

پیش‌بینی نیروهای وارد بر شاخه و مصرف سوخت تراکتور تحت شرایط کاری متفاوت حین عملیات زیرشکنی با استفاده از سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS)

محمد عسکری^{۱*} و یوسف عباسپور گیلانده^۲

۱ و ۲- به ترتیب: پسادکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی؛ و استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
تاریخ دریافت: ۹۷/۳/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۵

چکیده

در این تحقیق، از سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS) به منظور پیش‌بینی نیروهای وارد بر شاخه و مصرف سوخت تراکتور تحت شرایط کاری متفاوت حین عملیات زیرشکنی استفاده شد. نیروهای مقاوم افقی و عمودی وارد بر شاخه‌های زیرشکن و مصرف سوخت تراکتور 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) اندازه‌گیری شدند. از داده‌های مزرعه‌ای برای ایجاد مدل‌های رگرسیونی و انفیس به منظور پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی استفاده و نتایج دو سری مدل با یکدیگر مقایسه شد. نتایج بررسی‌های مزرعه‌ای نشان داد که همه متغیرهای مستقل اثر معنی‌داری بر پارامترهای تحت بررسی دارند. افزایش عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی به افزایش نیروهای مقاوم افقی و عمودی وارد و مصرف سوخت تراکتور انجامید. به علاوه، پاراپلو از نظر انرژی موردنیاز نسبت به زیرشکن، مقرون به صرفه‌تر بود. نتایج بخش انفیس نشان داد که در مورد نیروهای افقی، عمودی و مصرف سوخت، به ترتیب، توابع عضویت *Gaussmf*، *Trimf* و *dsigmf* با میانگین مربعات خطای ۰/۰۱۵۶، ۰/۰۲۳۱ و ۰/۰۲۱۲ و ضریب همبستگی ۰/۹۹۹، ۰/۹۸۹ و ۰/۹۹۱، بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی هستند. مدل‌های انفیس نسبت به مدل‌های رگرسیونی دقت بالاتری دارند و با استفاده از سطوح شکل‌های خروجی در انفیس می‌توان خروجی مدل را برای یک ورودی خاص محاسبه کرد.

واژه‌های کلیدی

مصرف انرژی، زیرشکن، مقاومت کششی، انفیس

مقدمه

است (Samiei Far et al., 2015). برای ارزیابی صحیح مجموعه تراکتور- ادوات حین عملیات کشاورزی، سنجش پارامترهای عملکردی تراکتور و ادوات متصل به آن با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری ضروری است. در همین راستا، اندازه‌گیری نیروی کششی موردنیاز ادوات و ارائه مدل‌های پیش‌بینی نیروی کششی موردنیاز آنها بیشترین توجه را در اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای به خود جلب کرده است

تراکتور مهم‌ترین منبع تولید توان برای عملیات کشاورزی است (Pentos & Pieczarka, 2017). اولین هدف استفاده از تراکتور در کشاورزی، به ویژه تراکتورهایی با قدرت متوسط به بالا، کشیدن ادوات کشاورزی است. بسیاری از محققان معتقدند تلفیق نادرست تراکتور و ادوات کشاورزی، مهمترین عامل در افزایش مصرف سوخت و هدررفت انرژی

معادلات رگرسیونی متعددی برای پیش‌بینی نیروها، به‌ویژه نیروی کششی موردنیاز ابزارهای خاک‌ورز، با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای ارائه شده‌اند (Kheiralla *et al.*, 2004; Rashidi *et al.*, 2013; Askari *et al.*, 2017). برخی دیگر از محققان مدل‌های تحلیلی در این خصوص ارائه داده‌اند (Summers *et al.*, 1986; Bashford *et al.*, 1991). مدل ریاضی ارائه شده توسط استاندارد ASABE standard D497.7 (Anon, 2011) یکی از مهمترین و کاربردی‌ترین معادلات ریاضی در پیش‌بینی نیروی کششی موردنیاز ابزارهای خاک‌ورز است. این معادله، ابزارهای اصلی مانند زیرشکن را شامل می‌شود و ابزارهای فرعی مانند پاراپلو و کج‌ساق را شامل نمی‌گردد. مدل‌های کامپیوتری و برنامه‌های شبیه‌ساز به منظور پیش‌بینی مقدار نیروهای وارد بر ابزارهای خاک‌ورز در تعیین بسیاری از فاکتورهای مؤثر بدون اجرای آزمون‌های زمان‌بر و طاقت‌فرسای مزرعه‌ای به محققان کمک می‌کنند. این ابزارها همچنین به طراحان ادوات کشاورزی در طراحی و بهینه‌سازی ادوات جدید و موجود کمک خواهند کرد (Zeng *et al.*, 2017). به دلیل ماهیت غیرخطی پارامترهای مرتبط با برهمکنش ابزار خاک‌ورز و خاک، برخی محققان روش‌های مبتنی بر هوش محاسباتی مانند شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج فازی^۱ (FIS) را به‌کار گرفته‌اند (Marakoglo & Çarman, 2010; Mohammadi *et al.*, 2012; Akbarnia *et al.*, 2014). سیستم استنتاج عصبی فازی^۲ (ANFIS) ابزاری جدید و تلفیقی است از دو روش مذکور که مزایای هر دو روش را دارد (Taghavifar & Mardani, 2014). در خصوص بررسی توانایی انفیس به‌منظور پیش‌بینی پارامترهای مختلف مرتبط با کشاورزی، تحقیقات

(Grisso *et al.*, 1996; Al-Suhaibani & Al-janobi, 1997; Kheiralla *et al.*, 2004) نیروی کششی، از نیروهای عمودی و جانبی وارد بر ادوات حین عملیات خاک‌ورزی معمولاً صرف‌نظر می‌شود (Godwin, 1975; Leonard, 1980).

انرژی موردنیاز خاک‌ورزی، بخش قابل‌توجهی (۲۵ تا ۴۰ درصد) از انرژی مصرف‌شده در تولید محصول را شامل می‌شود (Askari *et al.*, 2011; Sorin *et al.*, 2013) و کاهش این انرژی مصرفی به چالشی برای مهندسان کشاورزی و کشاورزان تبدیل شده است. زیرشکن ابزاری است برای از بین‌بردن سخت‌لایه موجود در عمق خاک و به نیروی کششی بالایی نیاز دارد. به‌منظور کاهش انرژی مصرفی، از دیگر ادوات مانند پاراپلو و زیرشکن کج‌ساق، به‌جای زیرشکن مرسوم استفاده می‌شود (Pidgeon, 1983; Celik & Raper, 2012). در دهه‌های اخیر، اجرای خاک‌ورزی حفاظتی در سراسر جهان گسترش یافته است؛ در این نوع خاک‌ورزی، باقی گذاشتن بقایای گیاهی بر سطح خاک به کاهش فرسایش خاک کمک می‌کند (Subbulakshmi *et al.*, 2009). خاک‌ورزی با استفاده از انواع شاخه‌های زیرشکن می‌تواند خاک‌ورزی حفاظتی تلقی گردد زیرا حداقل ۳۰ درصد بقایای گیاهی بر سطح خاک باقی خواهد ماند (Raper *et al.*, 2000). بنابراین، زیرشکنی و خاک‌ورزی حفاظتی ارتباطی تنگاتنگ باهم دارند و طراحی و ساخت ادوات مناسب و مقرون‌به‌صرفه از لحاظ اقتصادی برای شکافتن مؤثر خاک در لایه‌های عمقی و حفظ بقایای گیاهی بر سطح خاک کاملاً ضروری خواهد بود.

روش‌های پیش‌بینی را در حالت کلی می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: معادلات رگرسیونی، مدل‌های تحلیلی و نیمه تحلیلی، و مدل‌های کامپیوتری.

