

مقاله پژوهشی

پیش‌بینی پارامترهای مرتبط با کشش تراکتور حین عملیات زیرشکنی با استفاده از سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS)

محمد عسکری^{۱*}، یوسف عباسپور گیلانده^۲ و ابراهیم تقی‌نژاد^۳

چکیده

در این تحقیق، از سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS) به منظور پیش‌بینی پارامترهای مرتبط با کشش تراکتور شامل توان مالبندی، میزان لغزش چرخ‌های محرک، بازده کششی و بازده کل انرژی در مجموعه تراکتور- ادوات تحت تأثیر متغیرهای مستقل شامل نوع شاخه (زیرشکن و پاراپلو)، عمق (۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر) و سرعت پیشروی (۱/۸، ۲/۳، ۲/۹ و ۳/۵ کیلومتر بر ساعت) حین عملیات زیرشکنی استفاده شد. از داده‌های مزرعه‌ای برای ایجاد مدل‌های رگرسیونی و ANFIS به منظور پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی استفاده و نتایج دو سری مدل با یکدیگر مقایسه شد. نتایج مزرعه‌ای نشان داد که همه متغیرهای مستقل به غیر از بازده کششی، اثر معنی‌داری بر پارامترهای تحت بررسی داشتند. افزایش عمق و سرعت پیشروی به افزایش لغزش چرخ‌های محرک، توان مالبندی، بازده کل انرژی و کاهش بازده کششی تراکتور انجامید. به علاوه با در نظر گرفتن پارامترهای تحت بررسی، پاراپلو نسبت به زیرشکن عملکرد بهتری داشت. نتایج بخش ANFIS نشان داد که به ترتیب در مورد لغزش، توان مالبندی، بازده کششی و بازده کل انرژی، توابع عضویت Trimf، dsigmf، Primf و Gaussmf با میانگین مربعات خطای ۰/۰۱۵۹، ۰/۰۲۳۱، ۰/۰۲۱۲ و ۰/۰۲۲۴ و ضرایب تبیین ۰/۹۹۹۶، ۰/۹۹۹۹، ۰/۹۹۸۵ و ۰/۹۹۹۷، بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی هستند. مدل‌های ANFIS نسبت به مدل‌های رگرسیونی دقت بالاتری دارند و با استفاده از سطوح شکل‌های خروجی در ANFIS می‌توان خروجی مدل را برای یک ورودی خاص محاسبه کرد.

واژه‌های کلیدی: ANFIS، بازده کششی، بازده کل انرژی، پاراپلو، زیرشکن، لغزش.

ارجاع: عسکری م. عباسپور گیلانده ی. و تقی‌نژاد ا. ۱۳۹۹. پیش‌بینی پارامترهای مرتبط با کشش تراکتور حین عملیات زیرشکنی با استفاده از سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS). نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۹(۲): ۳۵-۵۰.

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

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۳- دانشیار گروه مهندسی فناوری کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی.

* نویسنده مسئول: m.maskari@sanru.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۷

مقدمه

با هم دارند و طراحی و ساخت ادوات مناسب و مقرون به صرفه از لحاظ اقتصادی برای شکافتن مؤثر خاک در لایه‌های عمقی و در آن واحد، حفظ بقایای گیاهی بر روی سطح خاک کاملاً ضروری خواهد بود.

روش‌های پیش‌بینی را در حالت کلی می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود: معادلات رگرسیونی، مدل‌های تحلیلی و نیمه‌تحلیلی و مدل‌های کامپیوتری. معادلات رگرسیونی متعددی برای پیش‌بینی پارامترهای مرتبط با کشش تراکتور با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای ارائه شده‌اند (Kheiralla *et al.*, 2004; Rashidi *et al.*, 2013; Askari *et al.*, 2017). برخی دیگر از محققین مدل‌های تحلیلی در این خصوص ارائه داده‌اند (Summers *et al.*, 1986; Bashford *et al.*, 1991). مدل‌های ریاضی ارائه شده توسط استاندارد (ASABE standard D497.7 (2011) یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین معادلات ریاضی در پیش‌بینی پارامترهای مرتبط با کشش تراکتور از جمله توان مالبندی، بازده کششی و لغزش چرخ‌های محرک هستند. مدل‌های کامپیوتری و برنامه‌های شبیه‌ساز به‌منظور پیش‌بینی نیروهای وارد بر ابزارهای خاک‌ورز در تعیین بسیاری از فاکتورهای مؤثر بدون انجام آزمون‌های زمان‌بر و طاقت‌فرسای مزرعه‌ای به محققین کمک می‌کنند. این ابزارها همچنین به طراحان ادوات کشاورزی در طراحی و بهینه‌سازی ادوات جدید و موجود کمک شایانی می‌نمایند (Zeng *et al.*, 2017). به‌دلیل ماهیت غیرخطی پارامترهای مرتبط با کشش تراکتور، روش‌های مبتنی بر هوش محاسباتی مانند شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج فازی (FIS) توسط برخی از محققین بکارگرفته شده‌اند (Marakoglu & Çarman, 2010; Mohammadi *et al.*, 2012; Akbarnia *et al.*, 2014). سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS) به‌عنوان یک ابزار جدید، تلفیقی از دو روش مذکور بوده و دارای مزایای هر دو روش است (Taghavifar & Mardani, 2014). تحقیقات بسیار کمی در خصوص بررسی توانایی ANFIS به‌منظور پیش‌بینی پارامترهای مختلف مرتبط با کشاورزی انجام شده است (Al-Hamed *et al.*, 2014; Taghavifar & Mardani, 2017; Pandiyan *et al.*, 2014) و طبق بررسی‌های صورت گرفته تاکنون هیچ تحقیقی در خصوص کاربرد ANFIS در

داده‌های عملکرد مرتبط با تراکتورها و ادوات مختلف برای مدیریت ماشین‌آلات درون مزرعه و سازندگان آن‌ها ضروری است (Ranjbarian *et al.*, 2017). انتخاب مناسب تراکتورها و ادوات برای یک عملیات مزرعه‌ای خاص به‌منظور کاهش انرژی ورودی برای تولید محصول بر اساس همین داده‌های عملکرد انجام می‌شود (AI- (Suhaihani & Al-Janobi, 1997). سنجش پارامترهای عملکردی تراکتور و ادوات متصل به آن با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری، نظر بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است (Sahu & Raheman, 2006; McLoughlin *et al.*, 2008; Ranjbarian *et al.*, 2017). نتایج بسیاری از این تحقیقات نشان می‌دهد که تلفیق نادرست تراکتور و ادوات کشاورزی، مهم‌ترین عامل در افزایش لغزش چرخ‌های محرک و کاهش توان مالبندی و بازده کششی تراکتور است (Samiei Far *et al.*, 2015; Ranjbarian *et al.*, 2017).

انرژی مورد نیاز خاک‌ورزی، بخش قابل‌توجهی (۲۵ الی ۴۰ درصد) از انرژی مصرف‌شده در تولید محصول را شامل می‌شود (Askari *et al.*, 2011; Sorin *et al.*, 2013) و کاهش این انرژی مصرفی و افزایش بازده کششی و بهبود عملکرد تراکتور به یک چالش برای مهندسين کشاورزی و کشاورزان تبدیل شده است. زیرشکن به‌عنوان ابزاری که برای از بین بردن سخت‌لایه موجود در عمق خاک به کار می‌رود، به نیروی کششی بالایی نیاز دارد و کشنده خود را بسیار به چالش خواهد کشاند. به‌منظور کاهش انرژی مصرفی و افزایش راندمان عملیات زیرشکنی، زیرشکن مرسوم با سایر ادوات مانند پاراپلو و زیرشکن کج‌ساق جایگزین شده است (Pidgeon, 1983; Çelik & Raper, 2012). از طرف دیگر، در دهه‌های اخیر، اجرای خاک‌ورزی حفاظتی که موجب کاهش فرسایش خاک به کمک باقی‌گذاشتن بقایای گیاهی بر روی سطح خاک می‌شود، در سراسر جهان گسترش یافته‌است (Subbulakshmi *et al.*, 2009). خاک‌ورزی با استفاده از انواع شاخه‌های زیرشکن، خاک‌ورزی حفاظتی تلقی می‌گردد زیرا حداقل ۳۰ درصد بقایای گیاهی بر روی سطح خاک باقی خواهد ماند که در تحقیقات زیادی گزارش شده است (Raper *et al.*, 2000; Çelik & Raper, 2012; Askari *et al.*, 2017). بنابراین، عملیات زیرشکنی و خاک‌ورزی حفاظتی ارتباط تنگاتنگی

1- Artificial Neural Network

2- Fuzzy Inference System

3- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

برای محاسبه توان مالبندی تراکتور از معادله زیر استفاده شد:

$$DP = D \times Va \quad (2)$$

که در آن، DP = توان مالبندی (کیلووات)؛ D = نیروی مقاومت کششی افقی مورد نیاز ابزار خاک‌ورز (کیلو نیوتن)؛ Va = سرعت واقعی حرکت تراکتور در مزرعه (متر بر ثانیه) است. برای اندازه‌گیری بازده کششی از معادله زیر استفاده شد:

$$TE = (1-S) \left(\frac{NT}{GT} \right) \quad (3)$$

که در آن، TE = بازده کششی؛ S = میزان لغزش؛ NT = کشش خالص (تعریف شده در استاندارد ASAE S296)؛ و GT = کشش کلی (تعریف شده در استاندارد ASAE S296) است. یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت، بازده کل انرژی مجموعه تراکتور ادوات خاک‌ورز بود که به کمک معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$OEE = \frac{Va \times D}{10.2 \times Fc} \times 3.6 \quad (4)$$

در این معادله، OEE = بازده انرژی کل (درصد)؛ Va = سرعت واقعی حرکت تراکتور در مزرعه (کیلومتر بر ساعت)؛ D = مقاومت کششی مورد نیاز ادوات (کیلو نیوتن)؛ و Fc = مصرف سوخت تراکتور (لیتر بر ساعت) است. با نگاهی به معادله (۴) می‌توان دریافت که سرعت واقعی حرکت در مزرعه، مقاومت کششی مورد نیاز ادوات خاک‌ورز و مصرف سوخت به صورت مستقیم و عوامل دیگری مانند لغزش به صورت غیرمستقیم روی بازده انرژی کل تأثیر می‌گذارند.

