

Evaluation of the Effects of Soil Moisture and Vibration Frequency on the Performance Indices of an Electric Vibratory Subsoiler

E. Seydi¹, N. Kazemi^{1*}, B. Goudarzi², R. Meamar Dastjerdi¹

1- Department of Agricultural Machinery and Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

2- Agricultural Mechanization and Industries Development Center, Ministry of Agricultural Jihad, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: Navab.Kazemi@Aasnrkh.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.98183.1482>

Introduction

Soil compaction causes a decrease in water and air penetration into the soil, impairs root development, and consequently leads to a substantial decline in crop yield. The most rapid countermeasure is subsoiling. Subsoiler devices and the subsoiling operation are recognised among the most energy-consuming and heaviest soil tillage operations. Tillage tool vibration effectively reduces traction force, resulting in increased soil fracturing and mixing, which decreases soil adhesion. The objective of this research is to determine the optimal vibration frequency for an electrical oscillating subsoiler. This will lead to a modification of the conventional subsoiling process and the application of these research findings in routine agricultural subsoiling operations, particularly in the lands managed by the Khuzestan Sugarcane Development Company. Improving this operation can significantly reduce soil losses, energy consumption, and associated costs, given the vast annual volume and area involved.

Material and Methods

This research is a developmental and applied type. It contains the installation of an electric oscillation system, followed by the execution of treatments utilising the independent variables of the study, which consist of the vibration frequency of the subsoiler blade at five levels (0, 20, 30, 40, and 50 Hz) and soil moisture content at two levels, dry (5.5–5.8%) and moist (15–19%). The vibration generation system installed on the subsoiler consisted of two electrical circuits: one for supplying electrical energy from the tractor's battery, and another for adjusting the vibration acceleration. This alteration was achieved by modifying the rotational speed of the vibrator motor, which, in turn, changed the frequency. The highest frequency of 50 Hz and the absence of vibrations could be achieved using the F300-2R2G-2 model of a programmable inverter drive, which supports both manual and automatic control. The five frequency levels, ranging from 0 to 50 Hz, were generated by the driver from within the tractor cabin, in accordance with the experimental design. The required electrical energy was also continuously supplied without fluctuations or interruption. The experiments were conducted in a pre-divided and prepared field, with three replications, utilising the experimental design of split-plots in the form of completely randomised blocks. Data obtained from the tests, including traction force, working width, working depth, and the cross-sectional area of the tilled soil, were compiled and statistically analysed using Excel and SAS software.

Results and Discussion

The results indicated that at high moisture levels, the working depth increased, while the working width and the effectiveness of the vibratory subsoiler decreased. Vibration levels at the 0.01 significance level had a significant impact on performance indicators, including working width, working depth, the cross-sectional area of tilled soil, and specific traction force. Under conditions of minimum moisture and maximum vibration, the highest effectiveness was achieved, meaning that the width, working depth, and disturbed soil area increased, while the specific traction force decreased. The maximum traction force occurred at the lowest frequency and under dry soil conditions. Therefore, in subsoiling operations, selecting a time when the soil is within the suitable moisture range and utilising higher frequencies of vibration leads to a larger area of disturbed and fractured soil. Additionally, a reduction in the required specific traction force further enhances the efficiency of the vibratory subsoiler.

Conclusion

The electric vibration system offers an innovative solution for vibration management and control by the operator. It offers a wider range for achieving optimal vibration in soils of varying textures, thereby maximising the efficiency of the tractor-tiller system. The application of variable-rate vibration enables electrification and is independent of the PTO.

Keywords: Electrification, Optimum frequency, Soil compaction, Specific traction force

ارزیابی اثر رطوبت خاک و بسامد ارتعاش بر شاخص‌های عملکردی زیرشکن ارتعاشی الکتریکی

ابراهیم صیدی^۱، نواب کاظمی^{۱*}، بهروز گودرزی^۲، رسول معمار دستجردی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۸

چکیده

عملیات زیرشکنی جزو سنگین‌ترین عملیات خاک‌ورزی با مصرف انرژی زیاد است. ارتعاش ابزار خاک‌ورز، روشی موثر برای کاهش نیروی کششی است. هدف از این پژوهش مشخص نمودن بسامد بهینه در زیرشکن ارتعاش الکتریکی است، به نحوی که در مراحل بعدی باعث تغییر در روند مرسوم زیرشکنی و به‌کارگیری نتایج این پژوهش در عملیات مرسوم زیرشکنی مزارع کشاورزی، به‌ویژه در اراضی شرکت توسعه نیشکر خوزستان شود. این پژوهش شامل نصب یک سامانه ارتعاش الکتریکی و سپس اجرای تیمارهایی با متغیرهای مستقل پژوهش شامل میزان بسامد برق ورودی الکتروموتور- ویریه که عامل لرزش تیغه زیرشکن می‌باشد، در ۵ سطح (۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰ و ۰ هرتز) و محدوده رطوبتی خاک در دو سطح خشک (۵/۵ تا ۸/۵ درصد) و مرطوب (۱۵ تا ۱۹ درصد) بود. نتایج نشان داد عامل رطوبت بر عمق کار زیرشکن اثر مثبت و بر عرض کار زیرشکن و سطح مقطع از هم گسیخته خاک اثر منفی دارد. میزان ارتعاش روی شاخص‌های عملکردی شامل عرض کار، عمق کار، سطح مقطع خاک به‌هم‌خورده و نیروی کششی ویژه در سطح ۰/۰۱ اثر معنی‌داری داشت. در شرایط رطوبت ۷٪ و با ارتعاش ۵۰ هرتز، بیشترین اثربخشی حاصل گردید یعنی عرض، عمق کار و سطح خاک به‌هم‌خورده افزایشی و نیروی کششی ویژه کاهش‌ی بود. بیشترین نیروی کششی در کمترین بسامد و شرایط خاک خشک رخ داد. عملکرد سامانه ایجاد ارتعاش برقی، یک نوآوری برای مدیریت و کنترل ارتعاش توسط راننده با محدوده‌ای گسترده‌تر برای دسترسی به ارتعاش بهینه در خاک‌هایی با بافت متفاوت برای رسیدن به حداکثر کارایی تراکتور- خاک‌ورز شده و اعمال ارتعاش نرخ متغیر در راستای الکتریفیکاسیون و مستقل از پی‌تی‌او را میسر می‌کند.

واژه‌های کلیدی: الکتریفیکاسیون، بسامد بهینه، فشردگی خاک، نیروی کشش ویژه

مقدمه

امروزه فشردگی بیش از اندازه خاک یک معضل جهانی است که کشاورزی و محیط‌زیست را تحت تاثیر قرار داده است. (Sivarajan, 2018) Maharlooeei, Bajwa, & Nowatzki, 2018) فشردگی خاک ممکن است به دلایل متفاوت، مانند رسوبات خاک‌های آبرفتی و فشردگی طبیعی، خاک‌های دارای ساختمان ضعیف با توده‌های منفرد و متراکم، تردد ماشین‌های سنگین در رطوبت نامناسب و شخم پی‌درپی و عمق یکسان، به‌وجود آید. این عامل موجب عدم نفوذ آب و هوا در خاک و توسعه نامناسب ریشه می‌گردد. کلیه‌ی عملیات زراعی در فشردگی سطحی و عمقی خاک موثرند. در اثر عبور چرخ‌های تراکتور در ضمن اجرای عملیات زراعی، جرم مخصوص ظاهری و

مقاومت خاک افزایش می‌یابد (Ghasemi Abdoalmalaki, 2015). بنابراین قابلیت دسترسی عناصر غذایی و آب را برای گیاه کاهش می‌دهد (Bengough, McKenzie, Hallett & Valentine, 2011). ماشین‌های کشاورزی علی‌رغم مزیت‌های فراوانی که دارند، یکی از عوامل ایجاد فشردگی هستند اما مکانیزاسیون کشاورزی می‌تواند بخشی از راهکار برای کاهش و یا رفع آن نیز باشد (Tahmasebi, 2023). Gohari, Sharifi Malvajerdi & Hedayatipor, 2023). سریع‌ترین روش مقابله با فشردگی خاک، زیرشکنی است (Goudarzi, Kazemi & Asoodar, 2021). زیرشکنی، روشی است که معمولاً به‌منظور بهبود اثرات نامناسب تراکم خاک و شرایط فیزیکی خاک استفاده می‌شود. از اثرات زیرشکنی می‌توان به افزایش

۲- مرکز توسعه مکانیزاسیون و صنایع کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی، تهران، ایران

(* نویسنده مسئول: Email: Navab.Kazemi@Aasnrkh.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.98183.1482>

۱- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، خوزستان، ایران

به بافت سنگین خاک، عمق کار زیاد، رطوبت به شدت غیر قابل کنترل در عمق شرایط ورود به عمق بحرانی در عمق زیر ۵۰ سانتی متر قطعی است و موجب می شود قطعاتی متوازی الاضلاع به طول هر ضلع تقریبی یک متر با زوایای ۱۲۰ و ۶۰ درجه در عمق زیر ۶۵ و ۸۵ سانتی متر بدون زیرشکن زنی باقی بماند. نتیجه نهایی اثرات اعمال الگوی مرسوم مساحت کل سطح خاک دست نخورده از نظر زیرشکنی هر مزرعه در عمق ۸۵ سانتی متری با یک پاس عمیق در حدود ۷۷ درصد در عمق ۶۵ سانتی متری با دو پاس عمیق و نیمه عمیق، در حدود ۴۷ درصد است (Kazemi & Jafari, 2024). امروزه نیز با وجود روش های حفاظتی، هنوز هم خاک ورزی لایه های زیرین و شکستن سخت لایه خاک، یکی از پرهزینه ترین عملیات کشاورزی است و عمده ترین مصرف کننده انرژی مکانیکی در تولید محصولات زراعی می باشد، بنابراین محاسبه و بهینه سازی نیازهای توانی این ماشین ها بسیار حائز اهمیت است (Ahmadi, 2017; Andekaeizadeh, Sheikhdavoodi, & Khorasani, 2017). نیروی کششی با افزایش عمق و سرعت کار زیرشکن افزایش می یابد (Croitoru, Vladut, Marin, Matache, & Dumitru, 2016)، در نتیجه باعث مصرف زیاد انرژی و زمان می گردد. بنابراین با کاهش نیروی کشش می توان هزینه های زیاد اولیه را کاهش داد (Van der linde, 2007) و با استفاده از برنامه عملیات زراعی مدیریت شده به میزان قابل توجهی در مصرف سوخت، انرژی و زمان صرفه جویی نمود (Salahlloo, Mohammadi Alasti, Mardani, & Abbasgholipour, 2021). به همین دلیل دقت در نوع استفاده از ادوات خاک ورزی و مراتب ورود به مزرعه دارای اهمیت بالایی است. برخی از محققان به این نتیجه رسیده اند که ارتعاش ابزار خاک ورز، روشی موثر برای کاهش نیروی کشش است. همچنین ارتعاش باعث گسیختگی و اختلاط بیشتر خاک می گردد. تئوری این که چرا ارتعاش مقدار نیروی کششی را کاهش می دهد، جنبه مهم دیگری دارد و آن این که برای خاک های خشک، ارتعاش ابزار، باعث شکستگی خاک شده و از این رو مقدار چسبندگی را کاهش می دهد. برای خاک های مرطوب تنش اضافی از طریق خاک انتقال داده می شود و باعث قطع فشار هیدروستاتیکی منافذ شده که در این صورت باعث کاهش تنش موثر و مقاومت خاک می شود (Kanyawi & Shahgholi, 2018). از دیرباز از ارتعاش در ماشین های کشاورزی ثابت و سیار مانند دستگاه های بوجاری، تکاننده های باغی، تغذیه کننده ها و انتقال دهنده های مواد، صفحات مرتعش در خشک کن ها و حتی در ماشین های برداشت چغندر و سیب زمینی استفاده شده است. ارتعاش به صورت خودالقایی و القایی در خاک ورزی هم به کار گرفته می شود (Soeharsono & Setiawan, 2010). از انتظارات اولیه در به کارگیری ارتعاش در ادوات خاک ورزی کاهش نیروی کششی مورد نیاز این ادوات است (Hemmat, Sadegnejad

