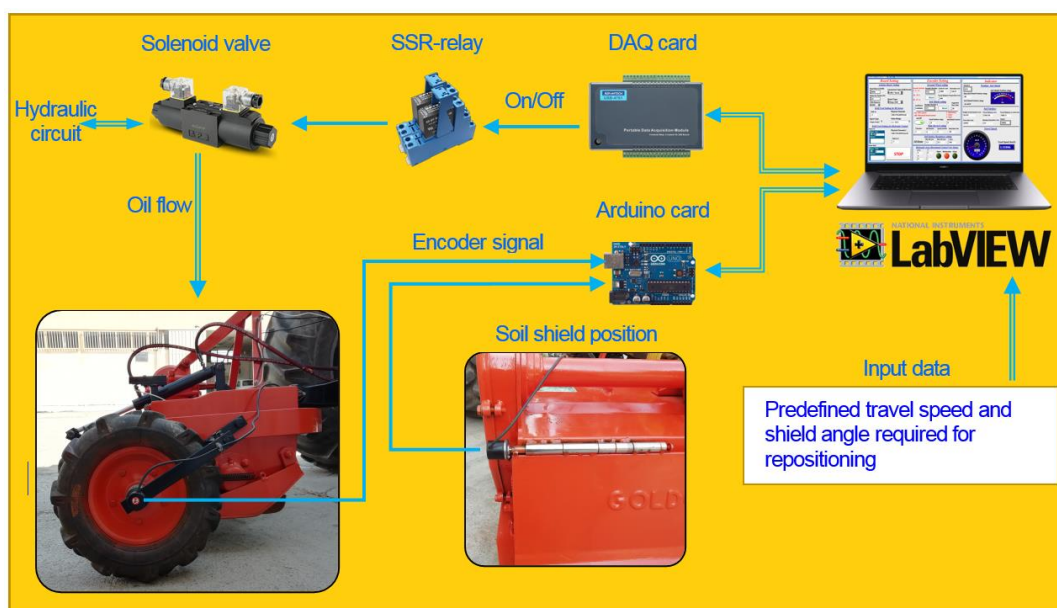


Design, Development, and Technical Evaluation of an Automatic Controlling System for Repositioning of Rotary Tiller Soil Shield

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

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

(Received: Oct. 30, 2021- Revised: March 17, 2022- Accepted: June 1, 2022)



Abstract: In the present study, an electro-hydraulic system for repositioning the soil shield of a rotary tiller was designed, developed, and evaluated to make it automated for performing variable rate tilling operation. The reposition of the soil shield was studied in the opening and closing stages from 0° to 80° and vice versa, with a 10° and 20° increment under laboratory and field conditions, respectively. Under laboratory conditions, the speed average of soil shield reposition in the opening and closing stages were 102.0±9.2 and 79.0±8.7 deg/s, with the time average in opening and closing stages of 0.11±0.02 and 0.15±0.01 s, respectively. The correlation coefficients between the requested position for the soil shield and the position created by the hydraulic actuator under laboratory conditions in both opening and closing states were $R^2 = 0.99$ (RMSE = 0.7 deg). Under field conditions, the speed average of the soil shield reposition at three travel speeds of 2.6, 3.5, and 4.8 km/h in the opening stage were 97.7, 99.1, and 99.1 deg/s and in the closing stage were 77.3, 78.3, and 78.7 deg/s, respectively. The correlation between the requested position for the soil shield and the position created by the hydraulic actuator in both opening and closing states were $R^2 = 0.99$ (RMSE = 1.2 deg) and $R^2=0.99$ (RMES=1.3 deg), respectively. The soil shield repositioning system can be performed in less than 0.3 s in-field, making it an effective and practical tool for performing variable rate tillage.

Keywords: Encoder, Feedback signal, Precision agriculture, Electro-hydraulic, LabVIEW.

طراحی ساخت و ارزیابی فنی سامانه کنترل خودکار تغییر موقعیت حفاظ خاک روتیواتور

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

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۸ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۳/۱۱)

چکیده: در این مطالعه، یک سامانه الکترو-هیدرولیک برای تغییر موقعیت حفاظ خاک یک روتیواتور طراحی، ساخته و ارزیابی شد، تا بتوان از آن برای انجام خاک‌ورزی نرخ متغیر بصورت خودکار استفاده کرد. جابجایی حفاظ خاک در حالت باز و بسته شدن از صفر تا ۸۰ درجه و برعکس با گام‌های ۱۰ درجه‌ای در آزمایشگاه و ۲۰ درجه‌ای در مزرعه بررسی شد. در شرایط آزمایشگاهی، میانگین سرعت تغییر موقعیت حفاظ خاک در حالت باز و بسته شدن به ترتیب $۰/۲ \pm ۰/۹$ و $۰/۷ \pm ۰/۸$ درجه بر ثانیه و میانگین زمان باز و بسته شدن به ترتیب $۰/۱ \pm ۰/۱۵$ و $۰/۲ \pm ۰/۱۱$ ثانیه به دست آمد. ضرایب تبیین حاصل از همبستگی موقعیت درخواستی حفاظ خاک و موقعیت ایجاد شده به وسیله جک هیدرولیکی در آزمایشگاه در هر دو حالت باز و بسته شدن $۰/۹۹$ با میانگین مربعات خطا $۰/۷۰$ درجه به دست آمد. در شرایط مزرعه، میانگین سرعت تغییر موقعیت حفاظ خاک در سه سرعت $۲/۶$ ، $۳/۵$ و $۴/۸$ کیلومتر بر ساعت به ترتیب در حالت باز شدن $۹۷/۷$ ، $۹۹/۱$ و $۹۹/۱$ و در حالت بسته شدن $۷۷/۳$ ، $۷۸/۳$ و $۷۸/۷$ درجه بر ثانیه به دست آمد. ضرایب تبیین همبستگی بین موقعیت درخواستی برای حفاظ خاک و موقعیت ایجاد شده توسط جک هیدرولیکی در هر دو حالت باز و بسته شدن $۰/۹۹$ با میانگین مربعات خطا به ترتیب $۱/۲$ و $۱/۳$ درجه به دست آمد. سامانه جابجایی حفاظ خاک می‌تواند حفاظ را در کمتر از $۰/۳$ ثانیه در عملیات مزرعه‌ای جابجا کند و می‌توان آن را به عنوان ابزاری مؤثر و کاربردی برای انجام خاک‌ورزی نرخ متغیر مورد استفاده قرار داد.

واژه‌های کلیدی: اینکودر، سیگنال بازخورد، کشاورزی دقیق، الکترو-هیدرولیک، لب‌ویو.

مقدمه

امروزه کلیه عملیات کشاورزی تحت تأثیر مفاهیم کشاورزی دقیق دچار تغییرات بنیادی شده است. در این راستا کوددهی نرخ متغیر (Maleki *et al.*, 2008)، سمپاشی نرخ متغیر (Hussain *et al.*, 2020) و آبیاری نرخ متغیر (Ribeiro Mendes *et al.*, 2019) واژه‌هایی هستند که جای خود را در کشاورزی دقیق باز کرده است. از آنجا که خاک مزرعه دارای شرایط یکسانی نیست، طبیعتاً اجرای شخم با نرخ ثابت در سرتاسر مزرعه نمی‌تواند غیر یکنواختی اولیه را از بین ببرد. بنابر این بهتر است که شخم در جاهایی که نیاز به بهم زدگی بیشتر خاک دارد با نرخ بیشتری و در جاهایی که نیازمند شخم کمتر هستند با نرخ کمتری اجرا شود. اگر عملیات خاک‌ورزی متناسب با شرایط خاک و تغییر پذیری سطح مزرعه اجرا شود می‌توان اظهار داشت که خاک‌ورزی دقیق^۱ اجرا شده است. حفظ رطوبت، کاهش انرژی مصرفی، به حداقل رساندن تردد ماشین‌های کشاورزی، تهیه بستر بذر با کمترین میزان بهم‌خوردگی خاک و کاهش فرسایش خاک از جمله مواردی است که می‌توان به‌عنوان اهداف خاک‌ورزی دقیق مورد اشاره قرار گیرد. شاید پیچیدگی‌های مرتبط با خصوصیات خاک و تغییرپذیری آن، منجر به کندی توسعه ادوات شخم نرخ متغیر شده است، چون تنها با اندک تغییری در رطوبت خاک، تغییرپذیری مقاومت خاک تا حد زیادی تغییر خواهد کرد و تولید پهنه مقاومت خاک پیش از اجرای عملیات شخم تا حدودی سوال برانگیز خواهد بود. تاکنون مطالعات متعددی در راستای بررسی عملکرد و انرژی مصرفی ادوات خاک‌ورزی انجام شده است (Kheiralla *et al.*, 2004; Shinde & Kajale, 2011; Rajabi-Vndchali *et al.*, 2015). با وجود این، محدود مطالعاتی در زمینه اجرای شخم نرخ متغیر انجام شده است، که در بیشتر آن‌ها نیز صرفاً کنترل عمق یک ابزار خاک‌ورز مطالعه شده است (Lee *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2000).

Anthonis *et al.*, 2004; Abbaspour-Gilandeh *et al.*, 2006; Schule & Koller, 2008; Gohari *et al.*, 2010; Fallahi *et al.*, 2015; Riegler-Nurscher *et al.*, 2020).

