

اثر سرعت پیشروی و موقعیت حفاظ خاک روتیواتور روی زبری سطح خاک

فرزاد محمدی^۱، محمدرضا ملکی^{۱*} و جلال خدائی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۵
۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
* مسئول مکاتبه mrmaleki@uok.ac.ir

چکیده

دست‌یابی به منضامات کارآمد ادوات خاک‌ورز در اجرای شخم نرخ متغیر در حین حرکت از چالش‌های پیش رو است. تغییر موقعیت حفاظ خاک روتیواتور به‌طور خوار می‌تواند این ابزار خاک‌ورز را برای اجرای شخم نرخ متغیر آماده کند. به این منظور یک سامانه الکترو-هیدرولیک با استفاده از یک مدار کنترل حلقه بسته و نیروی هیدرولیک تراکتور برای ایجاد زبری‌های مختلف به‌وسیله تغییر موقعیت حفاظ خاک روتیواتور مورد استفاده قرار گرفت. در یک آزمایش فاکتوریل ۳×۴ با طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار، اثر سرعت پیشروی و موقعیت حفاظ خاک بر عدد زبری تصادفی (RR) سطح خاک شخم خورده به‌وسیله روتیواتور بررسی شد. میانگین RR ایجاد شده در اثر سرعت‌های پیشروی ۲/۶، ۳/۵ و ۴/۸ کیلومتر بر ساعت به ترتیب ۱/۳۲، ۱/۹۱ و ۲/۶۱ سانتی‌متر و در سه موقعیت حفاظ خاک صفر، ۴۰ و ۸۰ درجه به ترتیب ۱/۴۳، ۱/۹۴ و ۲/۴۶ سانتی‌متر به‌دست آمد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر سرعت پیشروی و موقعیت حفاظ خاک بر شاخص زبری تصادفی در سطح احتمال ۱٪ معنادار است. بنابراین می‌توان اظهار داشت که در صورت کنترل بلادرنگ دو فاکتور سرعت پیشروی و یا موقعیت حفاظ خاک روتیواتور و استفاده از شاخص RR به‌عنوان سیگنال بازخورد کنترل، می‌توان از این وسیله در اجرای شخم نرخ متغیر بهره جست.

واژه‌های کلیدی: پین‌متر، تغییرپذیری مکانی، خاک‌ورزی دقیق، زبری سطح خاک، کشاورزی دقیق

The Effect of Travel Speed and the Position of Rotary Tiller Hood on Soil Surface Roughness

Farzad Mohammadi¹, Mohammad Reza Maleki^{1*} and Jalal Khodaei¹

Received: 9 Nov 2021 Accepted: 25 Jan 2022

¹Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

* Corresponding author: mrmaleki@uok.ac.ir

Abstract

Availability of efficient attachments on tillage implements is one of the challenges in variable-rate tilling concept. Reposition of the rotary tiller's soil hood automatically makes it a practical tool for variable rate plowing. In this study, an electro-hydraulic system using a closed-loop control circuitry and the tractor hydraulic power was utilized to create different roughness by soil hood reposition. The effect of travel speed and soil hood position in creating random roughness (RR) of the resulting soil surface was investigated using a completely randomized design and a 3×4 factorial experiment in 3 replications. The average RR created by the travel speeds of 2.6, 3.5, and 4.8 km/h were 1.32, 1.91, and 2.61 cm, respectively. Similarly, the average of RR created using three soil hood positions of 0, 40, and 80 degrees were 1.43, 1.94, and 2.46 cm, respectively. The analysis of variance showed that the effects of travel speed and soil hood position on random roughness index were significant at the probability level of 1%. Therefore, it can be stated that in the case of real-time control of these two factors and using the RR index as a control feedback signal, a rotary tiller can be implemented to perform variable rate tilling.

Keywords: Pin Meter, Spatial variability, Precision Tillage, Soil Surface Roughness, Precision Agriculture

How to cite:

Mohammadi, F., Maleki, M. R. and Khodaei, J. 2022. *The Effect of Travel Speed and the Position of Rotary Tiller Hood on Soil Surface Roughness*. Journal of Agricultural Mechanization 6 (4):35-45.

۱- مقدمه

اگرچه بسیاری کشاورزی دقیق را همان فناوری نرخ متغیر می‌دانند، اما وسعت آن از رصد کردن مدل‌های هواشناسی (MacRae *et al.*, 2011) تا تنظیمات برخط ماشین‌ها و ادوات کشاورزی (Maguire *et al.*, 2007) گسترده است. برآورد دقیق میزان محصول برداشت شده به‌وسیله کمباین غلات مبتنی بر پایش رطوبت دانه (Maertens *et al.*, 2004) و یا تنظیم نرخ بذرداری بر اساس میزان رطوبت خاک (Hi *et al.*, 2019) از مثال‌های دیگری است که دامنه پایش گیاه تا خاک را در کشاورزی دقیق نشان می‌دهد. صرفه اقتصادی متصور برای تکنیک‌های مورد استفاده در کشاورزی دقیق می‌تواند از مصرف کمتر کودهای دانه‌ای (Maleki *et al.*, 2008a) تا کاهش مصرف انرژی تعریف شود. با این حال درحالی‌که عملیات خاک‌ورزی که بیشترین مصرف انرژی را در مقایسه با سایر عملیات کشاورزی دارد (AI- (Suhairani & Ghaly, 2010) تا حدود زیادی نتوانسته است جایگاه خود را در تعریف کشاورزی دقیق باز کند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تعداد تحقیقات در زمینه خاک‌ورزی دقیق بسیار محدود است (Anthonis *et al.*, 2004; Gohari *et al.*, 2010; Fallahi *et al.*, 2015). یکی از دلایل این امر، پیچیدگی‌های مرتبط با خصوصیات خاک و تغییرپذیری آن است. اگرچه بافت و ساختمان خاک ممکن است دارای تغییر پذیری کمتری باشد (Shannon *et al.*, 2019) اما رطوبت خاک یکی از فاکتورهایی است که به شدت دارای تغییر پذیری مکانی و زمانی است (Fulton *et al.*, 2019). این بدین معنی است که اجرای شخم نرخ متغیر بدون استفاده از حسگرهای پایش برخط خاک در عمل غیرممکن می‌نماید، چون تغییر رطوبت تغییرات زیادی در سایر فاکتورهای خاک ایجاد خواهد کرد. در کنار این مهم، توانایی استفاده از فناوری شخم نرخ متغیر به ظرفیت ادوات شخم در تغییر نرخ شخم نیز بستگی دارد (Sharda *et al.*, 2019). درحالی‌که می‌توان با تغییر برخط دور موزع یک کودکار، نرخ کودکاری را تنظیم کرد (Maleki *et al.*, 2008b)، تغییر نرخ شخم بسیاری از ادوات شخم به‌سہولت میسر نیست. شاید تغییر عمق شخم زیر شکن با پایش مقاومت افقی خاک از جمله مواردی است که مطالعات موفق‌تری را به‌همراه داشته است (Adamchuk *et al.*, 2004; Abbaspour-Gilandeh & Rahimi-Ajdadi, 2016). بنابراین از چالش‌های اساسی در راستای فراهم آوری مقدمات اجرای شخم نرخ متغیر، یکی یافتن شاخصی مناسب به‌منظور تعیین بلادرنگ کیفیت شدت خاک‌ورزی و مینا قرار دادن داده‌های حاصل از آن به‌منظور تغییر بلادرنگ نرخ شخم است و دیگری امکان تغییر نرخ شخم به‌وسیله ابزار خاک‌ورز است. سرعت پیشروی، عمق کار، سرعت چرخش ادوات فعال و منظمات کنترل شدت شخم از عوامل مؤثر در عملیات خاک‌ورزی است (Sharda *et al.*, 2019).

