

بررسی عملکرد تراکتورهای جان‌دیر ۳۱۴۰ و مسی فرگوسن ۳۹۹ حین عملیات زیرشکنی

محمد عسکری^{۱*}، افشار آزادبخت^۲، حسینعلی شمس‌آبادی^۳ و سید رضا موسوی سیدی^۴

چکیده

در این تحقیق، عملکرد دو تراکتور مسی فرگوسن ۳۹۹ و جان‌دیر ۳۱۴۰ حین عملیات زیرشکنی بررسی شده است. نیروی کششی، مصرف سوخت، لغزش، قدرت مال‌بندی، بازده کششی و بازده کل انرژی این تراکتورها در چهار سرعت ۱/۸، ۲/۳، ۲/۹ و ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و دو عمق ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر در مورد شاخه زیرشکن با هم مقایسه گردید. نوع تراکتور، سرعت و عمق، همچنین آثار متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر تمامی مؤلفه‌ها به استثنای نیروی کششی و قدرت مال‌بندی داشت. در مجموع، تراکتور جان‌دیر عملکرد بهتری داشت؛ بدین‌صورت که با افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت، نیروی کششی، مصرف سوخت، لغزش، قدرت مال‌بندی و بازده کل انرژی به ترتیب و به طور میانگین در دو عمق ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری به میزان ۷، ۴، ۲۳، ۱۰۸/۳ و ۸۹ درصد افزایش یافت؛ اما بازده کششی به میزان ۱۳/۸ درصد کاهش یافت. به‌علاوه، افزایش ۱۰ سانتی‌متری عمق زیرشکنی موجب افزایش نیروی کششی، مصرف سوخت، لغزش و قدرت مال‌بندی به میزان ۳/۳، ۳۱/۶، ۲۰/۶ و ۲۱/۴ شد؛ اما بازده کششی و بازده کل انرژی به میزان ۹/۷ و ۲۵ درصد کاهش یافت. روش سطح پاسخ (RSM) نشان داد که عمق ۴۲/۹ سانتی‌متر و سرعت ۲/۴ کیلومتر بر ساعت، بهینه‌ترین نتایج عملکردی را حاصل می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: بازده کششی، بازده کل انرژی، روش سطح پاسخ، زیرشکن، مصرف سوخت.

ارجاع: عسکری م. آزادبخت ا. شمس‌آبادی ح. و موسوی سیدی س. ر. ۱۳۹۷. بررسی عملکرد تراکتورهای جان‌دیر ۳۱۴۰ و مسی فرگوسن ۳۹۹ حین عملیات زیرشکنی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. (۷۹-۷۹): (۲).

۱- پساکتری مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۲- دکتری علفهای هرز، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۳- استادیار مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

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

* نویسنده مسئول: mohammadaskari@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۸

مقدمه

رشد روزافزون جمعیت جهان، نیاز به غذا و تولید محصولات کشاورزی را افزایش داده است. از طرفی، سوخت به‌عنوان یکی از منابع انرژی مصرفی در کشاورزی و محدودیت منابع فسیلی، اهمیت فزاینده‌ای در سال‌های آتی خواهد یافت. یکی از راه‌های اندازه‌گیری بهره‌وری سوخت مصرفی در تولید محصولات کشاورزی، بررسی عملکرد تراکتور و ادوات مورد استفاده است. این امر، هم برای کشاورزان و هم برای تولیدکنندگان ماشین‌های کشاورزی ضروری است (Al-Suhaibani, 1992). اندازه‌گیری عملکرد تراکتور عموماً شامل مؤلفه‌های مصرف سوخت، لغزش چرخ‌های محرک، قدرت مال‌بندی و بازده کشتی می‌شود و تحقیق در مورد فرمول‌های پیش‌بینی آن‌ها، سهم ویژه‌ای از تحقیقات مهندسان کشاورزی را به خود اختصاص داده است (Ismail & Burkhardt, 1993; Raheman & Jha, 2007; Ranjbarian et al., 2017).

تحقیقات زیادی برای بررسی اثر سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی بر عملکرد تراکتور انجام شده است. Shebi et al. (1988) گزارش کردند که با افزایش سرعت تراکتور از ۴ به ۱۱ کیلومتر در ساعت، میزان لغزش چرخ‌ها از ۱۵ به ۵/۸ درصد می‌رسد. Ismail & Burkhardt (1993) در مطالعات خود رابطه تغییرات سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی را با مصرف سوخت (لیتر بر ساعت)، لغزش و بازده کشتی تراکتور به ترتیب خطی، درجه دوم و خطی گزارش کرده‌اند. Khosravani et al. (1998) به این نتیجه رسیدند که با افزایش عمق خاک‌ورزی، میزان مصرف سوخت تراکتور و لغزش چرخ‌های محرک افزایش می‌یابد. Raheman & Jha (2007) در تحقیقات خود دریافتند که با افزایش سرعت پیشروی، میزان لغزش به صورت چندجمله‌ای درجه دوم افزایش می‌یابد. بررسی‌های Mosavi Seyyedi (2009) نشان داد که با افزایش عمق شخم، مصرف سوخت و لغزش افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش سرعت پیشروی، مصرف سوخت و لغزش کاهش می‌یابد. Ranjbarian et al. (2017) دریافتند که وقتی سرعت پیشروی افزایش یابد، لغزش، قدرت مال‌بندی و بازده کل انرژی افزایش اما بازده کشتی کاهش می‌یابد و مصرف سوخت در سرعت ۳ کیلومتر بر ساعت بهینه است. همچنین، تحقیقات زیادی برای مقایسه عملکرد تراکتورهای متداول در کشور، شامل تراکتورهای رومانی

(یونیورسال ۶۵۰)، مسی فرگوسن ۲۸۵، مسی فرگوسن ۳۹۹ و جان‌دیر ۳۱۴۰ حین عملیات زراعی صورت گرفته است. (Bakhtiary (1996) به مقایسه عملکرد تراکتورهای رومانی، مسی فرگوسن ۲۸۵ و آی تی ام ۷۵۰ در حین عملیات شخم با گاواهن برگرداندار پرداخت. نتایج، بیانگر برتری تراکتور رومانی در بازده کشتی بالاتر و لغزش پایین‌تر بود. (Soltani (2004) به مقایسه عملکرد تراکتورهای مسی فرگوسن ۳۹۹ و جان‌دیر ۴۲۳۰ حین شخم عمیق پرداخت و گزارش کرد که تراکتور جان‌دیر ۴۲۳۰ دارای توان مال‌بندی بالاتر، مصرف سوخت اندکی بیشتر و بازده کشتی بالاتری است. وی پیشنهاد داد که از مسی فرگوسن ۳۹۹ برای شخم سطحی استفاده گردد تا عملکرد کشتی آن نسبت به سوخت مصرفی، بهینه باشد. (Mehranzade et al. (2016) به بررسی مصرف سوخت دو تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ و ۳۹۹ حین شخم سنگین و سبک پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که مصرف سوخت دو تراکتور در شخم سبک اختلاف معنی‌داری نداشت؛ اما مصرف سوخت مسی فرگوسن ۳۹۹ در شخم سنگین بیشتر بود. با توجه به توان مال‌بندی اندازه‌گیری شده، آن‌ها عملکرد مدل ۳۹۹ را بهتر از مدل ۲۸۵ ارزیابی کردند. در تحقیقات دیگر، سایر تراکتورها نیز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. به‌طور مثال، (Mirzazadeh (2011) به مقایسه دو تراکتور ITM800 و سیاهان ۸۰۴ پرداخت. هر دو تراکتور از قدرت موتور یکسان ۸۲ اسب بخار و دو دیفرانسیل به‌صورت درگیری مکانیکی در دیفرانسیل جلو برخوردار بودند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که تراکتور ITM800 مصرف سوخت کمتر اما لغزش بیشتر و بازده کشتی و توان مال‌بندی کمتری داشت و برای بهینه‌سازی عملکرد آن باید حتماً از وزنه‌های سنگین‌کننده استفاده کرد.