با توجه به پارامترهای تحت بررسی، سیستم اندازه‌گیری مورد استفاده در تحقیق حاضر شامل یک دینامومتر اتصال سه‌نقطه، سوخت‌سنج، چرخ پنجم و یک سیستم جمع‌آوری داده‌ها بود. به منظور اندازه‌گیری نیروی مقاوم کششی وارد بر شاخه‌های زیرشکن از دینامومتر اتصال سه‌نقطه موجود در کارگاه گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه محقق اردبیلی استفاده شد (شکل ۲). توضیحات کامل در خصوص طراحی، ساخت و سایر جنبه‌های این دستگاه در تحقیق عباسپور گیلانده و حقیقت شیشوان (Abbaspour-Gilandeh & Haghghat-Shishvan, 2011) ارائه شده است.

پیش‌بینی پارامترهای مرتبط با کشش تراکتور انجام نشده است. با در نظر گرفتن مطالب مطرح شده، اهداف زیر برای تحقیق حاضر مدنظر قرار گرفت:

۱- تعیین لغزش چرخ‌های محرک، توان مالبندی و بازده کششی تراکتور همچنین بازده کل انرژی مجموعه تراکتور- زیرشکن حین استفاده از شاخه‌های زیرشکن مرسوم و پاراپلو تحت تأثیر عمق‌های کاری و سرعت‌های مختلف پیشروی

۲- ارزیابی توانایی سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS) در پیش‌بینی پارامترهای مذکور حین عملیات زیرشکنی

مواد و روش‌ها

شاخه‌های تحت بررسی

شاخه‌های پاراپلو و زیرشکن تحت بررسی از نوع استاندارد و حداکثر عمق کاری آن‌ها ۶۰ سانتی‌متر بود. این شاخه‌ها از ورق فولادی به ضخامت ۲۵ میلی‌متر ساخته شده و به ترتیب ۲۵/۲ و ۲۴/۹ کیلوگرم وزن داشتند. ارتفاع شاخه‌ها و طول آن‌ها در قسمت بالا به ترتیب ۶۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر و شاخه زیرشکن تحت بررسی از نوع L شکل و نوک تیز بود. زاویه جلوه‌دهی قسمت پایینی ساقه پاراپلو و زاویه انحراف از خط عمود آن به ترتیب ۲۳/۴۱ و ۴۱/۸۶ درجه و در نتیجه، زاویه تمایل ۴۸/۱۴ درجه بود. زاویه حمله (α) نوک تیغه در هردو شاخه نیز ۱۵ درجه و از نظر نیروی کششی مورد نیاز، بهینه بودند (Page Harrison, 2005; Esehaghbeygi et al., 1988) (شکل ۱).

پارامترهای تحت بررسی و سیستم اندازه‌گیری

پارامترهای تحت بررسی شامل لغزش چرخ‌های محرک، توان مالبندی و بازده کششی تراکتور همچنین بازده کل انرژی در مجموعه تراکتور- زیرشکن بود. برای محاسبه لغزش چرخ‌های محرک از معادله زیر استفاده شد:

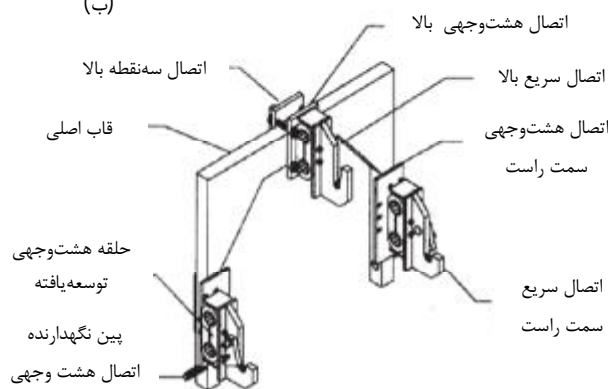
$$S = 100 \left(1 - \left(\frac{Va}{Vo} \right) \right) \quad (1)$$

که در آن، S ، میزان لغزش (درصد)؛ Va ، سرعت واقعی حرکت تراکتور حین عملیات خاک‌ورزی اندازه‌گیری شده با چرخ پنجم (کیلومتر بر ساعت)؛ و Vo ، سرعت حرکت تراکتور بدون بار روی سطح مزرعه (کیلومتر بر ساعت) است.

اندازه‌گیری مسافت پیموده شده مورد استفاده قرار می‌گرفت و با اندازه‌گیری مدت طی‌کردن آن مسافت توسط کروномتر، سرعت پیشروی درون مزرعه به دست می‌آمد. عمق خاک‌ورزی با استفاده از تنظیم بازوهای تحتانی سیستم اتصال سه‌نقطه تراکتور و چرخ‌های تثبیت عمق نصب شده در دو طرف قاب ابزار خاک‌ورز، کنترل می‌شد. با استفاده از این دو عامل کنترل، عمق خاک‌ورزی به دقت در سه عمق مورد نظر ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری تنظیم شد و نوسانات عمقی ناچیزی در طی مسیرهای حرکت به وقوع پیوست که قابل چشم‌پوشی بودند. به‌علاوه، در تمامی آزمایشات دور موتور ۱۶۰۰ دور بر دقیقه با استفاده از گاز دستی، ثابت نگه داشته شد. توضیحات کامل در خصوص سیستم جمع‌آوری داده در ادامه ارائه شده است.

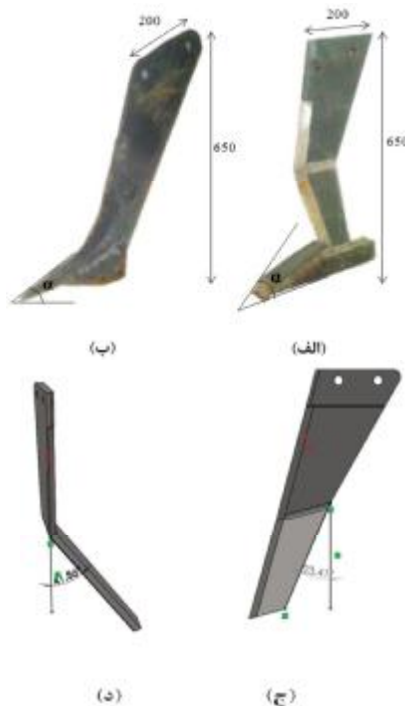


(الف)



شکل ۲- ابزارهای مورد استفاده در آزمون‌های مزرعه‌ای شامل (الف) دینامومتر و چرخ پنجم و (ب) اجزای دینامومتر

مصرف سوخت تراکتور با استفاده از دو عدد حسگر سنجش جریان ساخت شرکت اووال (Oval) ژاپن که در مسیرهای رفت و برگشت سوخت قرار داشتند، مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. حسگر مسیر رفت قبل از پمپ انژکتور، و حسگر مسیر برگشت در مسیر بازگشت سوخت اضافی به مخزن قرار داشت (شکل ۳). اختلاف داده این دو حسگر در نمایشگر دیجیتال سیستم سوخت‌سنج بیانگر میزان سوخت مصرفی بود.



شکل ۱- شاخه‌های تحت بررسی؛ (الف) پاراپلو، (ب) زیرشکن، (ج) نمای جانبی (شاخه پاراپلو بدون کفش و تیغه) (زاویه جلودهی قسمت زیرین ساقه = $23/41$ درجه)، (د) نمای روبه‌رو (شاخه پاراپلو بدون کفش و تیغه) (زاویه انحراف از خط عمود = $41/86$ درجه) (زاویه α یا زاویه حمله = 15 درجه) (ابعاد به میلی‌متر)

سرعت پیشروی درون مزرعه در هر دنده (۱ الی ۴ سنگین) با استفاده از چرخ پنجمی که بین دو محور تراکتور و در سمت راست بدنه تراکتور نصب شده بود، اندازه‌گیری شد (شکل ۲). یک حسگر مغناطیسی، تعداد چرخش چرخ‌دنده ۱۲ دندانه‌ای (۱۲ پالس به ازای هر دور چرخش کامل) که به چرخ پنجم متصل بود را اندازه می‌گرفت. پالس‌های خروجی این حسگر مستقیماً به پالس‌متر دیجیتالی ارسال می‌شد. این سیستم برای

صحت‌سنجی (کالیبراسیون) دینامومتر سه محوره

دینامومتر مورد استفاده، درون مزرعه صحت‌سنجی (کالیبره) شد. این صحت‌سنجی در دو مرحله انجام شد. این عملیات صحت‌سنجی به کشش دو تراکتوری $2RNAM$ معروف است. در مرحله اول، تراکتور مسی فرگوسن ۳۹۹، مجموعه تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ در حالت خلاص - دینامومتر - زیرشکن را حین خاک‌ورزی و از طریق کابل رابط و لودسل ۵ تنی نصب شده بین دو تراکتور می‌کشید. در این وضعیت، نیروهای کششی متفاوت با اعمال سرعت‌های پیشروی متفاوت در تراکتور کشنده به دست آمد. در مرحله دوم، تراکتور کشنده مجموعه تراکتور خلاص - دینامومتر - زیرشکن در حالت غیرعملیاتی را با همان سرعت‌های پیشروی مرحله اول می‌کشید. تفاوت نیروهای اندازه‌گیری شده با لودسل ۵ تنی در دو مرحله اول و دوم باید با نیروی مقاوم افقی (نیروی کششی) اندازه‌گیری شده با دینامومتر برابر باشد. با رسم دو سری نیرو، نمودار صحت‌سنجی مزرعه‌ای دینامومتر به دست آمد.

