



Original Article

Keywords:

Sensors.

Received:

Revised:

Accepted:

April 22, 2025

April 28, 2025

Real-time Soil Surface,

Roughness Measurement,

Variable Rate Tillage,

Optical Range-Finder

Random Roughness

February 04, 2025

Evaluating the Performance of Optical Range Finder Sensors in Real-time Measurement of Soil Surface Roughness

Nassim Salehi Babamiri¹, Hossein Haji Agha Alizade^{*1}, Majid Dowlati²

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

2. Department of Food Science and Technology, Faculty of Engineering and natural resources, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

ARTICLE INFO ABSTRACT

Introduction

Surface roughness measurements of agricultural soils play a critical role in assessing various factors, including tillage performance, surface water retention, soil resistance to rainfall-induced failure, seedbed preparation, and surface runoff management. Random roughness serves as a reliable vertical index due to its ease of calculation and a margin of uncertainty of approximately ± 3 mm, making it suitable for distinguishing roughness classes. Roughness measurement methods can be categorized into contact and non-contact techniques. Traditional methods often employ a stop-and-go approach, which is both tedious and time-consuming. In contrast, optical range finder sensors, when mounted on a moving system, can measure soil surface roughness in real-time, significantly reducing measurement time and increasing efficiency. The purpose of this study is to measure soil surface roughness in real time using optical sensors in greenhouse conditions and compare the accuracy and precision of the two measurement methods in order to choose the appropriate method in precision tillage operations.

Materials and Methods

Surface roughness measurements of agricultural soils play a critical role in assessing various factors, including tillage performance, surface water retention, soil resistance to rainfall-induced failure, seedbed preparation, and surface runoff management. Random roughness serves as a reliable vertical index due to its ease of calculation and a margin of uncertainty of approximately ± 3 mm, making it suitable for distinguishing roughness classes. Roughness measurement methods can be categorized into contact and non-contact techniques. Traditional methods often employ a stop-and-go approach, which is both tedious and time-consuming. In contrast, optical range finder sensors, when mounted on a moving system, can measure soil surface roughness in real-time, significantly reducing measurement time and increasing efficiency. The purpose of this study is to measure soil surface roughness in real time using optical sensors in greenhouse conditions and compare the accuracy and precision of the two measurement methods in order to choose the appropriate method in precision tillage operations.

Results and Discussion

* Corresponding author:

h-alizade@basu.ac.ir

Following sensor calibration, the relationship between the distances measured by the sensors and the reference pin meter method demonstrated a linear correlation under stationary conditions, with coefficients of determination (R²), root mean squared error (RMSE), and mean absolute percentage error (MAPE) of 0.98, 2.3, and 2.7 for the infrared (IR) sensor, and 1, 0.2, and 0.36 for the laser sensor, respectively. Both

How to cite:

Salehi Babamiri, N., Haji Agha Alizade, H. and Dowlati, M. (2025). *Evaluating the Performance of Optical Range Finder Sensors in Real-time Measurement of Soil Surface Roughness*. Journal of Agricultural Mechanization, 10 (2):37-57. https://doi.org/10.22034/jam.2025.65789.1317.





range-finder sensors effectively measured distances under stationary conditions ($R^2 > 0.98$). The performance of the IR and laser optical sensors was further evaluated on a moving system, revealing a significant effect of measurement methods and surface class (p < 0.01) on the standard deviation (SD) roughness index. The interaction between measurement method and surface class was also significant (p < 10.01). The laser sensor was able to accurately detect roughness classes akin to the pin meter method at speeds below 2.6 kmh-1. However, at speeds exceeding 3.5 kmh-1, the laser sensor could only identify softer roughness classes, failing to measure roughness indices greater than 1.11 cm due to a decrease in data collection rates and the presence of larger clods in rougher classes. The results of variance analysis show that, speed did not have a significant effect on the roughness index. A strong correlation ($R^2 > 0.9$) was noted between roughness measurements from the pin meter and laser sensor at forward speeds below 3.5 kmh-1, while this correlation decreased to 0.79 at 4.8 kmh-1. Although the predictive power of the fitted model decreased at forward speeds of 4.8 kmh-1, it was largely successful in predicting the roughness class of the soil. The study suggests that utilizing laser sensors with higher data collection rates could facilitate the detection of roughness classes and enable soil profile mapping akin to the pin meter method, regardless of forward speed. Conversely, the IR method performed well only on wide and regular surfaces and struggled with irregular roughness levels, with R² values of 0.74, 0.69, 0.69, and 0.7 at forward speeds of 1, 2.6, 3.5, and 4.8 kmh-1, respectively. Consequently, at higher speeds, both the laser and IR sensors exhibited reduced compatibility with the pin meter method. The findings emphasize the potential of optical sensors for rapid SSR measurement, paving the way for more efficient practices in precision agriculture.

Conclusion

Selecting the appropriate range-finder sensor is essential for online SSR measurement. The findings of this research suggest that the rapid measurement of soil surface roughness can replace traditional, labor-intensive methods, streamlining the process and enhancing accuracy in precision tillage operations.

Acknowledgement

The authors would like to express their gratitude to Bu-Ali Sina University for their support of the present research



مقاله پژوهشی

ارزیابی عملکرد حسگرهای فاصلهیاب نوری در اندازه گیری بلادرنگ زبری سطح خاک

نسيم صالحي باباميري' ⁶، حسين حاجي آقا عليزاده'^{* 6}، مجيد دولتي^۲ 🕫

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸

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

* نویسنده مسئول: E-mail: h-alizade@basu.ac.ir

چکیدہ

اندازه گیری زبری سطح خاکهای کشاورزی نقش مهمی در ارزیابی عاملهای مختلف از جمله: عملکرد ادوات خاکورزی، حفظ آب سطحی، آمادهسازی بستر بذر و مدیریت رواناب سطحی دارد. روشهای مرسوم اندازه گیری زبری اغلب از رویکرد توقف و حرکت استفاده میکنند که هم خستهکننده و هم زمانبر است. در صورت اندازه گیری بلادرنگ زبری خاک، زمان اندازه گیری به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت و راه انجام اقدامهای کار آمدتر در کشاورزی دقیق هموارتر می شود. در این مطالعه عملکرد حسگرهای نوری مادون قرمز و لیزری روی یک سیستم متحرک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سرعت دستگاه، تأثیر معنی داری بر عملکرد سامانه نداشت. اثر متقابل روش اندازه گیری و کلاس زبری در سطح یک درصد معنیدار بود. یک ارتباط قوی بین زبری بهدست آمده از پینمتر و حسگر لیزری در سرعتهای پیشروی کمتر از ¹⁻¹ km h سرعت ¹⁻¹ آمده از پینمتر و حسگر لیزری در سرعتهای پیشروی کمتر از ¹⁻¹ km h سرعت ¹⁻¹ آمده از پینمتر و حسگر لیزری در سرعتهای پیشروی کمتر از ¹⁻¹ km h سرعت ¹⁻¹ آمده از پینمتر و حسگر لیزری در سرعتهای پیشروی کمتر از ¹⁻¹ km h سرعت ¹⁻¹ آمده از پینمتر و حسگر لیزری در سرعتهای پیشروی کمتر از ¹⁻¹ km h سرعت ¹⁻¹ آمده از پینمتر و حسگر لیزری در سرعتهای پیشروی در سطح یک درصد معنی دار بود. یک ارتباط قوی بین زبری سرعت ¹⁻¹ آمده از پینمتر و حسگر لیزری در سرعتهای پیشروی کمتر از ¹⁻¹ km h سرعت ¹⁻¹ آمده از پینمتر و حسگرهای لیزری با نرخ جمع آوری دادهای بالاتر می تواند تشخیص کلاسهای زبری را تسهیل این مطالعه نشان داد که استفاده از حسگرهای لیزری با نرخ جمع آوری دادهای بالاتر می تواند تشخیص کلاسهای زبری را تسهیل این مطالعه نشان داد که استفاده از حسگرهای لیزری با نرخ جمع آوری دادهای بالاتر می تواند تشخیص کلاسهای زبری را تسهیل این مطالعه نشان داد که استفاده از حسگرهای لیزری با نرخ جمع آوری دادهای بالاتر می تواند تشخیص کلاسهای زبری را تسهیل این مطالعه نشان داد که استفاده از حسگرهای لیزری باید. را می در سطح یک درصد اختلاف معنی دار با روش پین متر داشت.

کلمات کلیدی: اندازهگیری بلادرنگ زبری خاک، حسگرهای فاصلهیاب نوری، خاکورزی دقیق، زبری تصادفی





۱_ مقدمه

کشاورزی دقیق^۱ یک نوع نگرش در مدیریت مزرعه است، به گونهای که با گردآوری اطلاعات و استفاده از فناوریها و تجهیزات نرم افزاری و سخت افزاری، با توجه به شرایط مزرعه و متناسب با آن نهاده های مرتبط را اعمال میکند. بنابراین در کشاورزی دقیق باید عملیات کشاورزی در هر قسمت از مزرعه مطابق با ویژگیهای آن قسمت تعیین و اعمال گردد یا به عبارتی دیگر مدیریتی متناسب با مکان مورد نظر صورت پذیرد. ادواتی که مجهز به این نوع فناوری باشند میتوانند نرخ متفاوتی از عملیات را در قسمتهای مختلف مزرعه اعمال نمایند (Crummett, 2019).

