

اندازه‌گیری مقاومت غلتشی و میزان فرورفتگی چرخ متحرک در انباره خاک آزمایشگاهی و پیش‌بینی آن‌ها به کمک ANFIS

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

چکیده

برهم‌کنش چرخ و خاک به دلیل اثراتی که بر مصرف انرژی و خصوصیات خاک به ویژه در مبحث کشاورزی دارد، بسیار مورد توجه محققین این بخش قرار گرفته است. در این تحقیق، میزان فرورفتگی چرخ درون خاک و مقاومت غلتشی چرخ متحرک که ویژگی‌های تعیین‌کننده در برهم‌کنش چرخ و خاک هستند، با استفاده از آزمون‌گر چرخ در محیط انباره خاک آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. آزمون‌ها در ۲ سطح مختلف از سرعت‌پیشروی (۰/۳۸۶ و ۰/۸۷۹ کیلومتر بر ساعت)، ۳ سطح مختلف از فشار باد چرخ (۱۸، ۲۵ و ۳۲ پوند بر 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. سپس با استفاده از سامانه استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS) و مدل رگرسیونی چند متغیره، میزان فرورفتگی و مقاومت غلتشی چرخ متحرک پیش‌بینی شد. به منظور ارزیابی این مدل‌ها از ضریب تبیین (R^2) و میانگین مربعات خطا (MSE) استفاده شد. نتایج نشان داد فشار باد چرخ، نیروی عمودی و سرعت پیشروی چرخ متحرک، تأثیر معنی‌داری بر عمق فرورفتگی چرخ درون خاک دارند ($P < 0.01$)؛ اما به غیر از سرعت پیشروی، بقیه عوامل اثر معنی‌داری بر مقاومت غلتشی ندارند. ضریب تبیین در پیش‌بینی میزان فرورفتگی و مقاومت غلتشی توسط مدل‌های ANFIS به ترتیب برابر ۰/۹۹ و ۰/۶۹ بوده که بسیار بیش‌تر از ضریب تبیین در مدل‌های رگرسیونی (به ترتیب برابر ۰/۸۷ و ۰/۴۰) بود. هم‌چنین میانگین مربعات خطا در مدل‌های ANFIS در خصوص عمق فرورفتگی و مقاومت غلتشی چرخ به ترتیب ۰/۰۲۳۱ میلی‌متر مربع و ۰/۰۱۰۱ کیلوگرم نیرو مربع بوده که بسیار کم‌تر از میانگین مربعات خطا در مدل‌های رگرسیونی (به ترتیب برابر ۰/۸۶۴ میلی‌متر مربع و ۰/۹۱۸ کیلوگرم نیرو مربع) است. بنابراین، مدل‌های ANFIS از دقت بالاتر و خطای کم‌تری نسبت به مدل‌های رگرسیونی برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی: انرژی مصرفی، برهم‌کنش چرخ و خاک، آزمون‌گر چرخ، روش استنتاج فازی - عصبی تطبیقی.

ارجاع: یوسفی، م. موسوی سیدی، س. ر. و عسکری، م. ۱۴۰۳. اندازه‌گیری مقاومت غلتشی و میزان فرورفتگی چرخ متحرک در انباره خاک آزمایشگاهی و پیش‌بینی آن‌ها به کمک انفیس ANFIS. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۳۳: ۳۴-۲۳.
<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14718.699>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

* نویسنده مسئول: mousavi22@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲

مقدمه

از نظر مدیریت خاک و تولید محصول، کیفیت خاک همواره مورد توجه محققین بوده است. از این منظر تلاش می‌شود که ادوات و ابزارهای که در رابطه با خاک به کار می‌روند، به گونه‌ای طراحی شوند که از پیامدهای تخریب خاک و هدر رفتن انرژی جلوگیری شود. به غیر از ابزار خاک‌ورز درون خاک، اثرات ماشین بر سطح و عمق خاک کشاورزی که به خاطر تردد ماشین صورت می‌گیرد نیز همواره باید مدنظر قرار بگیرد. در اثر برهم‌کنش چرخ و خاک تغییراتی در مکانیک خاک و ساختار فیزیکی آن رخ داده و ممکن است خاک‌دانه‌های موجود در خاک را از بین ببرد و اثرات منفی روی ساختمان خاک باقی بگذارد. در این صورت علاوه بر کاهش عملکرد محصول، تراکم بیش از حد خاک باعث افزایش مقاومت مکانیکی خاک شده و به تبع آن نیروی کششی، مصرف سوخت و زمان اجرای کار و ساییدگی ادوات کشاورزی افزایش خواهد یافت. همچنین باعث کاهش چرخه مواد مغذی و مواد معدنی شده و نیز فعالیت ریزسازواره‌ها را کاهش می‌دهد (Raper, 2005). تأثیرات منفی دیگری نیز وجود داشته و این نشانگر اهمیت بررسی روابط بین چرخ ماشین و خاک و یافتن راهی برای بهبود این اثرات نامطلوب است.

مطالعه عملکرد چرخ بر روی خاک به دو روش صورت می‌گیرد. در نخستین روش، چرخ مستقیماً بر روی خاک مزرعه مورد آزمایش و ارزیابی قرار می‌گیرد که معایبی چون عدم پایش شرایط محیطی را دارد. در روش دیگر، چرخ در انباره خاک حرکت نموده که مزیت‌های زیادی از جمله ایجاد شرایط مورد نظر محقق درون خاک را دارد. همچنین انجام آزمون در شرایط پایش شده و دقیق در انباره خاک تا حدودی پیچیدگی انجام تحقیقات مزرعه‌ای را کاهش می‌دهد. رمز موفقیت علم دینامیک خاک در عملیات خاک‌ورزی و فشردگی خاک نیز شناخت قوانین بنیادی و اصول رفتار حاکم بر خاک‌ها است و اکثر این تحقیقات در انباره خاک انجام می‌شود. از این‌رو انباره خاک سال‌هاست که توسط پژوهش‌گران ماشین‌های کشاورزی و متخصصین دینامیک خاک مورد استفاده قرار گرفته است و در تحقیقاتی که مربوط به ماشین‌هایی که با خاک در تماس هستند، نقش مهم و ارزنده‌ای دارد. انجام آزمون‌های مزرعه‌ای، زمان‌بر و هزینه‌بر است. بنابراین به کمک مدل‌سازی، اطلاعات مورد نیاز خود را به

آسانی به دست خواهیم آورد. در میان روش‌های نوین مدل‌سازی در بستر هوش مصنوعی، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سامانه استنتاج فازی (FIS) از جایگاه خاصی برخوردار بوده و به‌صورت دائمی برای بررسی انواع پدیده‌های زیستی و غیرزیستی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Tao et al., 2010). در حال حاضر ترکیبی از شبکه عصبی مصنوعی و سامانه استنتاج فازی با نام ANFIS که مزایای هر دو روش را یک‌جا دارد، برای بررسی پدیده‌هایی با معادلات غیرخطی به کار گرفته می‌شود (Pentos & Pieczarka, 2017; Lajani et al., 2024).

