



Single Stage Tillage: An Optimized Approach to Paddy Field Preparation with Reduced Tillage Operations

Mohammad Tousi Kehal¹ | Mahdi Shorafa² | Alireza Raheb³

1. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Collage of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: m.tousikehal@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Collage of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: mshorafa@ut.ac.ir

3. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Collage of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: araheb@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: May. 12, 2026

Revised: June. 21, 2026

Accepted: July. 16, 2026

Published online: Sep. 2026

Keywords:

**Bulk Density,
Conventional Tillage,
Minimum Tillage,
Puddling,
Soil Structure**

ABSTRACT

The conventional three-stage tillage system in paddy fields, with high water and fuel consumption, increased production costs, and soil compaction caused by frequent heavy machinery traffic, threatens rice production through increased greenhouse gas emissions and delayed planting. This study aimed to evaluate the feasibility of substituting the conventional system with a more efficient “single-tillage” system by investigating the effects of both tillage methods on specific soil physical and chemical properties. The experiment was conducted on a clay soil that had been without cultivation and agricultural operations for a long period, using two treatments: conventional tillage and single-tillage. Soil sampling was performed at depths of 0–15 and 15–30 cm with three replications. Indicators such as pH, EC, Eh, OC, BD, MWD, and Ks were measured. The results showed that bulk density in the topsoil significantly decreased in both methods compared to the control, by 23.23% and 19.56% for conventional and single-tillage, respectively. In the topsoil, MWD decreased by 47.06% and 36.64% in the single-tillage and conventional systems, respectively, and a significant difference was observed between the two tillage methods; however, no difference was noted in the sub-surface layer. Rice yield was similar in both methods, with no significant difference. In conclusion, the initial design of the single-tillage system, by maintaining yield and reducing operation time, along with a 30% saving in fuel and water, is evaluated as a suitable option for improving paddy field preparation.

Cite this article: Tousi Kehal, M., Shorafa, M., & Raheb, A. (2026). Single Stage Tillage: An Optimized Approach to Paddy Field Preparation with Reduced Tillage Operation., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (7), 1617-1636. <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.411451.670134>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.411451.670134>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Rice (*Oryza sativa* L.) is a strategic staple crop that plays a critical role in global food security, particularly in Asia. A substantial share of production costs in paddy systems is associated with conventional land preparation, which typically involves primary tillage, puddling, and leveling conducted in sequential stages. Although effective, this system is time consuming and characterized by high fuel consumption, excessive irrigation water use, and increased machinery-related emissions. Therefore, developing an alternative tillage method that is economically and environmentally efficient, while maintaining soil quality and crop productivity comparable to conventional tillage, is of high priority. This study aimed to (1) evaluate the effects of single-stage tillage and conventional puddled tillage on selected soil physical and chemical properties, and (2) assess the feasibility of single-stage tillage as a substitute for conventional paddy land preparation.

Materials and Methods

A field experiment was conducted using three 200 m² plots under practical farming conditions. The experimental design included three treatments: control (untilled soil), single-stage tillage, and conventional tillage and two soil depths (0–15 and 15–30 cm). Soil samples were collected randomly with three replications per treatment and depth. Prior to tillage, both treatment plots were flooded (12 cm water depth) for seven days. In the single-stage system, puddling and leveling were performed simultaneously using a tractor-mounted rotary tiller equipped with a leveling cover. In the conventional system, primary tillage (moldboard plow), puddling, and leveling were conducted sequentially at seven-day intervals using a two-wheel power tiller. After completion of operations, both tilled plots remained flooded for five days before sampling. Measured soil properties included pH, electrical conductivity (EC), soil organic carbon (OC), redox potential (Eh), mean weight diameter (MWD) of aggregates, bulk density (BD), saturated hydraulic conductivity (Ks), soil texture, and field capacity moisture. Agronomic parameters were measured after rice harvest, including number of tillers per plant, number of panicles and grain weight per square meter, and grain yield were measured after harvest. Statistical comparisons were performed ANOVA test.

Results

Both tillage systems significantly reduced soil redox potential compared with the control, reflecting anaerobic conditions induced by flooding; however, no significant difference was observed between single-stage and conventional tillage. Tillage under flooded conditions altered soil electrical conductivity, creating depth-dependent differences. Significant EC differences were observed between depths within each tillage treatment. At 0–15 cm, the two tillage methods differed significantly, whereas no significant difference was detected at 15–30 cm. Bulk density decreased significantly under both tillage systems relative to the control at both depths. However, no statistically significant difference was found between the two tillage methods at a given depth. Saturated hydraulic conductivity (Ks) increased under both tillage treatments compared with the control. Significant differences were observed among treatments and depths. Notably, single-stage tillage exhibited lower Ks than conventional tillage at both depths. Rice yield components and final grain yield showed negligible and statistically non-significant differences between the two tillage systems, indicating comparable crop productivity. Operationally, single-stage tillage reduced irrigation water use for land preparation by at least 50 percent, decreased fuel consumption, and substantially shortened operation time compared with the conventional multi-stage system.

Conclusion

Single-stage tillage demonstrated performance comparable to conventional puddled tillage in terms of key soil physical and chemical properties and rice yield. Although minor variations were observed in certain parameters, most differences were not statistically significant. Given its reduced operational time, lower fuel consumption and associated emissions, and significant water savings (at least 50 percent) during land preparation, single-stage tillage represents a promising, cost-effective, and environmentally favorable alternative for paddy cultivation. Nevertheless, long-term studies are required to evaluate its cumulative impacts on soil structural stability, nutrient dynamics, and overall soil quality to confirm its sustainability under diverse agro-ecological conditions.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authorship contribution

Conceptualization, Mehdi shorafa, Alireza Raheb and Mohammad Tousi Kehal; methodology, Mehdi shorafa and Alireza Raheb; software, Mohammad Tousi Kehal; validation, Mehdi shorafa and Alireza Raheb; formal analysis, Mohammad Tousi Kehal; investigation, Mohammad Tousi Kehal; writing original draft preparation, Mohammad Tousi Kehal; writing review and editing, Mehdi shorafa and Alireza Raheb; visualization, Mohammad Tousi Kehal; supervision, Mehdi Shorafa; project administration, Mehdi Shorafa; funding acquisition, Mehdi Shorafa. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.” All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

authors used ChatGPT application for checking grammar and spelling. After using this application, the authors reviewed and edited the content as needed and takes full responsibility for the content of the publication.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank Soil Science Department of University of Tehran for providing equipments and Facilities.