Maleki et al., کود (کود (Maleki et al., کود (Carrara) یایش عناصر خاک برای تعیین مقدار کود (Carrara) دو علف های هرز برای سمپاشی با نرخ متغیر (et al., 2004) وجود گیاه برای کوددهی نرخ متغیر (et al., 2004) و میزان رطوبت خاک برای آبیاری نرخ متغیر برخی از رویکردهای اساسی در کشاورزی دقیق هستند. کاهش مصرف انرژی و نهادههای مصرفی، برجسته ترین هدفی است که می تواند در راستای اجرای کشاورزی دقیق مد نظر باشد (Vellidis et al., 2008).

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 انجام شده نشان میدهد که تعداد تحقیقات در زمینه خاکورزی دقیق بسیار Anthonis et al., 2004; Gohari et al., 2010; ندقیق بسیار Fallahi et al., 2015; Alam et al., 2024; Abbaszadeh et al., 2019). یکی از دلایل این امر، آن است که خصوصیات خاک و شرایط خاک و تغییر پذیری سطح مزرعه اجرا شود می توان اظهار داشت شرایط خاک و تغییر پذیری سطح مزرعه اجرا شود می توان اظهار داشت که خاکورزی دقیق اجرا شده است. حفظ رطوبت، کاهش انرژی مصرفی، کاهش فرسایش و حفاظت خاک، تهیه بستر بذر با کمترین میزان بهم خوردگی خاک، به حداقل رساندن تردد ماشینهای کشاورزی و در نهایت نیل به کشاورزی پایدار از جمله مواردی است که می توان اهداف خاکورزی دقیق مورد اشاره قرار گیرد.

اولین گام در اجرای خاکورزی دقیق، ابتدا یافتن شاخصی مناسب برای تعیین آنی کیفیت و شدت خاکورزی و معیار قرار دادن دادههای حاصل از آن به منظور تغییر آنی نرخ شخم به وسیله ابزار خاکورز است (Sharda et al., 2018).

پستی و بلندی سطح خاک، یکی از ویژگیهای فیزیکی خاک است که میتواند بعنوان یک شاخص برای تعیین کیفیت و شدت خاکورزی استفاده شود (Mohammadi et al., 2023). این شاخص تحت عنوان

زبری سطح خاک تعریف می گردد و خود به دو نوع زبری جهتدار و زبری تصادفی تقسیم میشود زبری جهتدار بر اثر شیب و توپوگرافی زمین و با به کارگیری ادوات مختلف شخم بوجود می آید و زبری تصادفی، بر اثر توزیع ذرات و ریزدانههای خاک بهصورت مکانی بر یک (2024 می گردد (, Allmaras 2000; Allmaras عناک بهصورت مکانی بر یک (2024 می گردد (, می گردد (, 2000; Allmaras 2000; می اشد. (2024 می ایجاد می گردد (, ساختمان و بافت خاک، باران، فرسایش در فصول مختلف، تفاوت در ساختمان و بافت خاک، باران، فرسایش در فصول مختلف، تفاوت در ساختمان و بافت خاک، پوشش محصولات و نیز شیوههای مختلف خاکورزی می باشد. لذا می توان از این پارامتر برای ارزیابی کارایی ادوات خاکورزی استفاده نمود (Lin & Richards, 2007; Marzahn et al., 2012; García نمود Moreno et al., 2010; Dalla Rosa et al., 2012; Jensen et al., (2017; Römkens & Wang, 1986)

پارامترها و شاخصهای متعددی برای اندازه گیری زبری سطح خاک وجود دارد. این شاخصها معیارهای عددی استانداری برای تعیین کمیت و میزان پستی و بلندی و تغییرات ارتفاع و مقایسه زبری سطح خاک هستند. برخی از شاخصهای زبری رایج مورد استفاده در زمینههای مختلف عبارتاند از:

۱-خمیدگی (Ts): یک شاخص افقی زبری است که براساس L1 و
۱- فی الله (Ts): یک شاخص افقی زبری است که براساس (m)
۲۰۰ لبه ترتیب طول محیط پروفیل خاک (m) و طول افقی آن (m)
طبق رابطه (۱) بیان می شود. این شاخص به درک پیچیدگی و انحراف سطح خاک از یک خط مستقیم کمک می کند و میزان بی نظمی سطح را نشان می دهد (Mohammadi et al., 2023):

$$T_{S} = \frac{(L_{1} - L_{0})}{L_{1}} \tag{1}$$

۲-ریشه میانگین مربعات ارتفاع^۲: این شاخص با در نظر گرفتن انحرافات از ارتفاع متوسط، در کل پروفیل سطح، اندازه گیری جامعی از زبری را ارائه میدهد و طبق رابطه (۲) بیان میشود (Mohammadi et al., 2023):

$$RMS = \frac{1}{n_h} \sum_{u=1}^{n_h} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i \in h} [Z_i - \bar{Z}_h]^2 \right\}^{1/2}$$
(Y)

که n_h تعداد کل نقاط ارتفاع، Z_i ارتفاع نقطه i ام بر حسب واحد (cm) و z_h نشان دهنده میانگین ارتفاع در تمام نقاط بر حسب واحد (cm) است.

۳-شاخص میانگین شیب تورفتگی³: برای پیشبینی ظرفیت ذخیرهسازی سطح، مطابق رابطه (۳) بیان شده است. شاخص میانگین شیب تورفتگی بر اساس اختلاف ارتفاع ((Zi -Z(i+h)) بین نقطه مرجع i و دیگری i+h بر حسب واحد (cm) روی یک قطعه خط قرار داده

¹. Precision agriculture

¹-Root Mean Square (RMS)

³ -Mean upslope depression (MUD)

شدهی شیب از طرف نقطه مرجع بیان می شود. در هر قطعه خط، هر بار که نقطهی جدیدی به عنوان نقطه مرجع گرفته می شود، روند محاسبه برای تعدادی از زیر گروه ها تکرار می شود و طبق رابطه (۳) بیان می گردد (Mohammadi et al., 2023).

$$MUD = \sum_{i=1}^{m} \frac{\sum_{j=1}^{n} \frac{\Delta z}{n}}{m} \begin{cases} \Delta z = z_{i} - z_{i+h} ; z_{i} > z_{i+h} \\ \Delta z = 0 ; z_{i} \le z_{i+h} \end{cases}$$
(\mathfrak{r})

که در آنΔz، اختلاف ارتفاع بین نفطه i و i+h بر حسب واحد m) n (m) و m به ترتیب تعداد نقاط و زیربخشهای خط هستند.

⁴-زبری تصادفی: یکی از شاخصهای معمول برای توصیف زبری سطح است. زبری تصادفی به عنوان انحراف معیار ارتفاعها بیان شده است که برای کمی سازی تغییرات پستی و بلندی از ارتفاع میانگین Mohammadi et میشود و طبق رابطه (۴) به دست میآید(al., 2023).

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

که در آن N تعداد دادههای ارتفاع، Z_i ارتفاع مربوط به نقطه i ام (cm) و Z میانگین تمام دادهها بر حسب (cm) است.

SD تقریبا تمام شاخصهای زبری نتایج مشابهی را ارائه میدهند. SD یک شاخص عمودی است که انحراف از معیار ارتفاعهای سطح خاک و تغییرات عمودی را اندازه میگیرد که واحدی همسان با پارامتر مورد اندازه گیری دارد که در اینجا بر حسب (cm) است. اگر SD محاسبه شده برای یک سطح از SD سطح دیگر بزرگتر باشد یعنی زبری آن سطح بیشتر است. عدم قطعیت در این رابطه ۳±میلیمتر با فاصله اطمینان ۹۵ درصد است 2015 وسط شاخص SD). که نشان دهنده توانایی جداسازی طبقات زبری توسط شاخص SD است.

در تعدادی از تحقیقات و مقالات از شاخص زبری SD برای ارزیابی و تعیین کیفیت شخم ادوات متعدد خاکورزی استفاده شده است. (2010) Garcia Moreno et al کورز مختلف شامل غلتک، چیزل و تیلر را در سه مزرعه با خاک متفاوت مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که زبری سطح خاک به طور معنی داری تحت تأثیر ادوات مختلف خاکورزی و نیز بافت و نوع خاک تغییر می کند. در آزمایشی دیگر (2016) Martinez-Agirre et al کورزی با استفاده پارامترهای زبری سطح در خاک با شرایط مختلف خاکورزی با استفاده از یک پروفایل متر لیزری پرداختند و نتیجه گرفتند که مقدار زبری

محاسبه شده با افزایش شدت خاکورزی به طور معنیداری افزایش مییابد.

