

مدل‌سازی و بهینه‌سازی انرژی مصرفی در هنگام به‌کارگیری کولتیواتورهای مزرعه با استفاده از روش سطح پاسخ (مطالعه موردی)

سجاد میرزائی^۱، جلال خدائی^{۲*} و سمیرا زارعی^۳

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد؛ و استادیاران گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۲۴

چکیده

خاک‌ورزی مرحله مقدماتی تولید محصولات کشاورزی است و مقدار بالایی از انرژی در این مرحله مصرف می‌شود. با توجه به بحران انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، باید در کاهش مصرف انرژی تا حد ممکن تلاش شود. هدف از این مطالعه موردی بررسی اثر پارامترهای طراحی و عملیاتی کولتیواتور بر میزان مصرف سوخت و مقاومت کششی به‌هنگام خاک‌ورزی با کولتیواتور ۸ شاخه‌ای با هندسه تیغه مشخص در خاکی با بافت رسی با رطوبت مشخص است. آزمایش‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی با در نظر گرفتن سه سطح برای سرعت پیشروی تراکتور (۳، ۵ و ۷ کیلومتر بر ساعت)، سه سطح عرض تیغه (۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر) و سه عمق خاک‌ورزی متفاوت (۶، ۱۲ و ۱۸ سانتی‌متر) اجرا شدند. از نرم‌افزار Design Expert 8.0.6 برای تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که پارامترهای عرض تیغه، سرعت پیشروی، و عمق خاک‌ورزی اثر معنی‌داری در سطح یک درصد بر مصرف سوخت و مقاومت کششی دارند. متغیرهای مستقل به‌صورت معادلات رگرسیونی مرتبه دوم مدل‌سازی شدند و نقاط بهینه آنها به‌دست آمد. بالاترین مطلوبیت در عمق خاک‌ورزی ۱۸ سانتی‌متر، سرعت ۷ کیلومتر بر ساعت و عرض تیغه ۵ سانتی‌متر به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی

خاک‌ورزی، عرض تیغه، مدل رگرسیونی، مقاومت کششی

مقدمه

اتلاف انرژی شود. بیشتر ابزارهای خاک‌ورزی و ابزارهای درگیر با خاک که امروزه به‌کار می‌روند، بر اساس تجربه و ابتکار ساخته شده‌اند (Alimardani, 2011). بنابراین باید اجزای مصرف‌کننده انرژی را شناسایی و تحلیل کرد تا بتوان راه‌های کاهش مصرف انرژی و تنگناها را شناخت. انرژی مصرفی در خاک‌ورزی به عوامل مختلفی مانند نوع خاک و شرایط آن (رطوبت و بافت خاک)، نوع خاک‌ورز،

خاک‌ورزی یکی از اصلی‌ترین عملیات تأثیرگذار بر میزان مصرف انرژی در به‌کارگیری ادوات کشاورزی و ایجاد هزینه‌های تولید محصولات کشاورزی است (Mekyes, 1985; Kushwaha & Zhang, 1998; Kheiralla et al., 2004; Canakci et al., 2005). افزایش کارایی ابزار خاک‌ورزی، حتی به مقداری جزئی، می‌تواند منجر به جلوگیری از

پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای آنالیز و مدل‌سازی پاسخ‌های هر فرآیند استفاده می‌شود که هدف نهایی آن بهینه‌سازی فرآیند است. با این روش، تعداد آزمایش‌ها کاهش می‌یابد و کلیه ضریب‌های مدل رگرسیون و اثر متقابل فاکتورها برآورد شدنی هستند. (Giri & Prasad, 2007). طرح‌های مرکب مرکزی^۱، باکس بنکن^۲ و دهلرت^۳ سه روش اصلی سطح پاسخ‌اند که در بین آنها طرح مرکب مرکزی معتبرتر است (Box & Draper, 2007; Montgomery, 2008). کولتیواتور یکی از ابزارهای خاک‌ورزی است که کشاورزان آن را به‌طور گسترده در خاک‌ورزی به‌کار می‌گیرند. برای بهینه‌سازی مصرف انرژی به‌هنگام استفاده از کولتیواتورهای مزرعه‌ای، در این پژوهش شرایط بهینه فرآیند خاک‌ورزی با این کولتیواتورها شامل سرعت پیشروی تراکتور، عرض تیغه کولتیواتور و عمق خاک‌ورزی تعیین می‌شود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به‌منظور بهینه‌سازی خاک‌ورزی با کولتیواتور مزرعه در خاکی با بافت رسی و رطوبت حدود ۱۲ درصد اجرا شد که قبلاً با گاوآهن برگردان‌دار شخم زده شده بود. آزمایش‌ها برای بررسی اثر متغیرهای سرعت پیشروی، عمق کار و عرض تیغه بر میزان کشش مورد نیاز و میزان مصرف سوخت تراکتور دنبال و به این‌منظور از یک دستگاه کولتیواتور ۸ شاخه‌ای به‌صورت دنباله بند و با شاخه‌های C شکل استفاده شد که عرض کار آن ۲/۵ متر، حداکثر عمق کار ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۱۲۵ سانتی‌متر است. در ابتدای هر آزمایش مسافتی به اندازه ۱۰ متر برای تثبیت عمق و سرعت طی شد و سپس داده‌برداری در مسافتی به طول ۲۰ متر