The authors would like to thank anonymous referees for their constructive comments.

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

خاک‌ورزی تک مرحله‌ای: رویکردی بهینه در آماده‌سازی اراضی شالیزاری با کاهش عملیات خاک‌ورزی

محمد طوسی کهل^۱ | مهدی شرفا^۲ | علیرضا راهب^۳

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

m.tousikehal@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران،

کرج، ایران. رایانامه: mshorafa@ut.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

araheb@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۲/۲۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۳/۳۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲۵	
تاریخ انتشار: مهر ۱۴۰۵	
واژه‌های کلیدی: تک خاک‌ورزی، جرم مخصوص ظاهری، خاک‌ورزی مرسوم، ساختمان خاک، گل‌خراشی	روش مرسوم سه‌مرحله‌ای خاک‌ورزی در شالیزارها، با مصرف بالای آب و سوخت، افزایش هزینه‌های تولید، تردد مکرر ماشین‌های سنگین خاک‌ورزی همراه است و از طریق افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأخیر در کاشت، تولید برنج را تهدید می‌کند. این پژوهش با هدف ارزیابی قابلیت جایگزینی سامانه تک‌خاک‌ورزی به جای روش مرسوم، اثر دو سامانه خاک‌ورزی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را بررسی کرد. آزمایش روی یک خاک رسی که برای مدت طولانی بدون کشت و عملیات زراعی بود، در قالب دو تیمار خاک‌ورزی مرسوم و تک‌خاک‌ورزی اجرا شد. نمونه‌برداری از اعماق صفر تا ۱۵ و ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری با سه تکرار انجام گرفت. شاخص‌هایی مانند EC، pH، E _h ، OC، BD، MWD و K _s اندازه‌گیری شده و نتایج نشان داد جرم مخصوص ظاهری در عمق سطحی در هر دو روش نسبت به شاهد به‌طور معنی‌دار به ترتیب ۲۳/۲۳ و ۱۹/۵۶ درصد برای روش مرسوم و تک‌خاک‌ورزی کاهش یافت. در عمق سطحی، MWD در تک‌خاک‌ورزی و مرسوم به ترتیب ۴۷/۰۶ و ۳۶/۶۴ درصد کاهش یافت و اختلاف معنی‌دار بین دو روش خاک‌ورزی مشاهده شد، اما در عمق زیر سطحی اختلافی مشاهده نشد. عملکرد برنج در دو روش مشابه بوده و اختلاف معنی‌دار نداشت. در مجموع، طرح اولیه تک‌خاک‌ورزی با حفظ عملکرد و کاهش زمان عملیات، صرفه‌جویی ۳۰ درصدی سوخت و آب، گزینه‌ای مناسب برای بهبود آماده‌سازی شالیزارها ارزیابی می‌شود.
استناد: طوسی کهل؛ محمد، شرفا؛ مهدی، و راهب؛ علیرضا، (۱۴۰۵). خاک‌ورزی تک مرحله‌ای: رویکردی بهینه در آماده‌سازی اراضی شالیزاری با کاهش عملیات خاک‌ورزی، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۷)، ۱۶۳۶-۱۶۱۷. http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.411451.670134	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.411451.670134	



مقدمه

خاک‌های شالیزاری یکی از مهم‌ترین بسترهای تولید برنج در کشورهای آسیایی از جمله ایران هستند و نقش اساسی در امنیت غذایی و پایداری تولید ایفا می‌کنند (Grover et al., 2024). استان گیلان با دارا بودن حدود ۳۲ درصد از سطح زیرکشت برنج و تولید نزدیک به ۲۸ درصد شلتوک کشور، یکی از قطب‌های اصلی تولید برنج در ایران به‌شمار می‌رود (Ebrahimi et al., 2022). علیرغم این ظرفیت تولیدی، سیستم‌های شالیکاری سنتی مصرف آب بسیار بالایی دارند؛ به‌طوری‌که کشت برنج به روش غرقابی مرسوم از پرمصرف‌ترین شیوه‌های تولید محسوب می‌شود (Gava et al., 2024). آماده‌سازی مرسوم اراضی شالیزاری شامل اجرای سه مرحله عملیات خاک‌ورزی (شخم، گلخراپی و تسطیح) با فواصل زمانی مشخص است که علاوه بر زمان‌بر بودن، نیازمند مصرف سوخت قابل توجهی بوده و هزینه‌های تولید را افزایش می‌دهد. مصرف بالای سوخت‌های فسیلی در روش مرسوم موجب افزایش انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای، کاهش ذخیره کربن خاک، و تشدید چالش‌های اقلیمی و زیست‌محیطی می‌شود (Choudhary et al., 2025). در این راستا، اتخاذ رویکردهای مدیریت پایدار خاک و توسعه روش‌های جایگزین خاک‌ورزی که توان کاهش هزینه، زمان، مصرف آب و انتشار آلاینده‌ها را داشته باشند، ضروری می‌باشد (Ramasamy et al., 2024).

