

Research Article

Vol. 16, No. 2, 2026, p. 317-334

Multivariate Optimization of Moldboard Plow Tillage Quality Using Response Surface Methodology

M. Akbari¹, I. Hazbawi^{1*}, M. Jafarian²

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2- North Khorasan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shirvan, Iran

(*- Corresponding Author Email: hazbawi.i@lu.ac.ir)

Received: 16 March 2025

Revised: 19 May 2025

Accepted: 01 June 2025

Available Online: 14 July 2025

How to cite this article:

Akbari, M., Hazbawi, I., & Jafarian, M. (2026). Multivariate Optimization of Moldboard Plow Tillage Quality Using Response Surface Methodology. *Journal of Agricultural Machinery*, 16(2), 317-334. (in Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jam.2025.92680.1357>

Introduction

Tillage of rainfed lands is performed using moldboard plows to a depth of 30 cm. Due to the influence of soil surface roughness and crop residues on moisture absorption and erosion reduction, investigation of the relationship between tillage implements' performance and the aforementioned factors is essential. Therefore, considering the importance of preserving precipitation and preventing soil erosion, this study was conducted to investigate and optimize the effects of forward speed and tillage depth on soil surface roughness and the percentage of buried crop residue using response surface methodology.

Materials and Methods

This research was conducted in the Khomeyn region, Iran during the 2023-2024 growing season, utilizing a moldboard plow and an MF399 tractor. The objective was to investigate the effects of plowing depth and speed on soil surface roughness and the burial of plant residues. Soil surface roughness was measured using a pin meter, while the percentage of burial of plant residues was determined using image processing techniques and ImageJ software. Wheat straw residue with an initial moisture content of 8-9% was uniformly distributed at a rate of 100 g m⁻² along the designated paths. Images were captured before and after the tillage operation for subsequent processing and analysis.

To optimize the process, a central composite design (CCD) with three levels of speed (5, 7.5, and 10 km h⁻¹) and three levels of tillage depth (17.5, 22.5, and 27.5 cm) was employed. The objective was to determine the optimal factor levels for maximizing surface roughness and minimizing residue burial. Data were analyzed using a second-order model and Design Expert V11 software. The best model was selected based on statistical criteria.

Results and Discussion

Modeling soil surface roughness and crop residue incorporation revealed that the second-order regression model, with high coefficients of determination ($R^2 = 0.983$ and 0.96), was capable of accurately predicting these indices. The interaction effects of tillage speed and depth were significant ($P < 0.01$). In this study, the effect of tillage depth on soil surface roughness was greater than that of tractor speed. The regression model indicated that tillage depth plays a primary role in the amount of crop residue incorporation. Moldboard plowing demonstrated that increasing depth, particularly at high speeds, leads to increased roughness and residue incorporation, whereas increasing speed, especially at shallow depths, reduces roughness and increases incorporation. The maximum roughness was observed at the deepest tillage depth and lowest speed, while the shallowest depth and highest speed resulted in the minimum roughness.



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.92680.1357>

Tillage depth and speed influence soil surface roughness and bulk density. Higher speeds decrease furrow depth and ridge height; thus, lower speeds are recommended for creating greater roughness. The highest residue incorporation (85%) was achieved at a depth of 27.5 cm and speeds of 5 and 10 km h⁻¹, while the lowest (70%) occurred at a depth of 17.5 cm and a speed of 5 km h⁻¹. Depth was more influential than speed, and nonlinear models are necessary for more accurate modeling. The developed model, with a desirability of 81%, provides the maximum roughness (10.96 cm) and minimum residue incorporation (69.34%) for a moldboard plow at a speed of 5 km h⁻¹ and a tillage depth of 17.5 cm.

Conclusion

This study investigated the effects of conventional tillage methods in dry land areas on soil surface roughness and the extent of crop residue burial. The results indicate that increasing tillage depth leads to an increase in both indices, while reducing tractor speed increases roughness and decreases residue burial. The optimization model revealed that at a speed of 5 km h⁻¹ and a depth of 17.5 cm, minimum roughness and maximum residue incorporation can be achieved. To improve regional tillage practices, it is advised to conduct further research into the long-term effects of different tillage systems. This effort will ensure a well-informed selection and implementation of the most effective methods.

Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the University of Lorestan.

Keywords: Burial of plant residues, Forward speed, Soil surface roughness, Tillage depth

بهینه‌سازی چندمتغیره کیفیت خاک‌ورزی گاواهن برگردان‌دار با استفاده از روش سطح پاسخ

محمد اکبری^۱، عیسی حزباوی^{۱*}، مصطفی جعفریان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱

چکیده

حفظ بقایا و ناهمواری خاک در اراضی دیم، فرسایش را تقلیل داده و خاک‌ورزی حفاظتی با بهبود رشد گیاه، در پایداری کشاورزی نقش اساسی دارد. با توجه به اهمیت این روش‌ها و کمبود پژوهش‌های دقیق، مطالعه حاضر به منظور انتخاب بهینه‌ترین روش خاک‌ورزی حفاظتی انجام پذیرفت. این تحقیق به منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی کیفیت خاک‌ورزی (ناهمواری سطح و دفن بقایا) با استفاده از گاواهن برگردان‌دار انجام شد. هدف، تعیین بهترین سرعت و عمق شخم گاواهن برای دستیابی به کیفیت مطلوب خاک‌ورزی است. به منظور تعیین شرایط بهینه، تأثیر سرعت پیشروی تراکتور (۵، ۷/۵ و ۱۰ کیلومتر بر ساعت) و عمق شخم (۱۷/۵، ۲۲/۵ و ۲۷/۵ سانتی‌متر) با استفاده از روش سطح پاسخ ارزیابی شد. به منظور سنجش ناهمواری سطح خاک و تعیین درصد مدفون شدن بقایای گیاهی، به ترتیب از دستگاه پین‌متر و روش پردازش تصویر استفاده شد. نتایج حاکی از تأثیر معنادار کلیه فاکتورهای مستقل بر هر دو شاخص بود ($P < 0.01$). نتایج نشان داد که افزایش عمق شخم منجر به افزایش ۳۶/۷۸ درصدی در میزان ناهمواری سطح خاک گردید، در حالی که کاهش عمق شخم با افت ۱۳/۷۴ درصدی در مدفون شدن بقایای گیاهی همراه بود. همچنین، کاهش سرعت پیشروی، کاهش ۷/۷۸ درصدی در مدفون شدن بقایا و افزایش ۳۲/۸۲ درصدی در ناهمواری سطح خاک را نشان داد. در شرایط بهینه، مقادیر ۱۰/۹۶ سانتی‌متر برای ناهمواری سطح خاک و ۶۹/۳۴ درصد برای مدفون شدن بقایای گیاهی مشاهده شد. این نتایج در سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت و عمق شخم ۱۷/۵ سانتی‌متر به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: سرعت پیشروی، عمق شخم، مدفون شدن بقایای گیاهی، ناهمواری سطح خاک

مقدمه

دارد (Liu et al., 2021)، هدف از خاک‌ورزی، بهبود محیط خاک برای استقرار و نمو گیاه، کاهش رواناب و ارتقای خواص فیزیکی آن است (Shevchenko et al., 2024). پوشش گیاهی مناسب و بقایای آلی کافی نیز با کاهش رواناب و افزایش نفوذ آب، ضمن بهبود شرایط خاک و آزادسازی مواد مغذی، از فرسایش جلوگیری می‌کنند (Li, Shen, Wang, Wang, & Gao, 2021). مطالعات مزرعه‌ای نشان داده‌اند که کاهش دور آبیاری با کاهش رواناب و افزایش بهره‌وری محصول همراه است (Langer, 2021).

بقایای محصولات سطحی نقش مهمی در عملکردهای مختلف زراعی، از جمله حفظ آب خاک، کنترل فرسایش و سرکوب علف‌های هرز ایفا می‌کنند (Ranaivoson et al., 2017). در کشاورزی حفاظتی، ادوات خاک‌ورزی مختلف، تأثیرات متفاوتی بر میزان دفن بقایای گیاهی و میزان اختلال خاک دارند. نوع دیسک و عمق کار، جابه‌جایی خاک و اختلاط بقایا را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به‌طوری‌که افزایش عمق کار منجر به اختلال بیشتر خاک و اختلاط بیشتر بقایا

فعالیت‌های انسانی در کنار عوامل طبیعی، خاک را دستخوش تغییر و فرسایش می‌کند، به طوری که مدیریت فرسایش خاک‌های زراعی به شاخصی کلیدی در پایداری کشاورزی تبدیل شده است (Sharafi, Mohammadi Ghaleni, & Dragovich, 2023). ناهموارسازی سطح خاک با ادوات خاک‌ورزی، راهکاری مرسوم برای کاهش فرسایش و افزایش جذب رطوبت در اراضی آیش و بهبود ساختمان خاک است (Ma et al., 2022). از آنجا که وضعیت خاک پس از خاک‌ورزی تأثیر مستقیمی بر عملکرد و کیفیت محصولات

۱- گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان شمالی، شیروان، ایران

(*)- نویسنده مسئول:

(Email: hazbawi.i@lu.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2025.92680.1357>

می‌سازند. روش سطح پاسخ به‌عنوان ابزاری کارآمد در مطالعات خاک‌ورزی جهت بهینه‌سازی و مدل‌سازی پارامترهای کلیدی مختلف از جمله نیروی کشش، عرض شکست و کارایی انرژی سیستم‌های تراکتور-ادوات به کار رفته و نتایج پیش‌بینی شده تطابق مطلوبی با داده‌های تجربی نشان داده‌اند. این روش برای ارزیابی شیوه‌های مدیریتی جهت کنترل فرسایش خاک استفاده شده است (Shirazi, Khademalrasoul, & Safieddin Ardebili, 2020). در عملیات خاک‌ورزی، روش سطح پاسخ برای مدل‌سازی و پیش‌بینی رابطه بین ویژگی‌های خاک و نیروی کشش ادوات خاک‌ورزی مورد استفاده قرار گرفته است (Rahmatian, Nematollahi, Yeganeh, & Sharifi, 2021). این روش همچنین برای بهینه‌سازی طراحی و شرایط کاری یک تیغه خاک‌ورزی جدید به کار رفته و منجر به بهبود کارایی تراکتور و کاهش مصرف سوخت شده است (Mohammadi, Karparvarfard, Kamgar, & Rahmatian, 2020).

