

Real-Time Measurement of In-Field Soil Surface Roughness Using Laser and Infrared Sensors

N. Salehi Babamiri¹, H. Hajy Agha Alizade^{1*}, M. Dowlati²

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Department of Food Science and Technology, Tuyserkan Faculty of Engineering and Natural Resources, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(*- Corresponding Author Email: h-alizade@basu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2024.90374.1300>

Introduction

Soil surface roughness is an important factor in determining the intensity and quality of tillage operations, and obtaining accurate information essential for precision tillage. Using an inappropriate technique due to the lack of precise discrepancy detection can lead to increased time spent on analysis and potential damage. Generally, there are two methods for measuring soil surface roughness: contact and non-contact. Contact methods are less accurate for measuring the roughness of soft soil because they involve physical contact, which can partially disturb the soil. Most non-contact measurement methods are also performed in stop-and-go conditions, which increases measurement time and related analysis. The aim of this study is to measure soil surface roughness in real-time using optical sensors in the field. The accuracy and precision of two non-contact measurement methods will be compared to determine the best approach for precision tillage operations.

Materials and Methods

In the current research, a real-time soil surface roughness measurement system consisting of mechanical and electrical modules, data collection, and processing was built. The system performance was evaluated at different forward speeds and roughness categories, with two types of infrared and laser sensors. To assess the sensors' accuracy, the collected data was compared against the pin gauge method, which served as the reference standard. The method exhibiting the least variation from this reference is considered to provide the most reliable data. Also, to further examine the accuracy of the sensors, the roughness data obtained from the sensor at various frequencies was compared against the roughness data obtained from the pin measuring device at the same level, resulting in a suitable curve plot. The interpretation of the obtained mathematical relationship indicates the precision of the sensor data.

Results and Discussion

The results obtained from the optical sensors were compared to the pin meter, used as the reference method, in both stationary and moving conditions. It was demonstrated that the optical sensors detect distance in the static state similarly to the reference pin meter. The calibration curve interpretation factor was 0.99 for the infrared sensor and 1 for the laser sensor, indicating a strong correlation between the sensor signals and their distance from the soil surface. The random roughness index was significant for different roughness classes at the 1% probability level, showing that this index effectively distinguishes between the resulting roughness classes. Analysis of variance results revealed that the measurement method had a significant effect at the 1% level. The method with the smallest difference from the reference method is considered the most appropriate measurement technique. The effect of forward speed was also significant at the 1% level; the speed at which the sensor's performance did not significantly differ from the reference method was identified as the optimal speed for the system. Additionally, the effect of roughness class was significant at the 1% level, confirming that the created roughness classes had meaningful differences. The results of the sensor accuracy evaluation showed that the data obtained from the laser sensor at speeds of 1 and 2.6 km h⁻¹ had no significant difference with the reference method. Therefore, it is appropriate to use the laser sensor at speeds of 1 and 2.6 km h⁻¹. At speeds higher than 3.5 km h⁻¹, the laser sensor successfully detected smooth surfaces, but did not correctly distinguish uneven surfaces. In general, the laser sensor was able to detect all categories of roughness at a speed of 2.6 km h⁻¹. One reason the laser sensor did not perform well at speeds above 2.6 km h⁻¹ was its low data acquisition rate. By using laser sensors with a higher data collection rate, the soil height profile can be plotted similarly to a pin scale. The infrared sensor was successful only in detecting smooth surfaces but failed to detect other types of surfaces.

Conclusion

Due to limited accuracy and the risk of damaging or altering the surface roughness, the contact method is not recommended for use on soft soil surfaces. Among non-contact methods, the most suitable technique is the one that provides the highest accuracy and precision while minimizing cost and time for data collection and analysis. In this study, two types of sensors including laser and infrared ranging were selected based on their reasonable price, ease of operation, compatibility with a mobile system, and ability to deliver real-time roughness measurements in the shortest possible time. The results demonstrated that real-time measurement of soil surface roughness can effectively replace traditional, tedious, and time-consuming methods.

Keywords: Infrared sensor, Laser sensor, Precision, Real-Time measurement, Surface roughness

اندازه‌گیری بلادرنگ زبری سطح خاک در شرایط مزرعه‌ای، با استفاده از حسگرهای لیزری و مادون قرمز

نسیم صالحی بابامیری^۱، حسین حاجی آقا علیزاده^{۱*}، مجید دولتی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

چکیده

شاخص زبری تصادفی به دلیل سهولت محاسبات و قابلیت اطمینان خوب، مناسب‌ترین شاخص برای جداسازی کلاس‌های زبری و توصیف شدت و کیفیت خاک‌ورزی است. اکثر روش‌های مرسوم مورد استفاده از رهیافت توقف و حرکت در اندازه‌گیری زبری خاک بهره می‌گیرند؛ که بسیار پر زحمت و وقت‌گیر است. در پژوهش حاضر از حسگرهای فاصله‌یاب نوری برای اندازه‌گیری بلادرنگ زبری خاک استفاده شد؛ که سرعت اندازه‌گیری آن نسبت به روش‌های دیگر بیشتر است. از برازش بین فاصله‌یاب نوری شده توسط حسگرها و بین‌متر یک رابطه خطی بین این دو متغیر حاصل شد. هر دو حسگر فاصله‌یاب در شرایط استاتیکی توانستند به خوبی فاصله را اندازه‌گیری کنند ($R^2=0.98$)، صحت و دقت هر دو حسگر نوری مادون قرمز و لیزری بر روی سیستم متحرک، در مزرعه مورد ارزیابی قرار گرفت. صحت داده‌های به‌دست‌آمده از حسگر لیزر در سرعت‌های کمتر از $2/6 \text{ km h}^{-1}$ ، همانند روش بین‌متر بود ولی در سرعت‌های بیش از $3/5 \text{ km h}^{-1}$ روش لیزری فقط توانست کلاس زبری نرم را به‌درستی تشخیص دهد. کاهش صحت عملکرد حسگر، به دلیل کاهش نرخ جمع‌آوری داده‌ها در واحد طول و وجود کلوخه‌های بزرگ در کلاس‌های زبرتر بود. روش مادون قرمز فقط سطوح نرم را همانند بین‌متر تشخیص داد. در سرعت رو به جلو کمتر از $3/5 \text{ km h}^{-1}$ ، داده‌های حسگر لیزری از دقت خوبی برخوردار بود ($R^2=0.85$)، با این حال، با افزایش سرعت رو به جلو به $4/8 \text{ km h}^{-1}$ ، دقت عملکرد حسگر کاهش یافت ($R^2=0.72$). می‌توان نتیجه گرفت با استفاده از حسگرهای لیزری با نرخ داده‌برداری بیشتر، تشخیص سطوح زبری به خوبی روش بین‌متر امکان‌پذیر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری بلادرنگ، حسگر لیزر، حسگر مادون قرمز، دقت، زبری خاک

مقدمه

با وجود این که عملیات خاک‌ورزی بیشترین مصرف انرژی را دارد (Al-Suhaibani & Ghaly, 2010) ولی تاکنون نتوانسته است جایگاهی در تعاریف کشاورزی دقیق داشته باشد. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که تعداد تحقیقات در زمینه خاک‌ورزی دقیق بسیار محدود است. یکی از دلایل آن خصوصیات خاک و تغییرپذیری پیچیده آن می‌باشد (Anthonis, Mouazen, Saeys, & Ramon, 2004; Gohari, Hemmat, & Afzal, 2010; Fallahi, Aghkhani, & Bayati, 2015). از چالش‌های مهم در راستای اجرای خاک‌ورزی دقیق، داشتن اطلاعات کافی از خاک مزرعه برای تعیین آنی کیفیت و شدت خاک‌ورزی و معیار قرار دادن داده‌های حاصل از آن به منظور تغییرات آنی نرخ شخم است (Sharda, Franzen, David, Clay, & Luck, 2019). کیفیت خاک‌ورزی

کشاورزی دقیق^۳ یک فناوری جدید در کشاورزی مدرن است و به عنوان راهکاری جدید در بالا بردن کارایی ادوات کشاورزی و مدیریت مزرعه شناخته می‌شود؛ به گونه‌ای که با استفاده از فناوری‌ها و تجهیزات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری، اطلاعات لازم را گردآوری نموده و نهاده‌های مرتبط را مطابق با ویژگی‌های آن مکان از مزرعه اعمال می‌کند. این نوع مدیریت، ادوات کشاورزی را به سمت فناوری نرخ متغیر^۴ سوق می‌دهد. ادواتی که مجهز به این نوع فناوری باشند می‌توانند نرخ متفاوتی از عملیات را در قسمت‌های مختلف مزرعه اعمال نمایند (Maleki, Mouazen, De Ketelaere, Ramon, & De Baerdemaeker, 2008; Kitchen et al., 2010).

(Email: h-alizade@basu.ac.ir) ^(*) نویسنده مسئول:
<https://doi.org/10.22067/jam.2024.90374.1300>
 3- Precision agriculture
 4- Variable rate technology

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
 ۲- گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده فنی و منابع طبیعی تویسرکان، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

به‌وسیله برخی پارامترها همچون زبری سطح خاک، ابعاد خاکدانه‌ها، قطر متوسط وزنی کلوخه‌ها، جرم مخصوص ظاهری خاک، چگالی حجمی، تعیین هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع و مقاومت به نفوذ خاک، مورد ارزیابی و سنجش قرار می‌گیرد (Martinez-Agirre, Alvarez-Mozos, & Gí'menez, 2016). زبری خاک از جمله خواص فیزیکی خاک است که از آن برای ارزیابی و مقایسه کیفیت شخم ادوات متعدد خاک‌ورزی و شخم با یکدیگر استفاده شده است؛ در پژوهشی، اثر سه ابزار خاک‌ورز مختلف شامل غلتک، چپزل و تیلر بر روی زبری خاک بررسی شد و نتایج نشان داد که زبری سطح خاک تحت تأثیر ادوات مختلف خاک‌ورزی، بافت و ساختمان خاک تغییر می‌کند (García Moreno, Díaz Alvarez, Tarquis, Alonso, Paz Gon'zalez, & Saa' Requejo, 2010). در تحقیق دیگر پارامترهای زبری سطح در خاک با شرایط مختلف خاک‌ورزی با استفاده از یک پروفیل‌متر لیزری اندازه‌گیری شد که نتایج نشان داد مقدار زبری محاسبه‌شده با افزایش شدت خاک‌ورزی به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (Martinez-Agirre et al., 2016). نتایج مطالعات صورت‌گرفته نشان داد که پوشش محصولات (Lin & Richards, 2007)، نوع خاک (García Moreno et al., 2010)، اثرات بارندگی، فرایندهای فرسایش آب (Marzahn, Seidel, & Ludwig, 2012) و شیوه‌های مختلف خاک‌ورزی (Dalla Rosa, Cooper, Darboux, & Medeiros, 2012; Jensen, Karstoft, Green, & Munkholm, 2017; Römken, Singaray, & Gantzer, 1986) بر زبری سطح خاک موثر هستند. به‌طور کلی زبری به دو نوع زبری جهت‌دار^۱ و زبری تصادفی^۲ تقسیم می‌شود (Guzha, 2004). زبری جهت‌دار بر اثر شیب و توپوگرافی زمین و با به‌کارگیری ادوات مختلف شخم به‌وجود می‌آید. زبری تصادفی، بر اثر توزیع ذرات و خاک‌دانه‌ها به‌صورت مکانی بر یک سطح صاف ایجاد می‌گردد (Allmaras, Burwell, Larson, & Holt, 1966; Govers, Takken, & Helming, 2000). پارامترها و شاخص‌های متعددی برای اندازه‌گیری زبری سطح خاک وجود دارد. به‌طور کلی زبری سطح خاک دارای چهار پارامتر عمودی، افقی، ترکیبی (افقی-عمودی) و فراکتال است (Smith, 2014). پارامتر عمودی تعیین زبری خاک، اندازه‌گیری تغییرات ارتفاع نقاط در سطح خاک است. پارامتر افقی تعیین زبری خاک، بعد افقی زبری یا رابطه بین ارتفاع یک نقطه با نقاط مجاور آن تعیین می‌شود. پارامتر ترکیبی (افقی-عمودی)، ترکیبی از هر دو نوع مشخصه زبری سطح خاک است و پارامتر مبتنی بر تئوری فراکتال یا خودهمانند، که تعادل بین تغییرات ارتفاع در مقیاس‌های مختلف مکانی (فاصله‌ها) را اندازه‌گیری می‌کند. (Martinez-Agirre et al., 2016).