تحقیقات متعددی در زمینه تقابل چرخ و خاک همچنین مدل‌سازی آن با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی انجام شده است اما اندازه‌گیری مقاومت غلتشی چرخ و فرورفتگی آن درون خاک همچنین پیش‌بینی آن‌ها به کمک ANFIS مغفول مانده است. در یک پژوهش به تأثیر فشار باد چرخ بر مقاومت افقی خاک و مقاومت بر نفوذ عمودی در لایه‌های مختلف عمق خاک پرداخته شد. این تحقیق در دو سطح فشار ۹۰ و ۲۲۷ کیلوپاسکال در سه تکرار در طرح بلوک کاملاً تصادفی انجام شد. نتایج نشان داد که اختلاف بین مقاومت به نفوذ عمودی و نیروی افقی در عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر تفاوت معنی‌دار نداشته؛ اما در عمق ۱۰ تا ۴۰ سانتی‌متر تفاوت معنی‌داری وجود داشت (Sharifi Malvajerdi et al., 2011). در پژوهش دیگری به بررسی اندازه‌گیری فشار تماس بین زمین و چرخ پرداخته شد. آزمایش‌ها در سه سطح سرعت و سه سطح لغزش و سه سطح بار چرخ انجام شد. نتایج نشان داد که میانگین خطای مربع ریشه (۰/۱۳۸۱) و مقادیر ضریب تبیین (۰/۹۸۶۴) توسط شبکه عصبی موجه بهینه‌تر و مطلوب‌تر از شبکه عصبی انتشار مجدد بوده و دقت پیش‌بینی را افزایش می‌دهد (Taghavifar & Mardani, 2014). محققین در پژوهشی دیگر از روش‌های هوش مصنوعی به منظور بهینه‌سازی کشش چرخ متحرک بر روی خاک با بافت لومی رسی سیلتی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که هوش مصنوعی با دقت بسیار بالایی می‌تواند ویژگی‌های خروجی برهم‌کنش چرخ و خاک را مدل‌سازی و بهینه‌سازی نماید (Pieczarka et al., 2018). محققین در پژوهشی با استفاده از گچ مایع، رد اثر چرخ تراکتور را در مزرعه

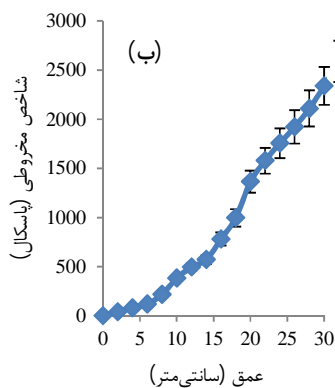
مواد و روش‌ها

انباره خاک آزمایشگاهی

داده‌برداری‌ها در محیط انباره خاک موجود در کارگاه دانشکده مهندسی زراعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با بافت خاک سیلتی رسی (۴۳ درصد سیلت، ۱۰ درصد شن، ۴۷ درصد رس) و رطوبت ۸/۴ درصد بر پایه وزن خشک انجام شد. توضیحات در خصوص ابعاد مخزن خاک، سامانه انتقال قدرت، کشنده ابزار یا شاسی متحرک (حامل)، سامانه پایش الکتریکی، زنجیرها و چرخنده‌ها، سامانه جمع‌آوری داده (دیتالاگر)، تصویر کامل سامانه و ... در پژوهش (Yousefi et al., 2022) آمده است. چرخ مورد استفاده مدل G10 از Good Year با سایز ۱۸-۷/۵۰ بود. اندازه‌گیری مقاومت غلتشی چرخ برحسب کیلوگرم نیرو (kgf) به وسیله‌ی یک سلول نیرویی S شکل انجام شد که محل قرارگیری آن در شکل ۱ مشاهده می‌گردد.

قالب‌گیری کرده و با استفاده از پوششگر سه‌بعدی به تصویر تبدیل کردند. آن‌ها از بار عمودی در سه سطح مختلف، سه سطح فشار باد چرخ و سه سطح رطوبت خاک استفاده کردند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی متغیرهای خروجی توسط شبکه عصبی مصنوعی به مقادیر اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک است (Farhadi et al., 2019). پژوهش‌گران در تحقیقی دیگر به پیش‌بینی عملکرد کششی یک چرخ محرک در محیط انباره خاک به کمک شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی با دقت بسیار بالایی توانست به پیش‌بینی خروجی مورد نظر در مقایسه با مدل رگرسیونی بپردازد (Badgujar et al., 2022).

با توجه به موارد مطرح شده، هدف از پژوهش حاضر، اندازه‌گیری مقاومت غلتشی چرخ و فرورفتگی آن درون خاک در تقابل میان چرخ و خاک در اثر متغیرهای مستقل بار عمودی وارده، میزان فشار باد و سرعت پیشروی چرخ در شرایط پایش‌شده انباره خاک و پیش‌بینی آن‌ها با استفاده از سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) است.



شکل ۱- (الف) محل قرارگیری سلول نیرویی افقی برای اندازه‌گیری مقاومت غلتشی، (ب) اندازه‌گیری میزان فرورفتگی چرخ در خاک و (ج) نتایج آزمون نفوذسنجی خاک انباره

تیمار در مسیرهای مجاور هم در عرض انباره انجام شد و سپس سطح خاک توسط تسطیح کن، مسطح شده و ۶ تیمار دیگر اجرا شد. در مجموع با ۸ عملیات تسطیح، ۵۴ تیمار اجرا شد. فشار باد چرخ در سه سطح ۱۸، ۲۵ و ۳۲ psi توسط پمپ باد تأمین شده و به وسیله فشارسنج عقربه‌ای (مانومتر) اندازه‌گیری و تنظیم شد. بار عمودی وارد شده بر چرخ در سه سطح ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ کیلوگرم لحاظ شد. برای تنظیم بار عمودی از یک سلول

برای کاهش خطاهای احتمالی، هر آزمایش با سه بار تکرار انجام شد و میانگین تکرارها به ثبت رسید. تعداد ۲۷ تیمار با سرعت پیشروی ۰/۳۸۶ کیلومتر بر ساعت انجام شد. پس از آن، با عوض کردن پولی‌های موتورالکتریکی و جعبه‌دنده با یکدیگر، سرعت پیشروی به ۰/۸۷۹ کیلومتر بر ساعت تغییر یافت و ۲۷ تیمار نیز در این سرعت پیشروی ثبت گردید. باتوجه به عرض چرخ و قابلیت جابجایی عرضی چرخ بر روی حامل انباره خاک، ۶

آن‌ها به واسطه یک بردار گرادیان انجام می‌گردد. بردار گرادیان مقیاسی برای ارزیابی عملکرد مدل ANFIS است. بدین منظور در آموزش ساختار ANFIS از روش ترکیبی که ترکیب روش حداقل مربعات و روش پس انتشار است، استفاده شد و حد خطا (Error tolerance) که برای ایجاد یک معیار توقف آموزش مورد استفاده قرار می‌گیرد، بر روی صفر و تکرارها (Epochs) بر روی عدد ۳۰ تنظیم شد. به طور کلی منظور از Epochs تعداد مراحل آموزش شبکه است که در این صورت آموزش شبکه حداکثر ۳۰ بار تکرار می‌شود. به علاوه، به منظور ارزیابی مدل‌های خروجی ANFIS از دو عامل ضریب تبیین (R^2) و میانگین مربعات خطا (MSE) استفاده شد که در ادامه ارائه شده‌اند:

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

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

در این معادله‌ها، Y_{ac} ، Y_{pr} و Y_{me} به ترتیب، مقادیر اندازه‌گیری شده، پیش‌بینی شده و میانگین مدل‌های توسعه یافته هستند.