حجم کل منافذ خاک، بهبود نفوذ و انتقال آب، افزایش رشد ریشه و افزایش جذب آب و عناصر غذایی اشاره کرد (Ariz & Safir, 2021). تراکم خاک یک معضل اساسی و مخصوصا در مزارع کشت و صنعت نیشکر خوزستان با مساحتی بیش از ۱۰۰ هزار هکتار با قطعات ۲۵ هکتاری است که دشواری های زیادی همچون نبود تهویه کافی و محدودیت در دسترسی بودن آب و مواد غذایی و کاهش عملکرد محصول را به دنبال دارد (Hamzeh Dost Mirabzadeh, Zarei, & Haji Sharfi, 2016; Mahohi & Khatinzade, 2021). زیرشکنی از مهم ترین عملیات کشاورزی برای مقابله با فشردگی خاک می باشد که با انواع زیرشکن های سبک (دکمپکتور) تا ریه های پشت بلدوزر انجام می گیرد. در این کشت و صنعت به طور سالانه سطح عملیات راتونینگ نزدیک به ۷۵ هزار هکتار زیرشکنی راتونینگ، ۷۵ هزار هکتار دیسک زنی و ۳۲ هزار هکتار عملیات زیرشکنی انجام می گردد (Kazemi & Jafari, 2024). بدیهی است که فشردگی خاک پدیده ای پیچیده و مداوم است که بر پایداری تولید محصولات کشاورزی، در کشاورزی مدرن تاثیر می گذارد (Yang, Dong, Heinen, Qin, & Oenema, 2022). آریز و صفیرزاده (Ariz & Safir Zadeh, 2021) در مطالعه خود سه نوع زیرشکن شامل آهنگری خراسان؛ آلیاگو با ژئومتری مناسب خاک های کشاورزی و ریه بلدوزری، در مزارع نیشکر بررسی و مقایسه نموده که زیرشکنی با ریه کمترین به هم زدگی و گسیختگی در سطح و عمق خاک را داشته و دارای پایین ترین بازده کاری نسبت به دو نوع دیگر بود، همچنین نتیجه گرفتند که ریه با کمترین شاخص سطح مقطع خاک به هم خورده از عمق بحرانی نیز عبور کرده است. در تحقیقات مشابه دیگر زیرشکنی با بلدوزر نسبت به انواعی دیگر از زیرشکن های کشاورزی، سطح خاک به هم خورده ریه از یکنواختی کمتری برخوردار است و تاثیر آن بر شاخص نفوذسنج مخروطی و سطح مقطع خاک به هم خورده نیز ضعیف تر است (Raoufat & Kazemi najfabadi, 2007). به دلیل سنگین بودن بافت اراضی نیشکر و اختلاف رطوبتی زیاد بین لایه های عمیق و سطحی، عمق بحرانی تیغه های خاک ورز بالاتر آمده و احتمال قرارگیری تیغه ها در زیر عمق بحرانی زیرشکن زیاد است (Abbaspour-Gilandeh, Ahani, Askari, Rasooli, & Sofalian, 2010). زیرشکن دارای بیشترین مقاومت کششی در خاک ورزی است و علاوه بر صرف انرژی بالا به علت عمق زیاد کار، مشکلات دیگری مانند مقاومت خاک فشرده شده، لغزش چرخ های محرک تراکتور و کاهش در بازده کشش را نیز به دنبال دارد (Goudarzi et al., 2021). در مزارع نیشکر استان خوزستان به طور مرسوم و مطابق دستورالعمل شرکت کشت و صنعت نیشکر دو پاس زیرشکن با ریه پشت بلدوزر اعمال می گردد که پاس اول با عمق ۶۰ تا ۷۰ سانتی متر و پاس دوم با عمق ۸۰ تا ۹۰ سانتی متری به ترتیب در امتداد زوایای ۱۵ تا ۴۵ درجه نسبت به خطوط کشت است. حال نظر

رفت و برگشتی (نوسانی) با گرفتن توان از پی‌تی‌او بوده است که امکان تغییر پیوسته و دقیق بسامد در محدوده‌ای گسترده را به سادگی فراهم نمی‌کرده و دامنه تحقیق را محدود ساخته است. این محدودیت فنی در روش ایجاد ارتعاش، شکاف دانشی مهمی در درک کامل پاسخ خاک به تغییرات بسامد، به‌ویژه در تعامل با متغیر حیاتی دیگری مانند رطوبت خاک، ایجاد کرده است. این پژوهش با به‌کارگیری یک شیوه نوین برای ایجاد ارتعاش کنترل‌پذیر، درصدد پرکردن این شکاف برآمده است به‌طوری‌که ایجاد ارتعاش با نوع جرم نابرابر و با استفاده از یک موتور ویبره الکتریکی و کاملاً مستقل از پی‌تی‌او با قابلیت نرخ متغیر بر روی یک زیرشکن تک ساق با عمق حداکثر یک متر انجام شد. مزیت اصلی این سامانه نوین، قابلیت تنظیم دقیق و پیوسته بسامد ارتعاش از ۱ تا ۵۰ هرتز به سهولت کامل است. این قابلیت برای اولین بار امکان تعریف و آزمون سطوح مختلف بسامد در ترکیب با سطوح رطوبت خاک را در یک مطالعه کنترل‌شده فراهم نموده تا اثرات این دو فاکتور بر شاخص‌های عملکرد زیرشکن به‌طور همزمان و دقیق مورد سنجش قرار گیرد. لذا نکته اصلی غالب آمدن بر چالش کنترل بسامد از طریق پیاده‌سازی یک سامانه ارتعاش برقی کنترل‌پذیر و ارزیابی تأثیر سطوح مختلف بسامد ارتعاش در شرایط رطوبتی خاک خشک و خاک مرطوب بر برخی شاخص‌های عملکردی زیرشکن برای شناخت اثربخشی ارتعاش است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش از نوع تحقیقات توسعه‌ای و کاربردی بوده و با نصب سامانه ایجاد ارتعاش برقی و قابل کنترل بر روی زیرشکن تک ساق (شکل ۱) شاخص‌های عملکردی زیرشکن مورد ارزیابی قرار گرفت. متغیرهای مستقل پژوهش شامل میزان بسامد ارتعاش تیغه زیرشکن در ۵ سطح (۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰ و ۰ هرتز) و محدوده رطوبتی خاک در دو سطح خشک (۵/۵ تا ۸/۵ درصد) و مرطوب (۱۵ تا ۱۹ درصد) بود و تأثیر آن‌ها بر متغیرهای وابسته شامل عرض کار، عمق کار، سطح مقطع خاک به‌هم‌خورده و نیروی کششی ویژه، مورد بررسی قرار گرفت. کلیه مراحل نصب و تجهیز و اجرای آزمایشات عملی توسعه‌ای این تحقیق در کارگاه و مزارع تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان در اواخر زمستان ۱۴۰۳ انجام گرفت. برآورد درصد رطوبت خاک به روش وزنی در آزمایشگاه خاک دانشکده با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$\theta_m = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

که در آن: θ_m = رطوبت وزنی خاک (درصد یا کسر وزنی)، W_w = وزن خاک مرطوب (تر) و W_d = وزن خاک خشک

(Alimardani, 2000). کاهش نیروی برشی مواد از طریق تیغه‌های ارتعاشی، یک روش رایج در بسیاری از صنایع و در برش خاک است. در عملیات مکانیکی (شخم‌زنی، زیرشکنی، برداشت سیب‌زمینی و غیره)، ارتعاش با استفاده از ابزارهای دارای حرکت ارتعاشی قابل استفاده و کاربردی شده است (Friso, 2025). زیرا به هنگام ارتعاش تماس کمتر عوامل خاک‌ورز با خاک اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر ارتعاش موجب کاهش مقاومت خاک از طریق کاهش چسبندگی و تنش‌های موثر در خاک‌های خشک تا مرطوب می‌گردد. در نتیجه برای ماشین‌های کشاورزی با مقاومت کششی بالا، مانند زیرشکن‌ها، استفاده از ارتعاش در کاهش مقاومت کششی یک راهکار مطلوب به نظر می‌رسد (Hemmat et al., 2000). مفهوم خاک‌ورزی ارتعاشی که منجر به کاهش نیروی کششی می‌شود از سال ۱۹۵۵ معرفی شد. ابزارها باید در یک حالت خاص از نوسان با دامنه و بسامد مشخص همراه با حرکت رو به جلوی ابزار، نوسان کنند (Gowripathi Rao, Chaudhary, & Sharma, 2019). پژوهشی که توسط لی و همکاران (Li, Fu, Zhang, Cui, & Zhang, 2012) در مورد بررسی تأثیر پارامترهای ارتعاش بر مقاومت کششی تراکتور در عملیات زیرشکنی انجام شد، نتایج نشان داد که افزایش بسامد ارتعاش در سرعت ثابت، موجب کاهش نیروی مقاومت کششی و کاهش لغزش چرخ شده و در نهایت توان مورد نیاز را کاهش می‌دهد. همچنین کاهش نیروی کشش استفاده از ادوات بزرگ‌تر را برای پوشش سطح بیشتر و تراکتورهای کوچک‌تر را برای خاک‌ورزی عمیق، در مزارع کوچک مانند تاکستان و باغستان، امکان‌پذیر می‌سازد (Van der linde, 2007). در پژوهشی عثمان و ژانگ (Osman & Zhang, 2013) در رابطه با زیرشکن ارتعاشی و غیرارتعاشی و تأثیر آن‌ها بر مقاومت کششی و خواص خاک، به مقایسه عملکرد دو نوع زیرشکن (ارتعاشی و ثابت) در شرایط میدانی پرداختند؛ نتایج نشان داد که زیرشکن ارتعاشی مقاومت کششی را تا حدود ۳۳ درصد کاهش می‌دهد و عمق کارکرد را بدون افزایش قابل توجه جرم مخصوص خاک به ۳۵ سانتی‌متر می‌رساند. زیرشکن ارتعاشی با ایجاد ارتعاش، خاک متراکم را بهتر شکافته و مقاومت کششی را نسبت به خاک‌ورزهای غیرارتعاشی به‌طور معنی‌داری پایین می‌آورد. این ارتعاش خواص فیزیکی خاک مانند نفوذپذیری و تهویه را بهبود می‌بخشد، در حالی که نوع ثابت باعث فشردگی بیشتر خاک می‌شود. آزمایش‌ها تأیید کرد که ارتعاش تیغه، شکست خاک را تسهیل کرده و مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. اگرچه مزایای کلی استفاده از ارتعاش به‌عنوان یک راهکار در کاهش نیروی کششی ادوات خاک‌ورزی شناخته شده است، اما مطالعه سیستماتیک اثر پارامتر کلیدی بسامد ارتعاش در گستره وسیع و کنترل‌شده، با چالش‌های فنی مواجه بوده است و پاسخ عملکرد زیرشکن به تغییرات بسامد ارتعاش به‌وضوح تعیین نشده است. در بیشتر تحقیقات گذشته، ایجاد ارتعاش عمدتاً مبتنی بر مکانیزم‌های

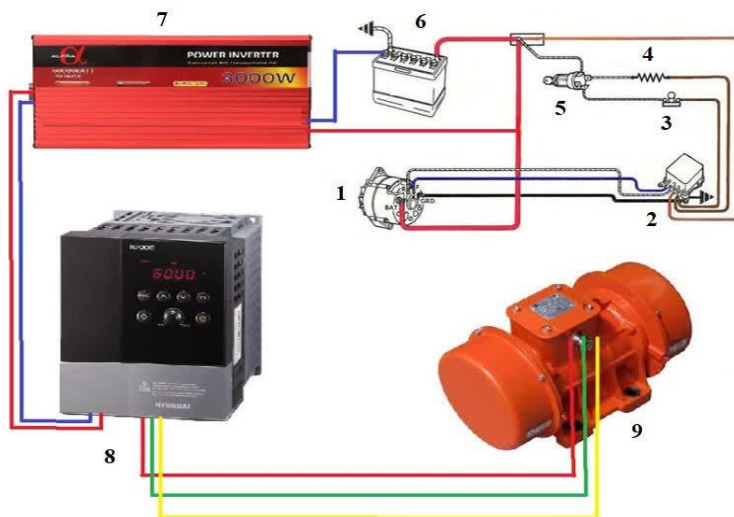


Fig. 1. Tractor equipped with the electric vibrating subsoiler

الکتروموتور را تامین می‌کرد. باتری تراکتور با دو عدد کابل کوتاه با سطح مقطع ۳۵ میلی‌متر (35 mm^2) با بست‌های قوی به اینورتر و از آن‌جا با یک کابل $22/5 \text{ mm}^2$ به ورودی درایو متصل گردید برای رسیدن به دور مورد نظر سامانه لرزشی از قابلیت‌های درایو به‌کاررفته در مدار و برق سه فاز تولیدشده توسط آن استفاده گردید خروجی درایو به‌وسیله یک کابل $31/5 \text{ mm}^2$ به الکتروموتور- و بیره کار گذاشته‌شده بر روی عامل خاک‌ورز زیرشکن انتقال یافت و با تنظیم برنامه‌های درایو ارتعاش‌های زیرشکن با بسامد مختلف ایجاد شد (شکل ۲).

سامانه ایجاد ارتعاش

در این سامانه نوآورانه از اجزایی شامل آلترناتور و باتری ۱۵۰ آمپر ساعت تراکتور، کلید اتوماتیک، اینورتر ac به dc سینوسی خالص ۳۰۰۰ وات، درایو (مبدل) تک به سه فاز مدل F300-2R2G-2 و الکتروموتور ویریه کوپل مدل PT-MVE1200/3 با توان ۹۵۰ وات و قدرت ضربه حداکثر ۱۰۰۰ کیلوگرم استفاده گردید. باتری به‌طور دائم توسط آلترناتور با شدت جریان خروجی تا حداکثر ۱۲۰ آمپر از طریق مدار مربوطه شارژ می‌گردید و شدت جریان (آمپر) مورد نیاز



شکل ۲- مدار تامین توان الکتریکی زیرسکن ارتعاش الکتریکی: ۱- آلترناتور، ۲- رگولاتور، ۳- لامپ تست، ۴- مقاومت سیم، ۵- سویچ، ۶- باتری، ۷- اینورتر ۱۲ ولت مستقیم به ۲۲۰ ولت متناوب، ۸- اینورتر ۲۲۰ ولت تک فاز به ۲۲۰ ولت سه فاز، ۹- الکتروموتور و بیره

Fig.2. Electrical power supply circuit for the vibrating subsoiler: 1- Alternator, 2- Regulator, 3- Test lamp, 4- Wire resistor, 5- Switch, 6- Battery, 7- Inverter 12V DC to 220 V AC, 8- Inverter 220V single phase to 220 V three phase, 9- Vibrating electric motor