در صورتی که زبری سطح خاک ادوات خاک‌ورزی به‌صورت

لحظه‌ای و در حال حرکت اندازه‌گیری شود؛ این شاخص می‌تواند در حین عملیات خاک‌ورزی نرخ متغیر مورد استفاده قرار گیرد (García Moreno et al., 2010). زبری سطح خاک شخم‌خورده تحت تأثیر اطلاعات وسیعی از خاک همچون رطوبت، بافت خاک، میزان کاه و کلس و بقایای گیاهی و شدت ابزار خاک‌ورز است؛ و در فاصله کوتاه بعد از عبور خاک‌ورز، شدت تغییرات زیاد نخواهد بود (Mohammadi, Maleki, & Khodaei, 2022; Sharda et al., 2019). اندازه‌گیری زبری و پستی و بلندی سطح خاک، با توجه به نوع دستگاه و ابعاد اندازه‌گیری با دو روش تماسی و غیرتماسی انجام می‌شود (Jester & Klik, 2005). در روش تماسی، وسایل مکانیکی به‌طور مستقیم با خاک تماس برقرار می‌کنند. روش‌های تماسی خود به دو روش زنجیر غلتکی و روش سوزن‌های اندازه‌گیری یا پین‌متر تقسیم می‌شوند (Kuipers, 1957; Podmore & Huggins, 1981; Saleh, 1993). در روش غیرتماسی، وسایل اندازه‌گیری از سطح خاک فاصله داشته و با سطح خاک تماسی ندارند. مبنای روش‌های غیرتماسی، ارسال امواج به سطح خاک و دریافت آن می‌باشد، روش‌های اندازه‌گیری غیرتماسی را می‌توان براساس نوع حسگری که استفاده می‌شود و ابعاد اندازه‌گیری به پنج روش: فراصوت، اسکنر لیزری، استریوفتوگرامتری، مادون قرمز و راداری ماهواره‌ای دسته‌بندی کرد. (Aguilar, Aguilar, & Negreiros, 2009; Gilliot, Vaudour, & Michelin, 2017; Jester & Klik, 2005; Koval, Vaňuš, & Bilík, 2016; Lee, Yamazaki, Oida, Nakashima, & Shimizu, 1996; Marinello, Gasparini, Arvidsson, & Sartori, 2015; Römken et al., 1986; Zribi, Ciarletti, & Taconet, 2000).

در اندازه‌گیری‌های فراصوتی، فاصله زمانی بین ارسال و دریافت امواج اندازه‌گیری شده و با استفاده از سرعت صوت، فاصله تا سطح جسم مورد نظر محاسبه می‌گردد. از آنجایی که دما و رطوبت محیط در سرعت صوت تأثیرگذارند لذا می‌بایست به‌منظور تصحیح داده‌های به‌دست‌آمده، در کنار حسگرهای فراصوت از حسگرهای دما و رطوبت استفاده کرد که از معایب این روش اندازه‌گیری است (Mohammadi et al., 2022). با استفاده از اسکنرهای لیزر سه‌بعدی، مدل ارتفاعی سطح خاک با دقت بسیار خوبی قابل‌ارائه است. وضوح و دقت در محدوده عمودی ۰/۵-۰/۱ میلی‌متر و افقی ۲-۰/۱ میلی‌متر را می‌توان با این روش به‌دست آورد (Haubrock, Kuhnert, Chabrilat, Günther, & Kaufmann, 2009). اسکنر لیزری به‌دلیل وضوح و عملکرد نمونه‌برداری سریع، انتخاب بسیار جالبی است. با این حال، تا حدودی حجیم است و تنها مناطق کوچکی را در یک زمان پوشش می‌دهد؛ همچنین دستگاه بسیار گران و واسنجی آن پیچیده است (Draeos, Deshpande, & Grant, 2012). لذا توجیه اجرای آن در ماشین‌های کشاورزی دشوار است، این اسکنرها به گرد و غبار و

به طور کلی روش مورد استفاده برای اندازه گیری زبری به عوامل مختلفی مانند هزینه، دقت، وضوح، امکان حرکت بر روی سطح و غیره بستگی دارد. استفاده از یک روش نامناسب، موجب تحلیل های بیشتر شده و خسارت هایی را به دلیل عدم تشخیص دقیق زبری در پی خواهد داشت. با توجه به رزلوشن محدود و امکان تخریب و دگرگونی زبری سطح به دلیل تماس مستقیم، استفاده از روش تماسی پیشنهاد نمی گردد. در بین روش های غیرتماسی نیز با توجه به محدودیت ها و مشکلات استفاده از روش های: فراصوت، اسکنر لیزری و فوتوگرامتری و همچنین عدم طولنایی آن ها در اندازه گیری بلادرنگ زبری، توصیه نمی شوند. از آنجا که حسگرهای نوری دقیق و قابل اعتمادند (Bagheri, 2023) و قابلیت به کارگیری در حال حرکت را دارند؛ به نظر روش جالبی برای اندازه گیری بلادرنگ زبری خاک می باشند؛ هدف مطالعه حاضر اندازه گیری بلادرنگ زبری سطح خاک با استفاده از حسگرهای نوری در شرایط مزرعه و مقایسه صحت و دقت این دو روش اندازه گیری به منظور انتخاب روش مناسب در عملیات خاک ورزی دقیق است.

مواد و روش ها

سامانه اندازه گیری بلادرنگ زبری متشکل از واحدهای مکانیکی-الکتریکی، داده برداری و پردازش است که در شکل ۱ نشان داده شده است. اجزای تشکیل دهنده ی بخش مکانیکی-الکتریکی شامل شاسی، لکتروموتور و چرخ دنده، درایور کنترل دور لکتروموتور، آداپتور تغذیه کننده لکتروموتور و آداپتور تغذیه کننده انکودر و برد آردوینو، ریل مسیر حرکت و جعبه محتوی خاک می باشد. بخش اندازه گیری شامل حسگر لیزری، حسگر مادون قرمز و انکودر است و بخش پردازش شامل برد آردوینو و نرم افزار لب ویو نصب شده روی لپ تاب می باشد.

ارتعاشات مکانیکی حساس هستند که قابل استفاده به صورت متحرک در ماشین های خاک ورزی نیست (Römken et al., 1986). تکنیک های فتوگرامتری برد کوتاه، قابلیت تهیه مدل سه بعدی را دارند؛ که امکان استخراج پروفیل های متعدد در جهات مختلف با تنها یک اندازه گیری را فراهم می کند (Aguilar et al., 2009). با وجود این که این روش از حسگرهای کم هزینه بهره می برد و جمع آوری داده ها در این روش سریع انجام می شود، به نظر راه حل جالبی است اما دانش تخصصی و همچنین نرم افزار ویژه برای تجزیه و تحلیل عکس ها وقت گیر بوده و موجب زمان بر شدن آن می گردد (Jester & Klik, 2005). به کارگیری این روش مستلزم دقت در موقعیت و جهت عکس برداری نسبت به سطح می باشد. همچنین خطای اعوجاج ناشی از فاصله کانونی دوربین می بایست مینیمم شود. نحوه اخذ تصویر می بایست طوری باشد که تصویر سایه دار نباشد که این امر مستلزم داشتن نور کافی به هنگام عکس برداری می باشد. تجزیه و تحلیل تصویر و استخراج ویژگی های هندسی کلوخه در تکنیک های پردازش تصویر دشوار است و برای اجرای قطعه بندی مناسب به مداخله انسانی نیاز دارد؛ لذا روش مناسبی برای اندازه گیری زبری خاک نیست (Moreno, Álvarez, Alonso, Barrington, & Requejo, 2008). روش مادون قرمز، امواج الکترومغناطیس را با طول موج بیشتر از ناحیه دید انسان به سمت سطوح مورد نظر ساطع می کند. با استفاده از این روش می توان در مدت زمان کوتاهی، اطلاعات زیادی را در مورد تعدادی از پارامترهای خاک بر اساس یک طیف با وضوح بالا، معمولاً در محدوده ۲۵۰۰-۳۵۰۰ نانومتر به دست آورد (Nayerifard, 2015). حسگرهای فاصله سنج لیزری در طول یک مسیر افقی حرکت کرده و فاصله تا سطح را اندازه گیری می کنند. با استفاده از حسگر لیزری می توان داده هایی با دقت کمتر از یک میلی متر را به دست آورد (Nayerifard, 2015).



شکل ۱- طرح‌واره و اجزای سامانه اندازه‌گیری بلادرنگ زبری سطح خاک: (۱) لپ‌تاب، (۲) حسگر مادون قرمز، (۳) برد آردوینو، (۴) حسگر لیزر، (۵) آداپتور تغذیه الکتروموتور، (۶) کنترلر دور الکتروموتور، (۷) چرخ‌دنده‌های انتقال قدرت، (۸) الکتروموتور، (۹) انکودر و (۱۰) آداپتور تغذیه حسگر مادون قرمز و برد آردوینو

Fig.1. Schematics and components of the soil surface roughness online measurement system: 1) Laptop, 2) IR sensor, 3) Arduino board, 4) Laser sensor, 5) Adapter driver for electromotor, 6) Speed controller for electromotor, 7) Power transmission gears, 8) Electromotor, 9) Encoder, and 10) Adapter feeding the infrared sensor and Arduino board

که در این رابطه M_{DB} درصد رطوبت خاک بر پایه خشک، W_w وزن آب موجود در خاک و W_s وزن خشک خاک می‌باشد. وزن نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت 0.01 g تعیین شد.