ثابت شده که استفاده مکرر از ادوات چرخ‌دار و سنگین در سطح مزرعه در دراز مدت سبب تشکیل سخت لایه در عمق خاک‌های زراعی و کاهش بهره‌وری مزرعه می‌شود. بنابر این در راستای اجرای عملیات خاک‌ورزی دقیق، سعی بر این است از ادواتی استفاده شود که عملیات کشاورزی را با تردد کمتری انجام دهند. در مقایسه با سایر ادوات خاک‌ورزی اولیه و ثانویه و در صورت مناسب بودن شرایط مزرعه، روتیواتور جایگزین مناسبی برای ادوات خاک‌ورزی اولیه و ثانویه است و موجب تهیه بستر بذر مناسب جهت رشد گیاهان با ریشه‌های سطحی می‌گردد (Beh-Ayin & Sheykhdavoudi, 2003). برای کنترل میزان خردشدگی خاک به‌وسیله‌ی روتیواتور، سرعت محور گردنده، سرعت حرکت تراکتور، تغییر موقعیت حفاظ خاک و تعداد تیغه‌ها به‌عنوان عوامل تغییر میزان شخم بکارگرفته می‌شود (Beh-Ayin & Sheykhdavoudi, 2003; Elahifard *et al.*, 2008; Tabatabae koloor & Kiani, 2011; Mansourirad, 2013; Sedghi & Abbaspour Gilandeh, 2014; Rajabi-Vndchali *et al.*, 2015; Mohammadi *et al.*, 2022b). بنابر این به‌نظر می‌رسد روتیواتور می‌تواند به‌منظور اجرای شخم نرخ متغیر مورد استفاده قرار بگیرد.

انجام عملیات خاک‌ورزی به‌صورت نرخ متغیر مانند سایر عملیات کشاورزی دقیق به دو روش پهنه-مبنا و روش حسگر-مبنا یا بلادرنگ تقسیم می‌شود. در هر دو روش ذکر شده پس از دریافت اطلاعات لازم از خاک، این اطلاعات و داده‌ها توسط واحد پردازنده برای حمایت از مجموعه‌ای از تصمیمات مدیریتی یک به‌وسیله نرم-افزار تجزیه و تحلیل می‌شوند و در نهایت با طراحی مکانیزم‌های لازم روی ابزار خاک‌ورز، تصمیم اتخاذ شده اجرا می‌شود.

یکی از چالش‌های اساسی در اجرای خاک‌ورزی نرخ متغیر محدودیت‌های دستیابی به منضات لازم و

اندازه‌گیری عمق شخم از پتانسیومتر خطی استفاده گردید که روی شافت جک نصب شده بود. طبق نتایج به‌دست آمده، انرژی مورد نیاز در عملیات با کنترل دقیق نسبت به عملیات با عمق یکسان ۵۰ درصد کاهش یافت. سوخت مصرفی نیز کاهش ۳۰ درصدی را نشان داد.

Gohari *et al.* (2010) در پژوهشی برای انجام خاک‌ورزی دقیق به‌صورت پهنه-مبنا اقدام به طراحی و ارزیابی یک زیرشکن عمق متغیر مجهز به GPS نمودند. آن‌ها ابتدا با استفاده از فروسنج مخروطی پهنه مقاومت عمق کار خاک‌ورزی را ایجاد کرده تا از آن طریق عمق کار زیر شکن کنترل شود. به‌منظور کنترل عمق خودکار ابزار خاک‌ورز، محور چرخ‌های تنظیم عمق را به یک سیلندر هیدرولیکی دوطرفه متصل کردند تا با باز شدن سیلندر هیدرولیکی محور اتصال بازوی چرخ‌ها چرخیده و سطح اتکا چرخ روی زمین تغییر ارتفاع دهد و به این ترتیب عمق کار ابزار خاک‌ورز تغییر داده می‌شد. در ارزیابی سامانه خاک‌ورز عمق متغیر نتایج رضایت بخشی در هر دو شرایط آزمایشگاهی و مزرعه‌ای به‌دست آمد.

Fallahi *et al.* (2015) در پژوهشی اقدام به طراحی و ارزیابی دستگاه کنترل عمق ادوات کشاورزی نسبت به سطح زمین کردند. در این پژوهش میزان دقت و سرعت عملکرد دستگاه در ایجاد عمق مورد نظر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مسافت طی شده به‌وسیله‌ی تراکتور، از لحظه صدور فرمان تغییر عمق تا لحظه رسیدن به عمق تعیین شده را نیز مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که میزان خطای دستگاه برای افزایش عمق و کاهش عمق در سرعت‌های مختلف به ترتیب حدود ۵ و ۶ درصد بود.

در پژوهشی دیگر (Lee *et al.*, 2000) عملکرد مزرعه‌ای یک سامانه کنترل عمق روی یک روتیواتور بررسی شد. در این سامانه یک حسگر اولتراسونیک در جلو تراکتور برای کنترل عمق مورد نظر نصب شده و

مناسب روی ادوات برای اعمال شخم با درجه شدت مختلف در حین حرکت است. در راستای فراهم‌آوری مقدمات اجرای شخم نرخ متغیر، کنترل عمق زیرشکن به‌وسیله‌ی هر دو روش پهنه_مبنا (Fallahi *et al.*, 2015) (Abbaspour-Gilandeh *et al.*, 2006; Schule & Koller, 2008; Lee *et al.*, 1998; Lee) و حسگر_مبنا (Gohari *et al.*, 2010; *et al.*, 2000; Adamchuk *et al.*, 2004; Mouazen *et al.*, 2005a) و همچنین سامانه‌های تشخیص بلادرنگ موقعیت عمق ادوات خاک‌ورزی (Anthonis *et al.*, 2004;) (Mouazen *et al.*, 2004; Saeys *et al.*, 2004; Jia *et al.*, 2016) مورد مطالعه محققین قرار گرفته است. علاوه بر این مطالعاتی نیز صورت گرفته است که از نتایج آنها می‌توان در زمینه شخم نرخ متغیر بهره برد. به‌عنوان مثال، می‌توان با تعیین خواص فیزیکی خاک (Liu *et al.*, 1993;) (Viscarra Rossel *et al.*, 2006; Andrade-Sanchez *et al.*, 2007; Waiser *et al.*, 2007; Christy, 2008; Ji *et al.*, 2016) پایش برخط میزان رطوبت (Mouazen *et al.*, 2005b;) (Mouazen *et al.*, 2007; Adamchuk *et al.*, 2009) و تعیین میزان مقاومت افقی و مقاومت عمودی خاک (Adamchuk *et al.*, 2001; Sirjacobs *et al.*, 2002; Tekeste *et al.*, 2002; Adamchuk *et al.*, 2004; Siefken *et al.*, 2005; Hemmat & Adamchuk, 2008) اشاره نمود.

عبارت شدت متغیر شخم^۱ واژه‌ای است که توسط دان کرامت (Crummett, 2019) مطرح شده و شرکت جان‌دیر با تغییر زاویه شاخه‌های دیسک تاندم مفهوم این واژه را برای یکی از ابزارهای خاک‌ورز خود (2660VT) بکار گرفته است. البته باید دقت شود که شدت شخم با افزایش زاویه قرارگیری شاخه‌های بشقاب‌ها با راستای حرکت (و در نتیجه تا حدود کمی کاهش عمق) صورت می‌گیرد.

Abbaspour-Gilandeh *et al.* (2006) در پژوهشی دستگاهی را به‌منظور تغییر عمق یک زیرشکن طراحی و آزمایش کردند. دستگاه ساخته شده شامل یک جک هیدرولیکی و دو چرخ برای تغییر عمق بود. برای

به صورت پهنه-مبنا و نیز بر اساس اندازه‌گیری بلادرنگ زبری سطح خاک (Mohammadi *et al.*, 2022a) بکار گرفته شود.

با توجه به ساختمان پیچیده و تجهیزات گران قیمت بکار برده شده توسط Riegler-Nurscher *et al.* (2020) برای تغییر سرعت محور روتیواتور، محدودیت‌هایی در کاربرد عملی دستگاه وجود خواهد داشت. تاکنون هیچ تحقیقی که در آن با تغییر خودکار حفاظ خاک به وسیله سامانه هیدرولیک تراکتور میزان خردشدگی خاک کنترل شود، گزارش نشده است. هدف از انجام مطالعه حاضر طراحی، ساخت و ارزیابی یک سامانه‌ای الکترو هیدرولیک با ساختمان ساده بود تا بتوان از آن به عنوان عامل تغییر نرخ شخم روی روتیواتور استفاده کرد. عملکرد سامانه در تغییر نرخ شخم تحت ارزیابی کارگاهی و نیز مزرعه‌ای قرار گرفت.

مواد و روش‌ها:

برای طراحی و ساخت سامانه خودکار تغییر موقعیت حفاظ خاک از یک روتیواتور گلدونی مدل C40 ساخت کشور ایتالیا استفاده شد. طول، عرض و ارتفاع روتیواتور به ترتیب ۱۲۷، ۶۰ و ۹۵ سانتی‌متر و وزن آن ۱۸۲ کیلوگرم بود. روتیواتور دارای ۲۴ عدد تیغه C شکل روی ۶ فلانچ با عرض و عمق کار به ترتیب ۱۰۰ و ۱۵ سانتی‌متر است. دور محور دوار روتیواتور در ۵۴۰ دور بر دقیقه محور P.T.O تراکتور، ۱۷۰/۵ دور بر دقیقه است. این روتیواتور به یک تراکتور مدل ITM-۲۸۵ چهار چرخ محرک ساخت کارخانه تراکتورسازی کردستان الحاق شده و تحت آزمایشات مزرعه‌ای قرار گرفت.

برای تغییر موقعیت حفاظ، یک سامانه الکترو-هیدرولیکی طراحی و ساخته شد. گزارش شده که تغییر موقعیت حفاظ خاک می‌تواند در میزان خرد شدن خاک و نرم شدگی خاک موثر باشد (Kepner *et al.*, 1982). این سامانه سیگنال لازم برای تغییر موقعیت حفاظ را از یک برنامه تدوین شده در محیط لب‌ویو (LabVIEW,)

بسته به سرعت حرکت تراکتور و نرخ داده برداری موقعیت آن تنظیم می‌شد. عمق عملیات به وسیله‌ی چرخش زاویه صفحه تسطیح روی درپوش روتیواتور برای ارزیابی عملکرد پاسخ سامانه کنترل در طول آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج کار آن‌ها نشان داد که سامانه کنترل طراحی شده دارای پاسخ سریع در تغییر عمق بود.