Garcia Moreno et al (2010) اثر خاکورزی و نوع خاک را روی شاخص زبری سطح خاک در شرایط آب و هوایی نیمه خشک بررسی کردند، آزمایشها با سه نوع ابزار خاک ورز شامل غلتک، چیزل و روتیواتور برای کار در سه نوع خاک، لومی، شنی، رسی از دو محل مختلف و لومی شنی از یک محل صورت گرفت. نتایج نشان داد که اثر ابزار خاکورز و نوع خاک، بر میزان ناهمواری و زبری سطح خاک معنیدار است. همان طور که مشاهده می شود اندازه گیری زبری و پستی و بلندی سطح خاک، با استفاده از شاخصهای موجود برای بررسی و ارزیابی ادوات خاکورز مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته است و از آن به عنوان ملاک و شاخص تغییر نرخ و میزان شخم استفاده شده است. با توجه به اینکه زبری سطح خاک را می توان در خاکورز به صورت لحظهای و در حال حرکت اندازه گیری کرد؛ لذا این شاخص می تواند در هنگام عملیات خاکورزی به صورت نرخ متغیر مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه زبری سطح خاک شخم خورده شامل اطلاعات وسیعی از خاک همچون رطوبت، بافت خاک، میزان کاه وکلش و بقایای گیاهی و میزان بهمزدن خاک توسط ابزار خاکورز است؛ لذا می توان گفت اندازه گیری زبری سطح خاک بعد از عبور خاکورز میتواند مفید باشد. (Mohammadi et al., 2022; Sharda et al., 2018) در یک تقسیم بندی دیگر، اندازه گیری زبری و پستی و بلندی سطح خاک، با توجه به نوع دستگاه و ابعاد اندازه گیری با دو روش تماسی و غیر تماسی انجام می شود (Jester & Klik, 2005) در روش تماسی، وسایل مکانیکی به طور مستقیم با خاک تماس برقرار میکنند. روشهای تماسی خود به دو روش زنجیر غلطکی (Saleh, 1993) و روش سوزنهای اندازه گیری یا پینمتر (& Kuipers, 1957; Podmor Huggins, 1981) تقسيم مى شوند. با توجه به وضوح محدود و امكان تخریب و دگرگونی زبری سطح به دلیل تماس مستقیم، استفاده از روش تماسی پیشنهاد نمی گردد. در روش غیر تماسی، وسایل اندازه گیری از سطح خاک فاصله داشته و با سطح خاک تماسی ندارند. مبنای روشهای غیر تماسی، ارسال امواج به سطح خاک و دریافت آن میباشد، روشهای اندازهگیری غیر تماسی را به پنج روش: اولتراسونیک، اسکنر لیزری، فتوگرامتری، فاصله یاب لیزری و مادون قرمز دستهبندی می شوند. ,Koval et al., 2016; Lee & Ehsani, قرمز دستهبندی می 2008; Zribi et al., 2000; Römkens et al., 1986; Jester & Klik., 2005; Marinello et al., (2015; Gilliot et al., 2017; Aguilar et al., 2009 . مزايا و معايب هر يک از اين روشها در جدول (۱) نشان داده شده است.

Table 1. Weaknesses and strengths of each of the non-contact methods used in soil surface roughness measurement				
منبعها	معايب	قوت	روش	
References	Weakness	Strength	Method	
(Mohammadi et	به دلیل تاثیرگذاری دما و رطوبت محیط در سرعت صوت، بمنظور	سرعت بالای دادهبرداری	فراصوتى	
al., 2022)	تصحیح دادههای بدست آمده، استفاده از حسگرهای دما و رطوبت در		Ultrasonic	
	کنار حسگرهای فراصوت ضروری است.			
(Haubrock et al.,	. حجیم هستند؛ مناطق کوچکی را در یک زمان پوشش میدهند؛ بسیار	وضوح و سرعت دادهبرداری بالا	اسکنر لیزر	
al., 2012;	گران و واسنجی آن پیچیده است؛ حساس به گرد و غبار و ارتعاشات		Laser Scaner	
Römkens et	مکانیکی که قابلیت استفاده بصورت متحرک در ماشینهای خاکورزی			
al.,1986)	را ندارند.			
(Aguilar et al.,	نیازمند دانش تخصص و نرمافزار ویژه برای تجزیه و تحلیل عکس،	قابلیت تهیه مدل سه بعدی در جهات مختلف با	فتوگرامتری	
2009; Jester and	وقتگیر بودن و دشواری تحریه و تحلیل تصاویر، مستلزم دقت در	تنها یک بار اندازه گیری، کم هزینه، سرعت	Photogrametry	
Klik., 2005; Garcia Moreno et al., 2010)	موقعت و حدت عکسیادای نسبت به سطح در هنگام به کارگیای؛	ی		
	افزار خطاء اعمام در ممیت نیمد: نم کاف به هنگاه			
	مريس عصى الوجع دار صورت تبوي تور دنى به منته			
	عدسبرداری: نیارمند به مداخله انسانی برای اجرای طعهبندی مناسب			
	و لذا روش مناسبی برای اندازه کیری زبری خاک نیست.			
(Nayerifard, 2015)	ایراد قابل ذکری از منابع گزارش نشده است.	در مدت زمان کوتاهی، اطلاعات زیادی را در مورد	حسگر مادون قرمز	
		تعدادی از پارامترهای خاک بر اساس یک طیف با	IR Sensor	
		وضوح بالا، به طور معمول در محدوده ۳۵۰–۲۵۰۰		
		نانومتر بدست آورد.		
(Nayerifard, 2015)	ایراد قابل ، ذکری از منابع گزارش نشده است.	با استفادہ از حسگر لیزری مے توان دادہھایے با	حسگر لیزری	
		دقت کمتر از یک میلی متر را بدست آورد	Laser Sensor	

جدول ۱- نقاط ضعف و قدرت هر یک از روشهای غیر تماسی مورد استفاده در اندازهگیری زبری سطح خاک

به طور کلی روش مورد استفاده برای اندازه گیری زبری به عوامل مختلفی مانند هزینه، دقت، وضوح، امکان حرکت بر روی سطح و ... بستگی دارد. استفاده از یک روش نامناسب، موجب تحلیلهای بیشتر شده و خسارتهایی را بدلیل عدم تشخیص دقیق زبری در پی خواهد داشت. در بین روشهای غیرتماسی نیز با توجه به محدودیتها و مشکلات استفاده از روشهای فیراصوت، اسکنر لیزری و فوتوگرامتری و همچنین عدم توانایی آنها در اندازه گیری بلادرنگ زبری، توصیه نمی شوند. از آنجا که حسگرهای نوری دقیق و قابل اعتمادند (2003) و قابلیت بکار گیری در حال حرکت را دارند؛ بهنظر 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 گلخانه و مقایسه این دو روش اندازه گیری به منظور انتخاب روش مناسب در عملیات خاک ورزی دقیق است.

۲- مواد و روشها

۲-۱- سامانه در حال حرکت

ابتدا به منظور حرکت دادن حسگرها در سرعتهای مختلف از روی سطوح ایجاد شده با ابزارهای خاکورزی آزمایشگاهی از یک سامانه مطابق شکل (۱) استفاده شد. این سامانه در حال حرکت برای اندازه گیری زبری سطح خاک با قابلیت کنترل سرعت پیشروی به

منظور استفاده در شخم نرخ متغیر که شامل حسگرهای فاصله سنج لیزری و مادون قرمز و همچنین سامانه تحصیل داده و مدارهای الکترونیک در پروژه جداگانه طراحی و ساخته شد. برنامه نرم افزاری LabView برای قرائت داده حسگرها و تبدیل آن به دادههای زبری سطح خاک براساس شاخصهای آماری مختلف تدوین گردید.



شکل ۱- سامانه اندازه گیری زبری سطح خاک Fig 1. The soil surface roughness measurement system

این سامانه از واحدهای مکانیکی-برقی، اندازهگیری و دادهبرداری و پردازش تشکیل شده است. اجزای تشکیل دهندهی بخش مکانیکی -برقی، شامل شاسی متحرک، الکتروموتور و چرخ دنده، درایور کنترل دور الکتروموتور، ریل مسیر حرکت میباشد.

۲-۲- حسگر مادون قرمز'

این نوع حسگر شامل فرستنده و گیرنده میباشد. که اساس کار آن مبتنی بر ارسال امواج به سطح خاک و دریافت آن است. فرستنده یک LED به عنوان منبع نور است که انرژی ساطع کننده و گیرنده نور را شناسایی و دریافت میکند. سیگنال خروجی حسگر بهطور معمول به صورت ولتاژی است که از طریق یک پردازنده سیگنال پردازش میشود تا دادههای مورد نیاز را به دست آورد. این خروجی حاوی اطلاعاتی در مورد شدت تابش مادون قرمز می باشد شکل (۲).



شکل۲- حسگر فاصله یاب مادون قرمز Fig 2. IR range finder sensor

۳-۲- حسگر لیزری

حسگر لیزری نیز مانند حسگر مادون قرمز با استفاده از زمان ارسال تا دریافت اشعه لیزر و مشخص بودن سرعت نور، نسبت به محاسبه فاصله حسگر از سطح خاک اقدام می-کند شکل (۳).



