

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی و پیش‌بینی ارتباط شاخص مخروط و مقاومت برشی خاک با نیروی کششی خاک‌ورز متقارن

محمد رحمتیان^۱، محمدامین نعمت‌الهی^{۲*}، رضا یگانه^۳ و احمد شریفی مالواجردی^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- استادیار مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- استادیار دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۴- دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۱/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۹/۸/۲۱

چکیده

امروزه خاک‌ورزی و مباحث مرتبط با آن برای محققان و کشاورزان اهمیت بالایی دارد. یکی از این مباحث، نیروی کششی است که عوامل زیادی بر آن تأثیر می‌گذارد. دانستن مقدار تقریبی این نیرو کمک می‌کند تا مثلاً ماشین‌آلات و ادوات مناسب با شرایط موجود در مزرعه به کار گرفته شود. هدف از این تحقیق استفاده از نتایج حاصل از آزمون‌های برش وین و نفوذسنج مخروطی به منظور ارائه مدلی برای پیش‌بینی نیروی کششی ابزار خاک‌ورز متقارن (گاواهن قلمی)، بدون نیاز به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است. بدین منظور چهار مزرعه در نظر گرفته شد و در هر مزرعه آزمایش‌های شاخص مخروط و برش وین اجرا شد. در هر مزرعه با در نظر گرفتن متغیرهای سرعت پیشروی (۳، ۵، ۷ و ۹ کیلومتر در ساعت) و عمق خاک‌ورزی (۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر)، نیروی کششی گاواهن قلمی به دست آمد. این تحقیق در مزرعه بر اساس آزمایش کرت خرد شده بر پایه طرح بلوک کاملاً تصادفی و هر آزمایش در سه تکرار اجرا شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که با افزایش عمق نفوذ از ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر، مقاومت برشی و شاخص مخروط خاک به ترتیب از ۳۶/۶۲ تا ۴۸/۲۱ و از ۲۳/۱۶ تا ۳۸/۸۶ درصد افزایش یافته‌اند. با افزایش سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی، نیروی کششی به ترتیب در حدود ۳۰/۱۶ و ۲۵/۳۲ درصد افزایش یافت. با افزایش رطوبت خاک، مقدار مقاومت کششی ۴۷/۸۳ درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش شاخص مخروط و مقاومت برشی خاک، نیروی کششی خاک‌ورز قلمی نیز افزایش پیدا کرد. با توجه به رابطه بین متغیرهای نامبرده شده با نیروی کششی، مدلی با روش سطح پاسخ با استفاده از طرح Historical data به دست آمد. در این مدل، نیروی کششی به عنوان متغیر وابسته و متغیرهای سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی، شاخص مخروط و مقاومت برشی خاک به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای تخمین زده شده برای این مدل به ترتیب ۰/۹۷، ۰/۴۹ و ۲/۳۴ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل برای پیش‌بینی نیروی کششی است.

واژه‌های کلیدی

آزمون برش وین، سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی، نفوذسنج مخروطی

مقدمه

(Or & Ghezzehei, 2002). به منظور کاهش انرژی

مصرفی در آماده‌سازی بستر بذر، سامانه‌های

خاک‌ورزی حفاظتی جایگزین خاک‌ورزی مرسوم

شده‌اند. با توسعه خاک‌ورزی حفاظتی، اهمیت خاک

خاک‌ورزی یکی از مهم‌ترین عملیات مزرعه‌ای

است که به منظور بهبود ساختار و شرایط فیزیکی

خاک و برای تهیه بستر بذر و رشد گیاه اجرا می‌شود

با ابزار است. در تحقیقی مشابه، اثر پارامترهای هندسی خاک‌ورز برگردان‌دار مانند زاویه استقرار، تنظیم و برش و انحنای صفحه برگردان‌دار بر نیروی وارد بر ابزار مطالعه شد. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مشخص شد که این پارامترها اثر معنی‌داری بر مقدار نیروی اعمالی بر خاک‌ورز دارند (Ibrahmi et al., 2017).

رحمتیان و همکاران (Rahmatian et al., 2018)، در تحقیقی تأثیر عواملی همچون زاویه حمله تیغه قلمی، سرعت پیشروی و رطوبت خاک را بر نیروی کششی گاوآهن قلمی بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش سرعت پیشروی و زاویه حمله نیروی کششی افزایش و با افزایش رطوبت خاک، نیروی کششی کاهش می‌یابد. این پژوهشگران همچنین گزارش داده‌اند با افزایش رطوبت، شاخص مخروط^۲ کاهش می‌یابد. در این تحقیق، با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره، مقدار بهینه زاویه حمله تیغه قلمی، سرعت پیشروی و رطوبت خاک را برای گاوآهن قلمی در خاک لومی رسی برای رسیدن به کمترین نیروی کششی به دست آوردند. همچنین در تحقیقی دیگر، برای مدل‌سازی اثر عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر نیروهای وارد بر گاوآهن برگردان‌دار، از دو روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی استفاده و نشان داده شد که با افزایش عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی، نیروی کششی نیز افزایش می‌یابد. همچنین ضریب تعیین برای روش سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۹ به دست آمد که نشان می‌دهد این دو روش به خوبی قادر به پیش‌بینی نیروهای وارد بر گاوآهن برگردان‌دار هستند (Rahmatian et al., 2020). سالار و کارپورفرد

در خاک‌ورزی مورد توجه بیشتری قرار گرفت و مصرف سوخت، نیروی کار و فرسایش خاک کاهش یافت (Derpsch & Friedrich, 2009). از عوامل مهم در جریان خاک‌ورزی، نیروهای وارد بر ابزار خاک‌ورز است که بر عواملی مانند مصرف سوخت تراکتور، لغزش چرخ تراکتور و غیره اثر دارد (Mohammadi et al., 2020). به هنگام حرکت ابزار خاک‌ورز در خاک، ابزار باعث شکست مکانیکی خاک می‌شود تا بتواند به حرکت خود ادامه دهد (Rahmatian et al., 2020). این شکست مکانیکی در مرز بین خاک و سطح ابزار اتفاق می‌افتد. خاک در مقابل شکست مکانیکی از خود مقاومت نشان می‌دهد که به آن مقاومت برشی خاک^۱ می‌گویند (He et al., 2018). مقاومت برشی خاک به هنگام ورود ابزار خاک‌ورز به درون خاک و همچنین به هنگام حرکت در خاک ایجاد می‌شود که بر نیروهای وارد بر تیغه خاک‌ورز تأثیر بسزایی دارد.

به منظور بهبود اثربخشی خاک‌ورزی، درک روند حرکت خاک و نیروهای اعمالی از طرف توده خاک به ابزارهای مختلف خاک‌ورزی به ویژه خاک‌ورزهای قلمی، تحقیقات زیادی شده است و مدل‌های متفاوتی برای شبیه‌سازی برخورد خاک و خاک‌ورز توسعه داده شده‌اند. برخی از رایج‌ترین این روش‌ها، شامل روش‌های تحلیلی (Godwin et al., 2007) و تجربی (Pytko & Konstankiewicz, 2002) هستند. تاگر و همکاران (Tagar et al., 2015) در پژوهشی از روش المان محدود به منظور شبیه‌سازی الگوی شکست خاک استفاده کردند. نتایج مقایسه شبیه‌سازی با نتایجی که از آزمایش‌ها در مزرعه به دست آمده نشان داده است که المان محدود روشی قابل اعتماد برای شبیه‌سازی برهم‌کنش خاک

نمی‌دهد.

با توجه به مطالب و پژوهش‌هایی که گفته شد و نیز تأثیر مقاومت مکانیکی خاک بر نیروی‌های وارده به خاک‌ورز، هدف از این تحقیق ارائه مدلی با استفاده از نتایج حاصل از آزمون‌های پره برش و نفوذسنج مخروطی برای پیش‌بینی نیروی کششی ابزار خاک‌ورز قلمی بدون اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی خاک است.