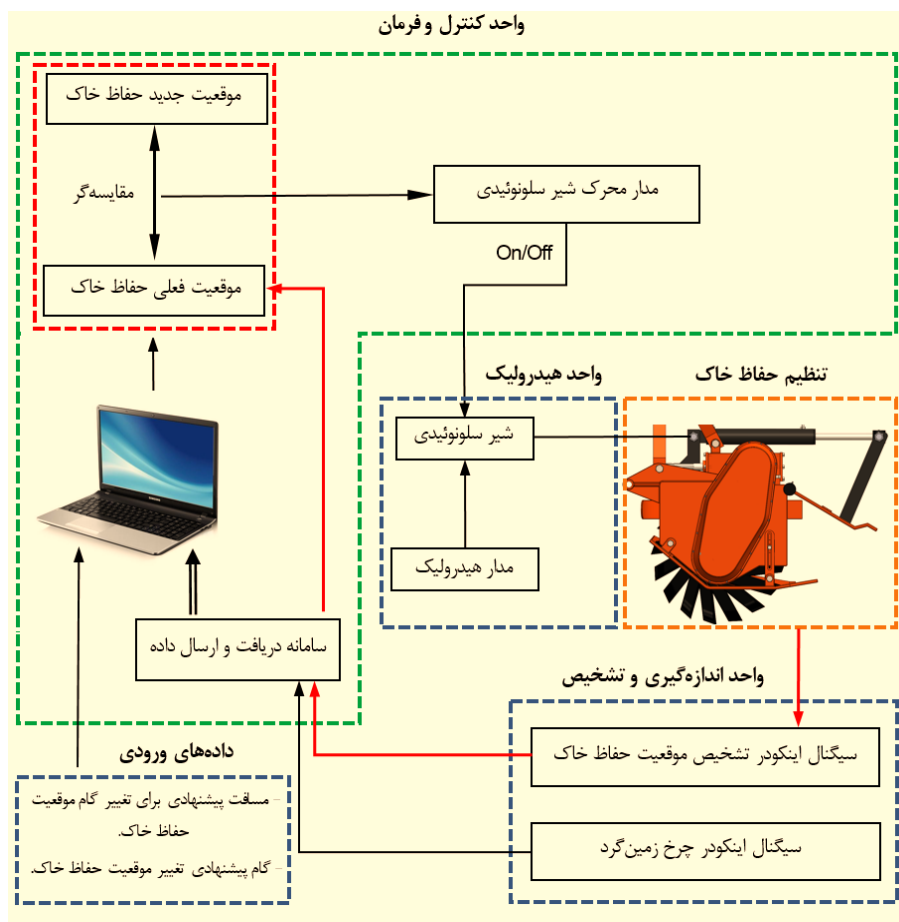
(Marinello *et al.*, 2015) بیان کردند که زبری خاک کشاورزی به پدیده‌های مهم کشاورزی مانند تبخیر، نفوذ یا فشرده‌سازی مربوط می‌شود و نظارت بر تغییرات زبری، بهبود عملیات خاک‌ورزی را ممکن می‌سازد. آنها یک طرح مفهومی را به این شکل پیشنهاد کردند که در آن یک روتیواتور بصورت بلادرنگ عملیات تجزیه و تحلیل زبری خاک را پس از عملیات خاک‌ورزی انجام دهد و بلافاصله ابزار کنترل خاک‌ورزی بر اساس آن تنظیم شود. در ایده پیشنهادی، تغییر زبری خاک ملاک عمل است و دستگاه بطور پیوسته در تلاش است تا زبری ایجاد شده را با زبری درخواست شده منطبق سازد.

پیرو مطالعه مورد اشاره و باتوجه به پتانسیل موجود، مطالعات بیشتری روی روتیواتورها صورت گرفت تا از این طریق عملیات شخم نرخ متغیر با کنترل برخی از پارامترهای مؤثر، اجرا شود. Riegler-Nurscher *et al.* (2020) سامانه‌ای را برای کنترل سرعت چرخش محور تواندهی تراکتور (PTO) منتقل شده به یک روتیواتور طراحی کرد. ملاک تغییر سرعت بر اساس تشخیص بصری زبری خاک توسط راننده و از طریق انتقال تصویر سطح خاک پس از شخم با استفاده از یک دوربین استریو بنا نهاده شد.

بنابر این اگر بدانیم در چه قسمت از مزرعه شدت خاک‌ورزی بیشتر و در چه قسمت شدت خاک‌ورزی کمتر نیاز است می‌توان با ارسال سیگنال لازم، حفاظ خاک را به ترتیب بسته‌تر و بازتر کرد. این عمل می‌تواند بر اساس اندازه‌گیری دانسیته یا مقاومت خاک (Mouazen & Ramon, 2006) هم به صورت بلادرنگ و هم

کنترل الکترو-هیدرولیک موقعیت حفاظ خاک از سه بخش اصلی واحد اندازه‌گیری و تشخیص، واحد کنترل و فرمان و نیز واحد هیدرولیکی تشکیل شده است (شکل ۱).

(National Instrument, ver. 15) تحویل گرفته و با باز کردن یک شیر سولونوئیدی در مدار هیدرولیکی، مسیر روغن را به سمت یک جک هیدرولیکی برقرار و بدین ترتیب عمل تغییر وضعیت حفاظ صورت می‌گرفت. سامانه



شکل ۱- دیاگرام سامانه کنترل الکترو-هیدرولیک موقعیت حفاظ خاک روتیواتور
Figure 1- Flowchart of electro-hydraulic system for soil shield repositioning of rotary tiller.

زمین‌گرد کوپل شد. چرخ زمین‌گرد روی یک بازوی لولایی به نحوی نصب شد تا بتواند از ناهمواری سطح خاک پیروی کند. جهت حذف ارتعاش چرخ بر اثر ضربات ناشی از برخورد با زمین در حین عملیات خاک‌ورزی، از یک فنر تثبیت استفاده شد. به‌منظور محاسبه دقیق محیط چرخ زمین‌گرد، آزمایشی در سه سرعت پیشروی مختلف ۲/۶، ۳/۵ و ۴/۸ کیلومتر در ساعت با طول مسیرهای پیشروی مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵

واحد اندازه‌گیری و تشخیص در کنترل دقیق حفاظ خاک نیاز به دریافت یک سیگنال بازخورد از موقعیت لحظه‌ای آن است. به همین منظور یک اینکودر نوری ۶۰۰ پالسی (Optic Encoder, E.K.T2) روی لولای آن نصب شد. برای پایش دقیق سرعت و طول مسیر پیموده شده از یک اینکودر نوری ۶۰۰ پالسی دیگر روی یک چرخ زمین‌گرد استفاده گردید. اینکودر به‌وسیله‌ی یک شاسی به محور چرخ

اینکودر چرخ زمین گرد با فرکانس ۴۰ هرتز برای ثبت طول مسیر پیشروی مورد استفاده قرار گرفت. اما همه داده‌های اینکودر چرخ زمین گرد برای محاسبه سرعت پیشروی لازم نبود. لذا از هر ۴ داده تنها ۱ داده یعنی با فرکانس ۱۰ هرتز برای محاسبه سرعت استفاده شد. این تصمیم عمدتاً برای کاهش محاسبات حلقه‌های تعریف شده در برنامه لب ویو بود. دقت محاسبه طول مسیر پیشروی با استفاده از چرخ زمین گرد در دقت مندرج اینکودر ۶۰۰ پالسی معادل $12/40 \pm 0/08$ سانتی‌متر بود، اما برای بالا بردن دقت، رمزگشایی پالس‌های اینکودر در لب ویو با چهار برابر دقت مندرج در اینکودر یعنی ۲۴۰۰ پالس در دور صورت گرفت، که این عمل دقت محاسبه طول مسیر پیشروی را به $3/10 \pm 0/02$ سانتی‌متر رساند.

به‌منظور کنترل فعال^۳ باز و بسته شدن جک هیدرولیک و به تناسب آن موقعیت حفاظ خاک به مقدار مورد نظر با گام مشخص (۱۰ و ۲۰ درجه‌ای)، از یک مدار کنترل حلقه بسته^۴ و سیگنال باز خورد^۵ ارسالی از تغییر وضعیت اینکودر کوپل شده با لولای حفاظ خاک استفاده شد. نرم‌افزار با مقایسه موقعیت فعلی حفاظ خاک با موقعیت درخواست شده توسط کاربر، فرمان لازم را جهت کنترل جک هیدرولیک از طریق کارت USB-4704 به شیر سلونوئیدی چهار راهه سه وضعیتی ارسال می‌کند. در زمان تغییر موقعیت حفاظ خاک، اینکودر نوری متصل به لولای حفاظ خاک میزان باز و یا بسته شدن لحظه‌ای حفاظ خاک را از طریق برد واسط به رایانه ارسال می‌کند. زمانی که حفاظ خاک به موقعیت مورد نظر رسید، رایانه فرمان قطع جریان را می‌دهد و جک هیدرولیک متوقف می‌شود. این حلقه بسته به‌صورت مداوم در تمام طول عملیات تکرار می‌شود. داده‌های اینکودر موقعیت حفاظ خاک با فرکانس ۴۰ هرتز به‌طور پیوسته جهت کنترل به رایانه ارسال می‌شد. اینکودر این

متر در مزرعه انجام شد. برای هر سرعت سه تکرار انجام شد، و میانگین محیط چرخ زمین گرد $129/73 \pm 0/83$ سانتی‌متر تعیین شد.