اگرچه استفاده از تغییر عمق زیر شکن بر اساس پایش مقاومت خاک و یا انجام عملیات مرتبط مبتنی بر پهنه مقاومت خاک (Schule

(Koller, 2008) در عمل استفاده محدودی خواهد داشت، اما از آنجا که بیشترین انرژی مصرفی در عملیات خاک‌ورزی را دارد، توجه محققین به آن را توجیه خواهد کرد. یکی دیگر از ادوات شخم که در راستای انجام شخم نرخ متغیر مورد توجه قرار گرفته است، روتواتور است. گزارش شده که در صورت مناسب بودن شرایط، روتواتور جایگزین مناسبی برای ادوات خاک‌ورزی اولیه و ثانویه است (Beh- (Ayin & Sheykhdavoudi, 2003; Dobbratz *et al.*, 2019). به همین دلیل مطالعه روی عملکرد روتواتور در راستای آماده‌سازی آن برای اجرای شخم نرخ متغیر صورت گرفته است (Mohammadi *et al.*, 2022; Riegler-Nurscher *et al.*, 2020). جهت کنترل میزان خردشدگی خاک به‌وسیله روتواتور، سرعت محور گردنده، سرعت حرکت تراکتور، تغییر موقعیت حفاظ خاک و تعداد تیغه‌ها به‌عنوان عوامل تغییر میزان شخم به‌کارگرفته می‌شود (Mansourirad, 2013). بنابراین جهت اجرای شخم نرخ متغیر، این گاوآهن می‌تواند جایگاه ویژه‌ای داشته باشد. کارکرد روتواتور از نقطه نظرهای متفاوتی مانند میزان خرد شدن خاک، میزان ناهمواری سطح زمین پس از عملیات خاک‌ورزی و میزان برگرداندن بقایای گیاهی قابل بررسی است و توسط تعدادی از محققین مورد مطالعه قرار گرفته است.

(Tabatabae Kolor & Kiani (2011) عملکرد یک دستگاه روتواتور چند منظوره را مورد تحلیل و ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش پارامترهای اصلی مانند: سرعت پیشروی تراکتور و سرعت دورانی تیغه‌ها و تأثیر آن‌ها بر کیفیت عملیات خاک‌ورزی مورد تحلیل نظری و عملی قرار گرفت. نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که سرعت پیشروی و سرعت دورانی تیغه‌ها بر ضخامت لایه بریده شده خاک و در نتیجه میزان خرد شدن آن تأثیر دارد.

(Rajabi-Vandchali *et al.* (2015) تأثیر عوامل مؤثر روی عملکرد چهار وسیله خاک‌ورز از جمله روتواتور را بررسی کردند. در این مطالعه رطوبت عامل اصلی و نوع ابزار و سرعت پیشروی به‌عنوان عوامل فرعی در نظر گرفته شد. نتایج کار نشان داد، کاهش چگالی ظاهری بوسیله روتواتور بیشتر از سایر ادوات حاصل می‌گردد.

بررسی تحلیلی تأثیر پارامترهای طراحی روتواتور روی یکنواختی شیارهای کف شخم توسط (Khodabakhshi *et al.* (2012) نیز انجام شد. آن‌ها دریافتند با افزایش سرعت زاویه‌ای محور دوار و کاهش سرعت پیشروی، ارتفاع شیارهای کف شخم کاهش یافته و کف شیار شخم یکنواخت‌تر می‌گردد.

در پژوهشی دیگر (Elahifard *et al.* (2008) به بررسی خرد شدن خاک در روتواتور با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی پرداخته و مشخص نمودند میزان خرد شدن خاک تحت تأثیر عوامل سرعت پیشروی، سرعت دورانی محور دوار، وضعیت استقرار درپوش و محتوای رطوبتی خاک قرار می‌گیرد.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، جهت ارزیابی میزان کارایی و بازده ابزار و ادوات خاک‌ورزی باید شاخصی به‌عنوان معیار کیفیت خاک‌ورزی

زبری یا رابطه بین ارتفاع یک نقطه با همسایگان آن تعیین می‌شود. پارامتر ترکیبی (افقی-عمودی) از هر دو بعد مشخصه زبری سطح خاک تعیین می‌شود. پارامتر مبتنی بر تئوری فراکتال، تعادل بین تغییرات ارتفاع در مقیاس‌های مختلف مکانی (فاصله‌ها) را اندازه‌گیری می‌کند (Martinez-Agirre *et al.*, 2016).

از طرف دیگر، روش‌های اندازه‌گیری ناهمواری سطح خاک را می‌توان با توجه به نوع دستگاه و ابعاد اندازه‌گیری نیز دسته‌بندی نمود. اندازه‌گیری زبری سطح خاک را می‌توان با دو روش تماسی و غیر تماسی تعیین نمود (Jester & Klik, 2005). در روش تماسی وسایل مکانیکی به‌طور مستقیم با خاک تماس برقرار می‌کنند. روش‌های تماسی خود به دو روش زنجیر غلطکی (Saleh, 1993) و روش سوزن‌های اندازه‌گیری یا پین‌متر (Podmore & Huggins, 1981; Kuipers, 1957) تقسیم می‌شوند. در روش غیر تماسی وسایل اندازه‌گیری از سطح خاک فاصله داشته و با سطح خاک تماسی ندارند. اساس این روش‌ها مبتنی بر ارسال امواج به سطح خاک و دریافت آن است. روش‌های اندازه‌گیری با این روش را می‌توان بر اساس نوع حسگر استفاده شده و ابعاد اندازه‌گیری به پنج روش مادون قرمز (Lee & Koval *et al.*, 1986; Ehsani, 2008; Römken *et al.*, 2016; Jester *et al.*, 2009; Marinello *et al.*, 2005) و روش استریوفتوگرامتری (Zribi *et al.*, 2017; Gilliot *et al.*, 2015) و روش راداری ماهواره‌ای (Zribi *et al.*, 2000) دسته‌بندی کرد.

در تعدادی از مطالعات، از شاخص زبری برای ارزیابی و مقایسه کیفیت شخم ادوات مختلف شخم با یکدیگر استفاده شده است. (García Moreno *et al.*, 2008) تفاوت کار سه وسیله خاک‌ورز مختلف شامل غلتک، چپزل و تیلر را در سه مزرعه با خاک متفاوت مطالعه کردند و نشان دادند که زبری سطح خاک به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر ادوات مختلف خاک‌ورزی و نیز بافت خاک تغییر می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر (Martinez-Agirre *et al.*, 2016) به بررسی پارامترهای زبری سطح در خاک با شرایط مختلف خاک‌ورزی با استفاده از یک پروفایل‌متر لیزری پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که مقدار زبری محاسبه شده با افزایش شدت خاک‌ورزی به‌طور معنی‌داری تغییر کرد.

(Arvidsson & Bölenius, 2006) مطالعه‌ای انجام دادند که هدف از آن تعیین میزان رطوبت مناسب در حین عملیات خاک‌ورزی اولیه جهت حصول بهترین بازده شخم و میزان نرم شدگی خاک بود. آن‌ها برای بررسی این موضوع اندازه‌گیری شاخص زبری خاک را با دیگر اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند چگالی حجمی، هدایت هیدرولیکی خاک اشباع شده و خواص بستر بذر مقایسه کردند

تعریف گردد. در این راستا اهداف زیادی برای اجزای شخم مد نظر خواهد بود. به‌عنوان مثال؛ استفاده صحیح از ادوات خاک‌ورزی می‌تواند عامل مهمی در حفظ خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک باشد (Bertol *et al.*, 2004) و یا عامل مؤثر روی ناهمواری‌های سطح خاک محسوب شود (Zobeck & Onstad, 1987). در یک مطالعه نشان داده شد که تغییرات خواص خاک به دلیل خاک‌ورزی، با نوع خاک، نوع وسیله خاک‌ورز، عمق خاک‌ورزی، شرایط فیزیکی خاک در زمان خاک‌ورزی و شرایط اقلیمی در ارتباط است (Chang & Lindwall, 1990). همچنین گزارش شده که میزان خردشدگی خاک تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر سرعت پیشروی ادوات، چگالی خاک و ویژگی‌های مکانیکی خاک است (Sedghi & Abbaspour Gilandeh, 2014). طبیعی است که در اجرای شخم نرخ متغیر، جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل اطلاعات خاک مزرعه لازم است تا بتوان به نحوی از آن‌ها در جهت تغییر نرخ شخم بهره جست. پس از انجام عملیات شخم، سطح خاک دارای ناهمواری و یا پستی و بلندی می‌شود. میزان این ناهمواری علاوه بر بافت و ساختمان خاک به رطوبت خاک وابسته است. ساختار سطحی خاک شخم خورده به کمک برخی پارامترهای مهم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ابعاد خاک‌دانه‌ها، قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها، جرم مخصوص ظاهری خاک، زبری سطح خاک، چگالی حجمی، تعیین هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع و مقاومت به نفوذ خاک پارامترهایی هستند که معمولاً برای ارزیابی کارایی ادوات خاک‌ورز مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرند.