1- Artificial Neural Network
3- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

2- Fuzzy Inference System

مواد و روش‌ها

شاخه‌های تحت بررسی

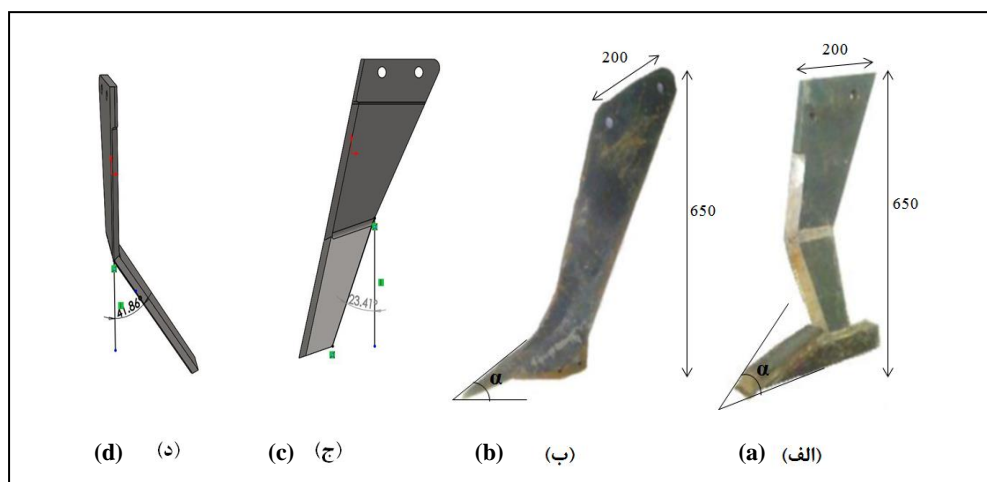
شاخه‌های پاراپلو و زیرشکن تحت بررسی از نوع استاندارد و حداکثر عمق کاری آنها ۶۰ سانتی‌متر است. این شاخه‌ها از ورق فولادی به ضخامت ۲۵ میلی‌متر ساخته شده‌اند و در حدود ۲۵ کیلوگرم وزن دارند. ارتفاع شاخه‌ها و طول آنها در قسمت بالا به ترتیب ۶۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر است. شاخه زیرشکن تحت بررسی از نوع L شکل و نوک تیز است. 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 است. زاویه حمله (α) نوک تیغه در هر دو شاخه نیز ۱۵ درجه و از نظر نیروی کششی موردنیاز، بهینه است (Page Harrison, 1988; Esehaghbeygi *et al.*, 2005) (شکل ۱).

اندک است (Al-Hamed *et al.*, 2014; Taghavifar & Mardani, 2014; Pandiyan *et al.*, 2017)

طبق بررسی‌های صورت گرفته تاکنون هیچ تحقیقی در خصوص کاربرد انفیس در پیش‌بینی نیروهای وارد بر ابزارهای خاک‌ورز دیده نشده است. با در نظر گرفتن مطالب مطرح‌شده، هدف‌های زیر برای تحقیق حاضر مدنظر قرار گرفت:

۱- تعیین نیروهای اصلی (کششی و عمودی) وارد شده از طرف خاک بر شاخه‌های زیرشکن مرسوم و پاراپلو و مصرف سوخت تراکتور هنگام کار با آنها در عمق‌ها و سرعت‌های مختلف.

۲- ارزیابی توانایی سیستم استنتاج عصبی فازی (انفیس) در پیش‌بینی نیروهای کششی و عمودی وارد بر شاخه‌ها و مصرف سوخت تراکتور حین عملیات زیرشکنی.



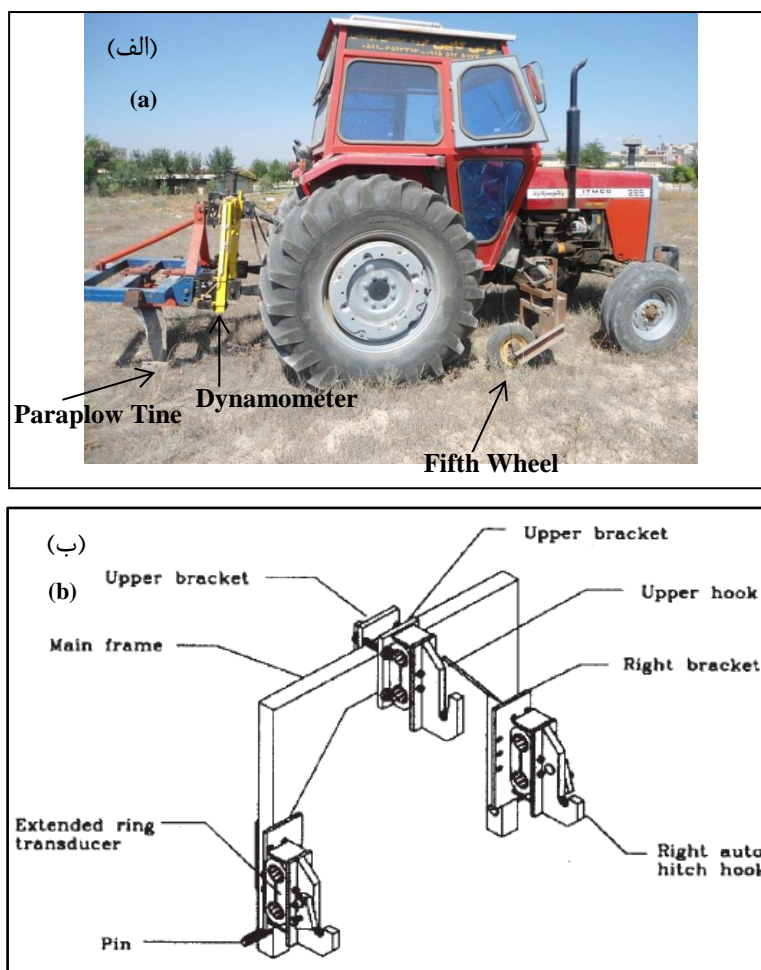
شکل ۱- شاخه‌های تحت بررسی؛ الف) پاراپلو، ب) زیرشکن، ج) نمای جانبی (شاخه پاراپلو بدون کفش و تیغه) (زاویه جلوه‌دهی قسمت زیرین ساقه = ۲۳/۴۱ درجه)، د) نمای روبه‌رو (شاخه پاراپلو بدون کفش و تیغه) (زاویه انحراف از خط عمود = ۴۱/۸۶ درجه) (زاویه α یا زاویه حمله = ۱۵ درجه) (ابعاد به میلی‌متر)

Fig. 1- Studied tines; a) Paraplow, b) Subsoiler, c) Side view of paraplow tine without blade and shoe (Forward angle of tine is 23.41°), d) Front view of paraplow tine without blade and shoe (diverse angle of normal position is 41.86°) (Rake angle of all tines is 15°) (Dimensions in mm)

اجزای سیستم اندازه‌گیری

سیستم اندازه‌گیری مورد استفاده شامل یک دینامومتر اتصال سه‌نقطه، سوخت‌سنج، چرخ پنجم و یک سیستم جمع‌آوری داده است. به منظور اندازه‌گیری نیروهای مقاوم کششی و عمودی وارد بر شاخه‌های زیرشکن، از دینامومتر اتصال سه‌نقطه

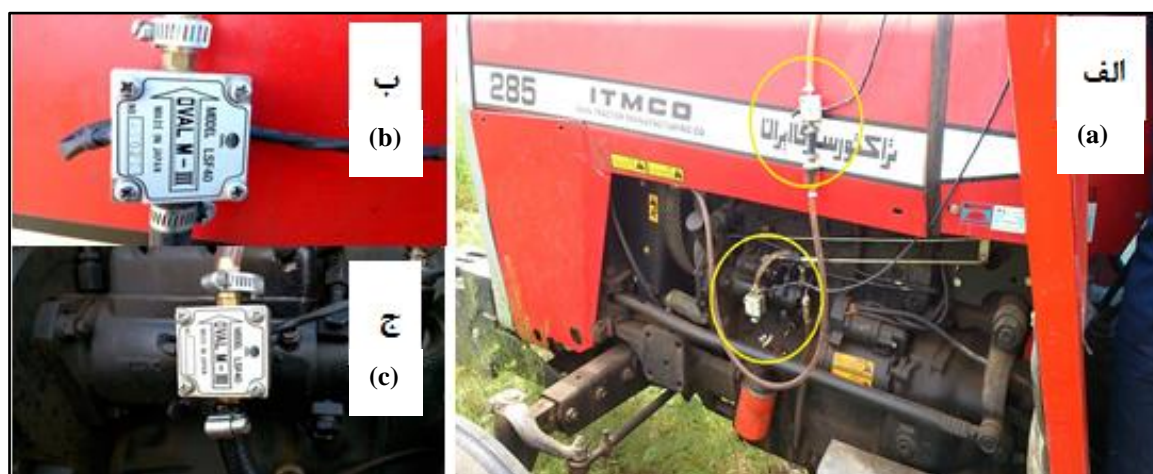
موجود در کارگاه گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه محقق اردبیلی استفاده شد (شکل ۲). توضیحات کامل در خصوص طراحی، ساخت و سایر جنبه‌های این دستگاه در تحقیق عباسپور گیلانده و حقیقت شیشوان (Abbaspour-Gilandeh & Haghghat-Shishvan, 2011) ارائه شده است.



شکل ۲- ابزارهای مورد استفاده در آزمون‌های مزرعه‌ای شامل الف) دینامومتر و چرخ پنجم و ب) اجزای دینامومتر
 Fig. 2- The used tools in field tests a) dynamometer and fifth wheel b) dynamometer parts

مسیر بازگشت سوخت اضافی به مخزن کار گذاشته شده‌اند (شکل ۳). اختلاف داده این دو حسگر در نمایشگر دیجیتال سیستم سوخت‌سنج بیانگر میزان سوخت مصرفی است.