مواد و روش‌ها

برای اجرای این پژوهش، ابتدا چهار مزرعه کشاورزی در چهار ناحیه از شهرستان دزفول، در شمال استان خوزستان، به طور تصادفی انتخاب شد (شکل ۱). پیش از آغاز آزمایش‌ها، این مزارع زیر کشت گندم بودند و پس از عملیات برداشت، کاه و کلش در سطوح مزارع پخش بود.

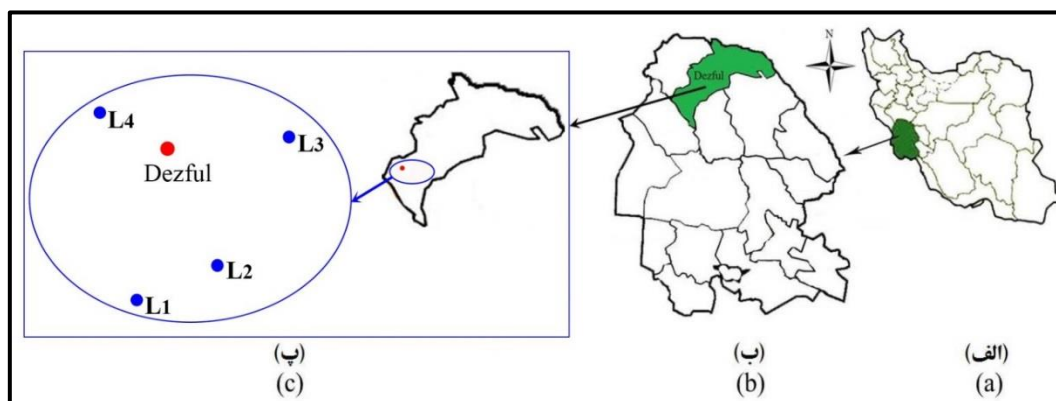
پس از انتخاب مزرعه‌های مورد آزمایش، با نمونه‌برداری از خاک مزارع از عمق‌های ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری و ارسال به آزمایشگاه بافت و رطوبت خاک تعیین شد (جدول ۱). برای به دست آوردن مقدار رطوبت مزارع از دستگاه رطوبت‌سنج دیجیتالی لوترون^۲ مدل PMS-714 ساخت تایوان، استفاده شد (جدول ۱). دلیل مهم انتخاب چهار مزرعه با مقدار رطوبت‌های متفاوت، بررسی اثر عامل رطوبت در این پژوهش است. تمامی آزمایش‌ها در ۲ تا ۳ روز در هر مزرعه انجام شد و رطوبت هر مزرعه به هنگام شروع آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد تا در هر یک از آنها رطوبت تقریباً یکسانی باشد.

(Salar & Karparvarfard, 2017)، اثر هندسه بال گاوآهن قلمی را بر نیروی کششی بررسی و آن را با روش سطح پاسخ مدل‌سازی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش عمق قرارگیری باله و زاویه تمایل آن، نیروی کششی نیز افزایش می‌یابد. این محققان با روش سطح پاسخ، نیروی کششی را با ضریب تعیین ۰/۹۴ به دست آوردند و گزارش دادند که روش سطح پاسخ به خوبی قادر به پیش‌بینی نیروی کششی است. در تحقیقی دیگر، با استفاده از دو روش تجربی و عددی (المان گسسته)، اثر نوع و هندسه خاک بر میزان نفوذپذیری خاک و همچنین شاخص مخروط بررسی شد. نتایج تحقیق نشان داد که نفوذ در خاک‌های شنی به مراتب راحت‌تر است تا در خاک‌های رسی. همچنین، با افزایش عمق مقدار شاخص مخروط نیز افزایش می‌یابد و نیز اینکه روش عددی المان گسسته به خوبی قادر به پیش‌بینی شاخص مخروط خاک هست (Kotrocz *et al.*, 2016).

هی و همکاران (He *et al.*, 2018)، در انبارۀ خاک و با استفاده از آزمون برش وین^۱، از پره‌های مختلفی برای اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک استفاده و حداکثر گشتاورهایی را که برای شکست خاک در عمق‌های مختلف رخ داد، اندازه‌گیری و تحلیل کردند. نتایج بررسی‌های این پژوهشگران نشان داد که با افزایش عمق نفوذ، مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد و نیز رطوبت در عمق‌هایی با فاصله‌های زیاد تغییر کرده و تأثیر بسزایی در مقاومت برشی خاک دارد و تغییر رطوبت در عمق‌های کم فاصله از هم، تغییر معنی‌داری به دست

1- Vane Shear Test (VST)

2- Lutron



شکل ۱- محل اجرای آزمایش‌ها: الف) ایران، ب) استان خوزستان و پ) شهرستان دزفول (L1، L2، L3 و L4: مزارع مورد مطالعه)
 Fig. 1- Farms situations: a) Iran, b) Khuzestan province and c) Dezful county (L1, L2, L3 and L4: studied farms)

جدول ۱- مشخصات خاک مزارع مورد مطالعه در این پژوهش

Table 1- Specifications of soil of the farms

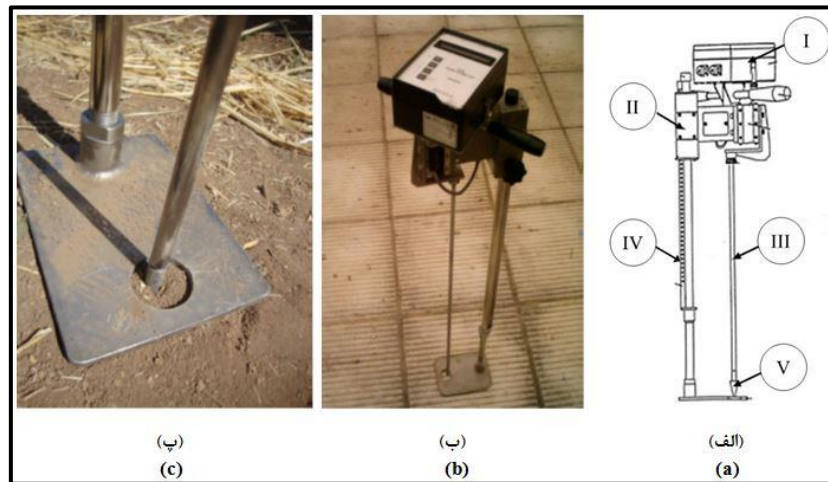
شماره ناحیه‌ها Area No.	موقعیت مکانی Geographical coordinates	شن (درصد) Sand (%)	سیلت (درصد) Silt (%)	رس (درصد) Clay (%)	بافت خاک Soil texture	مقدار رطوبت خاک (درصد) Soil moisture content (%)
1	32° 14' 56" N 48° 22' 32" E	35	30	35	Clay loam	16.32 ± 0.8
2	32° 16' 38" N 48° 26' 59" E	40	36	24	Loam	11.46 ± 0.4
3	32° 23' 16" N 48° 31' 08" E	42	30	28	Clay loam	9.51 ± 0.5
4	32° 24' 25" N 48° 20' 30" E	38	32	30	Clay loam	13.18 ± 0.3

۲- ب). برای اندازه‌گیری شاخص مخروط، هر یک از مزرعه‌ها به ۴۸ کرت تقسیم شد و در هر کرت سه نقطه به طور تصادفی انتخاب و شاخص مخروط در عمق‌های ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. بدین منظور، دستگاه در هر نقطه مورد نظر ثابت شد و میله نفوذ آن با اعمال نیرو به درون خاک نفوذ کرد (شکل ۲- پ). دستگاه به کمک نیروسنج و متر لیزری نصب شده روی خود، نیرو را در هر یک سانتی‌متر نفوذ، در حافظه خود ثبت می‌کرد (شکل ۲- الف).