از مهم‌ترین شاخص‌های مصرف انرژی در عملیات خاک‌ورزی، بازده کل انرژی مجموعه تراکتور- ادوات خاک‌ورز است. بازده کل انرژی، عبارت است از میزان انرژی منتقل‌شده از طرف تراکتور به ادوات خاک‌ورز نسبت به انرژی تولیدشده به ازای مصرف مقدار معینی از سوخت. این شاخص نسبت به بازده کشتی و مصرف سوخت ویژه برای مقایسه عملکرد تراکتورها، مهم‌تر است. (Serrano Joao et al., 2005). Crowell & Bowers (1985) گزارش کردند که بازده صحیح برای بازده کل انرژی ۲۰-۱۰ درصد

می‌توان به بهبود فرایند با یافتن ورودی‌های بهینه، رفع مشکلات و نقاط ضعف فرایند و پایدارسازی آن اشاره کرد. در همین راستا، سالار و کارپرورفرد (Salar & Karparverfard, 2017) به مدل‌سازی و بهینه‌سازی اثر هندسه بال بر نیروهای افقی و عمودی وارد بر خاک‌ورز قلمی بالدار توسط روش سطح پاسخ (RSM) پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که این روش برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی مؤلفه‌های مرتبط با عامل خاک‌ورز بسیار مفید است. با توجه به این مطالب، اهداف تحقیق حاضر بدین صورت است:

۱- بررسی اثر تغییرات سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی بر مصرف سوخت، لغزش چرخ‌های محرک، قدرت مال‌بندی، بازده کششی و بازده کل انرژی در دو تراکتور جان‌دیر ۳۱۴۰ (از این پس، به اختصار جان‌دیر نامیده خواهد شد) و مسی فرگوسن ۳۹۹ تک دیفرانسیل (از این پس، به اختصار فرگوسن نامیده خواهد شد) حین زیرشکن زنی.

۲- بهینه‌سازی مؤلفه‌های مورد بررسی تحت تأثیر متغیرهای مستقل (نوع تراکتور، سرعت پیشروی و عمق) با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM).

۳- ارائه اطلاعات به دست آمده دربارهٔ زیرشکن، عملکرد دو تراکتور متداول و تراکتور مناسب‌تر به کشاورزان برای ایجاد تناسب بهتر جهت بهره‌وری و مدیریت صحیح سوخت مصرفی.

مواد و روش‌ها

ابزارهای اندازه‌گیری

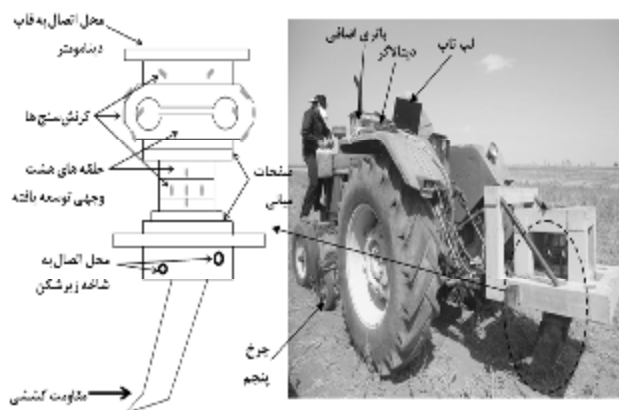
ابزارهای اندازه‌گیری استفاده‌شده در این تحقیق، شامل دینامومتر اتصال سه نقطه برای اندازه‌گیری نیروی کششی موردنیاز زیرشکن، سوخت‌سنج دیجیتالی، چرخ پنجم برای اندازه‌گیری سرعت واقعی حرکت تراکتور در مزرعه و سیستم جمع‌آوری داده است. دینامومتر مورد استفاده توسط Abbaspour-Gilandeh & Khanramaki (2013) ساخته شده است. این وسیله قادر است تمامی نیروهای وارد بر یک شاخه از ابزار خاک‌ورز را تا بیشینه مقدار ۳۰ کیلو نیوتن اندازه‌گیری کند (شکل ۱).

است. اگر بازدهٔ کل انرژی برای تراکتور- ادوات خاک‌ورز کمتر از ۱۰ درصد باشد، ترکیب مناسبی از تراکتور و ادوات را انتخاب نکرده‌ایم و بازدهٔ کششی پایینی داریم؛ بازده کل انرژی بیشتر از ۲۰ درصد بیانگر ترکیب مناسب تراکتور- ادوات خاک‌ورز و بازده کششی بالاست (Samiei Far et al., 2015).

برای شکستن لایهٔ سخت زیر سطح خاک، انواع مختلفی از گاوآهن‌های زیرشکن در طرح‌های متنوع وجود دارد (Raper, 2002)؛ اما مصرف سوخت تراکتور به هنگام کار با آن‌ها، عملکرد کششی تراکتورهای متداول مناسب برای کشش آن‌ها و تأثیر این زیرشکن‌ها در عمق‌ها و سرعت‌های متفاوت بر مؤلفه‌هایی مانند لغزش تراکتور، قدرت مال‌بندی، بازده کششی و بازده کل انرژی، همچنین بهینه‌سازی این مؤلفه‌ها توسط مدل‌های تجربی کمتر مورد توجه قرار گرفته است یا موجود نیست. کشاورزان معمولاً توجهی به تناسب تراکتور و ادوات متصل به آن به‌ویژه زیرشکن ندارند. از طرفی، باید توجه داشت که برای مقایسه دو تراکتور، باید آن‌ها را در شرایط یکسانی از لحاظ قدرت موتور، ابعاد تایر، ادوات متصل به آن‌ها و شرایط مزرعه‌ای تحت آزمون قرار دهیم. با احتساب این موارد، تصمیم به مقایسه دو تراکتور مشابه مسی فرگوسن ۳۹۹ تک دیفرانسیل و جان‌دیر ۳۱۴۰ با قدرت موتور برابر به میزان ۸۲ کیلووات گرفته شد.

در علوم مهندسی، بسیاری از پدیده‌ها بر مبنای تئوری‌های مربوط به خودشان مدل‌سازی می‌شوند. این در حالی است که بسیاری از پدیده‌ها به‌دلیل تعداد زیاد عوامل کنترل‌کننده، ناشناخته بودن مکانیزم یا پیچیدگی محاسباتی، قابلیت داشتن مدل ریاضی مناسب را ندارند. در چنین مواردی، استفاده از روش‌های تجربی مدل‌سازی کارساز است. روش سطح پاسخ^۱ (RSM)، به‌عنوان یکی از روش‌های مدل‌سازی تجربی مطرح است و مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی است که رابطه بین یک یا چند متغیر وابسته را با چندین متغیر مستقل تعیین می‌کند (Betiku & Adesina, 2013). در این روش سعی می‌شود تا با استفاده از یک طرح آزمایش مناسب، راهی برای تخمین برهمکنش‌ها، اثرهای درجه دوم و حتی شکل موضعی سطح پاسخ مورد مطالعه یافته شود. در این میان، اهداف خاصی به طور جدی دنبال می‌شوند که از مهم‌ترین آن‌ها

1- Response Surface Methodology

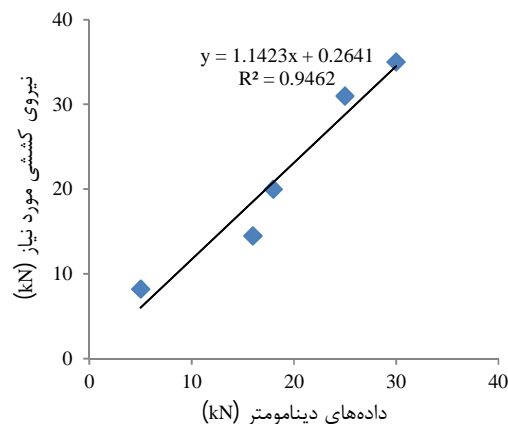


شکل ۱- تراکتور جان‌دیر ۳۱۴۰، دینامومتر، سیستم جمع‌آوری داده و چرخ پنجم مورد استفاده در آزمون‌های مزرعه‌ای

کالیبراسیون دینامومتر به صورت مزرعه‌ای و در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول، تراکتور فرگوسن، مجموعه تراکتور جان‌دیر در حالت خلاص- دینامومتر- زیرشکن را حین خاک‌ورزی و از طریق کابل رابط و لودسل ۵ تنی نصب‌شده بین دو تراکتور می‌کشید. در این وضعیت، نیروهای کششی متفاوت با اجرای سرعت‌های پیشروی متفاوت در تراکتور کشنده به دست آمد. در مرحله دوم، تراکتور کشنده مجموعه تراکتور خلاص- دینامومتر- زیرشکن در حالت عدم کار را در همان سرعت‌های پیشروی مرحله اول می‌کشید. تفاوت نیروهای اندازه‌گیری‌شده با لودسل ۵ تنی در دو مرحله اول و دوم باید با نیروی مقاوم افقی (مقاومت کششی) اندازه‌گیری‌شده با دینامومتر برابر باشد. با رسم دو سری نیرو، نمودار کالیبراسیون مزرعه‌ای به دست آمد (شکل ۲).