زبری خاک از جمله خواص فیزیکی خاک است که مورد توجه بسیاری از محققین است. مطالعات نشان داده‌اند که پوشش محصولات (Lin & Richards, 2007)، نوع خاک (García Moreno *et al.*, 2008)، اثرات بارندگی و فرایندهای فرسایش آب (Marzahn *et al.*, 2009) و نیز شیوه‌های مختلف خاک‌ورزی (Dalla Rosa *et al.*, 2012; Jensen *et al.*, 2017; Römken & Wang, 1986) می‌تواند زبری سطح خاک را تغییر دهد. به‌طور کلی می‌توان دو نوع زبری جهت‌دار^۱ و زبری تصادفی^۲ را تعریف نمود (Guzha, 2004). نوع اول، بر اثر شیب زمین، توپوگرافی زمین، نوع کاربری و یا به‌کارگیری ادوات مختلف شخم ایجاد می‌شود. نوع دوم زبری بر اثر توزیع مکانی ذرات و ریزدانه‌های خاک روی یک سطح صاف ایجاد می‌شود (Govers *et al.*, 2000; Allmaras *et al.*, 1966) پارامترها و شاخص‌های متعددی برای اندازه‌گیری زبری سطح خاک پیشنهاد شده است. به‌طور کلی پارامترهای تعیین زبری سطح خاک را می‌توان به چهار دسته‌ی عمودی، افقی، ترکیبی (افقی-عمودی) و فراکتال تقسیم نمود (Smith, 2014). پارامتر عمودی تعیین زبری خاک با اندازه‌گیری ابعاد عمودی زبری یا بزرگی تغییرات ارتفاع نقاط در سطح خاک تعیین می‌شود. پارامتر افقی تعیین زبری خاک بدین معنی است که بعد افقی

1. Oriented roughness

2. Random roughness (RR)

و نشان دادند که زبری در مقایسه با چگالی حجمی خاک می‌تواند شاخص بهتری باشد.

García Moreno *et al.* (2008) در پژوهشی اثر خاک‌ورزی و نوع خاک را روی زبری سطح خاک در شرایط آب و هوایی نیمه خشک بررسی کردند. آزمایش‌ها با سه نوع ابزار خاک‌ورز (غلتک، چپزل و روتیواتور) برای کار در سه نوع خاک (خاک لومی شنی رسی از دو محل مختلف و لومی شنی از یک محل) صورت گرفت. آن‌ها از پارامتر زبری سطح برای مقایسه‌ی اثر ابزار خاک‌ورزی روی خاک استفاده کردند. نتایج نشان داد که برای تعیین اثر نوع ابزار خاک‌ورز و نوع خاک بر میزان ناهمواری سطح خاک، زبری سطح شاخصی توانمند است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اندازه‌گیری زبری خاک عمده‌تاً به‌منظور ارزیابی ادوات خاک‌ورز مورد مطالعه قرار گرفته است و از آن به‌عنوان شاخصی برای تغییر نرخ شخم استفاده نشده است. از آنجا که زبری سطح خاک را می‌توان به‌صورت زمان واقعی در حین حرکت خاک‌ورز اندازه‌گیری کرد؛ لذا این شاخص می‌تواند در اجرای خاک‌ورزی به‌صورت نرخ متغیر مورد استفاده قرار گیرد. اما سوالی که مطرح است این است که آیا اندازه‌گیری زبری سطح خاک بعد از عبور خاک‌ورز از ناحیه تحت اندازه‌گیری عملاً فایده‌ای دارد. پاسخ این سوال مثبت است چراکه زبری سطح شخم خورده حاوی اطلاعات وسیعی از خاک از جمله رطوبت، بافت خاک، میزان کلس و بقایای گیاهی و شدت ابزار خاک‌ورز است (Mohammadi *et al.*, 2022) و در فاصله کوتاه شدت تغییرات سریع نخواهد داشت (Sharda *et al.*, 2019).

باتوجه به پتانسیل روتیواتورها، این وسیله می‌تواند به‌منظور دستیابی به عملیات شخم نرخ متغیر مفید واقع شود و با کنترل برخی از پارامترهای مؤثر، می‌توان آن را به یک خاک‌ورز نرخ متغیر تبدیل کرد، که بررسی‌های کامل‌تری در این خصوص لازم خواهد بود. از طرفی دیگر باتوجه به اینکه زبری سطح خاک این قابلیت را دارد که به‌صورت زمان واقعی اندازه‌گیری شود، می‌تواند شاخص مناسبی جهت استفاده در اندازه‌گیری شدت عملیات خاک‌ورزی به‌صورت زمان واقعی باشد. بنابراین، هدف از انجام این مطالعه بررسی تأثیر سرعت‌های پیشروی مختلف و موقعیت‌های مختلف حفاظ خاک روتیواتور روی زبری ایجاد شده به‌منظور استفاده وسیله در عملیات شخم نرخ متغیر است.

۲- مواد و روش‌ها

برای راه‌اندازی روتیواتور گلدونی مدل C40 ساخت کشور ایتالیا از یک تراکتور مدل ITM-۲۸۵ چهار چرخ محرک ساخت کارخانه تراکتورسازی کردستان استفاده شد. تمام تنظیمات تراکتور طبق کاتالوگ آن صورت گرفت. طول، عرض و ارتفاع روتیواتور به ترتیب

۱۲۷، ۶۰ و ۹۵ سانتی‌متر و به جرم ۱۸۲ کیلوگرم بود. روتیواتور دارای ۲۴ عدد تیغه C شکل روی شش فلانچ با عرض و عمق کار به ترتیب ۱۰۰ و ۱۵ سانتی‌متر است. دور محور دوار روتیواتور در ۵۴۰ دور بر دقیقه محور تو اند هی تراکتور، ۱۷۰/۵ دور بر دقیقه است. به‌منظور بررسی تأثیر سرعت پیشروی و موقعیت حفاظ خاک روی زبری سطح خاک یک سامانه کنترل خودکار موقعیت حفاظ خاک برای روتیواتور مطابق شکل ۱ طراحی و ساخته شد. برای تغییر موقعیت حفاظ از یک سامانه الکترو-هیدرولیکی استفاده شده است. این سامانه سیگنال لازم برای تغییر موقعیت در بچه را از یک برنامه تدوین شده در محیط لیبویو تحویل گرفته و با باز کردن یک شیر سولونوئیدی از یک مدار هیدرولیکی مسیر روغن هیدرولیک را به سمت یک جک هیدرولیکی برقرار و عمل تغییر وضعیت حفاظ صورت می‌گرفت. کنترل دقیق و ثابت حفاظ خاک نیازمند دریافت یک سیگنال بازخورد از موقعیت لحظه‌ای آن است. به همین منظور از یک اینکودر نوری^۱ ۶۰۰ پالسی (Optic Encoder, E.K.T^۲ Co., China) روی لولای آن استفاده شد (شکل ۱-ب). در حین کار سامانه الکترو-هیدرولیکی، این اینکودر به‌طور پیوسته و به‌صورت حلقه بسته سیگنال موقعیت حفاظ خاک را برای واحد کنترل ارسال می‌کند (شکل ۲). همچنین برای محاسبه دقیق سرعت پیشروی از یک اینکودر نوری ۶۰۰ پالسی دیگر روی یک چرخ زمین گرد استفاده شد (شکل ۱-ج). چرخ به‌وسیله یک شاسی لولایی طوری به بدنه روتیواتور متصل شد، تا بتواند از ناهمواری سطح خاک پیروی کند. از یک فنر ضربه‌گیر جهت حذف ارتعاش چرخ بر اثر ضربه در زمان عملیات خاک‌ورزی نیز استفاده شد. برای محاسبه دقیق محیط چرخ زمین گرد و حذف تأثیر فشار فنر و آج‌های چرخ در زمان عملیات خاک‌ورزی بر اندازه محیط چرخ، آزمایشی در چهار سرعت پیشروی مختلف ۱/۳، ۲/۶، ۳/۵ و ۴/۸ کیلومتر بر ساعت با طول مسیرهای پیشروی مختلف در مزرعه انجام شد. برای هر سرعت سه تکرار انجام شد و میانگین محیط چرخ زمین گرد ۱۲۹/۷۳ سانتی‌متر محاسبه شد.