خاک‌ورزی یکی از مهم‌ترین عوامل مدیریتی موثر بر کیفیت خاک است و می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را تحت تاثیر قرار دهد. روش‌های مختلف خاک‌ورزی بر خصوصیات مختلف خاک نظیر ساختمان، جرم مخصوص ظاهری، توزیع اندازه منافذ، پایداری خاکدانه‌ها، ضریب آب‌گذری و نفوذ آب در خاک ذخیره کربن آلی، پتانسیل ریداکس و ظرفیت نگهداری آب اثرگذار هستند (Ebrahimi et al., 2022). شدت این تغییرات به ویژگی‌های ذاتی خاک، میزان انرژی اعمال شده، تعداد دفعات عملیات و شرایط مدیریتی مزرعه بستگی دارد. هرچند که خاک‌ورزی با هدف ایجاد بستر مناسب برای رشد گیاه انجام می‌شود، اما اجرای مکرر و شدید آن سبب تخریب ساختمان خاک، افزایش تراکم و کاهش کیفیت فیزیکی خاک در بلندمدت می‌شود (Qi et al., 2023). در سامانه مرسوم کشت برنج، گلخراپی یکی از اصلی‌ترین مراحل آماده‌سازی زمین محسوب می‌شود. این عملیات که در شرایط اشباع یا غرقاب انجام می‌شود با تخریب خاکدانه‌ها و پراکندگی ذرات رس، در بلندمدت لایه‌ای کم‌نفوذ مقابل آب ایجاد نموده که سبب کاهش نفوذ عمقی آب سطحی و افزایش کارایی مصرف آب در شالیزار می‌گردد. علاوه بر این، گلخراپی شرایط مناسبی برای استقرار نشا و کنترل علف‌های هرز فراهم می‌نماید (Grover et al., 2024).

اگرچه مطالعات متعددی به ارزیابی شدت‌های مختلف گلخراپی، سامانه‌های استقرار برنج و روش‌های مختلف خاک‌ورزی بر عملکرد محصول و برخی ویژگی‌های خاک پرداخته‌اند، اما بسیاری از آن‌ها محدودیت‌هایی نظیر طولانی بودن بازه زمانی بین مراحل عملیات، مدت آماده‌سازی زیاد، و ناکارآمدی در کاهش مصرف آب و سوخت داشته و اطلاعات اندکی درباره تاثیر حذف خاک‌ورزی اولیه و انجام همزمان عملیات گلخراپی و تسطیح بر روی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک وجود دارد (Bameri et al., 2022; Mousavi et al., 2009; Dewanti & Mandang, 2022). در این پژوهش، رویکردی نوین مبتنی بر خاک‌ورزی تک‌مرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفت تا با حذف عملیات خاک‌ورزی اولیه و و ادغام مراحل گلخراپی و تسطیح با یکدیگر و بصورت همزمان، نقاط ضعف پژوهش‌های گذشته، پوشانده شود و کارایی خاک‌ورزی و آماده‌سازی اراضی شالیزاری افزایش یابد. با توجه به سهم قابل توجه عملیات آماده‌سازی زمین در هزینه‌ها و زمان، توسعه روش‌های بهینه‌تر می‌تواند نقش مهمی در افزایش بهره‌وری سامانه‌های شالیزاری داشته باشد. در این راستا پژوهش حاضر با هدف (۱) ارزیابی اثر روش خاک‌ورزی تک مرحله‌ای بر روی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در مقایسه با روش مرسوم خاک‌ورزی شالیزار، (۲) مقایسه اثر دو روش خاک‌ورزی بر روی برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دست‌نخورده (خاک شاهد)، و (۳) ارزیابی اولیه روش خاک‌ورزی تک مرحله‌ای به‌عنوان روشی جایگزین و پایدار برای بهبود بهره‌وری شالیزار و کاهش مصرف منابع می‌باشد. به‌طور مشخص، این پژوهش به دنبال تعیین میزان تاثیر هر یک از روش‌های آماده‌سازی زمین بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و شناسایی تغییرات احتمالی ناشی از کاهش شدت عملیات خاک‌ورزی است. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنایی برای انتخاب روش‌های کارآمدتر آماده‌سازی زمین در کشت برنج، کاهش هزینه‌ها و عملیات مکانیکی بدون ایجاد کاهش عملکرد محصول فراهم آورد.

پیشینه پژوهش

خاک‌ورزی یکی از مهم‌ترین عوامل مدیریتی موثر بر کیفیت خاک است و می‌تواند ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک را تغییر



دهد. نوع و شدت عملیات خاک‌ورزی می‌تواند ساختمان خاک، توزیع اندازه منافذ، تراکم، هدایت هیدرولیکی، نفوذپذیری آب و پویایی عناصر را تغییر دهد. در میان سامانه‌های مختلف زراعی، شالیزارها به دلیل عملیات گل‌خراشی و غرقاب‌سازی، دارای شرایطی متفاوت از سایر اراضی زراعی هستند (Bameri et al., 2022). گل‌خراشی با هدف تسهیل نشاکاری، کنترل علف‌های هرز و کاهش تلفات آب از طریق نفوذ عمقی انجام می‌گردد. تغییرات ایجاد شده در خاک می‌تواند پیامدهای کوتاه‌مدت و بلندمدتی بر کیفیت خاک داشته باشد (Qi et al., 2023). تغییرات ناشی از خاک‌ورزی و گل‌خراشی تنها به خصوصیات فیزیکی خاک محدود نمی‌شود. شرایط غرقابی ایجاد شده در شالیزار موجب تغییر فرایندهای اکسایش و کاهش، فعالیت میکروبی و چرخه عناصر غذایی می‌شود. این تغییرات می‌توانند بر مقدار واکنش خاک، قابلیت هدایت الکتریکی، دسترسی عناصر غذایی و پویایی کربن آلی اثرگذار باشند (Gava et al., 2024). در پژوهش (Qi et al., 2023)، با بررسی اثر ۵ سال بی‌خاک‌ورزی بر کربن آلی خاک شالیزار، بیان کردند که در عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متری خاک، به طور معنی‌داری سبب افزایش ۱۵/۸ درصدی کربن آلی شده بود. افزایش ذخیره کربنی خاک با کاهش به هم خوردگی خاک به واسطه کاهش شدت خاک‌ورزی امکان‌پذیر است (Rehman et al., 2025). ذخیره کربنی خاک در روش خاک‌ورزی مرسوم توسط گاواهن برگردان‌دار، به علت زیر و رو شدن خاک و در معرض هوا قرار گرفتن، سبب اکسید شدن مواد آلی می‌گردد (McLaughlin et al., 2024). (Shen et al., 2020)، اعلام کردند که مقدار مناسب pH و Eh در شرایط غرقاب طولانی‌مدت برای کاهش زیست‌فراهمی کادمیوم و آرسنیک، به ترتیب برابر با ۷/۳۱ و ۱۳۰- میلی‌ولت است. (Bahmaniar, 2008) در یک مطالعه مزرعه‌ای گزارش کرد که با افزایش مدت غرقاب، پتانسیل اکسایش-کاهش در افق سطحی خاک کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که مقادیر این شاخص بسته به شرایط محیطی می‌تواند در بازه‌ای حدود ۴۰۰+ تا ۳۰۰- میلی‌ولت نوسان داشته باشد.