آزمون‌های مزرعه‌ای

تمامی ابزارها و ادوات موردنیاز به همراه تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ به مزرعه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی (طول جغرافیایی "۳۵' ۱۷" ۴۸°، عرض جغرافیایی "۴۰' ۱۲" ۳۸° و ارتفاع ۱۴۱۰ متر از سطح دریا) منتقل شد. مزرعه دارای خاک بسیار متراکم با نفوذپذیری بسیار کم بود. همچنین، قطعه کرت‌بندی شده برای انجام آزمایشات غیرمسطح بود و حدود چهار درصد شیب داشت. آزمون‌های مزرعه‌ای در سه عمق ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری و در چهار سرعت پیشروی ۱/۸، ۲/۳، ۲/۹ و ۳/۵ کیلومتر بر ساعت برای دوشاخه زیرشکن شامل زیرشکن مرسوم و پاراپلو در چهار تکرار برای هر حالت اجرا شد. با در نظر گرفتن متغیرهای مستقل و تکرارها، مجموعاً ۹۶ تیمار در قالب ۴ بلوک برپایه طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی اعمال شد. هر بلوک ۲۴ کرت داشت و هر کرت ۲ متر عرض و ۲۰ متر طول داشت. فاصله محیطی به عرض ۳ متر در پیرامون هر بلوک قرار داشت تا تراکتور و ادوات متصل شده به آن، فضای کافی برای دور زدن



شکل ۳- حسگرهای سنجش جریان برای اندازه‌گیری مصرف سوخت (الف) نمای کلی، (ب) حسگر نصب‌شده در مسیر برگشت و (ج) حسگر نصب‌شده در مسیر رفت

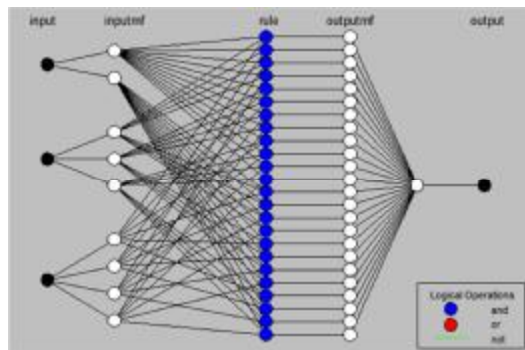
سیستم جمع‌آوری داده

ابزارهای مورد استفاده در این بخش شامل کرنش‌سنج‌های نصب شده بر روی حلقه‌های هشت‌وجهی توسعه یافته^۱ دینامومتر، دیتالاگر و لپ‌تاپ بود. سیگنال‌های خروجی از کرنش‌سنج‌ها در دیتالاگر DT-800 شرکت دیتاتیکر استرالیا، رقمی شده و سپس برای ذخیره‌سازی به لپ‌تاپ منتقل شد. دیتالاگر مورد استفاده، چندمنظوره (دارای قابلیت ثبت انواع داده‌های ورودی) است و قابلیت برنامه‌نویسی را نیز دارد، همچنین دارای ۱۲ کانال آنالوگ و ۱۶ کانال دیجیتال است و با جریان با ولتاژ ۲۲۰ ولت کار می‌کند. فرکانس نمونه‌گیری دیتالاگر ۲۰ هرتز (۲۰ قرائت در ثانیه) تنظیم شد. نمایشگر دیجیتال سیستم سوخت‌سنج، دیتالاگر و لپ‌تاپ درون کابین تراکتور و نزدیک راننده قرار گرفتند و انرژی موردنیاز آن‌ها از مبدل برق ۱۲ ولت مستقیم به ۲۴۰ ولت متناوب که به یک باتری اضافی کاملاً پر متصل بود، تأمین می‌شد (شکل ۴).



شکل ۴- ابزارهای مورد استفاده در سیستم جمع‌آوری داده

انجام می‌شود. بردار گرادیان مقیاسی برای ارزیابی عملکرد مدل ANFIS است. شماتیکی از مدل ANFIS با چهار متغیر مستقل در ورودی و یک متغیر وابسته در خروجی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- ساختار سیستم استنتاج عصبی فازی (انفیس)

مجموعاً ۹۶ داده در دسترس برای متغیرهای مستقل در ورودی (شاخه، سرعت و عمق) و سه متغیر در خروجی (نیروی کششی، نیروی عمودی و مصرف سوخت) وجود داشت. تعداد زیادی از مدل‌های ANFIS با توابع عضویت متفاوت به منظور یافتن بهترین مدل ANFIS برای پیش‌بینی خروجی‌های مذکور مورد بررسی قرار گرفتند. داده‌های در دسترس به دو مجموعه داده ۸۰ تایی و ۱۶ تایی تقسیم شد. مجموعه اول برای آموزش شبکه و مجموعه دوم برای آزمون مدل خروجی مورد استفاده قرار گرفت. آزمون مدل خروجی به منظور عدم همپوشانی خروجی‌ها اعمال شد. از دو عامل میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب تبیین (R^2) برای ارزیابی مدل‌های ANFIS استفاده شد که در زیر 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 معادلات فوق، Y_{ac} ، Y_{pr} و Y_{me} به ترتیب، مقادیر اندازه‌گیری شده، پیش‌بینی شده و میانگین مدل‌های توسعه‌یافته هستند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از صحت‌سنجی مزرعه‌ای دینامومتر اتصال سه‌نقطه مورد استفاده در آزمون‌های مزرعه‌ای در شکل ۷ نشان داده شده است.

داشته باشند. حین آزمون‌های مزرعه‌ای، چهار پارامتر شامل نیروهای کششی و عمودی به همراه سرعت پیشروی و مصرف سوخت به صورت مستقیم اندازه‌گیری شدند. خصوصیات خاک مؤثر بر تقابل میان ادوات خاک‌ورز و خاک، شامل میزان رطوبت خاک، چگالی ظاهری، شاخص مخروطی، بافت و ساختمان خاک هستند (Upadhyaya *et al.*, 1984 & 1987). این خصوصیات به‌عنوان مهم‌ترین خصوصیات در خاک لومی شنی مزرعه در ۱۰ نقطه اندازه‌گیری شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. همچنین میزان رطوبت خاک در ۲ عمق ۰ الی ۲۵ سانتی‌متری و ۲۵ الی ۵۰ سانتی‌متری، مورد اندازه‌گیری شد. نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده توزین شدند سپس درون آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و دوباره توزین شدند (Page *et al.*, 1982). نفوذسنج دیجیتال (Rimik, CP20) با زاویه استاندارد نوک مخروطی به میزان ۳۰ درجه به‌منظور اندازه‌گیری شاخص مخروط مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۵). بر طبق استاندارد ASAE Standards S313.2، سرعت نفوذ نفوذسنج باید به میزان ۲ سانتی‌متر بر ثانیه باشد که در اندازه‌گیری‌ها رعایت شد. نفوذپذیری خاک در ۲۰ نقطه حداقل صفر الی ۵۰ سانتی‌متری بلافاصله قبل از آزمون‌ها اندازه‌گیری شد.

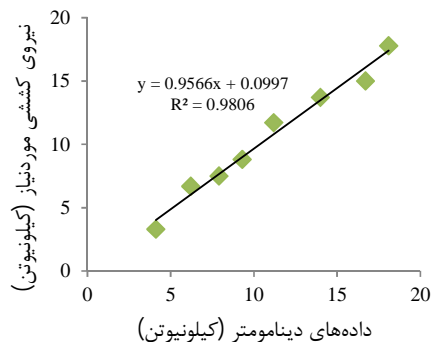


شکل ۵- نفوذسنج دیجیتال مورد استفاده

سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS)

اگر داده‌های ورودی، مبهم و یا دارای عدم قطعیت باشند، یک سیستم فازی مانند ANFIS، بهترین انتخاب برای تحلیل آن‌ها خواهد بود (Pentos & Pieczarka, 2017). توابع عضویت^۱ در طول فرآیند آموزش شبکه ANFIS تغییر کرده و تطبیق آن‌ها به واسطه یک بردار گرادیان

نتایج بررسی خصوصیات خاک مزرعه تحقیقاتی در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک در شکل ۸ دیده می‌شود. همانگونه که ملاحظه می‌شود، سخت‌لایه‌ای در عمق تقریباً ۴۰ سانتی‌متری خاک مزرعه وجود داشت.