امکان تغییر و کنترل ارتعاش

به کارگیری تکنیک لرزاندن یا ارتعاش قطعات عامل در ماشین‌های خاک‌ورزی همواره یک راهکار جهت کاهش نیروی کششی بوده که از طریق طراحی انعطاف‌پذیری یا نصب فنرها و یا با استفاده از توان پی‌تی‌او و به‌طور خاص در زیرشکن‌های تک‌ساق عمدتاً مبتنی بر مکانیزم‌های رفت و برگشتی انجام‌شده اما در این تحقیق با نصب سامانه ایجاد ارتعاش برقی روی ساق معلق زیرشکن اقدام شد. ارتعاش به شیوه جرم نابرابر بوده و سرعت دورانی آن توسط یک الکتروموتور ۹۵۰ واتی با حداکثر دور ۱۴۰۰ دور بر دقیقه است از آن‌جایی که شتاب ارتعاش به‌طور مستقیم تحت تأثیر سرعت دورانی و فاصله لنگ‌ها از محور اصلی است. در این سامانه از یک موتور و بیره کوپل‌شده و روی هم استفاده شد و با ثابت بودن فاصله لنگ‌ها (وزنه‌های تعادل) دامنه ارتعاش ثابت و تنها عامل تغییر شتاب ارتعاش سرعت دورانی الکتروموتور تامین‌کننده سرعت دورانی سامانه جرم نابرابر است. سامانه ایجاد ارتعاش نصب‌شده روی زیرشکن شامل دو مدار برقی بوده یکی مدار تامین انرژی الکتریکی از باتری تراکتور و دیگری مدار تغییر شتاب ارتعاش از طریق تغییر سرعت دورانی موتور و بیره با تغییر در بسامد انجام شد. به‌طوری‌که بالاترین ارتعاش با بسامد ۵۰ هرتز و بدون ارتعاش که بسامد صفر بود از طریق یک دستگاه اینورتر (درایو) قابل برنامه‌ریزی مدل F300-2R2G-2 به‌صورت دستی و هم به‌صورت اتوماتیک امکان‌پذیر گردید. اعمال ۵ سطح بسامد (از صفر تا ۵۰) مطابق طرح آزمایشی توسط راننده از داخل کابین تراکتور ایجاد شده و انرژی الکتریکی مورد نیاز نیز بدون نوسان و یا قطع شدن به‌طور پیوسته تامین گردید. لذا نتایج کارکرد سامانه ارتعاش برقی در هر دو شرایط کارگاهی (توقف تراکتور) و شرایط مزرعه‌ای و اجرای عملیات نشان داد انتخاب و اعمال میزان ارتعاش توسط راننده یا اپراتور به سهولت امکان‌پذیر است و نتیجه مهم‌تر این‌که امکان و پتانسیل ایجاد ارتعاش نرخ متغیر فراهم شده و در صورت نصب و به کارگیری حسگرهایی جهت سنجش آنالاین فاکتورهایی همچون درصد بکسواد، عمق کار، سرعت پیشروی، مقاومت خاک، رطوبت و غیره و محدوده‌ی گسترده‌تر بسامد و شناخت ارتباط بین شاخص‌ها و پارامترهای عملکردی و عملیاتی (ماشین و خاک) با میزان ارتعاش و توسعه مدار الکترونیکی اعمال ارتعاش نرخ متغیر در راستای کشاورزی دقیق امکان‌پذیر است. همچنین از نتایج بارز دیگر سامانه ارتعاش برقی عدم وابستگی میزان ارتعاش به پی‌تی‌او تراکتور و به تبع آن دور موتور و سرعت پیشروی است لذا علاوه بر رفع محدودیت‌هایی به

جهت ارتباط بین سرعت دورانی شافت پی‌تی‌او و دور موتور، مشکلاتی همچون انتقال ارتعاش به تراکتور و راننده ناشی از سیستم‌های مکانیکی که از نظر استهلاک فنی، بازدهی و موارد ارگونومیکی قابل توجه است نیز می‌تولند به‌طور معنی‌داری کاهش یابد. چراکه از مزیت‌های اصلی و امروزی توان الکتریکی نسبت به توان مکانیکی و هیدرولیکی، قابلیت کنترل ولتاژ و بسامد جریان به‌منظور تغییر و کنترل سرعت، تغییر جهت دوران الکتروموتورها و قابلیت قطع و وصل سریع را نیز می‌توان نام برد (Stoss, Sobotzik, Shi & Kreis, 2013). در زیرشکن نوسانی عامل ایجاد لرزش، شافت پی‌تی‌او تراکتور است و سبب لرزش در کل زیرشکن می‌شود و این لرزش از طریق اتصال سه نقطه به تراکتور و صندلی راننده منتقل می‌شود. طراحی خاص زیرشکن ارتعاش الکتریکی سبب کاهش انتقال لرزش، کاهش استهلاک و دوام سازه از نظر مهندسی می‌شود. بدین‌گونه که الکتروموتور و بیره مستقیم روی عامل خاک‌ورز تعبیه‌شده و خاک‌ورز درون قاب زیرشکن به‌صورت شناور قرار گرفته است. از مواد لاستیکی و منجیپی بین عامل خاک‌ورز و قاب زیرشکن کار گذاشته شده است. مجموع این عوامل سبب شده است که انتقال ارتعاش به قاب زیرشکن و صندلی راننده به‌طور چشمگیری کاهش یابد. نتیجه آنکه، صندلی راننده در معرض سطوح به‌مراتب پایین‌تری از سرعت و شتاب ارتعاشی قرار می‌گیرد؛ از این‌رو، عملکردی برتر داشته و در محدوده‌ی آسایش تعریف‌شده جای می‌گیرد.

جدول ۱، مشخصات تجهیزات، ادوات و ماشین‌های کشاورزی به‌کاررفته در این پژوهش را نشان داده است.

برای انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای از کرت‌های آزمایشی به عرض ۴ و طول ۴۰ متر در مزارع تحقیقاتی دانشگاه استفاده شد. روش کار بدین روش بود که بعد از آماده کردن تراکتور-خاک‌ورز، آزمایش‌ها در زمینی که از قبل کرت‌بندی و آماده شده بود، در سه تکرار و در طرح آزمایشی کرت‌های خردشده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی انجام گرفت و داده‌های مورد نظر ثبت گردید. در نهایت داده‌های حاصل از انجام آزمون‌ها شامل مقدار نیروی کششی و داده‌های مربوط به عرض کار، عمق کار و سطح مقطع خاک به‌هم‌خورده آماده و در محیط نرم‌افزارهای Excel و SAS¹ جهت بررسی آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز و تجزیه واریانس داده‌ها به شرح جدول‌ها و شکل‌ها در بخش نتایج آمده است.

جدول ۱- مشخصات تجهیزات، ادوات و ماشین‌های مورد استفاده در پژوهش

Table 1- Specifications of equipment, tools, and machinery used in the research

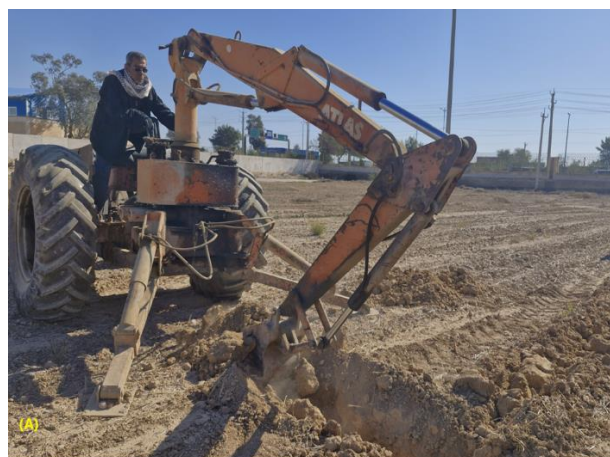
عنوان Title	ویژگی تجهیزات و ماشین‌آلات مورد استفاده Specifications of the equipment and machinery used
تراکتور Tractor	نیولند TM155 New Holland TM155
زیرشکن Subsoiler	تک ساق ارتعاش الکتریکی Electric Vibratory
لودسل Load cell	کششی 5000 کیلوگرمی 5000 kg, Traction
دیتالاگر Data logger	ماژول hx711 / نمایشگر TFT 3.2 inch HX711 module / TFT 3.2-inch Monitor
اینورتر اول First inverter	12 مستقیم به 220 متناوب، 3000 وات 12 DC to 220 AC, 3000 watts
اینورتر تک به سه فاز (درایو) Single to three phase inverter	2.2 kW hi tec 220 V single- to three-phase conversion
الکتروموتور ویبره Vibrator electric motor	1000 وات با حداکثر ضربه 1000 کیلوگرم 1000 watts with a maximum impact of 1000 kilograms
باتری Battery	12 ولت 150 آمپر ساعت 12 V, 150 Amper-hour

از عرض سطحی تا عرض عمقی با فاصله هر ۵ سانتی‌متر یک اندازه از عمق سطح مقطع خاک سست‌شده بود، به‌عنوان عرض خاک‌ورزی در نظر گرفته شد. بیشترین فاصله عمق این سطح مقطع خالی‌شده از خط افقی مماس بر سطح خاک مزرعه به‌عنوان عمق زیرشکنی اندازه گرفته شد و سپس حاصل ضرب میانگین عرض در عمق، به‌عنوان سطح مقطع خاک سست‌شده در زیرشکنی محاسبه گردید (Hemmat *et al.*, 2000). (شکل ۳- الف و ب)

اندازه‌گیری سطح مقطع خاک به‌هم‌خورده به این روش بود که پس از زیرشکنی در هر تیمار، سه نقطه مشخص و توسط بیل مکانیکی، گودبرداری به‌صورت عمود بر خط زیرشکنی‌شده، انجام شد. عمق گودبرداری حدود ۵۰ سانتی‌متر پایین‌تر از بیشترین عمق زیرشکن بود تا یک نفر بتواند ضمن ایستادن درون گود با استفاده از یک بیلچه، محتویات سست‌شده از خاک زیرشکنی‌شده درون گود ریخته شود. به این ترتیب سطح مقطع سست‌شده در زیرشکنی، خالی شده و میانگین عرض این سطح مقطع که حاصل تعدادی اندازه‌گیری



ب- اندازه‌گیری عرض و عمق کار زیرشکن
B- Measuring the width and depth of the subsoil work



الف- گودبرداری با بیل مکانیکی
A- Digging with an excavator

شکل ۳- گود برداری با بیل مکانیکی و اندازه‌گیری عرض و عمق کار زیرشکن

Fig.3. Digging with an excavator and measuring the width and depth of the subsoil work

نیروی کششی ویژه

نیروی کششی ویژه، از تقسیم میانگین مقاومت کششی بر میانگین سطح مقطع خاک سست‌شده و با رابطه (۲) پس از زیرشکنی و به‌دست آوردن عرض کار، عمق کار و میزان نیروی کششی محاسبه شد (Hemmat et al., 2000). برای اندازه‌گیری پارامتر نیروی کششی از یک عدد لودسل ۵ تن اس تایپ (شکل ۴) که بین عامل خاک‌ورز که به‌صورت معلق درون قاب زیرشکن قرار داشت و جلوی



شکل ۴- لودسل مورد استفاده

Fig. 4. The used load cell

شاسی زیرشکن نصب شده، به‌طوری‌که در هنگام کار و درگیر شدن ساق زیرشکن با خاک به سمت عقب کشیده شده و تمام نیروی کششی از طریق لودسل و بازوهای دوطرف آن به اتصال سه نقطه تراکتور منتقل شده و با دیتالاگر ویژه آن ضمن نمایش لحظه‌ای نیروی کششی بر روی نمایشگر با بسامد داده‌برداری، چهار داده در ثانیه و با ثبت زمان دقیق بر حسب ساعت، دقیقه و ثانیه با فرمت اکسل روی کارت اس‌دی ذخیره‌سازی می‌شد.

رطوبتی و پنج سطح بسامد بر مقدار عرض کار، عمق کار، سطح مقطع خاک به‌هم‌خورده و نیروی کششی ویژه زیرشکن را نشان داده است. این نتایج نشان داد که میزان رطوبت و بسامد و اثر متقابل آن‌ها در سطح ۱٪ اثر معنی‌داری بر همه شاخص‌های عملکردی زیرشکن داشتند. در مطالعه تانگ و همکاران (Tang, Li, Zhang, & Wang, 2015) که در مورد بررسی تأثیر زیرشکنی ارتعاشی بر مقاومت کششی و خواص خاک بود، نتایج مشابه این پژوهش را گرفتند و نشان دادند که زیرشکنی ارتعاشی، مقاومت کششی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد و خواص فیزیکی خاک مانند تراکم و نفوذپذیری را بهبود می‌بخشد. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ارتعاش خواص مکانیکی خاک مانند چگالی و رطوبت را بهینه می‌کند و بهره‌وری خاک‌ورزی را افزایش می‌دهد. در نهایت، ابراز داشتند که روش مدیریت خاک‌ورزی ارتعاشی می‌تواند گزینه‌ای مؤثر برای کاهش مقاومت و بهبود ساختار خاک باشد.

جدول ۳، نتایج مقایسه میانگین‌های اثر رطوبت بر عرض کار زیرشکن را نشان داده است که اثر عامل رطوبت در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ بر عرض کار زیرشکن اثرگذار بود. اثر خاک خشک بر عرض کار، بیشتر از خاک مرطوب بود و این به‌خاطر شکستگی کمتر و به اصطلاح حالت پنبه‌ری خاک است که در رطوبت بالا به‌وجود آمد.