حسگرهای مورد استفاده و اساس کار آن‌ها

دو نوع حسگر نوری مورد استفاده در تحقیق حاضر شامل: حسگر مادون قرمز (IR) و حسگر لیزری است. حسگر مادون قرمز شامل فرستنده و گیرنده می‌باشد؛ که اساس کار آن مبتنی بر ارسال امواج به سطح خاک و دریافت آن است. فرستنده یک LED به‌عنوان منبع نور است که انرژی ساطع‌کننده و گیرنده نور را شناسایی و دریافت می‌کند. سیگنال خروجی حسگر معمولاً به‌صورت ولتاژی است که از طریق یک پردازنده سیگنال پردازش می‌شود تا داده‌های مورد نیاز را به‌دست آورد. این خروجی حاوی اطلاعاتی در مورد شدت تابش مادون قرمز می‌باشد. حسگرهای لیزری نیز با استفاده از ارسال اشعه لیزری و دریافت انعکاس و بازتاب آن، نسبت به داده‌برداری سطح خاک اقدام می‌کند. یک پرتو لیزر بازتاب را ساطع و دریافت می‌کند و زمان بین ارسال و دریافت نور لیزر می‌تواند فاصله را تعیین کند. مشخصات حسگرهای مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

آماده‌سازی نمونه خاک

نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که روشنایی سطح خاک ارتباط نزدیکی با رطوبت خاک دارد؛ در خاکی با رطوبت بالا، بازتاب امواج از حسگرهای نوری در محدوده‌های مرئی و امواج کوتاه نزدیک مادون قرمز کاهش می‌یابد و سبب بروز خطاهای اندازه‌گیری می‌شود (Weidong et al., 2002). لذا به‌منظور جلوگیری از بروز خطای اندازه‌گیری ناشی از: رطوبت، بافت و ساختمان خاک؛ تعداد ۶ نمونه ۵ کیلوگرمی از خاک تهیه شد. میزان رطوبت خاک با استفاده از روش آون طبق استاندارد (ISO17892-1, 2014) تعیین شد. بدین صورت که نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون بادامی ۱۰۵ درجه سلسیوس قرارداده شد. پس از ۲۴ ساعت نگهداری در آون (Mouazen, 2007) Maleki, De Baerdemaeker, & Ramon, 2007) خاک بر پایه خشک با استفاده از رابطه (۱) (ASTM D2216-19, 2019) محاسبه شد. مقدار رطوبت آن در حدود ۱۵ درصد برپایه خشک به‌دست آمد؛ به‌منظور جلوگیری از تغییرات رطوبت خاک در آزمایشگاه، خاک موردنظر در محفظه پلاستیکی در بسته نگهداری شد. پس از آماده‌سازی نمونه خاک، واسنجی حسگرها انجام شد.

$$M_{DB} = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (1)$$

جدول ۱- مشخصات حسگرهای مورد استفاده برای اندازه گیری بلادرنگ زبری سطح خاک

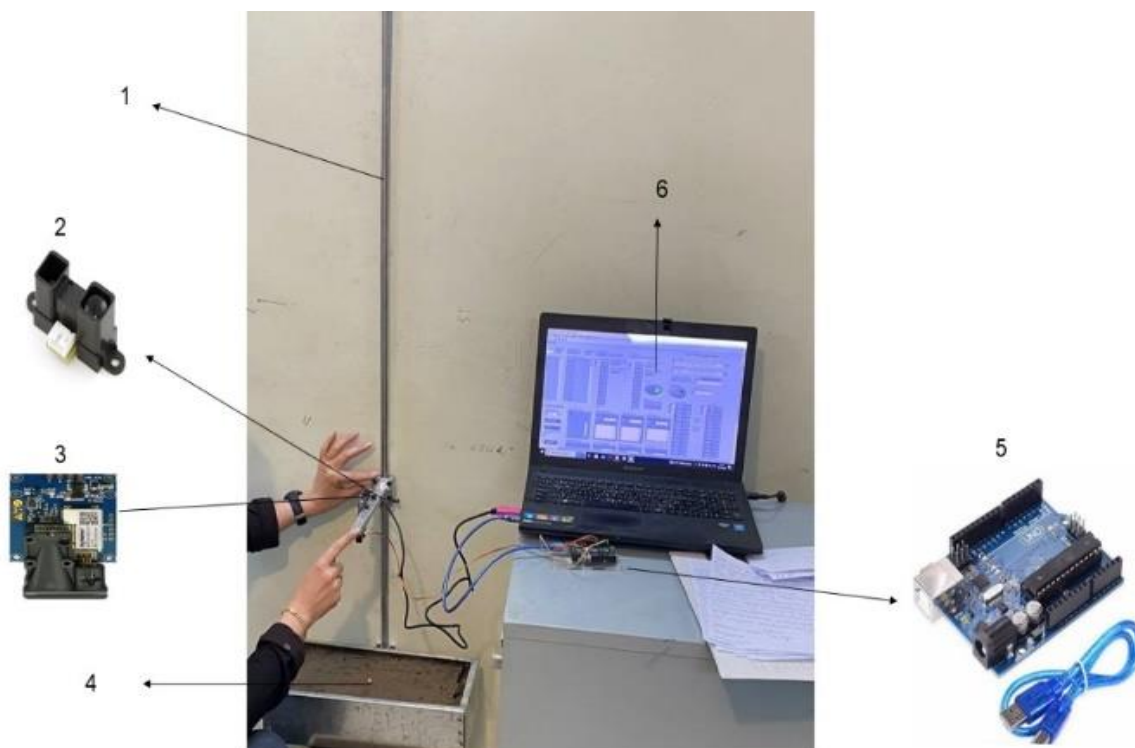
Table 1- Specifications of sensors utilized for real-time soil surface roughness measurement

مشخصات Specification	نوع Type	
	مادون قرمز IR (GP2Y0A02YK0F)	لیزر Laser (L1-40)
جریان / ولتاژ عملیاتی Operational voltage (V) / current (mA)	4.5 to 5.5 / 33 to 50	3.7 to 5.2 / 86 to 122
فاصله اندازه گیری Measuring distance (cm)	20 to 150	5 to 4000
زمان پاسخ Response time (ms)	39	30
زمان اندازه گیری Measuring time (ms)	44	33
روش تشخیص Sensing method	Reflective	Reflective
وزن Weight (g)	5.03	15.8
ارتفاع × عرض × طول Height (mm) × Width (mm) × Length (mm)	21.6 × 18.9 × 44.2	14.3 × 36.61 × 54.33
نوع خروجی Output type	Analogue	Analogue
دمای عملیاتی Operating temperature (°C)	-70	-10 to 50

واسنجی حسگرها

در ابتدا به منظور یافتن رابطه بین سیگنال خروجی حسگرها و فاصله حسگر از سطح خاک، همچنین واسنجی حسگرهای مورد استفاده به منظور اندازه گیری ناهمواری و زبری سطح خاک، سامانه‌ی آزمایشگاهی مطابق شکل ۲ طراحی و ساخته شد. شاسی

این سامانه از قوطی آهنی با سطح مقطع ۲×۵ cm و طول ۱۶۰ cm، میله‌های هادی به قطر ۱/۲ cm و پایه نگهدارنده حسگر مدرج با قابلیت تنظیم و حرکت در هر ۱ mm، تشکیل و ساخته شد. سامانه به گونه‌ای روی دیوار نصب شد که نگهدارنده‌ی حسگر قابلیت حرکت در جهت عمود را داشته باشد و بتواند به وسیله پیچ تثبیت در موقعیت‌های مختلف ثابت شود (شکل ۲).

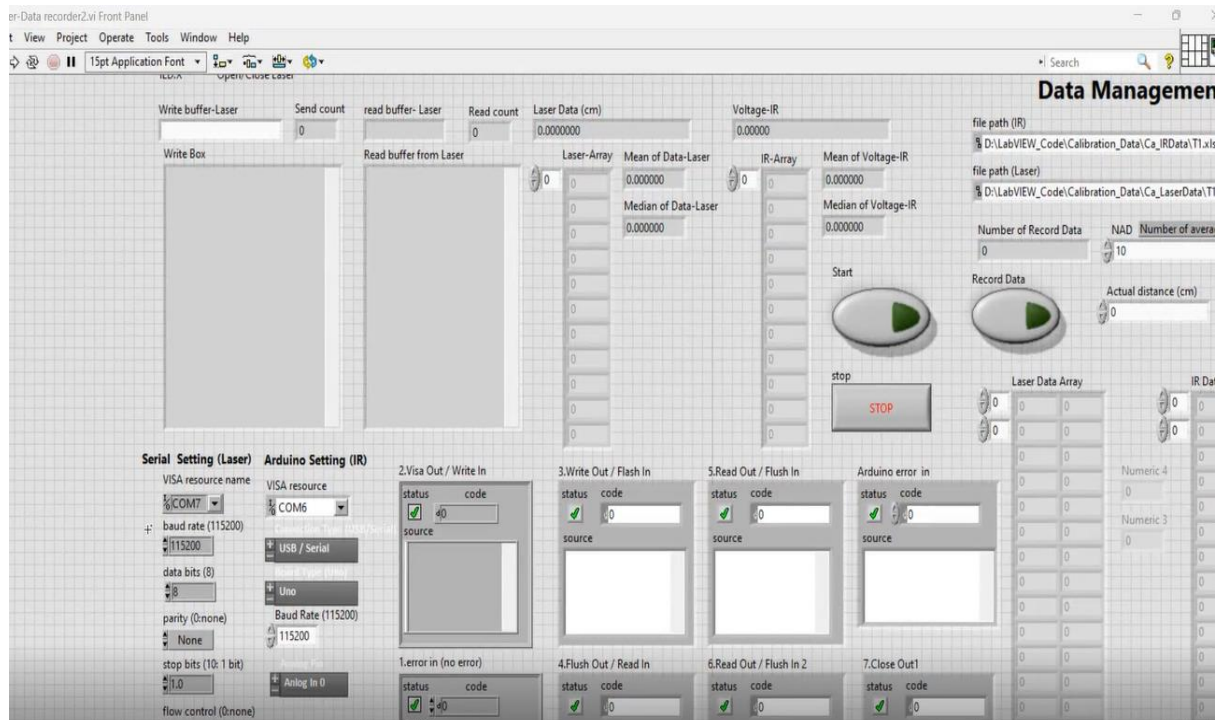


شکل ۲- سامانه واسنجی حسگرها: (۱) ریل هادی، (۲) حسگر مادون قرمز، (۳) حسگر لیزر، (۴) سطح خاک، (۵) برد آردوینو و (۶) لپ‌تاب و نرم‌افزار لب ویو

Fig.2. Calibration system for sensors: 1) Guide rail, 2) IR sensor, 3) Laser sensor, 4) Soil surface, 5) Arduino board, and 6) Laptop and LabVIEW software

قسمت‌هایی که در حین عملیات واسنجی تنظیم شد شامل: serial setting (laser) و serial setting (IR) که در این قسمت‌ها شماره پورت سریال برد آردوینو و حسگر لیزر که در قسمت Device manager سیستم قابل مشاهده است وارد گردید. آیکون start شروع داده‌برداری حسگرها، آیکون‌های Laser Data و Voltage-IR برای نمایش لحظه‌ای خروجی حسگرها، آیکون‌های ستون Laser-Array و IR-Array مربوط به ثبت خروجی داده‌های حسگر در یک بازه زمانی، آیکون‌های (IR) file path و (Laser) file path تعریف مسیر ذخیره داده‌ها، آیکون stop توقف داده‌برداری و آیکون Record Data ذخیره داده‌ها در محل از پیش تعریف شده است.