مدل رگرسیونی استفاده شده

جهت تعیین سهم متغیرهای مستقل در پیش‌بینی متغیر وابسته از تحلیل رگرسیون استفاده می‌شود. در تحلیل رگرسیون هدف پیش‌بینی تغییرات متغیر وابسته با توجه به تغییرات متغیرهای مستقل است. یکی از مدل‌های رگرسیونی مدل رگرسیون خطی است. مزیت رگرسیون خطی این است که فهمیدن و کار با آن ساده است و در حالت کلی برای پیش‌بینی مناسب است. رگرسیون خطی چند متغیره روشی برای تحلیل مشارکت جمعی و فردی دو یا چند متغیر مستقل در تغییرات یک متغیر وابسته است. در این پژوهش از مدل پیش‌بینی رگرسیون خطی چند متغیره در نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶/۰ استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس اثر تغییر متغیرهای ورودی بر متغیرهای خروجی تحت بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. اثر تغییر متغیرها به غیر از اثرات سه گانه آن‌ها بر عمق فرورفتگی معنی‌دار و نتایج سایر تحقیقات هم بیان‌گر همین موضوع است (Diserens, 2009; Diserens

نیروی ۵۰۰ کیلوگرمی استفاده شده و میزان فرورفتگی چرخ در خاک (عمق نفوذ چرخ) پس از هر بار طی کردن مسیر، توسط ریزسنج رقمی اندازه‌گیری شد (شکل ۱). کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری نیز در نرم‌افزار آماری Genstat نسخه ۱۴ انجام گرفت و جهت رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۹ استفاده شد.

پیش‌بینی با استفاده از هوش مصنوعی

روش‌های پیش‌بینی ویژگی‌های تحت بررسی در تحقیقات علمی به سه دسته کلی معادلات ریاضی و رگرسیون به اضافه مدل‌های رایانه‌ای تقسیم می‌گردند. در این بین، مدل‌های کامپیوتری و برنامه‌های شبیه‌سازی به دلیل پیشرفتی که داشته‌اند و هم‌چنین به علت عدم اجرای عملیات وقت‌گیر و پرهزینه مزرعه‌ای، بسیار مورد توجه محققین بخش مکانیک خاک و کشاورزی قرار گرفته است و آنان توانسته‌اند مدل‌ها و پیش‌بینی‌های خوبی از برهم‌کنش چرخ و خاک انجام دهند. بدین منظور کافی است، یکبار داده‌برداری مزرعه‌ای در شرایطی خاص صورت پذیرد تا بتوان با استفاده از این روش‌های پیش‌بینی، خروجی‌ها را برای سایر حالات عملیات مزرعه‌ای پیش‌بینی نمود. از آنجا که تقابل میان چرخ و خاک حالت غیرخطی دارد، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی بسیار پرکاربرد و مؤثر هستند.

در بین روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، سامانه استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) با بهره‌گیری از مزیت هر دو روش شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی، بسیار کارآمد است که در این پژوهش از آن استفاده شد. این ساختار در بستر نرم‌افزار MATLAB نسخه R2020a صورت پذیرفت و همچنین ۵۴ داده در دسترس برای متغیرهای مستقل در ورودی (بار عمودی، فشار باد چرخ و سرعت پیشروی) و هر کدام از دو متغیر در خروجی (میزان فرورفتگی چرخ در خاک و مقاومت غلتشی) وجود دارد که داده‌ها به دو دسته ۴۴ تایی برای آموزش شبکه و ۱۰ تایی برای آزمون مدل خروجی تقسیم شدند. تعداد زیادی از مدل‌های ANFIS با توابع عضویت متفاوت (Tranf ، Gaussmf ، Pimf ، Trimf ، dsigmf) یافتن بهترین مدل ANFIS برای پیش‌بینی خروجی‌های مذکور مورد بررسی قرار گرفتند. توابع عضویت در طول فرآیند آموزش شبکه ANFIS تغییر می‌یابند و تطبیق

اثر سرعت پیشروی بر مقاومت غلتشی چرخ متحرک را نتایج سایر محققین نیز تأیید می‌کند (Coutermarsh, 2007; Sharifi Malvajerdi et al., 2011). تجزیه واریانس اثر متغیرها به غیر از سرعت پیشروی بر مقاومت غلتشی معنی‌دار نیست. علت این امر، عدم نفوذ چرخ به درون خاک به دلیل سرعت بالای عبور چرخ بر روی سطح خاک است. معنی‌دار بودن

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثر تغییر متغیرهای ورودی بر مقاومت غلتشی و عمق فرورفتگی

میانگین مربعات	مقاومت غلتشی (kgf)	عمق فرو رفتگی (mm)	درجه آزادی	منابع تغییر
۲۴/۵۶۳۲۷**	۴۹/۶۹۱*		۱	سرعت
۶۷/۴۲۵۷۲**	۲/۸۵۰ ^{ns}		۲	باد چرخ
۰/۵۰۷۲۱**	۲/۹۵۴ ^{ns}		۲	بار عمودی
۳/۰۴۹۶۲**	۳/۵۵۸ ^{ns}		۲	سرعت × باد چرخ
۰/۸۹۱۷۶**	۳/۶۱۸ ^{ns}		۲	سرعت × بار عمودی
۰/۷۵۵۱۹**	۲/۴۰۳ ^{ns}		۴	باد چرخ × بار عمودی
۰/۱۶۱۳۲ ^{ns}	۳/۰۵۵ ^{ns}		۴	سرعت × باد چرخ × بار عمودی
۰/۰۴۷۶۱	۱/۲۱۰		۳۶	خطا

* و ** به ترتیب سطح معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ns عدم معنی‌دار بودن