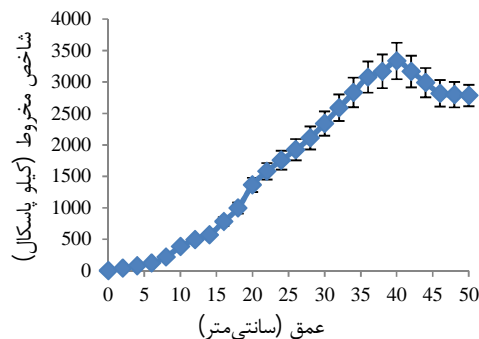


شکل ۷- نتایج به دست آمده از صحت‌سنجی مزرعه‌ای دینامومتر

جدول ۱- خصوصیات خاک مزرعه تحقیقاتی

مقدار	خصوصیت
۴۵/۹ درصد	شن
۲۹/۱ درصد	سیلت
۲۵ درصد	رس
۰/۵ درصد	ماده آلی
۷/۱۳	اسیدیته
۰/۳۱ دسی‌زیمنس بر متر	هدایت الکتریکی
۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب	جرم مخصوص ظاهری خاک (۰-۲۵ سانتی‌متری)
۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب	جرم مخصوص ظاهری خاک (۲۵-۵۰ سانتی‌متری)
۶/۵ درصد	رطوبت بر پایه وزن خشک (۰-۲۵ سانتی‌متری)
۷/۴ درصد	رطوبت بر پایه وزن خشک (۲۵-۵۰ سانتی‌متری)

نتایج جدول فوق نشان می‌دهد که نوع شاخه خاک‌ورز، تغییرات سرعت پیشروی و عمق همچنین اثر متقابل آن‌ها بر لغزش چرخ‌های محرک در سطح یک درصد معنی‌دار است ($p < 0.01$). زیرشکن مرسوم به نیروی کششی بالاتری نسبت به پاراپلو نیاز داشت بنابراین مطابق شکل ۹ دیده می‌شود که لغزش چرخ‌های محرک به هنگام کشیدن زیرشکن بیشتر است. به‌علاوه، با افزایش سرعت پیشروی و عمق زیرشکنی، میزان لغزش در چرخ‌های محرک افزایش می‌یابد به طوری که بیشترین لغزش به میزان ۱۵ درصد در سرعت پیشروی ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و در عمق خاک‌ورزی ۵۰ سانتی‌متر در زیرشکن مرسوم و کمترین لغزش به میزان ۷/۲۶ درصد در سرعت ۱/۸ کیلومتر بر ساعت در عمق خاک‌ورزی ۳۰ سانتی‌متر در پاراپلو اتفاق افتاده‌است. اختلاف لغزش چرخ‌های محرک به هنگام کشیدن شاخه‌های زیرشکن مرسوم و پاراپلو در دو عمق ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متری تقریباً مشابه هم است اما این اختلاف در عمق ۴۰ سانتی‌متری بیشتر می‌شود (شکل ۹).



شکل ۸- نتایج اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک مزرعه تحقیقاتی

نتایج اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای

اثر شاخه، عمق کار و سرعت پیشروی بر لغزش چرخ‌های محرک

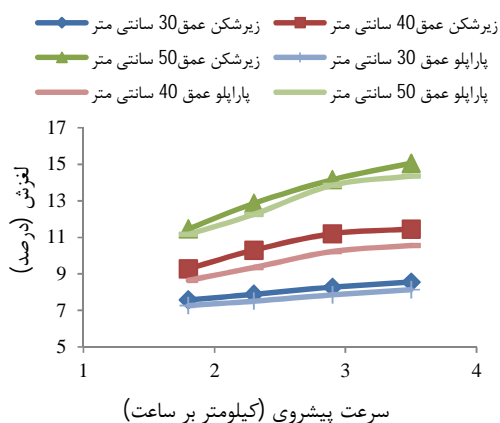
اثر نوع ابزار خاک‌ورز، سرعت پیشروی و عمق کاری بر لغزش چرخ‌های محرک، قدرت مالبندی، بازده کششی و بازده کل انرژی در جدول ۲ و تغییرات لغزش چرخ‌های محرک نسبت به تغییرات سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی همچنین نوع شاخه تحت آزمون در شکل ۹ نشان داده شده است.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر شاخه، عمق و سرعت بر پارامترهای مورد مطالعه

میانگین مربعات				درجه آزادی	منبع تغییرات
بازده کل انرژی	بازده کشتی	توان مالبندی	لغزش		
۳۷/۲۴**	۵۷۷/۷۱**	۸/۰**	۷/۹۰۱**	۱	شاخه
۱۶۳/۸۵**	۱۰۲/۳۸**	۵/۲۰۴**	۲۲/۴۲**	۲	عمق
۳۰/۵۸**	۵۳۲/۶۸**	۶۵/۶۴**	۲۱/۵۲**	۳	سرعت
۸۵/۸۶**	۰/۲۱۱ ^{ns}	۰/۰۹۶**	۰/۵۲۸**	۲	شاخه × عمق
۶/۳۰۴**	۰/۱۹۹ ^{ns}	۰/۰۹۱**	۰/۰۷۹**	۳	شاخه × سرعت
۸/۷۴۲**	۳/۹۰۷**	۰/۸۱۹**	۲/۵۰۳**	۶	عمق × سرعت
۸/۷۰۱**	۰/۱۹۹*	۰/۰۲۲**	۰/۰۳**	۶	شاخه × عمق × سرعت
۰/۰۶۱	۰/۰۸۷	۰/۰	۰/۰۰۱	۷۲	خطا
				۹۵	کل

* اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد



شکل ۹- رابطه بین سرعت پیشروی، عمق، نوع شاخه و لغزش

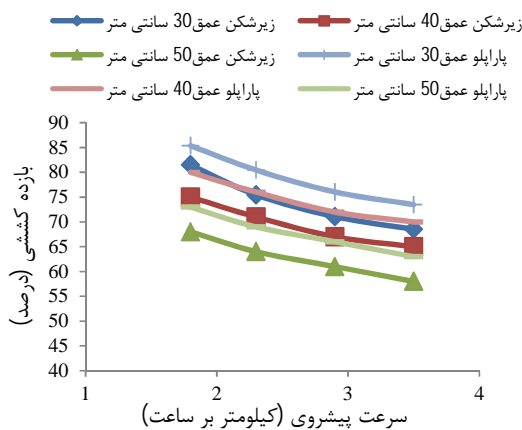
اثر شاخه، عمق کار و سرعت پیشروی بر توان مالبندی تراکتور

تغییرات توان مالبندی تراکتور نسبت به تغییرات سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی همچنین نوع شاخه تحت آزمون در شکل ۱۰ دیده می‌شود. در این خصوص، نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که نوع شاخه خاک‌ورزی، تغییرات سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی همچنین اثر متقابل آن‌ها بر توان مالبندی تراکتور در سطح یک درصد معنی‌دار است.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که توان مالبندی تراکتور حین کشیدن پاراپلو بیشتر از زمانی است که زیرشکن مرسوم را می‌کشد همچنین این شکل نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیشروی و عمق زیرشکنی، توان مالبندی تراکتور افزایش یافته‌است به طوری که بیشترین توان مالبندی (به میزان ۹ کیلووات) در سرعت پیشروی ۳/۵ کیلومتر بر

تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ تحت آزمون، قدرت کافی برای آزمون‌های مزرعه‌ای را دارا بوده و مهم‌ترین عاملی که می‌تواند سبب افزایش لغزش در سرعت‌های بالاتر باشد، سایدگی آج لاستیک‌های عقب و کهنه‌بودن آن‌ها است. (Raheman & Jha (2007), Albana & Hassan (1990) و Ranjbarian *et al.* (2017) نیز دریافتند که با افزایش سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی، لغزش چرخ‌های محرک افزایش خواهد یافت. (Khosravani *et al.*, (1998) و Mosavi Seyyedi (2009) نیز گزارش کرده‌اند که با افزایش عمق خاک‌ورزی، لغزش چرخ‌های محرک تراکتور بیشتر می‌شود. اما Shebi *et al.*, (1988) و Mosavi Seyyedi (2009) دریافتند که با افزایش سرعت پیشروی، لغزش چرخ‌های تراکتور کاهش می‌یابد. دلیل اختلاف میان نتایج بررسی‌های این محققان و نتایج به دست آمده از این تحقیق آن است که نوع تراکتورها، آج لاستیک‌های چرخ محرک، ادوات مورد استفاده و شرایط خاک در هر یک از این تحقیقات متفاوت است. رابطه بین سرعت پیشروی و لغزش در عمق‌های مختلف تحت آزمون، به صورت چند جمله‌ای درجه دوم با همبستگی بالا ($R^2 > 0.99$) است. (Ismail & Burkhardt (1993) نیز رابطه بین تغییرات سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی و لغزش چرخ‌های محرک را به صورت چندجمله‌ای درجه دوم گزارش کرده‌اند. اما Ranjbarian *et al.* (2017) رابطه سرعت پیشروی و لغزش را در مورد گاواهن چیزل، خطی گزارش کرده‌اند. تفاوت در نتایج تحقیقات آنها با نتایج این تحقیق می‌تواند ناشی از تفاوت در تراکتورها و ادوات مورد استفاده و شرایط عملیاتی آزمون‌ها باشد.