عمق خاک‌ورزی، سرعت عملیات و نحوه اتصال ادوات به تراکتور بستگی دارد (Roozbeh & Hemmat, 2003). در زمینه بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت کششی ادوات خاک‌ورزی، تأثیر پارامترهایی مانند رطوبت خاک، عمق شخم و سرعت کاری بر مقاومت کششی گاوآهن برگردان‌دار سوار مطالعه شده (Rashidi et al., 2013) و این نتیجه به‌دست آمده است که با افزایش عرض تیغه، مقدار نیروی کششی مورد نیاز افزایش می‌یابد. علاوه بر عرض و عمق کار و خصوصیات هندسی ادوات، نوع و شرایط خاک از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر میزان نیروی کششی ادوات هستند (Godwin et al., 2007). در مطالعه‌ای دیگر گزارش شده که با افزایش سرعت پیشروی در هر نوع خاک، نیروی کششی افزایش می‌یابد؛ در این مطالعات، عمق شخم و سرعت شخم زدن را دو فاکتور مؤثر و مهم در نیروی کششی مورد نیاز ادوات خاک‌ورز معرفی کرده‌اند (Harrison & Reed, 1968). نتایج یک بررسی نشان می‌دهد که میانگین مقاومت کششی هر یک از ادوات خاک‌ورزی با افزایش عمق شخم افزایش می‌یابد، چون با افزایش عمق شخم احتمال برخورد تیغه‌ها به لایه‌های فشرده‌تر خاک افزایش می‌یابد (Heydari-Rozdarreh et al., 2015).

بهینه‌سازی خاک‌ورزی در سطح مزرعه باعث می‌شود دیدی دقیق‌تر نسبت به ماشین‌های کشاورزی، از لحاظ مدیریت مصرف انرژی در کشاورزی و تولید محصول قابل رقابت با قیمت‌های جهانی و بهینه‌سازی مصرف انرژی، به‌دست‌آید (Khodaei, 2010). بهینه‌سازی معمولاً هدف‌هایی مانند دستیابی به کمترین هزینه یا کمترین زمان صرف‌شده را در نظر دارد. روش سطح پاسخ^۱ روشی مناسب برای دستیابی به این هدف است. روش سطح

1- Response surface method
3- Box-behnken

2- Central composite design
4- Doehlert

(شکل ۱). حسگر بار ساخت شرکت Bongshin کره جنوبی و مدل DBBP 5t با ظرفیت تحمل بار ۵ نیوتن است. با حرکت تراکتور جلویی در مزرعه با سرعت مشخص که با GPS کنترل شد، نیروی کششی مورد نیاز برای کشیدن خاک‌ورز و تراکتور رابط با حسگر بار اندازه‌گیری شد. نیروی مورد نیاز برای کشیدن تراکتور عقبی بدون اتصال خاک‌ورز نیز اندازه‌گیری شد و با کم‌کردن این مقدار نیرو از نیروی کششی کل، نیروی مورد نیاز (F) برای کشیدن خاک‌ورز به دست آمد. از یک دیتالاگر (ثبت‌کننده داده ساخت شرکت مهندسی سازش الکترونیک ایران با حداقل دقت نمایش ۱/۱۰۰۰۰) برای ذخیره‌کردن داده‌های به‌دست آمده با حسگر بار استفاده شد.

انجام شد. زمین مورد آزمایش، پیشتر با گاوآهن برگردان‌دار شخم زده شده بود.

در این تحقیق، از تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ و تراکتور یونیورسال U650، به‌ترتیب با توان اسمی ۷۵ و ۶۵ اسب بخار استفاده شد. این تراکتورها در بین کشاورزان ایران بسیار رایج و مشخصات فنی آنها بسیار شبیه به هم است؛ تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ برای اتصال ادوات به آن و تراکتور یونیورسال U650 برای کشش تراکتور حامل ادوات به‌کار گرفته شد. برای اندازه‌گیری نیروی کششی مورد نیاز از دو تراکتور و یک حسگر بار استفاده شد، بدین‌گونه که حسگر بار از یک طرف به مالبند تراکتور جلویی و از طرف دیگر به جلو تراکتور عقبی و خاک‌ورز به سیستم اتصال سه نقطه تراکتور عقبی متصل شد