واحد کنترل و فرمان

واحد کنترل و فرمان سامانه وظیفه دریافت سیگنال اینکودر محاسبه موقعیت حفاظ خاک، اینکودر چرخ زمین گرد، دریافت اطلاعات ورودی اپراتور، محاسبه سرعت پیشروی تراکتور، محاسبه طول مسیر پیشروی و در نهایت ارسال فرمان به جک هیدرولیک را بر عهده دارد. این واحد شامل سه قسمت اصلی سامانه دریافت و ارسال داده، پردازشگر مرکزی و برنامه نرم‌افزاری است. سامانه دریافت و ارسال داده، اطلاعات حسگرهای واحد اندازه‌گیری را به پردازشگر مرکزی ارسال می‌کند و با دریافت فرمان از رایانه، شیر سلونوئیدی را به‌منظور کنترل جک هیدرولیک کنترل می‌کند (Gohari et al., 2015; Fallahi et al., 2010). برای رمزگشایی پالس‌های اینکودرها و ارسال داده‌های آن‌ها به رایانه از برد آردوینو مدل UNO-R3 استفاده شد. برای ارسال فرمان به شیر سلونوئیدی از کارت^۱ DAQ (USB-4704, Advantech Co., Taiwan) که می‌تواند اطلاعات آنالوگ یا دیجیتال را با سرعت نمونه 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 ۲ آمپر جریان مصرفی بود، از دو عدد رله حالت جامد (SSR^۲) DC به DC به‌منظور ارسال فرمان از کارت USB-4704 به شیر سلونوئید استفاده شد. این رله‌ها روی پایه رله ساخت شرکت فایندر (Finder 9505) ایتالیا نصب شدند.

برنامه کنترل و فرمان سامانه یک نرم‌افزار در محیط لَبویو نوشته شد. از آنجا که با بررسی نسبت نویز/سیگنال (signal/noise) اینکودر چرخ زمین گرد در فرکانس ۴۰ هرتز بهترین نتیجه را به‌دست می‌داد،

4. Closed-Loop
5. Feed back signal

1. Data acquisition
2. Solid state relays
3. Active control

هیدرولیکی دو طرفه را برای تغییر موقعیت حفاظ خاک فعال می‌کند. جک هیدرولیکی مورد استفاده بر اساس مشخصات یک جک استاندارد ساخت شرکت رکسروت بوش آلمان (Bosch Rexroth) طراحی و ساخته شد. با توجه به مشخصات مدار هیدرولیک تراکتور (فشار روغن: 210 kg/cm^2 ، دبی پمپ: $16/7 \text{ Lit/min}$) و محاسبات نیروی وارده شده بر جک، قطر داخلی پیستون 40 میلی‌متر و قطر میله پیستون 20 میلی‌متر با طول کورس 220 میلی‌متر محاسبه شد. بیشترین قدرت جک در مسیر رفت و برگشت به ترتیب $23/74$ و $17/80$ کیلو نیوتن به‌دست آمد. همچنین بیشترین سرعت رفت و برگشت جک به ترتیب $0/21$ و $0/28$ متر بر ثانیه محاسبه شد. به‌منظور کنترل جهت جریان روغن بین مسیرهای ارتباطی از شیر کنترل جهت چهار راهه سه وضعیتی وسط باز با برگشت فنری تحریک سلونوئید با اندازه $0/25$ اینچ (DSG-02-3C60-D12-DL, Tork) اینچ (Hydrolics Co., Iran) در مدار استفاده شد.

آزمون آزمایشگاهی سامانه کنترل حفاظ خاک قبل از انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای، سامانه الکترو-هیدرولیک کنترل حفاظ خاک روتیواتور در آزمایشگاه تحت ارزیابی قرار گرفت. ابتدا مقادیر اندازه‌گیری شده اینکودر نصب شده روی حفاظ خاک در زاویه‌های 30 ، 45 ، 60 و 90 درجه در سه تکرار ثبت شد. میانگین مقادیر به‌دست آمده به‌وسیله‌ی اینکودر در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده به‌وسیله‌ی گونیای مدرج دارای اختلاف $0/1 \pm 0/15$ درجه بود. صحت سیگنال ارسالی برای تنظیم زاویه و نیز سیگنال دریافتی محاسبه شده به‌وسیله‌ی اینکودر در یک برنامه تدوین شده در نرم‌افزار لیبویو بصورت مجزا نیز ارزیابی شد. این ارزیابی در دو مرحله باز و بسته شدن به ترتیب از موقعیت صفر تا 80 درجه و برعکس از 80 تا صفر درجه با گام‌های 10 درجه انجام شد. به عبارت دیگر، داده‌های دو موقعیت حفاظ خاک یکی اندازه‌گیری شده به‌وسیله‌ی اینکودر (به‌دست

بخش نیز برای حصول اطمینان بیشتر با دقت چهار برابر دقت مندرج اینکودر یعنی 2400 پالس در یک دور رمزگشایی شد.

در نرم‌افزار تدوین شده موقعیت حفاظ خاک در سه حالت کنترل دستی، کنترل خودکار شخم با نرخ ثابت و کنترل خودکار شخم با نرخ متغیر در نظر گرفته شد. با انتخاب حالت کنترل دستی، امکان تنظیم موقعیت حفاظ خاک با استفاده از کلیدهای کنترلی که در صفحه پانل نرم‌افزار قرار داده شد، میسر بود. همچنین در این حالت تنظیم موقعیت حفاظ خاک به‌وسیله اهرم‌های هیدرولیک تراکتور نیز امکان پذیر بود. از حالت کنترل دستی برای تنظیم اولیه موقعیت حفاظ خاک استفاده شد. در حالت کنترل خودکار شخم با نرخ ثابت، نرم‌افزار موقعیت حفاظ خاک را در تمام طول عملیات در یک موقعیت ثابت (مثلاً 40 درجه) که توسط کاربر انتخاب می‌شود، به‌صورت خودکار نگه می‌دارد. در این حالت چنانچه به هر دلیلی حفاظ خاک از تنظیم خارج شود نرم‌افزار با دریافت بازخورد موقعیت از اینکودر، بلافاصله اقدام به بازگرداندن حفاظ در وضعیت تنظیم شده قبلی خواهد کرد. با انتخاب حالت کنترل خودکار شخم با نرخ متغیر، عملیات شخم به‌وسیله‌ی روتیواتور بر اساس دریافت داده‌های حاصل از حسگرهای درحال حرکت (مثلاً حسگر مقاومت خاک و یا زبری خاک) و یا پهنه از پیش تعیین شده صورت می‌گیرد. در این حالت پایش زمان واقعی شخم لازم است تا اطلاعات مورد نیاز برای جابجایی پی در پی حفاظ خاک برای ثابت نگه داشتن میزان خرد شدن خاک تأمین شود. تمامی داده‌های اینکودرها، نتیجه محاسبات و فرمان‌های ارسالی به‌وسیله‌ی نرم‌افزار در قالب یک فایل اکسل با فرمت xls جهت تجزیه و تحلیل نهایی ثبت شدند.

واحد عملگر هیدرولیکی

وظیفه واحد عملگر هیدرولیک، کنترل موقعیت حفاظ خاک است که با دریافت فرمان از واحد کنترل یک جک

لازم برای رسیدن به موقعیت درخواست شده نیز اندازه‌گیری شد و به تناسب آن سرعت زاویه‌ای باز و بسته شدن حفاظ خاک محاسبه شد.

آمده) و دیگری مقدار داده شده به نرم‌افزار (درخواست شده) با هم مقایسه شدند. آزمایش‌ها به نحوی اجرا شد که تنظیم هر موقعیت از حفاظ خاک حداقل شش بار تکرار شود. همچنین در زمان انجام این آزمایش زمان



شکل ۲- سامانه کنترل موقعیت حفاظ خاک پیاده سازی شده روی یک روتیواتور گلدونی (مدل C40). (a) ترکیب تراکتور-روتیواتور، (b) اینکودر حفاظ خاک، (c) اینکودر چرخ زمین گرد، (d) رایانه همراه، (e) سامانه انتقال داده و (f) شیر کنترل جهت سلونوئیدی

Figure 2. Soil shield repositioning system implemented on a Goldoni tiller (C40); a) tiller and tractor, b) soil shield encoder, c) ground wheel encoder, d) computer, e) data transportation system, f) solenoid valve.

مشخصات مزرعه

به‌منظور انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای، قطعه زمینی با ابعاد ۲۴۰×۷۰ متر از زمین‌های مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان واقع در دشت دهگلان با موقعیت جغرافیایی (47°18'21.8" E)، (35°18'13.6" N) و با ارتفاع ۱۸۶۷ متر از سطح دریا در نظر گرفته شد. این مزرعه قبلاً زیر کشت کلزا بود و با یک شخم سطحی به‌وسیله‌ی چیزل برای آزمایش‌های مزرعه‌ای آماده شد. مزرعه دارای بقایای گیاهی در حد متوسط بود. بافت خاک مزرعه لومی رسی با مقدار رس ۲۷/۵۶٪، سیلت ۳۲/۷۲٪ و شن ۳۹/۷۲٪ بود. رطوبت خاک مزرعه با نمونه برداری از عمق صفر تا ۲۰

سانتی‌متری و با استفاده از روش آون (ISO 17892-1, 2014) در طی چند مرحله از انجام آزمایش تعیین شد و مقدار آن در محدوده ۳۱/۸۳-۱۴/۱۷ درصد بر پایه خشک به‌دست آمد. 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 مخروط خاک ارزیابی شد و مقدار آن ۲۶/۸۷ کیلو پاسکال به ازای هر سانتی‌متر نفوذ به‌دست آمد.