شخم اراضی دیم با گاوآهن‌های برگردان‌دار تا عمق ۳۰ سانتی‌متر انجام می‌شود. به دلیل تأثیر ناهمواری خاک و بقایای گیاهی بر جذب رطوبت و کاهش فرسایش، بررسی رابطه بین دستگاه خاک‌ورز و عوامل مذکور ضروری است، اما تاکنون تحقیق جامعی در این زمینه صورت نگرفته است. این تحقیق با هدف بررسی و بهینه‌سازی تأثیر سرعت پیشروی و عمق شخم بر ناهمواری سطح خاک و درصد مدفون شدن بقایای گیاهی به روش سطح پاسخ، با توجه به اهمیت حفظ نزولات جوی و جلوگیری از فرسایش خاک انجام شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال‌های ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در عملیات خاک‌ورزی به‌وسیله گاوآهن برگردان‌دار (۳ خیش به عرض ۹۰ سانتی‌متر) و تراکتور MF399 در شهر خمین (استان مرکزی) با ارتفاع ۱۸۱۵ متر از سطح دریا و موقعیت جغرافیایی ۵۰ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۶۳ دقیقه عرض شمالی اجرا گردید.

تعیین کمیت ناهمواری سطح خاک

نقش تعیین‌کننده ناهمواری سطح خاک پس از عملیات خاک‌ورزی در جذب رطوبت و کنترل فرسایش، به‌ویژه در دوره آیش، لزوم اندازه‌گیری دقیق آن را ایجاب می‌کند. بدین منظور، در این مطالعه از پین‌متر معرفی شده توسط زینلی و همکاران (Zeinli, Mousavi, Jafarian, & Bayati, 2012) (شکل ۱) به‌عنوان ابزاری ساده و کم‌هزینه بهره گرفته شده است (Thomsen, Baartman, Barneveld, Starkloff, & Stolte, 2015). در این آزمایش، از یک سازه فلزی عمودی با طول ۲ متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر، مجهز به ۴۰ سوراخ با فاصله ۵ سانتی‌متر، استفاده شد. این سازه بر روی سطح

می‌شود (Zeng, Thoms, Chen, & Ma, 2021). در راستای کشاورزی پایدار، حفظ کیفیت خاک و بهینه‌سازی مصرف انرژی از طریق انتخاب و بهره‌برداری از ادوات خاک‌ورزی با کمترین اثر مخرب، از اولویت‌های اساسی مدیریت خاک به‌شمار می‌رود (Orzech, Wanic, & Zaluski, 2021). به‌منظور درک بهتر اندرکنش ادوات خاک‌ورزی با خاک، انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای تحت شرایط واقعی ضروری است، اما پیچیدگی عوامل مؤثر، این مهم را دشوار می‌سازد. لذا، آزمایش‌های کنترل‌شده در مقیاس کوچک، راهکاری مؤثر برای تسهیل این فرآیند پیچیده به‌شمار می‌رود (Fechete-Tutunaru, Gaspar, & Gyorgy, 2019).

در پژوهشی، رابطه بین سرعت و عمق خاک‌ورزی با جرم مخصوص ظاهری خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش سرعت خاک‌ورزی باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک شده و برعکس، افزایش عمق خاک‌ورزی منجر به افزایش این ویژگی می‌شود (Mahmoudi, Jalali, Valizadeh, & Skandari, 2015). در تحقیقی، با بهره‌گیری از روش‌های زمین‌آماری، تغییرات مکانی فشردگی خاک پس از عملیات خاک‌ورزی به دقت بررسی شد. هدف اصلی این مطالعه، یافتن بهترین مدل برای تخمین دقیق فشردگی خاک در نقاط مختلف زمین بود (Bahrpour, Rouhani, Abbaspour-Fard, Zarifneshat, & Aghkhani, 2018). محققان با استفاده از تصاویر اسکن‌شده باکیفیت از سطح خاک پس از عملیات خاک‌ورزی، موفق به استخراج دقیق ویژگی‌های کلوخه‌ها مانند موقعیت و رمز آن‌ها شدند. این کار با محاسبه شاخص‌های مختلف تصویر انجام شده است (Chimi-Chiadjeu, Le Hegarat, Mascle, Vannier, Taconet, & Dusseaux, 2014).

در تحقیقی، تأثیر سرعت پیشروی تیغه پنجه‌غازی (۵، ۷/۵ و ۱۰ کیلومتر بر ساعت) بر مشخصات پروفیل خاک پس از خاک‌ورزی با استفاده از مدل شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت. یافته‌ها حاکی از آن بود که افزایش سرعت، با پخش گسترده‌تر خاک، کاهش ارتفاع پشته‌ها و افزایش پرتاب خاک، عمق شیار و عرض ناحیه به‌هم‌خورده همراه است. شکل مثلث متساوی‌الساقین پروفیل خاک در سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت مشاهده شد (Liu, Chen, & Kushwaha, 2010). نتایج یک مطالعه منطقه‌ای در شمال غرب ایران حاکی از آن است که گاوآهن برگردان‌دار (۵۷ سانتی‌متر) در مقایسه با گاوآهن چیزل (۲۰ سانتی‌متر) و روش کم‌خاک‌ورزی (۱۵ سانتی‌متر)، بیشترین میزان جابه‌جایی خاک را موجب می‌شود (Kouselou et al., 2018). پیچیدگی اندرکنش عوامل محیطی و مدیریتی در مزرعه و دشواری تعمیم نتایج مقیاس کوچک، در کنار نیاز به تعادل اهداف خاک‌ورزی و محدودیت‌های به‌کارگیری روش‌های حفاظتی، چالش‌های اساسی در این حوزه محسوب می‌شوند. این موانع، ضرورت یافتن راهکارهای بهینه و کارآمد در عملیات خاک‌ورزی را برجسته

$$BPR = 100 \times \frac{RS_1 - RS_2}{RS_1} \quad (2)$$

در این رابطه، BPR^2 درصد مدفون شدن بقایای گیاهی، RS_1 سطح پوشیده‌شده از بقایا قبل از عبور دستگاه (پیکسل) و RS_2 سطح پوشیده‌شده از بقایا پس از عبور دستگاه (پیکسل) است.

طراحی آزمایش و تحلیل آماری

به‌منظور بهینه‌سازی فرآیندهایی با پاسخ‌های چندگانه، از طرح مرکب مرکزی (CCD^3) به‌عنوان روشی کارآمد برای کاهش تعداد آزمایش‌ها و بررسی اثر متغیرها استفاده می‌شود. این آزمایش شامل سه سطح سرعت پیشروی تراکتور (۵، ۷/۵ و ۱۰ کیلومتر بر ساعت) و سه عمق شخم (۱۷/۵، ۲۲/۵ و ۲۷/۵ سانتی‌متر) بود. انتخاب سطوح مورد نظر بر مبنای بررسی جامع منابع علمی و رویه‌های متداول در منطقه انجام شده است. به‌منظور بهبود برازش مدل و تخمین دقیق‌تر خطای آزمایش، نقطه مرکزی پنج مرتبه تکرار گردید. برای بقیه تیمارها میانگین سه تکرار لحاظ شده است (جدول ۱). طرح CCD به‌صورت صاف^۴ اجرا شد. مقادیر سرعت پیشروی و عمق شخم، با توجه به عرف منطقه، انتخاب شدند.

هدف از این پژوهش، تعیین سطوح بهینه فاکتورها با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM^5) و نرم‌افزار Design Expert v11 بود. مقادیر بهینه سرعت پیشروی تراکتور و عمق شخم به گونه‌ای تعیین شد که حداکثر ناهمواری سطح خاک و حداقل مدفون شدن بقایای گیاهی حاصل شود. تحلیل داده‌ها با استفاده از مدل درجه دوم کامل و اثرات متقابل بین فاکتورها انجام شد (رابطه ۳). پس از ارزیابی مدل‌های رگرسیونی مختلف، بهترین مدل بر اساس معیارهای آماری تجزیه رگرسیون (مانند مقادیر عدم برازش، P و R^2)، برگزیده شد (Hazbawi & Safaeinezhad, 2023).

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i V_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} V_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} V_i V_j \quad (3)$$

در این رابطه، Y متغیر پاسخ (مقدار مدفون شدن بقایا و مقدار ناهمواری سطح خاک)، b_0 مقدار عرض از مبدأ، b_i ($i = 1, 2, \dots, k$) ضریب مدل مرتبه اول، b_{ij} اثر متقابل، و b_{ii} ضرایب درجه دوم V_i را نشان می‌دهند. V_i و V_j متغیرهای ورودی هستند که بر متغیر پاسخ تأثیر می‌گذارند.

خاک قرار گرفت و با توجه به شیب زمین در هر نقطه، تنظیم گردید. اندازه‌گیری شیب زمین با تراز زاویه‌سنج و تعیین ارتفاع پین‌ها نسبت به سطح مبنا انجام شد. شاخص ناهمواری سطح خاک با محاسبه انحراف معیار داده‌های ارتفاعی (رابطه ۱) در نرم‌افزار اکسل محاسبه و به‌عنوان معیاری کمی برای ناهمواری خاک مورد استفاده قرار گرفت (Thomsen et al., 2015). قطعات آزمایشی با ابعاد 4×140 متر در جهت طولی زمین برای هر تیمار تعیین گردید. پنج قرائت در نقاطی با فاصله ۲۰ متر انجام و میانگین آن‌ها به‌عنوان یک واحد تکرار در نظر گرفته شد.

$$SSR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n}} \quad (1)$$

در این رابطه، SSR^1 معرف شاخص ناهمواری سطح خاک، h_i معرف مقدار ارتفاع میله (پین) i ام نسبت به سطح مبنا (میلی‌متر)، $\bar{h}$ معرف میانگین مقادیر h_i و n تعداد میله‌های به‌کار گرفته‌شده در هر قرائت است.