مصرف سوخت تراکتور با استفاده از دو حسگر سنجش جریان، ساخت شرکت اوال (Oval) ژاپن، اندازه‌گیری شد که یکی در مسیر رفت (قبل از پمپ انژکتور) و دیگری یعنی حسگر مسیر برگشت در



شکل ۳- حسگرهای سنجش جریان برای اندازه‌گیری مصرف سوخت:
 الف) نمای کلی، ب) حسگر در مسیر برگشت و ج) حسگر در مسیر رفت
Fig. 3- Flow meter sensors for measuring the amount of fuel consumption
 a) total view and b,c) sensors in back and go lines, respectively

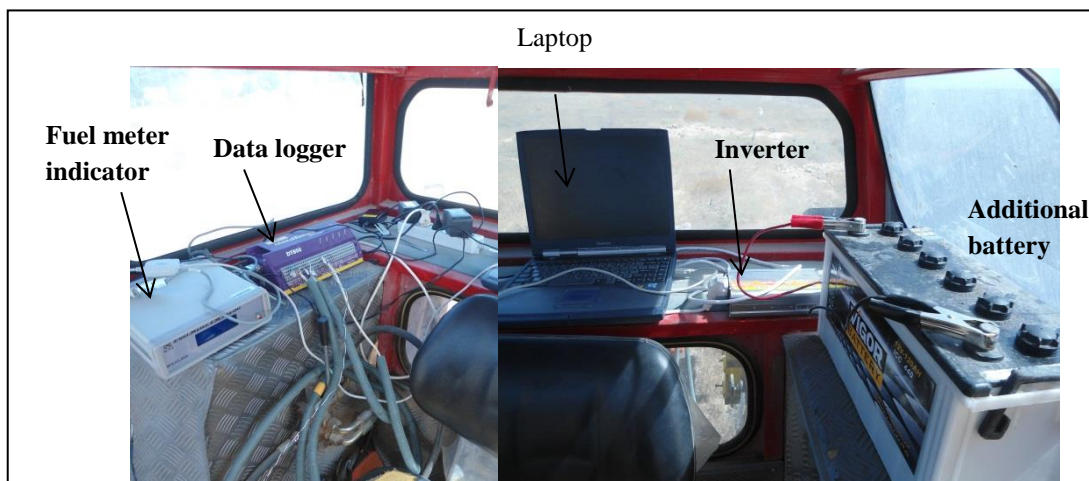
می‌شود. با استفاده از این دو عامل کنترل، عمق خاک‌ورزی به دقت در سه عمق مورد نظر ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری تنظیم و از نوسانات عمقی ناچیز چشم‌پوشی شد. سرعت دورانی موتور در ۱۶۰۰ دور بر دقیقه در تمامی آزمایش‌ها ثابت نگه داشته شد.

سیستم جمع‌آوری داده

ابزارهای مورد استفاده در این بخش شامل کرنش‌سنج‌های نصب‌شده روی حلقه‌های هشت‌وجهی توسعه یافته^۱ دینامومتر، دیتالاگر و لپ‌تاپ است. سیگنال‌های خروجی از کرنش‌سنج‌ها در دیتالاگر DT-800 شرکت دیتاتیکر استرالیا، پس از رقومی شدن، برای ذخیره‌سازی به لپ‌تاپ منتقل می‌شود (شکل ۴).

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

از این سیستم برای اندازه‌گیری مسافت پیموده‌شده استفاده می‌شود. عمق خاک‌ورزی با استفاده از تنظیم بازوهای تحتانی سیستم اتصال سه‌نقطه تراکتور و نیز چرخ‌های تثبیت عمق نصب شده در دو طرف قاب ابزار خاک‌ورز کنترل



شکل ۴- ابزارهای مورد استفاده در سیستم جمع‌آوری داده

Fig. 4- The used tools in data logging system

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، هر کرت ۲ متر عرض و ۲۰ متر طول دارد. در آزمون‌های مزرعه‌ای، چهار پارامتر شامل نیروهای کششی و عمودی به همراه سرعت پیشروی و مصرف سوخت به صورت مستقیم اندازه‌گیری شدند. خصوصیات خاک لومی شنی مزرعه که بر تقابل میان ادوات خاک‌ورز و خاک مؤثر هستند شامل میزان رطوبت، چگالی ظاهری، شاخص مخروط و ساختمان خاک (Upadhyaya *et al.*, 1987; 1984، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند (جدول ۱، شکل ۵).

صحت‌سنجی (کالیبراسیون) دینامومتر سه محوره

دینامومتر مورد استفاده، در مزرعه و فقط در مورد نیروی مقاوم افقی در دو مرحله و با استفاده از کشش دو تراکتوری RNAM^۱ صحت‌سنجی (کالیبره) شد.

آزمون‌های مزرعه‌ای

تمامی ابزارها و ادوات موردنیاز به همراه تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ به مزرعه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی (طول جغرافیایی "۴۸°۱۷'۳۵"، عرض جغرافیایی "۳۸°۱۲'۴۰" و ارتفاع ۱۴۱۰ متر از سطح دریا) منتقل گردید. مزرعه دارای خاک بسیار متراکم با نفوذپذیری بسیار کم و شیب حدود چهار درصد است. آزمون‌های مزرعه‌ای در سه عمق ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری و در چهار سرعت پیشروی ۱/۸،



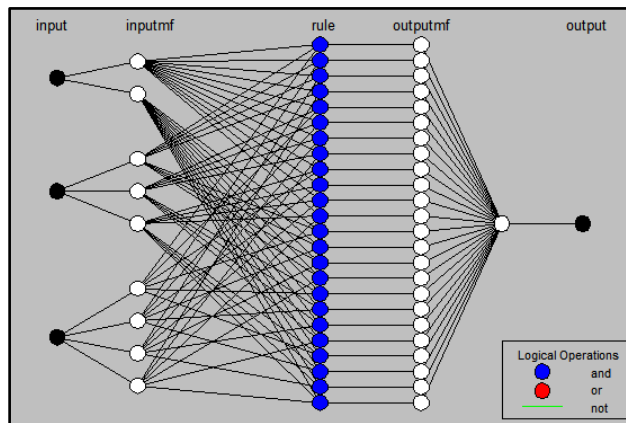
شکل ۵- نفوذسنج دیجیتال

Fig. 5- Digital penetrometer

واسطه یک بردار گرادیان میسر خواهد بود. بردار گرادیان مقیاسی برای ارزیابی عملکرد مدل انفیس است. شماتیکی از مدل انفیس با چهار متغیر مستقل در ورودی و یک متغیر وابسته در خروجی در شکل ۶ ارائه شده است.

سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS)

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



شکل ۶- ساختار سیستم استنتاج عصبی فازی (انفیس)

Fig. 6- The schematic of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

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

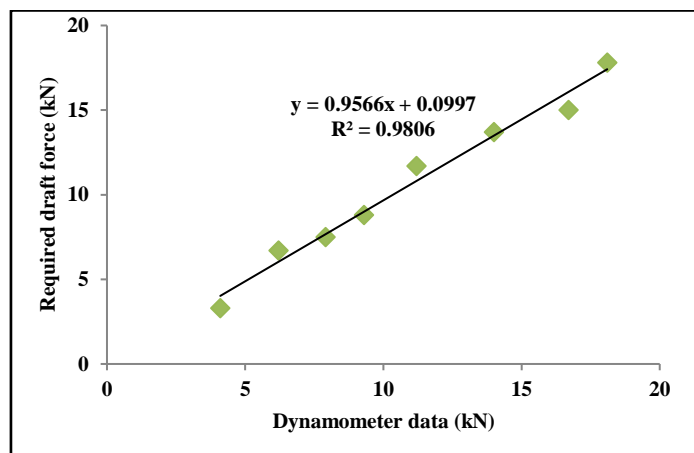
که در آن، Y_{pr} ، Y_{ac} و Y_{me} = به ترتیب، مقادیر اندازه‌گیری شده؛ پیش‌بینی شده؛ و میانگین مدل‌های توسعه‌یافته.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از صحت‌سنجی مزرعه‌ای دینامومتر اتصال سه‌نقطه در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک (شکل ۸) نشان می‌دهد که سخت‌لایه‌ای در عمق تقریباً ۴۰ سانتی‌متری خاک مزرعه وجود دارد.