شکل ۱- اندازه‌گیری مقاومت کششی با استفاده از روش دو تراکتوری و حسگر بار مالبندی

Fig. 1- Measurement of tensile strength by two tractors and drawbar dynamometer



شکل ۲- انواع تیغه‌های استفاده شده در آزمایش

Fig. 2- Different blades adopted in the experiments

خاک‌ورزی، ابتدا تأثیر هر یک از پارامترهای مؤثر بر آن محاسبه شد. در آزمایش‌های خاک‌ورزی با کولتیواتور برای بررسی اثر متغیرهای آزمایش‌ها از روش سطح پاسخ طبق طرح مرکب مرکزی با ۲۰ تیمار در قالب مرکز وجهی^۱ با پنج تکرار در نقطه مرکزی استفاده شد. در حالت مرکز وجهی، حدود بیشینه و کمینه با کد سطح‌های (+۱) و (-۱) مشخص می‌شوند که با توجه به مطالعات و ایده پژوهش، برای سطوح هر متغیر باید در نرم‌افزار تعریف شوند (جدول ۱). به این ترتیب، سطح دوم به‌عنوان سطح صفر یا مرکزی (۰)، مقداری بین کمینه و بیشینه است. در این آزمون، برای کلیه تجزیه و تحلیل‌ها از روش سطح پاسخ در محیط نرم‌افزار آماری Design Expert 8.0.6 بهره‌گرفته شد.

برای تعیین سوخت مصرفی و نیروی کششی لازم برای دستگاه کولتیواتور با عرض تیغه‌های متفاوت (۱۵، ۱۰ و ۵ سانتی‌متر)، از اندازه‌گیری سطح گازوئیل در سیستم باک جداگانه نصب شده روی سیستم سوخت‌رسانی تراکتور استفاده شد. سیستم باک جداگانه از استوانه‌ای مدرج، محافظ استوانه و اتصالات برای ورود و خروج گازوئیل تشکیل شده است. حجم کل این باک با توجه به ارزیابی‌ها برای مسیر مورد نظر در حدود یک لیتر است. باک مدرج پر شد و در هر یک از سطوح، مدت زمان آزمایش ثبت و موتور تراکتور خاموش شد. میزان سوخت مصرفی اندازه‌گیری شد (Rezapor- Sarabi et al., 2015).

برای تعیین سطح بهینه انرژی مصرفی فرآیند

جدول ۱- سطوح متغیرهای مستقل با استفاده از روش سطح پاسخ

Table 1- Independent variable levels using response surface methodology

-1	0	+1	پارامتر مستقل Independent parameter
6	12	18	عمق شخم (سانتی‌متر) Tillage depth (cm)
3	5	7	سرعت پیشروی (کیلومتر در ساعت) Forward speed (km h ⁻¹)
5	10	15	عرض تیغه (سانتی‌متر) Blade width (cm)

استفاده شده در روش سطح پاسخ عموماً معادلهٔ مدل درجه دوم کامل یا فرم کاهش یافتهٔ آن است. مدل درجه دوم می‌تواند به‌صورت رابطهٔ ۱ بیان شود.

مقادیر به‌دست آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای در جدول ۲ ارائه شده است. پس از انتخاب طرح، معادلهٔ مدل تعیین و ضرایب آن پیش‌بینی می‌شود. مدل

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i \leq j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

که در آن، (Giri & Prasad, 2007). سپس باید مطابقت مدل با داده‌های آزمایش بررسی شود. برای این کار، روش‌های متعددی مانند تحلیل باقیمانده، ریشهٔ میانگین مربعات خطاهای پیش‌بینی شده و آزمون عدم تطابق وجود دارد. قابلیت پیش‌بینی کلی مدل با ضریب تبیین (R^2) بیان و اهمیت آماری آن با آزمون آماری فیشر (F-Value) مشخص شد.

دوم و اثر متقابل رگرسیون؛ x_i و $x_j =$ متغیرهای مستقل کد شده؛ $\varepsilon =$ باقیمانده یا خطای مدل؛ و $k =$ شمارنده متغیرها که از عدد ۲ شروع می‌شود؛ i و $j =$ اندیس‌های متغیرهای مستقل؛ و i کوچک‌تر از j است. پس از تعیین ضرایب‌های رابطهٔ فوق، پاسخ پیش‌بینی می‌شود

جدول ۲- نتایج اندازه‌گیری مزرعه‌ای مصرف سوخت و نیروی کششی

Table 2- Results from farm measurement of fuel consumption and tensile strength

مقاومت کششی (کیلو نیوتن) Tensile strength (kN)	مصرف سوخت (لیتر در هکتار) Fuel consumption (Lit ha ⁻¹)	عمق شخم (سانتی‌متر) Tillage depth (cm)	عرض تیغه (سانتی‌متر) Blade width (cm)	سرعت پیشروی (کیلومتر در ساعت) Forward speed (km h ⁻¹)	پارامتر مستقل Independent parameter
9.9	18.3	12	10	5	1
4.7	21.3	6	15	3	2
4.3	14.9	12	10	5	3
9.6	18	12	10	5	4
9.7	18	12	10	5	5
12.5	18.3	18	5	7	6
9.7	17.7	12	10	5	7
8.7	17	12	5	5	8
20.6	30	18	15	3	9
10.8	19.8	12	15	5	10
4.1	12	6	5	7	11
5.5	17.3	6	15	7	12
16	24.4	18	5	3	13
10.6	26	12	10	3	14
6.2	19	6	5	3	15
9.8	18.4	12	10	5	16
15.3	19.6	18	10	5	17
16	22	18	15	7	18
9.2	15	12	10	7	19
9.6	17.6	12	10	5	20
4.30	4.03	4.24	3.54	1.41	انحراف استاندارد Standard deviation