به‌منظور کنترل جهت جریان روغن بین مسیرهای ارتباطی از یک شیر کنترل جهت چهار راهه سه وضعیتی وسط باز با برگشت فنری و تحریک یک بوبین سلونوئیدی با اندازه ۰/۲۵ اینچ (DSG-02-3C60) برای رمزگشایی پالس‌های اینکودرها و ارسال داده‌های آن‌ها به رایانه از یک برد آردوینو مدل Mega 2560 استفاده شد. برای ارسال فرمان به شیر سلونوئیدی از کارت DAQ^۳ (USB-4704, Advantech Co., Taiwan) که می‌تواند اطلاعات آنالوگ یا دیجیتال را با سرعت نمونه

1. Optic encoder

2. Electronics Katrangi Trading

3. Data acquisition

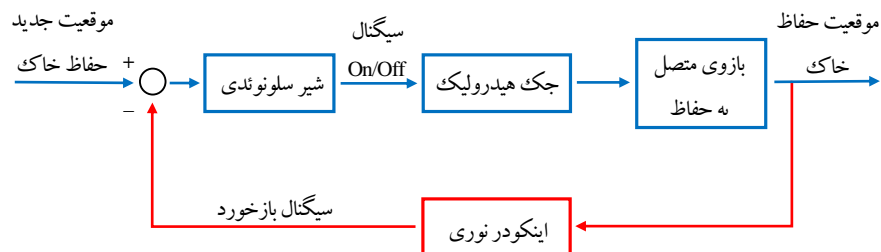
خاک قبل از انجام آزمایش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. تغییر موقعیت در دو مرحله باز و بسته شدن ارزیابی شد و موقعیت درخواست شده و موقعیت به‌دست آمده به‌وسیله جک هیدرولیکی بررسی شد. ضرایب تبیین برای هر دو حالت باز و بسته شدن حفاظ خاک و در سرعت‌های پیشروی مختلف بیش از ۰/۹۹ به‌دست آمد.

برداری بالا (۴۸ kS/s) از حسگرها یا دستگاه‌های دیگر دریافت نماید استفاده شد. با توجه به این که ولتاژ لازم برای تحریک شیر سلونوئیدی ۱۲ ولت DC با دو آمپر جریان مصرفی بود، از دو عدد رله حالت جامد (SSR^۱) DC به DC به‌منظور ارسال فرمان از کارت USB-4704 به شیر سلونوئید استفاده شد. این سامانه الکترو-هیدرولیک کنترل حفاظ



شکل ۱- سامانه الکترو-هیدرولیک کنترل موقعیت حفاظ روتیواتور. (a) ترکیب تراکتور-روتیواتور، (b) اینکودر نوری نصب شده روی لولای حفاظ خاک و (c) اینکودر نصب شده روی چرخ زمین‌گرد

Fig 1. Electro-hydraulic system of rotary tiller hood control. a) The combination of tractor and rotary tiller, b) Optical encoder installed on the tiller hood, and c) Optical encoder installed on the ground wheel



شکل ۲- دیاگرام بلوکی مدار کنترل حلقه بسته جهت کنترل سامانه الکترو-هیدرولیک

Fig 2. Block diagram of closed-loop control circuitry to control electro-hydraulic system

تصادفی در طول روزهای آزمایش به‌منظور محاسبه رطوبت از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر گرفته شدند.

مقاومت مکانیکی خاک نیز برای عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر با استفاده از دستگاه فروسنج مخروطی عمودی با سطح مقطع قاعده مخروط یک اینچ مربع و زاویه نوک مخروط ۳۰ درجه (شرکت ابزار آزمایش آروین، استاندارد ASTM-D1558) به‌عنوان شاخص مخروطی ارزیابی شد. نوع خاک لومی رسی با ۲۷/۵۶ درصد رس، ۳۲/۷۲ درصد سیلت، ۳۹/۷۲ درصد شن و با رطوبت نسبی ۱۷/۸۳-۱۴/۳۱ درصد تعیین شد. شکل ۳ نمودار تغییرات میانگین شاخص مخروطی خاک در مقابل

۲-۱- مشخصات مزرعه

به‌منظور انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای، قطعه زمینی با ابعاد ۷۰×۲۴۰ متر از زمین‌های مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان واقع در دشت دهگلان با موقعیت جغرافیایی زمین مزرعه (47°18'21.8" E)، (35°18'13.6" N) و با ارتفاع ۱۸۶۷ متر از سطح دریا در نظر گرفته شد. مزرعه دارای بقایای گیاهی در حد متوسط بود. رطوبت خاک مزرعه با استفاده از روش آن بر اساس استاندارد ISO 17892-1: 2014 تعیین شد. نمونه‌های خاک به‌طور

^۱. Solid state relays

انحراف از معیار ارتفاع‌های سطح خاک تعریف می‌شود (Kamphorst *et al.*, 2000; Hansen *et al.*, 1999). که از رابطه (۱) قابل محاسبه است.

$$RR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2}{N-1}} \quad (1)$$

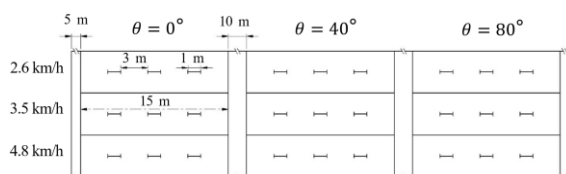
که در آن RR انحراف از معیار ارتفاع‌ها به سانتی‌متر، N تعداد داده‌های ارتفاع، Z_i ارتفاع مربوط به مرحله i ام به سانتی‌متر و \bar{Z} میانگین تمام داده‌ها به سانتی‌متر است. زبری تصادفی در مطالعات متعددی به‌عنوان روشی ساده و قابل اتکا جهت تعیین زبری سطح خاک استفاده شده است (Kamphorst *et al.*, 2015; Zobeck & Onstad, 1987).