در مجموع 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 دارد. تعداد زیادی از مدل‌های انفیس با توابع عضویت متفاوت به منظور یافتن بهترین مدل انفیس برای پیش‌بینی خروجی‌های مذکور بررسی شدند. داده‌های در دسترس به دو مجموعه ۸۰ تایی (برای آموزش شبکه) و ۱۶ تایی (برای آزمون مدل خروجی) استفاده شد. آزمون مدل خروجی به منظور همپوشانی نشدن خروجی‌ها اعمال گردید. از دو عامل میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب همبستگی (R^2) برای ارزیابی مدل‌های انفیس استفاده شد:

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



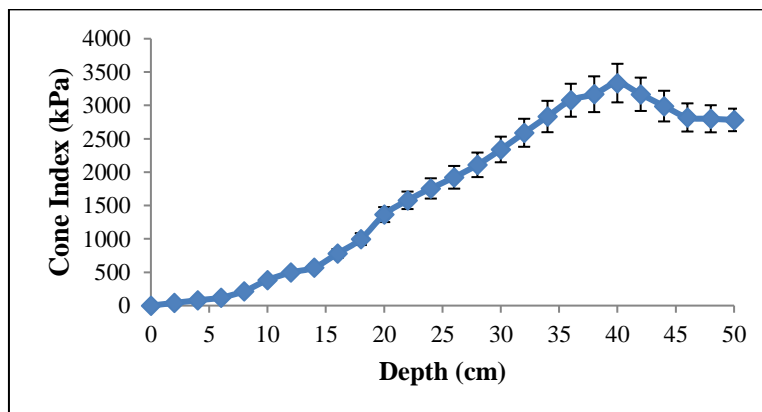
شکل ۷- نتایج به دست آمده از صحت‌سنجی مزرعه‌ای دینامومتر

Fig. 7- Obtained data from dynamometer field calibration

جدول ۱- خصوصیات خاک مزرعه تحقیقاتی

Table 1- Properties of research field soil

| مقدار (Amount) | خصوصیت (Property) |
|----------------|--|
| 45.9 | شن (درصد) Sand (%) |
| 29.1 | سیلت (درصد) Silt (%) |
| 25 | رس (درصد) Clay (%) |
| 0.5 | ماده آلی (درصد) Organic Matter (%) |
| 7.13 | اسیدیته pH |
| 0.31 | هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) EC (ds/m) |
| 1.47 | جرم مخصوص ظاهری خاک (۰-۲۵ سانتی‌متری) (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Bulk Density (0-25 cm depth) (g/cm ³) |
| 1.58 | جرم مخصوص ظاهری خاک (۲۵-۵۰ سانتی‌متری) (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Bulk Density (25-50 cm depth) (g/cm ³) |
| 6.5 | رطوبت بر پایه وزن خشک (۰-۲۵ سانتی‌متری) (درصد) Moisture Content (Dry Base) (0-25cm depth) (%) |
| 7.4 | رطوبت بر پایه وزن خشک (۲۵-۵۰ سانتی‌متری) (درصد) Moisture Content (Dry Base) (25-50cm depth) (%) |



شکل ۸- نتایج اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک مزرعه تحقیقاتی

Fig. 8- The results of measuring soil penetration of research field

بیش‌بینی نیروهای وارد بر شاخه و مصرف سوخت تراکتور...

نمی‌شود.

این نوع افزایش برای هر دو شاخه مصداق دارد. از فرمول استاندارد 2011 ASABE Standards و تحقیقات بسیاری از محققان (Upadhyaya *et al.*, 1984; Crowell & Bowers, 1985; De Souza *et al.*, 1994; Al-suhaibani *et al.*, 2006; Sahu & Raheman, 2006) نیز این نوع افزایش نیروی کششی تحت تأثیر افزایش سرعت پیشروی مشهود است.

نتایج اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای

اثر نوع شاخه، عمق کار و سرعت پیشروی بر نیروی کششی

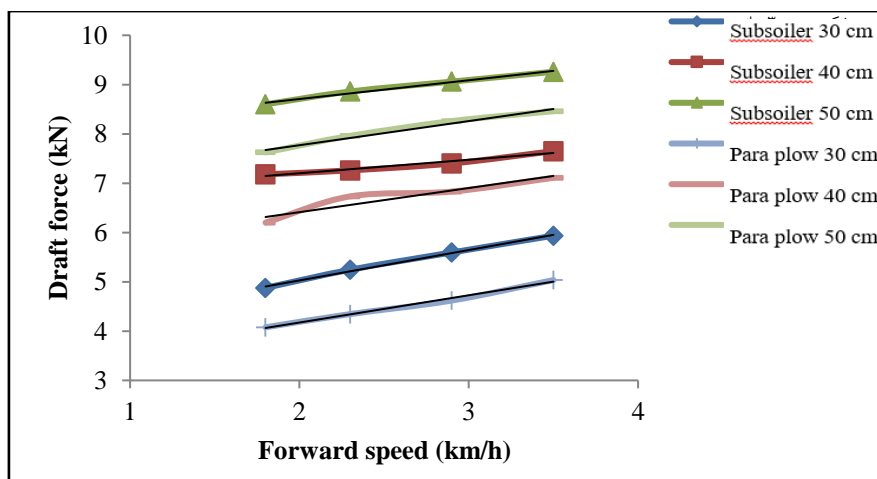
جدول ۲ و شکل ۹ نشان می‌دهد که عمق خاک‌ورزی، سرعت پیشروی و نوع شاخه (تمامی عوامل) و اثر متقابل آنها، بر نیروی کششی مؤثر هستند ($p < 0.01$). شکل ۸ نشان می‌دهد با دو برابر شدن سرعت پیشروی، مثلاً از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت، مقاومت کششی افزایش می‌یابد اما دو برابر

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

Table 2- Analysis of Variance (ANOVA) of tine type, tillage depth and forward speed on the studied parameters

| میانگین مربعات | | | درجه آزادی | منبع تغییرات |
|------------------|----------------|-------------|-------------------|------------------------------------|
| مصرف سوخت | نیروی عمودی | نیروی کششی | Degree of Freedom | Source of Variation |
| Fuel consumption | Vertical force | Draft force | | |
| **11.852 | **3.234 | **31.155 | 1 | شاخه Tine |
| **195.519 | **4.843 | **203.01 | 2 | عمق Depth |
| **95.235 | **0.299 | **5.729 | 3 | سرعت Speed |
| **2.201 | **0.073 | **0.277 | 2 | شاخه × عمق Tine×Depth |
| **0.497 | **0.012 | **0.071 | 3 | شاخه × سرعت Tine×Speed |
| **0.348 | **0.04 | **0.111 | 6 | عمق × سرعت Depth×Speed |
| **0.41 | **0.018 | **0.084 | 6 | شاخه × عمق × سرعت Tine×Depth×Speed |
| 0.001 | 0.003 | 0.001 | 72 | خطا Error |
| | | | 95 | کل Total |

**اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد



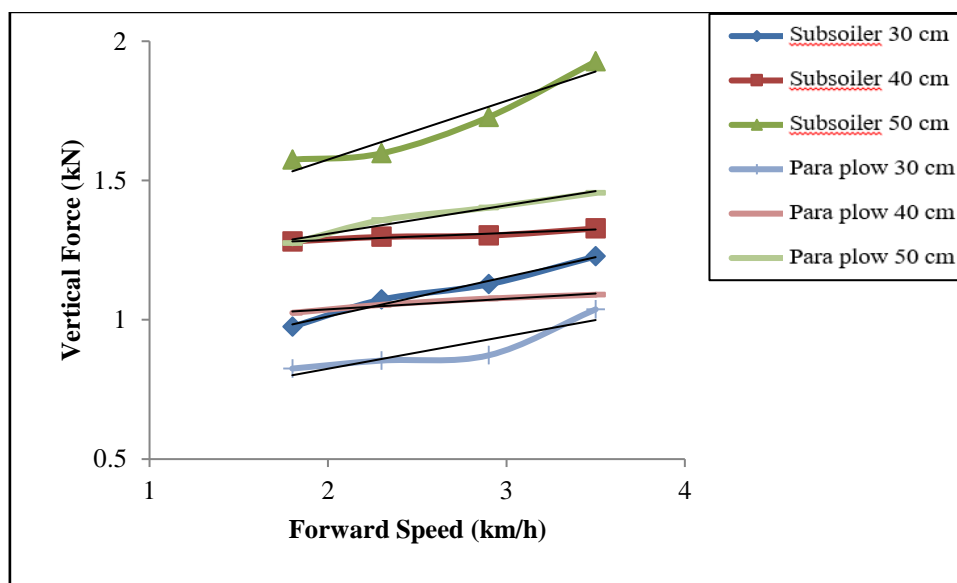
شکل ۹- رابطه بین سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی، نوع شاخه و نیروی کششی

Fig. 9- Relationship between forward speed, tillage depth, tine type and draft force

بیشترین نیروی کششی موردنیاز به میزان ۹/۲۶ کیلونیوتن در شاخه زیرشکن در سرعت پیشروی ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و عمق ۵۰ سانتی‌متر و کمترین آن در شاخه پاراپلو در سرعت پیشروی ۱/۸ کیلومتر بر ساعت و عمق ۳۰ سانتی‌متر دیده می‌شود. رابطه میان نیروی کششی موردنیاز و سرعت پیشروی در همه عمق‌ها و هر دو شاخه، خطی است ($R^2 > 0.89$). دیده می‌شود که نیروی کششی موردنیاز شاخه پاراپلو در عمق ۴۰ سانتی‌متر و سرعت ۲/۳ کیلومتر بر ساعت به صورت ناگهانی

افزایش یافته اما در مجموع، افزایش نیروی کششی تحت تأثیر افزایش سرعت پیشروی، بدون تغییرات ناگهانی و به آرامی اتفاق افتاده است. در تمامی عمق‌ها و سرعت‌ها، نیروی کششی موردنیاز پاراپلو از نیروی کششی موردنیاز زیرشکن کمتر است.