نتایج و بحث

سوخت مصرفی

مزرعه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است. می‌توان دریافت که اثر متقابل دوگانه عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی بر میزان سوخت مصرفی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار است. از بین سایر منابع تغییر در تجزیه واریانس، تنها توان دوم سرعت پیشروی معنی‌دار است که آوردن آن در مدل چند جمله‌ای باعث افزایش دقت پیش‌بینی مدل می‌شود.

نتایج تجزیه واریانس برای ارزیابی اثر سه عامل عمق شخم، سرعت پیشروی و عرض تیغه بر سوخت مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که تأثیر این سه عامل و نیز اثر متقابل سه‌گانه این عوامل بر مصرف سوخت در خاک‌ورزی با کولتیواتور

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر سرعت، عمق و عرض تیغه بر سوخت مصرفی تراکتور

Table 3. The results of variance analysis of speed, depth and blade width impacts on tractor fuel consumption

F آماره F value	میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییر Source of variation
40.7**	29.5	10	مدل Model
93.98**	68.12	1	عمق- A A- Depth
218.54**	158.4	1	سرعت پیشروی- B B- Speed
35.32**	25.6	1	عرض تیغه- C C- Blade width
7.97*	5.78	1	AB
0.69 ^{n.s}	0.5	1	AC
1.17 ^{n.s}	0.84	1	BC
2.3 ^{n.s}	1.67	1	A ²
23.17**	16.8	1	B ²
0.52 ^{n.s}	0.38	1	C ²
12.75**	9.25	1	ABC
-	0.72	9	خطا Error
-	-	19	کل Total
			ضریب تبیین Coefficient of determination
			0.97
			ضریب پراکندگی Coefficient of variation
			4.47

** : معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، * : معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، n.s : بی‌معنی

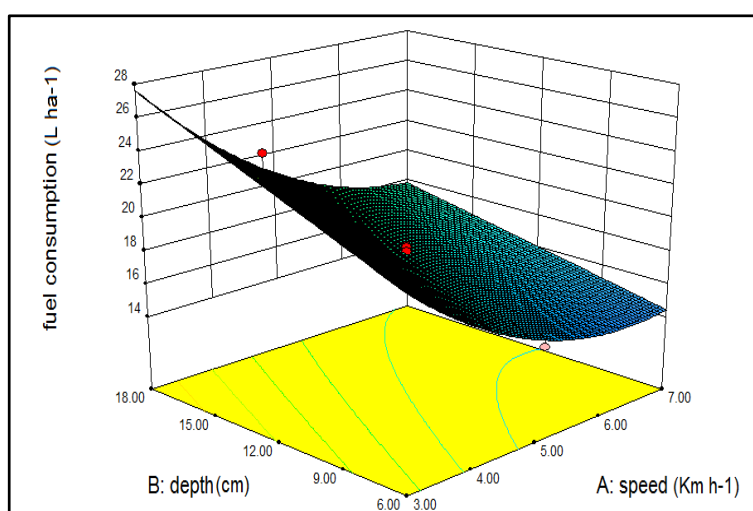
** : Significant at 0.01 probability level, * : Significant at 0.05 probability level, n.s: Non-significant

علت کاهش مصرف سوخت در واحد سطح با افزایش سرعت پیشروی، سرعت بالاتر عملیات در واحد سطح است. بدین معنی که با افزایش سرعت پیشروی، عملیات خاک‌ورزی سریع‌تر پیش می‌رود و

شکل ۳ مصرف سوخت را در عمق‌های متفاوت خاک‌ورزی و سرعت‌های مختلف پیشروی تراکتور نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش سرعت پیشروی میزان مصرف سوخت کاهش یافته است.

بالا بردن بازده تراکتور و کاهش مصرف سوخت را استفاده از سرعت‌های بالاتر برای عملیات مزرعه می‌دانند و می‌گویند میزان مصرف سوخت در واحد سطح در سرعت بالاتر کمتر است تا در سرعت پایین‌تر. با توجه به شکل ۳، با افزایش عمق خاک‌ورزی مصرف سوخت افزایش پیدا می‌کند و بیشترین مقدار سوخت مصرفی در عمق خاک‌ورزی ۱۲ تا ۱۸ سانتی‌متر مشاهده می‌شود.