و بدین روش نیروی کششی محاسبه گردید. نیروی کششی ویژه که یکی از فاکتورهای مورد نظر این پژوهش بود از حاصل تقسیم نیروی کششی بر سطح مقطع خاک به‌هم‌خورده به‌دست آمد.

$$ST = \frac{T}{SS} \quad (2)$$

در این رابطه، ST: نیروی کششی ویژه (کیلو نیوتن بر متر مربع)، T: نیروی کششی (کیلو نیوتن) و SS: سطح مقطع خاک به‌هم‌خورده (بر حسب متر مربع) است. در بررسی، آزمون و یا ارزیابی عملیات خاک‌ورزی و به‌طور خاص زیرشکن‌زنی افزایش عرض، عمق و مساحت خاک به‌هم‌خورده در کنار کاهش نیروی کششی ویژه نشان‌دهنده اثربخشی مثبت عملیات زیرشکن‌زنی با اعمال تکنیک ارتعاش است

نتایج و بحث

شاخص‌های عملکردی

نتایج بررسی و تجزیه واریانس داده‌های حاصل از آزمایش‌های این پژوهش نشان داد که اثر متغیرهای مستقل (رطوبت خاک و بسامد ارتعاش عامل خاک‌ورز)، بر روی پارامترها و متغیرهای وابسته شامل عرض کار، عمق کار، سطح مقطع خاک به‌هم‌خورده و نیروی کششی ویژه زیرشکن ارتعاش الکتریکی در سطح معنی‌داری ۱٪ اثرگذار بوده است. جدول ۲، نتایج آزمون تجزیه واریانس اثر اعمال دو سطح

جدول ۲- تجزیه واریانس متغیرهای عرض، عمق، سطح مقطع خاک به هم خورده و نیروی کششی ویژه تحت تأثیر فاکتورهای رطوبت و بسامد
Table 2- Analysis of variances of width, depth, cross-sectional area of disturbed soil, and specific traction force under the influence of humidity and frequency factors

منابع تغییرات Sources of changes	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square			
		عرض کار Working width	عمق کار Working depth	سطح مقطع خاک به هم خورده Cross-sectional area of disturbed soil	نیروی کششی ویژه Specific tensile force
تکرار (Repeat)	2	0.900	1.300	7.114E-5	24.131
رطوبت (Humidity)	1	10416.033**	3413.333**	0.005 **	762.365**
خطا (Error)	2	1.633	1.033	3.602E-5	11.079
بسامد (Frequency)	4	646.950**	25.383**	0.009**	1797.181**
رطوبت × بسامد (Humidity×Frequency)	4	373.950**	20.750**	0.006**	804.801**
خطا (Error)	16	2.850	1.292	3.150E-5	8.838

ns, *, and ** به ترتیب غیر معنی دار، معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns, *, and ** are not significant, and significant at the 5 and 1 percent probability levels, respectively

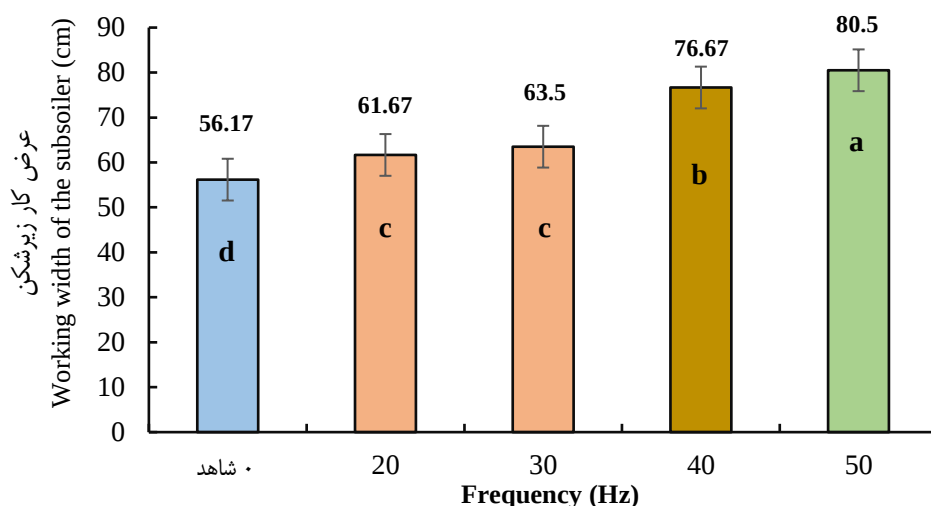
جدول ۳- اثر سطوح مختلف رطوبت خاک بر عرض کار زیرشکن

Table 3- Effect of different soil humidity levels on the working width of the subsoiler

رطوبت Humidity	میانگین Mean	تعداد Number	انحراف معیار Std. Deviation
0.07	86.3333 a	15	16.98178
0.17	49.0667 b	15	2.63131
Total	67.7000	30	22.39943

بسامد ۵۰ هرتز بیشترین و در بسامد صفر کمترین عرض کار به دست آمد. نتایج نشان داد در بسامدهای ۲۰ و ۳۰ هرتز تغییر عرض کار مشاهده نگردید و قابل چشم پوشی بود.

شکل ۵، نتایج مقایسه مقدار میانگین اثر بسامدهای پنج گانه بر عرض کار زیرشکن را نشان داده است. نتایج نشان داد که اثر عامل بسامد بر عرض کار در سطح ۰/۰۱ معنی داری بود. این معنی داری به دلیل شکستگی بیشتر خاک در ارتعاشهای بالاتر بود، به طوری که در

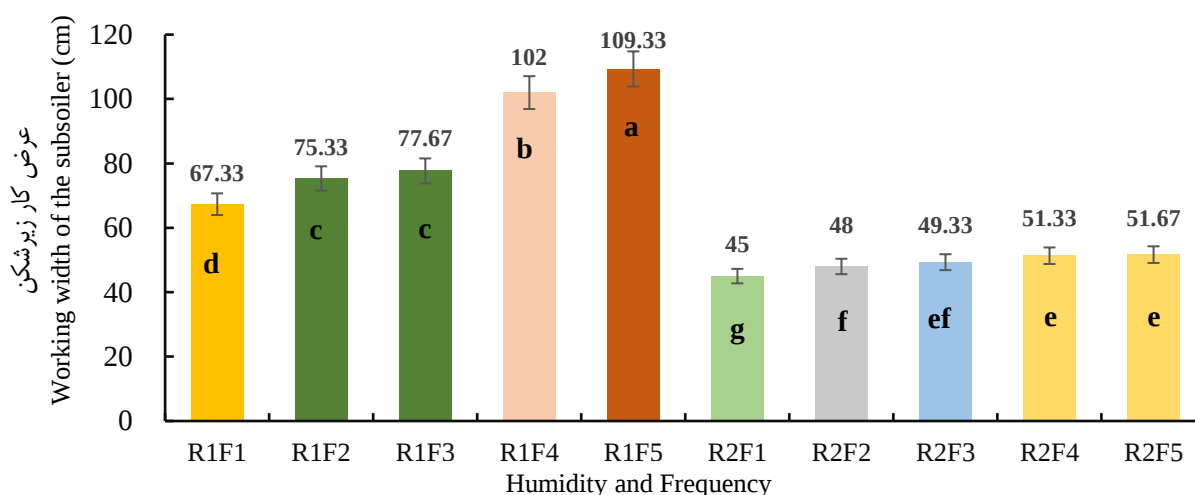


شکل ۵- اثر سطوح مختلف فاکتور بسامد بر عرض کار زیرشکن

Fig.5. The effect of different frequency factor levels on the working width of the subsoiler

میزان تاثیر بسامد افزایشی بود. بیشترین عرض کار در رطوبت ۷ درصد با بسامد ۵۰ هرتز (R_1F_5) اتفاق افتاد که بیانگر تاثیر مستقیم بسامد و اثر معکوس میزان رطوبت بود. همچنین کمترین عرض کار در رطوبت ۱۷ درصد و بسامد صفر (R_2F_1) حاصل شد و در بسامدهای میانی یعنی ۲۰ و ۳۰ هرتز، تاثیر بر عرض کار یکسانی به دست آمد.

نتایج به دست آمده از مقایسه میانگین‌های اثر متقابل رطوبت و بسامد بر عرض کار در شکل ۶ نمایش داده شده است. این نتایج بیانگر دو محدوده متفاوت از تاثیر بسامد بر عرض کار به دست آمده است. محدوده بالاتر که بسامد اثر بیشتری داشته است، در سطح رطوبتی ۷ درصد و محدوده‌ای که بسامد اثر کمتر و پایین‌تری داشته است در سطح رطوبتی ۱۷ درصد اتفاق افتاده است که به خاطر تاثیر معکوس میزان رطوبت بر عرض کار بوده است. در هر دو محدوده

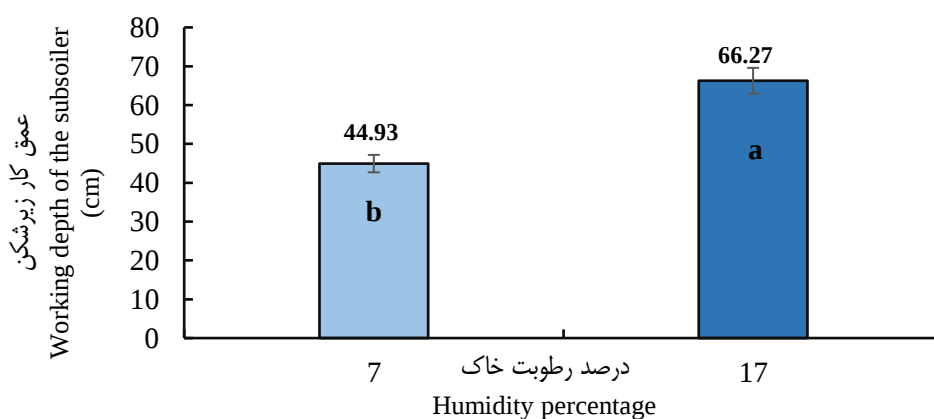


شکل ۶- اثر متقابل سطوح فاکتورهای رطوبت و بسامد بر عرض کار زیرشکن

Fig.6. The interaction effect of different moisture and frequency factor levels on the working width of the subsoiler

از رطوبت ۷ درصد بود و این به خاطر تاثیر میزان رطوبت بر مقاومت کششی می‌باشد.

شکل ۷، مقایسه میانگین‌های اثر رطوبت بر عمق کار زیرشکن را نشان داده است. نتایج نشان داد که اثر عامل رطوبت بر عمق کار در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار بود. در سطح رطوبت ۱۷ درصد، عمق کار بیشتر

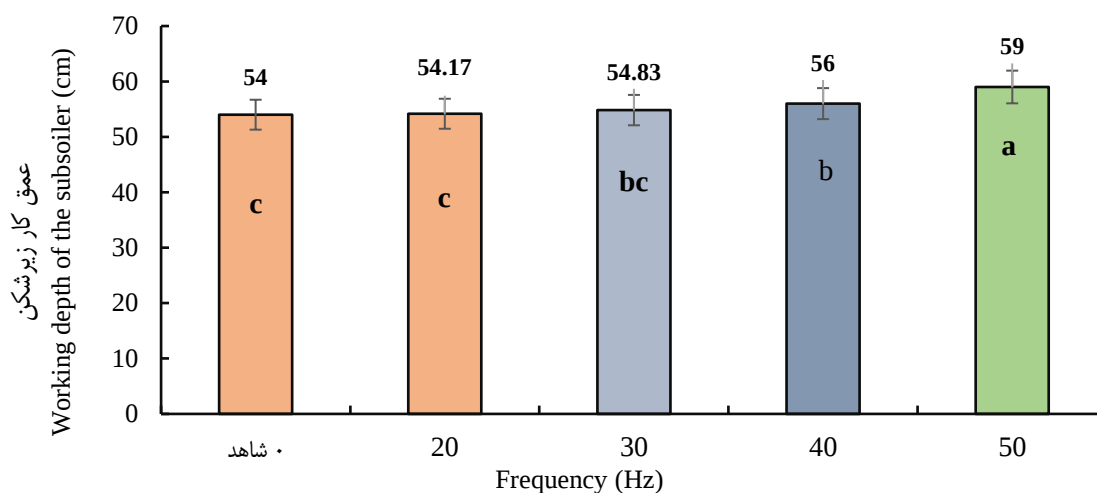


شکل ۷- اثر فاکتور رطوبت بر عمق کار زیرشکن

Fig.7. The effect of the moisture factor on the working depth of the subsoiler

عامل بسامد بر عمق کار در سطح ۰/۰۱ معنی دار بود. بیشترین تاثیر مربوط به بسامد ۵۰ هرتز و کمترین مربوط به بسامدهای ۲۰ و ۰ بود.

نمودار مقایسه میانگین‌های اثر بسامد بر عمق کار زیرشکن در شکل ۸، نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که اثر

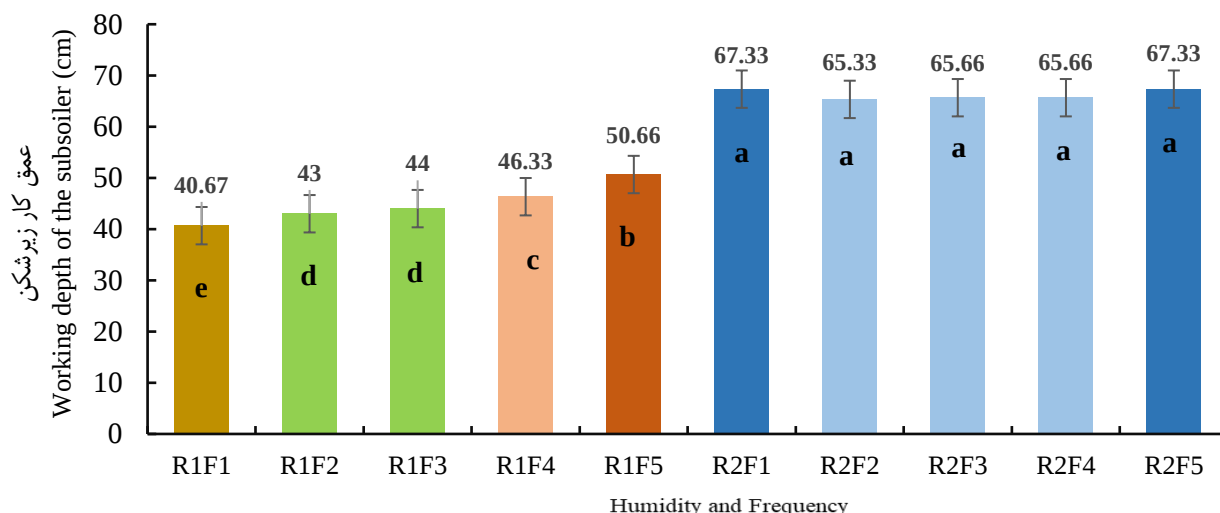


شکل ۸- اثر سطوح مختلف فاکتور بسامد بر عمق کار زیرشکن

Fig.8. The effect of different levels of frequency factor on the working depth of the subsoiler

یکسانی بر عمق کار داشته است. اثر یکسان بسامدهای مختلف به‌خاطر شکستگی کمتر و به اصطلاح حالت پنبه‌ری خاک است که در رطوبت بالا به‌وجود می‌آید و عمق بیشتر به‌خاطر تاثیر رطوبت بر کاهش مقاومت کششی و همچنین نفوذ راحت‌تر و بیشتر زیرشکن بوده است. بیشترین عمق کار در رطوبت ۱۷ درصد با همه بسامدها به‌طور یکسان اتفاق افتاده است که بیانگر دو مورد است یکی تاثیر کم میزان بسامد و دیگری کاهش مقاومت کششی زیرشکن در این رطوبت بود. همچنین کمترین عمق کار در رطوبت ۷ درصد و بسامد صفر یعنی تیمار (R_1F_1) حاصل شد.