حسگرها را در فاصله ۲۰ تا ۸۰ سانتی‌متری سطح خاک تنظیم کرده و در هر ۱ cm داده‌ها قرائت می‌شود. فاصله حسگر تا سطح خاک به عنوان متغیر وابسته و خروجی حسگرها به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد. خروجی حسگر مادون قرمز به شکل ولتاژ و حسگر لیزر به صورت فاصله طولی بر حسب cm است. بنابراین اندازه‌گیری در ۶۰ مرحله انجام شد. این مراحل ۶ بار تکرار شد که ۴ تکرار آن برای واسنجی و ۲ تکرار برای مراحل اعتبارسنجی بود. برای جمع‌آوری داده‌های حاصل از دو حسگر لیزر و مادون قرمز از نرم‌افزار LabVIEW 2020 استفاده شد. پنل برنامه نوشته‌شده در نرم‌افزار برای واسنجی حسگر نیز در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- پنل برنامه نوشته شده در نرم افزار LabVIEW برای واسنجی حسگرها

Fig.3. LabVIEW software program panel compiled for sensor calibration

گاواهن برگرداندار، چپزل و دیسک) به ابعاد 20×40 m مطابق شکل ۴ در مزرعه تحقیقاتی عباس آباد واقع در دانشگاه بوعلی سینا ایجاد شد.

آزمون مزرعه ای سامانه

به منظور ارزیابی عملکرد سامانه در حال حرکت در شرایط واقعی مزرعه، سه سطح زبری برای هر یک از ادوات خاکورز مرسوم



ج



ب



الف

شکل ۴- ایجاد کلاس های زبری در مزرعه: الف) دیسک، ب) چپزل و ج) گاواهن برگرداندار

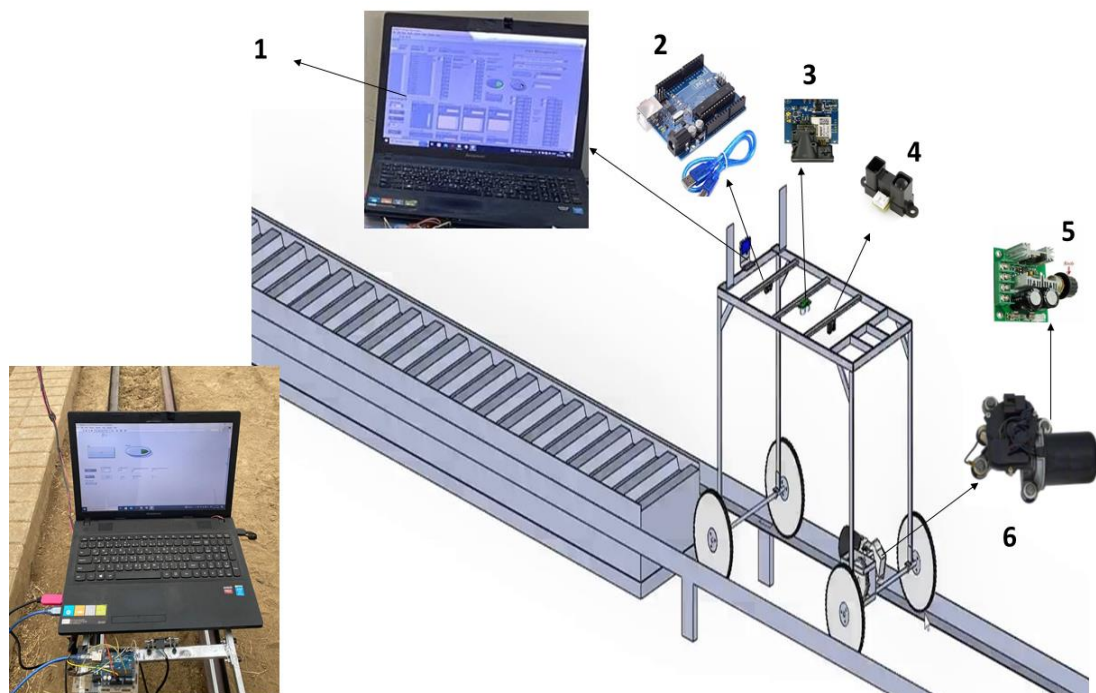
Fig.4. Roughness classes created in the field: a) Disc, b) Chisel, and c) Moldboard plow

فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار مورد بررسی قرار گرفت. سرعت حرکت با در نظر گرفتن سرعت های مرسوم عملیات خاکورزی در مزرعه انتخاب شد. سپس در حین اجرای برنامه، حرکت با سرعت مشخصی آغاز شد و هر یک از حسگرهای

این آزمایش با هدف انتخاب حسگر مناسب به منظور تشخیص ناهمواری سطح خاک از بین حسگرهای مادون قرمز و لیزری در نظر گرفته شد، تیمارهای آزمایش شامل: سه روش اندازه گیری، چهار سطح سرعت و سه روش خاکورزی بودند که در یک آزمایش

مدولاسیون عرض پالس صورت می‌گرفت. با استفاده از گیربکس با نسبت سرعت ۴:۱، سرعت رو به جلو تا 9 km h^{-1} در دسترس بود. موقعیت و سرعت سامانه در حال حرکت نیز با انکودر شفت در هر لحظه تعیین و داده‌های مربوطه جمع‌آوری شدند.

تشخیص زبری، داده‌های حسگر را برای محاسبه ناهمواری سطح خاک به کامپیوتر ارسال کردند. حسگرها مطابق شکل ۵، روی سامانه در حال حرکت نصب شدند. حرکت دستگاه توسط الکتروموتور تامین شد و کنترل سرعت نیز با درایور کنترل سرعت براساس



شکل ۵- طرح‌واره سامانه در حال حرکت برای اندازه‌گیری زبری بلادرنگ خاک: (۱) لپ‌تاب، (۲) برد آردوینو، (۳) حسگر لیزر، (۴) حسگر مادون قرمز، (۵) کنترلر دور الکتروموتور و (۶) الکتروموتور

Fig.5. Schematic of moving system for real-time soil roughness measurement: 1) Laptop, 2) Arduino board, 3) Laser sensor, 4) IR sensor, 5) Speed controller for the electromotor, and 6) Electromotor

جهت ارزیابی استفاده شد (Podmore & Huggins, 1981). بر این اساس از پین‌متر ساخته‌شده توسط (Mohammadi et al., 2022) در دانشگاه کردستان، به‌عنوان شاخص اندازه‌گیری زبری سطح خاک برای ارزیابی حسگرها استفاده شد (شکل ۶). این پین‌متر شامل ۱۰۰ میخ با فاصله ۵ میلی‌متر از هم است که روی یک قاب چوبی نصب شده است. در مطالعات علمی گزارش شده که این روش برای اندازه‌گیری ارتفاع ناهمواری سطح خاک در حالت استاتیکی قابل‌اعتماد است (García Moreno et al., 2010; Jester & Klik, 2005; Thomsen, Baartman, Barneveld, Starkloff, & Stolte, 2015).

دو شاخه نبشی L با بال‌های $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ و ضخامت ۵ mm با فاصله ۴۰ cm از هم به طول ۱۲ m استفاده شد. برای رسیدن به سرعت تعیین‌شده سامانه در ۲ متر اول بدون داده‌برداری حرکت می‌کرد سپس به‌صورت یک متر در میان، ۴ بار به طول یک متر عمل داده‌برداری انجام شد.

در این حالت نیز اثر سطوح مختلف سرعت پیشروی، کلاس زبری و روش اندازه‌گیری بر روی شاخص زبری تصادفی SD مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای تعیین صحت و دقت عملکرد حسگرهای مورد استفاده، روش مرجعی به‌عنوان مبنا لازم است. به دلیل قابلیت اطمینان روش پین‌متر، از این روش به‌عنوان روش مرجع



شکل ۶- پین‌مترگذاری برای قرائت داده‌های ارتفاع سطوح زبری در مزرعه

Fig.6. Pin metering for reading the height data of rough surfaces in the field

داده‌های ورودی است.

تجزیه و تحلیل مقادیر زبری

ابتدا از داده‌های پین‌متر به منظور بررسی توانایی شاخص زبری تصادفی برای تفکیک کلاس‌های مختلف زبری (شخم با گاوآهن برگرداندار، دیسک و چیزل) در مزرعه استفاده شد. برای این منظور آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی که تیمارهای آن سه نوع کلاس مختلف زبری بود صورت گرفت. مقدار داده‌های جمع‌آوری شده از نظر آماری تحلیل و مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه اثر سه کلاس زبری، چهار سطح سرعت پیشروی و سه روش اندازه‌گیری بر روی شاخص زبری تصادفی به دست آمده به وسیله حسگر در یک آزمایش فاکتوریل $3 \times 3 \times 4$ طرح کاملاً تصادفی در ۴ تکرار در مزرعه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای تحلیل و بررسی داده‌ها و همچنین بررسی نتایج آزمایش از نرم‌افزارهای: R 4.1.0، SPSS و Excell 2019 استفاده شد.

به منظور مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل از پین‌متر و حسگرهای فاصله‌یاب، از برخی پارامترهای آمار توصیفی بر اساس روابط زیر استفاده شد: ریشه میانگین مربعات خطا؛ طبق رابطه (۳) به دست می‌آید که از آن به عنوان معیار مناسبی برای سنجش کیفیت مدل استفاده می‌شود. معیاری که با میانگین گرفتن از تفاضل مقادیر حقیقی و پیش‌بینی شده، میزان خطای مدل‌های آماری را اندازه می‌گیرد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (At - Ft)^2}{N}} \quad (3)$$

که در آن At ، Ft و N به ترتیب مقدار واقعی، مقدار پیش‌بینی شده و تعداد نقاط برازش است. میانگین درصد مطلق خطا، معیاری برای

شاخص‌های زبری سطح خاک

شاخص زبری تصادفی یکی از شاخص‌های رایج برای اندازه‌گیری زبری می‌باشد (Allmaras et al., 1966). زبری تصادفی در واقع انحراف از معیار داده‌های ارتفاع از سطح خاک می‌باشد زبری تصادفی از رابطه (۲) قابل محاسبه است:

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

که در آن N تعداد داده‌های ارتفاع، Z_i ارتفاع مربوط به نقطه i ام و $\bar{Z}$ میانگین تمام داده‌ها است. اگر S محاسبه شده برای یک سطح از S سطح دیگر بزرگتر باشد به معنی این است که زبری آن بیشتر است. عدم قطعیت در این رابطه ± 3 میلی‌متر با فاصله اطمینان ۹۵ درصد است (Bauer et al., 2015). این نشان می‌دهد که شاخص S توانایی جداسازی طبقات زبری ایجاد شده را دارد. به همین ترتیب، برخی دیگر از محققین از شاخص زبری تصادفی به عنوان یک شاخص کارآمد برای تشخیص انواع مختلف خاک‌ورزی استفاده کردند (Vermang et al., 2013). نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که شاخص زبری تصادفی با تغییرات کاربری زمین و جهت‌گیری خاک‌ورزی و همچنین در طول زمان به طور قابل توجهی متفاوت است (Cremers, Van Dijk, De Roo, & Verzandvoort, 1996). این شاخص در چندین معادله برای تخمین ذخیره فرورفتگی سطحی، یعنی کسر سطح پوشیده از آب و مقدار بارندگی اضافی مورد نیاز قبل از شروع رواناب، در مدل‌های هیدرولوژیکی یا فرسایش خاک استفاده می‌شود. در چنین مدل‌هایی، زبری به صراحت با انجام محاسبات هیدرولیکی در تفکیک‌پذیری‌های مکانی-زمانی گنجانده می‌شود. بنابراین یکی از راه‌های بهبود عملکرد مدل فرسایش، بهبود دقت داده‌های ورودی مدل مانند زبری تصادفی، با استفاده از روش‌های جدید اندازه‌گیری حسگر و آزمایش میزان حساسیت مدل به تغییرات

پین‌متر در همان سطح قرار داده و منحنی برازش آن رسم می‌شود. ضریب تبیین برای رابطه ریاضی به‌دست‌آمده، بیانگر میزان دقت داده‌های حسگر است.