می‌کشد دارای بازده کششی بالاتری است. به‌علاوه، با افزایش سرعت پیشروی و عمق زیرشکنی، بازده کششی تراکتور کاهش می‌یابد به طوری که بیشترین بازده کششی به میزان ۸۵ درصد در سرعت پیشروی ۱/۸ کیلومتر بر ساعت و در عمق خاک‌ورزی ۳۰ سانتی‌متر در شاخه پاراپلو و کمترین بازده کششی به میزان ۵۸ درصد در سرعت ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و در عمق خاک‌ورزی ۵۰ سانتی‌متر در شاخه پاراپلو به وقوع می‌پیوندد. لغزش چرخ‌های محرک عامل مهمی در بازده کششی است و بسته به میزان لغزش، افزایش لغزش در سرعت‌های بالاتر تا حدی باعث بالا رفتن بازده می‌شود و با افزایش بیشتر، کاهش بازده کششی را به همراه دارد. رابطه بین سرعت پیشروی و بازده کششی در تمامی اعماق خاک‌ورزی خطی است ($R^2 > 0.95$). (Ismail & Burkhardt 1993) و Ranjbarian *et al.* (2017) نیز گزارش کردند که با افزایش سرعت پیشروی، بازده کششی تراکتور به‌صورت خطی کاهش می‌یابد.

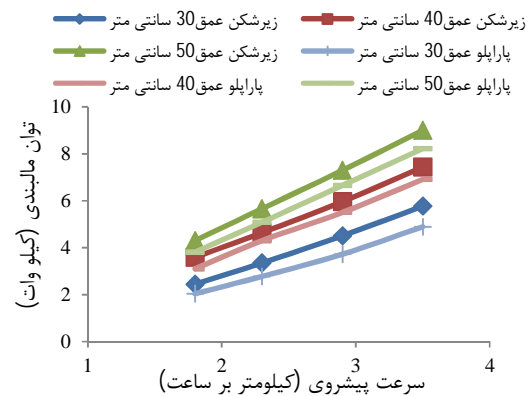


شکل ۱۱- رابطه بین سرعت، عمق، نوع شاخه و بازده کششی تراکتور

اثر شاخه، عمق کار و سرعت پیشروی بر بازده کل انرژی

تغییرات بازده کل انرژی مجموعه تراکتور- زیرشکن نسبت به تغییرات سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی، همچنین نوع شاخه تحت آزمون در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این خصوص، نتایج جدول ۲ بیانگر آنست که نوع شاخه خاک‌ورز، تغییرات سرعت پیشروی و عمق همچنین اثر متقابل آن‌ها بر بازده کل انرژی در سطح یک درصد معنی‌دار است. در شکل ۱۲ دیده می‌شود که تراکتور به

ساعت و در عمق خاک‌ورزی ۵۰ سانتی‌متر در شاخه زیرشکن مرسوم و کمترین توان مالبندی به میزان ۲ کیلووات در سرعت ۱/۸ کیلومتر بر ساعت در عمق خاک‌ورزی ۳۰ سانتی‌متر در شاخه پاراپلو اتفاق افتاده‌است. این نتایج کاملاً منطقی به نظر می‌رسد چون توان مالبندی، حاصل ضرب مقاومت کششی در سرعت پیشروی است و با افزایش مقاومت کششی در سرعت‌های بالاتر و عمق‌های خاک‌ورزی بیشتر، توان مالبندی نیز افزایش خواهد یافت. رابطه بین سرعت پیشروی و توان مالبندی در هر سه عمق خاک‌ورزی و دو شاخه تحت بررسی، تقریباً خطی است ($R^2 > 0.95$). (Ranjbarian *et al.* 2017) نیز دریافتند که با افزایش سرعت پیشروی، قدرت مالبندی تراکتور به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.



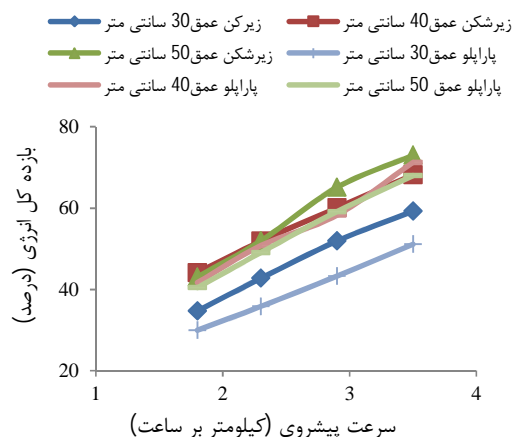
شکل ۱۰- رابطه بین سرعت، عمق، نوع شاخه و توان مالبندی

اثر شاخه، عمق کار و سرعت پیشروی بر بازده کششی تراکتور

تغییرات بازده کششی تراکتور نسبت به تغییرات سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی همچنین نوع شاخه تحت آزمون در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این خصوص، نتایج جدول ۲ بیانگر آنست که نوع شاخه خاک‌ورز، تغییرات سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی و اثر متقابل عمق در سرعت پیشروی در سطح یک درصد معنی‌دار است. همچنین اثر متقابل شاخه در عمق در سرعت در سطح پنج درصد معنی‌دار است. اثر متقابل شاخه در سرعت به اضافه اثر متقابل شاخه در عمق بر تغییرات بازده کششی غیر معنی‌دار هستند.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که تراکتور به هنگام کشیدن شاخه پاراپلو نسبت به زمانی که شاخه زیرشکن مرسوم را

رسیده‌اند که با افزایش سرعت پیشروی، بازده کل انرژی در مجموعه تراکتور- ادوات به صورت خطی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲- رابطه بین سرعت، عمق، نوع شاخه و بازده کل انرژی

مدل‌های پیش‌بینی رگرسیون چندگانه

هشت مدل رگرسیونی چندمتغیره شامل پارامترهای عمق و سرعت پیشروی به منظور پیش‌بینی پارامترهای لغزش، قدرت مالبندی، بازده کششی و بازده کل انرژی مرتبط با شاخه‌های زیرشکن مرسوم و پاراپلو به صورت جداگانه توسط روش گام به گام توسعه داده شده و در جدول ۳ ارائه شده‌اند. در این مدل‌ها، D بیانگر عمق خاک‌ورزی بر حسب سانتی‌متر و S بیانگر سرعت پیشروی بر حسب کیلومتر بر ساعت است.

هنگام کشیدن شاخه زیرشکن مرسوم نسبت به موقعی که شاخه پاراپلو را می‌کشد، بازده کل انرژی بالاتری دارد. به علاوه، با افزایش سرعت پیشروی، بازده کل انرژی در مجموعه تراکتور- زیرشکن افزایش، اما با افزایش عمق زیرشکنی، بازده کل انرژی کاهش می‌یابد؛ به طوری که بیشترین بازده کل انرژی به میزان ۷۳ درصد در سرعت پیشروی ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و در عمق خاک‌ورزی ۵۰ سانتی‌متر در زیرشکن مرسوم و کمترین بازده کششی به میزان ۳۰ درصد در سرعت ۱/۸ کیلومتر بر ساعت و در عمق خاک‌ورزی ۳۰ سانتی‌متر در پاراپلو اتفاق افتاده است. با تبدیل هرچه بیشتر سوخت مصرفی به کار مفید (توان مالبندی)، بازده کل انرژی بالاتر خواهد رفت و بهتر است تا جاییکه لغزش زیاد نیست، تراکتور را در سرعت‌های بالاتر و عمق زیرشکنی معقول‌تر به کار گرفت تا بازده کل انرژی افزایش یابد. Crowell & Bowers (1985) گزارش کرده‌اند که بازده کل انرژی بالاتر نشان‌دهنده تطابق بهتر تراکتور و ادوات است که به افزایش بازده کششی می‌انجامد. اما در این تحقیق، افزایش سرعت پیشروی، منجر به بازده کل انرژی بیشتر و بازده کششی کمتر شده است. کهنه و بدون آج بودن لاستیک‌ها در چرخ‌های محرک عقب، لغزش و مصرف سوخت تراکتور را در سرعت‌های بالاتر افزایش داده که به کاهش بازده کششی انجامیده است. بنابراین، استفاده از سرعت‌های پیشروی بالاتر و لاستیک‌های آج‌دار موجب افزایش توان مالبندی، بازده کششی و بازده کل انرژی می‌شود و لغزش و مصرف سوخت را کاهش خواهد داد. رابطه بین سرعت پیشروی و بازده کل انرژی در همه اعماق خاک‌ورزی، تقریباً خطی است. Ranjbarian *et al.* (2017) نیز به این نتیجه