شکل ۳- حسگر فاصله یاب لیزری Fig 3. Laser range finder sensor

۲-۴- مشخصات حسگرهای فاصلهیاب

حسـگرهای مادون قرمز و لیزری که بر روی سـاملنه در حال حرکت نصب می شوند، می توانند با وضوح بالایی سطوح خاک را مورد سنجش و ارزیابی قرار دهند که امکان ارزیابی بلادرنگ تغییرات زبری سطح خاک^۲ را در حین حرکت در میدان فراهم کند مشخصات فنی آنها در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات حسگرهای مورد استفاده برای اندازهگیری بلادرنگ زبری سطح خاک Table 2. Specifications of sensors utilized for real-time soil surface roughness measurement.

نوع		مشخصات
Туре		Specifications
مادون قرمز (GP2Y0A02YK0F)	ليزر(L1-40)	
IR (GP2Y0A02YK0F)	Laser (L1-40)	
4.5 to 5.5 / 33 to 50	3.7 to 5.2 / 86 to 122	جریان (mA) / ولتاژ عملیاتی (V)
		Operational voltage (V) / current (mA)
20 to 150	5 to 4000	فاصله اندازهگیری (cm)
		Measuring distance (cm)
39	30	زمان پاسخ (ms)
		Response time (ms)
44	33	زمان اندازهگیری (ms)
		Measuring time (ms)
Reflective	Reflective	روش تشخيص
		Sensing method
5.03	15.8	وزن (g)
		Weight (g)
$21.6 \times 18.9 \times 44.2$	14.3×36.61×54.33	ار تفاع (mm)× عرض (mm) × طول (mm)
		Height (mm)× Width (mm) × Length (mm)
Analogue	Analogue	نوع خروجي
		Output type
-10 to 60	-10 to 50	دمای عملیاتی (°C)
		Operating temperature (°C)

²⁻ Soil Surface roughness (SSR)



شکل ۵- پین متر استفاده شده برای اندازه گیری زبری Fig 5. Pin meter used for measuring roughness

در مطالعات علمی گزارش شده که این روش برای اندازه گیری ارتفاع ناهمواری سطح خاک در حالت استاتیکی قابل اتکا است (Garcia Moreno et al., 2010; Jester & Klik, 2005; رومان (Thomsen et al., 2015; Garcia Moreno et al., 2010). پین متر مورد استفاده باید دارای مشخصاتی متناسب با آزمایش های لازم در این پژوهش باشد؛ بر این اساس از پین متر ساخته شده توسط (2022) (Mohammadi et al., 2022) در دانشگاه کردستان، به عنوان معیار ارزیابی حسگرها استفاده شد. با قرار دادن پین متر روی ریل و رها کردن میخهای آن مطابق شکل (۵) بر سطح خاک، ارتفاع ایجاد شده با ابزارهای مختلف (بیل، شن کش و فاروئر دستی) در سطح مزرعه خوانده شد و شاخص زبری با استفاده از انحراف معیار (SD) دادههای ثبت شده محاسبه شد.

۶-۲- اندازه گیری زبری سطح خاک به صورت برخط و در حال حرکت

آزمایشها در خاک گلخانه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی سینا همدان با بافت لومی رسی و رطوبت حدود ۱۵ درصد براساس وزن خشک انجام شد. سپس سه کلاس زبری روی سطح خاک به سه روش مختلف (بیل، شن کش و فاروئر دستی) مطابق شکل (۶) ایجاد گردید. این آزمایش با هدف انتخاب حسگر مناسب به منظور تشخیص ناهمواری سطح خاک از بین حسگرهای مادون قرمز و لیزری در نظر گرفته شد، برای اجرای آن سه سطح زبری مختلف و چهار سرعت مختلف پیشروی ¹ km h ، ۲/۶، ۵/۳ و ۴/۸ 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 تشخیص زبری، داده های حسگر را برای محاسبه ناهمواری سطح خاک به کامپیوتر ارسال کردند. برای این منظور ریلی به عرض ۴۴ سانتی متر و طول ۶ متر با استفاده از تیر نبشی ۵×۵ ساخته شد تا سیستم

۵-۲- کالیبراسیون حسگرها

ابتدا به منظور یافتن رابطه بین سیگنال خروجی و فاصله واقعی از سطح خاک، همچنین واسنجی حسگرهای مورد استفاده، سامانههای آزمایشگاهی مطابق شکل (۴) ساخته شد. این سامانه از شاسی مدرج با قابلیت تنظیم به مقدار یک میلیمتر، قوطی آهنی با سطح مقطع ۵×۲ سانتیمتر، به طول ۱۶۰ سانتیمتر و میله هادی به قطر ۱/۲ سانتی متر و یک عدد پایه نگه دارنده حسگر تشکیل شده است. سامانه روی دیوار به گونهای نصب شد که نگهدارندهی حسگر قابلیت حرکت در جهت عمود را داشته باشد و به وسیله پیچ تثبیت در موقعیتهای مختلف ثابت شود. فاصله حسگر تا سطح خاک به عنوان متغیر وابسته و خروجی حسگرها به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شد.خروجی حسگر مادون قرمز برحسب ولتاژ و حسگر لیزر به برحسب سانتیمتر است.



شکل۴- تنظیمات طراحی شده برای سامانه کالیبراسیون حسگرها Fig 4. The setup designed for sensor calibration

نمونه خاک مزرعه پس از ۲۴ ساعت نگهداری در آون آزمایشگاهی با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس با رطوبت حدود ۱۵ درصد بر پایه خشک تهیه شد. قاب طراحی شده برای کالیبراسیون حسگر از ۲۰ تا ۱۰۸ سانتی متر در هر یک سانتی متر تنظیم میشد. بنابراین اندازه گیری در ۶۰ مرحله انجام شد. این مراحل شش بار تکرار شد، چهار رکورد برای کالیبراسیون و دو رکورد برای مراحل اعتبار سنجی. برای جمع آوری داده های حاصل از دو حسگر لیزر و مادون قرمز از نرم افزار 2020 LabView استفاده شد. مقادیر داده های جمع آوری شده توضیح داده شده در اندازه گیری زبری سطح خاک، مرجعی به عنوان مبنای کارایی آنها لازم است که به دلیل قابلیت اطمینان روش پین متر شکل (۵)، از این روش به عنوان روش مرجع برای ارزیابی دقت حسگرها استفاده شد (2023).

اندازه گیری زبری روی آن حرکت کند شــکل (۶). به منظور حذف شیب، ریل و خاک تسطیح شدند.



شکل ۶- ریل ساخته شده و زبری سطح ایجاد شده توسط a) بیل، b) شنکش و c) فاروئر دستی

Fig 6. Constructed rail and Surface roughness created by: a) shovel, b) spike and c) furrow with hand

حسـگرها روی سـامانه در حال حرکت برخط با ارتفاع، طول و عرض به ترتیب ۴۴، ۶۰ و ۴۴ سانتی متر نصب شـدند شـکل (۷). سرعت دستگاه توسط یک الکتروموتور که با درایور سرعت بر اساس مدولاسیون عرض پالس (PWM¹) کنترل می شـد. با اسـتفاده از گیربکس با نسبت سرعت ۸/۳–۱، سرعت رو به جلو ¹-۲ kmh تا ۹ در دسترس بود. موقعیت و سرعت سامانه در حال حرکت نیز با انکودر شفت در هر لحظه تعیین و دادههای مربوط جمعآوری شد. به منظور جمعآوری دقیق تر دادهها در حین آزمایش، سـامانه از ابتدای ریل دو متر را طی کرده و پس از آن جمعآوری اطلاعات در دو متر بعدی توسط حسگرهای فاصلهیاب انجام شد.



شکل ۷- طرحواره سامانه در حال حرکت برای اندازهگیری زبری بلادرنگ خاک

Fig 7. Schematic of the carrier for online soil surface roughness measurement

دادههای حسگرها در ۴ تکرار برای هر سطح و سرعت به دست آمد. از داده های پین متر نیز به منظور ارزیابی شاخص تعیین زبری SD برای تفکیک کلاسهای مختلف زیری (بیل، شن کش و فاروئر دستی) استفاده شد. برای این منظور آزمایشی در قالب طرح کاملا تصادفی که تیمارهای آن سه نوع کلاس مختلف زبری بود صورت گرفت. مقدار دادههای جمع آوری شده از نظر آماری تحلیل شده و نمودارهای ستونی و برازش بین دادههای پینمتر و هر یک از حسگرها برای سطوح مختلف زبری و سرعتهای پیشروی مختلف محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت.