نیروی به دست آمده در هر عمق بر بیشترین سطح مقطع مخروط تقسیم و شاخص مخروط خاک به دست آمد.

اندازه‌گیری شاخص مخروط و مقاومت برشی خاک

یکی از مهم‌ترین فاکتورها در خاک‌های کشاورزی برای اجرای عملیات خاک‌ورزی، شاخص مخروط است. با توجه به اینکه گاوآهن در هر بار خاک‌ورزی باید در داخل خاک نفوذ کند، اندازه‌گیری شاخص مخروط خاک در ارزیابی و مقایسه مقاومت مکانیکی خاک‌ها و نیروهای صرف شده در عملیات، از جمله نیروی کششی، اهمیت بسزایی خواهد داشت (Chaplain *et al.*, 2011; Kotroc *et al.*, 2016). برای اندازه‌گیری شاخص مخروط از دستگاه نفوذسنج مخروط مدل SP-1000 ساخت شرکت Findly Irvine کشور انگلیس استفاده شد (شکل



شکل ۲- شاخص مخروط خاک: الف) اجزای نفوذسنج مخروطی مورد استفاده در این پژوهش (I: ریز پردازنده، II: سامانه کنترل، III: میله نفوذ، IV: خط‌کش مدرج، V: مخروطی)، ب) نفوذسنج مخروطی مورد استفاده در این پژوهش و پ) اندازه‌گیری شاخص مخروط

Fig. 2- Soil cone index: a) the cone penetrometer components (I: Microprocessor; II: Control system; III: Penetration rod; IV: Scale ruler; V: Cone), b) cone penetrometer used in this research and c) measurement of the cone index

مقاومت برشی با آزمون برش وین از رابطه ۱ استفاده شد (He et al., 2018).

$$T = T_s + T_{e1} + T_{e2} \quad (1)$$

$$T_s = \pi D H C_u R = \frac{\pi}{2} D^2 H C_u \quad (2)$$

$$T_{e1} = \int_r^R 2\pi dr C_u r = \frac{2}{3} \pi C_u (R^3 - r^3) = \frac{1}{12} \pi C_u (D^3 - d^3) \quad (3)$$

$$T_{e2} = \int_r^R 2\pi dr c_u r = \frac{1}{2} \pi C_u D^3 \quad (4)$$

$$T = \frac{\pi}{12} C_u (2D^3 + 6D^2 H - d^3) \quad (5)$$

که در آنها،

T = گشتاور شکست خاک؛ T_s = گشتاورهای اعمال شده توسط نواحی جانبی؛ T_{e1} و T_{e2} = مقادیر گشتاورهای اعمال شده توسط ناحیه بالایی و پایینی پره؛ C_u = مقاومت برشی خاک؛ R ، D و H = به ترتیب قطر، شعاع و ارتفاع پره؛ d و r = به ترتیب قطر و شعاع محور.

یکی دیگر از فاکتورهای مهم به هنگام حرکت خاک‌ورز در خاک، مقاومت برشی خاک است که بر افزایش یا کاهش نیروی کششی، تأثیر بسزایی دارد (He et al., 2018). در این پژوهش، برای اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک از آزمایش برش وین استفاده شد. برای اجرای این آزمایش از دستگاه تست برش وین مدل SL840 ساخت شرکت بهسازان ایران با طول پره، ارتفاع پره و قطر محور پره به ترتیب ۵۰/۸، ۱۰۱/۶ و ۱۲/۷ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۳). این دستگاه با توجه به ابعاد پره آن، قادر به اندازه‌گیری مقاومت برشی تا عمق ۵۰ سانتی‌متر است. همانند آزمایش شاخص مخروط، هر یک از مزرعه‌ها به ۴۸ کرت تقسیم شد و در هر کرت سه نقطه به طور تصادفی انتخاب و در عمق‌های گفته شده آزمایش برش وین اجرا شد. ابتدا دستگاه در عمق مورد نظر قرار داده شد و سپس با چرخش آن در خاک، گشتاور اعمال شده یادداشت شد (He et al., 2018). روابط ۱ تا ۵ مربوط به آزمون برش وین است (He et al., 2018). برای به دست آوردن



شکل ۳- الف) شمایی از دستگاه برش پره‌ای وین (D: قطر پره، H: ارتفاع پره، d: قطر محور پره) و ب) دستگاه برش پره‌ای وین مورد استفاده در این پژوهش

Fig. 3- a) An outline of hand vane shear (D: Vane diameter, H: Vane height, d: Rod vane diameter) and b) Hand vane shear used in this research

خاک‌ورزی با گاوآهن قلمی

در این پژوهش، برای اندازه‌گیری نیروی کششی گاوآهن قلمی به هنگام خاک‌ورزی، دو فاکتور تأثیرگذار بر مقاومت کششی شامل سرعت پیشروی در چهار سطح (۳، ۵، ۷ و ۹ کیلومتر در ساعت) و عمق خاک‌ورزی در چهار سطح (۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر) و در چهار مزرعه با رطوبت‌های متفاوت در نظر گرفته شدند. این پژوهش در هر مزرعه بر اساس آزمایش کرت خرد شده بر پایه طرح بلوک کاملاً تصادفی و هر آزمایش در سه تکرار اجرا و در مجموع ۴۸ کرت در هر مزرعه و هر کرت به ابعاد ۵۰ × ۳ متر در نظر گرفته شد.

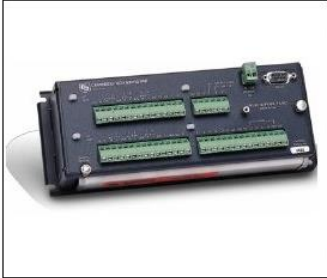





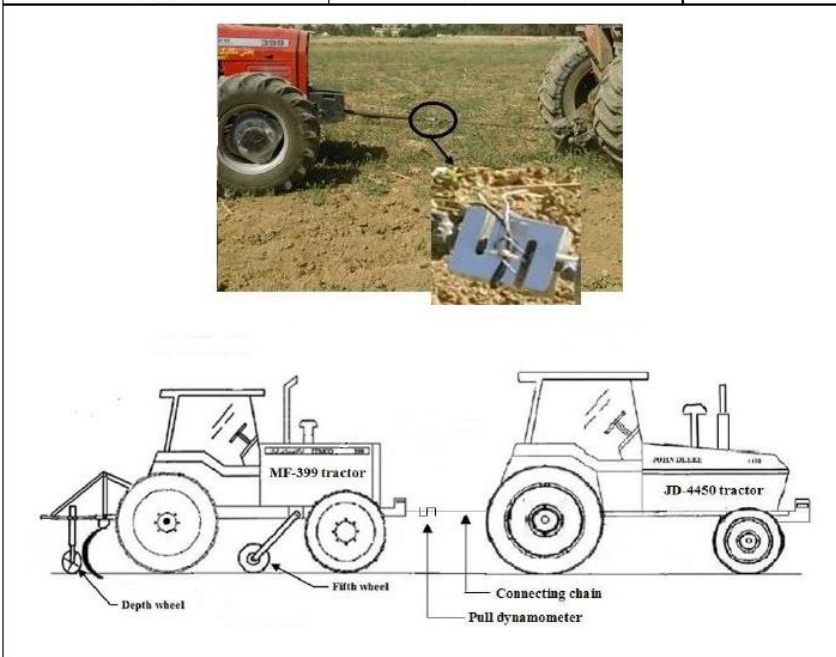

گاوآهن به کار گرفته شده نیز از نوع گاوآهن قلمی تک ساقه با زاویه حمله تیغه ۳۰ درجه و تیغه قلمی با عرض ۵ سانتی‌متر انتخاب شد (شکل ۴-ج). برای تنظیم عمق خاک‌ورزی مورد نظر، از دو چرخ آهنی قابل تنظیم^۱ در دو طرف گاوآهن، استفاده شد (شکل ۴-الف).