اثر نوع شاخه، عمق و سرعت پیشروی بر نیروی عمودی
اثر نوع شاخه زیرشکن، عمق کاری و سرعت پیشروی بر نیروی عمودی وارد بر ابزار خاک‌ورز در جدول ۲ و شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۱۰- رابطه بین سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی، نوع شاخه و نیروی عمودی

Fig. 10- Relationship between forward speed, tillage depth, tine type and vertical force

خاک‌ورزی ۵۰ سانتی‌متر و کمترین میزان نیروی عمودی، معادل با ۰/۸۲۵ کیلونیوتن، مربوط است به شاخه پاراپلو در سرعت پیشروی ۱/۸ کیلومتر بر ساعت و عمق خاک‌ورزی ۳۰ سانتی‌متر. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که نیروهای کششی و عمودی ارتباط مستقیم با یکدیگر دارند و افزایش نیروی کششی در سرعت‌های بالاتر به

نتایج این بخش از تحقیق نشان می‌دهد که نوع شاخه زیرشکن، سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی و اثر متقابل آنها، بر نیروی عمودی وارد بر ابزار خاک‌ورز مؤثر هستند ($p < 0.01$). شکل ۹ نشان می‌دهد که بیشترین نیروی عمودی به میزان ۱/۹۳ کیلونیوتن مربوط است به شاخه زیرشکن مرسوم در سرعت پیشروی ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و عمق

نیروی عمودی بیانگر تمایل به نفوذ است و نیروی عمودی پاراپلو نیز کم است، توصیه شده تا وزنه‌هایی به قاب این ابزار خاک‌ورز اضافه گردد تا نفوذ آن به درون زمین راحت‌تر باشد و در عمقی از خاک حرکت کند که مد نظر کشاورزان است (Kasisira & du Plessis, 2006).

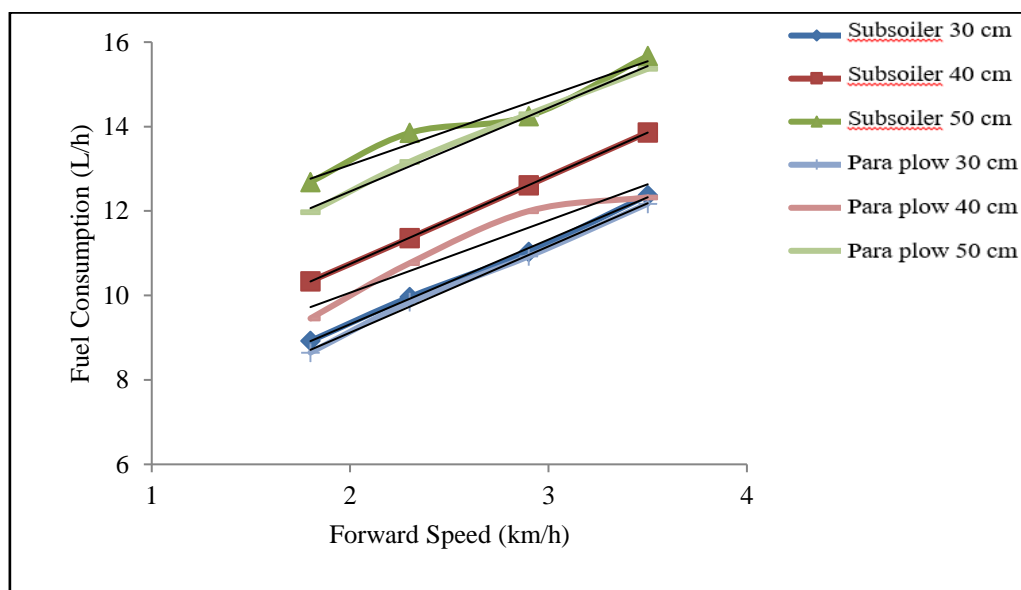
اثر نوع شاخه، عمق خاک‌ورزی و سرعت

پیشروی بر مصرف سوخت

اثر نوع شاخه، عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر مصرف سوخت تراکتور در جدول ۲ و شکل ۱۱ نشان داده شده است.

افزایش نیروی عمودی می‌انجامد و بالعکس. رابطه بین نیروی عمودی و سرعت پیشروی در تمامی عمق‌های تحت بررسی و هر دو نوع شاخه زیرشکن خطی است ($R^2 > 0.8$). در عمق ۴۰ سانتی‌متر، افزایش سرعت پیشروی منجر شده است به افزایش نیروی عمودی، با شیب ملایم، در هر دو نوع شاخه اما در دیگر عمق‌ها این روند افزایشی تندتر است.

میزان نیروی عمودی در عمق ۳۰ سانتی‌متر و در سرعت‌های بالاتر بسیار نزدیک به میزان نیروی عمودی در عمق ۴۰ سانتی‌متر است. این تقارب در پاراپلو بیشتر ملموس است. نیروی عمودی وارد بر پاراپلو کمتر است تا بر زیرشکن مرسوم؛ دلیل این امر طراحی خاص پاراپلو با ساقه کج آن است. چون



شکل ۱۱- رابطه بین سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی، نوع شاخه و مصرف سوخت

Fig. 11- Relationship between forward speed, tillage depth, tine type and fuel consumption

پیشروی ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و عمق ۵۰ سانتی‌متر و کمترین مصرف سوخت در پاراپلو به میزان ۸/۶ لیتر بر ساعت در سرعت پیشروی ۱/۸ کیلومتر بر ساعت و عمق ۳۰ سانتی‌متر دیده می‌شود. رابطه میان مصرف سوخت و سرعت پیشروی در تمامی عمق‌ها و برای

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که نوع شاخه، سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی و اثر متقابل آنها بر مصرف سوخت مؤثر هستند ($p < 0.01$). در شکل ۱۰، بیشترین مصرف سوخت به میزان ۱۵/۷ لیتر بر ساعت در شاخه زیرشکن مرسوم و در سرعت

هر دو نوع شاخه خطی است ($R^2 > 0.93$). مصرف

مدل‌های پیش‌بینی رگرسیون چندگانه

شش مدل رگرسیونی چندمتغیره شامل پارامترهای تحت بررسی (عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی) به منظور پیش‌بینی پارامترهای بررسی شده مرتبط با شاخه‌های زیرشکن مرسوم و پاراپلو به صورت جداگانه با روش گام به گام توسعه داده شدند. این مدل‌ها به همراه ضریب‌های تبیین و میانگین مطلق خطای مربوط در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

سوخت در پاراپلو در سرعت ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در هر دو عمق ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر کاملاً به هم نزدیک است. در حالت کلی، نیروهای مقاوم کششی و عمودی وارد بر پاراپلو و نیز مصرف سوخت تراکتور به‌هنگام استفاده از آن کمتر است تا در زیرشکن مرسوم. می‌توان نتیجه گرفت به‌کارگیری پاراپلو با صرفه‌تر است تا زیرشکن مرسوم. این نتیجه‌گیری نیز در تحقیقات گذشته (Askari et al., 2017)

جدول ۳- مدل‌های پیش‌بینی رگرسیونی برای پارامترهای مورد مطالعه
Table 3- Regression prediction models for studied parameters