آزمون مزرعه‌ای سامانه کنترل حفاظ خاک:

از آنجا که حرکت تراکتور در مزرعه باعث می‌شود تا

مزرعه مجدداً با هم مقایسه شدند. مشابه آزمون‌های آزمایشگاهی، آزمایش‌ها به نحوی اجرا شد که تنظیم هر موقعیت از حفاظ خاک حداقل شش بار تکرار شود. همچنین در طی انجام آزمایش زمان لازم برای رسیدن به موقعیت مورد نظر با استفاده از برنامه نوشته شده در نرم‌افزار لیبویو اندازه‌گیری شد و به تناسب آن سرعت زاویه‌ای باز و بسته شدن حفاظ خاک نیز محاسبه شد.

نتایج و بحث

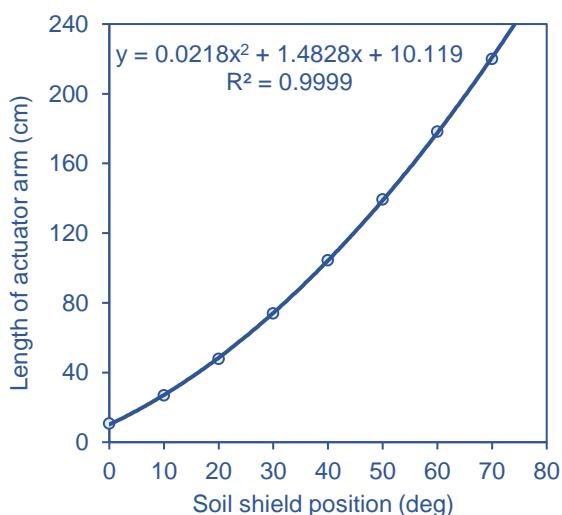
نتایج آزمون آزمایشگاهی سامانه کنترل حفاظ خاک نتایج آزمایشگاهی سرعت و زمان عملکرد سامانه در تغییر موقعیت حفاظ خاک برای رسیدن به موقعیت درخواست شده در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصله برای هر گام ۱۰ درجه‌ای میانگین سرعت عملکرد تغییر موقعیت حفاظ خاک در دو حالت باز و بسته شدن حفاظ خاک به ترتیب $۱۰۲/۰ \pm ۹/۲$ و $۷۹/۸ \pm ۰/۷$ درجه بر ثانیه و میانگین زمان باز و بسته شدن برای هر گام ۱۰ درجه‌ای نیز به ترتیب $۰/۱۱ \pm ۰/۰۲$ و $۰/۱۵ \pm ۰/۰۱$ ثانیه به دست آمد. نتایج نشان داد که سرعت لازم برای رسیدن حفاظ خاک به موقعیت‌های مختلف در حالت باز شدن نسبت به حالت بسته شدن حفاظ خاک بیشتر است. به عبارتی زمان لازم برای رسیدن به موقعیت مطلوب در حالت باز شدن حفاظ خاک نسبت به بسته شدن آن کمتر است. دلیل این امر ماهیت جک‌های هیدرولیک دوطرفه است، که دارای سطح مقطع بزرگتر پیستون به هنگام باز شدن هستند. در حالیکه در طرف دیگر سطح مقطع پیستون به علت اتصال بازوی جک به قسمت میانی دایره پیستون سطح مؤثر آن کاهش می‌یابد. تفاوت در سرعت انقباض جک هیدرولیکی در پژوهش (Fallahi et al., 2015) نیز گزارش شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که سرعت حفاظ خاک در هر کدام از گام‌های درخواستی در هر دو حالت باز و بسته شدن متفاوت است.

بخشی از توان موتور برای تأمین سرعت حرکت تراکتور مصرف شود، بررسی کار سامانه الکترو-هیدرولیک کنترل حفاظ خاک که عملکرد آن به‌طور غیر مستقیم تحت تأثیر حرکت تراکتور قرار می‌گیرد حائز اهمیت است. لذا عملکرد سامانه الکترو-هیدرولیک کنترل حفاظ خاک در تغییر موقعیت حفاظ خاک روتیواتور به هنگام کار در مزرعه نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در طی انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای دور موتور تراکتور مطابق با دفترچه راهنمای آن روی ۱۶۸۴ دور بر دقیقه تنظیم شد. بدین ترتیب فشار روغن در سرعت‌های مختلف تأمین شده ضمن اینکه سرعت محور تواندهی در ۵۴۰ دور بر دقیقه نیز ثابت می‌ماند. عمق کار روتیواتور روی ۱۵ سانتی‌متر نگاه داشته شد. حرکت روتیواتور در سرعت‌های $۲/۵$ ، $۳/۶$ و $۴/۸$ کیلومتر مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که روتیواتور مورد استفاده از نوع باغی با ابعاد متوسط بود که می‌بایست به وسیله تراکتور باغی با حداکثر سرعت $۴/۸$ کیلومتر در ساعت مطابق با دفترچه راهنمای وسیله نگه داشته می‌شد، از این محدوده سرعت استفاده شد. موقعیت حفاظ خاک در دو مرحله باز و بسته شدن به ترتیب از موقعیت صفر تا ۸۰ درجه و برعکس یعنی از ۸۰ تا صفر درجه با گام‌های ۲۰ درجه تغییر داده شد. تغییر موقعیت حفاظ خاک برای هر یک متر پیشروی روتیواتور یک بار انجام شد. آزمایش‌های مقدماتی مزرعه نشان داد چنانچه گام‌های باز و بسته شدن حفاظ خاک همانند آزمایش‌های کارگاهی ۱۰ درجه انتخاب می‌شد، تغییر محسوسی در زبری خاک پس از پیمودن یک متر پیشروی تراکتور مشاهده نمی‌شد. لذا در شرایط مزرعه گام‌های ۲۰ درجه‌ای برای تغییر موقعیت حفاظ انتخاب شد تا بتوان در هر بار تغییر حفاظ شدت خرد شدن بشتی برای شخم فراهم آورد. داده‌های دو موقعیت حفاظ خاک اندازه‌گیری شده به وسیله‌ی اینکودر (به دست آمده) و مقدار داده شده به نرم‌افزار (درخواست شده) در شرایط

جدول ۱- نتایج آزمایشگاهی سرعت و زمان عملکرد سامانه در تغییر موقعیت حفاظ خاک برای رسیدن به موقعیت درخواست شده
 Table 1. Laboratory results of operating speed and time of soil shield repositioning system to obtain the requested position

تغییر موقعیت حفاظ خاک	مرحله تغییر موقعیت حفاظ خاک (deg)	سرعت عملکرد تغییر موقعیت حفاظ خاک (deg/s)	زمان عملکرد (s)
باز شدن	۰-۱۰	۱۴۶/۰±۱۸/۲	۰/۰۷±۰/۰۳
	۱۰-۲۰	۱۳۹/۳±۱۶/۶	۰/۰۸±۰/۰۲
	۲۰-۳۰	۱۱۶/۳±۱۱/۰	۰/۰۹±۰/۰۹
	۳۰-۴۰	۱۱۳/۳±۹/۷	۰/۱۰±۰/۰۲
	۴۰-۵۰	۹۳/۱±۷/۱	۰/۱۱±۰/۰۱
	۵۰-۶۰	۸۰/۰±۶/۱	۰/۱۲±۰/۰۱
	۶۰-۷۰	۶۸/۷±۳/۰	۰/۱۳±۰/۰۱
	۷۰-۸۰	۵۹/۱±۱/۸	۰/۱۶±۰/۰۱
میانگین	-	۱۰۲/۰±۹/۲	۰/۱۱±۰/۰۲
بسته شدن	۸۰-۷۰	۳۷/۸±۳/۹	۰/۳۱±۰/۰۰
	۷۰-۶۰	۴۷/۹±۴/۰	۰/۲۱±۰/۰۰
	۶۰-۵۰	۶۰/۰±۴/۲	۰/۱۷±۰/۰۱
	۵۰-۴۰	۶۲/۱±۷/۷	۰/۱۶±۰/۰۱
	۴۰-۳۰	۸۸/۴±۸/۴	۰/۱۳±۰/۰۱
	۳۰-۲۰	۹۳/۱±۹/۰	۰/۰۹±۰/۰۲
	۲۰-۱۰	۱۱۳/۹±۱۵/۶	۰/۰۹±۰/۰۲
	۱۰-۰	۱۳۹/۳±۱۷/۰	۰/۰۸±۰/۰۳
میانگین	-	۷۹/۰±۸/۷	۰/۱۵±۰/۰۱

حفاظ خاک لازم شود.