جدول ۳- مدل‌های پیش‌بینی رگرسیونی برای پارامترهای مورد مطالعه

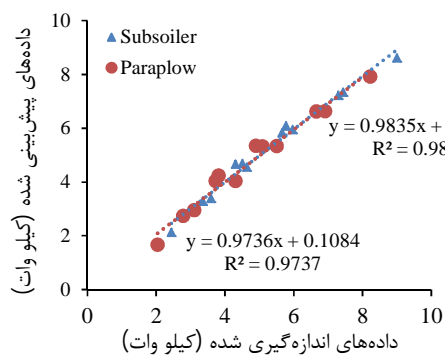
پارامتر	شاخه	مدل	ضریب تبیین	میانگین مطلق خطا (MAE)
لغزش (درصد)	زیرشکن	$1/327 S + 0/266 D - 3/443$	۰/۹۶۵۵	۰/۰۱۳۱
	پاراپلو	$1/209 S + 0/261 D - 2/509$	۰/۹۵۳۸	۰/۰۱۵۷
توان مالبندی (کیلووات)	زیرشکن	$2/327 S + 0/127 D - 5/877$	۰/۹۸۵۰	۰/۰۰۳۷
	پاراپلو	$2/162 S + 0/129 D - 6/096$	۰/۹۷۳۷	۰/۰۰۶۴
بازده کششی (درصد)	زیرشکن	$6/407 S - 0/569 D - 108/36$	۰/۹۷۲۳	۰/۰۳۹۱
	پاراپلو	$6/222 S - 0/555 D - 112/22$	۰/۹۷۷۲	۰/۰۲۷۲
بازده کل انرژی (درصد)	زیرشکن	$15/533 S + 0/555 D - 9/155$	۰/۹۶۵۰	۰/۰۲۱۵
	پاراپلو	$15/195 S + 0/706 D - 18/234$	۰/۸۷۷۲	۰/۰۶۲۲

D- عمق (سانتی‌متر)، S- سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت)

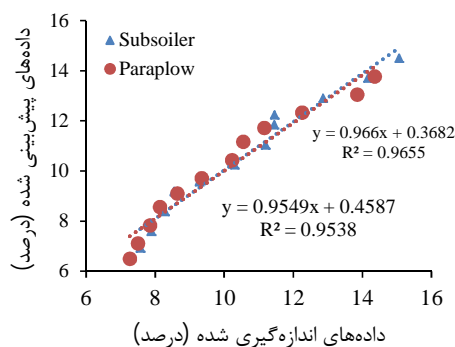
قرار گرفتند. این شکل نشان می‌دهد که مدل‌های رگرسیونی ارائه شده، پارامترهای وابسته مورد مطالعه را با دقت بالایی ($R^2 > 0.87$) پیش‌بینی می‌کنند.

اعتبارسنجی معادلات رگرسیونی

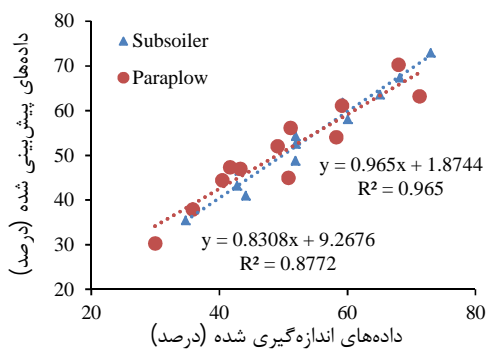
داده‌های حاصل از معادلات رگرسیونی در مقایسه با داده‌های مزرعه‌ای ترسیم‌شده در شکل ۱۳ مورد ارزیابی



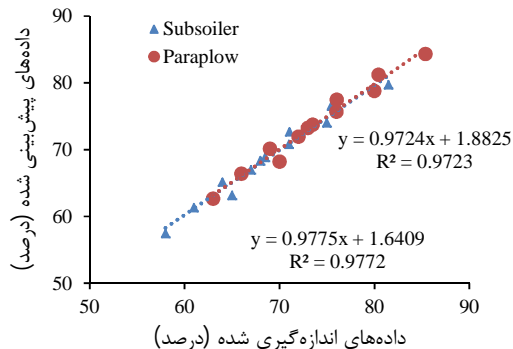
ب



الف



د



ج

شکل ۱۳- داده‌های پیش‌بینی شده در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمون‌های مزرعه‌ای در مورد: الف) لغزش، ب) توان مالبندی، ج) بازده کششی و د) بازده کل انرژی

و بازده کل انرژی) را، با بهترین نتیجه، کمترین مربعات خطا و بیشترین ضریب تبیین تولید می‌کند. تغییرات لغزش چرخ‌های محرک، توان مالبندی، بازده کششی و بازده کل انرژی عملیات زیرشکنی تحت تأثیر نوع شاخه، عمق کاری و سرعت پیشروی حاصل از مدل‌های بهینه انفیس در شکل ۱۴ نشان داده شده‌اند. در این شکل، شاخه‌های ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به زیرشکن و پاراپلو است. با استفاده از سطوح این شکل‌ها، خروجی مدل را برای یک ورودی خاص می‌توان محاسبه نمود. سطوح موجود در شکل ۱۴ نیز تأییدکننده مطالب بررسی شده در بخش‌های قبلی در خصوص چگونگی تغییرات پارامترهای لغزش، توان مالبندی، بازده کششی و بازده کل انرژی تحت تأثیر نوع شاخه، سرعت پیشروی و عمق کاری است (Spoor & Godwin, 1978; Askari et al., 2016).

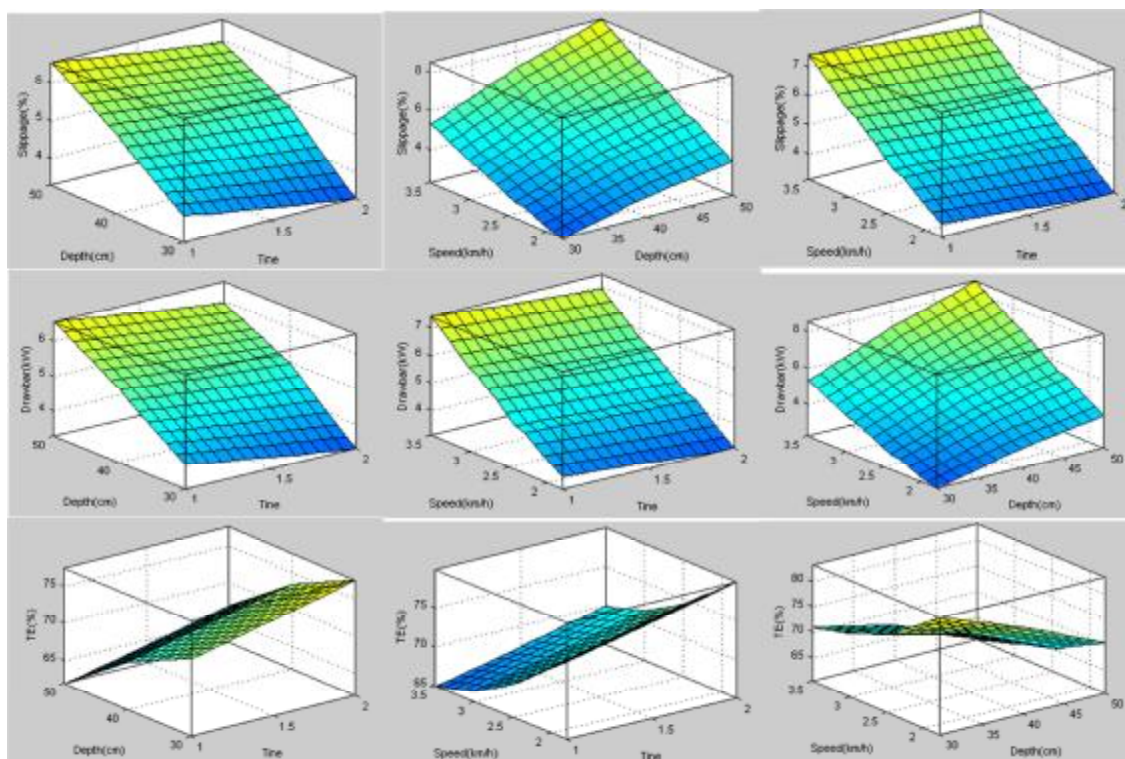
بیشترین ضریب تبیین (R^2) مربوط به مدل پیش‌بینی توان مالبندی تراکتور هنگام کار با زیرشکن به میزان ۰/۹۸۵ و کمترین ضریب همبستگی نیز مربوط به مدل پیش‌بینی بازده کل انرژی هنگام کار با پاراپلو به میزان ۰/۸۷۷ است. همچنین، کمترین و بیشترین میانگین ضریب تبیین (در بین هر دو شاخه) مربوط به بازده کل انرژی و قدرت مالبندی به ترتیب به میزان ۰/۹۲۱۱ و ۰/۹۷۹۳ است. این امر بیانگر آن است که مدل‌های رگرسیونی ارائه شده با دقت بالایی به پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی مرتبط با شاخه‌های زیرشکن مرسوم و پاراپلو می‌توانند پردازند.