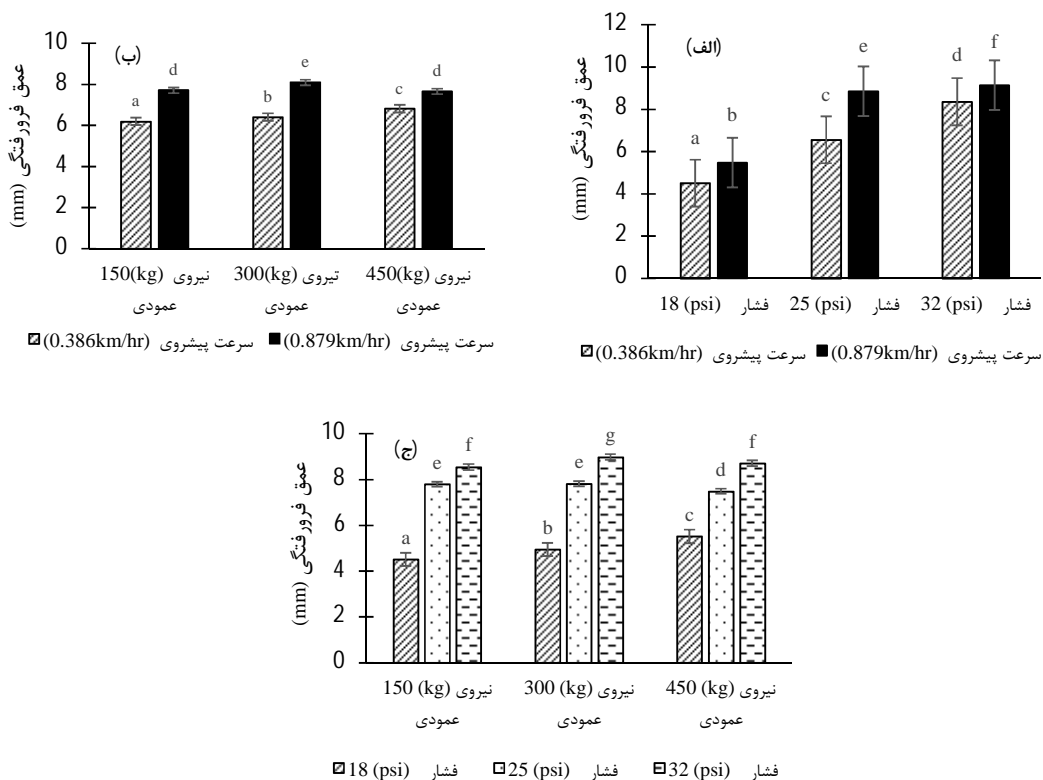
اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه فشار باد، بار عمودی و

سرعت پیشروی

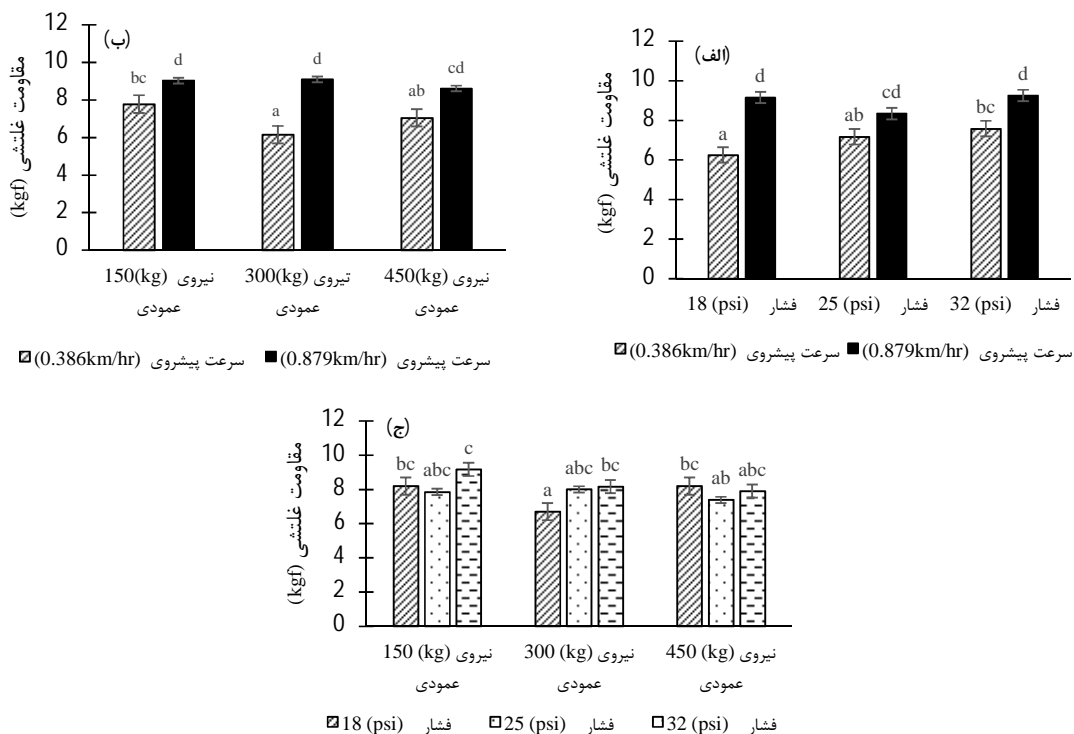
با توجه به شکل ۲ میزان فرورفتگی چرخ درون خاک، رابطه مستقیمی با فشار باد چرخ دارد. با افزایش فشار باد چرخ، میزان فرورفتگی چرخ در خاک نیز افزایش پیدا می‌کند که با نتایج سایر محققین همخوانی داشت (Arvidsson & Keller, 2007; Sharifi Malvajerdi et al., 2011). همچنین با توجه به شکل، افزایش سرعت پیشروی باعث افزایش عمق نفوذ چرخ در خاک می‌شود که در این صورت، بیش‌ترین میزان فرورفتگی در خاک مربوط به فشار ۳۲ psi در سرعت ۰/۸۷۹ کیلومتر بر ساعت به میزان ۹/۱۳ میلی‌متر بوده و کم‌ترین میزان فرورفتگی در فشار ۱۸ psi و سرعت پیشروی ۰/۳۸۶ کیلومتر بر ساعت به میزان ۴/۵۱ میلی‌متر است. عموماً نتیجه عکس در تحقیقات مشابه ارائه گردیده است. یعنی با افزایش سرعت پیشروی، مدت زمان بارگذاری خاک زیر چرخ کاهش یافته و باید میزان نفوذ (نشست) چرخ در خاک نیز کاهش یابد. علت نتیجه عکس در پژوهش حاضر به دلیل سرعت پیشروی‌های کمی (کمتر از ۱ کیلومتر بر ساعت) است که اعمال شده‌اند.

با توجه به شکل ۲، با افزایش نیروی عمودی وارد بر چرخ معادل با افزایش وزن روی چرخ، چرخ نفوذ بیش‌تری در خاک پیدا می‌کند و در نتیجه باعث افزایش میزان فرورفتگی چرخ در خاک می‌شود که با نتایج سایر تحقیقات مطابقت دارد (Carman, 2008; Johari et al., 2011; Sharifi Malvajerdi et al., 2011). اثر متقابل فشار باد چرخ و نیروی عمودی بر میزان عمق فرورفتگی چرخ نشان می‌دهد که در هر نیروی عمودی با افزایش فشار باد چرخ، چون سطح تماس چرخ با خاک کم شده و لذا فشار تماسی چرخ- خاک افزایش می‌یابد، عمق فرورفتگی چرخ در خاک افزایش یافته و به طور کلی فشار باد چرخ و نیروی عمودی وارد بر چرخ رابطه مستقیمی با عمق فرورفتگی چرخ در خاک دارد که با نتایج سایر محققین همخوانی دارد (Keller, 2007; & Arvidsson, 2009; Sharifi Malvajerdi et al., 2011).