نتایج و بحث

سامانه اندازه‌گیری بلادرنگ زبری خاک

سامانه اندازه‌گیری بلادرنگ زبری خاک با قابلیت کنترل سرعت پیشروی به‌منظور استفاده در شخم نرخ متغیر که شامل حسگرهای فاصله‌سنج لیزری و مادون قرمز و همچنین سامانه تحصیل داده و مدارهای الکترونیک است مطابق شکل ۷ ساخته شد. برنامه نرم‌افزاری لب‌ویو برای قرائت داده حسگرها و تبدیل آن به داده‌های زبری سطح خاک بر اساس شاخص‌های آماری مختلف تدوین گردید.



شکل ۷- سامانه اندازه‌گیری زبری سطح خاک

Fig.7. The soil surface roughness measurement system

به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته می‌شود. خروجی حسگر مادون قرمز به‌صورت ولتاژ و حسگر لیزری به‌صورت فاصله است، نمودارهای برازش فاصله حسگر تا سطح خاک و خروجی حسگرها در این مرحله در شکل ۸ نشان داده شده است. داده‌های این بخش حاصل میانگین داده‌ها در چهار تکرار است.

دقت پیش‌بینی است که طبق رابطه (۴) بیان می‌کند.

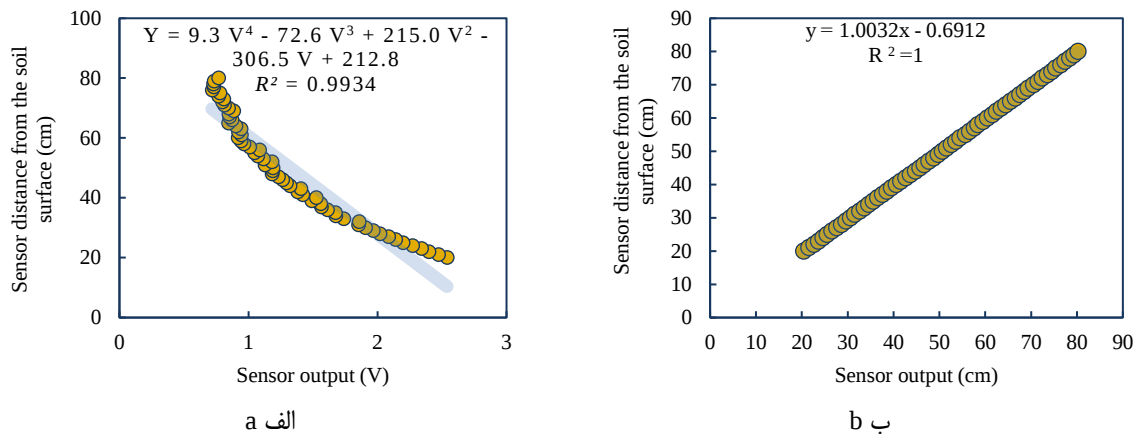
$$MAPE = 100 \frac{\sum_{i=1}^N |At - Ft|}{At} \quad (4)$$

بررسی صحت و دقت داده‌های حسگرها در شرایط مزرعه

به‌منظور بررسی صحت داده‌های حسگر ابتدا سطوح ایجادشده با استفاده از پین‌متر قرائت شد و اختلاف میانگین داده‌های زبری حسگر در تکرارهای مختلف با پین‌متر مورد بررسی قرار گرفت. در صورتی که این اختلاف میانگین‌ها معنی‌دار نباشد، بیانگر صحت داده‌های حسگر است. در صورتی که معنی‌دار باشد، بدین معنی است که داده‌های به‌دست‌آمده با میزان واقعی آن اختلاف دارد و عملکرد سامانه تحت‌تأثیر پارامتر موردبررسی تغییر یافته است و صحیح نیست. به‌منظور بررسی میزان دقت حسگر نیز داده‌های زبری به‌دست‌آمده از حسگر در تکرارهای مختلف را در مقابل داده‌های زبری به‌دست‌آمده با

واسنجی حسگرها

هدف از انجام آزمایش‌ها در بخش واسنجی، پیدا کردن رابطه‌ای بین سیگنال خروجی حسگرها و فاصله حسگر از سطح خاک بود. این رابطه را می‌توان با ایجاد تناسب بین داده‌های این دو متغیر انجام داد. فاصله حسگر تا سطح خاک به‌عنوان متغیر وابسته و خروجی حسگرها



شکل ۸- نمودار واسنجی برای الف) حسگر مادون قرمز و ب) حسگر لیزر
Fig.8. Calibration diagram for a) Infrared sensor, and b) Laser sensor

۰/۹۸ و ۱، ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب ۲/۳۶ cm و ۰/۲ cm و میانگین درصد خطای مطلق به ترتیب ۲/۷٪ و ۰/۳۶٪ بود. نتایج این بخش، حاصل میانگین داده‌ها در دو تکرار است. همانطور که مشاهده می‌شود برای حسگرهای تشخیص فاصله از سطح خاک، حسگر لیزری شرایط بهتری نسبت به حسگر مادون قرمز دارد. ضریب تبیین منحنی برازش برای حسگر مادون قرمز و فراصوت ۰/۹۹ بود؛ همچنین ریشه میانگین مربعات خطا آن‌ها به ترتیب ۰/۸ cm و ۰/۶ cm و میانگین درصد خطای مطلق به ترتیب ۱/۰۵٪ و ۲/۱٪ بود (Mohammadi et al., 2023).

ارزیابی مزرعه‌ای حسگرها

به منظور تشخیص اختلاف بین سطوح زبری ایجادشده در شرایط واقعی مزرعه، داده‌های ارتفاع هر یک از سطوح با استفاده از پین متر به دست آمد و سپس تاثیر آن بر روی شاخص زبری تصادفی در یک آزمایش کاملاً تصادفی مورد مقایسه قرار گرفت. جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس کلاس‌های زبری بر روی شاخص زبری تصادفی را نشان می‌دهد.

نتایج بررسی فاصله حسگرها از سطح خاک و خروجی حسگرها نشان داد که ارتباط قوی بین سیگنال‌های خروجی حسگرها و فاصله آن‌ها از سطح خاک وجود دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر ضریب تبیین منحنی واسنجی برای حسگر مادون قرمز ۰/۹۹ و برای حسگر لیزر ۱ بود که نمایانگر وجود ارتباط قوی بین آن‌ها است. معادله رگرسیون به دست آمده برای واسنجی داده‌های خروجی حسگر مادون قرمز برخلاف حسگر لیزر خطی نیست و به صورت یک تابع چندجمله‌ای درجه ۴ می‌باشد که بر حسب ولتاژ (V) مدل می‌شود. اگرچه رگرسیون چندجمله‌ای یک مدل غیرخطی را برای داده‌ها برازش می‌کند، اما رگرسیون چندجمله‌ای یک مورد خاص از رگرسیون خطی چندگانه در نظر گرفته می‌شود. در واقع می‌توان از رابطه خطی درجه یک نیز برای تبیین فاصله حسگر از سطح خاک استفاده کرد که نسبت به رگرسیون چندجمله‌ای درجه چهار، قدرت توضیح‌دهندگی مدل را کمتر نشان می‌دهد. در تحقیقی مشابه، ضریب تبیین منحنی واسنجی برای دو حسگر فراصوت و مادون قرمز ۰/۹۹ به دست آمد (Mohammadi, Maleki, & Khodaei, 2023).

همچنین به منظور اعتبارسنجی حسگرها، مقادیر خروجی حسگرها، با استفاده از معادلات واسنجی، به فاصله حسگر از سطح خاک تبدیل شد ضرایب تبیین برازش برای حسگر مادون قرمز و لیزری به ترتیب

جدول ۲- تجزیه واریانس کلاس‌های زبری بر روی شاخص زبری تصادفی

Table 1- Variance analysis of roughness classes on random roughness index

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی df	میانگین مربعات (MS)
کلاس زبری Roughness class	2	66.083**
خطا Error	9	0.046

کل
Total

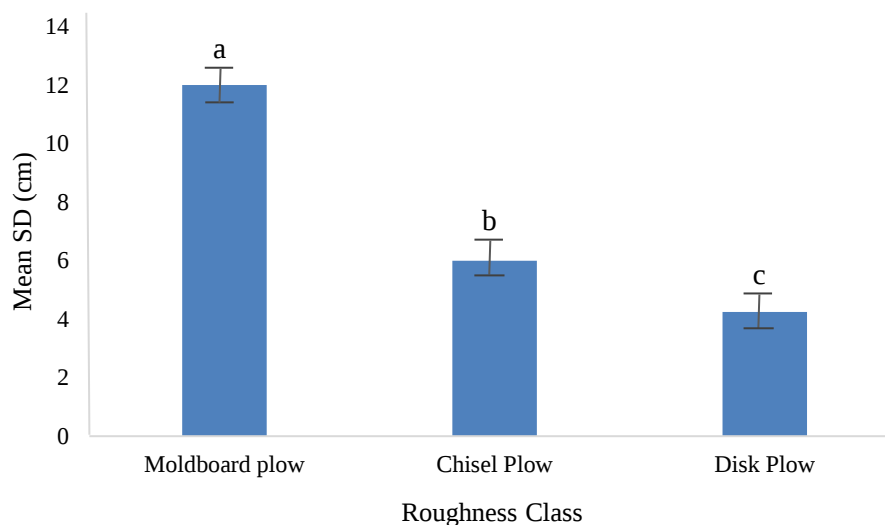
11

** وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪

**significant at 1% level

قابلیت تفکیک کلاس‌های زبری ایجادشده را دارد؛ که مطابق نتایج تحقیقات انجام‌گرفته در این زمینه بود (Gilliot et al., 2017). در شکل ۹ نتایج مقایسه میانگین شاخص زبری تصادفی در کلاس‌های زبری با آزمون دانکن در سطح احتمال ۱ درصد نشان داده شده است.