نتایج به‌دست آمده از مقایسه میانگین‌های اثر متقابل رطوبت و بسامد بر عمق کار زیرشکن، در شکل ۹ نمایش داده شده است. دو سطح از تاثیر بر عمق کار به‌دست آمد که به‌خاطر تاثیر مثبت میزان رطوبت بر عمق کار بوده است. اثر سطح ترکیبی رطوبت ۷ درصد با بسامدهای مختلف در سطح ۰/۰۱ بر عمق کار اثر معنی‌داری داشته است. این میزان تاثیر نسبت به رطوبت ۱۷ درصد کمتر ولی اثر بسامد افزایشی بوده است. در سطح ترکیبی رطوبت ۱۷ درصد با بسامدهای مختلف، میزان تاثیر بیشتر ولی اثر آن یکسان و مشابه بوده است، یعنی ترکیبات بسامدهای مختلف با رطوبت بالا اثر



شکل ۹- اثر متقابل سطوح مختلف فاکتورهای رطوبت و بسامد بر عمق کار زیرشکن

Fig.9. The interaction effect of different moisture and frequency factor levels on the working depth of the subsoiler

مقطع خاک به هم خورده بیشتر شود و بیشترین سطح مقطع خاک به هم خورده در رطوبت ۷ درصد به دست آید، که بیانگر تاثیر و کارایی زیرشکن در رطوبت کم می باشد. در پژوهشی که ساساکی و همکاران (Sasaki, de Moraes Gonçalves, & da Silva, 2007) انجام دادند، نتیجه گرفتند که رابطه معکوس بین سطح مقطع خاک به هم خورده و افزایش محتوای رطوبت خاک وجود دارد. در پژوهشی دیگر عباسپور گیلانده و همکاران (Abbaspour-Gilandeh, & Sedghi, 2015)، رطوبت مناسب جهت اجرای عملیات خاک ورزی را که منجر به تشکیل حداکثر خاک دانه های ریز و حداقل کلوخه های درشت می گردد در محتوای رطوبت نزدیک به ۹ درصد حد پایین خمیری خاک گزارش نمودند.

جدول ۴، مقایسه میانگین های اثر رطوبت بر سطح مقطع خاک به هم خورده را نشان داده است. این نتایج بیان می دارد که اثر عامل رطوبت خاک بر سطح مقطع خاک به هم خورده زیرشکن در سطح ۰/۰۱ اثر معنی داری داشته است و در رطوبت ۷ درصد نسبت به رطوبت ۱۷ درصد اثر بیشتری بر جای گذاشته است. این تاثیر گذاری را می توان این گونه توضیح داد، با توجه به این که سطح مقطع خاک به هم خورده از حاصل ضرب عرض کار در عمق کار زیرشکن به دست می آید و چون رطوبت بالا به سبب خاصیت پنبیری که در خاک به وجود می آید، بر عرض کار تاثیر عکس دارد و به سبب کاهش نیروی کششی و نفوذ بیشتر زیرشکن بر عمق کار تاثیر مثبت و مستقیم دارد، علی رغم این که در رطوبت ۷ درصد عمق کار کاهش یافته است ولی عرض کار آن قدر زیاد بوده است، که در این رطوبت نه تنها جبران کاهش عمق را نمود، بلکه سبب آن شد که سطح

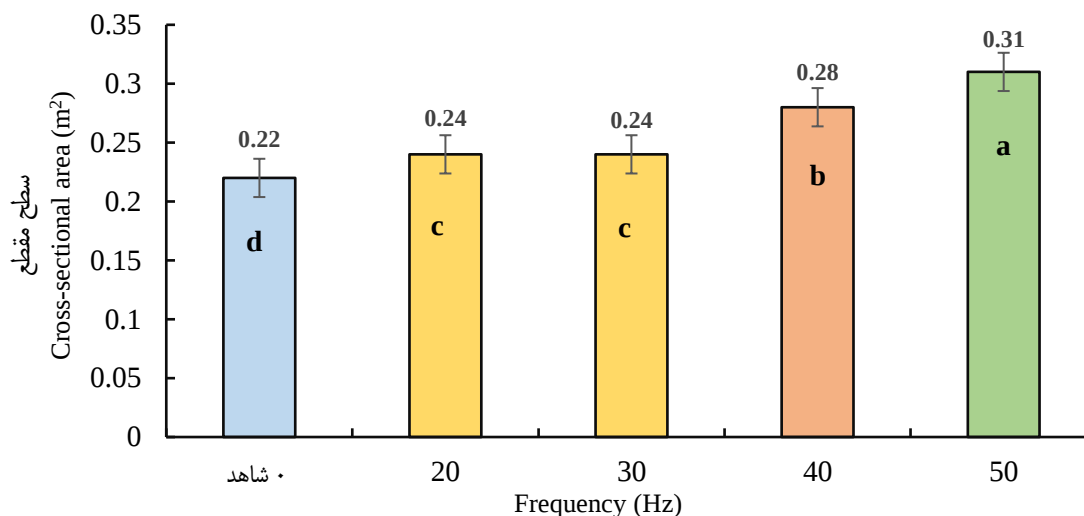
جدول ۴- اثر سطوح مختلف رطوبت خاک بر سطح مقطع خاک به هم خورده

Table 4- Effect of different soil humidity levels on the cross-sectional area of disturbed soil

رطوبت Humidity	میانگین Mean	تعداد Number	انحراف معیار Std. Deviation
0.07	0.2714 a	15	0.6585
0.17	0.2448 b	15	0.00894
Total	0.2581	30	0.04811

معنی دار بود. این به خاطر شکستگی بیشتر خاک در ارتعاش های بالاتر و تاثیر آن بر عرض و عمق کار زیرشکن بود، به طوری که در بسامد ۵۰ هرتز بیشترین و در بسامد صفر کمترین سطح مقطع خاک

شکل ۱۰، مقایسه میانگین های اثر بسامد بر سطح مقطع خاک به هم خورده را نشان داده است. نتایج نشان داد که عامل بسامد ارتعاش زیرشکن بر سطح مقطع خاک به هم خورده در سطح ۰/۰۱

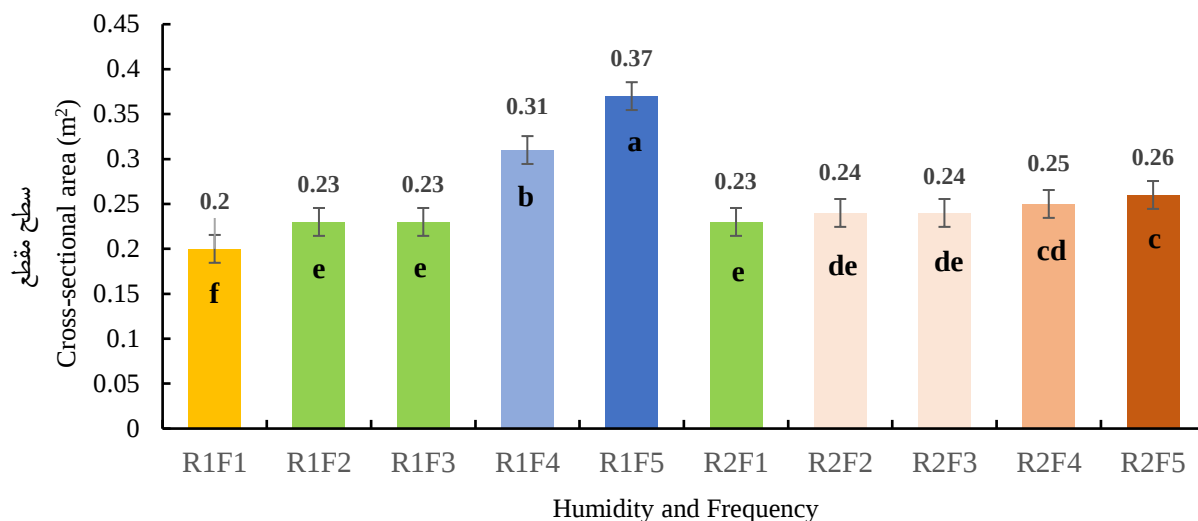


شکل ۱۰- اثر سطوح مختلف فاکتور بسامد بر سطح مقطع خاک به هم خورده

Fig.10. The effect of different frequency factor levels on the cross-sectional area of disturbed soil

۷ درصد و بسامد ۵۰ هرتز، یعنی در تیمار (R_1F_5) بود که بیانگر تاثیر زیاد میزان ارتعاش بر عرض کار است که علی رغم این که در رطوبت کم، عمق کاهش می یابد، ولی افزایش زیاد عرض کار سبب شده است که بیشترین سطح مقطع خاک به هم خورده در بسامد بالا و رطوبت کم به وجود آید. همچنین کمترین سطح مقطع خاک به هم خورده در رطوبت ۷ درصد و بسامد صفر (R_1F_1) حاصل شد، که باز تاییدی است بر اثربخشی میزان ارتعاش به ترتیب اثر بر عرض و عمق که در افزایش سطح مقطع خود را نشان داده اند. در پژوهشی تلنگ و همکاران (Tang et al., 2015) نشان دادند که در زیرشکنی ارتعاشی، خواص فیزیکی خاک مانند تراکم و نفوذپذیری بهبود می یابند و ارتعاش باعث افزایش گسیختگی و سطح مقطع خاک به هم خورده شده و نیروی مورد نیاز برای عملیات را کاهش می دهد.

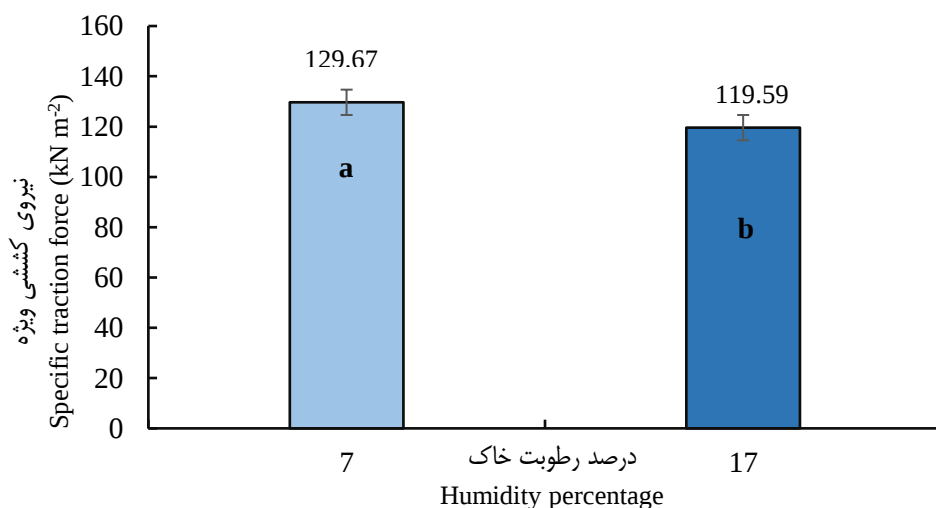
شکل ۱۱، مقایسه میانگین های اثر متقابل رطوبت و بسامد بر سطح مقطع خاک به هم خورده تیمارهای مختلف را نمایش داده است که دارای اثر معنی داری در سطح ۰/۰۱ بود. دو سطح اثرگذاری بر سطح مقطع خاک به هم خورده، بیان کننده تاثیر معکوس میزان رطوبت بر عرض کار است. آن چنان که در سطح ترکیبی رطوبت ۷ درصد و بسامدهای مختلف میزان تاثیر بیشتر و افزایشی بوده است و در سطح ترکیبی رطوبت ۱۷ درصد با بسامدهای مختلف، خاصیت پنبیری به وجود آمده برای خاک میزان تاثیر عامل ارتعاش را کم کرده است ولی به خاطر تاثیر زیاد عامل رطوبت بر عمق کار همچنان در سطح ۰/۰۱ اثر معنی داری خود را حفظ کرده است. یعنی ترکیبات بسامدهای مختلف با رطوبت بالا اثر کمتری بر سطح مقطع خاک به هم خورده داشته و بسامدهای ۲۰ و ۳۰ هرتز در هر دو سطح رطوبتی اثر مشابه و یکسانی داشته اند. بیشترین سطح مقطع خاک به هم خورده در رطوبت



شکل ۱۱- اثر متقابل سطوح مختلف فاکتورهای رطوبت و بسامد بر سطح مقطع خاک به هم‌خورده
Fig.11. The interaction effect of different moisture and frequency levels on the cross-section of disturbed soil

رطوبت ۷ درصد نیروی کششی ویژه بیشتر از رطوبت ۱۷ درصد بود و این به‌خاطر تاثیر میزان رطوبت بر مقاومت کششی می‌باشد.