اثر متقابل متغیرها بر روی مقاومت غلتشی در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج تجزیه واریانس در جدول ۱ نشان داد که تنها اثر سرعت پیشروی بر مقاومت غلتشی معنی‌دار است. همچنین اثر متقابل سه‌گانه سرعت پیشروی، بار عمودی و فشار باد چرخ در میانگین مقاومت غلتشی و عمق فرورفتگی چرخ درون خاک در جدول ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۲- الف) اثر متقابل سرعت پیشروی و فشار باد چرخ و (ب) سرعت پیشروی و نیروی عمودی و (ج) فشار باد چرخ و نیروی عمودی بر میزان فرورفتگی چرخ درون خاک



شکل ۳- الف) اثر متقابل سرعت پیشروی و فشار باد چرخ، ب) سرعت پیشروی و نیروی عمودی و ج) فشار باد چرخ و نیروی عمودی بر مقاومت غلتشی

جدول ۲- اثر متقابل سه گانه متغیرها در میانگین مقاومت غلتشی و عمق فرورفتگی چرخ متحرک

عمق فرورفتگی (mm)	مقاومت غلتشی (kgf)	نیروی عمودی (kg)	فشار باد چرخ (Psi)	سرعت پیشروی (km/hr)
۴/۰۶۳ ^a	۷/۵۷۰ ^{bcd}	۱۵۰		
۴/۳۸۷ ^a	۳/۹۵۳ ^a	۳۰۰	۱۸	
۵/۰۸۷ ^b	۷/۲۲۷ ^{bcd}	۴۵۰		
۶/۵۵۷ ^e	۶/۹۸۱ ^{bc}	۱۵۰		
۶/۳۸۳ ^e	۷/۲۷۹ ^{bcd}	۳۰۰	۲۵	۰/۳۸۶
۶/۷۳۰ ^e	۷/۲۳۸ ^{bcd}	۴۵۰		
۷/۹۷۳ ^f	۸/۷۹۳ ^{bcd}	۱۵۰		
۸/۴۵۷ ^{gh}	۷/۲۴۹ ^{bcd}	۳۰۰	۳۲	
۸/۶۳۷ ^e	۶/۷۰۱ ^b	۴۵۰		
۴/۹۷۳ ^b	۸/۸۲۸ ^{bcd}	۱۵۰		
۵/۵۲۰ ^c	۹/۴۶۱ ^e	۳۰۰	۱۸	
۵/۹۵۳ ^d	۹/۱۷۶ ^{de}	۴۵۰		
۹/۰۵۰ ^{ij}	۸/۷۳۹ ^{bcd}	۱۵۰		
۹/۲۵۰ ^{jk}	۸/۷۴۴ ^{bcd}	۳۰۰	۲۵	۰/۸۷۹
۸/۲۵۰ ^{fg}	۷/۵۵۲ ^{bcd}	۴۵۰		
۹/۱۱۷ ^{ij}	۹/۵۵۴ ^e	۱۵۰		
۹/۵۱۷ ^k	۹/۰۹۳ ^{cde}	۳۰۰	۳۲	
۸/۷۸۳ ^{hi}	۹/۱۱۱ ^{cde}	۴۵۰		

حروف متفاوت نشانگر اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

مدل پیش‌بینی رگرسیون چند متغیره

مدل رگرسیونی چندمتغیره خطی مورد استفاده شامل ویژگی‌های تحت بررسی (بار عمودی، فشار باد چرخ و سرعت پیشروی) به منظور پیش‌بینی عمق فرورفتگی چرخ درون خاک و مقاومت غلتشی با روش گام به گام توسعه داده شد. این مدل‌ها به همراه ضریب تبیین و میانگین مطلق خطای مربوطه در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

در این جدول، ضریب W برای پیش‌بینی مقاومت غلتشی منفی است. یعنی با افزایش بار عمودی، مقاومت غلتشی کاهش می‌یابد. اما در بخش‌های الف و ج شکل ۳ که نیروی عمودی دخیل است، این روند کاهشی همیشگی نیست، بلکه بعضی مواقع کاهش و بعضی مواقع افزایش داشته است.

جدول ۳- مدل پیش‌بینی رگرسیونی چندمتغیره خطی برای ویژگی‌های عمق فرورفتگی و مقاومت غلتشی

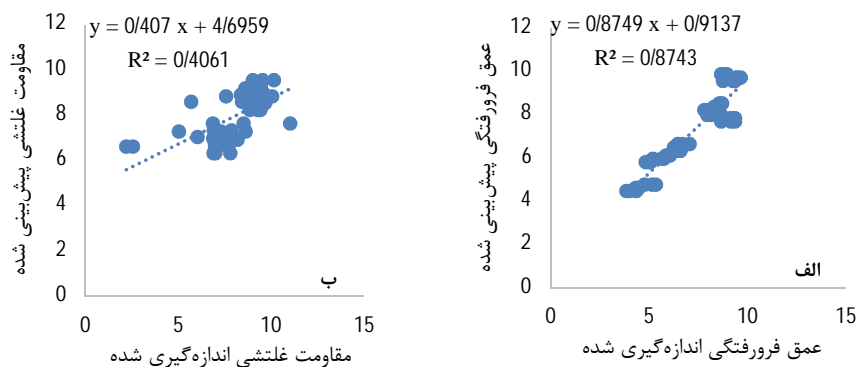
ویژگی	میانگین مربعات خطا	ضریب تبیین	مدل	محدوده ویژگی‌های ورودی
عمق فرورفتگی	۰/۸۶۴	۰/۸۷۴۳	$W + 0.01P - 1.562 + 2.736V$	$1 < V < 7$ کیلومتر بر ساعت
مقاومت غلتشی	۰/۹۱۸	۰/۴۰۶۱	$W + 0.051P - 0.02W + 3.892V - 0.798$	$150 < W < 450$ کیلوگرم $18 < P < 32$ پوند بر اینچ مربع

V - سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت)، W - بار عمودی (کیلوگرم)، P - فشار باد چرخ (پوند بر اینچ مربع)

اعتبارسنجی معادلات رگرسیونی

داده‌های مربوط به عمق فرورفتگی چرخ درون خاک و مقاومت غلتشی حاصل از پیش‌بینی توسط معادله رگرسیونی چند متغیره خطی در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده در انبار خاک به ترتیب در شکل‌های ۴- الف و ۴- ب ارائه شده‌اند. این شکل نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی ارائه شده، میزان عمق فرورفتگی چرخ

درون خاک و مقاومت غلتشی را به ترتیب با دقت تقریباً بالا ($R^2=0.8743$) و پایینی ($R^2=0.4061$) تحت برآزش خطی پیش‌بینی می‌کند. اصولاً مقاومت غلتشی در همبستگی مثبت با عمق نفوذ (نشست) چرخ است. هر چه عمق نفوذ چرخ بیشتر گردد، مقاومت غلتشی هم بیشتر خواهد شد. این روند در پژوهش حاضر نیز مشاهده شد.