برای اندازه‌گیری نیروی کششی از آزمون دو

تراکتوری^۲ استفاده شد (Anon, 1983) (شکل ۴-ح). در آزمون دو تراکتوری، از دو تراکتور مسی فرگوسن مدل ۳۹۹ استفاده شد که یکی از تراکتورها مجهز به سامانه اندازه‌گیری دقیق بود و تراکتور دیگر وظیفه کشش تراکتور اول را بر عهده داشت (شکل ۴-ح). یک نیروسنج S شکل پنج تنی (شکل ۴-ت) ساخت چین برای اندازه‌گیری نیروی کششی در بین دو تراکتور نصب شد و یک دورسنج مدل E50S8-500-3-T-1 (شکل ۴-ث) ساخت کره جنوبی برای اندازه‌گیری سرعت پیشروی روی چرخ پنجم (شکل ۴-ب) نصب شد (Rahmanian-Koushkaki et al., 2015). نیروسنج و دورسنج به دیتالاگر^۳ (شکل ۴-پ) متصل شدند و این دیتالاگر با استفاده از کابل RS232 به کامپیوتر همراه (شکل ۴-ج) وصل و نتایج اندازه‌گیری نمایش داده شد و ذخیره شد (Rahmatian et al., 2018). برای به دست آوردن مقایسه میانگین‌ها از روش LSD و برای تحلیل داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها از نرم‌افزار SAS 9.1 استفاده شد.

1- Depth Wheel
3- Data Logger

2- RNAM Test (Regional Network for Agricultural Machinery)

		
<p>پ) دیتالاگر c) data logger</p>	<p>ب) چرخ پنجم b) fifth wheel</p>	<p>الف) گاوآهن قلمی a) chisel plow</p>
		
<p>ج) کامپیوتر همراه f) laptop</p>	<p>ت) دور سنج e) encoder</p>	<p>ت) نیروسنج d) load cell</p>
		
<p>ح) آزمون دو تراکتوری h) RNAM test</p>		<p>ج) تیغه مورد استفاده در این پژوهش g) Blade used in this research</p>

شکل ۴- ابزارها و سامانه اندازه‌گیری مورد استفاده در این پژوهش
Fig. 4- Tools and measurement system used in this research

طراحی آزمایش‌ها نیز به کار می‌رود (Mostafaei *et al.*, 2016). در این پژوهش برای مدلسازی به روش سطح پاسخ از نرم افزار دیزاین اکسپرت^۱ و ۰/۷

مدلسازی یکی از روش‌های موجود برای تحلیل چند متغیره، روش سطح پاسخ^۱ است. این روش برای

مدل‌سازی حذف و بقیه صفات معنی‌دار شده در مدل‌سازی استفاده شدند. برای ارزیابی مدل به دست آمده از روش سطح پاسخ، از معیارهای عملکردی آماری مانند ضریب تعیین (رابطه ۷)، جذر میانگین مربعات خطا^۶ (رابطه ۸) و میانگین خطای تخمین زده شده^۷ (رابطه ۹) استفاده شد (Rahmatian et al., 2020).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (R_{act} - \bar{R}) - \sum_{i=1}^N (R_{act} - R_{pre})}{\sum_{i=1}^N (R_{act} - \bar{R})} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{pre} - R_{act})^2} \quad (8)$$

$$MRDM = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|R_{pre} - R_{act}|}{R_{act}} \right) \right] \times 100 \quad (9)$$

که در آنها،

R_{act} ، R_{pre} ، \bar{R} و N = به ترتیب نیروی اندازه‌گیری شده؛ نیروی پیش‌بینی شده؛ میانگین نیروهای اندازه‌گیری شده؛ و تعداد داده‌ها.

نتایج و بحث

شاخص مخروط و مقاومت برشی

نتایجی که از آزمایش‌های شاخص مخروط و مقاومت برشی خاک به دست آمد به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند. طبق این شکل‌ها، با افزایش عمق کار در هر چهار مزرعه، شاخص مخروط و مقاومت برشی خاک نیز افزایش یافته است. با افزایش عمق نفوذ از صفر تا ۳۰

استفاده شد. به منظور بالا بردن دقت پیش‌بینی و استفاده از داده‌های بیشتر برای آموزش مدل با روش سطح پاسخ، از طرح Historical data استفاده شد (Rahmatian et al., 2020). در روش سطح پاسخ نیاز است که برای مدل‌سازی، آزمایش‌ها با سه تکرار یا بیشتر اجرا شود (Mostafaei et al., 2016)، که در این پژوهش نیز این توصیه رعایت شده است. متغیرهای مستقل در این مدل‌سازی سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی، رطوبت خاک، شاخص مخروط خاک و مقاومت برشی خاک و همچنین متغیر وابسته نیز نیروی کششی وارد بر ابزار قلمی در نظر گرفته شدند. پس از وارد کردن سطوح و داده‌ها در نرم‌افزار، با استفاده از شاخص‌های آماری مانند ضریب تعیین^۳ (R^2)، ضریب تعیین معادل^۴ (R^2_a) و ضریب تعیین پیش‌بینی^۵ (R^2_p)، بهترین مدل از بین مدل‌های خطی، درجه دوم و دو فاکتوره برای پیش‌بینی نیروی کششی انتخاب شد. معادله‌ای که برای پیش‌بینی نیروی کششی از روش سطح پاسخ به دست آمد به صورت رابطه ۶ است.

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i X_i + \sum_{i=1}^N a_{ii} X_{ii}^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N a_{ij} X_i X_j \quad (6)$$

در این رابطه Y متغیر وابسته، a_0 ضریب ثابت، a_i ضریب خطی برای تیمارهای آزمایش، a_{ii} ضریب تأثیر درجه دوم، a_{ij} ضریب تأثیر متقابل و X_i و X_j متغیرهای مستقل هستند.

رابطه بین متغیرهای مستقل و اثر متقابل آنها با متغیر وابسته با استفاده از آنالیز واریانس بررسی شد. در این میان، صفاتی که معنی‌دار نشده بودند از روند

1- Response Surface Methodology (RSM)

3- Coefficient Of Determination (R^2)

5- Predicted Coefficient Of Determination (R^2_p)

7- Mean Relative Deviation Modulus (MRDM)

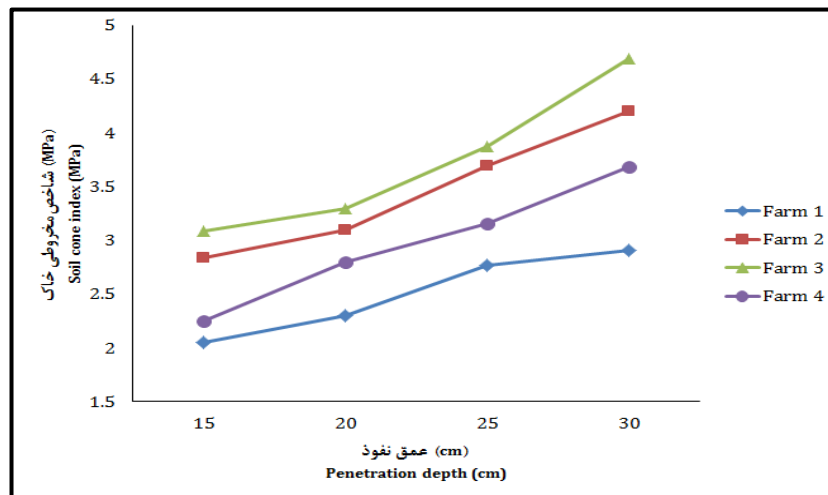
2- Design-Expert 7.0.0

4- Adjusted Coefficient Of Determination (R^2_a)

6- Root Mean Square Error (RMSE)