مطالعات گذشته نشان داده‌اند که گل‌خراشی سبب تخریب خاکدانه‌ها و پراکندگی ذرات ریز خاک می‌شود. در اثر این فرایند بخش قابل توجهی از منافذ درشت از بین رفته، تراکم خاک با کاهش رطوبت و در طول زمان افزایش می‌یابد. و قرارگیری ذرات رس پراکنده شده بین منافذ خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع و سرعت نفوذ آب را به‌طور محسوسی کاهش می‌دهد (Frene et al., 2024). پایداری خاکدانه‌ها تا حد زیادی توسط خاکدانه‌های بزرگ پایدار در آب کنترل می‌گردد (Yang et al., 2025). ادواتی که سبب به هم خوردگی شدیدتر خاک مثل گاواهن می‌شوند، خاکدانه‌های درشت ایجاد می‌کنند، در صورتی‌که ادواتی نظیر دیسک و روتاری، سبب تولید خاکدانه‌های ریز می‌شوند. با افزایش شعاع برش ادوات خاک‌ورزی، مقدار خاکدانه‌های درشت افزایش می‌یابد (Tisdall & Adem, 1986). همچنین سرعت پیشروی تراکتور و سرعت دوران محور تواندهی و تعداد واحدهای خاک‌ورز از عوامل موثر بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها می‌باشند (Hamid, 2024). پژوهشی بر روی انواع خاک‌ورزی شالیزار شامل بی‌خاک‌ورزی، خاک‌ورزی با گاواهن با حفظ بقایای ساقه برنج، خاک‌ورزی با گاواهن با حذف بقایا، خاک‌ورزی با روتواتور، انجام شد و محققین اعلام کردند که خاکدانه‌های پایدار در آب در روش بی‌خاک‌ورزی به‌طور معنی‌داری بیشتر از خاک‌ورزی با گاواهن به همراه حفظ بقایای ساقه برنج بود. همچنین نتایج دیگر این پژوهش، مقدار رس قابل پراکنش در آب در بی‌خاک‌ورزی در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر ۳۶ درصد کمتر از روش خاک‌ورزی با گاواهن همراه با حفظ بقایا بود (Qi et al., 2022).

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک، جرم مخصوص ظاهری آن است. نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که گل‌خراشی و تردد مکرر ماشین‌های کشاورزی، سبب افزایش در جرم مخصوص ظاهری خاک و کاهش تخلخل کل می‌شوند (Mishra & Saha, 2007; Mousavi et al., 2009; Kalita et al., 2020). (Sharma and De Datta, 1985) بیان نمودند که گل‌خراش کردن یک خاک با تخلخل و ساختمان مناسب اغلب سبب تشکیل ساختمانی می‌شود که جرم مخصوص ظاهری آن کمتر نسبت به قبل از گل‌خراشی شده و تغییر جرم مخصوص ظاهری خاک، بستگی به نوع و میزان رس و رطوبت خاک هنگام خاک‌ورزی دارد. (Sharma and De Datta, 1985) با انجام تحقیقی بیان کردند که در منطقه مورد مطالعه خود، جرم مخصوص ظاهری خاک رسی از ۰/۸۳ به ۰/۵۳ و در خاک لوم رسی از ۱/۱۶ به ۰/۸۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نتیجه عملیات خاک‌ورزی و گل‌خراشی کاهش یافت. ولی با گذشت زمان و ته‌نشینی ذرات، به ویژه ذرات رس، جرم مخصوص ظاهری یک خاک غرقاب شده و گل‌خراش شده افزایش می‌یابد. (Dewanti and Mandang, 2022) در پژوهشی دو روش خاک‌ورزی تلفیقی (انجام هر سه مرحله خاک‌ورزی بدون فاصله زمانی) و خاک‌ورزی مرسوم (با فاصله زمانی ده روزه بین خاک‌ورزی اولیه و ثانویه) را اجرا کرده و بیان نمودند که تخلخل کل خاک در عمق صفر تا ۱۹/۵ سانتی‌متر، از ۶۹/۹۶ درصد به ۷۳/۳۹ درصد افزایش یافته بود. (Bameri et al., 2022) اثر خاک‌ورزی و گل‌خراشی بر برخی خصوصیات فیزیکی خاک و عملکرد برنج بررسی نمودند. این پژوهش نشان داد که با افزایش شدت گل‌خراشی، هدایت هیدرولیکی به‌طور معنی‌داری تقلیل یافت.