در یک آزمایش فاکتوریل ۳×۴ با طرح کاملا تصادفی در ۴ تکرار اثر سرعت پیشروی ^{۱-}kmh (۲/۶،۱) و ۲/۸ و ۴/۹) و اثر سه کلاس مختلف زبری بر عدد زبری به دست آمده به وسیله حسگر انتخاب شده بر اساس شاخص انحراف از میانگین دادهها (SD) نیز بررسی شد. برای تحلیل و بررسی دادهها و همچنین بررسی نتایج آزمایش از نرم افزار A1.10 و اکسل ۲۰۱۹, ۲۰۱۹ SAS استفاده شد. به منظور مقایسه دادههای لندازه گیری شده حاصل از پینمتر و حسگرهای فاصلهیاب، از برخی پارامترهای آمار توصیفی دادهها بر اساس روابط ۵ و۶ محاسبه شد.

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE): از ریشه میانگین مربعات خطا برحسب (cm)، به عنوان معیاری برای سنجش کیفیت مدل استفاده می شود. معیاری که با میانگین گرفتن از تفاضل مقادیر حقیقی و پیش بینی شده، میزان خطای مدل های آماری را مطابق رابطه (۵) اندازه می گیرد.

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

که در آن Ft ،At به ترتیب مقدار واقعی ارتفاع و مقدار پیشبینی شده ارتفاع بر حسب (cm) و N تعداد نقاط برازش است.

میانگین درصد مطلق خطا (MAPE): میانگین درصد مطلق خطا برحسب (cm) بیان می شود و معیاری برای بررسی دقت پیش بینی مدل آماری است. به طور معمول دقت را به عنوان نسبتی که توسط رابطه (۶) تعریف شده است بیان می کند.

$$MAPE = 100 \frac{\sum_{i=1}^{N} |At - Ft|}{At}$$
(7)

۲-۷- تجزیه و تحلیل مقادیر زبری

¹ - Pulse Width Modulation

۳- نتايج و بحث

۱–۳– کالیبراسیون حسگرها

هدف از انجام آزمایشها در بخش کالیبراسیون، پیدا کردن رابطهای بین سیگنال خروجی حسگرها و فاصله حسگر از سطح خاک بود. این رابطه را می توان با ایجاد تناسب بین داده های این دو متغیر

انجام داد. فاصله حسگر تا سطح خاک به عنوان متغیر وابسته و خروجی حسگرها به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته می شود. خروجی حسگر مادون قرمز بر حسب ولتاژ و حسگر لیزری بر حسب سانتی متر است. نمودارهای برازش فاصله حسگر تا سطح خاک و خروجی حسگرها در این مرحله در شکل نشان داده شده است شکل (۸). دادههای این بخش حاصل میانگین دادهها در چهار تکرار است





نتایج حاصل از بررسی فاصله حسگرها از سطح خاک و خروجی حسـگرها نشـان داد که ارتباط قوی بین سـیگنال های خروجی حسـگرها و فاصـله آنها از سـطح خاک وجود دارد. همان طور که مشاهده میشود ضریب تبیین در حسگر مادون قرمز برابر ۲۹/۰ و در حسگر لیزر ۱ محاسبه شـد. از آنجا که کالیبراسیون حسـگرها در شرایط آزمایشگاهی، و با دقت و حساسیت بالا انجام شد؛ لذا بهمنظور حذف اثر عاملهای محیطی و خطاها، فاصله حسگر از سطح خاک، هر یک سانتی متر، یک بار، قرائت و این عمل چهار بار تکرار شـد و دادههای پرت موجود در هر تکرار حذف گردید. بنابراین شـرایط محیطی، کاملا تحت کنترل بود و ضریب تبیین برای مدل برازش (۱ هر یک

البته کنترل کلیه خطاها در شــرایط مزرعه که عوامل غیر قابل کنترل و ناشناخته محیطی بیشـتری بر برازش مدل تاثیرگذار هسـتند تقریبا غیر ممکن خواهد بود.

در ادامه به منظور اعتبارسنجی حسگرها، مقادیر خروجی حسگرها، با استفاده از معادلات کالیبراسیون به دست آمده، به فاصله حسگر از سطح خاک تبدیل شد. رابطه بین فاصله اندازه گیری شده توسط حسگر و فاصله واقعی، یک تناسب خطی برای هر دو حسگر بهدست آمد شکل



شکل ۹- تناسب بین فاصله واقعی و فاصله اندازه گیری شده تا سطح خاک برای a)حسگر مادون قرمز و b) حسگر لیزری Fig 9. Fitness between the actual distance and the measured distance to the soil surface for a) IR and b) laser sensor



شکل ۱۰- مقایسه میانگین شاخص زبری SD در کلاسهای مختلف

Fig 10. Mean comparison of the SD roughness index across different roughness classes

مقایسه در سطح احتمال یک درصد انجام شد. با توجه به نتایج بهدستآمده، شاخص زبری SD سه کلاس زبری مختلف را به طور کامل از یکدیگر جدا کرد. از آنجایی که بیل نسبت به دو ابزار دیگر ناهمواری بیشتری ایجاد می کرد؛ لذا دارای بیش ترین میزان شاخص زبری (cm) ۱/۴، سپس فاروئر دستی و شن کش به ترتیب (cm) ۱/۱۱ و (cm) ۱/۴، بود. نتایج در محدوه شاخص زبری بدست آمده توسط سایر محققین برای زمین شخم خورده قرار داشت (cm) ۲/۴– ۱/۹، (cm) ۷–۱، (cm) ۱/۵–۵، (cm) ۲/۸– ۱/۲ و (cm) ۱/۴–

(Gilliot et al., 2017; Martinez-Agirre et al., 2016; García .(Moreno et al., 2010; Carvajal et 2006)

۳–۳– انتخاب حسگر مناسب

با مقایسیه دادههای پینمتر به عنوان روش مرجع با روش اندازه گیری حسیگر در سیه کلاس زبری (بیل، شین کش و فاروئر دستی) و چهار سرعت پیشروی سیستم حرکت ^۱-kmh (۱، ۲/۶، ۳/۵ و ۲/۸)، حسگر مناسب انتخاب شد. دادههای حسگرها میانگین داده ها در چهار تکرار بود. نتایج تجزیه واریانس عوامل موثر بر شاخص زبری SD در جدول (۴) نشان داده شده است. ضریب تبیین (R²) معادله برازش، نشان دهنده دقت پیش گوئی مدل است؛ برای حسگر مادون قرمز و حسگر لیزری به ترتیب ۹۸/۸ و ۱، ریشه میانگین مربعات خطا به ترتیب ۲/۳ و ۲/۲ و میانگین درصد خطای مطلق به ترتیب ۲/۷ و ۱۳۶۶ بود. نتایج دادههای میانگین این بخش در دو تکرار انجام شد. همان طور که مشاهده می شود برای حسگرهای تشخیص فاصله از سطح خاک، حسگر لیزری شرایط بهتری نسبت به حسگر مادون قرمز دارد. که این بدلیل دقت بیشتر حسگر لیزری است که با نتایج Jensen et al (2017) مطابقت داشت.

۲-۳- بررسی توانایی شاخص SD در تفکیک طبقات مختلف زبری

با استفاده از پینمتر ارتفاع سه کلاس زبری ایجاد شده (بیل، شن کش و فاروئر دستی) اندازه گیری شد. انحراف معیار دادههای ارتفاع به عنوان معیار مقایسه برای تعیین شاخص زبری در نظر گرفته شد. جدول (۳) نتایج تحلیل واریانس تأثیر کلاسهای مختلف زبری را بر شاخص تعیین زبری SD نشان میدهد.

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر کلاسهای مختلف زبری بر شاخص ذیری

Table 3. Variance analysis effect of roughness classes on SD roughness index

منابع تغييرات	درجه آزادی	ميانگين مربعات	
SOV	df	MS	
کلاس زبری Roughness class	2	0.209**	
خطا Error	9	0.001	
کل Total	11		

** اختلاف معنیدار در سطح یک درصد

نتایج نشان داد که تأثیر طبقات زبری بر شاخص زبری تصادفی SD در سطح احتمال یک درصد معنادار بود. به عبارت دیگر، بر اساس شاخص SD، بین طبقات زبری در سطح احتمال یک درصد تفاوت معناداری وجود داشت و این نشان داد که شاخص SD توانایی جداسازی طبقات زبری ایجاد شده را دارد. برخی از محققین از شاخص SD به عنوان یک شاخص کارآمد برای تشخیص میزان بهم خوردگی خاک توسط ادوات مختلف خاکورزی استفاده کردند بهم خوردگی خاک توسط ادوات مختلف خاکورزی استفاده کردند میانگین شاخص زبری SD در کلاسهای مختلف زبری با استفاده از آزمون دانکن در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

منابع تغييرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
Sov	df	Ms
روش Method	2	0.523**
سرعت Velocity	3	0.005 ^{ns}
کلاس زبری Roughness class	2	2.625**
روش×کلاس زبری Method× Roughness class	4	0.114**
سرعت×روش Method×Velocity	6	0.005 ^{ns}
سرعت × کلاس زبری Roughness class×Velocity	6	0.002 ^{ns}
کلاس زبری×سرعت×روش Roughness class×Method×Velocity	12	0.002 ^{ns}
خطا Error	108	0.003
کل Total	143	

جدول ۴-تجزیه واریانس پارامترهای موثر بر روی شاخص زبریSD

Table 4. Variance analysis of effective factors on the SD roughness index

* و ** به ترتیب وجود اختلاف معنی دار در سطح پنج درصد و یک درصد و ns معنی دار نبودن

مادون قرمز نیز بهغیر از سطوح ایجاد شده با فاروئر دستی در سایر سطوح با روش پین متر اختلاف معنی دار داشت. بعبارتی هیچکدام از دو روش (لیزر و مادون قرمز) در اندازه گیری توام همه کلاس های زبری، مشابه روش پین متر عمل نکرد؛ که احتمالا بدلیل نزدیک به هم بودن کلاس های زبری ایجاد شده است که با نتایج Thomsen هم بودن کلاس های زبری ایجاد شده است که با نتایج (۱۱). سایر تأثیرات متقابل دو و سه گانه بر شاخص زبری SD معنی دار نبود.