تعیین میزان مدفون شدن بقایای گیاهی

با توجه به محدودیت‌های روش سنتی چارچوب‌های یک مترمربعی در تعیین دقیق درصد مدفون شدن بقایای گیاهی، در این مطالعه از تکنیک تصویربرداری و پردازش تصویر به‌عنوان روشی نوین و دقیق‌تر برای نمونه‌برداری و تحلیل استفاده شد. کاه گندم با رطوبت اولیه ۸ تا ۹ درصد به میزان ۱۰۰ گرم بر مترمربع، پس از مشخص شدن مسیر حرکت دستگاه خاک‌ورزی، به‌صورت یکنواخت در مسیرهای تعیین‌شده پخش شد. (Akbari, Dahmardeh, Morshedi, Ghanbari, & Khorramdel, 2019).

به‌منظور ثبت تغییرات سطح خاک، قبل و بعد از عبور دستگاه، از دوربین دیجیتال مستقر در موقعیتی ثابت، تصویربرداری انجام شد (شکل ۲). با استفاده از نرم‌افزار ImageJ v1.52 تصاویر پردازش و درصد مدفون شدن بقایا با تعیین مساحت پوشش گیاهی (قبل و بعد از عبور دستگاه) در قالب مربعی فرضی ($a \times a$) و بر اساس رابطه (۲) محاسبه گردید. به‌منظور کاهش اثر حاشیه‌های تصویر، ابعاد قاب مجازی معادل ۸۰ درصد عرض کاری دستگاه تعیین گردید (Vidal-Vazquez, Miranda, & Paz Gonzalez, 2007). روش مورد استفاده برای تعیین میزان مدفون شدن بقایای گیاهی در شکل ۲ نشان داده شده است. این روش شامل تصویربرداری توسط دوربین (A)، تراکتور و ادوات خاک‌ورزی (B)، مسیر حرکت (E) و با استفاده از یک قاب مشخص (F) است. تصاویر نمونه قبل (C) و بعد (D) از انجام عملیات خاک‌ورزی در این شکل نشان داده شده‌اند.

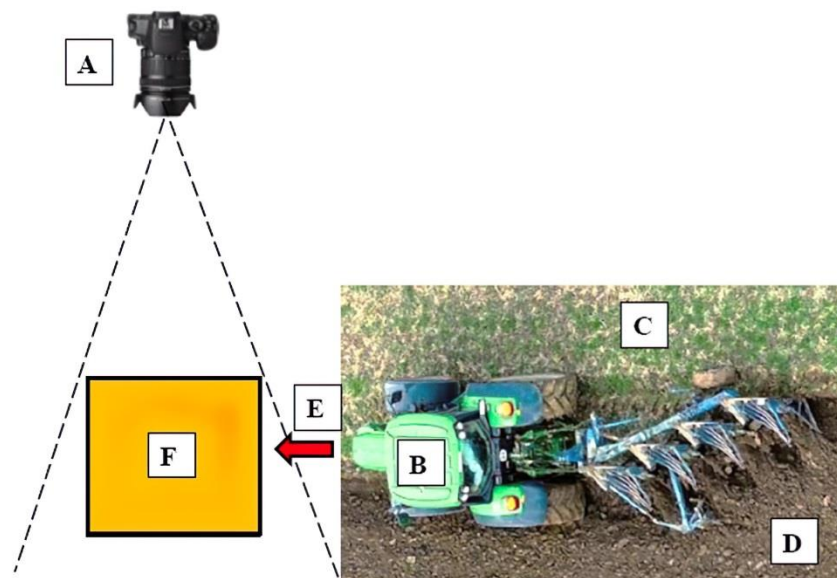
2- Burial of Plant Residues
3- Central Composite Designs
4- Face centered
5- Response surface method

1- Soil Surface Roughness



شکل ۱- اندازه‌گیری ناهمواری سطح خاک با استفاده از دستگاه پین متر ساخته شده

Fig.1. Soil surface roughness measurement procedure using a custom-built pin meter



شکل ۲- نحوه قرارگیری دوربین برای محاسبه درصد مدفون شدن بقایای گیاهی: (A) دوربین، (B) تراکتور و ادوات خاک‌ورزی، (C) قبل از خاک‌ورزی، (D) بعد از خاک‌ورزی، (E) مسیر حرکت و (F) قاب مشخص

Fig.2. Camera positioning for calculating the percentage of the buried plant residue: (A) Camera, (B) Tractor and tillage equipment, (C) Before tillage, (D) After tillage, (E) Path of movement, and (F) Specific frame

نتایج و بحث

ارزیابی و مدل‌سازی میزان ناهمواری سطح خاک

ناهمواری‌های سطح خاک، عبارات خطی، درجه دوم و اثرات دوگانه متغیرهای مستقل سرعت پیشروی تراکتور و عمق شخم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ($P < 0.01$). به‌منظور دستیابی به برازش مطلوب در مدل رگرسیونی، ضریب تبیین (R^2) باید حداقل ۰/۸ باشد (Danbaba et al., 2014). در مطالعه حاضر، مدل پیشنهادی سطح پاسخ برای ناهمواری‌های سطح خاک، از نوع درجه دوم با ضریب تبیین ۰/۹۸۳ به‌دست آمد (جدول ۳). این یافته‌ها نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی ناهمواری‌های سطح خاک است.

با توجه به نتایج جدول ۲، مدل درجه دوم برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی انتخاب شد. نتایج تحلیل واریانس مدل به روش سطح پاسخ در جدول ۳ نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی درجه دوم از لحاظ آماری معنی‌دار ($P < 0.01$) و فاقد برازش نامناسب است. لذا، این مدل قادر به پیش‌بینی تاثیر متغیرهای مستقل بر ناهمواری سطح خاک می‌باشد. این مدل، ناهمواری‌های سطح خاک را با ۵ عبارت (درجه آزادی) توانسته شبیه‌سازی کند. در مدل شبیه‌سازی‌شده

جدول ۱- مقادیر تیمارها براساس طرح CCD

Table 1- Treatment values based on CCD design

عمق شخم Ploughing depth (cm)	سرعت تراکتور Tractor speed (km h ⁻¹)	مقدار ناهمواری سطح خاک Soil surface roughness	مدفون شدن بقایای گیاهی Buried plant residues (%)
17.5	5	11.0±0.98	70.0±3.3
17.5	7.5	8.1±0.69	72.0±3.8
17.5	10	7.0±0.42	80.0±4.2
22.5	5	10.8±0.97	70.0±3.6
22.5	7.5	8.2	72.8
22.5	7.5	8.0	69.2
22.5	7.5	8.5	72.0
22.5	7.5	9.0	69.5
22.5	7.5	8.7	72.7
22.5	10	8.0±0.73	79.0±3.9
27.5	5	13.0±0.95	85.0±4.3
27.5	7.5	11.5±1.01	82.5±3.7
27.5	10	11.2±1.05	85.0±4.6

جدول ۲- معیارهای آماری برای انتخاب مدل برازش در روش سطح پاسخ برای ناهمواری‌های سطح خاک

Table 2- Statistical criteria for model selection in response surface methodology for soil surface roughness

منبع Source	مقدار P متوالی Sequential p-value	مقدار P عدم برازش Lack of Fit p-value	ضریب تعیین تعدیل‌شده Adjusted R ²	ضریب تعیین پیش‌بینی‌شده Predicted R ²
خطی Linear	0.002	0.016	0.644	0.391
تعاملی 2FI	0.334	0.015	0.646	-0.219
درجه دوم Quadratic	<0.0001	0.948	0.970	0.965
درجه سوم Cubic	0.882	0.739	0.961	0.918

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر سرعت و عمق شخم بر ناهمواری‌های سطح خاک

Table 3- ANOVA of the effect of tillage speed and depth on soil surface roughness

منبع تغییر Source	جمع مربعات SS	درجه آزادی df	میانگین مربعات MS	مقدار F F-value	p-value
مدل رگرسیون Model	38.67	5	7.73	79.47	< 0.0001
عمق شخم (D) Depth	15.36	1	15.38	157.82	< 0.0001
سرعت شخم (S) Speed	12.33	1	12.33	126.66	< 0.0001
S×D	1.21	1	1.21	12.43	0.0096
D ²	4.23	1	4.23	43.49	0.0003
S ²	1.94	1	1.94	19.93	0.0029
مانده Residual	0.68	7	0.09		
عدم برازش Lack of fit	0.05	3	0.02	0.11	0.948
خطای خالص Pure error	0.63	4	0.15		
کل تصحیح‌شده Cor Total	39.35	12			

R² = 0.983

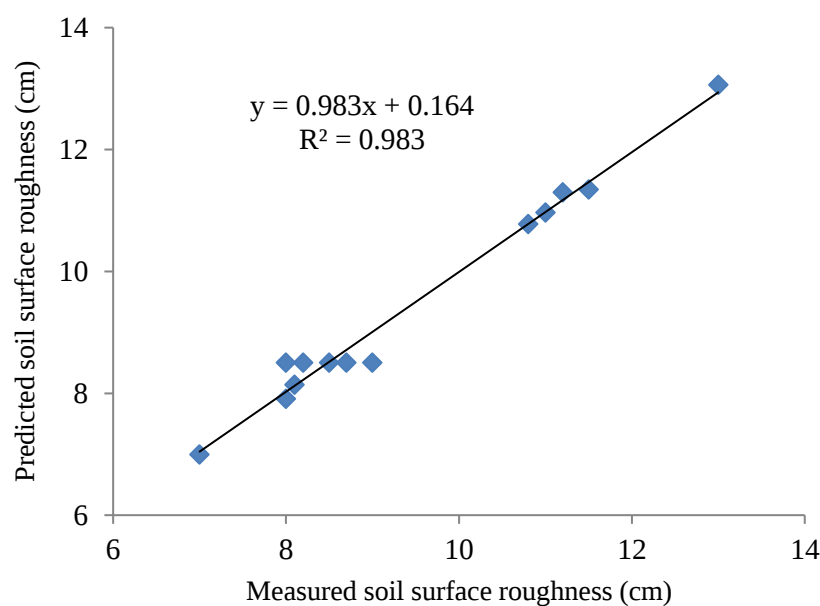
شکل ۳، نمایشگر تطابق بین داده‌های مشاهده‌شده و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل منحنی سطح پاسخ است. ضریب تعیین بالای مدل ($R^2=0.983$) نشان‌دهنده توانایی بالای آن در پیش‌بینی ناهمواری سطح خاک می‌باشد. نزدیکی نقاط داده‌شده به خط نیمساز، گویای دقت بالای مدل است.