شکل ۳- رابطه بین موقعیت حفاظ خاک و طول جابجایی بازوی جک هیدرولیکی

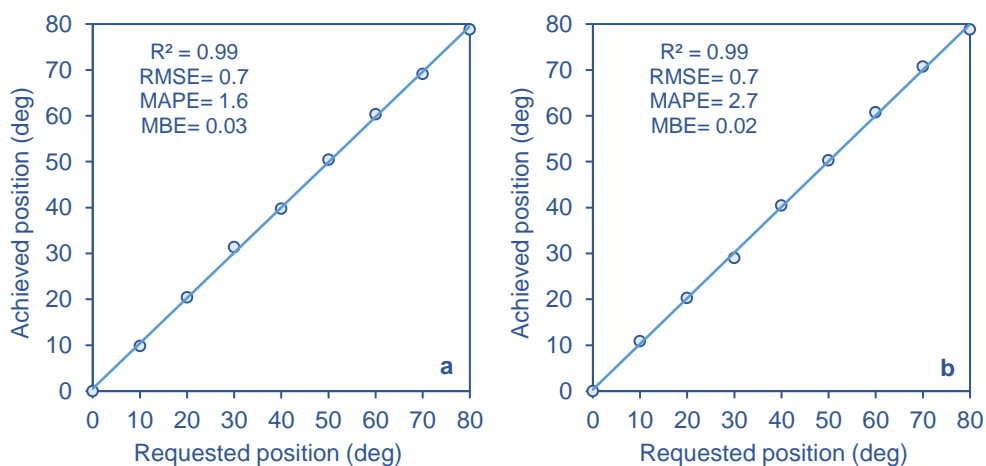
Figure 3- Length of the actuator arm versus soil shield position

رابطه بین موقعیت حفاظ خاک درخواست شده و موقعیت به دست آمده به وسیله جک هیدرولیکی به ترتیب برای حالت باز و بسته شدن حفاظ خاک در

علاوه بر این، سرعت باز و یا بسته شدن حفاظ خاک در گام‌های بالاتر در مقایسه با گام‌های پایین‌تر کندتر است (شکل ۳). به عنوان مثال، سرعت حرکت حفاظ خاک برای تغییر از موقعیت ۷۰ تا ۸۰ درجه کمتر از سرعت حرکت حفاظ خاک برای تغییر از موقعیت ۱۰ تا ۲۰ درجه است. دلیل این تفاوت در مکانیزم جفت لنگی اتصال جک هیدرولیکی به حفاظ خاک روتیواتور است. اگر حفاظ خاک بسته باشد، به محض منقبض شدن جک هیدرولیکی حفاظ شروع به چرخش حول لولاهای خود نموده و تنها لولای محل اتصال بازوی جک به اهرم واسط اتصال به حفاظ خاک حرکت می‌کند. بنابراین در این حالت حفاظ خاک با سرعت بیشتری باز می‌شود. اما زمانی که محل متصل شدن اهرم واسط اتصال جک هیدرولیکی به حفاظ خاک از سطح فوقانی محفظه روتیواتور بالاتر آید، اتصال لولائی محل اتصال جک هیدرولیکی به تراکتور نیز شروع به حرکت نموده و این امر باعث می‌شود تا انقباض بیشتری برای باز شدن

Fallahi et al. (2015) در پژوهش خود به منظور ارزیابی آزمایشگاهی سامانه الکترو-هیدرولیک کنترل عمق ادوات خاک‌ورزی، دقت دستگاه را در هفت مرحله تغییر عمق به اندازه ۵۰ میلی‌متر در بازه ۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر برای دو حالت افزایش و کاهش عمق بررسی کرده و میزان خطای دستگاه در آزمایشگاه را ۳/۳ درصد برای افزایش و ۳/۸۳ درصد برای کاهش عمق گزارش کردند.

شرایط آزمایشگاهی در شکل (۴) نشان داده شده است. ضرایب تبیین برای هر دو حالت باز و بسته شدن حفاظ خاک بیش از ۰/۹۹، میانگین مربعات خطا ۰/۷ درجه و میانگین درصد خطای مطلق نیز به ترتیب ۱/۶ و ۲/۶ درصد به دست آمد. شاخص‌های به دست آمده بیانگر دقت و حساسیت سامانه کنترل موقعیت حفاظ خاک در شرایط آزمایشگاهی است.



شکل ۴- موقعیت درخواست شده و به دست آمده حفاظ خاک در آزمایشگاه، باز شدن حفاظ (a) و بسته شدن حفاظ خاک (b)
 Figure 4- Requested and achieved position of soil shield under laboratory condition in a) opening and b) closing stages.

به دست آمد. با توجه به نتایج حاصله دقت و حساسیت سامانه کنترل موقعیت حفاظ خاک در شرایط مزرعه‌ای نیز بسیار قابل اطمینان است. جدول‌های (۳) و (۴) به ترتیب نتایج مزرعه‌ای سرعت عملکرد جک هیدرولیکی و مسافت طی شده برای رسیدن به موقعیت مطلوب در سه سرعت پیشروی ۲/۶، ۳/۵ و ۴/۸ کیلومتر در ساعت و دو حالت باز و بسته شدن در چهار مرحله تغییر موقعیت حفاظ خاک را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود سرعت عملکرد دستگاه برای سه سرعت پیشروی مختلف در حالت باز شدن بیشتر از حالت بسته شدن است، به گونه‌ای که میانگین سرعت عملکرد برای حالت باز شدن حفاظ برای سه سرعت پیشروی ۲/۶، ۳/۵ و ۴/۸ کیلومتر در ساعت

نتایج آزمون مزرعه‌ای سامانه کنترل حفاظ خاک: به نظر می‌رسد که نتایج به دست آمده در ارزیابی سامانه کنترل حفاظ خاک در آزمایشگاه کفایت کند، اما به دلیل وجود نواسانات روتیواتور به هنگام حرکت در مزرعه و نیز کاسته شدن عملکرد پمپ روغن در اثر کاهش احتمالی فشار روغن، ارزیابی مزرعه‌ای سامانه نیز لازم بود. در جدول (۲) برازش خطی بین دو متغیر موقعیت حفاظ خاک درخواست شده و موقعیت به دست آمده به وسیله‌ی جک هیدرولیکی برای حالت باز و بسته شدن حفاظ خاک در شرایط مزرعه‌ای در سه سرعت پیشروی مختلف ۲/۶، ۳/۵ و ۴/۸ کیلومتر در ساعت آمده است. ضرایب تبیین برای هر دو حالت باز و بسته شدن حفاظ خاک در هر سه سرعت پیشروی مختلف بیش از ۰/۹۹

نتایج کار آنها نشان داد که با افزایش دور موتور زمان تغییر عمق کاهش می‌یابد و دلیل آن را افزایش دبی جریان روغن هیدرولیک به دلیل افزایش دور موتور بیان کردند. در تحقیق اشاره شده، زمان تأخیر در بازوی هیدرولیک بالابرنده با افزایش دور موتور کاهش یافت. مشابه با نتایج این تحقیق، آنها نیز دریافتند که کاهش عمق که با باز شدن بازوی هیدرولیک بالابرنده همراه است، با سرعت بیشتری روی خواهد داد.

زمان به‌دست آمده برای عملکرد بازوی هیدرولیک نیز با نتایج کار Lee et al. (1998) مطابقت دارد. گزارش شده که برای ۱۵ سانتی متر تغییر عمق، تأخیر زمانی ۰/۵ ثانیه در کاهش عمق (منقبض شدن بازو) و اندکی کمتر از ۰/۵ ثانیه در افزایش عمق (منبسط شدن بازو) لازم است.

به ترتیب ۹۷/۷، ۹۹/۱ و ۹۹/۱ درجه بر ثانیه و برای حالت بسته شدن به ترتیب ۷۷/۳، ۷۸/۳ و ۷۸/۷ درجه بر ثانیه به‌دست آمد. برای تمام حالت‌ها همانند نتایج ارزیابی آزمایشگاهی سرعت عملکرد در گام‌های پایین تغییر موقعیت (به‌عنوان مثال، صفر تا ۲۰ درجه) بیشتر از گام‌های بالا (به‌عنوان مثال، ۶۰ تا ۸۰ درجه) می‌باشد. با توجه به انحراف معیار داده‌های سه سرعت در مقایسه با یکدیگر، سرعت پیشروی (تعویض دنده) تأثیر چندانی بر سرعت عملکرد سامانه ندارد و دلیل اصلی آن ثابت بودن دور موتور تراکتور یعنی ثابت بودن نرخ روغن هیدرولیک تراکتور در سه سرعت است. این مطلب با نتایج به‌دست آمده توسط Lee et al. (1998) که یک سیستم کنترل عمق الکترو-هیدرولیکی را روی یک روتیواتور نصب کرده و آزمایش کردند مطابقت دارد.

جدول ۲- نتایج مزرعه‌ای برازش بین موقعیت حفاظ خاک درخواست شده و به‌دست آمده در سرعت‌های پیشروی مختلف

Table 2. The best fit correlation between the requested and obtained soil shield position at different travel speeds under field conditions

MBE (deg)	MAPE	RMSE (deg)	R ²	سرعت پیشروی (km/h)	تغییر موقعیت حفاظ خاک
۰/۶	۰/۹۸	۱/۳	۰/۹۹	۲/۶	باز شدن
۰/۴	۰/۷۳	۱/۱	۰/۹۹	۳/۵	
۰/۴	۰/۹۶	۱/۳	۰/۹۹	۴/۸	
۰/۵	۰/۶۰	۱/۲	۰/۹۹		کل
۰/۳	۰/۸۷	۱/۱	۰/۹۹	۲/۶	بسته شدن
۰/۳	۱/۳۰	۱/۴	۰/۹۹	۳/۵	
۰/۴	۲/۸۵۵	۱/۵	۰/۹۹	۴/۸	
۰/۴	۱/۴۸	۱/۳	۰/۹۹		کل

جدول ۳- نتایج مزرعه‌ای زمان و سرعت عملکرد جک هیدرولیکی در تغییر موقعیت حفاظ خاک برای رسیدن به موقعیت درخواست شده

Table 3. The hydraulic actuator time and speed in repositioning of soil shield to obtain the required position