همچنین تیمار خاک‌ورزی با بیشترین شدت گل‌خراشی (چهار بار عبور روتیواتور) بیشترین مقدار وزن هزار دانه را به خود اختصاص داد. (Ciollaro and lamaddalena (1998) اثر روش خاک‌ورزی عمیق (عمق شخم ۴۰-۰ سانتی‌متر) و خاک‌ورزی سطحی (عمق شخم ۲۰-۰ سانتی‌متر) را بر یک خاک ورتی‌سول در ایتالیا بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که ضریب آب‌گذری اشباع خاک پس از هر دو روش خاک‌ورزی نسبت به خاک دست‌نخورده افزایش یافته است و بین دو روش خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد و ضریب آب‌گذری اشباع در طول زمان کاهش یافته بود.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، به منظور ارزیابی اثر دو روش خاک‌ورزی شالیزار شامل خاک‌ورزی مرسوم و تک‌خاک‌ورزی، قطعه زمینی که طی مدت طولانی فاقد هرگونه عملیات زراعی و خاک‌ورزی با شرایط نسبتاً یکنواخت از نظر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و شیب بود، به عنوان تیمار شاهد انتخاب و تیمارهای آزمایشی بر روی آن اعمال شد. پژوهش به صورت طرحی با سه تیمار، نمونه‌برداری در دو عمق و سه تکرار، در زمینی واقع در اطراف شهر رشت انجام گرفت (شکل ۱)؛ به دلیل ماهیت عملیات خاک‌ورزی و ضرورت استفاده از ماشین‌ها در شرایط واقعی مزرعه، زمین به سه قطعه مجاور تقسیم گردید؛ به طوری که مساحت هر قطعه برای تیمارها ۲۰۰ متر مربع (مجموعاً ۶۰۰ مترمربع) که توسط مرز خاکی از یک‌دیگر جدا شدند. منطقه مورد مطالعه دارای میانگین بارندگی سالانه ۱۲۶۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۶ درجه سانتی‌گراد است. پس از نمونه‌برداری اولیه از خاک شاهد در قطعه اول، دو قطعه مربوط به تیمارهای خاک‌ورزی به مدت هفت روز با ارتفاع آب ۱۲ سانتی‌متر غرقاب شدند و سپس عملیات خاک‌ورزی مطابق تیمارهای تعریف‌شده اجرا گردید. تیمارهای آزمایش شامل خاک شاهد، کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم بودند و نمونه‌برداری از اعماق صفر تا ۱۵ و ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر، در سه تکرار برای هر عمق، به صورت نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده و با روش تصادفی انجام شد. پس از سپری شدن هفت روز از غرقاب، روش مرسوم خاک‌ورزی با تیلر دوچرخ هفت و نیم اسب بخاری کوبوتا در سه مرحله انجام شد: ابتدا خاک‌ورزی اولیه با گاوآهن برگردان‌دار تیلری یک تیغه (شکل ۲) تا حداکثر عمق و عرض کار ۲۵ سانتی‌متر، سپس خاک‌ورزی ثانویه (گل‌خراشی) با گاوآهن مرسوم تیلری یک تیغه (شکل ۲) با عرض و عمق کار به ترتیب ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر، و در نهایت تسطیح با ماله چوبی تیلری با طول و عرض و ارتفاع به ترتیب ۲۰، ۲۰ و ۵ سانتی‌متر (شکل ۲)؛ به طوری که هر یک از این مراحل با فاصله زمانی هفت روز و با دو بار تردد به ازای هر مرحله اجرا گردید. در مقابل، در روش تک خاک‌ورزی پس از غرقاب، عملیات خاک‌ورزی ثانویه و تسطیح به صورت همزمان با استفاده از روتیواتور تراکتوری کاوردار ۶۰ تیغه با عرض و عمق کار به ترتیب ۱۸۰ و ۲۳ سانتی‌متر (شکل ۲) در دو تردد انجام شد؛ به گونه‌ای که حداکثر عمق کار در تردد اول ۱۰ و در تردد دوم ۲۳ سانتی‌متر بود. سرعت پیشروی تراکتور در تردد اول و دوم به ترتیب برابر یک و سه کیلومتر بر ساعت، سرعت پیشروی تیلر دو چرخ در هر دو تردد برای خاک‌ورزی اولیه، گل‌خراشی و تسطیح به ترتیب برابر یک، دو و چهار کیلومتر بر ساعت بود.