بر اساس نتایج جدول ۴، مدل چند جمله‌ای درجه دوم، پس از حذف عوامل غیرمرتبط، نشان می‌دهد که عمق شخم، به‌عنوان یک عامل مستقل خطی، در مقایسه با سرعت پیشروی تراکتور، تأثیر بیشتری بر ناهمواری سطح خاک دارد. عمق شخم و سرعت پیشروی بر ناهمواری‌های سطح خاک، به‌ترتیب اثر مستقیم و معکوس دارند.

جدول ۴- ضرایب مدل رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو برای پیش‌بینی مقدار ناهمواری سطح خاک

Table 4- Coefficients of the second-degree polynomial regression model for predicting soil surface roughness

b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
8.5 ± 0.13	1.6 ± 0.13	$-1.43 \pm 0.0.12$	0.55 ± 0.16	1.24 ± 0.19	0.84 ± 0.18



شکل ۳- مطابقت بین مقادیر تخمینی و تجربی برای مقدار ناهمواری سطح خاک

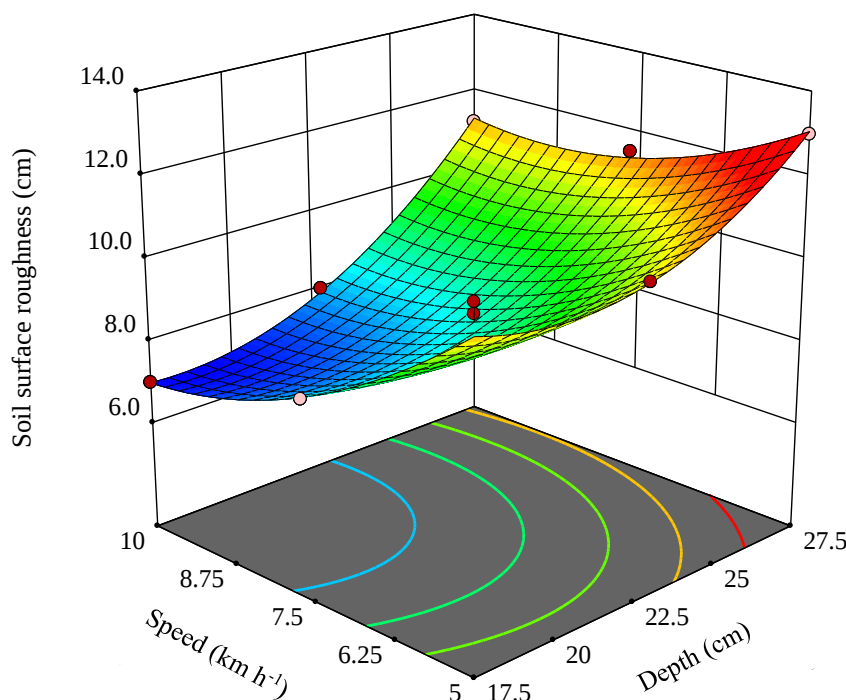
Fig.3. Agreement between estimated and experimental values for soil surface roughness

عمق شخم، به تشدید ناهمواری‌ها می‌انجامد (Mohammadi, Maleki, & Khodaei, 2022). با این حال، در شرایط استفاده از گاواهن برگردان‌دار، افزایش سرعت پیشروی (از ۵ تا ۱۰ کیلومتر بر ساعت) می‌تواند میزان ناهمواری سطح خاک را کاهش دهد، به‌ویژه در سطوح پایین عمق شخم (۱۷/۵ سانتی‌متر). در سرعت‌های بالای پیشروی تراکتور، افزایش عمق شخم، تشدید ناهمواری سطح خاک را در پی دارد. این امر ناشی از کاهش زمان لازم برای ته‌نشینی و تسطیح خاک در سرعت‌های بالاست. همچنین، افزایش نیروی اصطکاک بین تیغه و خاک با افزایش عمق شخم، به تشدید ناهمواری‌ها می‌انجامد. با این وجود، در شرایط استفاده از گاواهن برگردان‌دار، افزایش سرعت پیشروی می‌تواند به کاهش ناهمواری سطح خاک منجر شود. این تأثیر به‌ویژه در سطوح پایین عمق شخم

شکل ۴ چگونگی تأثیر عمق شخم و سرعت حرکت تراکتور را بر ناهمواری سطح خاک در زمان استفاده از گاواهن برگردان‌دار نشان می‌دهد. با افزایش عمق شخم از ۱۷/۵ به ۲۷/۵ سانتی‌متر، میزان ناهمواری سطح خاک بیشتر شده و این موضوع به‌ویژه در سرعت بالا (۱۰ کیلومتر بر ساعت)، بارزتر است. دلیل این پدیده، افزایش حجم خاکی است که جابه‌جا می‌شود و این امر، احتمال ایجاد پشته‌ها و فرورفتگی‌های بیشتر را در سطح خاک بالا می‌برد. در سرعت‌های بالای پیشروی تراکتور، افزایش عمق شخم تأثیر به‌سزایی در تشدید ناهمواری سطح خاک دارد. این امر ناشی از کاهش زمان لازم برای ته‌نشینی و تسطیح خاک در سرعت‌های بالاست که منجر به برجسته‌تر شدن ناهمواری‌های ایجادشده توسط شخم می‌شود. علاوه بر این، افزایش نیروی اصطکاک بین تیغه شخم و خاک با افزایش

سانتی‌متر و سرعت پیشروی ۵ کیلومتر بر ساعت رخ داده است، در حالی که کمترین ناهمواری (۷ سانتی‌متر) در عمق شخم ۱۷/۵ سانتی‌متر و سرعت پیشروی ۱۰ کیلومتر بر ساعت مشاهده شده است. با توجه به معنی‌دار بودن اثر درجه دوم عمق شخم و سرعت پیشروی، انحناى سطح پاسخ قابل مشاهده است.

مشهودتر است و احتمالاً به دلیل برخورد سریع‌تر تیغه با خاک و برش یکنواخت‌تر آن در سرعت‌های بالا می‌باشد (Celik & Altikat, 2022; Mohammadi et al., 2022). با افزایش عمق شخم، تأثیر سرعت پیشروی بر کاهش ناهمواری خاک کاهش می‌یابد. این پدیده با افزایش حجم خاک جابه‌جاشده در اعماق بیشتر مرتبط است. بیشترین ناهمواری سطح خاک (۱۳ سانتی‌متر) در عمق شخم ۲۷/۵



شکل ۴- نمودار سه‌بعدی اثر سرعت و عمق شخم بر ناهمواری‌های سطح خاک

Fig.4. Three-dimensional plot of the effect of tillage speed and depth on soil surface roughness

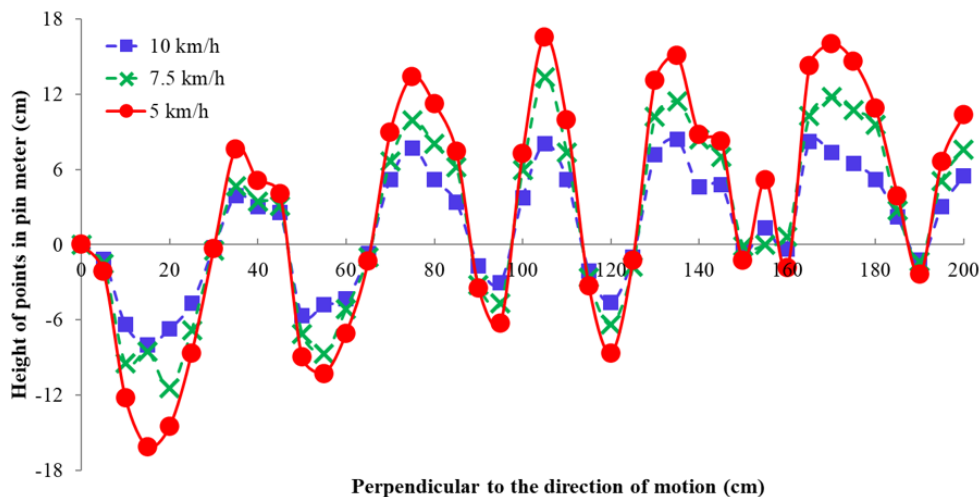
مطالعات متعددی به بررسی تأثیر سرعت و عمق شخم بر ناهمواری سطح خاک پرداخته‌اند. کاهش سرعت شخم‌زنی با افزایش ناهمواری سطح خاک همراه بوده است (Herodowicz-Mleczak, 2022). افزایش سرعت شخم می‌تواند منجر به کاهش زبری سطح خاک شود و بر جریان سطحی-زیرسطحی و فرسایش خاک تأثیر بگذارد (Ma et al., 2022). همچنین گزارش شده است که اثر کاهش سرعت بر افزایش ناهمواری می‌تواند توسط بقایای گیاهی تعدیل شود (Panachuki, Bertol, Alves, Oliveira, & Rodrigues, 2015). در مورد عمق شخم، افزایش آن عموماً با افزایش ناهمواری سطح خاک مرتبط دانسته شده است (Feng et al., 2024)، علاوه بر آن بیان شده است که این افزایش ناهمواری می‌تواند جریان زیرسطحی را بهبود بخشد (Ma et al., 2022). با این

مطالعات نشان داده است که تنظیم عمق شخم و سرعت پیشروی تراکتور تأثیر به‌سزایی در میزان ناهمواری سطح خاک دارد. بهینه‌سازی این دو پارامتر می‌تواند به افزایش جذب آب باران و بهبود مدیریت منابع آب منجر شود. همچنین، تحقیقات حاکی از آن است که افزایش سرعت خاک‌ورزی با کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک همراه است که احتمالاً به دلیل کاهش زمان کافی برای اعمال فشار تراکتور و ادوات بر خاک است (Mahmoudi et al., 2015). یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج تحقیقات پیشین همخوانی دارد، زیرا در سطوح خاکی با ناهمواری کمتر، چگالی ظاهری خاک پایین‌تر است. همچنین، نتایج این بخش از پژوهش با یافته‌های سایر محققان مطابقت دارد، چرا که تأثیر معنادار سرعت پیشروی و نوع خاک‌ورز بر چگالی و ناهمواری خاک گزارش شده است (Muhsin, 2017).