شکل ۴- همبستگی داده‌های پیش‌بینی شده توسط معادلات رگرسیون خطی و اندازه‌گیری شده برای عمق فرورفتگی (الف) و مقاومت غلتشی (ب)

در ورودی، بهترین نتیجه را با کم‌ترین میانگین مربعات خطا و بیش‌ترین ضریب همبستگی در خروجی حاصل می‌نماید. منظور از ۳۰ تکرار در این جدول، تعداد Epoch ها در نرم افزار است.

پیش‌بینی به روش ANFIS

عمق فرورفتگی چرخ در خاک

با توجه به جدول ۴ که نشان دهنده دقت مدل‌های مختلف ANFIS در پیش‌بینی عمق فرورفتگی چرخ در خاک است، می‌توان نتیجه گرفت که کدام تابع عضویت

جدول ۴- مدل‌های مختلف ANFIS در مورد عمق فرورفتگی چرخ درون خاک

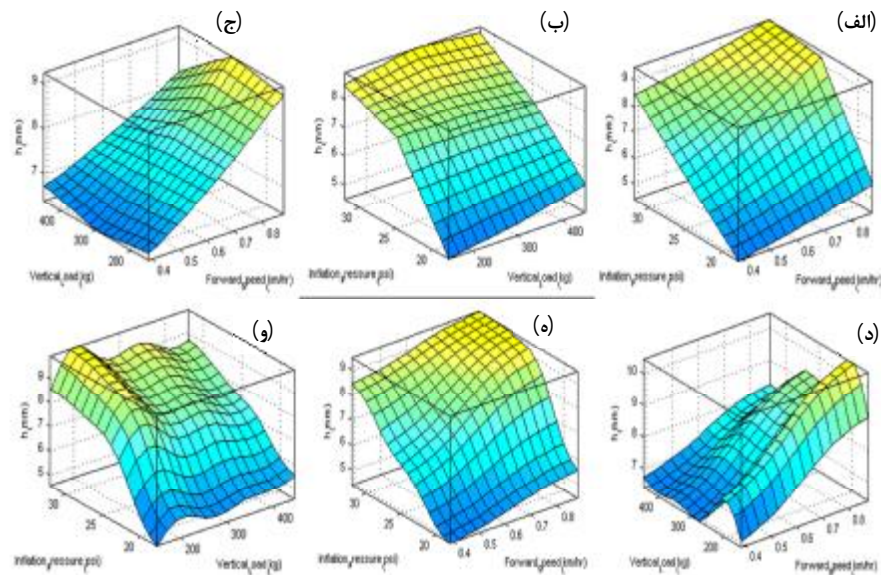
مدل	نوع تابع عضویت		تعداد توابع عضویت		ضریب تبیین (R^2)
	ورودی	خروجی	ورودی	تکرار	
۱	Trimf	Linear	۲.۳.۳	۳۰	۰/۰۲۳۱
۲	Gaussmf	Linear	۲.۳.۳	۳۰	۰/۰۲۸۶
۳	Pimf	Hybrid	۲.۳.۳	۳۰	۰/۰۳۴۵
۴	dsigmf	Hybrid	۲.۳.۳	۳۰	۰/۰۴۲۲
۵	Tramf	Linear	۲.۳.۳	۳۰	۰/۰۵۰۱

و همین‌طور با افزایش فشار باد چرخ و سرعت پیشروی میزان فرورفتگی چرخ در خاک هم افزایش پیدا کرده است. همچنین با استفاده از سطوح این شکل‌ها، می‌توان خروجی مدل مورد نظر را برای ورودی خاص که داده‌برداری نشده را محاسبه نمود.

همچنین با توجه به شکل ۶ که همبستگی میان داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده عمق فرورفتگی چرخ در خاک توسط مدل اول ANFIS را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که این مدل دارای ضرایب همبستگی بسیار بالایی هستند ($R^2 > 0.99$).

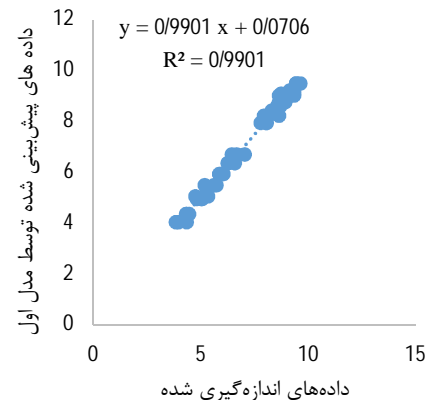
بالا بودن ضرایب همبستگی نشان می‌دهد، که مدل‌های ANFIS توانسته‌اند با دقت بسیار بالا با استفاده از ورودی‌های اندازه‌گیری شده در انباره خاک (بار عمودی وارد بر چرخ، فشار باد چرخ و سرعت پیشروی) عمق فرورفتگی چرخ در خاک را پیش‌بینی کنند.

همانگونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، بین مدل‌های مختلف، مدل‌های شماره ۱ و ۲ دارای بالاترین ضریب همبستگی و کاملاً برابر هستند. با توجه به میانگین مربعات خطا، مدل ۱ دارای میانگین مربعات خطای کمتری بوده و دقیق‌تر است. شکل ۵ تغییرات عمق فرورفتگی چرخ در خاک را که تحت تأثیر نیروی عمودی وارد بر چرخ، فشار باد چرخ و سرعت پیشروی حاصل از دو مدل بهینه ANFIS است، نشان می‌دهد. سه سطح نشان داده شده در قسمت بالایی شکل مربوط به مدل اول و سه سطح نشان داده شده در قسمت پایین این شکل مربوط به مدل دوم است. با توجه به نمودارهای مدل اول که دارای پیکسل‌های کوچکتری هستند، نمودارها توانسته‌اند تغییرات را نسبت به مدل دوم بهتر نشان دهند و مشاهده می‌شود که با افزایش نیروی عمودی میزان فرورفتگی چرخ در خاک افزایش پیدا کرده



شکل ۵- تغییرات عمق فرورفتگی چرخ در خاک با توجه به تغییرات فشار باد چرخ، بار عمودی وارد بر چرخ و سرعت پیشروی در مدل‌های ۱ (الف، ب و ج) و ۲ (د، ه و ن) پیش‌بینی ANFIS (=H عمق فرورفتگی چرخ در خاک، Inflation Pressure = فشار باد چرخ (psi)، Vertical Load = بار عمودی وارد بر چرخ (kg) و Forward Speed = سرعت پیشروی (km/hr))