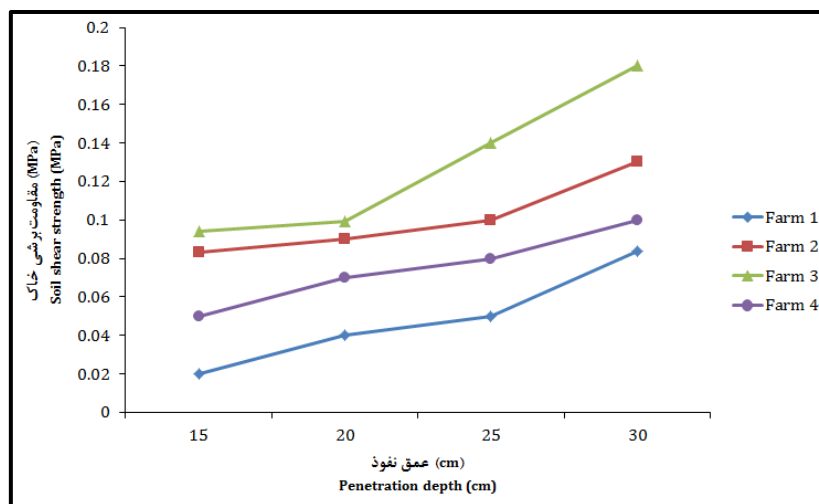
شاخص مخروط و مقاومت برشی نیز افزایش می‌یابد (Pytka & Konstankiewicz, 2002; Chen *et al.*, 2009; Chaplain *et al.*, 2011) با توجه به جدول ۱ و شکل‌های ۵ و ۶، مزرعه دارای که رطوبت کمتر نسبت به دیگر مزارع، شاخص مخروط و مقاومت برشی بیشتری دارد. به هنگام افزایش رطوبت در خاک، نیروی چسبندگی بین ذرات خاک کاهش و به تبع آن شاخص مخروط و مقاومت برشی خاک نیز کاهش می‌یابد (Arvidsson *et al.*, 2004; Chaplain *et al.*, 2011; Kotrocz *et al.*, 2016)

سانتی‌متر، شاخص مخروط و مقاومت برشی در چهار مزرعه مورد نظر به طور میانگین به ترتیب در حدود ۳۳/۹۸ و ۵۲/۵۳ درصد افزایش یافته است. به دلیل حجم لایه‌های بالایی روی لایه‌های پایین خاک و وارد آمدن وزن لایه‌های بالایی روی لایه‌های پایین‌تر، تراکم لایه‌های پایین خاک بیشتر از تراکم لایه‌های بالایی است (He *et al.*, 2018). به همین دلیل با افزایش عمق نیز تراکم خاک و چگالی ظاهری خاک افزایش می‌یابد و در نتیجه مقاومت ذرات خاک به نفوذ ابزار بالا می‌رود و به دنبال آن



شکل ۵- نتایج به دست آمده از شاخص مخروط در عمق‌های مورد نظر از چهار مزرعه

Fig. 5- Cone index results obtained from different depths in four farms



شکل ۶- نتایج به دست آمده از مقاومت برشی خاک در عمق‌های مورد نظر از چهار مزرعه

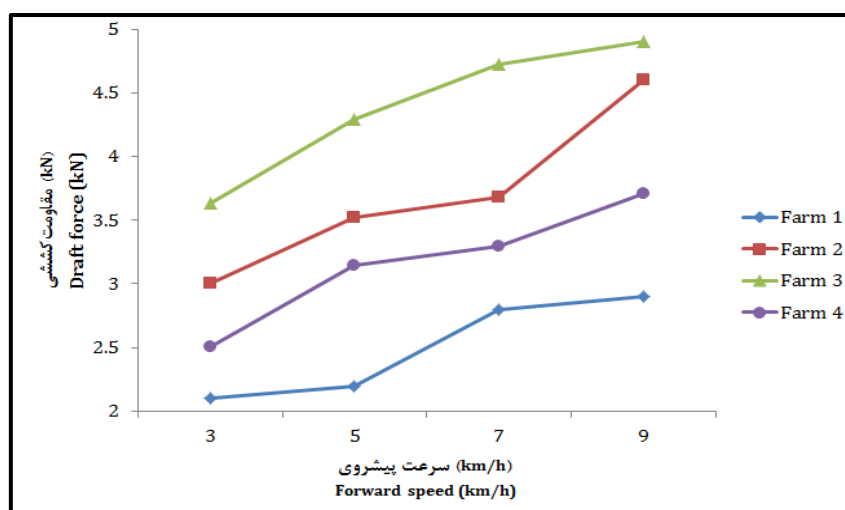
Fig. 6- Soil shear strength results obtained from different depths in four farms

نیروی کششی

نیروی بیشتری صرف جابه‌جا کردن خاک می‌شود و نیروی کششی نیز افزایش می‌یابد (Al-Suhaibani & Ghaly, 2010). مزرعه دارای رطوبت بیشتر نسبت به سایر مزارع (جدول ۱)، نیروی کششی کمتری داراست (شکل‌های ۷ و ۸). با افزایش رطوبت، نیروی چسبندگی بین ذرات خاک نیز افزایش می‌یابد که این امر نیروی کششی را کاهش می‌دهد (Arvidsson *et al.*, 2004; Manuwa, 2012).

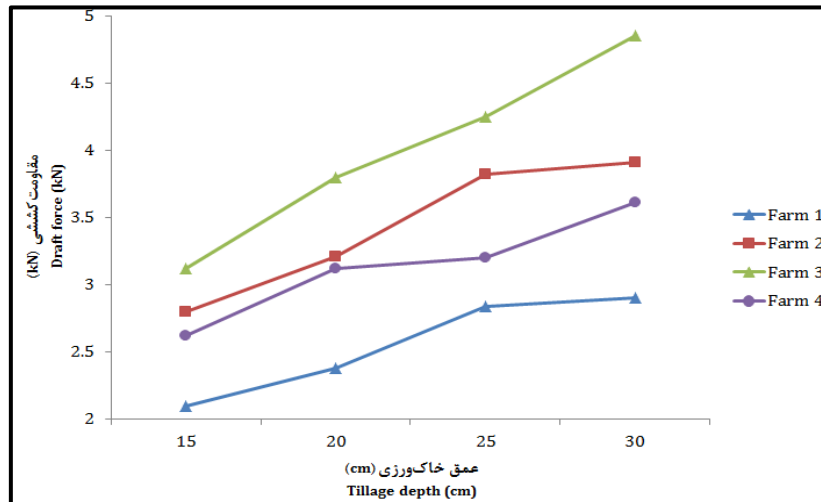
در شکل ۹ مشاهده می‌شود با افزایش رطوبت از حدود ۹ تا ۱۶ درصد، نیروی کششی ۴۷/۸۳ درصد کاهش یافته است. با افزایش رطوبت، مولکول‌های آب در بین ذرات خاک قرار می‌گیرند و بین آنها فاصله ایجاد می‌کنند. به همین منظور نیروی واندروال بین ذرات کاهش و در نتیجه میزان هم‌چسبی کاهش می‌یابد (Arvidsson *et al.*, 2004). با کاهش هم‌چسبی بین ذرات خاک، مقدار نیرو برای گسیختگی خاک کاهش می‌یابد که به کاهش نیروی کششی می‌انجامد (Manuwa, 2012).

در شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت پیشروی از ۳ تا ۷ کیلومتر در ساعت، نیروی کششی به طور میانگین در حدود ۳۰/۱۶ درصد افزایش یافته است. به هنگام افزایش سرعت حرکت تیغه در خاک، شتاب و نیروی بیشتری به ذرات خاک وارد می‌شود و در نتیجه ذرات خاک، واکنش بیشتری از خود نشان می‌دهند که باعث می‌شود نیروی بیشتری به تیغه وارد آورند، به همین دلیل نیروی کششی نیز افزایش می‌یابد (Godwin *et al.*, 2007; Al-Suhaibani & Ghaly, 2010). اثر عمق خاک‌ورزی بر نیروی کششی در شکل ۸ برای هر چهار مزرعه مورد آزمایش نشان داده شده است. بر این اساس، با افزایش عمق خاک‌ورزی از ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر، مقاومت کششی به طور میانگین در حدود ۲۵/۳۲ درصد افزایش یافته است. با افزایش عمق، حجم خاک سربار تیغه افزایش می‌یابد و تیغه باید حجم بیشتری از خاک را جابه‌جا کند. به همین دلیل،



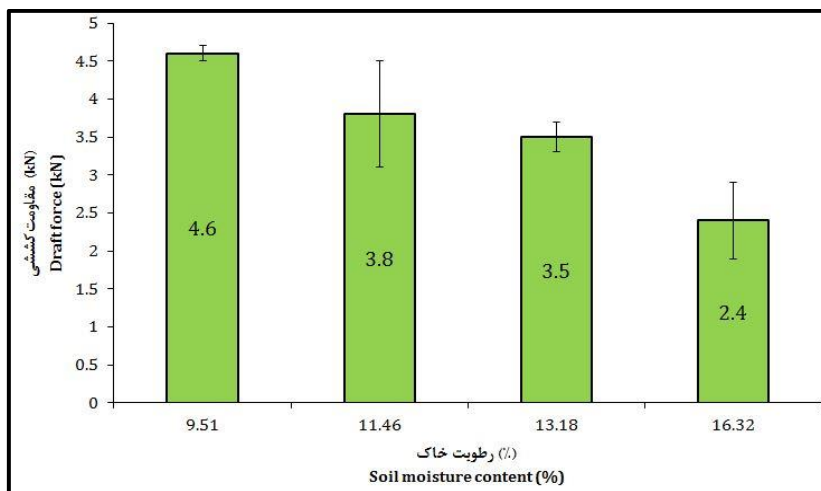
شکل ۷- اثر سرعت پیشروی بر مقاومت کششی به دست آمده در چهار مزرعه

Fig. 7- The effects of forward speed on draft force in four farms



شکل ۸- اثر عمق خاک‌ورزی بر نیروی کششی به دست آمده در چهار مزرعه

Fig. 8- The effects of tillage depth on draft force in four farms



شکل ۹- اثر رطوبت خاک بر نیروی کششی به دست آمده در چهار مزرعه

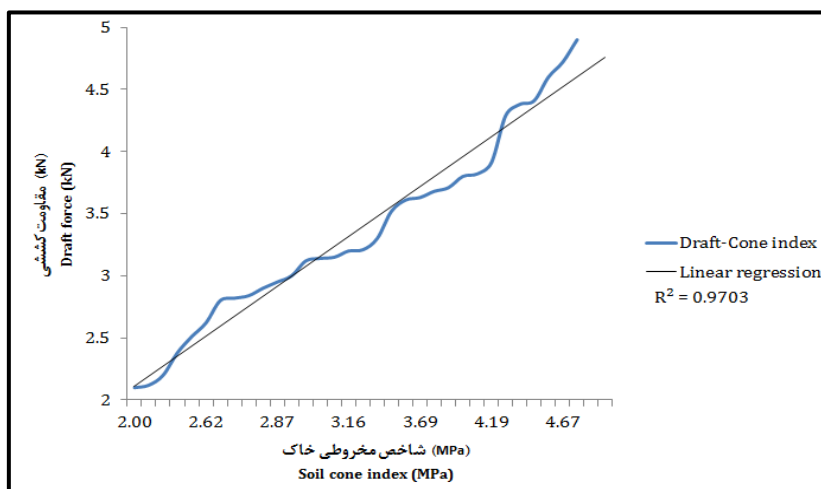
Fig. 9- The effects of soil moisture content on draft force in four farms

مکانیکی آن خاک نیز افزایش می‌یابد (Tagar *et al.*, 2015; He *et al.*, 2018).

به همین دلیل گاوآهن برای غلبه بر نیروی بین ذرات خاک و تراکم آنها باید نیروی بیشتری صرف کند. از این‌رو با افزایش مقاومت مکانیکی خاک، نیروی کششی نیز افزایش می‌یابد (Tagar *et al.*, 2015).

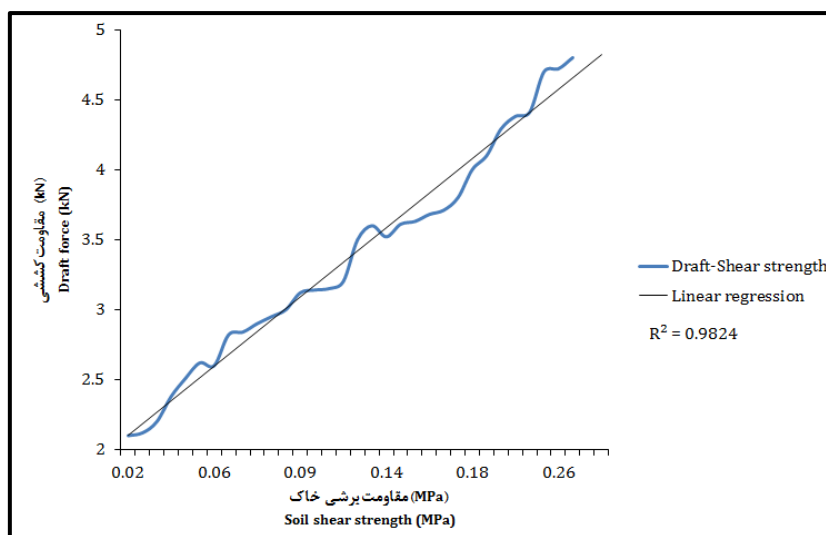
رابطه بین نیروی کششی با شاخص مخروط و مقاومت برشی خاک

با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱، با افزایش مقاومت مکانیکی خاک که شامل شاخص مخروط و مقاومت برشی خاک است، نیروی کششی نیز افزایش یافته است. هر اندازه چسبندگی ذرات خاک و چگالی ظاهری هر خاک افزایش یابد، مقاومت



شکل ۱۰- نیروی کششی خاک‌ورز قلمی در مقابل شاخص مخروط خاک

Fig. 10- Draft force of chisel plow versus soil cone index



شکل ۱۱- نیروی کششی خاک‌ورز قلمی در مقابل مقاومت برشی خاک

Fig. 11- Draft force of chisel plow versus soil shear strength

هر یک از مدل‌ها، مدل درجه دوم دارای شاخص‌های آماری بیشتری نسبت به دو مدل دیگر بود. به همین دلیل از مدل درجه دوم برای پیش‌بینی و مدل‌سازی نیروی کششی بهره گرفته شد. در جدول ۳، تجزیه واریانس اثر متغیرهای مستقل و اثرهای متقابل آنها بر نیروی کششی بررسی شده است.

مدل‌سازی به روش سطح پاسخ

مقادیر شاخص‌های آماری ذکر شده برای تعیین بهترین مدل به منظور پیش‌بینی نیروی کششی در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. در این جدول، سه مدل خطی، دو فاکتوره و درجه دوم تعریف شده که با استفاده از شاخص‌های آماری با هم مقایسه شدند. با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری برای

جدول ۲- شاخص‌های آماری برای انتخاب بهترین مدل در بین مدل‌های روش سطح پاسخ

Table 2- Statistical indices for choosing the best model among response surface methodology models

مدل‌ها Models	R ²	R ² _a	R ² _p
Linear خطی	0.86	0.82	0.63
2FI دو فاکتوره	0.92	0.88	0.74
Quadratic درجه دوم	0.97	0.94	0.81