این داده‌ها که توسط دستگاه پین‌متر ثبت شده‌اند، نشان می‌دهند که با افزایش سرعت پیشروی، عمق جوی و ارتفاع پشته‌ها کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند به دلیل کاهش زمان نفوذ تیغه در خاک در سرعت‌های بالاتر و یا به دلیل ضربه شدیدتر کلوخه‌ها باشد. در نتیجه، برای ایجاد ناهمواری بیشتر در خاک، سرعت‌های پایین‌تر تراکتور توصیه می‌شود.

حال، گزارش شده است که افزایش عمق شخم لزوماً منجر به افزایش زبری سطح خاک نمی‌شود، که نشان‌دهنده پیچیدگی این رابطه و احتمالاً تأثیر عوامل دیگر مانند نوع خاک و نوع ادوات خاک‌ورزی است (Zhou, Ren, Chen, & Zhang, 2023).

شکل ۵ نمایانگر تغییرات پروفیل خاک ناشی از شخم گاوآهن برگردان‌دار در سرعت‌های گوناگون است (در عمق ۱۷/۵ سانتی‌متر).



شکل ۵- منحنی‌های پروفیل خاک پس از شخم در سرعت‌های مختلف (عمق ۱۷/۵ سانتی‌متر)

Fig.5. Soil profile curves after tillage at various speeds (17.5 cm depth)

رگرسیونی درجه دوم با برازش مناسب ($P > 0.05$) و معناداری آماری ($P < 0.01$) جهت پیش‌بینی اثر متغیرهای مستقل بر شاخص مدفون شدن بقایای گیاهی به کار گرفته شد (جدول ۶). این مدل قادر به شبیه‌سازی شاخص مذکور با پنج درجه آزادی بود و اثرات خطی، درجه دوم و متقابل عمق شخم و سرعت پیشروی معنی‌دار بودند ($P < 0.01$). مدل رگرسیونی درجه دوم با ضریب تعیین 0.96 برای پیش‌بینی میزان دفن بقایای گیاهی، کارایی بالایی از خود نشان داد و به‌عنوان روشی دقیق برای برآورد این شاخص معرفی می‌شود (جدول ۶).

ارزیابی و مدل‌سازی میزان مدفون شدن بقایای گیاهی

به‌منظور توسعه کشاورزی پایدار و کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی، مدل‌سازی کمی عملیات خاک‌ورزی حائز اهمیت است. در این پژوهش، مدلی ریاضی درجه دوم برای پیش‌بینی میزان مدفون شدن بقایای گیاهی با استفاده از روش سطح پاسخ توسعه داده شد (جدول ۵). نتایج تحلیل واریانس نشان داد که مدل پیشنهادی، توانایی بالایی در توصیف این فرآیند پیچیده دارد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی برای بهینه‌سازی استفاده از بقایای گیاهی و بهبود کیفیت خاک مورد استفاده قرار گیرد. مدل

جدول ۵- معیارهای آماری برای انتخاب مدل برازش در روش سطح پاسخ برای مدفون شدن بقایای گیاهی

Table 5- Statistical criteria for model selection in response surface methodology for burial of plant residues

منبع	مقدار P متوالی	مقدار P عدم برازش	ضریب تعیین تعدیل‌شده	ضریب تعیین پیش‌بینی‌شده
Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R ²	Predicted R ²
خطی	0.034	0.017	0.390	-0.051
Linear				
تعاملی	0.313	0.016	0.399	-1.050
2FI				
درجه دوم	0.0002	0.646	0.930	0.830
Quadratic				
درجه سوم	0.407	0.821	0.931	0.911
Cubic				

جدول ۶- تجزیه واریانس اثر سرعت و عمق شخم بر مقدار مدفون شدن بقایای گیاهی

Table 6- ANOVA of the effect of tillage speed and depth on the amount of burial of plant residues

منبع تغییر	جمع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F مقدار	p-value
Source	SS	df	MS	F-value	
مدل رگرسیون	419.64	5	83.93	32.77	0.0001
Model					
عمق شخم (D)	155.04	1	155.04	60.54	0.0001
Depth					
سرعت شخم (S)	60.17	1	60.17	23.49	0.0019
Speed					
S×D	25.01	1	25.01	9.76	0.0167
D ²	91.75	1	91.75	35.83	0.0006
S ²	25.09	1	25.09	9.79	0.0166
مانده	17.93	7	2.56		
Residual					
عدم برازش	5.61	3	1.87	0.61	0.646
Lack of fit					
خطای خالص	12.33	4	3.08		
Pure error					
کل تصحیح‌شده	437.57	12			
Cor Total					

R² = 0.959

می‌دهد. شخم عمیق، ساختار خاک را بیشتر مختل کرده و با شکستن کلوخه‌ها، فضاهای خالی بیشتری ایجاد می‌کند که امکان نفوذ بقایای گیاهی را فراهم می‌سازد. افزایش عمق شخم، سطح تماس خاک و بقایا را افزایش داده و تجزیه و ادغام آن‌ها را تسریع می‌کند. تماس طولانی‌تر بین خاک و بقایا در سرعت‌های پایین، به ادغام آن‌ها کمک می‌کند. نتایج این تحقیق با نتایج محققان دیگر (Celik & Altikat, 2022; Pereira et al., 2017) مطابقت دارد. شکل ۷ نشان می‌دهد که افزایش سرعت تراکتور (از ۵ به ۱۰ کیلومتر بر ساعت) با گاواهن برگردان‌دار، به‌ویژه در عمق‌های شخم کم‌تر (۱۷/۵ سانتی‌متر)، به‌طور چشمگیری درصد مدفون شدن بقایا را از ۷۰ به ۸۰ درصد افزایش می‌دهد. این افزایش، که به‌صورت غیرخطی است، احتمالاً ناشی از پرتاب ذرات خاک و بقایا به اطراف و افزایش سطح تماس آن‌ها است. ضرایب مدل و نمودار سطح پاسخ (شکل ۷ و جدول ۷) تأثیر مثبت و معنی‌دار سرعت و عمق شخم بر مدفون شدن بقایا را تأیید می‌کنند. در راستای تایید نتایج این تحقیق، نتایج مشابهی نیز گزارش شده است (Isaak, Azawi, & Turkey, 2024).

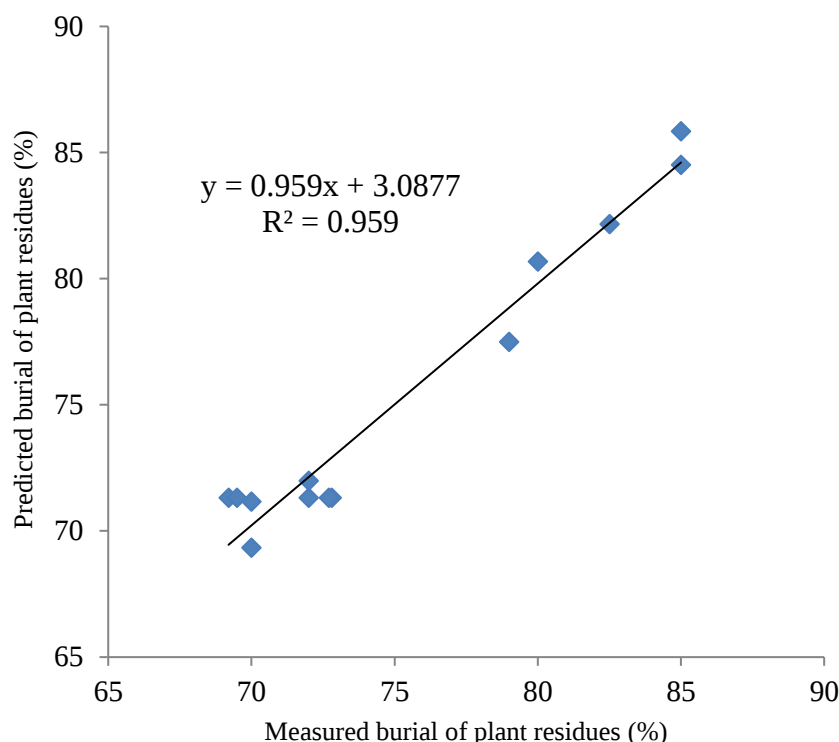
مدل رگرسیونی درجه دوم ارائه‌شده در جدول ۷، تأثیر عوامل مختلف را بر میزان مدفون شدن بقایای گیاهی بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که عمق شخم، در مقایسه با سرعت پیشروی، تأثیر بیشتری بر این فرآیند دارد. به‌طور کلی، هر دو عامل به‌طور مستقیم بر میزان مدفون شدن بقایای گیاهی مؤثرند. شکل ۶ تطابق بالایی بین داده‌های واقعی و مدل‌سازی‌شده مدفون شدن بقایای گیاهی را نشان می‌دهد. ضریب تعیین ($R^2=0.96$) نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی این پارامتر است. این دقت، مدل را به ابزاری مفید برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی‌های کشاورزی تبدیل می‌کند.