اما با توجه به میانگین مربعات خطا، مدل ۵ دارای میانگین مربعات خطای کم‌تری است و بعد از مدل شماره ۵، مدل‌های ۱ و ۳ به ترتیب مربعات خطای کم‌تری دارند، در ادامه به بررسی دو مدل ۵ و ۱ خواهیم پرداخت. شکل ۷ تغییرات مقاومت غلتشی را تحت تأثیر نیروی عمودی وارد بر چرخ، فشار باد چرخ و سرعت پیشروی حاصل از دو مدل بهینه ANFIS نشان می‌دهد. سه سطح نشان داده شده در قسمت بالایی شکل ۷ مربوط به مدل اول و سه سطح نشان داده شده در قسمت پایین این شکل مربوط به مدل ۵ است. در قسمت بالایی مرتبط با مدل اول، همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در نمودارهای چپ و راست که سرعت پیشروی دخیل است، روند مونوتونیک و منطقی نیست. در واقع با تغییر سرعت پیشروی، روند رفت و برگشتی ملاحظه می‌گردد که میانگین مربعات خطا را بالا برده است. اما در مدل ۵ در قسمت پایینی، روند تغییرات مقاومت غلتشی با تغییر سرعت، مونوتونیک و منطقی است و میانگین مربعات خطا کم است و تأکیدی بر ارجحیت مدل است. همچنین با استفاده از سطوح این شکل‌ها، می‌توان خروجی مدل مورد نظر را برای ورودی خاص که داده‌برداری نشده است را محاسبه کرد (Askari & Abbaspour-Gilandeh, 2019; Shafaei et al., 2019).



شکل ۶- همبستگی میان داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده عمق فرورفتگی چرخ در خاک توسط مدل اول ANFIS

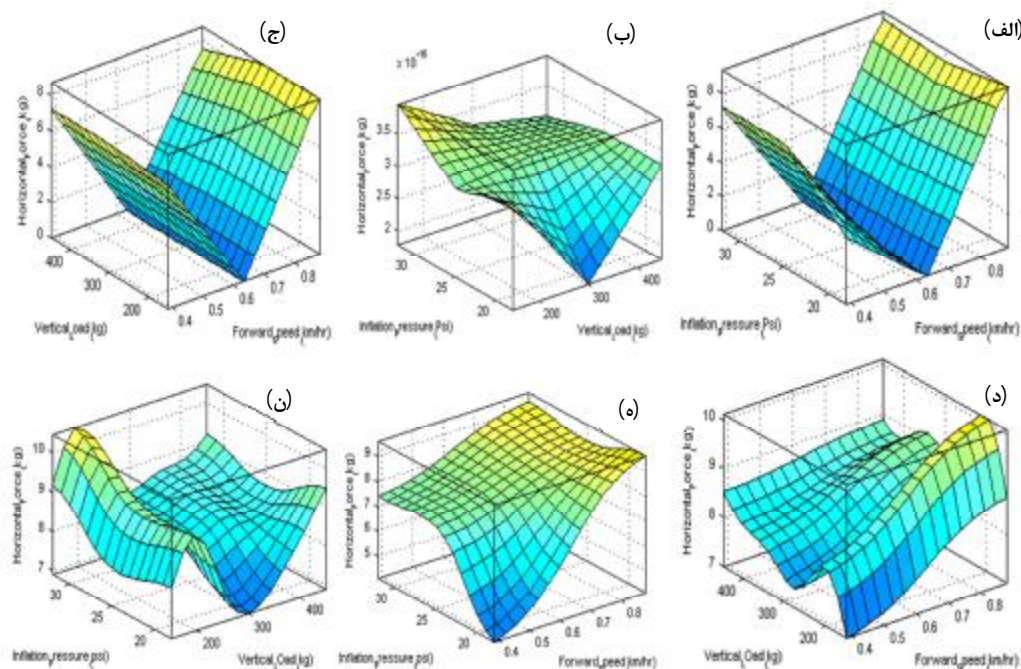
مقاومت غلتشی

با توجه به جدول ۵ که مدل‌های مختلف ANFIS در مورد مقاومت غلتشی است را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول می‌توان نتیجه گرفت، که کدام تابع عضویت در ورودی، بهترین نتیجه را با کم‌ترین مربعات خطا و بیش‌ترین ضریب همبستگی، در خروجی برای مقاومت غلتشی به‌دست می‌آورد.

همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، بین مدل‌های مختلف ANFIS، مدل‌های ۱، ۳ و ۵ دارای بالاترین ضریب همبستگی بوده و با یک‌دیگر برابر هستند.

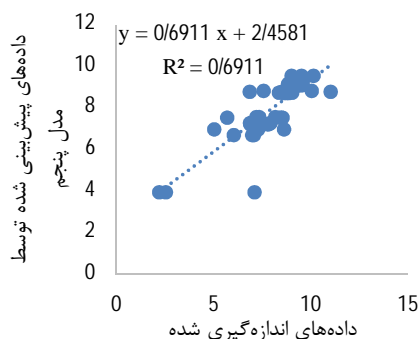
جدول ۵- مدل‌های مختلف ANFIS در مورد مقاومت غلتشی

مدل	نوع تابع عضویت		تعداد توابع عضویت		میانگین مربعات خطا (MSE)	ضریب تبیین (R ²)
	ورودی	خروجی	ورودی	تکرار		
۱	Trimf	Linear	۲،۳،۳	۳۰	۰/۰۱۳۱	۰/۶۹۱۱
۲	Gaussmf	Linear	۲،۳،۳	۳۰	۰/۰۴۸۶	۰/۶۰۸۸
۳	Pimf	Hybrid	۲،۳،۳	۳۰	۰/۰۱۴۵	۰/۶۹۱۱
۴	dsigmf	Hybrid	۲،۳،۳	۳۰	۰/۰۳۲۲	۰/۵۹۱۲
۵	Tranf	Linear	۲،۳،۳	۳۰	۰/۰۱۰۱	۰/۶۹۱۱



شکل ۷- تغییرات مقاومت غلتشی، با توجه به تغییرات فشار باد چرخ، بار عمودی وارد بر چرخ و سرعت پیشروی در مدل‌های ۱ (الف، ب و ج) و ۵ (د، ه و ن) پیش‌بینی ANFIS (مقاومت غلتشی، Inflation Pressure = فشار باد چرخ (پوند بر اینچ مربع)، Forward Speed = سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت))

چرخ و خاک و ... را با دقت بالایی پیش‌بینی نمایند (Carman, 2008; Gonaydin, 2009; Diserens *et al.*, 2011).