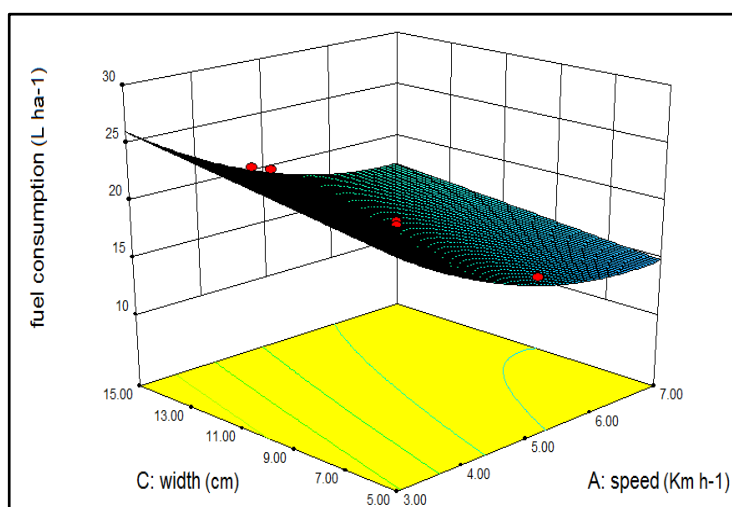
مصرف توان مالبندی کمتر در واحد سطح و زمان موجب پایین آمدن مقدار انرژی و سوخت کمتر در واحد سطح می‌شود. نتایج اثر پارامترهای مورد بررسی روی مصرف سوخت در این پژوهش با نتایج به‌دست آمده از تحقیق مشابه (Roosbeh & Hemmat, 2003) مطابقت دارد. پاره‌ای از محققان (Matthes *et al.*, 1988; Darabi *et al.*, 2012; Janulevicius *et al.*, 2013) بهترین استراتژی برای



شکل ۳- روند تغییرات مصرف سوخت در عمق‌های متفاوت خاک‌ورزی و سرعت‌های مختلف پیشروی تراکتور
 Fig. 3. The trend of fuel consumption changes at various tillage depths and forward speeds

سوخت، در سرعت ثابت ۵ کیلومتر بر ساعت، با افزایش عرض تیغه میزان مصرف سوخت افزایش می‌یابد اما این افزایش معنی‌دار نیست و بیشترین میزان مصرف سوخت با مقدار ۲۱ لیتر بر هکتار در عرض تیغه ۱۵ سانتی‌متر حادث شده است.

در شکل ۴ روند تغییرات مصرف سوخت بر اساس عرض‌های متفاوت تیغه و سرعت‌های مختلف حرکت تراکتور نشان داده شده است. با توجه به معنی‌دار شدن اثر متقابل سه‌گانه (اثر متقابل عمق خاک‌ورزی، عرض تیغه و سرعت پیشروی) بر مصرف



شکل ۴- روند تغییرات مصرف سوخت در سرعت‌های متفاوت پیشروی تراکتور و عرض‌های مختلف تیغه

Fig. 4- The trend of fuel consumption changes at various speeds and blade widths

با آنالیز رگرسیون چند متغیره، مدل چند جمله‌ای درجه دوم با ضریب تبیین ۰/۹۷ برای پیش‌بینی میزان مصرف سوخت به‌صورت رابطه ۲ به‌دست آمد.

$$FC = 17.94 + 2.61A - 3.98B + 1.6C + 0.85AB + 2.23B^2 - 1.08ABC \quad (2)$$

می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر هر سه عامل سرعت پیشروی تراکتور، عمق خاک‌ورزی، و عرض تیغه و نیز اثر متقابل دوگانه عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی و عرض تیغه و اثر متقابل سه‌گانه عوامل مذکور در سطح احتمال ۱ درصد بر مقاومت کششی کولتیواتور معنی‌دار است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که اثر متقابل سرعت پیشروی و عرض تیغه و نیز توان دوم هر یک از عوامل بر مقاومت کششی کولتیواتور معنی‌دار نیستند.

که در آن،
 FC = مصرف سوخت (لیتر بر هکتار)؛ A = عمق خاک‌ورزی (سانتی‌متر)؛ B = سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت)؛ و C = عرض تیغه (سانتی‌متر).

