, 35-43.
- Taghavifar, H., & Mardani, A. (2014b). Applying a supervised ANN (artificial neural network) approach to the prognostication of driven wheel energy efficiency indices. *Energy, 68*, 651-657.
- Taghavifar, H., & Mardani, A. (2014c). Effect of velocity, wheel load and multipass on soil compaction. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 13*, 57-66.
- Wong, J. Y. (2001). *Theory of Ground Vehicles*. John Wiley & Sons, Inc.
- Wulfsohn, D., Upadhyaya, S., & Chancellor, W. (1988). Tractive characteristics of radial ply and bias ply tyres in a California soil. *Journal of Terramechanics, 25*, 111-134.

Prediction of Tire Rolling Resistance with Regression Model and Artificial Neural Network (ANN)

P. Farhadi, A. Golmohammadi*, A. Sharifi-Malvajerdi and G. H. Shahgholi

*Corresponding Author: Associate Professor, Department of Biosystem Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: agolmohammadi1342@gmail.com

Received: 15 February 2017, Accepted: 17 January 2018

Abstract

In this study, a single tire tester was used to study the effects of vertical load, inflation pressure and moisture content on tire rolling resistance in a soil bin. A Goodyear 12.4-28, 6 ply tractor drive tire was employed and the soil texture was a clay loam. The experimental design was a completely randomized with factorial layout at three replications. A multivariate regression model was obtained with the correlation coefficient of $R^2=0.85$ to predict the tire rolling resistance based on vertical load, inflation pressure, and moisture content. A multilayer feed-forward ANN (artificial neural network) with standard BP (back propagation) algorithm and LM (Levenberg-Marquardt) training function by using of two hidden layer in the network architecture was employed. RMSE (root mean squared error) and R^2 was used as modeling performance criteria. Tire inflation pressure was identified as the controller parameter of tire rolling resistance at low moisture content and also moisture content was the most effective parameter on changing of rolling resistance in regression model. Also the obtained $R^2=0.977$ from ANN model showed that ANN data were more close to actual data than the regression model.

Keywords: Single Wheel Tester, Soil Bin, Tire-Soil Interaction, Factorial Test