شکل ۷ نشان می‌دهد که کارایی گاواهن برگردان‌دار در مدفون شدن بقایای گیاهی، تابعی از تعامل سرعت پیشروی تراکتور و عمق شخم است. افزایش عمق شخم (از ۱۷/۵ تا ۲۷/۵ سانتی‌متر)، به‌طور غیرخطی، درصد مدفون شدن بقایا را افزایش می‌دهد. این تأثیر در سرعت‌های پایین‌تر (۵ کیلومتر بر ساعت)، به دلیل افزایش حجم خاک جابه‌جاشده و ظرفیت بیشتر پوشش بقایا، مشهودتر است. کاهش سرعت، زمان لازم برای اختلاط و جابه‌جایی بقایا در خاک را افزایش

جدول ۷- ضرایب مدل رگرسیون چند جمله‌ای درجه دوم برای پیش‌بینی مقدار مدفون شدن بقایای گیاهی

Table 7- Coefficients of the second-degree polynomial regression model for predicting burial of plant residues

b ₀	b ₁	b ₂	b ₁₂	b ₁₁	b ₂₂
71.31±0.66	5.08±0.65	3.17±0.64	-2.5±0.80	5.76±0.96	3.01±0.95



شکل ۶- مطابقت بین مقادیر تخمینی و تجربی برای مقدار مدفون شدن بقایای گیاهی

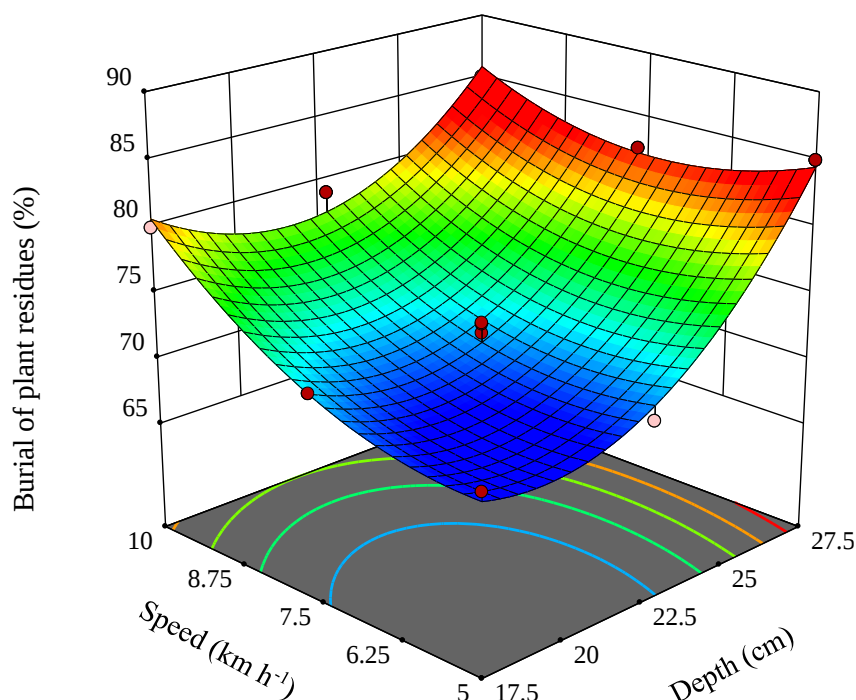
Fig.6. Agreement between estimated and experimental values for the amount of burial of plant residues

خاک‌ورزی نیز در میزان برگرداندن بقایا مؤثر است (Zarifneshat, Saeidi Rad, & Safari, 2020). در شکل ۸، وضعیت بقایای گیاهی مزرعه قبل و بعد از خاک‌ورزی با استفاده از گاوآهن برگردان‌دار نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ۷۰ درصد از بقایا در خاک دفن شده است. این میزان با استفاده از تصاویر پردازش‌شده و شاخص مدفون شدن بقایا محاسبه شده است (رابطه ۲).

سرعت شخم از عوامل مؤثر بر میزان مدفون شدن بقایای گیاهی است. کاهش سرعت شخم‌زنی به‌طور معمول منجر به کاهش دفن بقایا می‌گردد (Azimi-Nejadian, Karparvarfard, & Naderi-Boldaji, 2022) و این امر به دلیل اختلاط کمتر بقایا با خاک، سبب افزایش پوشش سطحی بقایا می‌شود (Celik & Altikat, 2022). علاوه بر این، کاهش سرعت شخم می‌تواند به کاهش کلی در میزان مدفون شدن بقایای گیاهی منجر شود (Lekavicienė, Sarauskis, Naujokienė, & Kriauciunienė, 2019). در ارتباط با اثر عمق شخم، کاهش عمق شخم‌زنی همواره منجر به کاهش مدفون‌سازی بقایا نمی‌شود (Guo et al., 2022). با این حال، کاهش عمق شخم در کنار حفظ بقایای گیاهی می‌تواند سبب افزایش تثبیت کربن آلی خاک در اراضی زراعی گردد (Clay et al., 2015)، اگرچه ممکن است پایداری کربن آلی خاک در مقایسه با شخم عمیق‌تر کاهش یابد (Alcantara, Don, Vesterdal, Well, & Nieder, 2017).

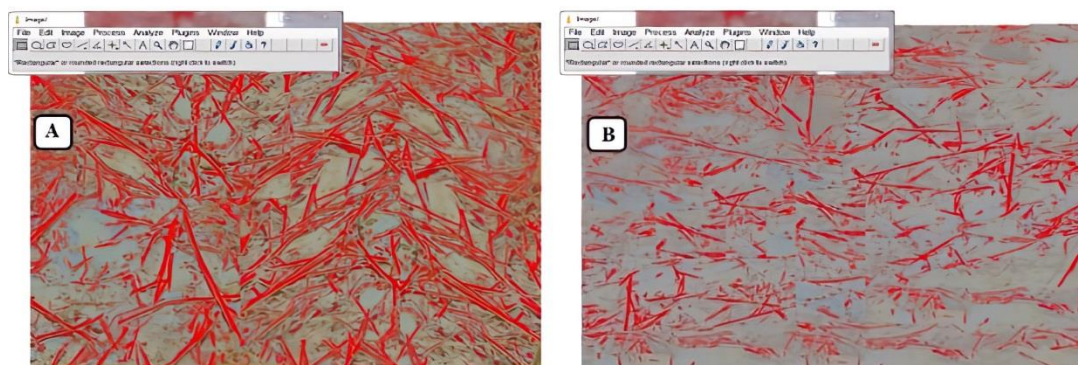
بیشترین میزان مدفون شدن بقایای گیاهی (۸۵٪) با استفاده از گاوآهن برگردان‌دار در عمق شخم ۲۷/۵ سانتی‌متر و سرعت‌های ۵ و ۱۰ کیلومتر بر ساعت حاصل شد. کمترین میزان مدفون شدن (۷۰٪) در عمق شخم ۱۷/۵ سانتی‌متر و سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت مشاهده گردید. عمق شخم در مقایسه با سرعت، عامل مؤثرتری در مدفون شدن بقایا بود (شکل ۷ و جدول ۷). برای مدل‌سازی دقیق، استفاده از مدل‌های غیرخطی ضروری است. تنظیم عمق و سرعت شخم می‌تواند به کاهش مدفون شدن بقایا و بهبود نفوذپذیری خاک کمک کند.

کشاورزی پایدار بر حفظ بقایای گیاهی بر سطح خاک برای بهبود ویژگی‌های خاک استوار است، نه دفن کامل آن‌ها. روش‌های مدیریتی بقایا باید با در نظر گرفتن شرایط خاص هر منطقه و محصول انتخاب شوند. گاوآهن برگردان‌دار با اختلاط زیاد خاک و بقایا، بیشتر بقایا را مدفون و مقدار کمی را در سطح مزرعه باقی می‌گذارد که با یافته‌های تحقیقاتی مطابقت دارد (Ahmadi Moghaddam, Eftekhari, Mardani, & Khodaverdilo, 2016). مطالعه‌ای پیرامون تأثیر شیوه‌های خاک‌ورزی مرسوم و حفاظتی بر ویژگی‌های خاک نشان داد که نوع خاک‌ورزی بر میزان برگرداندن بقایای گیاهی مؤثر است. بیشترین میزان برگرداندن بقایا (۸۹/۲۲ درصد) با گاوآهن برگردان‌دار و کمترین آن با روش‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی حاصل شد. نوع تیغه و ساختمان ادوات



شکل ۷- نمودار سه‌بعدی اثر سرعت و عمق شخم بر مقدار مدفون شدن بقایای گیاهی

Fig.7. Three-dimensional plot illustrating the effect of tillage speed and depth on burial of plant residues



شکل ۸- تصویر بقایای گیاهی: (A) قبل و (B) پس از عبور دستگاه خاکورز

Fig.8. Image of plant residues: (a) before and (b) after tillage operation

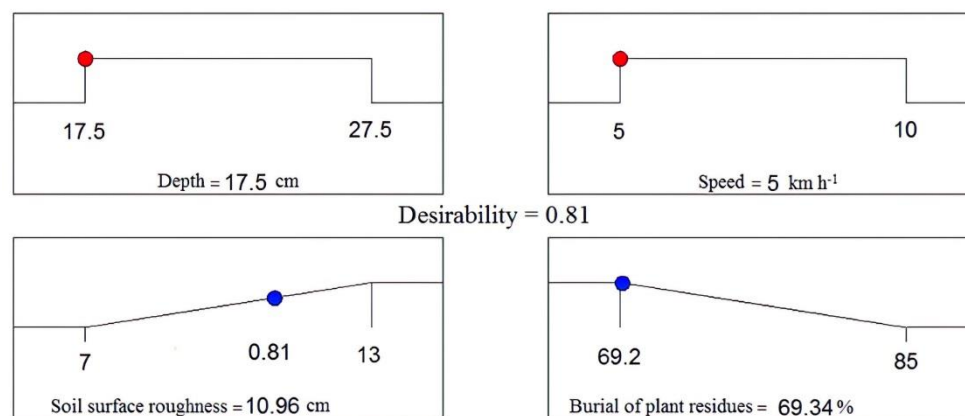
مطلوبیت (DI^1) که نشانگر دقت مدل در تعیین ترکیب تیمارها برای دستیابی به متغیرهای وابسته بهینه است، با مقادیر نزدیک به یک، دقت بالای مدل را در شبیه‌سازی متغیرهای وابسته تحت تاثیر متغیرهای مستقل نشان می‌دهد (Luis-Perez, 2021). برای عملیات

بهینه‌سازی عملیات خاک‌ورزی به روش سطح پاسخ

مطالعه حاضر به بررسی تاثیر سرعت و عمق شخم بر شرایط بهینه خاک‌ورزی با گاواهن برگردان‌دار با استفاده از روش سطح پاسخ پرداخت. نتایج بهینه‌سازی در شکل ۹ ارائه شده است. شاخص

سرعت پیشروی ۵ کیلومتر بر ساعت محقق می‌گردد. در این شرایط، ناهمواری سطح خاک ۱۳/۱ سانتی‌متر و مدفون شدن بقایای گیاهی ۸۴/۵ درصد پیش‌بینی می‌شود. در مقابل، هدف حداقل‌سازی مدفون شدن بقایای گیاهی نیز با مطلوبیت کامل (۱۰۰ درصد) در عمق شخم ۱۹/۹۲ سانتی‌متر و سرعت ۶/۲ کیلومتر بر ساعت حاصل شده و مقادیر ناهمواری و مدفون شدن بقایا به ترتیب ۹/۱ سانتی‌متر و ۶۸/۷ درصد تخمین زده می‌شود. این یافته‌ها نمایانگر وجود یک رابطه معکوس بین ناهمواری سطح خاک و مدفون شدن بقایای گیاهی در پاسخ به تغییرات عمق شخم و سرعت پیشروی کمباین است.