مقاومت کششی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های مقاومت کششی کولتیواتور در سرعت‌های مختلف پیشروی تراکتور، عمق خاک‌ورزی، و عرض تیغه در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به این جدول

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی و عرض تیغه بر مقاومت کششی کولتیواتور

Table 4- Variance analysis results of speed, depth and blade width effects on cultivator tensile strength

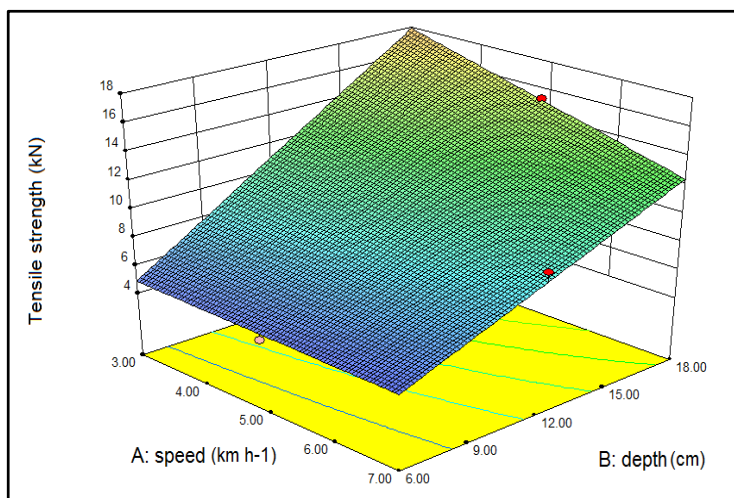
آماره F F value	میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییر Source of variation
143.14**	32.09	10	مدل Model
1210.92**	271.44	1	عمق - A A- Depth
91.22**	20.45	1	سرعت پیشروی - B B- Speed
19.43**	4.36	1	عرض تیغه - C C- Blade width
59.16**	13.26	1	AB
12.32**	2.76	1	AC
1.61 ^{n.s}	0.46	1	BC
0.37 ^{n.s}	0.082	1	A ²
0.91 ^{n.s}	0.2	1	B ²
0.18 ^{n.s}	0.041	1	C ²
31.37**	7.03	1	ABC
-	0.22	9	خطا Error
-	-	19	کل Total
			ضریب تبیین Coefficient of determination
0.99			
			ضریب پراکندگی Coefficient of variation
9.96			

***: معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، *: معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، n.s: بی‌معنی

**: Significant at 0.01 probability level, *: Significant at 0.05 probability level, n.s: Non-significant

جابه‌جا شود. این یافته با نتایج تحقیقات تعدادی از محققان (Loghavi & Moradi, 1996; Saunders *et al.*, 2000; Sahu & Raheman, 2006; Moeenifar *et al.*, 2014) همخوانی دارد که در تحقیقات خود تغییرات مقاومت کششی با افزایش عمق را به‌صورت خطی گزارش کرده‌اند. در توجیه این روند می‌توان گفت با افزایش عمق خاک‌ورزی، خاک به‌طور طبیعی متراکم می‌شود، مقاومت مکانیکی خاک را افزایش می‌دهد که به‌تبع آن افزایش مقاومت کششی را به‌دنبال خواهد داشت (Earl, 1997).

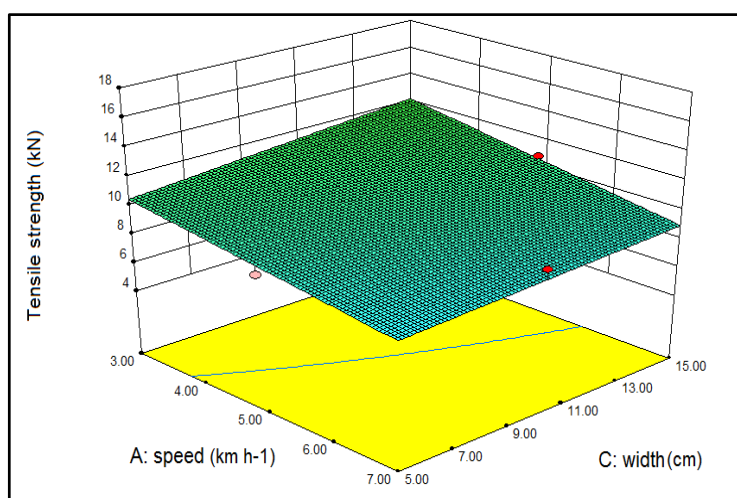
روند تغییرات مقاومت کششی کولتیواتور در عمق‌های متفاوت خاک‌ورزی و سرعت‌های مختلف پیشروی در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش عمق خاک‌ورزی، مقاومت کششی افزایش معنی‌داری پیدا می‌کند. بیشترین مقاومت کششی در عمق ۱۵ تا ۱۸ سانتی‌متر مشاهده می‌شود. بنابراین، در محدوده عمق مورد آزمایش، مقاومت کششی به‌طور خطی با عمق خاک‌ورزی افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش، مقدار زیاد خاکی است که با افزایش عمق خاک‌ورزی باید



شکل ۵- روند تغییرات مقاومت کششی کولتیواتور در عمق‌های متفاوت خاک‌ورزی و سرعت‌های مختلف پیشروی تراکتور
 Fig. 5- The trend of cultivator tensile strength variations at different tillage depths and forward speeds

محدوده سرعت‌های انتخابی در تحقیق حاضر صادق است و چنانچه سرعت‌های بالاتر از این محدوده در نظر گرفته شود، ممکن است به سبب شتاب بیشتری که خاک در اثر جابه‌جایی سریع‌تر به خود می‌گیرد باعث افزایش بارهای عمودی بر سطح درگیر با خاک شود و مقاومت کششی را افزایش دهد که با نتایج بررسی‌های سایر محققان (Kepner *et al.*, 1987; Rashidi *et al.*, 2013) همخوانی دارد.