۲-۳- آزمون مزرعه‌ای بررسی اثر سرعت و موقعیت حفاظ خاک بر زبری سطح

آزمایش‌های مزرعه با قرار دادن حفاظ خاک روتیواتور در سه موقعیت صفر، ۴۰ و ۸۰ درجه و در سه سرعت پیشروی ۲/۶، ۳/۵ و ۴/۸ کیلومتر بر ساعت انجام شد. از آنجا که روتیواتور مورد استفاده از نوع پشت تراکتوری سوار مخصوص تراکتورهای گلدونی کمرشکن باغی بود، استفاده از سرعت‌های پیشروی بیشتر مقدور نبود. کرت آزمایشی شامل پیمودن یک مسافت ۲۵ متری با پهنايي برابر با عرض کار روتیواتور در نظر گرفته شد. از این مسافت، داده‌های پنج متر ابتدایی و پنج متر پایانی به‌منظور اطمینان از قرارگیری قطعی روتیواتور در وضعیت تنظیم مد نظر مورد استفاده قرار نگرفت. شکل ۴ الگوی پیاده شده در مزرعه برای انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

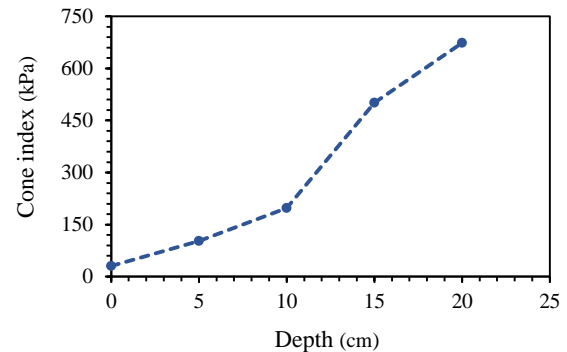
در هر کرت آزمایش (۱۵ متری) داده‌های ارتفاع ناهمواری سطح خاک به‌وسیله‌ی پین‌متر در سه کرت متوالی یک متری با فاصله سه متر از هم برای محاسبه زبری سطح خاک با محاسبه RR ثبت شدند (شکل ۵). برای حذف خطای ناشی از شیب زمین و تأثیر آن در محاسبه ارتفاع سطح اندازه‌گیری شده، پایه و ریل پین‌متر در هر بار اندازه‌گیری تراز طولی شدند.

در یک آزمایش فاکتوریل 3×4 با طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار، اثر سرعت‌های پیشروی مختلف (۲/۶، ۳/۵ و ۴/۸ کیلومتر بر ساعت) و سه موقعیت صفر، ۴۰ و ۸۰ درجه بر RR ایجاد شده به‌وسیله روتیواتور بررسی شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و بررسی نتایج آزمایش از نرم‌افزار SPSS-22.0.0.0 و اکسل ۲۰۱۶ استفاده شد.



شکل ۴- الگوی طرح آزمایشی پیاده شده در مزرعه
Fig 4. Experimental pattern in field test

عمق خاک را نشان می‌دهد. در تمام آزمایش‌های مزرعه‌ای دور موتور تراکتور روی ۱۶۸۴ دور بر دقیقه به‌منظور ایجاد فشار روغن کافی برای عملکرد صحیح سامانه الکترو-هیدرولیک و تأمین سرعت پیشروی ثابت در دنده‌های مختلف و به تبع آن تأمین سرعت محور توندهی ۵۴۰ دور بر دقیقه، ثابت نگاه داشته شد. عمق کار روتیواتور نیز روی ۱۵ سانتی‌متر تنظیم شد.



شکل ۳- تغییرات میانگین شاخص مخروطی با عمق خاک مزرعه مورد آزمایش

Fig 3. The cone index mean versus soil deep of the experimental field

۲-۲- اندازه‌گیری زبری سطح خاک

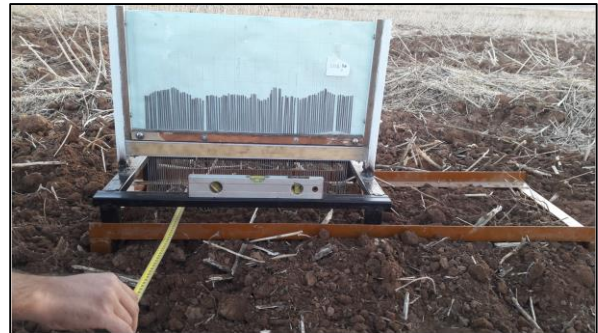
اندازه‌گیری زبری سطح خاک شامل دو مرحله بود. نخست، جمع‌آوری داده‌های ارتفاع ناهمواری سطح خاک، سپس تجزیه و تحلیل داده‌ها بر اساس یکی شاخص‌های توصیف کننده زبری. برای دستیابی به گام نخست، اقدام به اندازه‌گیری ارتفاع سطوح ناهموار خاک با استفاده از یک پین‌متر شد. بر اساس اصول مطروحه در منابع علمی (Wagner *et al.*, 1981; Podmore & Huggins, 1991) اقدام به ساخت یک پین‌متر متناسب با آزمایش‌های لازم در این پژوهش شد. نمونه ساخته شده شامل یک ردیف پین با قطر دو میلی‌متر و به طول ۳۰ سانتی‌متر بود. پین‌ها در یک قاب قرار گرفتند که در آن قابلیت حرکت عمودی را داشتند تا روی ناهمواری‌های سطح خاک قرار گیرند. قاب دستگاه با ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر از قوطی فولادی با سطح مقطع 5×2 سانتی‌متر ساخته شد. این ابزار طوری طراحی شد که بتوان پس از اندازه‌گیری ناهمواری، بدون بهم خوردن موقعیت پین‌ها آن را جابه‌جا کرد. این عمل با تنظیم موقعیت فک‌های نگه‌دارنده پین‌ها به‌وسیله‌ی چهار عدد پیچ صورت گرفت. برای اندازه‌گیری دقیق ارتفاع پین‌ها، یک صفحه کاغذ میلی‌متری شطرنجی با دقت یک میلی‌متر پشت پین‌ها روی یک صفحه چوبی نصب شد. تعداد ۱۰۰ پین با فاصله ۵ میلی‌متر نسبت به هم روی یک ردیف قرار گرفتند. دستگاه با یک بار قرارگیری روی سطح خاک می‌توانست ارتفاع ناهمواری یک راستا از سطح خاک را به طول ۵۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری کند.

زبری تصادفی (RR)، یکی از شاخص‌های معمول برای توصیف زبری سطح است (Allmaras *et al.*, 1966). زبری تصادفی به‌عنوان

اختلاف معناداری در ایجاد زبری وجود دارد. بنابراین از فاکتور سرعت پیشروی می‌توان برای تغییر و کنترل شدت خاک‌ورزی به‌وسیله روتیواتور استفاده کرد. یعنی با افزایش سرعت ترکتور می‌توان زبری ایجاد شده به‌وسیله روتیواتور را کاهش داد. توجه شود که از آنجا که دور محور روتیواتور تابع سرعت محور تواندهی است و این محور برای راه‌اندازی روتیواتور باید در وضعیت موتورگرد باشد، خللی در گردش فلانج دستگاه ایجاد نخواهد کرد.

این نتیجه با نتایج پژوهشی که توسط Tabatabae Koloor & Kiani (2011) برای عملکرد یک دستگاه روتیواتور چند منظوره مورد تحلیل و ارزیابی مزرعه‌ای قرار گرفت مطابقت دارد. آنها تأثیر سرعت پیشروی تراکتور و سرعت دورانی تیغه‌ها را بر کیفیت عملیات خاک‌ورزی مورد تحلیل نظری و عملی قرار دادند. نتایج تحلیل‌های آن‌ها نشان داد که سرعت پیشروی و سرعت دورانی تیغه‌ها بر ضخامت لایه بریده شده خاک و در نتیجه میزان خرد شدن آن تأثیر دارد.

همچنین نتایج پژوهش Beh-Ayin & Sheykhdavoudi (2003) نشان داد که تأثیر سرعت پیشروی و وضعیت‌های مختلف استقرار سرپوش بر میزان خرد شدن و برگردان خاک بسیار معنی‌دار بود و با افزایش سرعت و باز نمودن سرپوش هر دو پارامتر کاهش یافت. اثر دو متغیر یاد شده در آزمایش فوق روی هموار بودن سطح خاک معنی‌دار نبود، ولی با کاهش سرعت و باز نمودن سرپوش ناهمواری سطح خاک افزایش یافت.