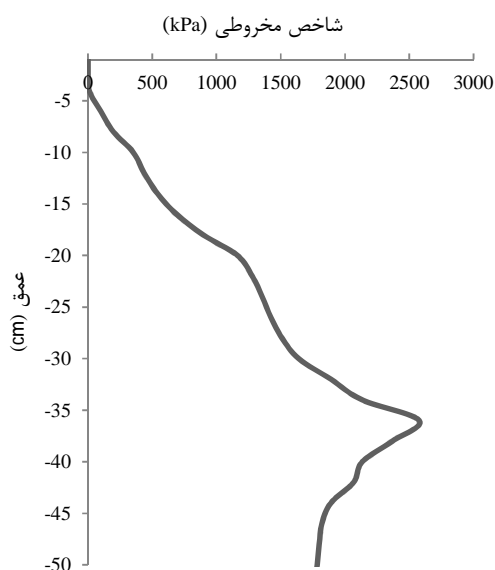
برای اندازه‌گیری سوخت مصرف‌شده از دو عدد حسگر دبی‌سنج از نوع دنده بیضوی با جابه‌جایی مثبت ساخت شرکت Oval ژاپن استفاده شد. این وسیله از دقت $\pm 1\%$ درصد در محدوده کاری ۵۰-۱ لیتر بر ساعت برخوردار بود. چون در موتورهای دیزلی سوخت مازاد از پمپ انژکتور به مخزن سوخت برمی‌گردد، علاوه بر حسگری که در مسیر رفت سوخت به پمپ انژکتور قرار داده شده بود، یک دبی‌سنج نیز در مسیر برگشت سوخت قرار گرفت تا میزان دبی مصرفی موتور از طریق تفاضل جریان عبوری از دو حسگر محاسبه شده و از طریق نمایشگر دیجیتال سوخت‌سنج در هر ثانیه نمایش داده شود.

سرعت تراکتور در مزرعه با چرخ پنجم اندازه‌گیری شد (شکل ۱). یک حسگر مغناطیسی به چرخ پنجم متصل است که چرخش چرخ‌دنده ۱۲ دندانه‌ای را ثبت می‌کند. با تقسیم عدد نشان داده شده در نمایشگر دیجیتال پالس‌متر بر عدد ۱۲، تعداد دور چرخ پنجم قابل محاسبه است. با داشتن محیط چرخ پنجم، مسافت طی شده، محاسبه می‌شود و با اندازه‌گیری مدت زمان مورد نیاز برای طی کردن این مسافت، سرعت تراکتور به دست می‌آید. سیستم جمع‌آوری داده مورد استفاده در این تحقیق، شامل کرنش‌سنج‌های نصب‌شده بر روی دو حلقه هشت وجهی توسعه‌یافته (EOR) نصب‌شده روی دینامومتر اتصال سه نقطه، دیتالاگر و لپ‌تاپ بود. سیگنال‌های دریافتی از کرنش‌سنج‌ها در دیتالاگر DT-800 رقومی شد و در انتهای هر کرت به لپ‌تاپ انتقال یافت. دیتالاگر و لپ‌تاپ از طریق یک باتری ۱۲ ولتی اضافی و مبدل برق ۱۲ به ۲۲۰ ولت تغذیه می‌شدند (شکل ۱).



شکل ۲- نتایج به دست آمده از کالیبراسیون مزرعه‌ای دینامومتر

و ۲۵-۵۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۳- نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری استحکام خاک با دستگاه نفوذسنج

آزمون‌های مزرعه‌ای

آزمون‌های مزرعه‌ای در مزارع ایستگاه تحقیقات کشاورزی اردبیل (آلاروق) اجرا شد. از یک دستگاه نفوذسنج دستی ریمیک (Rimik, CP-20) برای اندازه‌گیری استحکام خاک استفاده شد. نفوذپذیری خاک در ۲۰ نقطه تصادفی تا عمق ۵۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. میانگین نتایج به دست آمده در شکل ۳ نشان داده شده است.

این نتایج نشان می‌دهد که سخت‌لایه‌ای در عمق ۳۵ سانتی‌متری وجود دارد که زیرشکنی در عمق‌های ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر به شکستن آن کمک خواهد کرد. از دو تراکتور شش سیلندر تک دیفرانسیل متداول شامل جاندر و فرگوسن با ۸۲ کیلووات قدرت موتور و اندازه چرخ‌های مساوی بدون فعال‌سازی قفل دیفرانسیل در آزمون‌های مزرعه‌ای استفاده شد. شاخه زیرشکن مورد استفاده در آزمون‌های مزرعه‌ای از نوع استاندارد C شکل و حداکثر عمق کاری آن ۶۰ سانتی‌متر بود (شکل ۱). خاک مزرعه از نوع لومی رسی بود؛ رطوبت و سایر خصوصیات خاک در ۱۵ نقطه انتخاب‌شده به طور تصادفی و در دو عمق ۰-۲۵

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در مزرعه تحقیقاتی

| مقدار | خصوصیت |
|-------|---|
| ۴۰ | شن (درصد) |
| ۲۸ | سیلت (درصد) |
| ۳۲ | رس (درصد) |
| ۰/۲۹ | ماده آلی (درصد) |
| ۷/۶۲ | اسیدیته |
| ۰/۴۱ | هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) |
| ۱/۳۵ | جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب) (۲۵-۰ سانتی‌متری) |
| ۱/۴۶ | جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب) (۲۵-۵۰ سانتی‌متری) |
| ۹/۳ | رطوبت بر پایه وزن خشک (درصد) (۲۵-۰ سانتی‌متری) |
| ۱۲/۴ | رطوبت بر پایه وزن خشک (درصد) (۲۵-۵۰ سانتی‌متری) |

استفاده از فرمول‌های استاندارد محاسبه گردید. برای محاسبه لغزش از معادله (۱) استفاده شد:

$$S = 100(1 - (V_a/V_o)) \quad (1)$$

که در آن S لغزش (درصد)؛ V_a سرعت واقعی حرکت تراکتور حین عملیات خاک‌ورزی (کیلومتر بر ساعت)؛ و V_o سرعت حرکت تراکتور بدون بار روی سطح مزرعه (کیلومتر بر ساعت) است.

برای محاسبه قدرت مال‌بندی تراکتور از معادله (۲) استفاده شد:

با در نظر گرفتن متغیرهای مستقل، شامل دو نوع تراکتور، دو عمق خاک‌ورزی، چهار سرعت پیشروی و چهار تکرار برای هر حالت آزمون، جمعاً ۶۴ کرت آزمایشی (هر یک ۳ متر عرض در ۳۰ متر طول) در چهار بلوک بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در نظر گرفته شد. در هر کرت، سه مؤلفه، شامل نیروی کششی مورد نیاز، مصرف سوخت و سرعت تراکتور اندازه‌گیری و مؤلفه‌های دیگر، شامل لغزش، قدرت مال‌بندی، بازده کششی و بازده کل انرژی با

موردنیاز ادوات (کیلونیتون)؛ و F_c مصرف سوخت تراکتور (لیتر بر ساعت) است. عدد $10/2$ موجود در مخرج کسر فوق، ارزش حرارتی یک کیلوگرم سوخت دیزل تولیدی در ایران بر حسب کیلووات ساعت است.