با توجه به شکل ۵ می‌توان دریافت که با افزایش سرعت پیشروی تراکتور، مقاومت کششی کولتیواتور کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار مقاومت کششی بین سرعت ۵ تا ۷ کیلومتر بر ساعت مشاهده می‌شود. در سرعت‌های خیلی کم، به دلیل درگیری بیشتر و طولانی‌مدت کولتیواتور با خاک، نیروی اصطکاک خاک و تیغه افزایش می‌یابد و در نتیجه مقاومت کششی بالا می‌رود. این نتیجه‌گیری در مورد



شکل ۶- روند تغییرات مقاومت کششی کولتیواتور در سرعت‌های متفاوت پیشروی و عرض‌های مختلف تیغه
 Fig. 6- The trend of cultivator tensile strength changes with forward speed and blade width

نتیجه‌گیری

خاک‌ورزی با کولتیواتور است که با توجه به این هدف، نقطهٔ بهینه با مطلوبیت ۰/۹۹۸ در سرعت ۷ کیلومتر بر ساعت، عمق خاک‌ورزی ۶ سانتی‌متر و عرض تیغه ۵ سانتی‌متر به‌دست آمد. مقاومت کششی و مصرف سوخت در نقطهٔ بهینه تعیین شده به‌ترتیب برابر با ۴/۶ کیلو نیوتن و ۱۲/۲ لیتر در هکتار به‌دست آمده است. چنانچه عمق‌های بیشتر در عملیات خاک‌ورزی مورد نظر باشد، برای حفظ مقاومت کششی و مصرف سوخت در مقدار بهینه، باید عمق خاک‌ورزی ۱۸ سانتی‌متر، سرعت ۷ کیلومتر بر ساعت و عرض تیغه ۵ سانتی‌متر تنظیم شود که در این حالت درصد مطلوبیت برابر با ۸۵ و میزان مقاومت کششی و مصرف سوخت به‌ترتیب برابر با ۱۲ کیلو نیوتن و ۱۷/۱ لیتر بر هکتار خواهد بود.

سرانجام پیشنهاد می‌شود نتایج این تحقیق به‌صورت دستورالعمل فنی برای کشاورزان و کاربران تراکتور ارائه شود.

تحقیق حاضر به‌منظور بهینه‌سازی خاک‌ورزی با کولتیواتور مزرعه در خاکی با بافت رسی و رطوبت حدود ۱۲ درصد به اجرا درآمد که پیشتر با گاواهن برگردان‌دار شخم زده شده بود. آزمایش‌ها برای بررسی اثر متغیرهای سرعت پیشروی، عمق کار و عرض تیغه بر میزان کشش مورد نیاز و میزان مصرف سوخت تراکتور اجرا گردید. به این‌منظور، از یک دستگاه کولتیواتور ۹ شاخه‌ای به‌صورت دنباله‌بند و با شاخه‌های C شکل و تیغه‌های قلمی با عرض‌های متفاوت استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل تأثیر پارامترها بر مصرف سوخت و مقاومت کششی نشان می‌دهد که با افزایش عمق خاک‌ورزی مصرف سوخت در واحد سطح و با افزایش عرض تیغه، مصرف سوخت و مقاومت کششی افزایش می‌یابد. اما با افزایش سرعت مقاومت کششی و مصرف سوخت کاهش می‌یابد. هدف این تحقیق بهینه‌سازی انرژی مصرفی به‌هنگام

مراجع

- Alimardani, R. (2011). *Principals of Tillage and Tensile Engineering*. First Ed. Tehran University Press. (in Persian)
- Box, G. E. P., & Draper. N. R. (2007). *Response Surfaces, Mixtures and Ridge Analyses*. First Ed. John Wiley and Sons, New York.
- Canakci, M., Topakci, M., Akinci, I., & Ozmerzi. A. (2005). Energy use pattern of some field crops and vegetable production: Case study for Antalya Region, Turkey. *Energy Conversion and Management*, 46, pp. 655-666.
- Darabi, S., Behrooz-Lar, M., Ebrahimi, E., & Karami, B. (2012). *Evaluation of fuel consumption changes at the farm level to optimize energy consumption primary plowing in agricultural production*. 7th National Congress of Agricultural machinery Engineering and Mechanization. Shiraz University, Sep. 4-6, Shiraz, Iran. (in Persian)
- Earl, R. (1997). Assessment of the behavior of field soils during compression. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 68, pp. 147-157.