مقدار ضـریب تبیین مدل ۰/۹۵ بود که نشـان داد برازش خوبی بین داده های نتایج و مدل رگرسیون وجود داشت. اثر متقابل (روش × سطح) معنی دار بود که مقادیر MS و P value که به طور مجزا در هر یک از سطوح سرعت در جدول (۵) نشان داده شده است. نتایج جدول (۴) نشان داد که تفاوت بین روشهای اندازه گیری در سطح یک درصد بر روی شاخص زبری SD معنی دار است. تأثیر سرعت بر شاخص زبری معنیدار نبود، بنابراین سرعت دستگاه تأثیر معنیداری بر نتیجه کار آن نداشت. اثر سطوح مختلف زبری نیز در سطح یک درصد معنی دار بود. همچنین اثر متقابل (روش اندازه گیری محلاس زبری) در سطح یک درصد معنی دار بود. یعنی در سطوح مختلف زبری با روشهای مختلف اندازه گیری، روند یکسانی مشاهده نشد. روشی که کمترین اختلاف را با پین متر داشته باشد بهترین روش است. بعبارتی اگرچه روش لیزر در اندازه گیری سطوح زبری ایجاد شده با فاروئر دستی و شن کش مشابه روش پینمتر عمل کرد ولی در اندازه گیری زبری ایجاد شده با بیل در سرعتهای بیشتر از ایشد. روش

جدول ۵- تجزیه واریانس اثرمتقابل (روش×سطح) بطور جداگانه در هر سرعت Table 5- Variance analysis of the interaction effect of (Roughness class ×Method) at each speed

ضريب تبيين	(سطح×روش)			سرعت(kmh ⁻¹)
\mathbb{R}^2	P value	میانگین مربعات	درجه آزادی	Velocity
		Ms	df	
0.98	p<0.0001	0.22	8	1
0.97	p<0.0001	0.21	8	2.6
0.97	p<0.0001	0.24	8	3.5
0.9	p<0.0001	0.17	8	4.8

اثر متقابل (روش × سطح) به طور مجزا در هر سطح سرعت با

استفاده از تجزیه واریانس یک طرفه (مدل عمومی خطی) از هم جدا

و مورد بررسـی قرار گرفتند. نتایج تجزیه واریانس به طور مجزا در هر یک از سـطوح مختلف سـرعت، تفاوت معنیدار ترکیبهای (روش ×

سطح) را که هر یک دارای ۹ سطح بودند نشان داد. مقادیر ضرایب تبیین همگی بالای ۰/۹ بود که برازش خوب مدلهای آماری را نشان داد.





شکل ۱۱- اندازه گیری زبری سطح در سرعت های مختلف رو به جلو Fig 11. Surface roughness measurements differentiated by various forward speeds

همانطور که نتایج مقایسه اثر متقابل (روش اندازه گیری × سطح) در شـکل (۱۱) نشـان داد، تفاوتی بین پینمتر به عنوان روش اندازه گیری مرجع و لیزر در تمام سطوح زبری در سرعتهای ^۱-kmh ۱ و ۲/۶ وجود ندارد. بنابراین لیزر همانند پینمتر قادر به تشـخیص سطوح زبری خاک بود که به دلیل زاویه دیافراگم تیزتر و قطر نقطه کوچکتر این حسگر میباشد که قادر است فاصله را با دقت بیشتری تشخیص دهد. نتایج بدست آمده از این آزمایش با نتایج Lee et al (1996) مطابقت داشت.

در سـرعتهای ^{۱-} km h و ۲/۵ km بود، اما در سطح پینمتر در دو سطح شن کش و فاروئر دستی مشابه بود، اما در سطح زبری بیل تفاوت معنی داری وجود داشت. می توان نتیجه گرفت که با افزایش سرعت از ^{۱-} km h ۲/۶ به ۲/۵ روش لیزری قادر است سطوح نرم با شـاخص زبری حداکثر ۱/۱۱ سـانتی متر را مشـابه روش پین متر شناسایی کند، اما در تشخیص سطوح با شاخص زبری بالاتر از ۱/۱۱ (cm) موفق نیست. این به دلیل کاهش سـرعت جمعآوری دادهها در واحد طول و وجود تودههای نسـبتاً بزرگ در سـطوح ناهموار بود به طوری که ذرات درشت را سایه انداخته و موجب پراکندگی بیشتر نور ناهموار کمتر از سـطوح همگن و نرم اسـت. ذرات درشـت علاوه بر افزایش سایه اندازی، احتمال انعکاس نور توسط سـنگدانهها را نیز افزایش داده و بازتاب نور دریافتی را کم میکنند، همچنین ذرات

فرودی را به دام میاندازند و منجر به بازتاب کمتری می شود. که باعث می شد انعکاس نور به در ستی دریافت نشود و باعث خطاهای اندازه گیری شود. که با نتایج محققین مطابقت دارد (, Cierniewski 2015; Matthias et al., 2000; Liu et al., 2022).

روش مادون قرمز فقط سطح ایجاد شده با فاروئر دستی را مانند روش پینمتر تشخیص داد، اما در زبری سطوح دیگر تفاوت معنیداری با پینمتر داشت، بنابراین وجود شیارهای پهن و منظم و بسترهای برآمده، فرصت کافی برای دریافت بازتاب امواج را میدهد. اما حسگر در دریافت انعکاس نور مادون قرمز از سطوح ناهموار و نامنظم ضعیف عمل کرد. نتیجه مطابق با تحقیقات Mohammadi نامنظم ضعیف عمل کرد. نتیجه مطابق با تحقیقات Mohammadi ماطح خاک تشکیل شده 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 سامانه اندازه گیری زبری که در آن تمام زبری سطح با روش لیزر قابل اندازه گیری است، ¹⁻ km h میباشد. در سرعتهای بالاتر از در سطوح ناهموار، مقادیر زبری بدست آمده با مقادیر واقعی مغایرت داشت. یکی از دلایل ضعیف بودن عملکرد حسگر مادون قرمز نسبت به لیزر در اندازه گیری زبری سطح، احتمالا کوچک بودن قطر دیودهای فرستنده و گیرنده نسبت به لیزر میباشد. که این باعث میشود تمام

سیگنالهای فرستاده شده را دریافت کند. همچنین حساسیت بیشتر حسـگر مادون قرمز به ولتاژ تغذیه میتواند نویزهایی را در زمان اندازه گیری ایجاد کند. که با نتایج (2015) Marinello et al مطابقت داشت.

به منظور یافتن رابطه ریاضی بین نتایج بدست آمده توسط پینمتر به عنوان روش مرجع و حسگر فاصله یاب شامل: لیزر و مادون قرمز در سرعت رو به جلوی متفاوت، منحنی برازش بین آنها رسم و نتیجه در شکل های (۱۲ و ۱۳) نشان داده شد.



c=3.5 ، b=2.6 kmh⁻¹ ، a=1 kmh⁻¹) شکل ۱۲ – تناسب بین زبری اندازه گیری شده توسط پین متر و حسگر لیزری در سرعت رو به جلو (d=4.8 kmh⁻¹ ، kmh⁻¹

Fig 12. Fitness between roughness measured by pin meter and laser sensor at of forward speed (a=1 kmh⁻¹, b=2.6 kmh⁻¹, c=3.5 kmh⁻¹, d=4.8 kmh⁻¹)



c=3.5 ، b=2.6 kmh⁻¹ ، a=1 kmh⁻¹) شکل ۱۳ – تناسب بین زبری اندازه گیری شده توسط پین متر و حسگر مادون قرمز در سرعت رو به جلو (d=4.8 kmh⁻¹ ، kmh⁻¹

Fig 13. Fitness between roughness measured by pin meter and IR sensor at of forward speed (a=1 kmh⁻¹, b=2.6 kmh⁻¹, c=3.5 kmh⁻¹, d=4.8 kmh⁻¹)