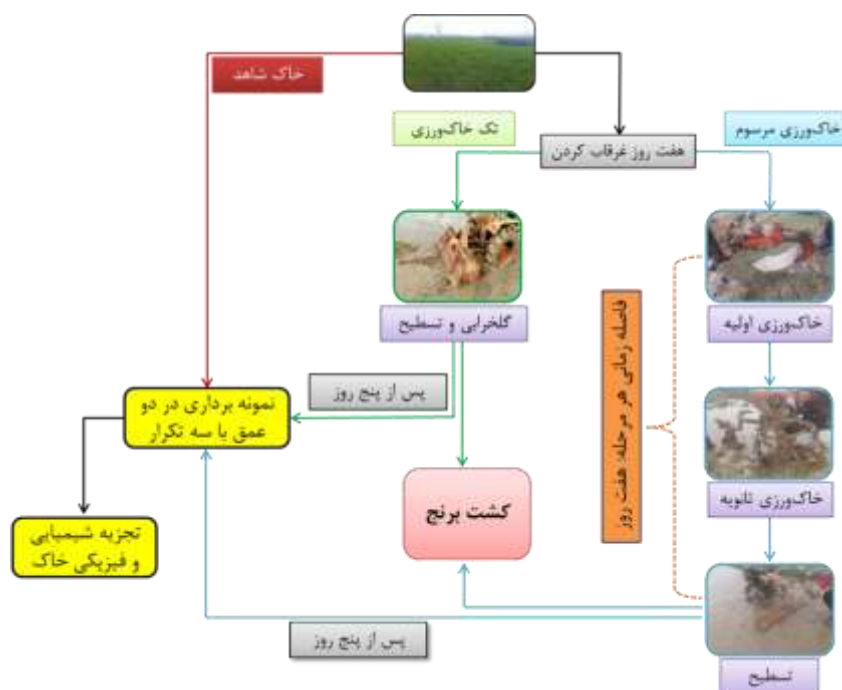


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شهرستان رشت

پس از اتمام عملیات، هر دو روش به مدت پنج روز در شرایط غرقاب باقی مانده، سپس زهکشی شدند و یک روز پس از زهکشی، نمونه برداری خاک صورت گرفت. خلاصه روند اجرای طرح در شکل ۲ ارائه شده است. همچنین در دو قطعه مربوط به تیمارهای خاک ورزی، کشت برنج رقم هاشمی در تاریخ هفت اردیبهشت ۱۴۰۴ انجام شده و برداشت محصول در تاریخ ۱۱ شهریور همان سال اقدام گردید و سپس برخی شاخص های عملکردی مثل تعداد پنجه در بوته، تعداد خوشه و وزن هزار دانه و عملکرد در هکتار مورد اندازه گیری قرار گرفت. واکنش خاک به روش (Thomas, 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی خاک به شیوه (Rhoades, 1996)، پتانسیل ریداکس خاک به شیوه (Robenhorst et al., 2009)، کربن آلی خاک به روش (Walkely & Black, 1934)، بافت خاک به روش (Gee & Bauder 1986)، جرم مخصوص ظاهری بر اساس (Grossman & Reinsch, 2002)، ضریب آبگذری اشباع به شیوه (Reynolds, 2002)، میانگین وزنی قطر خاکدانه ها به روش (Nimmo & Perkins, 2002) و رطوبت در نقطه ظرفیت مزرعه به شیوه (Assouline and Or, 2014)، اندازه گیری شد. برای تجزیه آماری داده ها از نرم افزار SPSS نسخه ۲۳ و با آزمون آنالیز واریانس دو طرفه^۱ با آزمون تعقیبی توکی^۲ در سطح ۵ درصد استفاده شد. رطوبت در نقطه ظرفیت مزرعه بر اساس رابطه ۱ ارائه شده توسط (Assouline & Or (2014)، بر اساس منحنی رطوبتی و معادله Van Gnuichten (1980) محاسبه گردید. در این پژوهش علاوه بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، میزان مصرف سوخت و زمان کارکرد ادوات در هر روش خاک ورزی اندازه گیری شده و برای مساحت یک هکتار برآورد گردید.

$$\psi_{fc} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{(1-2n)/n} \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه ۱، ψ_{fc} : مکش ماتریک در نقطه ظرفیت مزرعه، n و α ضرایب مدل ون گنوختن مستخرج از برازش مدل بر منحنی رطوبتی خاک می باشند. سپس با استفاده مدل ون گنوختن، رطوبت در این مکش محاسبه شد. نمونه های خاک به آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران منتقل شد و مورد تجزیه آزمایشگاهی قرار گرفت.



شکل ۲. خلاصه روش اجرای طرح

نتایج و بحث

خلاصه برخی ویژگی های شیمیایی و فیزیکی اولیه نمونه خاک شاهد در جدول ۱ آورده شده است. بر اساس این جدول، خاک مورد مطالعه در هر دو عمق مورد بررسی در کلاس خاک رسی (بر اساس طبقه بندی آمریکایی) و با خصوصیت متورم شونده با تخلخل متوسط و ضریب

آبگذری آهسته می‌باشد. pH خاک در گروه خاک‌های خنثی و خاک از نظر قابلیت هدایت الکتریکی در گروه خاک‌های غیرشور قرار می‌گیرد و مقدار کربن آلی خاک حدود ۴ درصد است. خاک مورد مطالعه به لحاظ شرایط اکسید و احیا، در گروه خاک‌های احیائی (پتانسیل ریداکس بین ۱۰۰+ تا ۱۰۰- میلی‌ولت) قرار می‌گیرد. این خاک دارای تراکم کمتر در لایه صفر تا ۱۵ سانتی‌متر بوده و دارای تراکم بیشتر در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک می‌باشد. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نیز روندی همانند جرم مخصوص ظاهری خاک داشته و حداکثر این ویژگی در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک مشاهده می‌گردد.

جدول ۱. برخی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی اولیه خاک مورد پژوهش

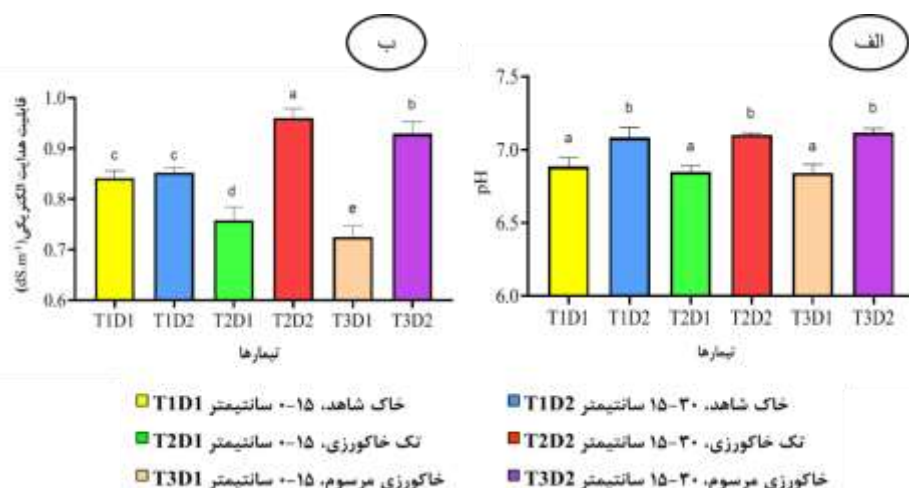
برخی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک شاهد			
ویژگی	واحد	۰-۱۵ cm	۱۵-۳۰ cm
pH	-	۶/۸۸۷	۷/۰۸۳
قابلیت هدایت الکتریکی	dS.m ⁻¹	۰/۸۴۲	۰/۸۵۲
پتانسیل ریداکس	mV	۴۳/۶۷	۳۴/۳۳
کربن آلی	%	۴/۸۴	۴/۶۸
کلاس بافت خاک	-	رسی	رسی
جرم مخصوص ظاهری	g.cm ⁻³	۱/۱۴	۱/۴۱
میانگین وزنی قطر خاکدانه	mm	۱/۸۷	۲/۳۴
ضریب آبگذری اشباع	mm.day ⁻¹	۱۰۸/۲۴	۸۵/۹۲
شاخص انقباض	%	۳۴/۷۵	۳۵/۸۳
ضریب انبساط خطی	-	۰/۱۱۵	۰/۱۲۱