همانطور که نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد، اثر نوع خاک‌ورزی روی شاخص زبری تصادفی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. به عبارتی میان زبری‌های به‌دست‌آمده برای کلاس‌های زبری در سطح احتمال ۱٪ اختلاف وجود دارد و این نشان می‌دهد شاخص زبری تصادفی



شکل ۹- مقایسه میانگین شاخص زبری تصادفی در کلاس‌های مختلف زبری در آزمایش‌های مزرعه

Fig.9. Mean comparison of random roughness index in different roughness classes in field experiments

(Amoah, ۱/۴-۲/۸ cm، ۵-۱۵ cm، ۱-۷ cm متغیر است (Amatya, & Nnaji, 2013; Carvajal, Aguilar, Agüera, Aguilar, & Giráldez, 2006; García Moreno et al., 2010) در جدول ۳ نتایج ارزیابی مزرعه‌ای سامانه در حال حرکت تشخیص زبری سطح خاک با دو حسگر (مادون قرمز و لیزر) و پین‌متر برای تشخیص سه کلاس زبری در چهار سرعت پیشروی مختلف (۱ km h⁻¹، ۲/۶ و ۳/۵ و ۴/۸) نشان داده شده است. داده‌های این بخش حاصل میانگین داده‌ها در چهار تکرار است. زبری تخمین زده‌شده به‌وسیله حسگرها با زبری محاسبه‌شده به‌وسیله پین‌متر مقایسه شد.

با توجه به نتایج حاصل‌شده، شاخص تعیین زبری تصادفی به‌طور کامل سه کلاس مختلف زبری را از هم تفکیک کرد. محققین دیگری از آن به‌عنوان یک شاخص کارآمد برای تشخیص انواع مختلف خاک‌ورزی استفاده کردند (Bauer et al., 2015; Vermang et al., 2013). نتایج مقایسه میانگین سطوح زبری نشان داد که بیشترین زبری مربوط به گاواهن برگرداندار با زبری ۱۲ cm پس از آن چیزل با ۶ cm و دیسک با ۴/۲۵ cm قرار داشت و اختلاف بین همه کلاس‌های زبری با هم معنی‌دار بود. تحقیقات انجام‌شده در این زمینه نشان داد برای زمین شخم‌خورده شاخص زبری تصادفی از ۰/۴-۹/۳ cm، ۰/۱-۷/۴ cm،

جدول ۳- تجزیه واریانس پارامترهای موثر بر روی شاخص زبری تصادفی

Table 3- Variance analysis for effective parameters on random roughness index

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
SOV	df	(MS)

روش	2	105.29**
Method		
سرعت	3	4.9*
Velocity		
کلاس زبری	2	466.4**
Roughness class		
روش × کلاس زبری	4	15**
Method × Roughness class		
سرعت × روش	6	14.2**
Method × Velocity		
سرعت × کلاس زبری	6	4.3**
Velocity × Roughness class		
کلاس زبری × سرعت × روش	12	2.3**
Method × Velocity × Roughness class		
خطا	108	0.6
Error		
کل	143	
Total		

* و **: به ترتیب وجود اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد و ۱ درصد، ^{ns}: عدم وجود اختلاف معنی دار
* and ** Significant at 1% and 5% level, respectively, and ^{ns} Nonsignificant

با توجه به جدول ۲ اثر روش اندازه گیری در سطح ۱ درصد معنی دار بود یعنی عدد زبری هر یک از روش ها در تشخیص زبری با هم متفاوت بود و از آنجایی که روش پین متر معیار اندازه گیری است؛ روشی که کمترین اختلاف را با روش مرجع داشته باشد بررسی شد تا به عنوان بهترین روش انتخاب گردد. اثر سرعت پیشروی نیز در سطح ۱ درصد معنی دار بود یعنی سطوح سرعت پیشروی در مزرعه بر روی عملکرد دستگاه اثر معنی داری داشت. اثر کلاس زبری در سطح ۱ درصد معنی دار بود یعنی کلاس های زبری ایجاد شده با هم اختلاف معنی دار داشتند؛ که مطابق با نتایج پژوهش های انجام شده درخصوص اثر گذاری روش اندازه گیری (Aguilar et al., 2009)، سرعت انجام

عملیات و کلاس زبری (Al-Suhaibani & Ghaly, 2010; Martinez-Agirre et al., 2016) بر روی شاخص زبری است. نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثرات متقابل دوگانه و سه گانه بر روی شاخص زبری تصادفی معنی دار است. با توجه به معنی داری اثر متقابل سه گانه (کلاس زبری × سرعت × روش)، ترکیب تیماری کلاس زبری، سرعت و روش اندازه گیری که کمترین اختلاف را با پین متر داشته باشد بهترین ترکیب است. جدول ۴ تجزیه واریانس اثر متقابل (روش × کلاس زبری) به طور جداگانه در هر سطح سرعت را نشان می دهد.

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر متقابل (روش × کلاس زبری) به طور جداگانه در هر سرعت

Table 4- Variance analysis of the interaction effect (method × level) separately at each speed

کلاس زبری × روش				
سرعت Velocity (km h ⁻¹)	Method × Roughness class			ضریب تبیین R ²
	درجه آزادی	میانگین مربعات MS	P value	
	df			
1	8	53.67	p<.0001	0.95
2.6	8	41.47	<.0001	0.94
3.5	8	38.17	<.0001	0.93
4.8	8	34.54	<.0001	0.91

p<.01 وجود اختلاف معنی دار در سطح ۱٪

p<.01 significant at 1% level

سطوح سرعت، در سطح اطمینان ۱ درصد معنی دار بود. ضریب تبیین R² برای همگی بیشتر از ۰/۹ بود که نشان دهنده برازش خوب مدل

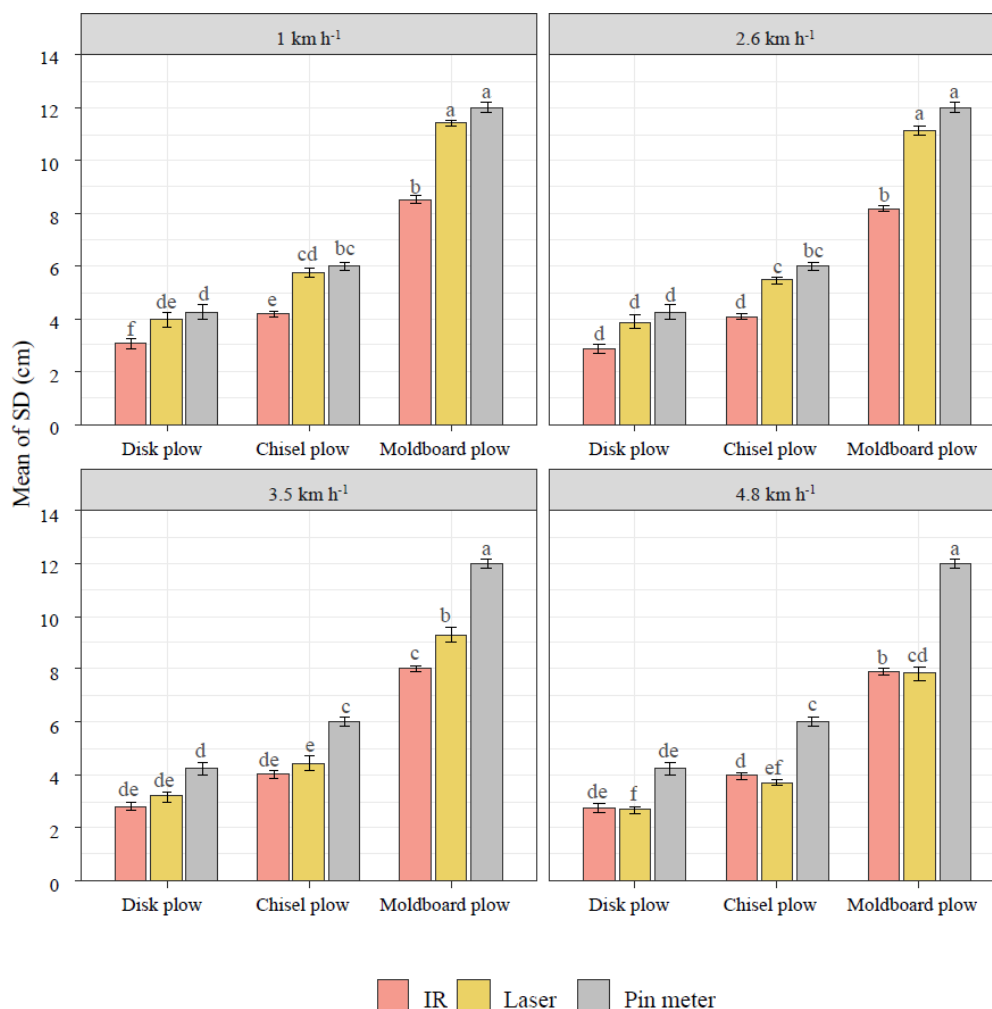
همان طور که نتایج جدول ۳ نشان می دهد اثر متقابل (روش × کلاس زبری) که هر یک ۹ سطح بود به طور جداگانه در هر یک از

مجزا برای هر سطح سرعت با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند که نتایج آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

آماري بود.

بررسی صحت عملکرد حسگرها در شرایط مزرعه

به منظور ارزیابی صحت عملکرد حسگرها در شرایط مزرعه، روش‌های مختلف اندازه‌گیری در کلاس‌های مختلف زبری به‌طور



شکل ۱۰- مقایسه میانگین اثر روش اندازه‌گیری در کلاس‌های زبری به‌طور مجزا در هر یک از سطوح سرعت

Fig.10. Mean comparison of the measurement method effect in the roughness classes separately for each of the speed levels

قرمز، احتمالاً کوچک بودن قطر دیوهای فرستنده و گیرنده می‌باشد، که باعث می‌شود در حین داده‌برداری در زمان حرکت به‌خوبی نتواند تمام سیگنال‌های فرستاده‌شده را دریافت کند. همچنین حسگر مادون قرمز در اندازه‌گیری فواصل کم به ولتاژ تغذیه حساسیت نشان داد و این می‌تواند نویزهایی را در زمان اندازه‌گیری حسگر ایجاد کند. حسگر مادون قرمز نیز توانست سطوح زبری را از هم تفکیک کند اما اختلاف آن با پین متر معنی‌دار بود. برای مواردی که به دقت بالا نیاز نباشد از

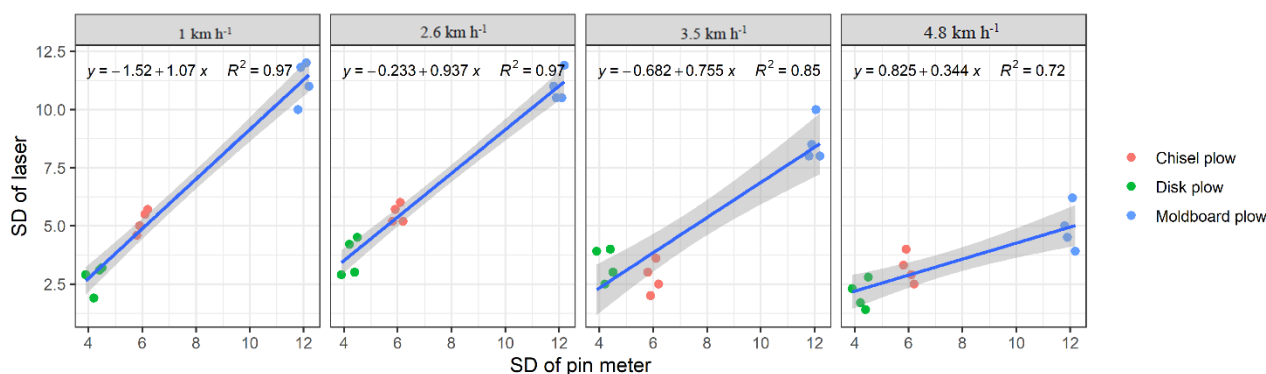
همان‌طور که از شکل ۱۲ مشخص است در سرعت‌های 1 km h^{-1} و $2/6 \text{ km h}^{-1}$ روش لیزر اختلاف معنی‌داری با روش پین متر نداشت اما روش مادون قرمز در غلب کلاس‌های زبری با روش پین متر اختلاف معنی‌داری داشت. نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش با نتایج (Lee et al., 1996) که به این نتیجه رسیدند که حسگر نوری به دلیل زاویه دیافراگم تیزتر و قطر نقطه کوچک‌تر فاصله را با دقت تشخیص می‌دهد، مطابقت داشت. یکی از دلایل ضعیف بودن حسگر مادون