و ۲/۸ به ترتیب ۷/۲۰، ۲/۹، ۲/۶۹، ۷/۶۹، ۷/۱ میباشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که حسگر لیزری دقت بهتری نسبت به حسگر مادون قرمز دارد. همچنین از منحنیهای برازش می توان نتیجه گرفت در شرایط گلخانه، سرعت حرکت دستگاه بر روی دقت کار حسگر لیزر تاثیر گذار است بطوری که با افزایش سرعت پیشروی، دقت کار حسگر کاهش می یابد. در حسگر مادون قرمز دادههای بدست آمده با مقادیر واقعی انطباق خوبی نداشت که مغایر با نتایج Mohammadi (2023) et al در تمام نمودارها، یک رابطه خطی با همبستگی مثبت بین زبری اندازه گیری شده توسط حسگر لیزر-پینمتر و حسگر مادون قرمز-پینمتر مشاهده شد. در روش اندازه گیری لیزری، برای سرعتهای رو به جلو ¹- 1 km ۱، ۲/۶ و ۲/۵، ضرایب تبیین منحنیهای برازش که نشان دهنده دقت یا به عبارتی نزدیک بودن دادههای حسگر در تکرارهای مختلف هر سرعت است، بیشتر از ۹/۰ بود و در سرعت رو به جلو ¹- 1 km h این ضریب به ۲/۹ کاهش یافت، در حالی که برای حسگرمادون قرمز در سرعتهای رو به جلو ¹- 1 km h

Mohammadi et al (2023) مطابقت داشت. از آنجایی که حسگر لیزری با روش مرجع اندازه گیری پینمتر تطابق خوبی داشت، به طور مجزا برای این حسـگر اثر سـطوح مختلف سـرعتهای حرکت و کلاسهای زبری در یک آزمایش فاکتوریل ۴×۳ با طرح کاملا تصادفی با ۴ تکرار بر روی شاخص زبری SD مورد بررسی قرار گرفت و نتایج

در جدول (۶) نشان داده شده است. آزمایشها به صورت فاکتوریل ۴×۳ با طرح کاملا تصادفی در ۴ تکرار انجام شد.

جدول ۶-تجزیه واریانس اثر سرعت های مختلف و کلاسهای زبری بر روی شاخص تعیین زبری SD بدست آمده توسط روش لیزر Table 6- Effect of different speeds and roughness classes on the SD roughness determination index obtained by the laser

sensor			
	میانگین مربعات(MS)	درجه آزادی	منابع تغييرات
		df	Sov
	1.002**	2	کلاس زبری Roughness class
	0.012 ^{ns}	3	سرعت velocity
	0.004 ^{ns}	6	سرعت × کلاس زبری Velocity× Roughness class
	0.007	36	خطا Error
		47	کل Total

** معنی دار بودن در سطح احتمال ۱ درصد و ns معنی دار نبودن

نتایج نشان داد که در شرایط گلخانه اثر سرعتهای مختلف رو به جلو بر شاخص زبری SD معنی دار نبود. به عبارت دیگر، مطابق نتایج شـکل (۱۲)؛ با وجود اینکه با افزایش سـرعت پیش روی، دقت داده برداری توسط حسگر لیزر کاهش می یافت؛ اما سطوح مختلف سرعت، تاثیر معنی داری بر روی عملکرد سامانه نداشت و در هر سه سرعت پیش روی مختلف، محدوده های زبری ایجاد شـده به خوبی از هم قابل تفکیک هستند. عملکرد خوب حسگر لیزر احتمالا بدلیل قطر کوچک نقطه روی یک هدف اسـت که با نتایج (2017) Xingming et al مطابقت داشت. عدد زبری به دست آمده به وسیله این حسگر اندکی محتر از پین متر بود، احتمالا به این دلیل اسـت که در طول پروفایل سطح، تعداد داده های جمع آوری شـده به وسیله حسگر، کمتر از پین متر بود. داده های زبری بدست آمده توسط این حسگر با محدوه

شاخص زبری محاسبه شده برای ابزارهای سنتی خاکورزی توسط محققین (Gilliot et al., 2017; Martinez-Agirre et al., 2016) مطابقت داشت.

۴-۳- مقایسه نقشه پروفیل خاک با استفاده از یینمتر و حسگرها

شکل (۱۴) پروفیل سطح خاک را توسط پین متر و هر دو حسگر در کلاسهای زبری و سرعت رو به جلو مختلف نشان میدهد.











شکل ۱۴– پروفیل ارتفاع کلاسهای زبری در سه روش اندازه گیری و چهار سطح سرعت رو به جلو با n= بیل، b=شن کش، b = فاروئر دستی Fig 14. Height profile of roughness classes measured using three methods at four forward speed levels, with (a) shovel, (b) spike, and (c) furrow with hand.

صالحی بابا امیری و همکاران

نشریه مکانیزاسیون کشاورزی/ دوره ۱۰ شماره ۲/ سال ۱۴۰۴

kmh⁻¹ همان طور که از شکل (۱۵) مشخص است، در سرعتهای kmh⁻¹ (۱ و ۲/۶، در نقشــه پروفیل خاک تطابق خوبی بین حســگرهای فاصـلهیاب و روش پین متر وجود داشـت اما در سـرعتهای kmh⁻¹ (مرع ا توانســتند ۳/۵ و ۲/۸ ، به دلیل کاهش نرخ دادهبرداری، حسـگرها نتوانســتند پروفیل خاک را ترسیم کنند. همچنین نتایج نشان داد که در ترسیم پروفیل خاک، حسگر لیزری ضعیفتر از حسگر مادون قرمز بود؛ که بدلیل تعداد دادههای کم جمع آوری شـده توسـط حسـگر لیزر در مقایسـه با دو روش دیگر است. بهطوری که در طول دو متر با روش مادون قرمز و لیزر در همان طول در سـرعت ¹-۲/۶ kmh مادون قرمز و لیزر در همان طول در سـرعت ¹-۲/۶ kmh مادون قرمز و لیزر در همان طول در سـرعت ¹-تاب در بری روش مادون قرمز و لیزر در همان طول در سـرعت ¹-۲/۶ kmh است؛ از آن جا که عده شـناسـایی برخی نقاط مرتفع و گود میتوان تاثیر زیادی در شکل نهایی پروفیل خاک داشته باشد؛ میتوان نتیجه تاثیر زیادی در شکل نهایی پروفیل خاک داشته باشد؛ میتوان نتیجه سطح نیست و با نتایج (2002) هدا ۲۵ (کم

از آنجایی که حسگر لیزر در سرعتهای کمتر از ¹⁻ kmh در تشـخیص کلاس زبری و ترسـیم پروفیل خاک مانند روش پینمتر عمل کرد، بنـابراین میتوان این نـاهمـاهنگی را بـه کـاهش نرخ دادهبرداری در واحد طول نسبت داد. میتوان نتیجه گرفت با استفاده از حسگرهایی با فرکانس دادهبرداری بیشتر، تشخیص کلاس زبری و ترسـیم ارتفاع پروفیل خاک مانند پینمتر با هر سـرعتی امکانپذیر خواهد بود. که با نتایج (2023) Mohammadi et al مابقت داشت.

۴– نتیجهگیری نهایی

زبری سطح خاک به عنوان یک پارامتر مهم برای تعیین کمیت و کیفیت عملیات خاکورزی شناخته می شود؛ که داشتن اطلاعات کافی در مورد آن یکی از الزامات خاکورزی دقیق است. روشهای تماسی اندازه گیری زبری، وقت گیر و طاقت فرسا هستند؛ همچنین روشهای غیر تماسی، قابلیت اندازه گیری بلادرنگ زبری سطح خاک را ندارند؛ لذا در مطالعه حاضر، با استفاده از دو حسگر لیزر و مادون قرمز، زبری سطح خاک در شرایط گلخانه به صورت بلادرنگ اندازه گیری شد و به منظور انتخاب روش مناسب در عملیات خاک ورزی دقیق، صحت و دقت آنها مورد مقایسه قرار گرفت. نتایچ بدست آمده نشان داد:

۱-سرعت پیشروی تاثیر معنیداری بر روی عملکرد سراملنه نداشت.

۲–حسـگر لیزر در سـرعت.های کمتر از ۲/۶ kmh⁻¹ در تشـخیص تمامی کلاس.های زبری موفق بود.

۳-حسـگر لیزر در سـرعتهای بیشـتر از ^{۱-}۳M kmh فقط در تشــخیص کلاسهای زبری کمتر از ۱/۱ cm موفق عمل کرد که به دلیل کاهش نرخ جمع آوری داده در سرعتهای بالاتر بود

۴- حسـگر فاصـله یاب مادون قرمز فقط در تشـخیص جوی و پشـتههای عریض و یکنواخت، عملکرد خوبی داشـت، اما در تشخیص

سایر سطوح که نامنظم ایجاد شده بود موفق عمل نکرد. بنابراین وجود شیار و پشتههای عریض و منظم، فرصت کافی برای دریافت نور منعکس شده را میدهد.

با توجه به اینکه اجرای خاکورزی نرخ متغیر نیازمند پایش آنلاین پستی و بلندی سطح خاک است؛ لذا استفاده از نتایج تحقیق حاضر برای اندازه گیری سریع زبری سطح خاک میتواند جایگزین روشهای مرسوم و وقت گیر، که اغلب به صورت توقف و حرکتند شده و از دادههای حاصل از آن برای اجرای خاکورزی نرخ متغیر استفاده نمود.