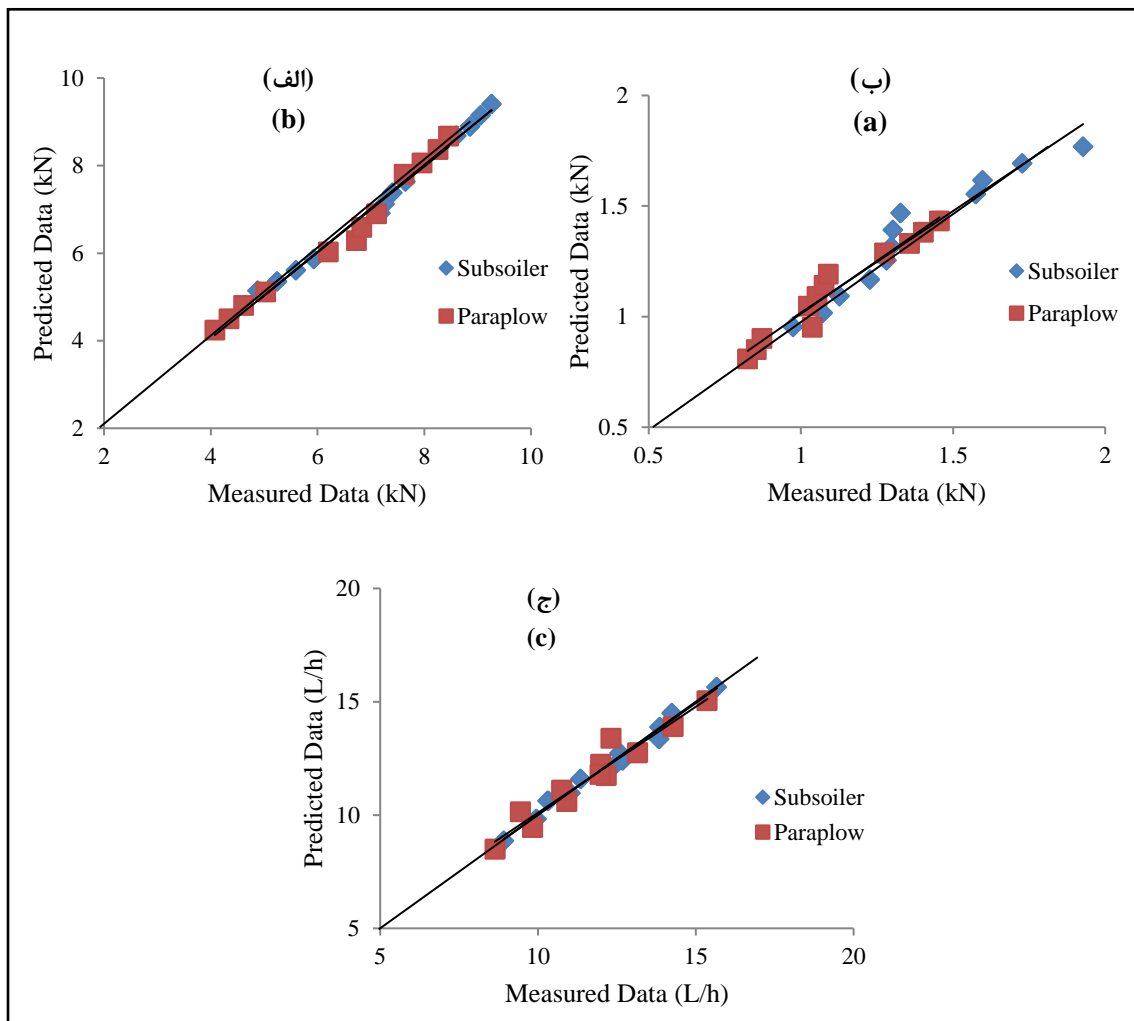
| پارامتر Parameter | شاخه Tine | مدل Model | ضریب تبیین Correlation Coefficient | میانگین مطلق خطا Mean of Actual Error |
|--|---------------------|------------------------------|---------------------------------------|--|
| نیروی کششی (کیلو نیوتن) Draft force (kN) | زیرشکن Subsoiler | $-0.932 + 0.177 D + 0.424 S$ | 0.9819 | 0.0131 |
| | پاراپلو Paraplow | $-2.016 + 0.178 D + 0.511 S$ | 0.9803 | 0.0157 |
| نیروی عمودی (کیلو نیوتن) Vertical force (kN) | زیرشکن Subsoiler | $-0.173 + 0.03 D + 0.126 S$ | 0.9281 | 0.0037 |
| | پاراپلو Paraplow | $-0.065 + 0.024 D + 0.085 S$ | 0.9492 | 0.0034 |
| مصرف سوخت (لیتر بر ساعت) Fuel consumption (L/h) | زیرشکن Subsoiler | $0.126 + 0.177 D + 1.907 S$ | 0.9854 | 0.0272 |
| | پاراپلو Paraplow | $0.099 + 0.165 D + 1.911 S$ | 0.9358 | 0.0391 |

D- عمق خاک‌ورزی (سانتی‌متر)، S- سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت) (D- Depth (cm) and S- Speed (km/h))

اعتبارسنجی معادلات رگرسیونی

این شکل نشان می‌دهد که مدل‌های رگرسیونی ارائه شده، پارامترهای وابسته مورد مطالعه را با دقت بالا ($R^2 > 0.928$) پیش‌بینی می‌کنند.

داده‌های حاصل از معادلات رگرسیونی در مقایسه با داده‌های مزرعه‌ای رسم شده در شکل ۱۲ ارزیابی شدند.



شکل ۱۲- داده‌های پیش‌بینی شده در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمون‌های مزرعه‌ای:

(الف) نیروی کششی، (ب) نیروی عمودی و (ج) مصرف سوخت

Fig. 12- Predicted data in comparison of measured data during field tests
a) draft force, b) vertical force, c) fuel consumption

می‌توانند دقت بالا پارامترهای تحت بررسی مرتبط با شاخه‌های زیرشکن مرسوم و پاراپلو را پیش‌بینی کنند.

نتایج بخش انفیس

جدول ۴ نشان می‌دهد که در هر یک از خروجی‌ها (نیروی کششی، نیروی عمودی و مصرف سوخت)، کدام تابع عضویت در ورودی، بهترین نتیجه را با کمترین مربعات خطا و بیشترین ضریب همبستگی به‌دست می‌دهد.

بالاترین ضریب همبستگی (R^2)، به میزان ۰/۹۸۵۴، در مدل پیش‌بینی مصرف سوخت تراکتور هنگام کار با زیرشکن و کمترین ضریب همبستگی، به میزان ۰/۹۳، در مدل پیش‌بینی نیروی عمودی زیرشکن دیده می‌شود.

کمترین و بالاترین میانگین ضریب همبستگی (در بین هردو شاخه) مربوط به نیروی عمودی و نیروی کششی به ترتیب ۰/۹۳۸۶ و ۰/۹۸۱۱ است و نشان می‌دهد مدل‌های رگرسیونی ارائه شده با

جدول ۴- مدل‌های مختلف انفیس در مورد خروجی‌های تحت بررسی

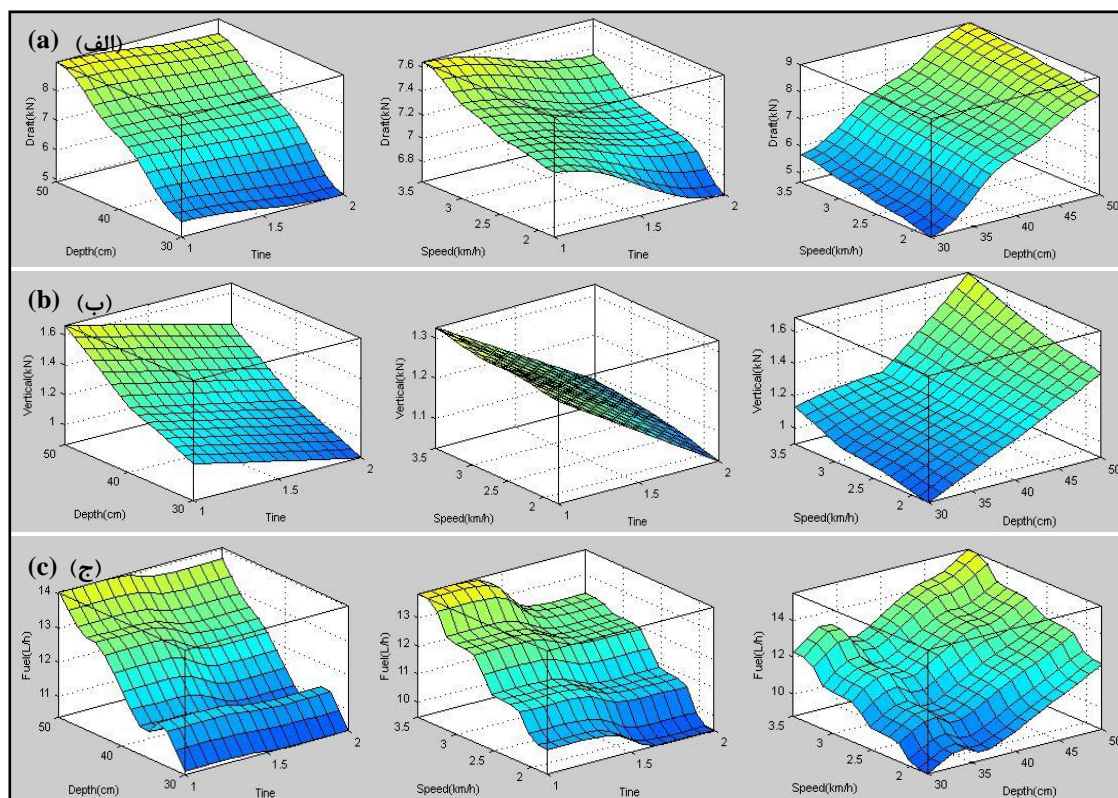
Table 4- Different ANFIS models about studied outputs