شکل ۱۲، مقایسه میانگین‌های اثر رطوبت بر نیروی کششی ویژه زیرشکن را نشان داده است که این نتایج معنی‌داری اثر عامل رطوبت بر نیروی کششی ویژه زیرشکن را در سطح ۰/۰۱ نشان داده است. در



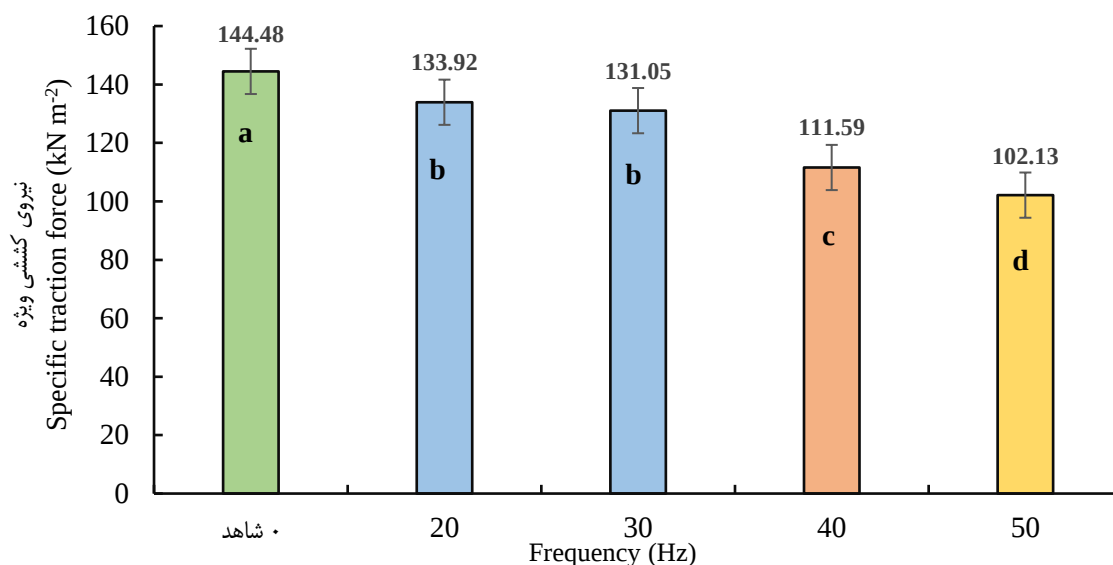
شکل ۱۲- اثر فاکتور رطوبت بر نیروی کششی ویژه زیرشکن
Fig.12. The effect of moisture factor on the specific traction force of the subsoiler

ارتعاش‌های بالاتر و تاثیر آن بر عرض و عمق کار زیرشکن بود که به‌طور مستقیم بر سطح مقطع کار اثر مثبت می‌گذارد و چون سطح مقطع کار در فرمول نیروی کششی ویژه در مخرج کسر قرار دارد، باعث کاهش نیروی کششی در واحد سطح (کشش ویژه) می‌شود،

از مقایسه میانگین‌های اثر بسامد بر نیروی کششی ویژه زیرشکن شکل ۱۳، این نتیجه به‌دست آمد که اثر عامل بسامد بر نیروی کششی ویژه در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار بود و بر نیروی کششی ویژه زیرشکن اثر معکوس داشت. این موضوع به‌خاطر شکستگی بیشتر خاک در

کاهش نیروی کششی ویژه زیرشکن مشهود بود و در بسامدهای ۲۰ و ۳۰ هرتز اثر مشابهی مشاهده شد.

به طوری که در بسامد ۵۰ هرتز کمترین و در بسامد صفر بیشترین نیروی کششی ویژه زیرشکن به دست آمد. در همه بسامدها سیر

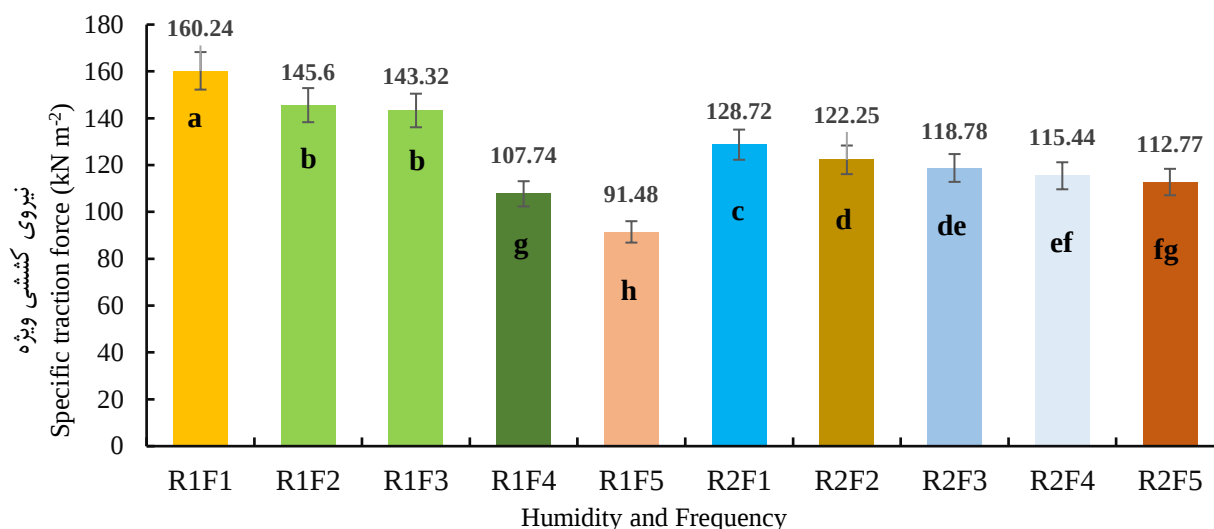


شکل ۱۳- اثر سطوح مختلف فاکتور بسامد بر نیروی کششی ویژه زیرشکن

Fig.13. The effect of different frequency factor levels on the specific traction force of the subsoiler

به وضوح در شکل ۱۰ خود را نشان داده است. در تحقیقی، گان و ترامونتینی (Gunn & Tramontini, 1995) نتیجه گرفتند که مقاومت کششی گاواهن چپزل از طریق اعمال ارتعاش کاهش می یابد. با افزایش سرعت ارتعاش نسبت به سرعت پیشروی، کاهش در مقاومت کششی قابل توجه بود، اگرچه ارتعاش موجب کاهش معنی دار مقاومت کششی شد ولی کاهش زیادی در توان کل مورد نیاز ایجاد نشد. الرجبو و همکاران (Al-Rajabo, Hilal, & Rajab, 2021) در پژوهشی به بررسی کاربرد ارتعاش در زیرشکن برای کاهش نیاز به انرژی پرداختند. نتایج کلیدی نشان دهنده کاهش قابل توجه مقاومت کششی و مصرف انرژی با استفاده از ارتعاش بود. در آزمایش های میدانی، ارتعاش زیرشکن منجر به کاهش مقاومت تا ۲۱/۴٪ در سرعت ۴ کیلومتر بر ساعت و عمق های مختلف (۲۵۰ تا ۳۵۰ میلی متر) شد. این کاهش مقاومت با افزایش سرعت کاری بیشتر مشهود بود و در مقایسه با زیرشکن بدون ارتعاش، صرفه جویی انرژی ۱۰/۳ درصد تا ۲۲/۶۵ درصد مشاهده گردید. علاوه بر صرفه جویی انرژی، ارتعاش باعث خردشدن بهتر خاک، کاهش تراکم و افزایش نفوذپذیری شد. این تغییرات عملکرد زیرشکن را در عمق های تقسیم شده تا ۳۶ درصد بهبود بخشید.

شکل ۱۴، مقایسه میانگین های اثر متقابل رطوبت و بسامد بر نیروی کششی ویژه زیرشکن در تیمارهای مختلف را نشان داده است که در سطح ۰/۰۱ اثر معنی داری بر نیروی کششی ویژه زیرشکن داشته اند. دو سطح از تاثیر بر نیروی کششی ویژه زیرشکن به دست آمد که به خاطر نحوه تاثیر رطوبت و بسامد بر سطح مقطع کار زیرشکن بود که در آن عامل رطوبت باعث افزایش عمق کار و کاهش نیروی کششی می شود و عامل بسامد باعث اثر مثبت بر عرض کار شده است که در نهایت افزایش سطح مقطع کار و به تبع آن سبب اثر کاهش بر نیروی کششی ویژه زیرشکن شده است، منتهی این اثربخشی در سطح رطوبت بالا، کمتر است. در بین تیمارها کمترین نیروی کششی ویژه زیرشکن در رطوبت ۷ درصد و بسامد ۵۰ هرتز (R_1F_5) بود، که بیانگر تاثیر زیاد میزان ارتعاش بر کاهش نیروی کششی ویژه زیرشکن است که علی رغم این که در رطوبت کم عمق کمتر بوده ولی افزایش زیاد عرض کار سبب شده است که بیشترین سطح مقطع کار در بسامد بالا به وجود آید و به دنبال آن نیروی کششی ویژه، کاهش می شود. همچنین بیشترین نیروی کششی ویژه زیرشکن در رطوبت ۷ درصد و بسامد صفر (R_1F_1) حاصل شد، که باز تاییدی است بر اثربخشی میزان ارتعاش بر سطح مقطع کار و نیروی کششی ویژه زیرشکن که



شکل ۱۴- اثر متقابل سطوح مختلف فاکتورهای رطوبت و بسامد بر نیروی کشش ویژه زیرشکن

Fig.14. The interaction effect of different moisture and frequency levels on the specific traction force of the subsoiler

مشاهده شد. اثر بسامد با $F=158.29$ بیشترین تأثیر را بر انرژی مصرفی داشت. ضریب تبیین ($R^2=0.986$) نشان‌دهنده برازش بسیار خوب مدل و توجیه ۹۸/۶ درصد از تغییرات انرژی کل توسط عوامل مورد مطالعه است. اثر تکرار معنی‌دار نبود ($p>0.05$) که حاکی از تکرارپذیری مناسب آزمایش‌ها می‌باشد. در مجموع، کاهش رطوبت خاک و کاهش بسامد ارتعاشی منجر به افزایش معنی‌دار انرژی ویژه زیرشکن می‌گردد.

تحلیل انرژی کل زیرشکن (مجموع انرژی کششی و الکتریکی)

جدول ۵، نتایج تجزیه واریانس انرژی کل در زیرشکن ارتعاشی نشان داد که اثر رطوبت، بسامد و اثر متقابل رطوبت و بسامد در سطح ۱٪ معنی‌دار است ($p < 0.01$). بیشترین مقدار انرژی کل در رطوبت ۱۷٪ (۱۳۱/۹۶ واحد) و کمترین آن در رطوبت ۱۲٪ (۱۲۲/۳۵ واحد)

جدول ۵- تجزیه واریانس انرژی کل زیرشکن

Table 5- Analysis of variance total energy of subsoiler

منابع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig
Source of variation	Sum of Squares	df	Mean Square		
تکرار	49.503	2	24.751	2.737	0.95 ^{ns}
Repeat					
رطوبت	692.273	1	692.273	76.562	0.000**
Humidity					
خطا	22.579	2	11.290	1.249	0.313 ^{ns}
Error					
بسامد	5724.866	4	1431.216	158.286	0.000**
Frequency					
رطوبت × بسامد	3444.595	4	861.149	95.239	0.000**
H × F					

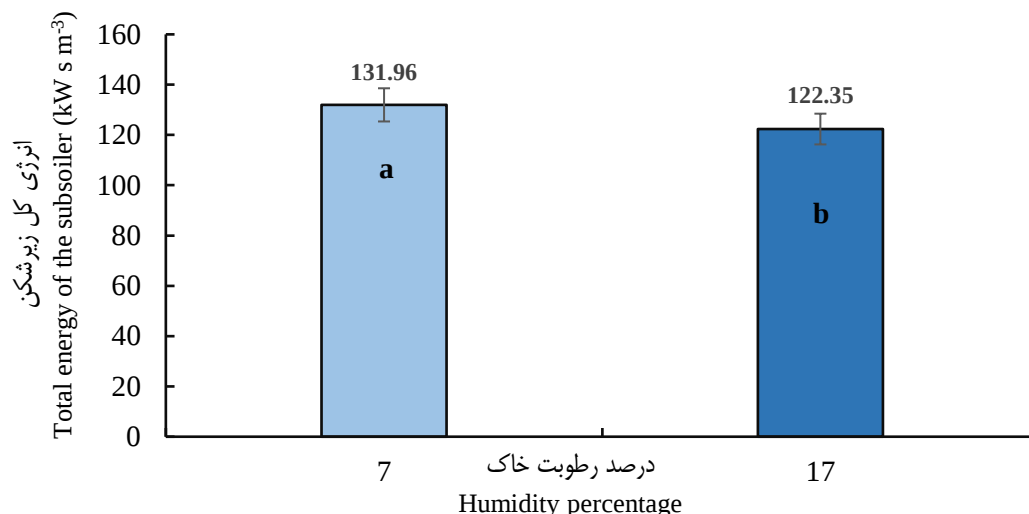
** در سطح ۱ درصد معنی‌دار * در سطح ۵ درصد معنی‌دار ns: غیر معنی‌دار

الف. مجذور $R = ۰/۹۸۶$ (مجذور R تعدیل‌شده = $۰/۹۷۴$)

a. R Squared = 0.986 (Adjusted R Squared = 0.974)

یافت و در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. این پدیده را می‌توان به کاهش اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک در رطوبت بالاتر نسبت داد که باعث کاهش مقاومت برشی و در نتیجه کاهش انرژی مورد نیاز زیرشکن می‌شود.