شکل ۸- همبستگی میان داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده مقاومت غلتشی توسط مدل پنجم ANFIS

با توجه به شکل ۸ که همبستگی میان داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده مقاومت غلتشی توسط مدل‌های اول و پنجم ANFIS را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که این مدل‌ها دارای ضرایب تبیین نسبتاً بالایی هستند ($R^2 > 0.69$). بالابودن ضرایب همبستگی نشان می‌دهد، که مدل‌های ANFIS توانسته‌اند با دقت بسیار بالا با استفاده از ورودی‌های اندازه‌گیری شده در انباره خاک (بار عمودی وارد بر چرخ، فشار باد چرخ و سرعت پیشروی) مقاومت غلتشی را پیش‌بینی کنند. نتایج سایر تحقیقات نیز نشان داد که روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی از جمله شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی و ANFIS می‌توانند ویژگی‌های برهم‌کنش چرخ و خاک مانند زمین‌گیرایی چرخ، فشردگی خاک، سطح تماس

نتیجه‌گیری

بار عمودی وارد شده، میزان فشار باد چرخ و سرعت پیشروی به همراه اثرات دوگانه آن‌ها بر میزان فرورفتگی چرخ در خاک بسیار مؤثر بودند؛ اما اثر سه گانه ویژگی‌های مذکور بر میزان فرورفتگی چرخ در خاک غیرمعنی‌دار بود. در نیروهای عمودی مختلف با افزایش فشار باد چرخ، عمق فرورفتگی چرخ در خاک افزایش می‌یابد. و در فشارهای باد مختلف با افزایش بار عمودی روی چرخ نیز، عمق فرورفتگی چرخ در خاک افزایش یافته و همچنین افزایش سرعت پیشروی نیز باعث افزایش عمق نفوذ چرخ در خاک می‌شود. در کل می‌توان نتیجه گرفت که عمق فرورفتگی چرخ در خاک رابطه مستقیمی با فشار باد چرخ و نیروی عمودی وارد بر چرخ و سرعت پیشروی دارد. در بخش ANFIS، مدل‌های ۱ و ۲ با توابع عضویت Trimf و Gaussmf به ترتیب با میانگین مربعات خطای 0.0231 و 0.0286 میلی‌متر مربع و ضریب همبستگی یکسان 0.99 ، با اولویت مدل ۱، بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی عمق فرورفتگی چرخ در خاک بودند. در پیش‌بینی عمق فرورفتگی چرخ در خاک، ضریب تبیین (R^2) در پیش‌بینی توسط مدل رگرسیونی به میزان 0.87 و ضریب همبستگی در پیش‌بینی توسط مدل‌های ANFIS به میزان 0.99 است. این امر نشان می‌دهد مدل‌های ANFIS، نسبت به مدل رگرسیونی، می‌توانند ویژگی خروجی را با دقت بسیار بالاتری پیش‌بینی کنند. در بخش ANFIS، مدل‌های ۱، ۳ و ۵ با توابع عضویت Trimf، Pimf و Tramf به ترتیب با میانگین مربعات خطای 0.0132 ، 0.0145 و 0.0101 کیلوگرم نیرو مربع و ضریب همبستگی یکسان 0.69 ، با اولویت مدل ۵، بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی مقاومت غلتشی بودند. در پیش‌بینی مقاومت غلتشی ضریب همبستگی (R^2) در پیش‌بینی توسط مدل رگرسیونی به میزان 0.40 و کمتر از ضریب همبستگی در پیش‌بینی توسط مدل‌های ANFIS به میزان 0.69 است. این امر نشان می‌دهد مدل‌های ANFIS، نسبت به مدل رگرسیونی، می‌توانند مقاومت غلتشی را با دقت بهتری پیش‌بینی کنند. پیشنهاد می‌شود سایر ویژگی‌های تقابل چرخ و خاک مانند فشردگی و سست شدگی خاک زیر چرخ در اثر تردهای بالا نیز با ANFIS و رگرسیون مدل سازی شود و نتایج با یکدیگر مقایسه شوند.

منابع

- Arvidsson, J., & Keller, T. (2007). Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil and Tillage Research*, 96(1): 284-291.
- Askari, M., & Abbaspour-Gilandeh, Y. (2019). Assessment of adaptive neuro-fuzzy inference system and response surface methodology approaches in draft force prediction of subsoiling tines. *Soil and Tillage Research*, 194: 1-8.
- Badgajar, Ch., Flippo, D., & Welch, S. (2022). Artificial neural network to predict traction performance of autonomous ground vehicle on a sloped soil bin and uncertainty analysis. *Computers and electronics in Agriculture*, Manuscript237a5188467e84161d73a99952bf990a.
- Carman, K. (2008). Prediction of soil compaction under pneumatic tires a using fuzzy logic approach. *Journal of Terramechanics*, 45(1): 103-108.
- Coutermarsh, B. (2007). Velocity effect of vehicle rolling resistance in sand. *Journal of Terramechanics*, 44(4): 275-291.
- Diserens, E. (2009). Calculating the contact area of trailer tyres in the field. *Soil and Tillage Research*, 103(2): 302-309.
- Diserens, E., Defossez, P., Duboisset, A., & Alaoui, A. (2011). Prediction of the contact area of agricultural traction tyres on firm soil. *Biosystems Engineering*, 110(2): 73-82.
- Farhadi, P., Golmohammadi, A., Sharifi Malvajerdi, A., & Shahgholi, G. (2019). Finite element modelling of the interaction of a treaded tire with clay - loam soil. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162: 793-806.
- Gonaydin, O. (2009). Estimation of soil compaction parameters by using statistical analyses and artificial neural network. *Environmental Geology*, 57(1): 203-215.
- Johari, A., Javadi, A. A., & Habibagahi, G. (2011). Modelling the mechanical behaviour of unsaturated soils using a genetic algorithm - based neural network. *Computers and Geotechnics*, 38: 2-13.
- Lajani, A., Nikbakht, A. M., Askari, M., & Salar, M. R. (2024). Design, construction and evaluation of a miniature soil bin plus predicting the measured parameters during primary tests using ANFIS. *Heliyon*, 10: e24041.
- Pentos, K., & Pieczarka, K. (2017). Applying an artificial neural network approach to the analysis of tractive properties in changing soil conditions. *Soil and Tillage Research*, 165: 113-120.

- Pieczarka, K., Pentos, K., Lejman, K., & Owsiak, Z. (2018). The use of artificial intelligence methods for optimization of tractive properties on silty clay loam. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 63(1): 63-68.
- Raper, R. L. (2005). Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics*, 42(3): 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., & Godwin, R. J. (2011). The effect of a flexible carcass tyre inflation pressure on some soil compaction related factors. *Journal of Watershed Management Researches (Pajouhesh and Sazandegi)*, 24(91): 43-48. (in Persian).
- Taghavifar, H., & Mardani, A. (2014). Effect of velocity wheel load and multipass on soil compaction. *Journal Of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(1): 57-66.
- 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 Trans syst Man Cybern Bcybern*, 40(1): 241-252.
- Yousefi, M., Mousavi Seyedi, S. R., & Askari, M. (2022). Predicting the soil-wheel contact area under the effect of vertical load, tire inflation pressure and forward speed at soil bin using ANFIS. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 22(80): 67-76. (In Persian).