شکل ۵- اندازه‌گیری ارتفاع ناهمواری سطح خاک

مزرعه شخم خورده با استفاده از پین‌متر

Fig 5. Measurement of soil surface roughness of resulting soil using a pin meter

۳- نتایج و بحث

جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس اثر سه سرعت پیشروی (۲/۶، ۳/۵ و ۴/۸ کیلومتر بر ساعت) و سه موقعیت حفاظ خاک (۰، ۴۰ و ۸۰ درجه) روتیواتور را بر شاخص زبری تصادفی (RR) اندازه‌گیری شده بعد از شخم نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که اثر فاکتور سرعت پیشروی در سطح احتمال ۱٪ معنادار است. به عبارتی برای زبری‌های به‌دست آمده در سه سرعت پیشروی ذکر شده بر اساس شاخص RR اختلاف وجود دارد. در جدول ۲ نتایج مقایسه میانگین (به روش دانکن) اثر سرعت پیشروی بر شاخص تعیین زبری RR در سطح احتمال ۵٪ نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل شده، میان سه سرعت پیشروی

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر سرعت پیشروی و موقعیت حفاظ خاک روتیواتور بر شاخص زبری تصادفی

Table 1. Analysis of variance of the effect of travel speed and rotary tiller's soil hood position on random roughness index

F	میانگین مربعات تصحیح شده (MS)	مجموع مربعات تصحیح شده (SS)	درجه آزادی (df)	منبع تغییر S.V
11.226**	1.845	14.757	8	تیمار Treatment
22.648**	3.722	102.191	2	سرعت پیشروی travel speed
14.518**	2.386	7.443	2	موقعیت حفاظ Soil hood position
3.869*	0.636	2.543	4	برهم کنش موقعیت-سرعت Position×speed
-	0.164	2.958	18	خطا Error
-	-	17.715	26	کل Total

** وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪؛ * وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪

خاک اختلاف معنادار در سطح احتمال ۵٪ وجود دارد. بنابراین می‌توان اظهار داشت که با تغییر موقعیت حفاظ خاک روتیواتور می‌توان زبری‌های متفاوتی را در سطح مزرعه ایجاد کرد و از این فاکتور در کنترل شدت شخم استفاده کرد.

همچنین با توجه به نتایج تجزیه واریانس جدول ۱ مشخص شد که اثر موقعیت حفاظ خاک روتیواتور در سطح احتمال ۱٪ بر شاخص زبری تصادفی به‌دست آمده بعد از عملیات شخم معنادار است. جدول ۳ نیز مقایسه میانگین (به روش دانکن) اثر موقعیت‌های مختلف حفاظ خاک بر شاخص زبری تصادفی را در سطح احتمال ۵٪ نشان می‌دهد. همان‌طور که پیداست، میان زبری ایجاد شده در سه موقعیت حفاظ

شده در خاک شخم خورده پشت ابزار خاک‌ورز به صورت بلادرنگ موقعیت حفاظ را در جهت کاهش و یا افزایش شدت خاک‌ورزی تغییر داد. اگرچه بعضی از عناصر و فاکتورهای فیزیکی خاک می‌تواند در چند متر جابجایی تغییر کند (Raun *et al.*, 1998)، اما همان‌طور که پیشتر اشاره شد، تغییر اساسی در این مسافت روی بافت و شرایط فیزیکی خاک در حد قابل توجه‌ای وجود نخواهد داشت.

جدول ۴- مقایسه اثر متقابل موقعیت حفاظ خاک و سرعت پیشروی بر شاخص زبری تصادفی

Table 4. Comparison Interaction effect of the soil hood position and travel speed on random roughness index

میانگین شاخص زبری RR (cm)	تیمار
0.8021 ^d	موقعیت 0 × سرعت 2.6km/h
1.3390 ^{cd}	موقعیت 0 × سرعت 3.5km/h
1.8265 ^{bc}	موقعیت 0 × سرعت 4.8km/h
1.8415 ^{bc}	موقعیت 40 × سرعت 2.6km/h
1.1283 ^{cd}	موقعیت 40 × سرعت 3.5km/h
2.4666 ^{ab}	موقعیت 40 × سرعت 4.8km/h
1.6580 ^c	موقعیت 80 × سرعت 2.6km/h
3.0655 ^a	موقعیت 80 × سرعت 3.5km/h
3.0973 ^a	موقعیت 80 × سرعت 4.8km/h

میانگین‌های با حروف یکسان دارای تفاوت معنی‌دار نیستند.

باتوجه به نتایج تحقیق حاضر و پژوهش‌های انجام شده می‌توان اظهار داشت که در صورت وجود تغییرپذیری مکانی در سطح مزرعه می‌توان با کنترل بلادرنگ موقعیت حفاظ خاک روتیواتور، یا سرعت پیشروی و یا هر دو برای اعمال شخم نرخ متغیر به‌وسیله روتیواتور استفاده کرد. اگر مقایسه‌ای بین میانگین به‌دست آمده در موقعیت حفاظ خاک در ۸۰ درجه و سرعت پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت و موقعیت حفاظ خاک در صفر درجه و سرعت پیشروی ۲/۶ کیلومتر بر ساعت انجام شود، ملاحظه می‌شود که تغییر در سرعت پیشروی تراکتور اثر بیشتری روی زبری خاک دارد. با وجود این خودکار نمودن سرعت تراکتور با استفاده از بازخورد شاخص زبری دارای پیچیدگی‌های فنی و هزینه قابل توجه‌ای خواهد بود (Riegler-Nurscheret *et al.*, 2020).

بنابراین، تغییر در موقعیت حفاظ خاک یک روتیواتور با استفاده از شاخص زبری تصادفی که پتانسیل اندازه‌گیری به‌صورت بلادرنگ را با کمترین پیچیدگی فنی دارد، می‌تواند ابزاری توانمندی در اجرای شخم متغیر باشد.

پیشنهاد می‌شود آزمایش‌های بیشتری روی عملکرد این ابزار خاک‌ورز در تهیه بستر بذر و مقایسه میزان محصول تولید شده در واحد سطح با روش‌های رایج شخم و روش شخم نرخ متغیر تشریح شده در این پژوهش انجام شود.

جدول ۲- مقایسه اثر سرعت پیشروی بر شاخص زبری تصادفی

Table 2. Comparison of the travel speed effect on random roughness index

سرعت (km/h)	میانگین شاخص زبری RR (cm)
2.6	1.3225 ^c
3.5	1.9070 ^b
4.8	2.6069 ^a

میانگین‌های با حروف یکسان دارای تفاوت معنی‌دار نیستند.

در پژوهش Elahifard *et al.* (2008) که به بررسی خرد شدن خاک در روتیواتور با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی پرداختند؛ مشخص نمودند که میزان خرد شدن خاک تحت تأثیر عوامل سرعت پیشروی، سرعت دورانی محور دوار، وضعیت استقرار در پوش و محتوای رطوبتی خاک در قالب طرح کرت‌های خرد شده است.

همچنین نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش Braunack & McPhee (1991) و Adam & Erbach (1992) مطابقت دارد. آن‌ها اظهار داشتند که شدت خاک‌ورزی بر زبری سطح خاک تأثیر دارد. همچنین Kepner *et al.*, (1982) بیان کردند که موقعیت حفاظ خاک یک پارامتر مهم است که می‌تواند بر میزان نرم شدن خاک به‌وسیله یک پنجه دوار تأثیر بگذارد.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل موقعیت حفاظ خاک بر شاخص زبری تصادفی

Table 3. Comparison of the soil hood position effect on random roughness index

موقعیت حفاظ (deg)	میانگین شاخص زبری RR (cm)
0	1.4338 ^c
40	1.9391 ^b
80	2.4635 ^a

میانگین‌های با حروف یکسان دارای تفاوت معنی‌دار نیستند.