بهبهینه‌سازی توسط تکنیک روش سطح پاسخ (RSM)

مقادیر بهینه برای کمیت‌های وابسته تحت بررسی، شامل نیروی کششی موردنیاز، مصرف سوخت، لغزش، قدرت مال‌بندی، بازده کششی و بازده کل انرژی در مجموعه تراکتور- زیرشکن توسط حل معادلات رگرسیونی برای پیش‌بینی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار Design Expert به‌دست آمد. هدف ما در این بخش، ایجاد کمترین مقادیر برای نیروی کششی، مصرف سوخت و لغزش بوده است و بالعکس، بیشترین مقادیر برای قدرت مال‌بندی، بازده کششی و بازده کل انرژی مدنظر می‌باشد.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس اثر نوع تراکتور، سرعت پیشروی و عمق زیرشکنی بر مؤلفه‌های بررسی‌شده در جدول ۲ نشان داده شده است. اثر نوع تراکتور، سرعت پیشروی و عمق، همچنین آثار متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر تمامی مؤلفه‌های تحت بررسی به استثنای نیروی کششی و قدرت مال‌بندی دارد. اثر نوع تراکتور و آثار متقابل این عامل با عوامل دیگر (سرعت و عمق) بر نیروی کششی و قدرت مال‌بندی، بی‌معنی است.

$$DP = D \times Va/3.6 \quad (2)$$

که در آن DP قدرت مال‌بندی (کیلووات)؛ D نیروی کششی موردنیاز ابزار خاک‌ورز (کیلونیتون) و Va سرعت واقعی حرکت تراکتور در مزرعه (کیلومتر بر ساعت) است. برای اندازه‌گیری بازده کششی از معادله (۳) استفاده شد:

$$TE = 1 - S (NT/GT) \quad (3)$$

که در آن TE بازده کششی؛ S میزان لغزش؛ NT کشش خالص (تعریف شده در استاندارد ASAE S296) به صورت

$$NT = W \left(0.88(1 - e^{-0.18 B_n})(1 - e^{-7.5 s}) - \frac{1}{B_n} - \frac{0.5 s}{\sqrt{B_n}} \right)$$

که در آن، e پایه لگاریتم طبیعی بوده و W و B_n به ترتیب نیروی دینامیک چرخ و یک نسبت بدون واحد به صورت

$$B_n = \left(\frac{Clb d}{W} \right) \left(\frac{1 + 5 \frac{\delta}{h}}{1 + 3 \frac{b}{d}} \right)$$

می‌باشد؛ و GT کشش ناخالص (تعریف شده در استاندارد ASAE S296) به صورت

$$GT = W(0.88(1 - e^{-0.1 B_n})(1 - e^{-7.5 s}) + 0.04)$$

است.

یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌هایی که در این تحقیق بررسی شد، بازده انرژی کل مجموعه تراکتور- ادوات خاک‌ورز بود که از طریق معادله (۴) محاسبه می‌گردد:

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

که در آن OEE بازده انرژی کل (درصد)؛ Va سرعت تراکتور در مزرعه (کیلومتر بر ساعت)؛ D مقاومت کششی

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر نوع تراکتور، سرعت پیشروی و عمق بر مؤلفه‌های مورد مطالعه

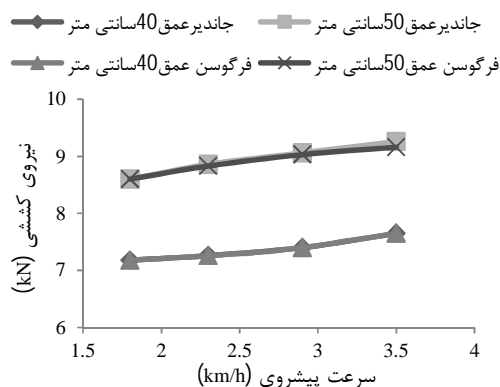
| میانگین مربعات | | | | مصرف سوخت | نیروی کششی | درجه آزادی | منبع تغییرات |
|----------------|------------|---------------------|----------|-----------|-----------------------|------------|--------------|
| بازده کل انرژی | بازده کششی | قدرت مال‌بندی | لغزش | | | | |
| ۵۱۱/۳۳** | ۲۳۰/۵۸** | ۴۸۷/۳** | ۱۰/۳** | ۱۹/۱۳** | ۲۲۱/۵۰۴ ^{ns} | ۱ | تراکتور |
| ۱۵/۲۸۵** | ۳۶۴/۵* | ۱۰/۷۴** | ۶۳/۹۵۸** | ۲۰/۰۲۰** | ۱۹/۷۸۲** | ۱ | عمق |
| ۵۴/۵۹** | ۱۵۱/۱۶۷** | ۲۷/۳۸۹** | ۱۲/۹۸* | ۰/۹۵۷** | ۰/۴۶۶** | ۳ | سرعت |
| ۵۶۰/۱۵** | ۳۴/۱۱۸** | ۴۶/۷۵ ^{ns} | ۴۴۳/۷۶** | ۳۹۴/۴۹** | ۵۰۰/۴۰ ^{ns} | ۱ | تراکتور×عمق |
| ۹۸/۱۴** | ۹۳۷/۵۶** | ۹۹۰/۷ ^{ns} | ۵۰/۸۷** | ۱۲۹/۹۸** | ۹۴۰/۴۲ ^{ns} | ۳ | تراکتور×سرعت |
| ۰/۳۹۱** | ۰/۵* | ۰/۲۷۸** | ۰/۷۴۷* | ۰/۰۷۳** | ۰/۰۲۲** | ۳ | سرعت×عمق |
| ۰/۰۰۱ | ۰/۱۱۴ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۱ | ۵۱ | خطا |
| | | | | | | ۶۳ | کل |

** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، * اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ^{ns} عدم معنی‌دار بودن اختلاف

جدول ۳- نتایج مربوط به بهینه‌سازی مؤلفه‌های مورد مطالعه

| مقدار | تراکتور | سرعت پیشروی (km/h) | عمق (cm) | مؤلفه تحت بررسی |
|-------|---------|--------------------|----------|--------------------|
| ۷/۶۲ | فرگوسن | ۱/۹۰۶ | ۴۲/۷۸ | نیروی کششی (kN) |
| ۶/۹۳ | فرگوسن | ۱/۸۸۱ | ۴۱/۳۶ | مصرف سوخت (L/h) |
| ۹/۹۹ | جان‌دیر | ۲/۰۰۲ | ۴۰/۶۷ | لغزش (%) |
| ۸/۴۴ | جان‌دیر | ۳/۴۰۱ | ۴۸/۳۳ | قدرت مال‌بندی (kW) |
| ۷۲/۲۳ | جان‌دیر | ۱/۸۳۲ | ۴۱/۹۴ | بازده کششی (%) |
| ۱۲/۳۸ | فرگوسن | ۳/۴۳۵ | ۴۲/۳۳ | بازده کل انرژی (%) |

۴۰ سانتی‌متر در هر دو تراکتور به میزان ۷/۱۸ کیلو نیوتن به دست آمده است. در مورد تراکتور جان‌دیر، افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت به ترتیب در دو عمق خاک‌ورزی ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر خاک باعث افزایش مقاومت کششی به میزان ۶/۵ و ۷/۷ درصد شده است. با افزایش ۱۰ سانتی‌متر به عمق عملیات زیرشکنی، مقاومت کششی موردنیاز حدود ۲۱/۳ درصد افزایش یافته است. در مورد تراکتور فرگوسن، افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت به ترتیب در دو عمق خاک‌ورزی ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر خاک باعث افزایش مقاومت کششی به میزان ۶/۵ درصد شده است. با افزایش ۱۰ سانتی‌متر به عمق عملیات زیرشکنی، مقاومت کششی موردنیاز حدود ۲۰/۸ درصد افزایش یافته است. شکل ۴، همچنین نشان می‌دهد که رابطه بین سرعت پیشروی و نیروی کششی موردنیاز در هر دو عمق خاک‌ورزی و هر دو تراکتور خطی است ($R^2 > 0.95$). از تحقیقات Ismail & Sahu & Ashrafi Zadeh (2006)، Burkhardt (1993) و Moenifar et al. (2013)، Raheman (2006) و Ranjbarian et al. (2017) نتایج مشابه به دست آمده است.



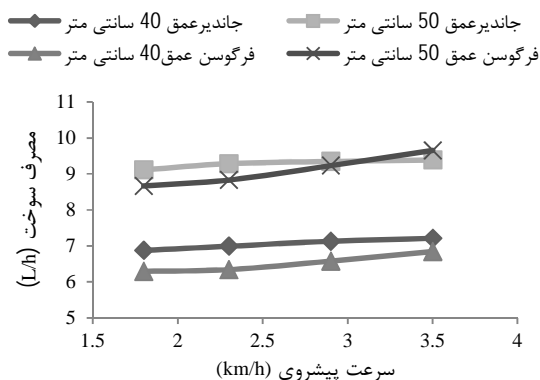
شکل ۴- ارتباط بین سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی، نوع تراکتور و نیروی کششی موردنیاز زیرشکن

اثر نوع تراکتور، سرعت پیشروی و عمق زیرشکنی بر نیروی کششی

شکل ۴، نیروی کششی موردنیاز زیرشکن متصل به دو نوع تراکتور تحت آزمون را در سرعت‌ها و عمق‌های مختلف نشان می‌دهد.