| ضریب همبستگی Correlation Coefficient (R ²) | میانگین مربعات خطا (Mean of) (Square Error) | تعداد توابع عضویت | | نوع تابع عضویت | | مدل Model | پارامتر خروجی Output Parameter |
|---|---|-------------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|--------------|---|
| | | Membership Function Number | | Membership Function Type | | | |
| | | تکرار Repeat | ورودی Input | خروجی Output | ورودی Input | | |
| 0.9630 | 0.0545 | 50 | 4,3,2 | خطی | Trimf | 1 | |
| 0.9999 | 0.0156 | 50 | 4,3,2 | خطی | Gaussmf | 2 | |
| 0.9283 | 0.0861 | 50 | 4,3,2 | خطی | Pimf | 3 | نیروی کششی Draft Force |
| 0.9437 | 0.0302 | 50 | 4,3,2 | خطی | dsigmf | 4 | |
| 0.9545 | 0.0611 | 50 | 4,3,2 | خطی | Tramf | 5 | |
| 0.9893 | 0.0231 | 50 | 4,3,2 | خطی | Trimf | 1 | |
| 0.9188 | 0.0286 | 50 | 4,3,2 | خطی | Gaussmf | 2 | |
| 0.9217 | 0.0326 | 50 | 4,3,2 | خطی | Pimf | 3 | نیروی عمودی Vertical Force |
| 0.9324 | 0.0422 | 50 | 4,3,2 | خطی | dsigmf | 4 | |
| 0.9033 | 0.0501 | 50 | 4,3,2 | خطی | Tramf | 5 | |
| 0.9362 | 0.0425 | 50 | 4,3,2 | خطی | Trimf | 1 | |
| 0.9457 | 0.0319 | 50 | 4,3,2 | خطی | Gaussmf | 2 | |
| 0.9280 | 0.0456 | 50 | 4,3,2 | خطی | Pimf | 3 | مصرف سوخت Fuel Consumption |
| 0.9916 | 0.0212 | 50 | 4,3,2 | خطی | dsigmf | 4 | |
| 0.9422 | 0.0313 | 50 | 4,3,2 | خطی | Tramf | 5 | |

نیروهای کششی و عمودی وارد بر شاخه‌های زیرشکن و مصرف سوخت تراکتور افزایش می‌یابد (Spoor & Godwin, 1978; Askari *et al.*, 2016) که دلیل آن افزایش حجم خاک حرکت کرده و افزایش سرعت حرکت خاک به ترتیب به واسطه افزایش عمق کار و سرعت پیشروی است. در تحقیقات گذشته (Page Harrison, 1988) نیز گفته شده که پاراپلو، نسبت به زیرشکن، به مصرف انرژی کمتری نیاز دارد.

تغییرات نیروی کششی، نیروی عمودی و میزان مصرف سوخت عملیات زیرشکنی تحت تأثیر نوع شاخه، عمق کاری و سرعت پیشروی حاصل از مدل‌های بهینه انفیس در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این شکل، شاخه‌های ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به زیرشکن و پاراپلو است. با استفاده از سطوح این شکل‌ها، می‌توان خروجی مدل را برای ورودی خاص محاسبه کرد. شکل ۱۳ نیز نشان می‌دهد که با افزایش عمق کار و سرعت پیشروی،

پیش‌بینی نیروهای وارد بر شاخه و مصرف سوخت تراکتور...



شکل ۱۳- تغییرات پارامترهای خروجی با توجه به تغییرات نوع شاخه، عمق کار و سرعت پیشروی در مدل پیش‌بینی انفیس

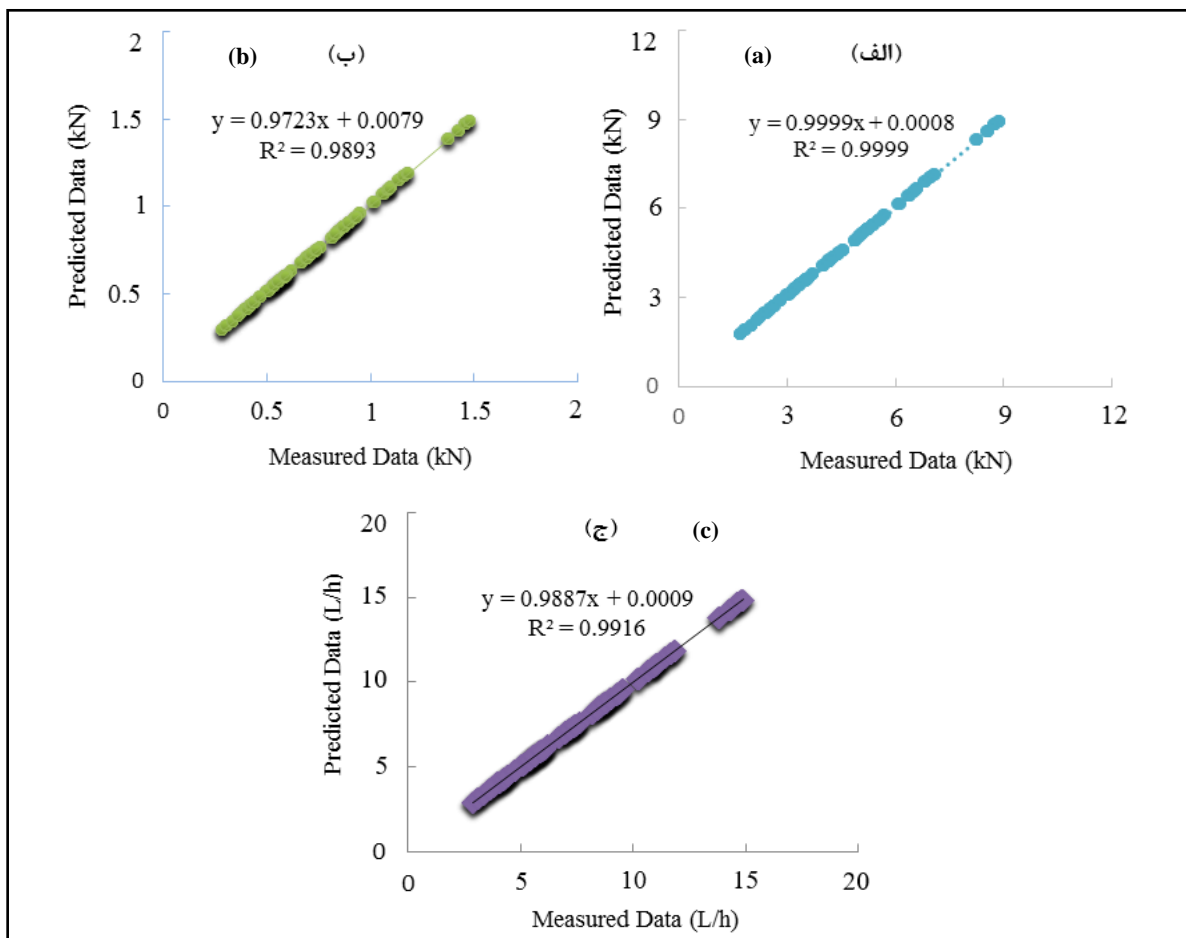
الف) نیروی کششی، ب) نیروی عمودی و ج) مصرف سوخت

(Draft = نیروی کششی، Vertical = نیروی عمودی، Fuel = مصرف سوخت، Tine = شاخه، Depth = عمق کار و Speed = سرعت پیشروی)

Fig. 13- The change of output parameters with regarding the change of tine type, operating depth and forward speed in ANFIS prediction model; a) draft force, b) vertical force, c) fuel consumption

های زیرشکن و نیز مصرف سوخت تراکتور را پیش‌بینی کنند. بالاترین ضریب همبستگی (R^2) در مدل‌های پیش‌بینی رگرسیونی در مدل پیش‌بینی مصرف سوخت تراکتور، به میزان ۰/۹۸۵۴، دیده می‌شود که کمتر از کمترین ضریب همبستگی در بین مدل‌های انفیس (به میزان ۰/۹۸۹۳) و بیانگر آن است که مدل‌های انفیس، نسبت به مدل‌های رگرسیونی، با دقتی بالاتر می‌توانند پارامترهای خروجی (متغیرهای وابسته) را پیش‌بینی کنند.

با مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه و داده‌های پیش‌بینی شده با مدل‌های انفیس برای هر یک از پارامترهای نیروی کششی، نیروی عمودی و مصرف سوخت تراکتور (شکل ۱۳) در می‌یابیم که این دو دسته داده، ضریب‌های همبستگی بسیار بالایی دارند ($R^2 > 0.9893$). بالابودن ضریب‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های انفیس توانسته‌اند با دقت بسیار بالا با استفاده از ورودی‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه، نیروهای کششی و عمودی موردنیاز شاخه-



شکل ۱۴- همبستگی میان داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده؛ الف) نیروی کششی، ب) نیروی عمودی و ج) مصرف سوخت
Fig. 14- Correlation between predicted and measured data about: up and left) draft force, up and right) vertical force, low) fuel consumption (Horizontal axis is measured data and vertical axis is predicted data at all diagrams)

نتیجه‌گیری

- بازه موجود در پارامترهای مورد مطالعه نشان می‌دهد که با انتخاب شاخه‌های اقتصادی‌تر و متناسب با ابعاد تراکتور و ادوات متصل به آن و انتخاب درست سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی، کاهش انرژی مصرفی به آسانی حاصل خواهد شد.
 - مدل‌های رگرسیونی چندگانه به منظور پیش‌بینی پارامترهای تحت بررسی ارائه و مشخص شد که آنها می‌توانند پارامترهای تحت بررسی را با دقت بالا پیش‌بینی کنند.
 - در قسمت انفیس، در مورد نیروهای افقی، عمودی و مصرف سوخت، به ترتیب، توابع عضویت

نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر بیانگر نکات مهم زیر است:
 - نوع شاخه، عمق کار و سرعت پیشروی بر نیروهای کششی و عمودی موردنیاز و نیز مصرف سوخت تراکتور بسیار مؤثرند ($p < 0.01$). افزایش سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی به افزایش نیروهای کششی و عمودی و مصرف سوخت می‌انجامد. بنابراین، نیروهای واردشده و میزان سوخت مصرفی رابطه‌ای مستقیم با یکدیگر دارند.

Trimf, Gaussmf و dsigmf هر یک با میانگین مربعیات خطای ۰/۰۱۵۶، ۰/۰۲۳۱ و ۰/۰۲۱۲ و ضریب همبستگی ۰/۹۹۹، ۰/۹۸۹ و ۰/۹۹۱، بهترین مدل برای پیش‌بینی بودند.

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

- بیشترین ضریب همبستگی (R^2) در مدل‌های پیش‌بینی رگرسیونی مربوط به مدل پیش‌بینی مصرف سوخت تراکتور به میزان ۰/۹۸۵۴ و کمتر از کمترین ضریب همبستگی در بین مدل‌های انفیس به میزان ۰/۹۸۹۳ است. این امر نشان می‌دهد مدل‌های انفیس، نسبت به مدل‌های رگرسیونی، می‌توانند پارامترهای خروجی (متغیرهای وابسته) را با دقت بالاتر پیش‌بینی کنند.

قدردانی

این مطالعه در قالب پروژه تحقیقاتی پسادکتری با شماره ۱۶۷۵ مورخ ۹۶/۰۹/۲۷ به انجام رسیده است. از حوزه معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی، به دلیل حمایت های مالی این حوزه، و از آقای مهندس علیرضا مهدی‌زاده مسئول محترم کارگاه گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه، برای همکاری ایشان در اجرای عملیات مزرعه‌ای، قدردانی می‌شود.

مراجع

- Abbaspour-Gilandeh, Y., & Haghghat-Shishvan, S. (2011). Extended octagonal ring transducers for measurement of tractor-implement force. *Instruments and Experimental Techniques*, 54(1), 137-141.
- 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.
- 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.
- Al-Suhaibani, S. A., & Al-Janobi, A. A. (1997). Draught requirements of tillage implements operating on sandy loam soil. *Research in Agricultural Engineering*, 66(3), 177-182.
- Al-Suhaibani, S. A., Al-Janobi, A. A., & Al-Majhadi, Y. N. (2006). *Tractors and tillage implements performance. Proceedings of the CSBE/SCGAB 2006 Annual Conference*, July 16-19, Alberta- Canada.
- Anon. (2011). *ASABE Standards*. ASAE D497.7. Agricultural Machinery Management Data. Available at www.asabe.org.
- 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.

- Askari, M., Shahgholi, Gh., Abbaspour-Gilandeh, Y., & Tash-Shamsabadi, H. (2016). The effect of new wings on subsoiler performance. *Journal of Applied Engineering in Agriculture*, 32, 1-10.
- Askari, M., Shahgholi, Gh., & 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.
- Bashford, L. L., Byerly, D. V., & Grisso, R. D. (1991). Draft and energy requirements of agricultural implements in semi-arid regions of Morocco. *Ama, Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America*, 22, 79-82.
- Çelik, A., & Raper, R. L. (2012). Design and evaluation of ground-driven rotary subsoilers. *Soil and Tillage Research*, 12(4), 203-210.
- Crowell, G., & Bowers, J. R. (1985). Southeastern tillage energy data and recommended reporting. *Transaction of the ASAE*, 28(3), 731-737.
- De Souza, E. G., Lima, J. S. S., & Milanez, L. F. (1994). Overall efficiency of tractor operating in the field. *Transaction of the ASAE*, 106, 771-775.
- 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 Journal of Agricultural Sciences*, 36, 1045-1052. (in Persian)
- Godwin, R. J. (1975). An extended octagonal ring transducer for use in tillage studies. *Journal of agricultural engineering research*, 20(2), 347-352.
- Grisso, R. D., Yasin, M., & Kocher, M. F. (1996). Tillage implements forces operating in silty clay loam. *ASAE Paper No. 94-1532*. St. Joseph, Mich. ASAE.
- Kasisira, L. L., & du Plessis, H. L. M. (2006). Energy optimization for subsoilers in tandem in a sandy clay loam soil. *Soil and Tillage Research*, 86(2), 185-198.
- 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.
- Leonard, J. J. (1980). An extended-octagon rigid drawbar dynamometer. *Agricultural Engineering Australia*, 9(1), 3-8.
- Marakoglo, T., & Çarman, K. (2010). Fuzzy knowledge-based model for prediction of soil loosening and draft efficiency in tillage. *Journal of Terramechanics*, 47(2), 173-178.
- 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.
- Page Harrison, H. (1988). Soil reacting forces for a bentleg plow. *American Society of Agricultural Engineering*, 311, 0001-2351/88/3101-47.
- Pandiyani, 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.
- 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.
- Pidgeon, J. D. (1983). Paraplow- A new approach to soil loosening. *ASAE Paper*. No. 83-2136. ASAE. St. Joseph, MI.

- 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*, 164, 379-385.
- 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 content, tillage depth and operation speed. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences (JAES)*, 13, 1057-1062.
- 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.
- 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 (IJFAS)*, 43, 215-221.
- Sorin, S., Drocas, I., Molnar, A., & Ranta, O. (2013). Studies regarding comparative fuel consumption at classical and conservation tillage. *ProEnvironment*, 6, 199-202.
- 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.
- Subbulakshmi, S., Harisudan, C., Saravanan, N., & Subbian, P. (2009). Conservation tillage-an eco friendly management practices for agriculture. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 56, 1098-1103.
- Summers, J. D., Khalilian, A., & Batchelder, D. G. (1986). Draft relationships for primary tillage in Oklahoma soils. *Transaction of the ASAE*, 29, 37-39.
- 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.
- Upadhyaya, S. K., Williams, T. H., Kemble, L. J., & Collins, N. E. (1984). Energy requirement for chiseling in coastal plain soils. *Transaction of the ASAE*, 36, 1267-1270.
- 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.
- Zeng, Zh., Chen, Y., & Zhang, X. (2017). Modelling the interaction of a deep tillage tool with heterogeneous soil. *Computers and Electronics in Agriculture*, 14, 130-138.



Research Paper

Predicting the Imposed Forces on the Tines and Tractor Fuel Consumption during Subsoiling Operation using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

M. Askari* and Y. Abbaspour-Gilandeh

*Corresponding Author: Post-Doctoral of Mechanics of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: engmohammadaskari@gmail.com

Received: 7 June 2018 Accepted: 26 November 2018

Abstract

In this research, the adaptive neuro-fuzzy inference system was used for predicting the imposed forces on the tines and tractor fuel consumption during subsoiling operation. The draft and vertical forces imposed on subsoiling tines and tractor fuel consumption were measured under the effect of tine type (subsoiler and paraplow), tillage depth (30, 40 and 50 cm) and forward speed (1.8, 2.3, 2.9 and 3.5 km/h). The field data were used to create the regression and ANFIS models for predicting the studied parameters; the results obtained from applying two models were compared with each other. The field results showed that all independent variables were effective on the studied parameters. Increase in forward speed and tillage depth resulted increase in draft force, vertical forces, and also fuel consumption. Moreover, from the point of consumption of fuel, the paraplow tine was more profitable than subsoiler tine. The results of ANFIS part showed that draft force, vertical force, and fuel consumption, the membership functions of Gaussmf, Trimf and dsigmf, with the mean square error of 0.0156, 0.0231 and 0.0212 also correlation coefficient of 0.999, 0.989 and 0.991, respectively, were the best models for prediction. ANFIS models were found more accurate than regression models, and it could be possible to calculated the model outlet for a special inlet using ANFIS outlet surfaces.

Keywords: ANFIS, Draft Force, Energy Consumption, Subsoiler