زبری بیشتر سطح خاک، علاوه بر افزایش خود سایه، احتمال انعکاس نور منعکس شده توسط سنگدانه‌ها را نیز افزایش می‌دهد، همچنین سنگدانه‌های بزرگ‌تر و نامنظم دارای سوراخ‌ها و شکاف‌های بیشتری هستند که تشعشعات فرودی را به دام می‌اندازند و منجر به بازتاب کمتری می‌شود. مشاهده حسگر تحت تاثیر سطح روشنایی خاک به جهت تابش انرژی خورشید و آسمان و غیره بستگی دارد (Cierniewski et al., 2015). حسگر مادون قرمز به‌غیر از سرعت 1 km h^{-1} در سایر سرعت‌ها همانند روش پین‌متر موفق به تشخیص کلاس زبری ایجادشده با دیسک شد، اما در تشخیص سایر کلاس‌های زبری، تفاوت معنی‌داری با پین‌متر داشت، لذا حسگر مادون قرمز در تشخیص سطوح نرم موفق بود. نتایج تحقیقات (Mohammadi et al., 2023) نشان داد حسگر مادون قرمز در تشخیص کلاس زبری ایجادشده توسط ورق موج‌دار موفق بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حسگر لیزر در تشخیص ناهمواری خاک بهتر از مادون قرمز بوده و سرعت بهینه حرکت با سیستم اندازه‌گیری زبری $2/6 \text{ km h}^{-1}$ است که در آن کلیه کلاس‌های زبری با حسگر لیزر قابل تشخیص است. در سرعت‌های بالاتر، اگر هدف اندازه‌گیری سطوح صاف خاک باشد، مشکلی وجود ندارد، اما در سطوح ناهموار داده‌های به‌دست‌آمده توسط حسگر لیزر صحیح نیستند.

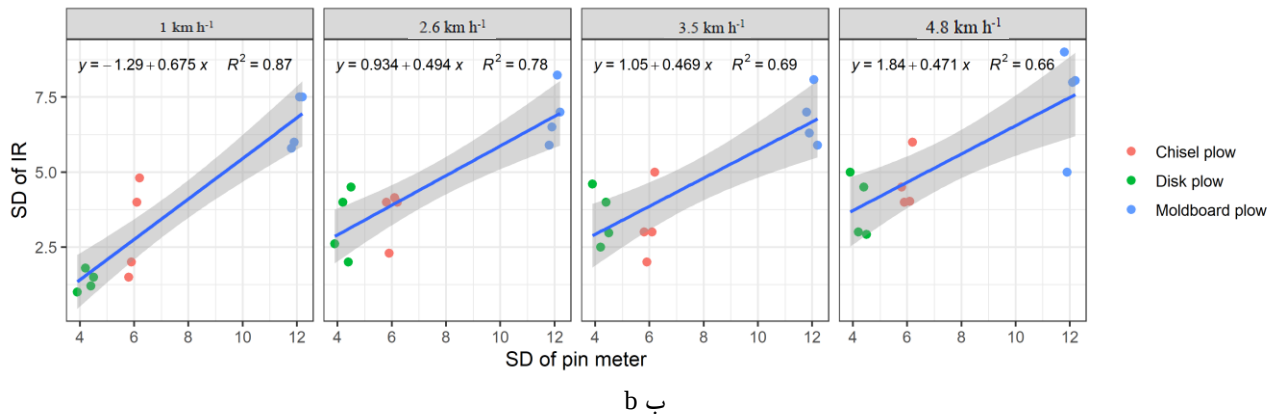
بررسی دقت عملکرد حسگرها در شرایط مزرعه

به‌منظور یافتن دقت نتایج به‌دست‌آمده توسط حسگرهای فاصله‌یاب در شرایط مزرعه، منحنی برازش بین آن‌ها با روش پین‌متر به‌عنوان روش مرجع در سطوح مختلف سرعت رسم و نتیجه در شکل ۱۱ نشان داده شد.

جمله کنترل ارتفاع ادوات نسبت به سطح خاک، از این حسگر می‌توان به‌عنوان یک روش قابل اطمینان برای اندازه‌گیری فاصله استفاده نمود. در تحقیقی که توسط (Lee et al., 1996) انجام شد؛ دو حسگر فراصوت و نوری را برای تشخیص فاصله از سطح زمین تحت شرایط مختلف عملیاتی با هم مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که حسگر نوری می‌تواند فاصله را دقیق‌تر از حسگر فراصوت تشخیص دهد؛ زیرا حسگر نوری دارای یک زاویه دیافراگم واضح‌تر و قطر کوچک‌تر نقطه روی یک هدف در مقایسه با حسگر فراصوت است. در سرعت $3/5 \text{ km h}^{-1}$ نتایج روش‌های لیزری و پین‌متر در کلاس زبری ایجادشده با دیسک اختلاف معنی‌داری نداشتند، اما در سایر کلاس‌های زبری اختلاف معنی‌داری بین روش پین‌متر با لیزر وجود داشت. که بدین معنی است در سطوح زبری نرم، لیزر توانست کلاس زبری را همانند روش پین‌متر تشخیص دهد اما در تشخیص سطوح ناهموار موفق عمل نکرد. در سرعت $4/8 \text{ km h}^{-1}$ ، در کلیه کلاس‌های زبری، بین روش پین‌متر با لیزر اختلاف معنی‌داری وجود داشت. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سرعت از $2/6 \text{ km h}^{-1}$ به $3/5$ ، روش لیزری سطوح نرم را شناسایی کرد، اما در تشخیص سطوح ناصاف موفق نبود. این به دلیل کاهش نرخ جمع‌آوری داده بود (برای لیزر حداکثر ۲۰ هرتز یعنی ۲۰ داده در ثانیه است) که در سرعت $3/6 \text{ km h}^{-1}$ در طول یک متر فقط ۲۰ داده اخذ می‌شد که در مقایسه با ۲۰۰ داده کسب‌شده با پین‌متر بسیار اندک است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت بازتاب و انعکاس نور تحت تاثیر خواص فیزیکی خاک قرار می‌گیرد. وجود توده‌های نسبتاً بزرگ در سطوح ناهموار باعث تشکیل سایه در پشت کلوخه‌ها و پراکندگی بیشتر نور در سطوح ناهموار می‌شد که موجب می‌شود انعکاس نور به‌درستی دریافت نگردد و باعث خطای اندازه‌گیری گردد. لذا بازتاب نور دریافتی از سطوح ناهموار کمتر از سطوح همگن و نرم است (Matthias et al., 2000)



الف a



شکل ۱۱- برازش بین زبری اندازه‌گیری شده توسط پین‌متر: الف) لیزر و ب) حسگر مادون در سرعت‌های مختلف رو به جلو

الف = ۱ km h⁻¹, ب = ۲/۶ km h⁻¹, ج = ۳/۵ km h⁻¹, د = ۴/۸ km h⁻¹

Fig.11. Fit between roughness measured by pin meter: a) Laser, and b) IR sensor at different forward speeds: a = 1 km h⁻¹, b = 2.6 km h⁻¹, c = 3.5 km h⁻¹, and d = 4.8 km h⁻¹

که برای اندازه‌گیری زبری استفاده می‌شود به عوامل مختلفی از جمله هزینه، دقت، قدرت تفکیک، امکان جابه‌جایی روی سطح و غیره بستگی دارد. با توجه به محدودیت تفکیک‌پذیری و امکان تخریب و تغییر زبری سطح، روش تماسی برای سطوح با زبری کم توصیه نمی‌شود. در بین روش‌های غیرتماسی، روش موجود با دقت و وضوح بالا که کمترین هزینه و زمان را برای جمع‌آوری داده‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج داشته باشد، مناسب‌ترین روش خواهد بود. از این رو حسگرهای فاصله‌یاب لیزری و مادون قرمز که با قیمت مناسب و کار آسان در دسترس باشند، قادر به نصب بر روی یک سیستم متحرک و ارائه نتایج زبری به‌صورت آنلاین در کمترین زمان ممکن هستند، استفاده شد. نتایج حسگرهای نوری با پین‌متر به‌عنوان روش مرجع در هر دو حالت ساکن و متحرک مقایسه شد و مشخص گردید که حسگرهای نوری در حالت ساکن، فاصله را همانند روش مرجع (پین‌متر) تشخیص می‌دهند. در حین حرکت، حسگر لیزری قادر بود کلاس‌های زبری را تا سرعت ۲/۶ km h⁻¹ همانند روش پین‌متر تشخیص دهد، در سرعت‌های بیشتر از ۳/۵ km h⁻¹ نیز در تشخیص سطوح نرم موفق عمل کرد اما سطوح ناهموار را به‌درستی تفکیک نکرد. به‌طور کلی حسگر لیزری قادر بود تمامی کلاس‌های زبری را با سرعت ۲/۶ km h⁻¹ تشخیص دهد. یکی از دلایلی که حسگر لیزر نتوانست در سرعت‌های بالاتر از ۲/۶ km h⁻¹ موفق عمل کند به‌خاطر نرخ کم داده‌برداری آن بود. استفاده از حسگرهای لیزری با نرخ بالاتر داده‌برداری می‌تواند مشخصات ارتفاع خاک را مانند پین‌متر ترسیم کنند. حسگر مادون قرمز، فقط در تشخیص سطوح نرم موفق بود اما در تشخیص سطوح دیگر موفق عمل نکرد. استفاده از نتایج تحقیق حاضر برای اندازه‌گیری بلادرنگ زبری سطح خاک می‌تواند جایگزین روش‌های خسته‌کننده و وقت‌گیر مرسوم شود.