شکل ۴، نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی، نیروی کششی موردنیاز زیرشکن متصل به هر دو تراکتور افزایش می‌یابد (Spoor & Godwin, 1978; Owen, 1989; Sheikh, 1989; Al-Suhaibani & Al-Janobi, 1997; Shahi et al., 2010; Ramadhan, 2011; Ramadhan, 2014). با دو برابر شدن سرعت پیشروی (مثلاً از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت) مقاومت کششی افزایش می‌یابد؛ اما دو برابر نمی‌شود. این تناسب با فرمول استاندارد پیش‌بینی مقاومت کششی ASABE و تحقیقات تعداد زیادی از محققان انطباق دارد (Crowell & Bowers, 1985; De Souza et al., 1994; Al-Suhaibani et al., 2006; Sahu & Raheman, 2006). بودن عمق و سرعت پیشروی، انتظار می‌رفت که نیروی کششی موردنیاز برای زیرشکن متصل به هر دو تراکتور یکسان باشد؛ اما نتایج به دست آمده در مزرعه کمی متفاوت بود که به علت تفاوت در خصوصیات فیزیکی خاک، مانند فشردگی، تخلخل و رطوبت آن از نقطه‌ای به نقطه دیگر می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که در عمق ۴۰ سانتی‌متر، مقاومت کششی زیرشکن یکسان است؛ اما در عمق ۵۰ سانتی‌متر، مقاومت کششی بیشتری از طرف ابزار خاک‌ورز بر تراکتور جان‌دیر وارد شده است. می‌توان استنباط کرد که کرت‌های مرتبط با آزمون این تراکتور به صورت کاملاً تصادفی دارای خاک متراکم‌تر یا مرطوب‌تر بوده‌اند. بیشترین نیروی کششی موردنیاز در سرعت ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در عمق خاک‌ورزی ۵۰ سانتی‌متر در تراکتور جان‌دیر به میزان ۹/۲۶ کیلو نیوتن و کمترین نیرو نیز در سرعت ۱/۸ کیلومتر بر ساعت در عمق خاک‌ورزی

پیشروی و هم افزایش عمق عملیات زیرشکنی تأثیر بسیار بیشتری بر افزایش مصرف سوخت تراکتور فرگوسن در مقایسه با تراکتور جاندر دارد.



شکل ۵- ارتباط بین سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی، نوع تراکتور و مصرف سوخت

اثر نوع تراکتور، سرعت پیشروی و عمق زیرشکنی بر لغزش

شکل ۶، لغزش چرخ‌های محرک در دو تراکتور تحت آزمون را در سرعت‌ها و عمق‌های مختلف حین زیرشکنی نشان می‌دهد.

با افزایش سرعت پیشروی و عمق زیرشکنی، میزان لغزش در چرخ‌های محرک در هر دو تراکتور افزایش می‌یابد؛ اما در همه حالات، لغزش در فرگوسن بیشتر از جاندر می‌باشد، به طوری که بیشترین لغزش به میزان ۱۵/۹۸ درصد در سرعت پیشروی ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و در عمق خاک‌ورزی ۵۰ سانتی‌متر تراکتور فرگوسن و کمترین لغزش به میزان ۹/۲۸ درصد در سرعت ۱/۸ کیلومتر بر ساعت در عمق خاک‌ورزی ۴۰ سانتی‌متر در تراکتور جاندر اتفاق افتاده است. در تراکتور جاندر، افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در دو عمق خاک‌ورزی ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر باعث افزایش لغزش به ترتیب به میزان ۲۳/۴ و ۲۲/۷ درصد شده است. همچنین، با افزایش ۱۰ سانتی‌متر به عمق زیرشکنی، لغزش ۲۰/۶ درصد افزایش می‌یابد. در تراکتور فرگوسن، افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در دو عمق خاک‌ورزی ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر باعث افزایش لغزش به ترتیب به میزان ۲۴/۶ و ۳۳/۱ درصد شده است. همچنین، با افزایش ۱۰ سانتی‌متر به عمق زیرشکنی، لغزش ۲۴ درصد افزایش می‌یابد. هر دو تراکتور، قدرت

اثر نوع تراکتور، سرعت پیشروی و عمق زیرشکنی بر مصرف سوخت

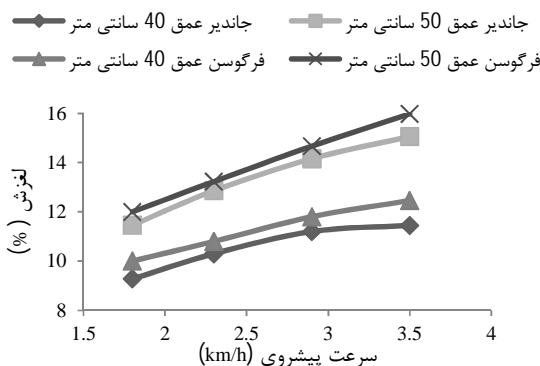
شکل ۵، مصرف سوخت مربوط به دو نوع تراکتور تحت آزمون را در سرعت‌ها و عمق‌های مختلف حین زیرشکنی نشان می‌دهد.

بیشترین مصرف سوخت به میزان ۹/۶۵ لیتر بر ساعت در سرعت ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و عمق خاک‌ورزی ۵۰ سانتی‌متر در فرگوسن و کمترین مصرف سوخت نیز به میزان ۶/۳ لیتر بر ساعت در سرعت ۱/۸ کیلومتر بر ساعت و عمق خاک‌ورزی ۴۰ سانتی‌متر در فرگوسن به دست آمده است. مصرف سوخت هر دو تراکتور با افزایش عمق خاک‌ورزی و با افزایش سرعت پیشروی، افزایش یافته است. (Khosravani et al. (1998) نیز گزارش کردند که با افزایش عمق خاک‌ورزی، مصرف سوخت تراکتور افزایش می‌یابد. رابطه بین سرعت پیشروی و مصرف سوخت در هر دو تراکتور و هر دو عمق، مستقیم و خطی است ($R^2 > 0.85$) (Ismail & Burkhardt, و Aljasimy (1993). (1993) نیز رابطه بین سرعت پیشروی و مصرف سوخت را مستقیم (خطی) گزارش کرده‌اند. همچنین، Ranjbarian (2017) et al. رابطه بین سرعت پیشروی و مصرف سوخت گاواهن چیزل را مستقیم و کاملاً خطی ($R^2 > 0.99$) گزارش کرده‌اند. در عمق ۴۰ سانتی‌متر، تراکتور جاندر در تمامی سرعت‌ها، مصرف سوخت بیشتری داشته اما اختلاف مصرف سوخت دو تراکتور با افزایش سرعت پیشروی، کاهش یافته است. در عمق ۵۰ سانتی‌متر، در سرعت‌های کمتر از ۳ کیلومتر بر ساعت، تراکتور جاندر مصرف سوخت بیشتری دارد؛ اما در سرعت‌های بالاتر، مصرف سوخت تراکتور فرگوسن از جاندر بیشتر شده است. در تراکتور جاندر با افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در دو عمق خاک‌ورزی ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر مصرف سوخت به ترتیب به میزان ۴/۹ و ۳ درصد و با افزایش عمق خاک‌ورزی از ۴۰ به ۵۰ سانتی‌متر، مصرف سوخت حدود ۳۱/۶۵ درصد افزایش می‌یابد. در تراکتور فرگوسن با افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در دو عمق خاک‌ورزی ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر مصرف سوخت به ترتیب به میزان ۸/۷ و ۱۱/۴ درصد و با افزایش عمق خاک‌ورزی از ۴۰ به ۵۰ سانتی‌متر، مصرف سوخت حدود ۳۹/۵ درصد افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که هم افزایش سرعت