- Giri, S. K., & Prasad, S. (2007). Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 78(2): pp. 512-521.
- Godwin, R. J., Dogherly, 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, pp. 117-129.
- Harrison, H. P., & Reed, W. B. (1968). Analysis of draft, depth and speed of tillage equipment. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 10(1): pp. 14-23.
- Heydari-Rozdarreh, S., Yeganeh, R., & Valipour, G. (2015). *Comparison of tensile strength between two secondary tillage tools*. 9th National Congress of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. Apr. 22-23. Tehran University, Tehran, Iran. (in Persian)
- Janulevicius, A., Juostas, A., & Pupinis, G. (2013). Tractor's engine performance and emission characteristics in the process of ploughing. *Energy Conservation Management*, 75(1): pp. 498-508.
- Kepner, R. A., Bainer, R., & Barger, E. L. (1987). *Principles of Farm Machinery*. The AVI Publishing Co., Inc., Westport, Connecticut.
- Kheiralla, A. F., Yahia, A., Zohadie, M., & Ishak, W. (2004). Modeling of power and energy requirements for tillage implement forces operating on serdangsandy clay loam, Malaysia. *Soil Tillage Research*, 78(1): pp. 21-34.
- Khodaei, J. (2010). Application of an indirect method for measuring the tensile strength of some tillage tools. *Research Report*. University of Kurdistan. (In Persian).
- Kushwaha, R. L., & Zhang, Z. X. (1998). Evaluation of factors and current approaches related to computerized design of tillage tools: a review. *Journal of Terramechanics*, 35, pp. 69-86.
- Loghavi, M., & Moradi, A. (1996). Draft and drawbar power requirement of moldboard plow in a clay loam soil. *Iran Agricultural Research (IAR)*, 15(2): pp. 203-214.
- Matthes, R. K. W. F., Watson, I. W., Savelle, K., & Sirois, D. L. (1988). Effect of load and speed on fuel consumption of a rubber-tired skidder. *Transactions of the ASABE*, 31(1): pp. 37-39.
- Mckyes, E. (1985). *Soil Cutting and Tillage. Developments in Agricultural Engineering*, Vol. 7. Elsevier, Amsterdam.
- Moenifar, A., Mousavi-Seyedi, S. R., & Kalantari, D. (2014). Influence of tillage depth, penetration angle and forward speed on the soil/thin-blade interaction force. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 16(1): pp. 96-74.
- Montgomery, D. C. (2008). *Design and Analysis of Experiments*. 8th Ed. John Wiley & Sons, Inc.
- Rashidi, M., Najjarzadeh, I., Jaberinasab, B., Emadi S. M., & Fayyazi, M. (2013). Effect of soil moisture content, tillage depth and operation speed on draft force of moldboard plow. *Journal of Science Research*, 16(2): pp. 245-249.
- Rezapour-Sarabi, M., Mesri- Gondoshmian, T., Abbaspour-Guilandeh, Y., & Ahmadi, A. (2015). *Determining the fuel consumption of the tractor MF6290 in the conventional tillage*

and no-tillage systems. 9th National Congress of Agricultural machinery Engineering and Mechanization. Apr. 22-23. Tehran University, Tehran, Iran. (in Persian)

Roosbeh, M., & Hemmat, A. (2003). Evaluation and investigation of energy consumption in different tillage methods in corn planting. *Journal of Agricultural Science*, 33, pp. 117-128.

Sahu, R. K., & Raheman, H. (2006). Draught prediction of agricultural implements using reference tillage tools in sandy clay loam soil. *Biosystems Engineering*, 94(2): pp. 275-284.

Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2000). *Research Methods for Business Students*. Second Ed. Harlow: Pearson Education.

Modeling and Optimization of Energy Consumption When Using Farm Cultivators by Response Surface Methodology (A Case Study)

S. Mirzaei, J. Khodaei* and S. Zareei

* Corresponding author: Associated Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Email: j.khodaei@uok.ac.ir

Received: 28 January 2019, Accepted: 15 July 2019

Abstract

Tillage as a preliminary step for agricultural production consumes large amounts of energy. Regarding the energy crisis and the greenhouse gas emissions caused by the indiscriminate use of fossil fuels, many efforts have been done to reduce energy consumption as much as possible. The aim of this case study is to evaluate the effect of design and operational parameters of cultivators on the required tensile force and fuel consumption during tillage operation with a farm cultivator which had 8 shanks with specific blade geometry on a clay loam soil with specific moisture content. Experiments were carried out using response surface method and central composite design (CCD) by taking three levels of tractor forward speed (3, 5 and 7 km/h), three widths of the blade (5, 10 and 15 cm) and three tillage depth (6, 12 and 18 cm). Design Expert 8.0.6 software was used for experimental data analysis. The results showed that the blade width, forward speed and tillage depth had a significant effect on fuel consumption and tensile strength at %1 probability level. The relationship between the dependent and independent variables was presented as a second-order regression model and optimal values of independent variables were determined. The maximum desirability was determined at tillage depth of 18 cm, the forward speed of 7 km/h and a blade width of 5 cm.

Keywords: Blade width, Regression model, Tensile strength, Tillage.