نتایج بخش انفیس

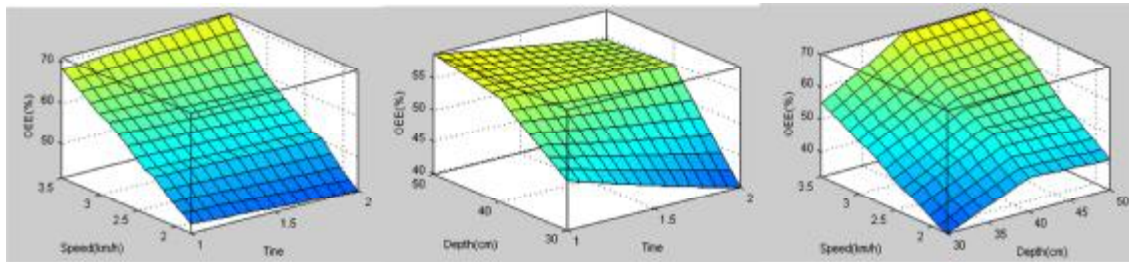
جدول ۴ نشان می‌دهد که کدام تابع عضویت در ورودی، هر یک از خروجی‌ها (لغزش، توان مالبندی، بازده کششی

جدول ۴- مدل‌های مختلف انقیس در مورد خروجی‌های تحت بررسی

ضریب تبیین (R^2)	میانگین مربعات خطا (MSE)	تعداد انواع عضویت		نوع تابع عضویت		مدل	پارامتر خروجی
		تکرار	ورودی	خروجی	ورودی		
۰/۹۹۹۶	۰/۰۱۵۹	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Trimf	اول	لغزش
۰/۹۶۳۰	۰/۰۵۴۵	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Gaussmf	دوم	
۰/۹۲۸۳	۰/۰۸۶۱	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Pimf	سوم	
۰/۹۴۳۷	۰/۰۳۰۲	۵۰	۴،۳،۲	خطی	dsigmf	چهارم	
۰/۹۵۴۵	۰/۰۶۱۱	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Tramf	پنجم	
۰/۹۳۲۴	۰/۰۴۲۲	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Trimf	اول	توان مالبندی
۰/۹۱۸۸	۰/۰۲۸۶	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Gaussmf	دوم	
۰/۹۲۱۷	۰/۰۳۲۶	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Pimf	سوم	
۰/۹۹۹۹	۰/۰۲۳۱	۵۰	۴،۳،۲	خطی	dsigmf	چهارم	
۰/۹۰۳۳	۰/۰۵۰۱	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Tramf	پنجم	
۰/۹۳۶۲	۰/۰۴۲۵	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Trimf	اول	بازده کنشی
۰/۹۴۵۷	۰/۰۳۱۹	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Gaussmf	دوم	
۰/۹۹۸۵	۰/۰۲۱۲	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Pimf	سوم	
۰/۹۲۸۰	۰/۰۴۵۶	۵۰	۴،۳،۲	خطی	dsigmf	چهارم	
۰/۹۴۲۲	۰/۰۳۱۳	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Tramf	پنجم	
۰/۹۳۶۲	۰/۰۴۲۵	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Trimf	اول	بازده کل انرژی
۰/۹۹۹۷	۰/۰۲۲۴	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Gaussmf	دوم	
۰/۹۶۸۵	۰/۰۳۱۲	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Pimf	سوم	
۰/۹۲۸۰	۰/۰۴۵۶	۵۰	۴،۳،۲	خطی	dsigmf	چهارم	
۰/۹۴۲۲	۰/۰۳۱۳	۵۰	۴،۳،۲	خطی	Tramf	پنجم	



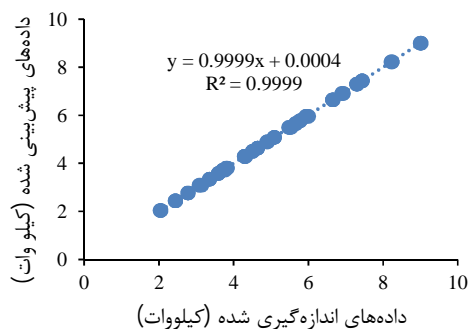
شکل ۱۴- تغییرات پارامترهای خروجی با توجه به تغییرات نوع شاخه، عمق کار و سرعت پیشروی در مدل پیش‌بینی انقیس



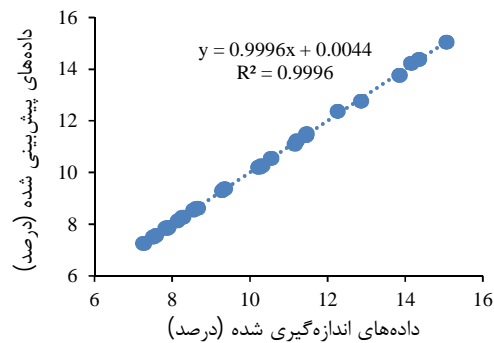
ادامه شکل ۱۴- تغییرات پارامترهای خروجی با توجه به تغییرات نوع شاخه، عمق کار و سرعت پیشروی در مدل پیش‌بینی انفیس؛ به ترتیب از بالا به پایین شامل لغزش، قدرت مالبندی، بازده کششی و بازده کل انرژی (در شکل‌های فوق Time=شاخه، Depth=عمق کار و Speed=سرعت پیشروی)

مجموعه تراکتور- زیرشکن بپردازند. بیشترین ضریب همبستگی (R^2) در مدل‌های پیش‌بینی رگرسیونی مربوط به مدل پیش‌بینی توان مالبندی تراکتور هنگام کار با زیرشکن به میزان $0/985$ بود که کمتر از کمترین ضریب همبستگی در بین مدل‌های انفیس به میزان $0/985$ است. این امر بیانگر این است که مدل‌های انفیس با دقت بالاتری نسبت به مدل‌های رگرسیونی به پیش‌بینی پارامترهای خروجی (متغیرهای وابسته) می‌توانند بپردازند.

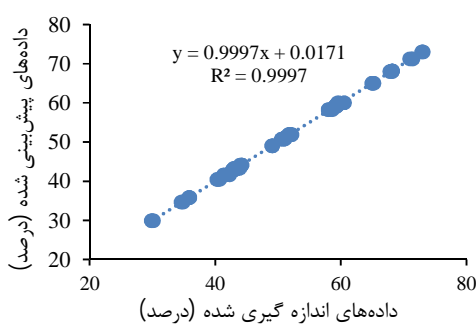
از مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل‌های انفیس برای هر یک از پارامترهای مورد بررسی که در شکل ۱۵ نشان داده شده‌اند، در می‌یابیم که این دو دسته داده، ضرایب همبستگی بسیار بالایی دارند ($R^2 > 0.99$). این ضرایب بالای همبستگی بیان می‌کند که مدل‌های انفیس با دقت بسیار بالایی توانسته‌اند با استفاده از ورودی‌های اندازه‌گیری شده درون مزرعه به پیش‌بینی لغزش، قدرت مالبندی و بازده کششی تراکتور همچنین بازده کل انرژی



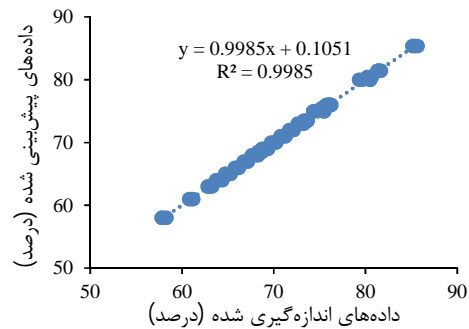
ب



الف



د



ج

شکل ۱۵- همبستگی میان داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده؛ (الف) لغزش، (ب) قدرت مالبندی، (ج) بازده کششی و (د) بازده کل انرژی

نتیجه‌گیری

نتایج به دست‌آمده از تحقیق حاضر بیانگر نکات مهم زیر است:

۱- در بین ادوات مورد آزمون، زیرشکن پاراپلو از نظر پارامترهای تحت بررسی شامل لغزش، توان مالبندی و بازده کششی تراکتور با عملکرد بالاتر ارزیابی شد و تنها مورد استثناء بازده کل انرژی در مجموعه تراکتور-زیرشکن بود که زیرشکن مرسوم عملکرد بهتری از پاراپلو داشت.

۲- نوع شاخه، عمق کار و سرعت پیشروی بر لغزش، توان مالبندی و بازده کششی تراکتور و بازده کل انرژی مجموعه تراکتور-زیرشکن بسیار مؤثر بودند ($p < 0.01$). با افزایش سرعت پیشروی، لغزش، قدرت مالبندی و بازده کل انرژی در هر دو شاخه و تمامی عمق‌ها افزایش یافته اما بازده کششی کاهش می‌یابد. افزایش عمق زیرشکنی منجر به افزایش در لغزش و قدرت مالبندی و کاهش در بازده کششی و بازده کل انرژی می‌شود.

۳- مدل‌های رگرسیونی چندگانه به‌منظور پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی ارائه شده و مشخص شد که با دقت بالایی ($R^2 > 0.87$) به پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی می‌توانند بپردازند.

۴- در قسمت انفیس، به‌ترتیب در مورد پارامترهای لغزش، قدرت مالبندی، بازده کششی و بازده کل انرژی نیز به‌ترتیب، توابع عضویت Trimf، dsigmf، Primf و Gaussmf با میانگین مربعات خطای 0.0159 ، 0.0231 ، 0.0212 و 0.0224 و ضرایب همبستگی 0.9996 ، 0.9999 ، 0.9985 و 0.9997 ، بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی هستند.

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

۶- بیشترین ضریب تبیین (R^2) در مدل‌های پیش‌بینی رگرسیونی مربوط به مدل پیش‌بینی قدرت مالبندی تراکتور هنگام کار با زیرشکن به میزان 0.985 بود که کمتر از کمترین ضریب تبیین در بین مدل‌های انفیس به میزان 0.985 است. این امر بیانگر این است که مدل‌های انفیس با دقت بالاتری نسبت به مدل‌های رگرسیونی به پیش‌بینی پارامترهای خروجی (متغیرهای وابسته) می‌توانند بپردازند.