اثر نوع تراکتور، سرعت پیشروی و عمق زیرشکنی بر قدرت مال‌بندی

شکل ۷، نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیشروی و عمق زیرشکنی، قدرت مال‌بندی هر دو تراکتور افزایش یافته است. این نتیجه کاملاً منطقی به نظر می‌رسد؛ چون قدرت مال‌بندی حاصل ضرب مقاومت کششی در سرعت پیشروی است و با افزایش مقاومت کششی در سرعت‌های بالاتر و عمق‌های خاک‌ورزی بیشتر، قدرت مال‌بندی افزایش پیدا خواهد کرد. در عمق ۴۰ سانتی‌متر، قدرت مال‌بندی هر دو تراکتور به دلیل اجرای کشش یکسان کاملاً برابر بوده اما در عمق ۵۰ سانتی‌متر، تراکتور جان‌دیر در پاسخ به توان مال‌بندی موردنیاز بالاتر ابزار خاک‌ورز، قدرت مال‌بندی بیشتری ایجاد کرد. بیشترین قدرت مال‌بندی به میزان ۹ کیلووات در سرعت پیشروی ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و در عمق خاک‌ورزی ۵۰ سانتی‌متر در تراکتور جان‌دیر و کمترین قدرت مال‌بندی به میزان ۳/۶ کیلووات در سرعت ۱/۸ کیلومتر بر ساعت در عمق خاک‌ورزی ۴۰ سانتی‌متر در هر دو تراکتور اتفاق افتاده است. در تراکتور جان‌دیر، افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت به ترتیب در دو عمق ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری خاک باعث افزایش قدرت مال‌بندی تراکتور به میزان ۱۰۷/۲ و ۱۰۹/۴ درصد شده است. همچنین، با افزایش ۱۰ سانتی‌متر به عمق زیرشکنی، قدرت مال‌بندی حدود ۲۱/۴ درصد افزایش یافته است. در فرگوسن، افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت به ترتیب در دو عمق ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری خاک باعث افزایش قدرت مال‌بندی تراکتور به میزان ۱۰۷/۲ و ۱۰۷/۱ درصد شده است. همچنین، با افزایش ۱۰ سانتی‌متر به عمق زیرشکنی، قدرت مال‌بندی به میزان ۲۰/۸ درصد افزایش یافته است. رابطه بین سرعت پیشروی و قدرت مال‌بندی در هر دو عمق خاک‌ورزی و هر دو تراکتور خطی است ($R^2 > 0.99$). رنجبریان و همکاران (Ranjbarian et al., 2017) نیز گزارش کردند که با افزایش سرعت پیشروی، قدرت مال‌بندی تراکتور به صورت خطی افزایش می‌یابد.

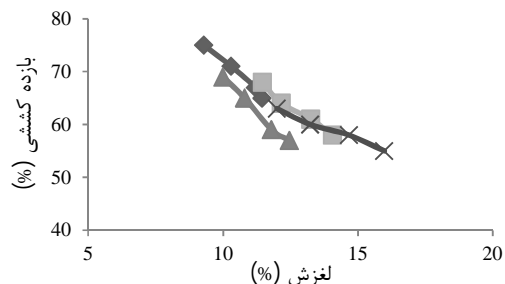
کافی برای آزمون‌های مزرعه‌ای دارند و مهم‌ترین عاملی که می‌تواند سبب افزایش لغزش در سرعت‌های بالاتر باشد، نبود وزنه‌های سنگین‌کننده است. Albana & Hassan (1990)، (Raheman & Jha (2007) و Ranjbarian et al. (2017) نیز دریافتند که با افزایش سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی، لغزش چرخ‌های محرک افزایش خواهد یافت. (Khosravani et al. (1998) و Mosavi Seyyedi (2009) نیز گزارش کرده‌اند که با افزایش عمق خاک‌ورزی، لغزش چرخ‌های محرک تراکتور افزایش می‌یابد. اما Mosavi Seyyedi (2009) دریافت که با افزایش سرعت پیشروی، لغزش چرخ‌های تراکتور کاهش می‌یابد. دلیل اختلاف میان نتایج بررسی‌های این محققان و نتایج به دست آمده از این تحقیق، آن است که نوع تراکتورها، آج لاستیک‌های چرخ محرک، ادوات مورد استفاده و شرایط خاک در هر یک از این تحقیقات متفاوت است. رابطه بین سرعت پیشروی و لغزش در عمق‌های ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری خاک‌ورزی برای هر دو تراکتور، به صورت چندجمله‌ای درجه دوم با همبستگی بالا ($R^2 > 0.92$) است. Ismail & Burkhardt (1993) نیز رابطه بین تغییرات سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی و لغزش چرخ‌های محرک را به صورت چندجمله‌ای درجه دوم گزارش کرده‌اند. اما Ranjbarian et al. (2017) رابطه سرعت پیشروی و لغزش را در مورد گاواهن چیزل، خطی گزارش کرده‌اند. تفاوت در نتایج تحقیقات آن‌ها با نتایج این تحقیق می‌تواند ناشی از تفاوت در تراکتورها و ادوات مورد استفاده و شرایط عملیاتی آزمون‌ها باشد.



شکل ۶- ارتباط بین سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی، نوع تراکتور و لغزش

تراکتور به صورت خطی کاهش می‌یابد. در این نمودار، دو روند تغییرات بازده کششی نسبت به سرعت پیشروی در فرگوسن عمق ۴۰ سانتی‌متر و جاندر عمق ۵۰ سانتی‌متر در تعقیب هم هستند؛ به گونه‌ای که در سرعت‌های پایین، بازده کششی فرگوسن عمق ۴۰ سانتی‌متر بهتر از جاندر عمق ۵۰ سانتی‌متر است؛ اما با افزایش سرعت پیشروی، بازده کششی در جاندر عمق ۵۰ سانتی‌متر بهتر از فرگوسن عمق ۴۰ سانتی‌متر شده است.

جاندر عمق ۵۰ سانتی متر (مربع) جاندر عمق ۴۰ سانتی متر (دایره)
فرگوسن عمق ۵۰ سانتی متر (X) فرگوسن عمق ۴۰ سانتی متر (مثلث)

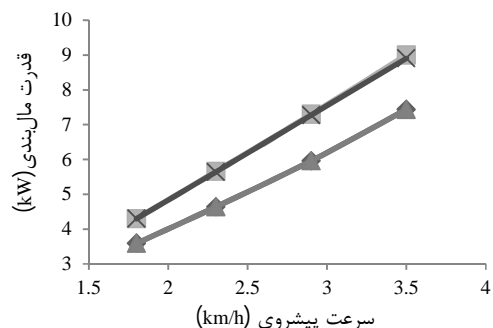


شکل ۸- ارتباط بین لغزش، عمق خاک‌ورزی، نوع تراکتور و بازده کششی

اثر نوع تراکتور، سرعت پیشروی و عمق زیرشکنی بر بازده کل انرژی

شکل ۹، نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیشروی در هر دو تراکتور، بازده کل انرژی در مجموعه تراکتور-زیرشکن افزایش اما با افزایش عمق زیرشکنی، بازده کل انرژی کاهش می‌یابد؛ به طوری که بیشترین بازده کل انرژی به میزان ۱۳/۹ درصد در سرعت پیشروی ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و در عمق خاک‌ورزی ۴۰ سانتی‌متر در فرگوسن و کمترین بازده کششی به میزان ۵/۹ درصد در سرعت ۱/۸ کیلومتر بر ساعت و در عمق خاک‌ورزی ۵۰ سانتی‌متر در فرگوسن حاصل شده است. در جاندر، افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در دو عمق خاک‌ورزی ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری خاک باعث افزایش بازده کل انرژی به میزان ۹۰ و ۸۸ درصد شده است. همچنین، با افزایش ۱۰ سانتی‌متر به عمق زیرشکنی، بازده کل انرژی ۲۵ درصد کاهش داشته است. در فرگوسن، افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در دو عمق خاک‌ورزی ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری خاک باعث افزایش بازده کل انرژی به میزان

جاندر عمق ۵۰ سانتی متر (مربع) جاندر عمق ۴۰ سانتی متر (دایره)
فرگوسن عمق ۵۰ سانتی متر (X) فرگوسن عمق ۴۰ سانتی متر (مثلث)

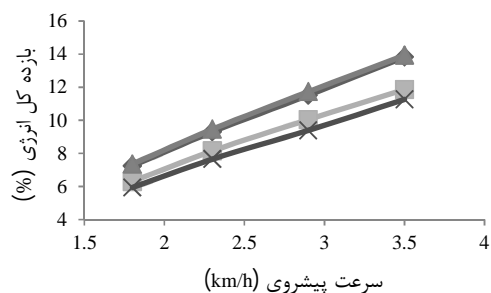


شکل ۷- ارتباط بین سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی، نوع تراکتور و قدرت مال‌بندی