با توجه به جدول ۱، اثر متقابل سرعت پیشروی و موقعیت حفاظ خاک بر عدد زبری تصادفی در سطح احتمال ۵٪ معنادار است. در جدول ۴ نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل دو فاکتور سرعت پیشروی و موقعیت حفاظ خاک روی عدد زبری تصادفی در سطح احتمال ۵٪ آمده است. در این قسمت به تفکیک اثر هر موقعیت حفاظ خاک و هر سرعت پیشروی روی عدد زبری ایجاد شده، آورده شده است. بنابراین با ترکیب هر یک از این حالت‌ها ممکن است به یک زبری ثابت رسید. به‌عنوان مثال؛ برای حالتی که موقعیت حفاظ خاک در صفر درجه و سرعت پیشروی ۴/۸ کیلومتر بر ساعت است؛ عدد زبری تقریباً برابر حالتی است که موقعیت حفاظ خاک در ۴۰ درجه و سرعت پیشروی ۲/۶ کیلومتر بر ساعت است. از طرفی در موقعیت ۸۰ درجه اثر دو سرعت پیشروی ۳/۵ و ۴/۸ کیلومتر بر ساعت بر عدد زبری بی‌معنی است.

بدیهی است که در تدوین الگوریتم کنترل این سامانه الکترو-هیدرولیکی می‌توان ترکیب پیوسته‌ای از سرعت پیشروی تراکتور و موقعیت حفاظ خاک را در نظر گرفت تا با اندک تغییر در زبری ایجاد

در سطح احتمال ۱٪ معنادار است. بنابراین با کنترل بلادرنگ این دو پارامتر تنظیم روتیواتورها می‌توان از این وسیله در اجرای شخم نرخ متغیر بهره جست. از طرف دیگر باتوجه به تأثیر دو فاکتور سرعت پیشروی و موقعیت حفاظ خاک روتیواتور روی زبری سطح خاک از این شاخص که اندازه‌گیری آن به‌صورت بلادرنگ توسط بسیاری از محققین گزارش شده است؛ می‌توان به‌عنوان سیگنال باز خورد کنترل منضمت روتیواتورها جهت اجرای شخم نرخ متغیر استفاده کرد.

۵- منابع

- Abbaspour-Gilandeh, Y., and Rahimi-Ajdadi, F. (2016). *Design, construction and field evaluation of a multiple blade soil mechanical resistance sensor*. Soil and Tillage Research. 157, 93-100.
- Adam, K.M., and Erbach, D.C. (1992). *Secondary tillage tool effect on soil aggregation*. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 35(6): 1771-1776.
- Adamchuk, V.I., Skotnikov, A.V., Speichinger, J.D., Kocher, M.F. (2004). *Development of an instrumented deep-tillage implement for sensing of soil mechanical resistance*. Transaction of the ASAE. 47 (6), 1913-1919.
- Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., and Negreiros, J. (2009). *Off-the-shelf laser scanning and close range digital photogrammetry for measuring agricultural soils microrelief*. Biosystems Engineering. 103 (4): 504-517.
- Allmaras, R.R., Burwell, R.E., Larson, W.E., and Holt, R.F. (1966). *Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage*. USDA Conservation Research Report. 7: 1-14.
- Al-Suhaibani, S. A., and Ghaly, A. E. (2010). *Effect of Plowing Depth of Tillage and Forward Speed on the Performance of a Medium Size Chisel Plow Operating in a Sandy Soil*. American Journal of Agricultural and Biological Sciences. 5(3): 247-255.
- Anthonis, J., Mouazen, A.M., Saeys, W., and Ramon, H. (2004). *An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, Part 3: Design of depth control system*. Biosystems Engineering. 89(1): 59-67.
- Arvidsson, J., and Bölenius, E. (2006). *Effects of soil water content during primary tillage - laser measurements of soil surface changes*. Soil and Tillage Research. 90: 222-229.
- Bauer, T., Strauss, P., Grims, M., Kamptner, E., Mansberger, R., and Spiegel, H. (2015). *Long term agricultural management effects on surface roughness and consolidation of soils*. Soil and Tillage Research. 151: 28-38.
- Beh-Ayin, M.A., and Sheykhdavoudi, M.J. (2003). *Effects of tractor speed and shield position on the performance of rotary tiller*. The Scientific Journal of Agriculture. 25(2): 1-11. (In Persian).
- Bertol, I., Albuquerque, J.A., Leite, D., Amaral, A.J., and Zoldan Junior, W.A. (2004). *Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo Brasil. 28: 155-163.

۴- نتیجه‌گیری نهایی

هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر سه سرعت پیشروی مختلف (۲/۶، ۳/۵ و ۴/۸ کیلومتر در ساعت) و سه موقعیت حفاظ خاک (صفر، ۴۰ و ۸۰ درجه) روتیواتور بر شاخص زبری سطح خاک شخم خورده بود؛ تا از نتایج این تحقیق در راستای تبدیل روتیواتور به یک خاک‌ورز نرخ متغیر بهره برد. نتایج تحقیق نشان داد که اثر سرعت‌های پیشروی مختلف و همچنین اثر موقعیت حفاظ خاک بر شاخص زبری تصادفی

Braunack, M.V., and McPhee, J.E. (1991). *The effect of initial soil water content and tillage implement on seedbed formation*. Soil and Tillage Research. 20: 5-17.

Chang, C., and Lindwall, C.W. (1990). *Comparison of the effect of long term tillage and crop rotation on physical properties of a soil*. Canadian Agriculture Engineering. 32: 53-56.

Dalla Rosa, J., Cooper, M., Darboux, F., and Medeiros, J.C. (2012). *Soil roughness evolution in different tillage systems under simulated rainfall using a semivariogram-based index*. Soil and Tillage Research. 124: 226-232.

Dobbratz, M., Baker, J. M., Grossman, J., Wells, M. S., and Ginakes, P. (2019). *Rotary zone tillage improves corn establishment in a kura clover living mulch*. Soil and Tillage Research. 189, 229-235.

Elahifard, E., Shekofteh, M., Hojati, M.R., and Zhale Rokhi, M. (2008). *Investigation of soil fragmentation in rotary tiller using artificial neural network method*. In: Proceedings of 5th International Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. 27-28 Aug, Ferdowsi University Mashhad, Mashhad, Iran. (In Persian).

Falahi, E., Aghkhani, M.H., and Bayati, M.R. (2015). *Design, construction and evaluation of the automatic position control system of tillage tools*. Iranian Journal of Biosystem Engineering. 46(2): 117-123. (In Persian).

Fulton, J., Hawkins, E., Taylor, R., and Franzen A. (2019). *Yield Monitoring and Mapping*, In: Shannon, D.K., David E. Clay, D.E., and Kitchen, N.R. (2019). *Precision Agriculture Basics*, ACSESS Publications, 265 pp.

García Moreno, R., Díaz Álvarez, M.C., and Tarquis, A.M. (2008). *Tillage and soil type effects on soil surface roughness at semi-arid climatic conditions*. Soil and Tillage Research. 98(1): 35-44.

Gilliot, J.M., Vaudour, E., and Michelin, J. (2017). *Soil surface roughness measurement: A new fully automatic photometric approach applied to agricultural bare fields*. Computers and Electronics in Agriculture. 134: 63-78.

Gohari, M., Hemmat, A., and Afzal, A. (2010). *Design, Construction and evaluation of a variable-depth tillage implement equipped with a GPS*. Iranian Journal of Biosystem Engineering. 41(1): 1-9. (In Persian).

Govers, G., Takken, I., and Helming, K. (2000). *Soil roughness and overland flow*. Agronomy. 20: 131-146.

Guzha, A.C. (2004). *Effects of tillage on soil microrelief, surface depression storage and soil water storage*. Soil and Tillage Research. 76: 105-114.