انحراف از معیار (deg/s), (s)	زمان (s) و سرعت (deg/s) عملکرد تغییر موقعیت حفاظ خاک			میزان تغییر موقعیت حفاظ خاک (deg)
	۴/۸ (km/h)	۳/۵ (km/h)	۲/۶ (km/h)	
۱/۱ (۰/۰۰)*	۱۳۴/۵ (۰/۱۳)	۱۳۶/۶ (۰/۱۳)	۱۳۵/۳ (۰/۱۳)	۲۰-۰
۰/۶ (۰/۰۰)	۱۱۴/۴ (۰/۱۸)	۱۱۳/۶ (۰/۱۷)	۱۱۳/۳ (۰/۱۷)	۴۰-۲۰
۲/۰ (۰/۰۱)	۸۵/۴ (۰/۲۴)	۸۱/۵ (۰/۲۵)	۸۲/۹ (۰/۲۵)	۶۰-۴۰
۲/۷ (۰/۰۱)	۶۲/۲ (۰/۳۰)	۶۴/۶ (۰/۳۰)	۵۹/۱ (۰/۳۲)	۸۰-۶۰
۰/۹ (۰/۰۰)	۹۹/۱ (۰/۲۱)	۹۹/۱ (۰/۲۱)	۹۷/۷ (۰/۲۲)	میانگین
۱/۱ (۰/۰۱)	۴۱/۸ (۰/۴۶)	۴۰/۱ (۰/۴۸)	۳۹/۷ (۰/۴۸)	۶۰-۸۰
۲/۲ (۰/۰۱)	۶۰/۸ (۰/۳۶)	۵۹/۶ (۰/۳۶)	۵۶/۶ (۰/۳۷)	۴۰-۶۰
۰/۷ (۰/۰۱)	۹۲/۹ (۰/۱۸)	۹۲/۶ (۰/۲۰)	۹۴/۰ (۰/۲۱)	۲۰-۴۰
۰/۹ (۰/۰۱)	۱۱۹/۳ (۰/۱۶)	۱۲۰/۶ (۰/۱۵)	۱۱۸/۹ (۰/۱۵)	۰-۲۰
۰/۷ (۰/۰۱)	۷۸/۶۹ (۰/۲۹)	۷۸/۲ (۰/۳۰)	۷۷/۳ (۰/۳۰)	میانگین

* داده‌ها در جدول به‌صورت "زمان عملکرد" سرعت عملکرد بیان شده است.

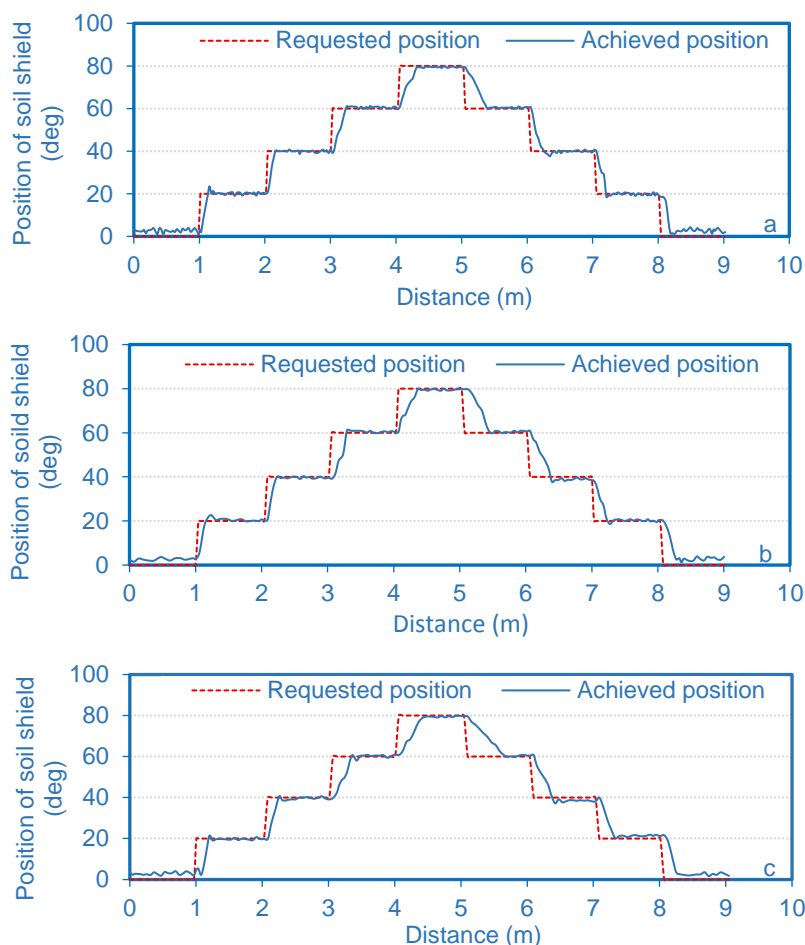
جدول ۴- نتایج مزرعه‌ای مسافت طی شده برای رسیدن حفاظ خاک به موقعیت درخواست شده

Table 4. The distance traveled to obtain the required soil shield position under field conditions

انحراف از معیار (mm)	مسافت طی شده (mm)			میزان تغییر موقعیت حفاظ خاک (deg)
	۴/۸ (km/h)	۳/۵ (km/h)	۲/۶ (km/h)	
۳۷	۱۶۸	۱۲۶	۹۵	۲۰-۰
۵۴	۲۳۳	۱۶۶	۱۲۶	۴۰-۲۰
۷۳	۳۲۴	۲۴۷	۱۷۸	۶۰-۴۰
۹۰	۴۰۵	۲۹۰	۲۲۸	۸۰-۶۰
۶۳	۲۸۳	۲۰۷	۱۵۷	میانگین
۱۳۵	۶۱۷	۴۶۴	۳۴۷	۶۰-۸۰
۱۰۸	۴۸۰	۳۴۸	۲۶۵	۴۰-۶۰
۴۶	۲۴۵	۱۹۵	۱۵۳	۲۰-۴۰
۵۲	۲۰۹	۱۴۲	۱۰۶	۰-۲۰
۸۶	۳۸۸	۲۸۷	۲۱۸	میانگین

۲۰ درجه در دو حالت باز و بسته شدن حفاظ خاک در شکل (۵) آمده است. شایان ذکر است که فرمان تغییر موقعیت، برای هر ۱ متر طول پروفایل ارسال شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت پیشروی مسافت طی شده برای رسیدن حفاظ خاک به موقعیت درخواست شده افزایش یافته است و همچنین مسافت طی شده در حالت بسته شدن حفاظ خاک نسبت به حالت باز شدن بیشتر است. در سه سرعت پیشروی مورد آزمایش برای تمام مراحل تغییر وضعیت، موقعیت حفاظ خاک به دست آمده به خوبی در موقعیت درخواست شده قرار گرفته است. جدول (۵) انحراف معیار در رسیدن به موقعیت‌های مختلف حفاظ خاک را در سه سرعت پیشروی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصله می‌توان اظهار داشت که کوپل میله پیستون به حفاظ خاک، متناسب بودن جک هیدرولیکی، عملکرد بازخورد اینکودر و در نهایت استفاده از هیدرولیک تراکتور به درستی طراحی شده است. البته در موقعیت کاملاً بسته، حفاظ خاک با اختلاف اندکی (۴~۱ درجه) در موقعیت خواسته شده قرار گرفت، چرا که خاک جمع شده در پشت حفاظ خاک مانع بسته شدن کامل آن می‌شد.

ثابت نگه داشتن دور موتور (۱۶۸۴ دور بر دقیقه) از نظر فنی کاملاً صحیح است و در صورت انتخاب دنده‌های سبک‌تر برای افزایش سرعت پیشروی تراکتور خللی در عملکرد سامانه طراحی شده به وجود نمی‌آورد. این مطلب توسط Fallahi et al. (2015) نیز قبلاً به اثبات رسیده است. آنها در تحقیق خود گزارش کردند که انتخاب دنده هیچ تأثیر معنی داری در عملکرد دستگاه کنترل خودکار عمق ادوات خاک‌ورزی طراحی شده آنها ندارد. طبیعی است که مسافت طی شده پس از دریافت سیگنال، تا رسیدن حفاظ خاک به موقعیت مطلوب هم وابسته به سرعت عملکرد سامانه و هم سرعت پیشروی است. بنابر این با افزایش سرعت پیشروی و نیز کاهش سرعت عملکرد سامانه، مسافت طی شده افزایش می‌یابد. باتوجه به جدول (۴) میانگین مسافت طی شده برای حالت باز شدن حفاظ خاک در سه سرعت پیشروی ۲/۶، ۳/۵ و ۴/۸ کیلومتر در ساعت به ترتیب ۱۵۷، ۲۰۷ و ۲۸۳ میلی‌متر و برای حالت بسته شدن به ترتیب ۲۱۸، ۲۸۷ و ۳۸۸ میلی‌متر به دست آمد. نمونه‌ای از پروفایل طولی موقعیت به دست آمده حفاظ خاک و موقعیت درخواست شده برای سه سرعت پیشروی ۲/۶، ۳/۵ و ۴/۸ کیلومتر در ساعت با گام‌های



شکل ۵- تطابق موقعیت درخواست شده و موقعیت به دست آمده حفاظ خاک در راستای حرکت در مزرعه در سه سرعت پیشروی ۲/۶ (a)، ۳/۵ (b) و ۴/۸ (c) کیلومتر در ساعت

Figure 5- Conformity of requested and achieved position of soil shield while traveling across the field at three travel speeds of 2.6 (a), 3.5 (b), and 4.8 (c) km/h.