شکل ۱۵، اثر اصلی رطوبت نشان داد که میانگین انرژی کل در رطوبت ۷٪ (۱۳۱/۹۶ واحد) بیشتر از رطوبت ۱۷٪ (۱۲۲/۳۵ واحد) بود، و در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. بررسی مقایسه میانگین‌ها اثر رطوبت (شکل ۱۵)، نشان داد که با افزایش رطوبت خاک از ۷٪ به ۱۷٪، میانگین انرژی کل از ۱۳۱/۹۶ واحد به ۱۲۲/۳۵ واحد کاهش

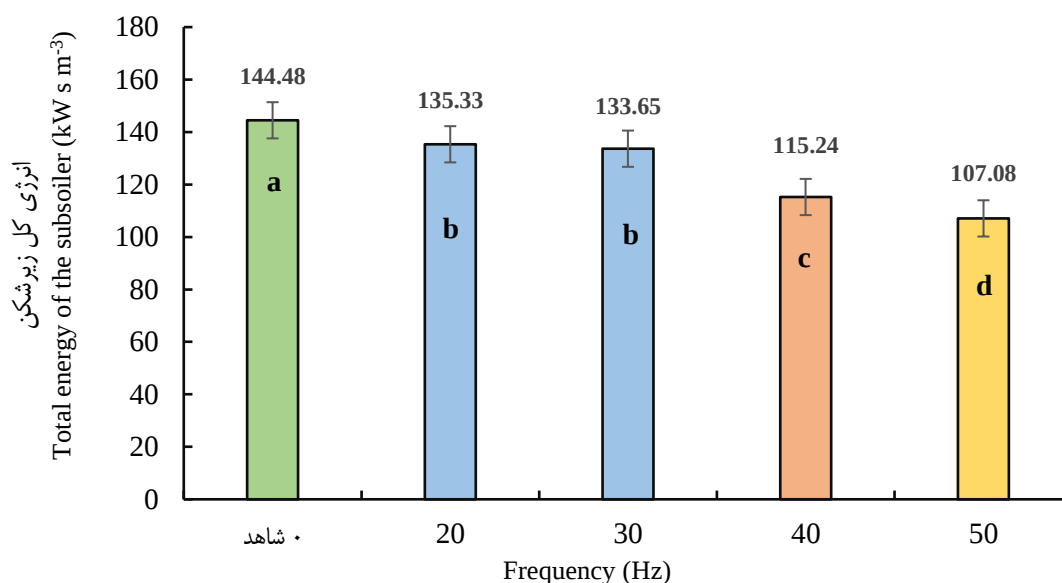


شکل ۱۵- اثر فاکتور رطوبت بر انرژی کل زیرشکن

Fig.15. The effect of moisture factor on the total energy of the subsoiler

به‌طور کلی، با افزایش بسامد از صفر به ۵۰ هرتز، علی‌رغم اضافه شدن انرژی الکتریکی سامانه ارتعاشی، انرژی کل حدود ۳۵ درصد کاهش یافت. این موضوع به‌خاطر توان مصرفی کم الکتروموتور ویبره که حداکثر توان مصرفی الکتروموتور ویبره، ۰/۹۵ کیلووات در بسامد ۵۰ هرتز است و تاثیر زیاد آن بر شاخص‌های عملکردی زیرشکن مانند عرض کار، عمق کار و نیروی کششی است.

نتایج آزمون شکل ۱۶ نشان داد که بسامد تأثیر معنی‌داری بر انرژی کل زیرشکن دارد ($P < 0.01$). بیشترین میانگین انرژی کل مربوط به حالت بدون ارتعاش (بسامد صفر) با مقدار ۱۴۴/۴۸ واحد و کمترین آن مربوط به بسامد ۵۰ هرتز با مقدار ۱۰۷/۰۸ واحد بود. بسامدهای ۲۰ و ۳۰ هرتز از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نداشتند (هر دو در زیرمجموعه سوم) و در یک گروه همگن قرار گرفتند.

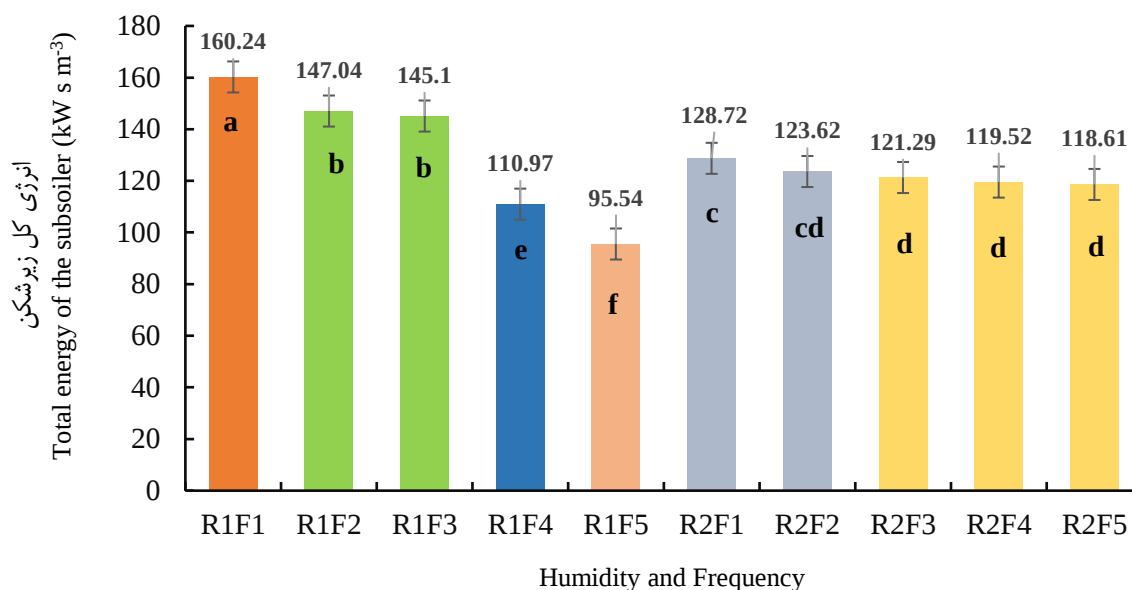


شکل ۱۶- اثر سطوح مختلف فاکتور بسامد بر انرژی کل زیرشکن

Fig.16. The effect of different frequency factor levels on the total energy of the subsoiler

دست یافتند و دلیل این موضوع را این گونه ابراز داشتند که کاهش نیروی کششی ویژه با افزایش بسامد را می‌توان به تغییر مکانیزم گسیختگی خاک از برشی پیوسته به ضربه‌ای و چندگانه، کاهش اصطکاک ظاهری ناشی از حرکت نوسانی ابزار و افزایش بازده شکست و متلاشی‌سازی و سطح مقطع خاک به هم‌خورده به‌ازای هر واحد انرژی ورودی نسبت داد. این پدیده به‌ویژه در سرعت‌های نسبت بیشتر از یک (نسبت سرعت نوسانی به سرعت پیشروی) مشهودتر است (Oyebode *et al.*, 2021). در این پژوهش نیز در سطح رطوبت ۰/۰۷ با افزایش 4 kW s m^{-3} انرژی الکتریکی سامانه ارتعاشی در بسامد ۵۰ هرتز، انرژی کل کششی مورد نیاز برای یک مترمکعب نه‌تنها افزایش نیافته‌است بلکه از $160/24$ در بسامد صفر به $95/5$ در بسامد ۵۰ هرتز کاهش یافته است. که می‌توان نتیجه گرفت از منظر انرژی بسیار قابل توجیه و باصرفه است. این مهم در رطوبت و بسامد بهینه اتفاق می‌افتد.

نتایج آزمون شکل ۱۷ نشان داد که اثر متقابل رطوبت و بسامد بر انرژی کل زیرشکن در سطح $0/01$ معنی‌دار است. در خاک خشک (R_1)، افزایش بسامد از ۰ به ۵۰ هرتز باعث کاهش انرژی از $160/24$ به $95/5$ واحد شد (کاهش حدود 40%). در خاک مرطوب (R_2)، همین افزایش بسامد، انرژی را از $128/7$ به $118/6$ واحد کاهش داد (کاهش حدود 8%). کمترین انرژی کل در تیمار R_1F_{50} (خاک خشک، بسامد ۵۰ هرتز) حاصل شد که با سایر تیمارها اختلاف معنی‌دار داشت. معنی‌داری اثر متقابل رطوبت و بسامد و نحوه تأثیر میزان رطوبت بر انرژی کل نشان می‌دهد که رفتار سیستم تحت تأثیر همزمان این دو عامل غیرخطی است؛ به‌طوری‌که در رطوبت پایین، تغییرات بسامد تأثیر بیشتری بر انرژی دارد. مقدار بالا F برای بسامد ($158/286$) تأیید می‌کند که در طراحی زیرشکن‌های ارتعاشی، انتخاب بسامد بهینه از اولویت بالایی برخوردار است. اویبود و همکاران (Oyebode, Andoniaina, & Shoji, 2021) در پژوهش خود به نتایج مشابه



شکل ۱۷- اثر متقابل سطوح فاکتورهای رطوبت و بسامد بر انرژی کل زیرشکن

Fig.17. The interaction effect of different moisture and frequency levels on the total energy of the subsoiler

نتیجه گیری

محدوده رطوبتی خاک (خشک و مرطوب) بر پارامترهای عرض و عمق کار، شاخص سطح خاک به هم خورده، نیروی مقاومت کششی و نیروی کششی ویژه نشان داد کمترین عمق کار در کل تیمارها با ۴۰/۶ سانتی متر در بدون ارتعاش (R₁F₁) و محدوده رطوبتی خاک خشک است و در همین رطوبت بیشترین عمق کار ۵۰/۶۶ سانتی متر در حالت ماکزیمم ارتعاش (R₁F₅) است. میزان ارتعاش در محدوده رطوبتی کم یا خاک خشک رابطه مستقیمی با عمق کار دارد به طوری که با روند افزایش ارتعاش عمق کار هم افزایشی است. در شرایط محدوده خاک مرطوب هرچند که عمق کار با ۶۷/۳۳ سانتی متر بیشترین مقدار رسیده اما هیچ تفاوت معنی داری با حالت بالاترین و بدون ارتعاش وجود ندارد به عبارتی میزان ارتعاش در محدوده رطوبتی بالای خاک تأثیری در عمق کار ندارد بلکه افزایش ۳۲/۹ درصدی میانگین عمق کار در بسامد ۵۰ هرتز در خاک تر نسبت به خاک خشک به جهت کاهش معنی دار نیروی مقاومت کششی ۲۹۵۵ کیلوگرم در شرایط رطوبت بیشتر نسبت به خاک خشک با ۳۴۸۰ کیلوگرم است. اما عرض کار با رطوبت کاملاً رابطه عکس داشته به طوری که کمترین عرض کار در محدوده رطوبتی بالا به میزان ۴۵ سانتی متر و بیشترین عرض کار با ۱۰۹/۳ سانتی متر در خاک خشک است. در شرایط خاک خشک میانگین عرض کار ۸۶/۳ سانتی متر بوده و با روند افزایش ارتعاش به طور کاملاً معنی دار از ۶۷/۳ (بدون ویریه) به ۱۰۹/۳ سانتی متر (با بیشترین ارتعاش) رسیده است اما در شرایط خاک مرطوب میانگین عرض کار ۴۹ سانتی متر بوده و با روند افزایش

از آن جایی که این پژوهش شامل نصب یک سامانه ارتعاش الکتریکی و سپس اجرای تیمارهایی با ترکیب بسامد و رطوبت بود، نتایج عملکرد و تحلیل داده ها به وضوح نشان می دهد، عملکرد سامانه ایجاد ارتعاش برقی، یک نوآوری در روش ایجاد، تغییر و کنترل میزان ارتعاش است، به طوری که در زیرشکن های موجود و مرسوم ارتعاش به صورت رفت و برگشتی یا نوسانی با تامین توان مکانیکی از شافت پی تی او تراکتور هستند، میزان ارتعاش وابسته به سرعت دورانی پی تی او و دارای محدودیت است. در مجموع سامانه ایجاد ارتعاش معرفی شده با استفاده از یک موتور ویریه الکتریکی، مدیریت و کنترل ارتعاش توسط راننده یا اپراتور با محدوده ای گسترده تر به آسانی میسر شده و در صورت نصب و به کارگیری حسگرهایی جهت سنجش آنالین پارامترهای عملکردی و عملیاتی (ماشین و خاک) و طراحی مدار الکترونیکی اعمال ارتعاش نرخ متغیر در راستای الکتریفیکاسیون و بهینه سازی فراهم شده است. همچنین از نتایج بارز دیگر سامانه ارتعاش برقی و مستقل از پی تی او محدودیت های سرعت پیشروی بسیار کمتر شده و مشکلاتی همچون انتقال ارتعاش به تراکتور و راننده ناشی از سیستم های مکانیکی که از نظر استهلاک فنی، بازدهی و موارد ارگونومیکی قابل توجه است نیز به طور معنی داری کاهش می یابد. نتایج بررسی اثرات ارتعاش عامل خاک ورز یا همان ساق زیرشکن از طریق تغییر بسامد سامانه ارتعاشی برقی در دو شرایط یا