اثر نوع تراکتور، سرعت پیشروی و عمق زیرشکنی بر بازده کششی

لغزش چرخ‌های محرک، عامل تعیین‌کننده‌ای در بازده کششی است و لغزش بیشتر از بازده کششی می‌کاهد. در این راستا، شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش لغزش ناشی از افزایش سرعت پیشروی و عمق زیرشکنی در هر دو تراکتور، بازده کششی کاهش می‌یابد. بیشترین بازده کششی به میزان ۷۵ درصد در سرعت پیشروی ۱/۸ کیلومتر بر ساعت و در عمق خاک‌ورزی ۴۰ سانتی‌متر در تراکتور جاندر و کمترین بازده کششی به میزان ۵۵ درصد در سرعت ۳/۵ کیلومتر بر ساعت و در عمق خاک‌ورزی ۵۰ سانتی‌متر در تراکتور فرگوسن اتفاق افتاده است. در جاندر، افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در هر دو عمق ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری خاک باعث کاهش بازده کششی به میزان ۱۳ و ۱۴/۷ درصد شد. همچنین، با افزایش ۱۰ سانتی‌متر به عمق زیرشکنی، بازده کششی ۹/۷ درصد کاهش یافت. در فرگوسن، افزایش سرعت پیشروی از ۱/۸ به ۳/۵ کیلومتر بر ساعت در هر دو عمق ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متری خاک باعث کاهش بازده کششی به میزان ۱۷/۴ و ۱۲/۷ درصد شد. همچنین، با افزایش ۱۰ سانتی‌متر به عمق زیرشکنی، بازده کششی ۵/۶ درصد کاهش یافت. رابطه بین افزایش سرعت پیشروی و کاهش بازده کششی در هر دو عمق خاک‌ورزی برای هر دو تراکتور خطی است ($R^2 > 0.96$). (Ismail & Burkhardt (1993) و Ranjbarian et al. (2017) نیز گزارش کردند که با افزایش سرعت پیشروی، بازده کششی

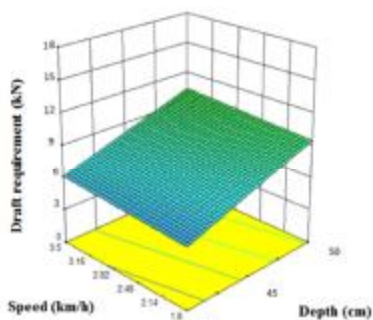
جاندیر عمق ۵۰ سانتی متر ■ فرگوسن عمق ۵۰ سانتی متر ✕
 جاندیر عمق ۴۰ سانتی متر ◆ فرگوسن عمق ۴۰ سانتی متر ▲



شکل ۹- ارتباط بین سرعت پیشروی، عمق خاک‌ورزی، نوع تراکتور و بازده کل انرژی

نتایج مربوط به بهینه‌سازی مؤلفه‌های تحت بررسی توسط روش سطح پاسخ (RSM)

به‌عنوان نمونه، نمودار سه‌بعدی تغییرات نیروی کششی موردنیاز زیرشکن تحت تأثیر سرعت‌ها و عمق‌های مختلف در تراکتور فرگوسن استخراج شده توسط تکنیک روش سطح پاسخ (RSM) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بهینه‌سازی مؤلفه‌های مورد مطالعه تحت تأثیر نوع تراکتور، سرعت پیشروی و عمق خاک‌ورزی به کمک تکنیک روش سطح پاسخ (RSM) انجام شد و نتایج آن به‌صورت جدول ۳ ارائه گردیده است.



شکل ۱۰- تغییرات نیروی کششی موردنیاز زیرشکن تحت تأثیر سرعت و عمق

ملاحظه می‌گردد که در ارتباط با نیروی کششی موردنیاز و مصرف سوخت، عمق و سرعت کمتر و تراکتور فرگوسن بهینه‌اند. در مورد لغزش و بازده کششی، عمق و سرعت کمتر و تراکتور جاندیر بهینه‌اند. در مورد قدرت مال‌بندی، عمق و سرعت بیشتر و تراکتور جاندیر بهینه‌اند. در مورد بازده کل انرژی نیز، عمق کمتر و سرعت بیشتر و تراکتور فرگوسن بهینه‌اند. در حالت کلی و با فرض نیروی کششی

۸۹ درصد شده است. همچنین با افزایش ۱۰ سانتی‌متر به عمق زیرشکنی، بازده کل انرژی ۱۹ درصد کاهش داشته است. در عمق ۴۰ سانتی‌متر، فرگوسن به‌دلیل مصرف سوخت کمتر، بازده کل انرژی بالاتری نسبت به جاندیر دارد؛ اما در عمق ۵۰ سانتی‌متر، جاندیر به‌دلیل ایجاد کشش بیشتر و با وجود مصرف سوخت بیشتر، بازده کل انرژی بیشتری نسبت به فرگوسن دارد. با تبدیل کردن هرچه بیشتر سوخت مصرفی به کار مفید (قدرت مال‌بندی)، بازده کل انرژی بالاتر خواهد رفت و چون تراکتور جاندیر قوی‌تر از فرگوسن در کشش و قدرت مال‌بندی است، بهتر است تا آنجا که لغزش آن زیاد نگردد، این تراکتور را در سرعت‌های بالاتر و عمق زیرشکنی بیشتر به کار گیریم؛ در واقع، کار بیشتری از آن بکشیم تا بازده کل انرژی آن، معقول باشد. می‌بینیم که در هر دو تراکتور، با افزایش سرعت پیشروی و ورود سرعت به محدوده ۳ کیلومتر بر ساعت، بازده کل انرژی به بازه ۲۰-۱۰ درصد وارد و نرمال می‌شود؛ همچنین، در سرعت‌های پایین میزان بازده کل انرژی پایین‌تر از ۱۰ درصد است که نشان می‌دهد تطابق صحیح بین زیرشکن، تراکتور و شرایط مزرعه‌ای خصوصاً سرعت وجود ندارد. کراول و بورز (Crowell & Bowers 1985) گزارش کرده‌اند که بازده کل انرژی بالاتر نشان‌دهنده تطابق بهتر تراکتور و ادوات و شرایط مزرعه‌ای است که به افزایش بازده کششی می‌انجامد؛ اما در این تحقیق، با افزایش سرعت پیشروی، بازده کل انرژی بیشتر و بازده کششی کمتر به دست آمده است. نبود وزنه‌های سنگین‌کننده روی چرخ‌های محرک هر دو تراکتور و کهنه و بدون آج بودن لاستیک‌ها در آن‌ها، لغزش و مصرف سوخت تراکتورها را در سرعت‌های بالاتر افزایش داده که به کاهش بازده کششی انجامیده است. بنابراین، در هر دو تراکتور، استفاده از سرعت‌های پیشروی بالاتر، عمق خاک‌ورزی کمتر، لاستیک‌های آج‌دار و وزنه‌های سنگین‌کننده موجب افزایش قدرت مال‌بندی، بازده کششی و بازده کل انرژی می‌شود و لغزش و مصرف سوخت را کاهش خواهد داد. رابطه بین افزایش سرعت پیشروی و افزایش بازده کل انرژی در هر دو عمق خاک‌ورزی و در هر دو تراکتور خطی است ($R^2 > 0.99$). (Ranjbarian et al. 2017) نیز به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت پیشروی، بازده کل انرژی در مجموعه تراکتور- ادوات به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.

مناسب تراکتور، ادوات و شرایط حاکم بر عملیات زیرشکنی به دست آید.

۴- بهینه‌ترین تیمار تحت بررسی در این تحقیق، استفاده از تراکتور جان‌دیر ۳۱۴۰ در عمق خاک‌ورزی ۴۲/۹ سانتی‌متر و سرعت پیشروی ۲/۴ کیلومتر بر ساعت است.

۵- روش سطح پاسخ (RSM) برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی مؤلفه‌های مرتبط با عملکرد تراکتور و عامل خاک‌ورز بسیار مفید است.