سپاسگزاری

بدینوسیله نویسندگان این مقاله از حمایت دانشگاه بوعلی سینا در قالب رساله دکتری با پیشنهادنامه شماره (۹۰۶۵۸۵۵۸) قدردانی مینمایند.

منابع

- Abbaszadeh, P., Moradkhani, H., and Zhan, X. (2019). Downscaling SMAP radiometer soil moisture over the CONUS using an ensemble learning method. Water Resources Research, 55(1): 324–344. https://doi.org/10.1029/2018WR023354.
- Aguilar, M. A., Aguilar, F. J., and Negreiros, J. (2009). Off-theshelf 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.
- Alam, A. M., Farhad, M. M., Kurum, M., and Gurbuz, A. (2024). An Advanced Testbed for Passive/Active Coexistence Research: A Comprehensive Framework for RFI Detection, Mitigation, and Calibration. 2024 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). 9-12 Jan 2024. Boulder, Colorado, USA. P. 280. https://doi.org/10.23919/USNC-URSINRSM60317.2024.10464436.
- Allmaras, R. R. (2024). *Total porosity and random roughness* of the interrow zone as influenced by tillage. USDA Conservation Research Report, 7: 1-14.
- 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.
- 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.
- Anthonis, J., Mouazen, A. M., Saeys, W. and Ramon, H. (2004). An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, Part 3: Design of depth control system. Biosystems Engineering, 89(1): 59-67. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.06.013.

۵۷

- Gohari, M., Hemmat, A., and Afzal, A. (2010). Design Construction and evaluation of a variable-depth tillage implement equipped with a GPS. Iranian Journal of Biosystem Engineering,41(1): 1-9. (In persian). https://doi.org/20.1001.1.20084803.1389.41.1.1.0
- Govers, G., Takken, I., & Helming, K. (2000). Soil roughness and overland flow. Agronomie, 20(2): 131-146.
- Guzha, A.C., (2004). Effects of tillage on soil microrelief, surface depression storage and soil water storage. Soil and Tillage Research, 76: 105–114. https://doi.org/10.1016/j.still.2003.09.002
- Haubrock, S., Kuhnert, M., Chabrillat, S., Güntner, A., and Kaufmann, H. (2009)."Spatiotemporal variations of soil surface roughness from in-situ laser scanning," Catena, 79.128–139. ttps://doi.org/10.1016/j.catena.2009.06.005.
- Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Scharf, P. C., Palm, H. L., et al., (2010). Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. Agron. J, 102: 71–84. https://doi.org/10.2134/agronj2009.0114.
- 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.
- 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.
- Koval, L., Vaňuš, J., and Bilík, P. (2016). Distance measuring by ultrasonic sensor. IFAC-PapersOnLine, 49(25): 153-158. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.026.
- Kuipers, H. (1957). A reliefmeter for soil cultivation studies. NJAS. 5(4). https://doi.org/10.18174/njas.v5i4.17727.
- Lee, J., Yamazaki, M., Oida, A., Nakashima, H., Shimizu, H., (1996). Non-contact sensors for distance measurement from ground surface. J. Terra, 33 (3): 155–165. https://doi.org/10.1016/S0022-4898(96)00016-X
- Lee, K. H. and Ehsani, R. (2008). Comparison of two 2D laser scanners for sensing object distances, shapes, and surface patterns. Computers and Electronics in Agriculture, 60(2): 250–262. https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.08.007.

Lin, B. B. and Richards, P. L. (2007). *Soil Random Roughness and Depression Storage on Coffee Farms of Varying Shade Levels*. Agricultural Water Management, 92(3): 194-204. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.05.014.

- Liu, L.; Bi, Q.; Zhang, Q.; Tang, J.; Bi, D.; Chen, L. (2022). Evaluation Method of Soil Surface Roughness after Ditching Operation Based on Wavelet Transform. Actuators, 11: 87. https://doi.org/10.3390/act11030087.
- 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. https://doi.org/10.1007/s11119-015-9398-5.

- 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, Iran. P. 6. (In Persian).
- Bauer, T., Strauss, P., Grims, M., Kamptner, E., Mansberger, R., et al., (2015). Longterm 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.
- Carrara, M., Comparetti, A., Febo, P., Orlando, S. (2004). Spatially variable herbicide application on Durum wheat in Sicily. Biosyst. Eng, 87: 387–392. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.01.004.
- 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.
- Cierniewski, J., Karnieli, A., Kazmierowski, C., Krolewicz, S., Piekarczyk, J., et al., (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.
- Crummett, D., (2019). Variable intensity tillage offers solutions for varying soil conditions. In Niche Equipment Markets, Manufacturer News available at: https://www.farmequipment.com/articles/16770-variable-intensity-tillageoffers-solutions-for-varying-soil-conditions.
- Dalla Rosa, J., Cooper, M., Darboux, F., & Medeiros, J. C. (2012). Soil roughness evolution in different tillage systems under simulated rainfall using a semivariogrambased index. Soil and Tillage Research, 124: 226–232. https://doi.org/10.1016/j.still.2012.06.001.
- 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) 13-15 September, Hamburg, Germany. pp. 251–256. https://doi.org/ 10.1109/MFI.2012.6343067.
- Fallahi, E., Aghkhani, M. H., and 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). https://doi.org/10.22059/ijbse.2015.55669.
- García Moreno, R., Díaz Alvarez, M.C., Tarquis Alonso, A.M., Paz Gon´zalez, 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, 2010.
- Gilliot, J. M., Vaudour, E., Michelin, J., (2017). Soil surface roughness measurement: A new fully automatic photogrammetric approach applied to agricultural bare fields. Computer and Electronic in Agriculture. 134: 63– 78. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.010.

- Römkens, M. J. M., Singarayar, S. and 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.
- Saleh, A. (1993). Soil roughness measurement: chain method. Journal of Soil and Water Conservation, 48(6): 527–529.
- Sharda, A., Franzen, A., Clay, D. E., & Luck, J. D. (2018). Precision variable equipment. Precision agriculture basics, 155-168. https://doi.org/10.2134/precisionagbasics.2016.0094.
- Thomsen, L. M., Baartman, J. E. M., Barneveld, R.J., Starkloff, T., Stolte, J., (2015). Soi surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion model. Soil, 1: 399-410. https://doi.org/10.5194/soil-1-399-2015.
- Vellidis, G., Tucker, M., Perry, C., Kvien, C., & Bednarz, C. (2008). A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. Computers and Electronics in Agriculture, 61 (1): 44–50. https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.05.009.
- Vermang, J., Norton, L. D., Baetens, J. M., Huang, C., Cornelis, W. M., et al., (2013). Quantification of soil surface roughness evolution under simulated rainfall. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 56(2): 505-514.
- Weidong, L., Baret, F., Xingfa, G., Qingxi, T., Lanfen, Z., et al., (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.
- Xingming, Z., Tao, J., Xiaofeng, L., Yanling, D., and Kai, Z., (2017). The temporal variation of farmland soil surface roughness with various initial surface states under natural rainfall conditions. Soil and Tillage Research, 170: 147-156. https://doi.org/10.1016/j.still.2017.03.015.
- Zribi, M., Ciarletti, V. and Taconet, O. (2000). Validation of a rough surface model based on fractional brownian geometry with SIRC and ERASME radar data over orgeval. Remote Sens of Environ, 73: 65-72. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00082-1.

- 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.
- Martinez-Agirre, A., Alvarez-Mozos, J., & Gi'menez, 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.
- Marzahn, P., Seidel, M., Ludwig, R. (2012). Decomposing dual scale soil surface roughness for microwave remote sensing applications. Remote Sens. J, 4: 2016–2032. https://doi.org/10.3390/rs4072016.
- Matthias, A. D., Fimbres, A., Sano, E. E., Post, D. F., Accioly, L., et al., (2000). Surface roughness effects on soil albedo. Soil Science Society of America Journal, 64(3): 1035–1041, https://doi.org/ 10.2136/sssaj2000.6431035x.
- Mohammadi, F., Maleki, M. R., & Khodaei, J. (2022). Control of variable rate system of a rotary tiller based on realtime measurement of soil surface roughness. Soil and Tillage Research, 215: 105216. https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105216.
- Mohammadi, F., Maleki, M. R., & Khodaei, J. (2023). Laboratory evaluation of infrared and ultrasonic rangefinder sensors for on-the-go measurement of soil surface roughness. Soil Tillage Res, 229: 105678. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105678.
- Nayerifard, T. (2015). Extraction of three-dimensional soil surface profile using laser based on digital image processing. MS thesis, biosystem engineering, Bu Ali Sina University, The Iran. (In Persian with English abstract).
- Podmore, T. H. and Huggins, L.F. (1981). An automated profile meter for surface roughness measurements. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 24(3): 663-665. https://doi.org/10.13031/2013.34317.
- Römkens, M. J. M., and Wang, J.Y. (1986). Effect of tillage on surface roughness. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 29(2): 429–433.