اثر روش‌های خاک‌ورزی بر خصوصیات الکتروشیمیایی خاک

نتایج بررسی اثر روش‌های خاک‌ورزی بر واکنش خاک در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. هر دو روش خاک‌ورزی سبب کاهش pH خاک در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر و افزایش pH خاک در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری شده‌اند، به گونه‌ای که مقدار واکنش خاک در عمق سطحی از ۶/۸۸ در خاک شاهد، به ۶/۸۴ در هر دو روش خاک‌ورزی و در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر از ۷/۰۸ در خاک شاهد، به ۷/۱۰ و ۷/۱۱ به ترتیب برای تک خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم تغییر یافته‌است. نتایج تجزیه واریانس دو طرفه نشان داد که تیمارهای مختلف خاک‌ورزی اثر معنی‌داری بر pH خاک نبود ($F=۰/۰۵۶$, $P=۰/۹۴۸$)، درحالی که اثر عمق خاک بر این ویژگی معنی‌دار بود ($P<۰/۰۰۱$)، $F=۱۰۴/۵$). همچنین اثر متقابل تیمار و عمق بر pH معنی‌دار نشد ($F=۰/۹۸۲$, $P=۰/۴۰۳$). تغییرات pH خاک در اثر مدیریت‌های زراعی، به‌ویژه شرایط غرقاب، عمدتاً ناشی از دگرگونی در وضعیت اکسایش-کاهش خاک و فعال شدن فرآیندهای احیایی است که با مصرف یون‌های هیدروژن همراه‌اند. در چنین شرایطی، کاهش آهن و منگنز و نیز دینیتریفیکاسیون از مهم‌ترین مکانیسم‌هایی هستند که با مصرف یون هیدروژن موجب کاهش اسیدیته و در نتیجه افزایش pH می‌شوند (Wang et al., 2013). علاوه بر این، غرقاب شدن خاک با رقیق‌سازی محلول خاک و تغییر در لایه دوگانه پخشیدگی، غلظت یون‌ها را کاهش داده و هم‌زمان سبب شسته شدن املاح و کاتیون‌های قلیایی از لایه سطحی به اعماق پایین‌تر می‌شود (Ponnamperuma, 1972)؛ بنابراین معمولاً pH در لایه‌های زیرین بیشتر از لایه سطحی است، زیرا در این بخش‌ها به دلیل تهویه کمتر و شدت بالاتر شرایط احیایی، واکنش‌های مصرف‌کننده پروتون با شدت بیشتری رخ می‌دهند (reeves, 1997). با این حال، عدم مشاهده تفاوت‌های معنی‌دار بین تیمارهای خاک‌ورزی، نشان‌دهنده غلبه ظرفیت بافری ذاتی خاک بر اثرات مدیریتی است؛ موضوعی که بیانگر آن است که تغییرات جزئی مشاهده‌شده، احتمالاً ناشی از ناهمگنی‌های مکانی یا خطاهای آزمایشگاهی است تا تأثیر مستقیم ادوات خاک‌ورزی.

بررسی اثرات دو روش خاک‌ورزی بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک (شکل ۳-ب) نشان داده شده است. تجزیه واریانس دو طرفه نشان داد که اثر تیمار ($F=۳/۹۶$, $P=۰/۰۴۸$)، عمق ($F=۲۱۹/۴۹$, $P<۰/۰۰۱$) و اثر متقابل تیمار و عمق ($F=۴۶/۸۷$, $P<۰/۰۰۱$) بر هدایت الکتریکی خاک معنی‌دار بود. هر دو تیمار خاک‌ورزی سبب کاهش معنی‌دار قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر از

۰/۸۴ دسی‌زیمنس بر متر، به ۰/۷۵ و ۰/۷۲ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب برای تک خاک‌ورزی و روش مرسوم شدند. در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر روند معکوس نسبت به لایه فوقانی مشاهده شد که هر دو تیمار خاک‌ورزی سبب افزایش معنی‌دار قابلیت هدایت الکتریکی خاک، از ۰/۸۵ در خاک شاهد به ۰/۹۶ و ۰/۹۲ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب برای تیمار تک خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم شدند اما مقایسه دو روش خاک‌ورزی در یک عمق مشابه اختلاف معنی‌دار نشان نداد. ورود حجم قابل توجهی از آب در شرایط غرقابی، به دلیل تسهیل فرآیند آبشویی، موجب انتقال املاح از لایه سطحی به اعماق خاک و در نتیجه ایجاد توزیع نامتقارن یونی می‌شود که طبق گزارش (Ponnamperuma, 1972)، این فرآیند با اختلال در ساختار طبیعی خاک ناشی از عملیات خاک‌ورزی، تشدید می‌گردد. در لایه سطحی (صفر تا ۱۵ سانتی‌متر)، شدت و مدت زمان غرقاب در تیمار خاک‌ورزی مرسوم منجر به کاهش محسوس تر EC نسبت به تیمار کم‌خاک‌ورزی شده است؛ این در حالی است که افزایش EC در لایه ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر در هر دو تیمار، بازتاب‌دهنده نفوذ عمقی آب و تجمع املاح شسته‌شده از سطح در این لایه است. با این وجود، در تیمار کم‌خاک‌ورزی، محدودیت در زمان و شدت نفوذ عمقی باعث شده است که یون‌ها فرصت کافی برای انتقال به اعماق پایین‌تر را نداشته و در نتیجه شوری در لایه‌های میانی بالاتر بماند. مقایسه عملکردی دو تیمار نشان می‌دهد که EC در لایه زیرین تیمار خاک‌ورزی مرسوم کمتر از کم‌خاک‌ورزی است که این امر می‌تواند ناشی از جابجایی نمک‌ها به اعماق دورتر به دلیل شخم عمیق و بهبود زهکشی باشد؛ یافته‌ای که با نتایج (Reeves, 1997) و (Keskin et al., 2011) مبنی بر شوری بیشتر در خاک‌ورزی حفاظتی (به دلیل تجمع مواد آلی، کاهش آبشویی و تبخیر سطحی) همسویی دارد. در نهایت، غرقاب‌شدگی از طریق رقیق‌سازی محلول خاک، علاوه بر تغییر در لایه دوگانه پخشیدگی، مکانیسمی مستقیم برای کاهش آنی EC و تغییر pH خاک فراهم می‌آورد.