خاک‌ورزی با گاواهن برگردان‌دار، با هدف به حداکثر رساندن ناهمواری سطح خاک به همراه حداقل درصد مدفون شدن بقایای گیاهی، مدل ارائه شده با مطلوبیت ۸۱ درصد (۰/۸۱) به این مهم خواهد رسید. در این حالت ناهمواری سطح خاک ۱۰/۹۶ سانتی‌متر و درصد مدفون شدن بقایای گیاهی برابر با ۶۹/۳۴ درصد خواهد بود. این حالت بهینه در سرعت پیشروی ۵ کیلومتر بر ساعت و عمق شخم ۱۷/۵ سانتی‌متر به دست می‌آید (شکل ۹). تحلیل سناریوهای بهینه‌سازی تک‌هدفه نشان می‌دهد که هدف ماکزیمم‌سازی ناهمواری سطح خاک با مطلوبیت ۱۰۰ درصد در عمق شخم ۲۷/۵ سانتی‌متر و

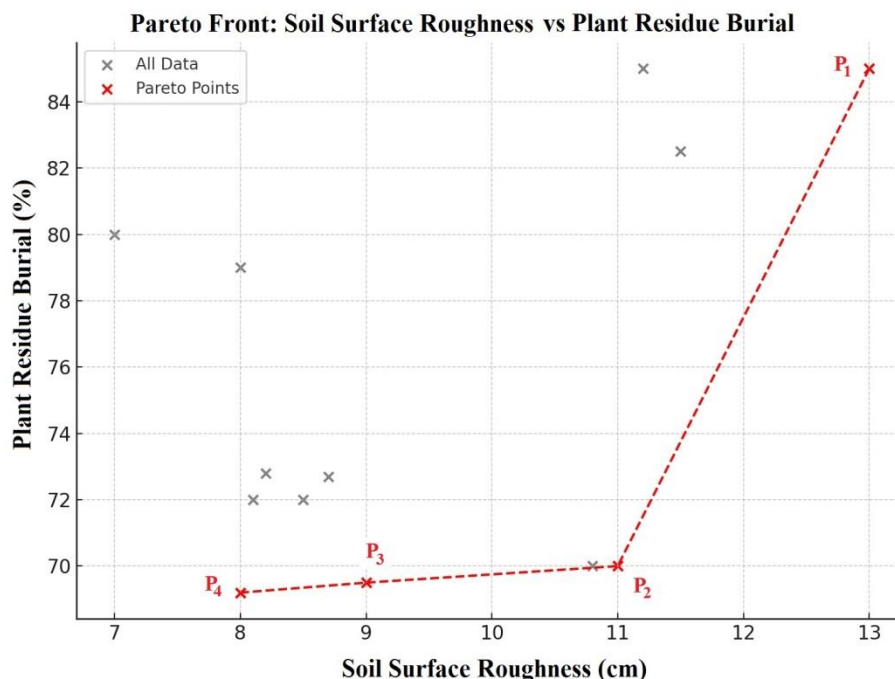


شکل ۹- مقادیر بهینه برای حداکثر نمودن ناهمواری سطح خاک و حداقل نمودن مدفون شدن بقایای گیاهی
Fig.9. Optimal values for maximizing soil surface roughness and minimizing plant residue burial

پایین‌تری از ناهمواری را نشان می‌دهند و برای دستیابی به این سطوح می‌توان به مقادیر کمتری از دفن بقایا نیز دست یافت (مانند نقطه قرمز در حدود ناهمواری ۸ سانتی‌متر و دفن ۶۹ درصد). در مقابل، نقاط واقع در سمت راست مرز پارتو (ناهمواری زیاد) برای دستیابی به سطوح بالاتر ناهمواری (حدود ۱۳ سانتی‌متر)، مدفون شدن بقایای بیشتری (حدود ۸۵٪) را نشان می‌دهند. نقاط میانی مرز پارتو، مصالحه‌هایی بین این دو حد نهایی ارائه می‌دهند (مانند ناهمواری حدود ۱۱ سانتی‌متر و دفن ۷۰٪). نقاط خاکستری واقع در بالا و سمت چپ مرز پارتو، راه‌حل‌های غیربهینه هستند زیرا توسط نقاط پارتو با ناهمواری مشابه اما دفن کمتر مسلط شده‌اند. به طور مشابه، نقاط پایین و سمت راست مرز پارتو نیز غیربهینه هستند. نقاط (حداکثر ناهمواری با بیشترین دفن)، P2 (کاهش دفن با حفظ نسبی ناهمواری)، P3 (ناهمواری متوسط رو به بالا با دفن پایین‌تر) و P4 (کمترین دفن با ناهمواری قابل قبول) نمونه‌هایی از نقاط روی مرز پارتو هستند که بسته به اولویت‌ها و شرایط خاص، راه‌حل‌های بهینه متفاوتی را ارائه می‌دهند.

شکل ۱۰، نمودار پارتو^۱ حاصل از تحلیل بهینه‌سازی چندهدفه را به تصویر می‌کشد که در آن اهداف متضاد حداقل‌سازی مدفون شدن بقایای گیاهی (محور عمودی) و حداکثرسازی ناهمواری سطح خاک (محور افقی) هستند. نقاط قرمز روی این نمودار، مرز پارتو را تشکیل می‌دهند و نشان‌دهنده مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیرمسلط هستند. هر نقطه قرمز، ترکیبی از ناهمواری سطح خاک و دفن بقایای گیاهی را ارائه می‌دهد که در آن هیچ ترکیب دیگری به طور هم‌زمان ناهمواری بالاتر و دفن کمتر را فراهم نمی‌کند. نقاط خاکستری نیز تمامی داده‌های حاصل از ارزیابی‌های مختلف را نشان می‌دهند و فضای راه‌حل‌های ممکن را در رابطه با این دو هدف ترسیم می‌کنند. تحلیل مرز پارتو نشان می‌دهد که یک تعادل بین این دو هدف وجود دارد؛ دستیابی به ناهمواری سطح خاک بیشتر احتمالاً مستلزم پذیرش مدفون شدن بقایای بیشتر است و بالعکس.

با در نظر گرفتن هدف حداقل‌سازی دفن بقایا و حداکثرسازی ناهمواری سطح خاک، می‌توان نکات کلیدی را از مرز پارتو استنباط کرد. نقاط واقع در سمت چپ مرز پارتو (ناهمواری کم) سطوح



شکل ۱۰- نمودار پارتو برای بهینه‌سازی چندهدفه در مدیریت دفن بقایای گیاهی و ناهمواری سطح خاک

Fig.10. Pareto front for multi-objective optimization in the management of burial of plant residues and soil surface roughness (P₁ to P₄: Pareto points)

نتیجه‌گیری

بهینه، ناهمواری سطح خاک به ۱۰/۹۶ سانتی‌متر و درصد مدفون شدن بقایای گیاهی به ۶۹/۲۴ درصد می‌رسد. این وضعیت در سرعت پیشروی ۵ کیلومتر بر ساعت و عمق شخم ۱۷/۵ سانتی‌متر حاصل می‌شود. پژوهش نشان داد که روش سطح پاسخ ابزاری کارآمد برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد خاک‌ورزی با گاواهن برگردان‌دار تحت تأثیر سرعت و عمق شخم است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از حمایت‌های مالی دانشگاه لرستان ابراز می‌دارند.

مشارکت نویسندگان

محمد اکبری: جمع‌آوری داده‌ها، استخراج و تهیه متن اولیه، روش‌شناسی، مفهوم‌سازی
عیسی حزبای: پردازش داده‌ها، ویرایش متن، نظارت و مدیریت، تصویرسازی نتایج، تحلیل آماری
مصطفی جعفریان: ویرایش متن، خدمات نرم‌افزاری، پردازش داده‌ها، مشاوره فنی

اثر روش‌های خاک‌ورزی مرسوم اراضی دیم بر شاخص ناهمواری سطح خاک و میزان مدفون شدن بقایای گیاهی با استفاده از روش سطح پاسخ بررسی شد. هدف از این مطالعه، انتخاب تیماری با بیشترین شاخص ناهمواری و کمترین میزان مدفون شدن بقایا به‌منظور کاهش فرسایش بادی و آبی و حفظ خاک حاصلخیز و جذب حداکثری نزولات جوی بود. مطالعه حاضر به بررسی اثر سرعت حرکت تراکتور و عمق شخم بر میزان ناهمواری سطح خاک و مدفون شدن بقایای گیاهی پرداخت. نتایج نشان داد که مدل‌های رگرسیونی برای هر دو پاسخ (مدفون شدن بقایای گیاهی و ناهمواری سطح خاک) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار هستند. افزایش عمق شخم، هم مدفون شدن بقایا و هم ناهمواری خاک را افزایش داد. در مقابل، افزایش سرعت تراکتور با گاواهن برگردان‌دار، موجب افزایش مدفون شدن بقایا و کاهش ناهمواری خاک شد. با استفاده از گاواهن برگردان‌دار، شاخص ناهمواری سطح خاک بین ۷ تا ۱۳ سانتی‌متر و درصد مدفون شدن بقایای گیاهی بین ۶۹/۳ تا ۸۷ درصد اندازه‌گیری شد. مدل ارائه شده با مطلوبیت ۸۱ درصد، قادر به بهینه‌سازی این دو پارامتر (حداکثر ناهمواری و حداقل مدفون شدن بقایا) است. در شرایط