نتایج برازش حسگرها نشان داد؛ حسگر لیزری دقت بهتری نسبت به حسگر مادون قرمز دارد. در تمام سرعت‌ها یک رابطه خطی با همبستگی مثبت بین زبری اندازه‌گیری شده توسط حسگر لیزر-پین‌متر و حسگر مادون قرمز-پین‌متر مشاهده شد. دقت روش اندازه‌گیری لیزری در مزرعه، برای سرعت‌های رو به جلو ۱ km h⁻¹، ۲/۶، معادل ۰/۹۷ بود. برای سرعت رو به جلو ۳/۵ km h⁻¹ معادل ۰/۸۵ و برای سرعت ۴/۸ km h⁻¹ معادل ۰/۷۲ بود، دقت کار حسگر مادون قرمز در شرایط مزرعه برای سرعت‌های رو به جلو ۱ km h⁻¹، ۲/۶، ۳/۵ و ۴/۸ به‌ترتیب ۰/۸۷، ۰/۷۸، ۰/۶۹ و ۰/۶۹ می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که حسگر لیزری با روش پین‌متر تطابق خوبی داشت و سرعت حرکت دستگاه بر روی دقت کار حسگر تاثیرگذار است به‌طوری‌که با افزایش سرعت حرکت، دقت کار حسگر کاهش می‌یابد. در صورت استفاده از حسگرهایی با نرخ بیشتر داده‌برداری، سرعت سامانه حرکت تأثیری روی شاخص زبری تصادفی ندارد ولی اگر از حسگرهای با نرخ داده‌برداری کم استفاده شود در سرعت‌های بالاتر، قادر به تشخیص صحیح کلاس‌های زبری نخواهد بود.

نتیجه‌گیری

زبری سطح خاک به‌عنوان یک پارامتر مهم برای تعیین کمیت و کیفیت عملیات خاک‌ورزی شناخته می‌شود که داشتن اطلاعات کافی در مورد آن یکی از الزامات خاک‌ورزی دقیق است. چندین روش برای اندازه‌گیری آن پیشنهاد شده است. استفاده از یک تکنیک نامناسب به دلیل عدم تشخیص دقیق ناهمواری، قطعاً عواقبی در تحلیل‌های بیشتر و آسیب‌ها را در پی خواهد داشت. زبری سطح خاک را می‌توان با روش‌های تماسی و غیرتماسی اندازه‌گیری کرد. به‌طور کلی روشی

سیاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان این مقاله از حمایت دانشگاه بوعلی سینا در قالب رساله دکتری با پیشنهادنامه شماره (۹۰۶۵۸۵۵۸) قدردانی می نمایند.

نسیم صالحی بابامیری: روش شناسی، جمع آوری داده، پردازش داده، تحلیل آماری، خدمات نرم افزاری، شبیه سازی کامپیوتری، اعتبار نجی، استخراج و تهیه متن اولیه
حسین حاجی آقا علیزاده: نظارت و مدیریت و ویرایش متن، اعتبارسنجی، مفهوم سازی
مجید دولتی: مشاور فنی، ویرایش متن، اعتبارسنجی

مشارکت نویسندگان

References

1. Aguilar, M. A., Aguilar, F. J., & Negreiros, J. (2009). Off-the-shelf laser scanning and close-range digital photogrammetry for measuring agricultural soils microrelief. *Biosystems Engineering*, 103(4), 504-517. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.010>
2. Al-Suhaibani, S. A., & 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. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2010.247.255>
3. Allmaras, R. R., Burwell, R. E., Larson, W. E., & Holt, R. F. (1966). Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. *USDA Conservation Research Report*, 7, 1-14.
4. Amoah, J., Amatya, D. M., & Nnaji, S. (2013). Quantifying watershed surface depression storage: Determination and application in a hydrologic model. *Hydrological Processes*, 27(17). 2401-2413. <https://doi.org/10.1002/hyp.9364>
5. 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. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.06.013>
6. ASTM D2216-19. (2019). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM International, West Conshohocken.
7. Bagheri, M. A. (2023). *3D surface profile extraction using image processing*, The ninth international Conference on Knowledge and Technology of Mechanical, Electrical Engineering and Computer of Iran, Tehran. (in Persian with English abstract).
8. Bauer, T., Strauss, P., Grims, M., Kamptner, E., Mansberger, R., & Spiegel, H. (2015). Long-term agricultural management effects on surface roughness and consolidation of soils. *Soil and Tillage Research*, 151, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.017>
9. Carvajal, F., Aguilar, M. A., Agüera, F., Aguilar, F. J., & Giráldez, J. V. (2006). Maximum depression storage and surface drainage network in uneven agricultural landforms. *Biosystems Engineering*, 95(2), 281-293. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.06.003>
10. Cierniewski, J., Karnieli, A., Kazmierowski, C., Krolewicz, S., Piekarczyk, J., Lewinska, K., Goldberg, A., Wesolowski, R., & Orzechowski, M. (2015). Effects of soil surface irregularities on the diurnal variation of soil broadband blue-sky albedo. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(2), 493-502. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2330691>
11. Cremers, N. H. D. T., Van Dijk, P. M., De Roo, A. P. J., & Verzaandvoort, M. A. (1996). Spatial and temporal variability of soil surface roughness and the application in hydrological and soil erosion modeling. *Hydrological Process*, 10, 1035-1047. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(199608\)10<1035::hydro1035\[1\]>3.0.co;2-1](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(199608)10<1035::hydro1035[1]>3.0.co;2-1)
12. Dalla Rosa, J., Cooper, M., Darboux, F., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.06.001>
13. Draelos, M., Deshpande, N., & Grant, E. (2012). *The Kinect up close: Adaptations for short-range imaging*. IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), pp. 251-256. <https://doi.org/10.1109/mfi.2012.6343067>
14. 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 Persian with English abstract).
15. García Moreno, R., Díaz Alvarez, M. C., Tarquis Alonso, A. M., Paz González, A., & Saa' Requejo, A. (2010). Shadow analysis of soil surface roughness compared to the chain set method and direct measurement of micro-relief. *Biogeosciences*, 7, 2477-2487. <https://doi.org/10.5194/bg-7-2477-2010>
16. Gilliot, J. M., Vaudour, E., & Michelin, J. (2017). Soil surface roughness measurement: A new fully automatic

- photogrammetric approach applied to agricultural bare fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 134, 63-78. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.010>
17. 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 Persian with English abstract).
 18. Govers, G., Takken, I., & Helming, K. (2000). Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, 20 (2), 131-146. <https://doi.org/10.1051/agro:2000114>
 19. Guzha, A. C. (2004). Effects of tillage on soil microrelief, surface depression storage and soil water storage. *Soil and Tillage Research*, 76, 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.09.002>
 20. Jensen, T., Karstoft, H., Green, O., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.11.006>
 21. Jester, W., & Klik, A. (2005). Soil surface roughness measurement—methods, applicability, and surface representation. *Catena*, 64(2-3), 174-192. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.005>
 22. Haubrock, S., Kuhnert, M., Chabrillat, S., Güntner, A., & Kaufmann, H. (2009). Spatiotemporal variations of soil surface roughness from in-situ laser scanning, *Catena*, 79, 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.06.005>
 23. ISO 17892-1. (2014). *Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 1: Determination of water content*. International Organization for Standardization, 10 pp.
 24. Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Scharf, P. C., Palm, H. L., Roberts, D. F., & Vories, E. D. (2010). Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. *Agronomy Journal*, 102, 71-84. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0114>
 25. Koval, L., Vaňuš, J., & Bilík, P. (2016). Distance measuring by ultrasonic sensor. *IFAC-PapersOnLine*, 49(25), 153-158. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.026>
 26. Kuipers, H. (1957). A reliefmeter for soil cultivation studies. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 5, 255-262. <https://doi.org/10.18174/njas.v5i4.17727>
 27. Lee, J., Yamazaki, M., Oida, A., Nakashima, H., & Shimizu, H. (1996). Non-contact sensors for distance measurement from ground surface. *Journal of Terramechanics*, 33(3), 155-165. [https://doi.org/10.1016/s0022-4898\(96\)00016-x](https://doi.org/10.1016/s0022-4898(96)00016-x)
 28. Lin, B. B., & Richards, P. L. (2007). Soil Random Roughness and Depression Storage on Coffee Farms of Varying Shade Levels. *Agricultural Water Management*, 92(3), 194-204. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.05.014>
 29. 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 VIS-NIR. *Biosystems Engineering*, 99(1), 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.007>
 30. Marinello, P. F., Gasparini, A., Arvidsson, F., & Sartori, J. L. (2015). Application of the Kinect sensor for dynamic soil surface characterization. *Precision Agriculture*, 16(6), 601-612. <https://doi.org/10.1007/s11119-015-9398-5>
 31. Martinez-Agirre, A., Alvarez-Mozos, J., & Gímenez, 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.013>
 32. Marzahn, P., Seidel, M., & Ludwig, R. (2012). Decomposing dual scale soil surface roughness for microwave remote sensing applications. *Remote Sensor Journal*, 4, 2016-2032. <https://doi.org/10.3390/rs4072016>
 33. Matthias, A. D., Fimbres, A., Sano, E. E., Post, D. F., Accioly, L., Batchily, A. K., & Ferreira, L. G. (2000). Surface roughness effects on soil albedo. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 1035-1041. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431035x>
 34. 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105216>
 35. Mohammadi, F., Maleki, M. R., & Khodaei, J. (2023). Laboratory evaluation of infrared and ultrasonic range-finder sensors for on-the-go measurement of soil surface roughness. *Soil and Tillage Research*, 229, 105678. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105678>
 36. Moreno, R. G., Álvarez, M. C. D., Alonso, A. T., Barrington, S., & Requejo, A. S. (2008). Tillage and soil type effects on soil surface roughness at semiarid climatic conditions. *Soil and Tillage Research*, 98(1), 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.10.006>
 37. 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.009>
 38. Nayerifard, T. (2015). *Extraction of three-dimensional soil surface profile using laser based on digital image processing*, Faculty of Agriculture. Bu Ali Sina University. (in Persian with English abstract).
 39. Podmore, T. H., & Huggins, L. F. (1981). An automated profile meter for surface roughness measurements. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 24(3), 663-665.

-
- <https://doi.org/10.13031/2013.34317>
40. Römken, M. J. M., Singarayar, S., & Gantzer, C. J. (1986). An automated non-contact surface profile meter. *Soil and Tillage Research*, 6, 193-202. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(86\)90454-x](https://doi.org/10.1016/0167-1987(86)90454-x)
 41. Saleh, A. (1993). Soil roughness measurement: chain method. *Journal of Soil and Water Conservation*, 48(6), 527-529. <https://doi.org/10.1080/00224561.1993.12456826>
 42. Sharda, A., Franzen, A., David, E., Clay, J., & Luck, D. (2019). *Precision Variable Equipment*. Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. P. 155-168. <https://doi.org/10.2134/precisionagbasics.2016.0094>
 43. Smith, M.W. (2014). Roughness in the earth sciences. *Earth-Science Reviews*, 136, 202-225. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.05.016>
 44. Thomsen, L. M., Baartman, J. E. M., Barneveld, R. J., Starkloff, T., & Stolte, J. (2015). Soil surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion model. *Soil*, 1(1), 399-410. <https://doi.org/10.5194/soil-1-399-2015>
 45. Vermang, J., Norton, L. D., Baetens, J. M., Huang, C., Cornelis, W. M., & Gabriels, D. (2013). Quantification of soil surface roughness evolution under simulated rainfall. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 56(2), 505-514. <https://doi.org/10.13031/2013.42670>
 46. Weidong, L., Baret, F., Xingfa, G., Qingxi, T., Lanfen, Z., & Bing, Z. (2002). Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 238-246. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(01\)00347-9](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(01)00347-9)
 47. Zribi, M., Ciarletti, V., & 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. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(00\)00082-1](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(00)00082-1)