جدول ۵- انحراف معیار در رسیدن به موقعیت‌های مختلف حفاظ خاک در سه سرعت پیشروی مورد آزمایش
Table 5. Standard deviation in obtaining different soil shield positions at three examined travel speeds

انحراف معیار در رسیدن به موقعیت‌های مختلف حفاظ خاک (deg)									سرعت پیشروی (km/h)
موقعیت‌های حفاظ خاک									
۰	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۶۰	۴۰	۲۰	۰	
۰/۹	۰/۵	۰/۸	۰/۳	۰/۲	۰/۴	۰/۵	۰/۵	۰/۸	۲/۶
۰/۸	۰/۴	۰/۵	۰/۵	۰/۳	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۷	۳/۵
۰/۶	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۳	۰/۴	۰/۶	۰/۶	۰/۸	۴/۸

نتیجه‌گیری

در فاصله زمان کوتاهی حفاظ خاک روتیواتور را که در تغییر میزان خردشدگی خاک مؤثر است، تغییر موقعیت دهد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که می‌توان از سامانه هیدرولیک تراکتور برای کنترل جک هیدرولیکی سامانه الکترو-هیدرولیک کنترل خودکار حفاظ خاک به‌خوبی استفاده کرد و نیازی به تجهیزات جانبی هیدرولیکی

در این پژوهش یک سامانه الکترو-هیدرولیک کنترل خودکار حفاظ خاک روتیواتور برای کنترل میزان خردشدگی خاک طراحی، ساخته و آزمایش شد. در این مطالعه سعی شد تا نشان داده شود که برای اجرای عملیات شخم با نرخ متغیر سامانه طراحی شده می‌تواند

می‌توان اظهار داشت که این سامانه قابلیت استفاده برای کنترل بلادرنگ نرخ عملیات شخم را با حداقل پیچیدگی و هزینه خواهد داشت. پیشنهاد می‌شود با استفاده از این سامانه مطالعه‌ای مفصل در خصوص ارزیابی مزرعه‌ای کارایی دستگاه در فراهم آوردن بستر مناسب بذر برای برخی از محصولات کشاورزی انجام شود. هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

نخواهد بود. برای ارزیابی بیشتر روتواتور مجهز به این سامانه لازم است که با تهیه پهنه خواص فیزیکی خاک کارایی دستگاه را در دستیابی به یک شخم یکنواخت در سطح مزرعه ارزیابی کرد. همچنین با توجه به نتایج ارزیابی مزرعه‌ای در رابطه با دقت و زمان پاسخ مناسب سامانه الکترو-هیدرولیک کنترل خودکار حفاظ خاک

REFERENCES

- Abbaspour-Gilandeh, Y., Alimardani, R., Khalilian, A., Keyhani, A. & Sadati, S.H. (2006). Energy requirement of site-specific and conventional tillage as affected by tractor speed and soil parameters. *International Journal of Agriculture and Biology*, 8, 499-503.
- Adamchuk, V.I., C.R. Hempleman, & Jahraus, D.G. (2009). On-the-go capacitance sensing of soil water content. Paper No. MC09-201. *Transactions of the ASABE*, St. Joseph, MI.
- Adamchuk, V.I., J.W. Hummel, M.T. Morgan, & S.K. Upadhyaya. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(1), 71-91.
- Adamchuk, V.I., Morgan, M.T. & Sumali, H. (2001). Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go. *American Society of Association Executives*, 44(6), 1377-1383.
- Andrade-Sánchez, P., S.K. Upadhyaya, & Jenkins, B.M. (2007). Development, construction, and field evaluation of a soil compaction profile sensor. *Transactions of the ASABE*, 50, 719-725.
- Anthonis, J., Mouazen, A.M., Saeys, W. & 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.
- Beh-Ayin, M.A. & 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 Farsi)
- Crummett, D. (2019). Variable intensity tillage offers solutions for varying soil conditions. In *Niche Equipment Markets, Manufacturer News*, available at: <https://www.farm-equipment.com/articles/16770-variable-intensity-tillage-offers-solutions-for-varying-soil-conditions>.
- Christy, C.D. (2008). Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61, 10-19.
- Elahifard, E., Shekofteh, M., Hojati, M.R. & 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 Farsi)
- Fallahi, E., Aghkhani, M.H. & Bayati, M.R. (2015). Design, construction and evaluation of the automatics position control system of tillage tools. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 46(2), 117-123. (in Farsi)
- Gohari, M., Hemmat, A. & 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 Farsi)
- Hemmat, A., & Adamchuk, V.I. (2008). Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63, 89-103.
- Hussain, N., Farooque, A.A., Schumann, A.W., McKenzie-Gopsill, A., Esau, T., Abbas, F., Acharya, B. & Zaman, Q. (2020). Design and development of a smart variable rate sprayer using deep learning. *Remote Sensing*, 12(24), 4091, from <https://doi.org/10.3390/rs12244091>.

- Ji, W., Adamchuk, V., Biswas, A., Dhawale, N., Sudarsan, B., Zhang, Y., Viscarra Rossel, R. & Shi, Z. (2016). Assessment of soil properties in situ using a prototype portable MIR spectrometer in two agricultural fields. *Biosystems Engineering*, 152, 14-27.
- Jia, H., Guo, M., Yu, H., Li, Y., Feng, X., Zhao, J. & Qi, J. (2016). An adaptable tillage depth monitoring system for tillage machine. *Biosystems Engineering*, 151, 187-199.
- Kepner, R.A., Bainer, R., Barger, E.L., (1982). *The principles of Farm Machinery*. New York, John Wiley & Sons, Inc. 527 pp.
- Kheiralla, A.F., Yahya, A., Zohadie, M. and Ishak, W. (2004). Modelling of power and energy requirements for tillage implements operating in Serdang sandy clay loam, Malaysia. *Soil and Tillage Research*, 78, 21-34.
- Lee, J., Yamazaki, M., Oida, A., Nakashima, H. & Shimizu, H. (1998). Electro-hydraulic tillage depth control system for rotary implements mounted on agricultural tractor design and response experiments of control system. *Journal of Terramechanics*, 35, 229-238.
- Lee, J., Yamazaki, M., Oida, A., Nakashima, H. & Shimizu, H. (2000). Field performance of proposed foresight tillage depth control system for rotary implements mounted on an agricultural tractor. *Journal of Terramechanics*, 37, 99-111.
- Liu, W., Gaultney, L.D. & Morgan, M.T. (1993). Soil texture detection using acoustic methods. *American Society of Association Executives*, 93-1015. ASAE, St. Joseph, MI.
- Maleki, M.R., Mouazen, A.M., De Ketelaere, B., Ramon, H. & De Baerdemaeker, J. (2008). On-the-go variable rate phosphorus fertilization based on a visible and near-infrared soil sensor. *Biosystems Engineering*, 99 (1), 35 – 46.
- Mansourirad, D. (2013). *Tractors and Agricultural Machinery* (Vol.1). (7th ed.). Bu-Ali Sina Univercity Press. 853 P. (in Farsi)
- Marinello, F., Pezzuolo, A., Gasparini, F., Arvidsson, J. & Sartori, L. (2015). Application of the Kinect sensor for dynamic soil surface characterization. *Precision. Agriculture*, 16 (6), 601–612.
- Mohammadi, F., Maleki, M.R., & Khodaei, J. (2022a). Control of variable rate system of a rotary tiller based on real-time measurement of soil surface roughness. *Soil and Tillage Research*, 215, 105216.
- Mohammadi, F., Maleki, M.R., & Khodaei, J. (2022b). The effect of travel speed and the position of rotary tiller hood on soil surface roughness. *Agricultural Mechanization*, 6(4), 35-45. (in Farsi)
- Mouazen, A.M., Anthonis, J. & Ramon, H. (2005a). An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, Part 4: Improvement of compaction maps by using a proportional integrative derivative depth controller. *Biosystems Engineering*, 90(4), 409-418.
- Mouazen, A.M., Anthonis, J., Saeys, W. & Ramon, H. (2004). An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, Part 1: Sensor design for measurement of frame height variation from soil surface. *Biosystems Engineering*, 89(2), 139-150.
- Mouazen, A.M., De Baerdemaeker, J. & Ramon, H. (2005b). Towards development of on-the-go soil moisture content sensor using a fibre type NIR spectrophotometer. *Soil and Tillage Research*, 80, 171–183.
- Mouazen, A.M., Maleki, M.R., De Baerdemaeker, J. & Ramon H. (2007). On-line measurement of some selected soil properties using a VIS–NIR sensor. *Soil and Tillage Research*, 93(1), 13–27.
- Mouazen, A.M., & Ramon H. (2007). On Development of on-line measurement system of bulk density based on on-line measured draught, depth and soil moisture content. *Soil and Tillage Research*, 86, 218-229.
- Rajabi-Vndchali, M., Hemmat, A. & Ghanbari Malidarreh, A. (2015). Field performance of the disk harrow, power harrow and rotary tiller at different soil moisture contents on a clay loam soil in Mazandaran. *Journal of Agricultural Machinery*, 5(1), 63-72. (in Farsi)
- Ribeiro Mendes, W., Araújo, F.M.U., Dutta, R. & Heeren, D.M. (2019). Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing. *Expert Systems with Applications*, 124(15), 13-24.

- Riegler-Nurscher, P., Moitzi, G., Moitzi, J., Huber, J., Karner, J., Wagentristl, H. & Wagentristl, M. (2020). Machine vision for soil roughness measurement and control of tillage machines during seedbed preparation. *Soil and Tillage Research*, 196, 104351, from <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104351>.
- Saeyns, W., Mouazen, A.M., Anthonis, J. & Ramon, H. (2004). An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, Part 2: Modelling of the depth control system. *Biosystems Engineering*, 89(3), 267-280.
- 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. & 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 Farsi)
- Shinde, G.U. & Kajale, S.R. (2011). Computer aided engineering analysis and design optimization of rotary tillage tool components. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 4(3), 1-6.
- Siefken, R.J., Adamchuk, V.I., Eisenhauer, D.E. & Bashford, L.L. (2005). Mapping soil mechanical resistance with a multiple blade system. *Engineering in Agriculture*, 21(1), 15-23.
- Sirjacobs, D., Hanquet, B., Lebeau, F. & Destain, M.F. (2002). On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture. *Soil and Tillage Research*, 64(3-4), 231-242.
- Tabatabae koloor, R. & 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 Farsi)
- Tekeste, M.Z., Grift, T.E. & Raper, R.L. (2002). Acoustic compaction layer detection. ASAE Paper No. 02-1089. *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, MI.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J. & Skjemstad, J.O. (2006). Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131(1-2), 59-75.
- Waiser, T.H., Morgan, C.L.S. & Brown, D.J. (2007). In situ characterization of soil clay content with visible near infrared diffuse reflectance spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 389-396.