References

1. Ahmadi Moghaddam, P., Eftekhari, L., Mardani, A., & Khodaverdilo, H. (2016). Determination of crop residues and the physical and mechanical properties of soil in different tillage systems. *Journal of Agricultural Machinery*, 6(1), 102-113. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v6i1.32700>
2. Akbari, F., Dahmardeh, M., Morshedi, A., Ghanbari, A., & Khorramdel, S. (2019). Effect of tillage systems and crop residues on soil bulk density and chemical properties under corn (*Zea mays* L.)-bean (*Phaseolus vulgaris* L.) intercropping. *Agroecology*, 11(3), 1123-1138. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v11i3.72178>
3. Alcantara, V., Don, A., Vesterdal, L., Well, R., & Nieder, R. (2017). Stability of buried carbon in deep-ploughed forest and cropland soils-implications for carbon stocks. *Scientific Reports*, 7(1), 5511. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05501-y>
4. Azimi-Nejadian, H., Karparvarfard, S. H., & Naderi-Boldaji, M. (2022). Weed seed burial as affected by mouldboard design parameters, ploughing depth and speed: DEM simulations and experimental validation. *Biosystems Engineering*, 216, 79-92. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.02.005>
5. Bahrpour, V., Rouhani, A., Abbaspour-Fard, M. H., Zarifneshat, S., & Aghkhani, M. H. (2018). Spatial Variability Analysis and Zoning of Soil Compaction Using Different Geostatistical Methods. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 49(3), 329-340. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2018.227916.664911>
6. Celik, A., & Altikat, S. (2022). The effect of power harrow on the wheat residue cover and residue incorporation into the tilled soil layer. *Soil and Tillage Research*, 215, 105202. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105202>
7. Chimi-Chiadjeu, O., Le Hegarat-Masclé, S., Vannier, E., Taconet, O., & Dusseaux, R. (2014). Automatic clod detection and boundary estimation from digital elevation model images using different approaches. *Catena*, 118, 73-83. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.02.003>
8. Clay, D. E., Reicks, G., Carlson, C. G., Moriles-Miller, J., Stone, J. J., & Clay, S. A. (2015). Tillage and corn residue harvesting impact surface and subsurface carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality*, 44(3), 803-809. <https://doi.org/10.2134/jeq2014.07.0322>
9. Danbaba, N., Nkama, I., Badau, M. H., Ukwungwu, M. N., Maji, A. T., Abo, M. E., & Oko, A. O. (2014). Optimization of rice parboiling process for optimum head rice yield: a response surface methodology (RSM) approach. *Focus*, 18, 154-165. <https://doi.org/10.5923/j.ijaf.20140403.02>
10. Fechete-Tutunaru, L. V., Gaspar, F., & Gyorgy, Z. (2019). Soil-tool interaction of a simple tillage tool in sand. *E3S Web of Conferences*, 85, 08007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198508007>
11. Feng, Z., Zheng, X., Li, X., Liu, H., Tao, Z., Wang, C., ..., & Song, J. (2024). Soil Surface Roughness Characteristics Under Different Agricultural Tillage Practices-A Case Study in the Black Soil Region of Northeast China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/jstars.2024.3405952>
12. Guo, X., Wang, H., Yu, Q., Ahmad, N., Li, J., Wang, R., & Wang, X. (2022). Subsoiling and plowing rotation increase soil C and N storage and crop yield on a semiarid Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*, 221, 105413. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105413>
13. Hazbawi, I., & Safaeinezhad, M. (2023). Optimizing the Effect of Spike Density and Combine Speed for Reducing Wheat Loss Using Response Surface Methodology. *Biomechanism and Bioenergy Research*, 2(2), 19-27. <https://doi.org/10.22103/BBR.2023.22269.1055>
14. Herodowicz-Mleczak, K., Piekarczyk, J., Kazmierowski, C., Nowosad, J., & Mleczak, M. (2022). Estimating soil surface roughness with models based on the information about tillage practises and soil parameters. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14(3), e2021MS002578. <https://doi.org/10.1029/2021ms002578>
15. Isaak, M., Azawi, A., & Turkey, T. (2024). Influence of various tillage systems and tillage speed on some soil physical properties. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 20(1), 37-47. <https://doi.org/10.1556/446.2024.00070>
16. Kouselou, M., Hashemi, S., Eskandari, I., McKenzie, B., Karimi, E., Rezaei, A., & Rahmati, M. (2018). Quantifying soil displacement and tillage erosion rate by different tillage systems in dryland northwestern Iran. *Soil Use and Management*, 34(1), 48-59. <https://doi.org/10.1111/sum.12395>
17. Langer, S. (2021). Improving irrigation management on hillslope pastures. *Journal of New Zealand Grasslands*, 83, 135-144. <https://doi.org/10.33584/jnzg.2021.83.3495>
18. Lekavicienė, K., Sarauskis, E., Naujokienė, V., & Kriauciunienė, Z. (2019). Effect of row cleaner operational settings on crop residue translocation in strip-tillage. *Agronomy*, 9(5), 247. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050247>
19. Li, H., Shen, H., Wang, Y., Wang, Y., & Gao, Q. (2021). Effects of ridge tillage and straw returning on runoff and soil loss under simulated rainfall in the mollisol region of northeast China. *Sustainability*, 13(19), 10614. <https://doi.org/10.3390/su131910614>

20. Liu, J., Chen, Y., & Kushwaha, R. L. (2010). Effect of tillage speed and straw length on soil and straw movement by a sweep. *Soil and Tillage Research*, 109(1), 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.03.014>
21. Liu, Z., Cao, S., Sun, Z., Wang, H., Qu, S., Lei, N., & Dong, Q. (2021). Tillage effects on soil properties and crop yield after land reclamation. *Scientific Reports*, 11(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84191-z>
22. Luis-Perez, C. J. (2021). On the Application of a Design of Experiments along with an ANFIS and a Desirability Function to Model Response Variables. *Symmetry*, 13(5), 897. <https://doi.org/10.3390/sym13050897>
23. Ma, Y., Li, Z., Deng, C., Yang, J., Tang, C., Duan, J., Zhang, Z., & Liu, Y. (2022). Effects of tillage-induced soil surface roughness on the generation of surface–subsurface flow and soil loss in the red soil sloping farmland of southern China. *Catena*, 213, 106230. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106230>
24. Mahmoudi, A., Jalali, A., Valizadeh, M., & Skandari, I. (2015). The effects of forward speed and depth of conservation tillage on soil bulk density. *Journal of Agricultural Machinery*, 5(2), 368-380. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v5i2.28533>
25. 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>
26. Mohammadi, M., Karparvarfard, S. H., Kamgar, S., & Rahmatian, M. (2020). Optimization and Evaluation of Working Conditions of New Tillage Blade for Use in Tillage Tools. *Journal of Agricultural Machinery*, 10(2), 273-287. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v10i2.73914>
27. Muhsin, S. J. (2017). Performance study of moldboard plow with two types of disc harrows and their effect on some soil properties under different operating conditions. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 30(2), 1-15. <https://doi.org/10.37077/25200860.2017.37>
28. Orzech, K., Wanic, M., & Załuski, D. (2021). The effects of soil compaction and different tillage systems on the bulk density and moisture content of soil and the yields of winter oilseed rape and cereals. *Agriculture*, 11(7), 666. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070666>
29. Panachuki, E., Bertol, I., Alves, T., Oliveira, P. T. S. D., & Rodrigues, D. B. B. (2015). Effect of soil tillage and plant residue on surface roughness of an oxisol under simulated rain. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 39(1), 268-278. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150187>
30. Pereira, R. C., Hedley, M. J., Arbestain, M. C., Bishop, P., Enongene, K. E., & Otene, I. J. J. (2017). Evidence for soil carbon enhancement through deeper mouldboard ploughing at pasture renovation on a Typic Fragiaqualf. *Soil Research*, 56(2), 182-191. <https://doi.org/10.1071/sr17039>
31. Rahmatian, M., Nematollahi, M., Yeganeh, R., & Sharifi Malvajerdi, A. (2021). Modeling and predicting the relationship between cone index and soil shear strength with draft force of a symmetrical tillage. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 22(77), 101-118. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/erams.2020.342455.1346>
32. Ranaivoson, L., Naudin, K., Ripoché, A., Affholder, F., Rabeharisoa, L., & Corbeels, M. (2017). Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0432-z>
33. Sharafi, S., Mohammadi Ghaleni, M., & Dragovich, D. (2023). Simulated Runoff and Erosion on Soils from Wheat Agroecosystems with Different Water Management Systems, Iran. *Land*, 12(9), 1790. <https://doi.org/10.3390/land12091790>
34. Shevchenko, S., Derevenets-Shevchenko, K., Desyatnyk, L., Shevchenko, M., Sologub, I., & Shevchenko, O. (2024). Tillage effects on soil physical properties and maize phenology. *International Journal of Environmental Studies*, 81(1), 393-402. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2320032>
35. Shirazi, M., Khademalrasoul, A., & Safieddin Ardebili, M. (2020). Evaluation of different supervised learning smart methods and response surface method to optimize factors affecting erosion (case study: Emamzadeh Watershed of Baghmalek). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(7), 1653-1666. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.296715.668485>
36. 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>
37. Vidal-Vazquez, E., Miranda, J. G. V., & Paz Gonzalez, A. (2007). Describing soil surface microrelief by crossover length and fractal dimension. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 14(3), 223-235. <https://doi.org/10.5194/npg-14-223-2007>
38. Zarifneshat, S., Saeidi Rad, M. H., & Safari, M. (2020). Effect of Conservation and Conventional Tillage on Some Machine and Soil Parameters in Cold Regions of Khorasan Razavi Province. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50(4), 939-949. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2019.268169.665106>
39. Zeinli, A., Mousavi, R., Jafarian, M., & Bayati, M. R. (2012). Investigation of the Effect of Plow Type, Plowing Speed and Working Depth on Soil Distribution Model on Land. 7th National Congress on Agricultural Machinery

-
- Engineering and Mechanization, Shiraz University, Shiraz, Iran. (in Persian).
40. Zeng, Z., Thoms, D., Chen, Y., & Ma, X. (2021). Comparison of soil and corn residue cutting performance of different discs used for vertical tillage. *Scientific Reports*, 11(1), 2537. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82270-9>
 41. Zhou, S., Ren, J., Chen, Q., & Zhang, Z. (2023). Dynamic change patterns of soil surface roughness and influencing factors under different tillage conditions in typical mollisol areas of Northeast China. *Agronomy*, 13(7), 1817. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071817>