منابع

1. Abbaspour-Gilandeh, Y. and Khanramaki, M. 2013. Design, construction and calibration of a triaxial dynamometer for measuring forces and moments applied on tillage implements in field conditions. *Journal of meterology Society of India*, 28(2), 119-127.
2. Albana, A. R. and Hassan, N. S. 1990. Planting equipment for soil harrowing with disc harrow. *Iragi Journal of Agricultural Science*, 22(2): 260-267.
3. Aljasimy, A. S. A. 1993. The technical and economical indicators for soil harrowing with disc harrow. *Iragi Journal of Agricultural Science*, 24(2): 260-264.
4. Al-Suhaibani, S. A. 1992. Use efficiency of farm machinery in Saudi Arabia. ASAE Paper No. 92-1044, ASAE, St. Joseph, Michigan, USA. Available at <http://asae.frymulti.com/abstract.asp?aid=22082&t=2>.
5. Al-Suhaibani, S. A. and Al-Janobi, A. 1997. Draught requirements of tillage implements operating on sandy loam soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66(3): 177-182.
6. Al-Suhaibani, S. A. Al-Janobi, A. A. and Al-Majhadi, Y. N. 2006. Tractors and tillage implements performance. The 26 th CSBE/SCGAB Annual Conference, Edmonton, Canada.
7. ASABE Standards, 2011. ASAE D497.7, Agricultural machinery management data. Available at www.asabe.org. 612 p.
8. Ashrafi Zadeh, S. R. 2006. Modelling of energy requirements by a narrow tillage tool. M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan. USA. 209 p.
9. Bakhtiary, M. R. 1996. Investigating and selection of best combination of tractor and common conventional moldboard plow. Ms.C. Thesis, University of Shiraz. Shiraz, Iran. 144 p.
10. Betiku, E. and Adesina, O. A. 2013. Optimization of sweet potato starch

موردنیاز یکسان در دو تراکتور تحت بررسی، تراکتور جان‌دیر با دارابودن ۳ مؤلفه بهینه از ۵ مؤلفه باقیمانده، عملکرد بهتری را دارد. همچنین، داده‌های این جدول نشان می‌دهد که به‌طور میانگین، عمق ۴۲/۹ سانتی‌متر و سرعت ۲/۴ کیلومتر بر ساعت، بهینه‌ترین نتایج را در خصوص عملکرد مجموعه تراکتور- زیرشکن حاصل می‌نمایند. از طرف دیگر و با صرف‌نظر از نتایج بهینه‌سازی، در حالت کلی درمی‌یابیم که برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی، سرعت پیشروی ۳/۵ کیلومتر بر ساعت چندان مناسب نیست؛ چون مقاومت کششی، مصرف سوخت و لغزش را افزایش و بازده کششی را به شدت کاهش می‌دهد. سرعت‌های پایین (۱/۸ کیلومتر بر ساعت) نیز مناسب نیستند؛ چون بازده کل انرژی در این سرعت‌ها در هر دو عمق خاک‌ورزی و هر دو تراکتور کمتر از ۱۰ درصد است. همچنین، عمق خاک‌ورزی ۵۰ سانتی‌متر مناسب نیست؛ چون مقاومت کششی، مصرف سوخت و لغزش را افزایش و بازده کل انرژی را کاهش می‌دهد. نتایج بهینه‌سازی و استنباطی، تطابق بالایی با یکدیگر دارند.

نتیجه‌گیری

تجزیه واریانس داده‌های این تحقیق، نتایج زیر را به دست می‌دهد:

۱- اثر نوع تراکتور، سرعت پیشروی و عمق، همچنین آثار متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر تمامی مؤلفه‌های تحت بررسی به استثنای نیروی کششی و قدرت مال‌بندی داشت. اثر نوع تراکتور و آثار متقابل این عامل با عوامل دیگر (سرعت و عمق) بر نیروی کششی و قدرت مال‌بندی بی‌معنی است. افزایش سرعت پیشروی در هر دو تراکتور منجر به افزایش کشش، مصرف سوخت، لغزش، قدرت مال‌بندی و بازده کل انرژی می‌شود؛ اما بازده کششی را کاهش می‌دهد.

۲- افزایش عمق زیرشکنی در هر دو تراکتور منجر به افزایش در نیروی کششی، مصرف سوخت، لغزش و قدرت مال‌بندی و کاهش در بازده کششی و بازده کل انرژی می‌شود.

۳- نتایج بررسی مؤلفه‌های اندازه‌گیری‌شده در این تحقیق نشان می‌دهد که تراکتور جان‌دیر ۳۱۴۰ عملکرد بهتری نسبت به مسی فرگوسن ۳۹۹ داشته و صرفه‌جویی در مصرف انرژی در هنگام زیرشکنی می‌تواند با ترکیب

- performance evaluation of the double tines subsoiler in silty clay soil part1: draft force, disturbed area and specific resistance, Mesopotamia Journal of Agriculture, 42(1): 293-313.
23. Ranjbarian, S. Askari, M. and Jannatkah, J. 2017. Performance of tractor and tillage implements in clay soil. Journal of Saudi Society of Agricultural Science, 16(2): 154-162.
24. Raper, R. L. 2002. The influence of implement type, tillage depth and tillage timing on residue burial. Transaction of ASAE, 45(5): 1281-1286.
25. Sahu, R. K. and Raheman, H. 2006. Draught prediction of agricultural implements using reference tillage tools in sandy clay loam soil. Biosystems Engineering, 94(2): 275-284.
26. Salar, M. R. and Karparverfard, 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): 468-479 (In Farsi).
27. Samiei Far, A. Kazemi, N. Rahnama, M. and 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). Inter. Journal of Farm and Allied Science, 43(1): 215-221.
28. Serrano Joao, M. Peça, J. O. and Santos, F. 2005. Draft and fuel requirement's in tillage operations: modeling for optimizing tractor-implement systems. The EFITA/WCCA joint Congress in Agriculture, VILA Real, Portugal.
29. Shahi, N. Shahgholi, G. and Biranvand, M. 2010. Modelling of soil-blade interaction and effect of speed and depth on subsoiler performance using discrete element method (DEM). The 6th National Congress of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. University of Tehran, Karaj, Iran. (In Farsi).
30. Sheikh, G. S. 1989. Agricultural mechanization research development and planning. Journal of Agricultural Science, 21(1): 3-4.
31. Soltani, A. 2004. Investigating the traction efficiency of two heavy duty tractors as axial load and draft force. Ms.C. Thesis, University of Shiraz, Shiraz, Iran.
32. Spoor, G. and Godwin, R. J. 1978. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. Journal of Agricultural Engineering Research, 2(3): 243-259.
- hydrolyzate production and its potential utilization as substrate for citric acid production. British Biotechnology Journal, 3(3): 169-182.
11. Crowell, G. and Bowers, J. R. 1985. Southeastern tillage energy data and recommended reporting. Transactions of ASAE, 28(3): 731-737.
12. De Souza, E. G. Lima, J. S. S. and Milanez, L. F. 1994. Overall efficiency of tractor operating in the field. Transaction of ASAE, 10(6): 771-775.
13. Ismail, W. I. W. and Burkhardt, T. H. 1993. Draft and fuel requirements measurement using tractor on-board data acquisition system. Pertanika Journal of Science and Technology, 11(1): 51-64.
14. Khosravani, A. Loghvi, M. and Solhjoo, A. 1998. Evaluation and comparison of traction performance of middle power tractors in Iran. The 1st National Congress of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization, Karaj, Iran. (In Farsi).
15. Mehranzade, M. Ghasemi Nejad, M. and Asadi, S. H. 2016. Compare and investigating the fuel consumption of MF285 and 399 tractors. The 3rd International conference on Science and Engineering, Istanbul, Turkey. (In Farsi).
16. Mirzazadeh, R. 2011. Investigating the traction performance of two tractors as ITM800 and Sepahan804 in tillage with moldboard plow. Ms.C. Thesis, Technical University of Isfahan, Isfahan, Iran.
17. Moeenifar, A. M. Kalantari, D. and Mousavi Seyedi, S. R. 2013. Application of dimensional analysis in determination of traction force acting on a narrow blade. International Journal of Agriculture and Crop Science, 59(2): 1034-1039.
18. Mosavi Seyyedi, S. R. 2009. Evaluation the operational parameters of U650 tractor under different speeds and depths. The National Conference on water, soil, plant and Mechanization sciences, Islamic Azad University of Dezful, Dezful, Iran (In Farsi).
19. Owen, G. T. 1989. Subsoiling forces and tool speed in compact soils. Canadian Agricultural Engineering, 31(1): 15-20.
20. Raheman, H. Jha, S. K. 2007. Wheels slip measurement in 2WD tractor. Journal of Terramechanics, 44(2): 89-94.
21. Ramadhan, M. N. 2011. Field study to evaluate the mechanical performance of the double tines longitudinally arranged subsoiler and its effect on some growth characteristics of barley hordeum vulgare L. M.Sc. Thesis, Basrah University. Basrah, Iraq, 193 p.
22. Ramadhan, M. N. 2014. Development and