Hansen, B., Schjønning, P., and Sibbesen, E. (1999). *Roughness indices for estimation of depression storage*

- capacity of tilled soil surfaces. *Soil & Tillage Research*. 52 (1999) 103±111.
- Hi, X., Ding, Y., Zhang, D., Yang, L., Cui, T., and Zhong, X. (2019). *Development of a variable-rate seeding control system for corn planters Part II: Field performance*. *Computers and Electronics in Agriculture*. 162: 309-317.
- ISO 17892-1. (2014). *Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 1: Determination of water content*. International Organization for Standardization. 10 pp.
- Jensen, T., Karstoft, H., Green, O., and Munkholm, L.J. (2017). *Assessing the effect of the seedbed cultivator leveling tines on soil surface properties using laser range scanners*. *Soil and Tillage Research*. 167, 54-60.
- Jester, W., and Klik, A. (2005). *Soil surface roughness measurement—methods, applicability, and surface representation*. *Catena*. 64: 174-192.
- Kamphorst, E.C., Jetten, V., Guérif, J., Pitkänen, J., Iversen V, B., Douglas, J.T., and Paz, A. (2000). *Predicting depression storage from soil surface roughness*. *Soil Science Society of America Journal*. 64(5): 1749-1758.
- Kepner, R.A., Bainer, R., and Barger, E.L. (1982). *The Principles of Farm Machinery*. New York, John Wiley & Sons, Inc. 527 pp.
- Khodabakhshi, A., Mosavi, R., and Abdal Dahnavi, S. (2012). *The effect of rotary tiller design parameters on the uniformity of plow floor furrows in precision seed drills*. In: *Proceedings of 7th International Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization*, 4-6 Sep, Shiraz University, Shiraz, Iran. (In Persian).
- Koval, L., Vaňuš, J., and Bilík, P. (2016). *Distance measuring by ultrasonic sensor*. *IFAC-PapersOnLine*. 49 (25): 153-158.
- Kuipers, H. (1957). *A reliefmeter for soil cultivation studies*. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 5: 255-262.
- Lee, K. H., and Ehsani, R. (2008). *Comparison of two 2D laser scanners for sensing object distances, shapes, and surface patterns*. *Computers and Electronics in Agriculture*. 60, 250-262
- Lin, B.B. and Richards, P. L. (2007). *Soil random roughness and depression storage on coffee farms of varying shade levels*. *Agricultural Water Management*. 92 (3): 194-204.
- MacRae, I., M. Carroll, and M. Zhu. (2011). Site-specific management of green peach aphid, *Myzus persicae* (Sulzer). In: Clay, S.A., editor, *GIS applications in agriculture*. Vol. 3: Invasive Species. CRC Press, Boca Raton, FL. p. 167-189.
- Maguire, S. M., Godwin, R. J., O'Dogherty, M. J., and Blackburn, K. (2007). *A dynamic weighing system for determining individual square bale weights during harvesting*. *Biosystems Engineering*. 98 (2), 138-145.
- Maleki, M.R., Mouazen A.M., De Ketelaere B., Ramon H., and De Baerdemaeker J. (2008a). *On-the-go variable rate phosphorus fertilization based on a visible and near-infrared soil sensor*. *Biosystems Engineering*. 99 (1): 35 – 46.
- Maleki M. R., Ramon H., De Baerdemaeker J., and Mouazen A. M. (2008b). *A study on the time response of a soil sensor-based variable rate granular fertilizer applicator*. *Biosystems Engineering*. 100 (2) 160-166.
- Mansourirad, D. (2013). *Tractors and Agricultural Machinery* (Vol.1). (7th ed.). Bu-Ali Sina University Press. 853 P. (In Persian).
- Marinello, F., Pezzuolo, A., Gasparini, F., Arvidsson, J., and Sartori, L. (2015). *Application of the Kinect sensor for dynamic soil surface characterization*. *Precision Agriculture*. 16: 601-612.
- Martinez-Agirre, A., Álvarez-Mozos, J., and Giménez, R. (2016). *Evaluation of surface roughness parameters in agricultural soils with different tillage conditions using a laser profile meter*. *Soil and Tillage Research*. 161: 19-30.
- Marzahn, P., and Ludwig, R. (2009). *On the derivation of soil surface roughness from multi parametric PolSAR data and its potential for hydrological modeling*. *Hydrology and Earth System Sciences*. 13, 381-394.
- Maertens, K., Reyns, P. and J. De Baerdemaeker, J. (2004). *On-line measurement of grain quality with nir technology*. *Transactions of the ASAE*. 47(4), 1135-1140.
- Mohammadi, F., Maleki, M.R., Khodaei, J. (2022). *Control of variable rate system of a rotary tiller based on real-time measurement of soil surface roughness*. *Soil and Tillage Research*. 215, 105216.
- Podmore, T.H., and Huggins, L.F. (1981). *An automated profile meter for surface roughness measurements*. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 24(3): 663-665.
- Rajabi-Vandchali, M., Hemmat, A., and Ghanbari Malidarreh, A. (2015). *Comparison of disk harrow, ciclo tiller and rotary tiller efficiency at different humidity in a clay loam soil in Mazandaran*. *Journal of Agricultural Machinery*. 5 (1): 63-72. (In Persian).
- Raun, W. R., Soile, J. B., Johnson, G. V., Stone, M. L., Whitney R. W., Lees, H. L., Sembiring, H., Philips, S. B. (1998). *Microvariability in soil test, plant nutrient and yield parameters in Bermudagrass*. *Soil Science Society of America Journal*. 62, 683-690.
- Riegler-Nurscher, P., Moitzi, G., Moitzi, J., Huber, J., Karner, J., Wagentristsl, H., and Wagentristsl, M. (2020). *Machine vision for soil roughness measurement and control of tillage machines during seedbed preparation*. *Soil and Tillage Research*. 196, 104351.
- Römken, M.J.M., and Wang, J.Y. (1986). *Effect of tillage on surface roughness*. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 29 (2): 429-433.
- Römken, M.J.M., Singarayar, S., and Gantzer, C.J. (1986). *An automated non-contact surface profile meter*. *Soil and Tillage Research*. 6: 193-202.
- Saleh, A. (1993). *Soil roughness measurement: chain method*. *Journal of Soil and Water Conservation*. 48 (6): 527-529.
- Schule, T., and Koller, K. (2008). *Erosion control by using site-specific tillage*. *Bulletin of the University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca Agriculture*. 65(1): 259-263.
- Sedghi, R., and Abbaspour Gilandeh, Y. (2014). *Factors Affecting Soil Fragmentation during Tillage Practice and Determining the Optimal Range of the Parameters using a Fuzzy Logic Approach*. *Journal of Agriculture Engineering*. 37 (1): 35-47. (In Persian).

- Shannon, D.K., David E. Clay, D.E., and Kitchen, N.R. (2019). *Precision Agriculture Basics*, ACSESS Publications, 265 pp.
- Sharda, A., Franzen, A., Clay, D.E., and Luck, J.D. (2019). *Precision Variable Equipment*. In: D. K. Shannon, David E. Clay, and Newell R. Kitchen, Editors. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. P. 155-168.
- Smith, M.W. (2014). *Roughness in the earth sciences*. Earth-Science Reviews. 136: 202-225.
- Tabatabae koloor, R., and Kiani, Gh. (2011). *Investigation of the rototiller blades operational factors on the orchards and paddy fields tillage*. Journal of Agricultural Machinery Engineering. 1 (1): 34-40. (In Persian).
- Wagner, L. E., and Yiming, Y. (1991). *Digitization of profile meter photographs*. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 34 (2): 412-416.
- Zobeck, T.M., and Onstad, C.A. (1987). *Tillage and rainfall effects on random roughness: a review*. Soil and Tillage Research. 9 (1): 1-20.
- Zribi, M., Ciarletti, V., and Taconet, O. (2000). *Validation of a Rough Surface Model Based on Fractional Brownian Geometry with SIRC and ERASME Radar Data over Orgeval*. Remote Sensing of Environment. 73: 65-72.



This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>)