جدول ۳- تجزیه واریانس نیروی کششی وارد بر تیغه

Table 3- Analysis of variance (ANOVA) of draft force on blade

منبع تغییرات Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	مجموع مربعات Sum of square
Model مدل	20	64.23**
Forward speed (V) سرعت پیشروی	1	5.14*
Tillage depth (D) عمق خاک‌ورزی	1	39.46**
Soil moisture content (M) رطوبت خاک	1	23.2*
Cone index (CI) شاخص مخروط	1	4.16*
Shear strength (SV) مقاومت برشی	1	2.21**
V×D	1	8.19*
V×M	1	2.41*
V×CI	1	1.53 ^{ns}
V×SV	1	0.20 ^{ns}
D×M	1	0.16**
D×CI	1	0.069*
D×SV	1	0.66**
M×CI	1	0.16 ^{ns}
M×SV	1	0.83*
CI×SV	1	0.29 ^{ns}
V ²	1	0.17 ^{ns}
D ²	1	0.15 ^{ns}
M ²	1	0.27 ^{ns}
(CI) ²	1	4.16*
(SV) ²	1	0.64**
Residuals مانده‌ها	21	1.66
Lack of fit عدم برازش	14	1.43 ^{ns}
Error خطا	41	71.15

** P ≤ 0.01, * P ≤ 0.05, ns non-significant

** معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد، * معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد، ns: معنی‌دار نیست

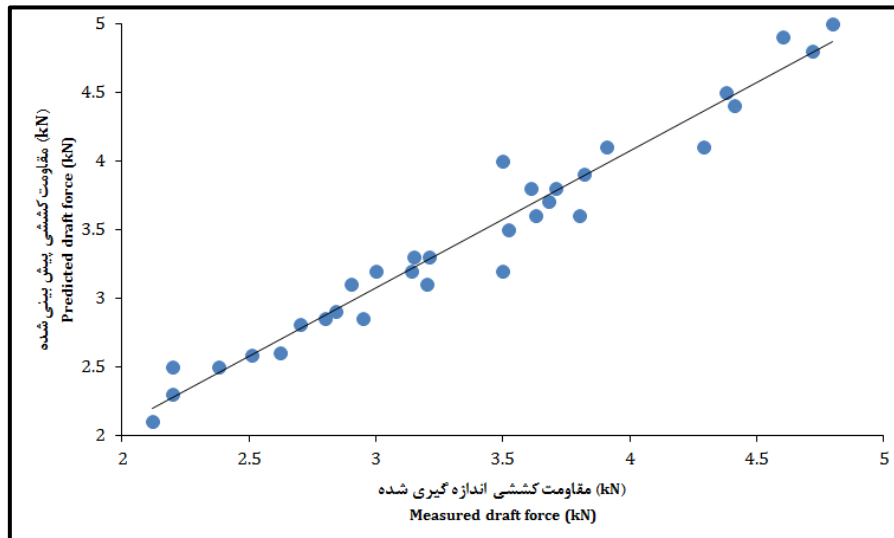
خاک‌ورزی و رطوبت خاک به دلیل معنی‌دار نبودن، استفاده نشد (جدول ۳). مدل به دست آمده با روش سطح پاسخ با طرح Historical data برای نیروی کششی (R) در رابطه ۱۰ نشان داده شده است.

در مدل‌سازی از اثر متقابل سرعت پیشروی و شاخص مخروط، اثر متقابل سرعت پیشروی و مقاومت برشی، اثر متقابل شاخص مخروط و مقاومت برشی، اثر متقابل رطوبت خاک و شاخص مخروط و همچنین مجذور متغیرهای سرعت پیشروی، عمق

$$R = -6.13 + 16.42D + 0.02V + 0.91CI + 38.47SV + 2.58(V \times D) - 0.11(D \times CI) + 4.17(D \times SV) + 0.51(CI)^2 + 5.39(SV)^2 + 16.2(M) + 0.17(V \times M) - 0.031(D \times M) + 0.12(M \times SV) \quad (10)$$

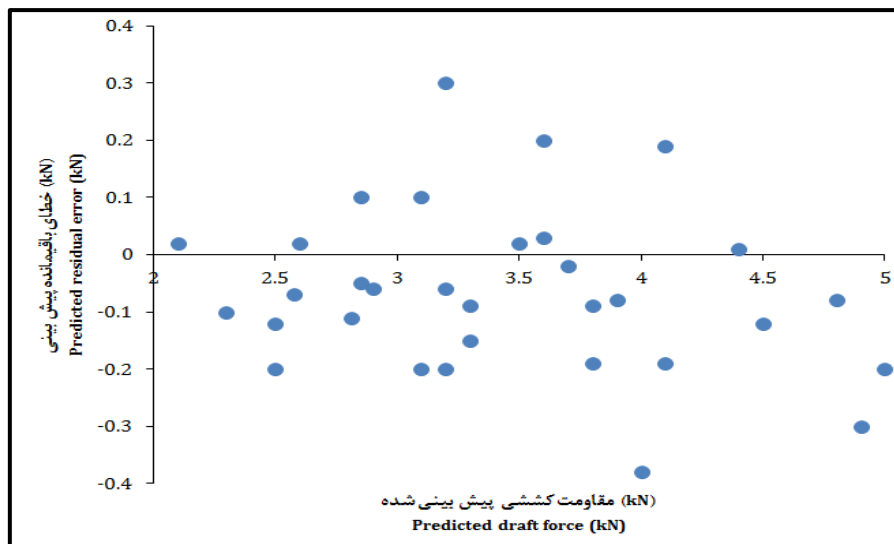
پیش‌بینی متغیرهای مورد نظر می‌باشد. به طور مثال، در تحقیق رحمتیان و همکاران (Rahmatian *et al.*, 2020) نیروی‌های کششی، عمودی و جانبی گاوآهن برگردان‌دار به کمک روش سطح پاسخ در طرح Historical data مدل‌سازی شد. ضریب تعیین هر مدل برای هر یک از نیروی‌های کششی، عمودی و جانبی گاوآهن برگردان‌دار به ترتیب ۰/۹۸۳، ۰/۹۸۷ و ۰/۹۷۱ به دست آمد که به خوبی قادر به پیش‌بینی این نیروها بوده است. سالار و کارپورفرد (Salar & Karparvarfard, 2017) نیروهای کششی و عمودی وارد بر گاوآهن قلمی بالدار را با استفاده از روش سطح پاسخ مدل‌سازی کردند و ضریب تعیین برای نیروهای کششی و عمودی را به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۹۳ به دست آوردند.

معیارهای عملکردی آماری شامل ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا و میانگین خطای تخمین زده شده به ترتیب ۰/۹۷، ۰/۴۹ کیلونیوتن و ۲/۳۴ درصد به دست آمد. شکل ۱۲ همبستگی بین نیروی کششی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده و شکل ۱۳، خطای باقیمانده پیش‌بینی شده را در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و شاخص‌های عملکردی آماری می‌توان گفت که مدل به دست آمده با روش سطح پاسخ به خوبی نیروی کششی را پیش‌بینی کرده است. در پژوهش‌های دیگر محققانی چون رحمتیان و همکاران (Rahmatian *et al.*, 2020) و سالار و کارپورفرد (Salar & Karparvarfard, 2017) نیز اشاره شده که روش سطح پاسخ به خوبی قادر به



شکل ۱۲- همبستگی بین مقاومت کششی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده

Fig. 12- Correlation between predicted and measured draft force



شکل ۱۳- خطای باقیمانده پیش‌بینی در مقابل مقاومت کششی پیش‌بینی شده

Fig. 13- Predicted residual errors versus predicted draft force

نتیجه‌گیری

معلوم شد نیروی کششی با افزایش مقاومت برشی خاک و شاخص مخروط افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر بسزای متغیرهای مقاومت برشی خاک و شاخص مخروط بر نیروی کششی است. تأثیر سرعت پیشروی تراکتور، عمق خاک‌ورزی و رطوبت خاک نیز بر نیروی کششی بررسی و نشان داده شد که با افزایش سرعت پیشروی از ۳ تا ۹ کیلومتر بر

در این پژوهش، رابطه بین مقاومت برشی خاک و شاخص مخروط با نیروی کششی خاک‌ورز قلمی بررسی و نشان داده شد که با افزایش عمق نفوذ در خاک از ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر، مقاومت برشی و شاخص مخروط به ترتیب از ۳۶/۶۲ تا ۴۸/۲۱ و از ۲۳/۱۶ تا ۳۸/۸۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین

ساعت و عمق خاک‌ورزی از ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر، مقاومت کششی به ترتیب ۳۰/۱۶ و ۲۵/۳۲ درصد افزایش و با افزایش رطوبت خاک از حدود ۹ تا ۱۶ درصد، ۴۷/۸۳ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به تأثیر مقاومت برشی خاک، شاخص مخروط، سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی و رطوبت خاک بر نیروی کششی، مدلی بر اساس روش سطح پاسخ با طرح Historical data برای پیش‌بینی نیروی کششی به کمک متغیرهای گفته شده به دست آمد که ضریب تعیین ۰/۹۷، جذر میانگین مربعات خطا ۰/۴۹ کیلونیوتن و میانگین خطای تخمین زده شده ۲/۳۴ درصد برای این مدل به دست آمد. بر طبق ارزیابی‌ها روی این مدل، می‌توان نتیجه گرفت که روش سطح پاسخ با طرح Historical data به خوبی نیروی کششی را پیش‌بینی می‌کند. پیشنهاد می‌شود که از دیگر روش‌های عددی برای به دست آوردن مدلی بین نیروی کششی و متغیرهای مستقل این پژوهش استفاده و دقت این مدل‌ها با مدل به دست آمده در این پژوهش مقایسه شود.

مراجع

- Al-Suhaibani, S. A., & Ghaly, A. E. (2010). Effect of ploughing depth of tillage and forward speed on the performance of a medium size chisel plough operating in a sandy soil. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 3, 588-596.
- Anon. (1983). RNAM test codes and procedures of farm machinery. Regional Network for Agricultural Machinery. Technical Series No. 12. Bangkok, Thailand.
- Arvidsson, J., Keller, T., & Gustafsson, K. (2004). Specific draught for mouldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents. *Soil and Tillage Research*, 79(2), 221-231.
- Bentaher, H., Ibrahmi, A., Hamza, E., Hbaieb, M., Kantchev, G., Maalej, A., & Arnold, W. (2013). Finite element simulation of moldboard-soil interaction. *Soil and Tillage Research*, 134, 11-16.
- Chaplain, V., Défossez, P., Richard, G., Tessier, D., & Roger-Estrade, J. (2011). Contrasted effects of no-till on bulk density of soil and mechanical resistance. *Soil and Tillage Research*, 111(2), 105-114.
- Chen, H., Hou, R., Gong, Y., Li, H., Fan, M., & Kuzyakov, Y. (2009). Effects of 11 years of conservation tillage on soil organic matter fractions in wheat monoculture in Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, 106(1), 85-94.
- Derpsch, R., & Friedrich, T. (2009). *Development and current status of no-till adoption in the world. Proceedings of the 18th Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO)*. June 15-19. Izmir, Turkey.
- Godwin, R. J., O'dogherty, M. J., Saunders, C., & Balafoutis, A. T. (2007). A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed. *Biosystems engineering*, 97(1), 117-129.
- He, C., You, Y., Wang, D., & Wu, H. (2018). Estimating soil failure due to torsion via vane shear test by varying vane diameter and soil properties. *Soil and Tillage Research*, 177, 68-78.

- Ibrahmi, A., Bentaher, H., Hamza, E., Maalej, A., & Mouazen, A. M. (2017). Advanced analytical method of mouldboard plough's design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(1-4), 781-788.
- Kotroc, K., Mouazen, A. M., & Kerényi, G. (2016). Numerical simulation of soil-cone penetrometer interaction using discrete element method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 125, 63-73.
- Manuwa, S. I. (2012). Evaluation of soil/material interface friction and adhesion of sandy clay loam soils in southwestern Nigeria. *Advances in Natural Science*, 5(1), 41-46.
- Mohammadi, M., Karparvarfard, S. H., Kamgar, S., & Rahmatian, M. (2020). Optimization and evaluation of working conditions new tillage blade for use in tillage tools. *Journal of Agricultural Machinery*. 10(2), 273-287. (in Persian)
- Mostafaei, M., Javadikia, H., & Naderloo, L. (2016). Modeling the effects of ultrasound power and reactor dimension on the biodiesel production yield: Comparison of prediction abilities between response surface methodology (RSM) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Energy*, 115, 626-636.
- Or, D., & Ghezzehei, T. A. (2002). Modeling post-tillage soil structural dynamics: A review. *Soil and Tillage Research*, 64(1-2), 41-59.
- Pytko, J., & Konstankiewicz, K. (2002). A new optical method for soil stress and strain investigation. *Soil and Tillage Research*, 65(2), 243-251.
- Rahmanian-Koushkaki, H., Karparvarfard, S. H., & Mortezaei, A. (2015). The effect of the operational characteristics of the tractor composite electronic measurement system by the standards of emotion on the performance of chisel plows in a clay loam soil. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 17(1), 44-49.
- Rahmatian, M., Karparvarfard, S. H., & Nematollahi, M. A. (2018). Prediction for optimizing performance of chisel blade used in combined tillage to obtain suitable effectiveness. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 49(1), 73-82. (in Persian)
- Rahmatian, M., Yeganeh, R., & Nematollahi, M.A. (2020). Modeling and predicting of the forces on mouldboard plough by using two methods of response surface and artificial neural network. *Journal of Agricultural Machinery*, 10(2), 169-185. (in Persian)
- Salar, M. R., & Karparvarfard, S. H. (2017). Modeling and optimization of wing geometry effect on draft and vertical forces of winged chisel plow. *Journal of Agricultural Machinery*, 7(2), 169-185. (in Persian)
- Tagar, A. A., Changying, J., Adamowski, J., Malard, J., Qi, C. S., Qishuo, D., & Abbasi, N. A. (2015). Finite element simulation of soil failure patterns under soil bin and field testing conditions. *Soil and Tillage Research*, 145, 157-170.

Research Paper**Modeling and Predicting the Relationship between Cone Index and Soil Shear Strength with Draft Force of a Symmetrical Tillage Tool****M. Rahmatian, M. A. Nematollahi*, R. Yeganeh and A. Sharifi Malvajerdi**

*Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: manemat54@gmail.com

Received: 30 March 2020, Accepted: 11 November 2020

Abstract

Nowadays, tillage and related topics are of great importance to researchers and farmers. One of these issues is the draft force, which is influenced by many factors. Knowing the approximate amount of this force helps, for example, to use suitable machines and tools on the farm. The purpose of this study was to use the results of shear vane and cone penetration tests to provide a model for predicting the draft force of chisel plow without measuring soil physical and mechanical parameters. For this purpose, four farms were selected and cone index and shear vane test were performed on each farm. Also, draft force of chisel plow was obtained in each farm considering the variables of forward speed (3, 5, 7 and 9 km.h⁻¹) and tillage depth (15, 20, 25 and 30 cm). The experiments were performed based on a split plot experiment and on a completely randomized block design with three replications. The results showed that with increasing the penetration depth from 15 to 30 cm, shear strength of soil and cone index increased by 36.62% to 48.21% and 23.60% to 38.86%, respectively. With increasing forward speed and tillage depth, the draft force increased by about 30.16% and 25.32%, respectively. With increasing soil moisture, the amount of draft force decreased by 47.83%. Also, with increasing cone index and shear strength of soil, the draft force of chisel plow increased. According to the relationship between the mentioned variables with draft force, a model with response surface methodology and historical data design was obtained. In this model, draft force was considered as a dependent variable and forward speed, tillage depth, cone index and soil shear strength were considered as independent variables. The coefficient of determination (R²), root mean square error (RMSE) and mean relative deviation modulus (MRDM) for this model were 0.97, 0.49 kN and 2.34%, respectively, indicating high accuracy of the model for predicting draft force.

Keywords: Chisel Plow, Cone Penetrometer, Forward Speed, Shear Vane Test

© 2021 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran.



[This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0 license\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)