۷- در حالت کلی، برای بهینه‌کردن عملکرد تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ حین عملیات زیرشکنی، استفاده از وزنه‌های سنگین‌کننده متناسب با قدرت مصرفی، لاستیک‌های نو و آج‌دار برای چرخ‌های محرک و اعمال سرعت‌های پیشروی و عمق کاری متناسب با اهداف عملیات خاک‌ورزی توصیه می‌شود تا از این طریق توان مالبندی، بازده کششی و بازده کل انرژی افزایش و لغزش کاهش یابد.

سپاس‌گزاری

حمایت مالی این مطالعه توسط معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی در قالب پروژه تحقیقاتی پسادکتری با شماره ۱۶۷۵ مورخ ۹۶/۰۹/۲۷ تأمین شده است.

منابع

1. Abbaspour-Gilandeh, Y., & Haghghat-Shishvan, S. (2011). Extended octagonal ring transducers for measurement of tractor-implement force. *Instruction Experiment Technology*, 54(1): 137-141.
2. Akbarnia, A., Mohammadi, A., Farhani, F., & Alimardani, R. (2014). Simulation of draft force of winged share tillage tool using artificial neural network model. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 16: 57-65.
3. Albana, A. R., & Hassan, N. S. (1990). Planting equipment for soil harrowing with disc harrow. *Iragi Journal of Agricultural Sciences*, 242: 260-267.
4. Al-Hamed, S., Wahby, M., Al-Sulaimani, M., & Aboukarima, A. (2014). Prediction of Soil Fractions (Sand, Silt and Clay) in Surface Layer Based on Natural Radionuclides Concentration in the Soil Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System. *Open Journal of Soil Science*, 42: 215-225.
5. Al-Suhaibani, S. A., & Al-Janobi, A. A. (1997). Draught requirements of tillage implements operating on sandy loam soil. *Agricultural Engineering Research*, 66(3): 177-182.
6. Anonymous. (1994). ASAE Standards: ASAE S313.2, Soil Cone Penetrometer, SAI Global. Agricultural machinery management data. Available at www.asabe.org.
7. Anonymous. (2011). ASABE Standards: ASAE D497.7, Agricultural machinery

- soil loosening and draft efficiency in tillage. *Journal of Terramechanics*, 47(2): 173-178.
19. McLaughlin, N. B., Drury, C. F., Reynolds, W.D., Yang, X. M., Li, Y. X., Welacky, T. W., & Stewart, G. (2008). Energy inputs for conservation and conventional primary tillage implements in a clay loam soil. *Transactions of ASABE*, 51: 1153-1163.
 20. Mohammadi, A., Alimardani, R., Akbarnia, A., & Akram, A. (2012). Modeling of draft force variation in a winged share tillage tool using fuzzy table look-up scheme. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 14: 262-268.
 21. Mosavi Seyyedi, S.R. (2009). Evaluation the operational parameters of U650 tractor under different speeds and depths. *Proceedings of the National Conference on water, soil, plant and Mechanization sciences*. Islamic Azad University of Dezful, Dezful, Iran.
 22. Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (1982). *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy (Publ.), Madison, Wisconsin, USA.
 23. Page Harrison, H. (1988). Soil Reacting Forces for a Bentleg Plow. *American Society of Agricultural Engineering*, 311, 0001-2351/88/3101-47.
 24. Pandiyan, V., Caesarendra, W., Tjahjowidodo, T., & Praveen, G. (2017). Predictive modelling and analysis of process parameters on material removal characteristics in abrasive belt grinding Process. *Applied Science*, 7: 363-380.
 25. 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*, 16(5): 113-120.
 26. Pidgeon, J. D. (1983). *Paraplow- A new approach to soil loosening*. ASAE paper No. 83-2136, ASAE. St. Joseph, MI.
 27. Raheman, H., & Jha, S.K. (2007). Wheel slip measurement in 2WD tractor. *Journal of Terramechanics*, 44(2): 89-94.
 28. Ranjbarian, S., Askari, M., & Jannatkah, J. (2017). Performance of tractor and tillage implements in clay soil. *Journal of Saudi Society of Agricultural Science*, 16: 154-162.
 29. Raper, R. L., Reeves, D. W., Burmester, C. H., & Schwab, E. B. (2000). Tillage depth, tillage timing, and cover crop effects on cotton yield, soil strength, and tillage energy requirements. *Applied Engineering in Agriculture*, 16(4): 379-385.
 30. Rashidi, M., Najjarzadeh, I., Tabrizi Namin, S., Naserzaeim, F., Mirzaki, S. H., & Salimi Beni, M. (2013). Prediction of moldboard plow draft force based on soil moisture management data. Available at www.asabe.org.
 8. Askari, M., Komarizade, M. H., Nikbakht, A. M., Nobakht, N., & Teimourlou, R. F. (2011). A novel three-point hitch dynamometer to measure the draft requirement of mounted implements. *Research in Agricultural Engineering*, 57: 128-136.
 9. Askari, M., Shahgholi, G.H., Abbaspour-Gilandeh, Y., & Tash-Shamsabadi, H. (2016). The effect of new wings on subsoiler performance. *Applied Engineering in Agriculture*, 32: 1-10.
 10. Askari, M., Shahgholi, G.H., & Abbaspour-Gilandeh, Y. (2017). The effect of tine, wing, operating depth and speed on the draft requirement of subsoil tillage tines. *Research in Agricultural Engineering*, 63: 160-167.
 11. Bashford, L. L., Byerly, D. V., & Grisso, R. D. (1991). Draft and energy requirements of agricultural implements in semi-arid regions of Morocco. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America (AMA)*, 22: 79-82.
 12. Çelik, A., & Raper, R. L. (2012). Design and evaluation of ground-driven rotary subsoilers. *Soil and Tillage Research*, 12(4): 203-210.
 13. Crowell, G., & Bowers, J. R. (1985). Southeastern tillage energy data and recommended reporting. *Transactions of ASAE*, 28(3): 731-737.
 14. Esehaghbeygi, A., Tabatabaee far, A., Keyhai, A. R., & Raoufat, M. H. (2005). Effect of depth and rake angle on the draft requirement of oblique blade subsoiler. *Iranian Agricultural Sciences*, 36, 1045-1052. (In Persian).
 15. Ismail, W. I. W., & Burkhardt, T. H. (1993). Draft and fuel requirements measurement using tractor on-board data acquisition system. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 11: 51-64.
 16. Kheiralla, A. F., Azmi, Y., Zohadie, M., & Ishak, W. (2004). Modeling of power and energy forces for tillage implements operating in Serdang sandy clay loam, Malaysia. *Soil and Tillage Research*, 78: 21-34.
 17. Khosravani, A., Loghvi, M., & Solhjoo, A. (1998). Evaluation and comparison of traction performance of middle power tractors in Iran. *Proceedings of the 1st National Congress of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization*, Karaj, Iran. 34-41.
 18. Marakoglu, T., & Carman, K. (2010). Fuzzy knowledge-based model for prediction of

- content, tillage depth and operation speed. *American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Sciences*, 13: 1057-1062.
31. Sahu, R. K., & Raheman, H. (2006). Draught prediction of agricultural implements using reference tillage tools in sandy clay loam soil. *Biosystems Engineering*, 94(2): 275-284.
32. Samiei Far, A., Kazemi, N., Rahnama, M., & Ghasemi Nejad, M. (2015). Simultaneous comparison of the effects of shaft load and shaft positions on tractor OEE in two soil conditions (cultivated and uncultivated). *International Journal of Farming and Allied Sciences*, 43: 215-221.
33. Shebi, J., Oni, K.C., & Braide, F.G. (1988). Comparative tractive performance of three tractors. *Agricultural Mechanization in Asia*, 192: 25-29.
34. Sorin, S., Drocas, I., Molnar, A., & Ranta, O. (2013). Studies regarding comparative fuel consumption at classical and conservation tillage. *Progressive Environment*, 62: 199-202.
35. Spoor, G., & Godwin, R. J. (1978). An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 23(4): 243-252.
36. Subbulakshmi, S., Harisudan, C., Saravanan, N., & Subbian, P. (2009). Conservation Tillage-An Eco Friendly Management Practices for Agriculture. *Research Journal of Agriculture and Biosystems Science*, 56: 1098-1103.
37. Summers, J. D., Khalilian, A., & Batchelder, D. G. (1986). Draft relationships for primary tillage in Oklahoma soils. *Transactions of ASAE*, 29: 37-39.
38. Taghavifar, H., & Mardani, A. (2014). On the modeling of energy efficiency indices of agricultural tractor driving wheels applying adaptive neuro-fuzzy inference system. *Journal of Terramechanics*, 56(2): 37-47.
39. Upadhyaya, S. K., Williams, T. H., Kemble, L. J., & Collins, N. E. (1984). Energy requirement for chiseling in coastal plain soils. *Transactions of ASAE*, 36: 1267-1270.
40. Upadhyaya, S. K., Ma, T. X., Chancellor, W. J., & Zhao, Y. M. (1987). Dynamics of soil-tool interaction. *Soil and Tillage Research*, 93: 187-206.
41. Zeng, Zh., Chen, Y., & Zhang, X. (2017). Modelling the interaction of a deep tillage tool with heterogeneous soil. *Computer and Electronics in Agriculture*, 14: 130-138.