ارتعاش از ۴۵ سانتی‌متر (بدون ویبره) با شیب ملایم‌تری به ۵۱/۳ سانتی‌متر (ارتعاش ۴۰ هرتز) رسیده و بین ارتعاش ۴۰ و ۵۰ هرتز نیز اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. لذا ارتعاش نقش مهم‌تر و موثرتری بر عرض کار در محدوده خاک خشک دارد به‌طوری‌که اعمال بیشترین ارتعاش تا ۶۰ درصد عرض کار را نسبت به حالت بدون ارتعاش بالا می‌برد که موجب افزایش ظرفیت زراعی خاک‌ورز است. بنابراین در تحلیل نتایجی که هم عمق و هم عرض کار واکنش متفاوت و عکس همدیگر نسبت به رطوبت دارند توجه به مساحت خاک به‌هم‌خورده از دیدگاه کیفیت و کارایی زیرشکن‌زنی حایز اهمیت است همچنین پارامتر بسیار مهم عمق بحرانی critical dept پس از عملیات خاک‌ورزی و بخصوص در عملیات زیرشکنی و بطور خاص در مزارع نیشکر به دلیل ماهیت کار و تردد زیاد ادوات و تراکتورهای سنگین روی خاک (گاها در رطوبت بالا) بسیار قابل توجه است. چراکه عمق بحرانی عمقی است که پایین‌تر از آن فقط کانالی به اندازه تیغه زیرشکن و فشرده‌شده ایجاد می‌شود بنابراین همواره عمق زیادتر نمی‌تواند نکته مثبتی باشد مگر این که گسیختگی خاک ایجاد گردد، یا به عبارتی پارامتر سطح خاک به‌هم‌خورده متناسب باشد. در خاک خشک و بالاترین میزان ارتعاش (R_{1F5}) مساحت خاک به‌هم‌خورده 3734 سانتی‌متر مربع است که کمترین نیروی کششی ویژه را نیز دارد یعنی $91/48$ کیلو نیوتن بر متر مربع است و در این تیمار عمق کار $50/66$ سانتی‌متر است به عبارتی عمق بحرانی در محدوده ۵۰ سانتی‌متری است لذا خاک هرچه خشک‌تر و میزان ارتعاش نیز بالاتر برود کارایی زیرشکنی رو به بهبودی است. درمجموع تحلیل داده‌های این تحقیق نشان داد که در رطوبت بالا عمق کار افزایش، عرض کار و اثربخشی زیرشکن ارتعاشی کاهش می‌یابد، بنابراین باید در انجام زیرشکنی به میزان رطوبت توجه ویژه شود، میزان ارتعاش در این تحقیق از طریق عامل بسامد از سطوح صفر (بدون ارتعاش) تا ۵۰ هرتز (بیشترین ارتعاش) متغیر بود در سطح ۱٪ روی شاخص‌های عملکردی همچون عرض و عمق کار و سطح مقطع خاک به‌هم‌خورده خاک و نیروی کششی ویژه تاثیر معنی‌داری دارد و در شرایط کمترین رطوبت و بالاترین بسامد، بیشترین اثربخشی حاصل گردید یعنی عرض، عمق کار و سطح خاک به‌هم‌خورده افزایشی و نیروی کششی ویژه کاهش بود و بیشترین نیروی کششی در کمترین بسامد و شرایط خاک خشک (محدوده پایین رطوبت) رخ می‌دهد. بنابراین در عملیات زیرشکنی انتخاب زمانی که خاک در محدوده رطوبتی پایین باشد و به‌کارگیری شیوه ارتعاش با بسامد بالاتر مساحت خاک به‌هم‌خورده و گسیختگی آن بیشتر شده و از طرفی کاهش نیروی کششی ویژه لازم موجب بهبود کارایی زیرشکن ارتعاشی است و فراهم شدن امکان تغییر و کنترل میزان ارتعاش با سامانه ارتعاش برقی نصب‌شده، دسترسی به ارتعاش بهینه در خاک‌هایی با بافت متفاوت برای رسیدن به حداکثر کارایی با اهداف متنوع همچون مصرف انرژی و پارامترهای عملکردی

تراکتور- خاک‌ورز میسر می‌گردد. همچنین نظر به این که در مزارع نیشکر استان خوزستان یکی از مهم‌ترین عملیات‌ها، استفاده از زیرشکن‌ها برای مقابله با فشردگی خاک در سطح سالانه ده‌ها هزار هکتار به‌طور مرسوم با دستگاه‌های سنگین همچون بلدوزر D6 و D8 که در واقع ماشین‌آلات عمرانی هستند با صرف هزینه‌ها و مصرف انرژی فراوان است. بررسی سوابق نیز نشان می‌دهد بافت سنگین خاک، عمق کار زیاد، رطوبت به شدت غیر قابل کنترل در عمق و شرایط ورود به عمق بحرانی در زیر ۵۰ سانتی‌متر است و این الگوی مرسوم مساحت کل سطح خاک دست‌نخورده از نظر زیرشکنی در هر مزرعه به‌طور متوسط ۶۰ درصد در عمق ۶۵ تا ۸۵ سانتی‌متری با دو پاس عمیق و نیمه‌عمیق است و از نظر فنی زیرشکنی با بلدوزر به جا ملندن کلوخه‌های بزرگ پس از عملیات زیرشکنی و افزایش تعداد پاس‌های خاک‌ورزی ثانویه جهت خرد کردن این کلوخه‌هاست. که گاها به ده پاس دیسک‌زنی هم منجر می‌شود.

در این تحقیق به دلیل نوع تراکتور و شرایط لاستیک‌های آن و همچنین لایه هارد پهن با وزن مخصوص ظاهری $1/72$ گرم بر سانتی‌متر مکعب، در عمق ۵۰ سانتی‌متری امکان عمق بیشتر وجود نداشت به‌همین خاطر در شرکت‌های کشت و صنعت نیشکر خوزستان که تراکتورهای بالای ۲۰۰ اسب بخار و سنگین موجود است چنانچه از شیوه ارتعاش و فناوری معرفی‌شده در این تحقیق بر زیرشکن‌ها استفاده نمایند علاوه‌بر افزایش عمق بحرانی کارایی عملیات زیرشکنی ارتقا یافته و علاوه بر کاهش هزینه‌ها و انرژی مصرفی با یک مدیریت و نظام صحیح خاک‌ورزی مبتنی بر نتایج این تحقیق و تحقیقات مشابه طی چند سال معضل فشردگی که یکی از عوامل اصلی کاهش تولید است کاهش خواهد یافت.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از رساله دکتری گروه مهندسی مکانیزاسیون و ماشین‌های کشاورزی از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان می‌باشد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان این مقاله وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

ابراهیم صیدی: اجرای آزمایش‌ها، جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، استخراج و تهیه متن اولیه
نواب کاظمی: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، ویرایش متن،

References

1. Abbaspour-Gilandeh, Y., & Sedghi, R. (2015). Predicting soil fragmentation during tillage operation using fuzzy logic approach. *Journal of Terramechanics*, 57, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2014.12.002>
2. Abbaspour Gilandeh, Y., Ahani, M., Askari Asli Ardeh, E., Rasooli Sharabiani, V., & Sofalian, O. (2010). Design, fabrication and evaluation of a tractor-mounted soil cone penetrometer with multiple probes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 11(1), 19-34. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26454531.1389.11.1.2.1>
3. Ahmadi, I. (2017). Evaluation of a chisel plow draft force and power estimation as based on the required mechanical laws. *Iranian Journal of Biosystems Engineering (Iranian Journal of Agricultural Sciences)*, 47(4), 625-632. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.60256>
4. Al-Rajabo, S., Hilal, Y. Y., & Rajab, R. H. (2021). Investigation on the application of subsoiler vibration to reduce the energy requirement. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 653, No. 1, p. 012040). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/653/1/012040>
5. Ariz, A., & Safir Zadeh, S. (2021). Comparison of the efficiency of three types of subsoiler on the soil of sugar cane. *Iranian Journal of Promotional Science Society of Sugarcane Technologists*, 11(56), 31-39. [in Persian].
6. Andekaeizadeh, K., Sheikhdavoodi, M. J., & Khorasani Fardavani, M. E. (2017). The selection of best tillage implements in terms of energy use efficiency using simple additive weighting methodology. *Journal of Agricultural Machinery*, 7(1), 37-47. [in Persian]. <https://doi.org/10.22067/jam.v7i1.48464>
7. Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 59-68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>
8. Croitoru, S., Vladut, V., Marin, E., Matache, M., & Dumitru, I. (2016). Determination of subsoiler's traction force influenced by different working depth and velocity. In *Proceedings of the 15th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"* (Vol. 15, pp. 817-825). Jelgava, Latvia.
9. Friso, D. (2025). A study of forced vibrations with nonlinear springs and dry friction: Application to a mechanical oscillator with very large vibrating blades for soil cutting. *Vibration*, 8(1), 10. <https://doi.org/10.3390/vibration8010010>
10. Ghasemi Abdoalmalaki, Y., Ghajar Sepanlou, M., & Bahmanyar, M. A. (2015). Effects of different methods of tillage on some physical characteristics of soil. *Iranian Journal of Soil Research*, 29(3), 309-320. [in Persian]. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22287124.1394.29.3.6.8>
11. Goudarzi, B., Kazemi, N., & Asoodar, M. A. (2021). Effect of rotary vibration by electric power, on tillage performance and efficiency of subsoiler. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 22(78), 19-38. https://amsr.areeo.ac.ir/article_123112.html
12. Gowripathi Rao, N. R. N. V., Chaudhary, H., & Sharma, A. K. (2019). Optimal design and analysis of oscillatory mechanism for agricultural tillage operation. *SN Applied Sciences*, 1(9), 1003. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1025-z>
13. Gunn, J. T., & Tramontini, V. N. (1955). Oscillation of tillage implements. *Agricultural Engineering*, 36(11), 725-729.
14. Hamzeh Dost, M., Mirabzadeh, A., Zarei, S., & Haji Sharfi, H. (2016). Irrigation water volume delivery and flow rate measurement in sugarcane farms: Case study of Amir Kabir Sugarcane Production and Industry [Conference presentation]. 5th National Conference on Management of Irrigation and Drainage Networks and 3rd National Irrigation and Drainage Congress of Iran, Ahvaz, Iran. [in Persian].
15. Hemmat, A., Sadegh Nejad, H., & Ali Moradi, R. (2000). Draft of vibrating-share subsoiler in vibrating and non-vibrating mods and its effect on soil physical properties. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 31(1), 127-146. [in Persian]. https://jijas.ut.ac.ir/article_17189
16. Kanyawi, N., & Shahgholi, G. (2018). Modeling the effect of different oscillation angles on the oscillatory tine performance using Discrete Element Method. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 49(2), 181-194. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2018.216690.664853>
17. Kazemi, N., & Jafari, S. (2024). Study of some Soil Physical Characteristics and Soil Compaction Using Accurate Measuring Machine and Optimizing Subsoiling Operations in Sugarcane Fields: A Precision Agriculture Approach. *Journal of Agricultural Mechanization*, 9(2), 1-15. [in Persian]. <https://doi.org/10.22034/jam.2024.59356.1263>
18. Li, X., Fu, J., Zhang, D., Cui, T., & Zhang, R. (2012). Experiment analysis on traction resistance of vibration subsoiler. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(1), 32-36. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.007>
19. Mahohi, A., & Khatinzade, H. A. (2021). Evaluation of subsoiling depth of fields of ratoon cane on some soil and

- plant indices. *Applied Soil Research*, 9(3), 134-146. [in Persian].
20. Osman, A. N., & Zhang, D. (2013). An oscillating and non-oscillating subsoiler shanks and their influence on traction resistance and soil properties. In 2013 Kansas City, Missouri, July 21-July 24, 2013. American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/aim.20131602809>
 21. Oyeboode, O. O., Andoniaina, R. M., & Shoji, K. (2021). Draft reduction without increase in power requirement using a vertically oscillating model subsoiler. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers*, 83(5), 361-368. https://doi.org/10.11357/jsamfe.83.5_361
 22. Raoufat, M. H., & Kazemi Najafabadi, M. (2007). Performance of a bentleg subsoiler with shallow tines in a clay soil. *Journal of Agricultural Sciences and Techniques and Natural Resources (JWSS)*, 11(41), 117-129. [in Persian]. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763594.1386.11.41.10.2>
 23. Sasaki, C. M., de Moraes Gonçalves, J. L., & da Silva, Á. P. (2007). Ideal subsoiling moisture content of Latosols used in forest plantations. *Forest Ecology and Management*, 243(1), 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.024>
 24. Salahloo, M., Mohammadi Alasti, B., Mardani, A., & Abbasgholipour, M. (2021). Effect of forward speed, working depth and overlay parameters of cultivator tillage on power consumption and draft force. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 51(4), 749-756. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2020.295901.665265>
 25. Sivarajan, S., Maharlooei, M., Bajwa, S. G., & Nowatzki, J. (2018). Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. *Soil and Tillage Research*, 175, 234-243. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.001>
 26. Soeharsono, P., & Setiawan, R. A. (2010). Analytical study of self-excited vibration on single degree of freedom vibratory-tillage. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(6), 61-66.
 27. Stoss, K. J., Sobotzik, J., Shi, B., & Kreis, E. R. (2013). *Tractor power for implement operation—Mechanical, hydraulic, and electrical: An overview* (ASABE Distinguished Lecture Series No. 37, pp. 1–25). St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
 28. Tahmasebi, M., Gohari, M., Sharifi Malvajerdi, A., & Hedayatipor, A. (2023). Development and field evaluation of a horizontal pneumatic sensor equipped with multiple nozzles for on-the-go soil mechanical strength measurement. *Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery*, 12(2), 91-101. [in Persian]. <https://doi.org/10.22034/jrmam.2023.14013.609>
 29. Tang, M., Li, X., Zhang, D., & Wang, W. (2015). The effects of vibrating subsoiling on tractional resistance and soil properties. In 2015 ASABE Annual International Meeting (Paper No. 152188353). American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/aim.20152188353>
 30. Van der Linde, J. (2007). *Discrete element modeling of a vibratory subsoiler* (Master's thesis, University of Stellenbosch). Stellenbosch, South Africa: University of Stellenbosch. <http://hdl.handle.net/10019.1/2865>
 31. Yang, P., Dong, W., Heinen, M., Qin, W., & Oenema, O. (2022). Soil compaction prevention, amelioration and alleviation measures are effective in mechanized and smallholder agriculture: A meta-analysis. *Land*, 11(5), 645. <https://doi.org/10.3390/land11050645>