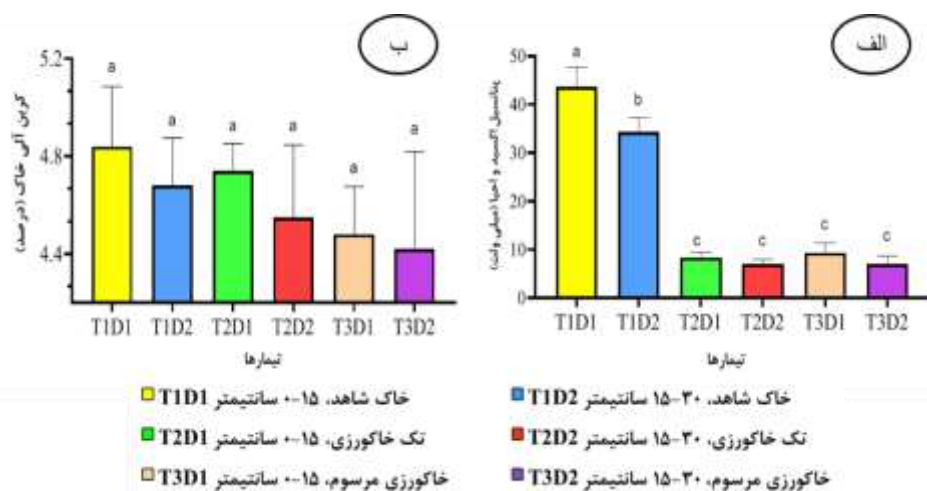
شکل ۳. اثر روش‌های خاک‌ورزی بر خصوصیات شیمیایی خاک: الف) pH، ب) قابلیت هدایت الکتریکی

بررسی اثر روش‌های خاک‌ورزی بر پتانسیل ریداکس خاک (شکل ۴-الف) نشان داده شده است. تجزیه واریانس دو طرفه نشان داد که اثر تیمار (۴-الف) نشان می‌دهد در خاک شاهد در دو عمق مورد بررسی اختلاف معنی‌دار وجود دارد. همچنین هر دو روش خاک‌ورزی سبب کاهش معنی‌دار پتانسیل ریداکس خاک، از ۴۳/۶۷ میلی‌ولت در خاک شاهد به ۸/۳۳ و ۹/۳۳ میلی‌ولت به ترتیب در تک خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر خاک شد. در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک نیز پتانسیل ریداکس خاک به‌طور معنی‌داری از ۳۴/۳۳ میلی‌ولت به ۷ میلی‌ولت برای هر دو تیمار خاک‌ورزی کاهش یافت اما مقایسه هر دو روش خاک‌ورزی چه در عمق سطحی و چه در عمق زیرسطحی اختلاف معنی‌داری نشان نداد. در لایه سطحی خاک (صفر تا ۱۵ سانتی‌متر)، مشاهدات حاکی از آن است که پتانسیل ریداکس (Eh) در تیمار خاک‌ورزی مرسوم، به‌طور موقت، مقادیر بالاتری نسبت به تیمار کم‌خاک‌ورزی را نشان می‌دهد. این پدیده احتمالاً به دلیل برگردان اولیه خاک و تکرار عملیات خاک‌ورزی در تیمار مرسوم، منجر به افزایش موقت Eh در مراحل اولیه شده و سپس کاهش تدریجی آن را به همراه داشته است. در مقابل، در تیمار کم‌خاک‌ورزی، که با تداخل کمتر در ساختار خاک و مراحل کمتر عملیات خاک‌ورزی همراه است، روند کاهشی پایدارتری در Eh مشاهده می‌شود (Jamison, 1953). یکی از عوامل مؤثر بر پتانسیل

ریداکس، میزان کربن آلی خاک است؛ کربن آلی بالاتر، با فراهم آوردن بستری مناسب‌تر برای فعالیت میکروبی، به کاهش بیشتر Eh و پیشبرد فرآیندهای احیایی کمک می‌کند. این در حالی است که ناهمگنی احتمالی در توزیع اکسیدهای نیترات و منگنز در خاک می‌تواند منجر به تأخیر در کاهش پتانسیل ریداکس گردد (Dekamedhi & Dedaita, 1995). (Ponnamperuma, 1972) و (Sajwan and Lindsey, 1986) بر اهمیت عوامل متعددی چون نوع و مقدار مواد آلی، دما، و نوع و غلظت گیرنده‌های الکترون در تعیین سرعت و میزان کاهش پتانسیل ریداکس تأکید کرده‌اند. (Sajwan and Lindsey, 1986) همچنین بیان نمودند که پتانسیل ریداکس خاک پس از غرقاب، به سرعت کاهش یافته و پس از حدود ۳۰ روز به ثبات نسبی می‌رسد. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عمق، کاهش پتانسیل ریداکس تشدید می‌شود؛ این امر ناشی از محدودیت در انتشار گازهایی چون دی‌اکسید کربن از خاک به اتمسفر و اکسیژن از اتمسفر به خاک است. علاوه بر این، تراکم بیشتر در لایه‌های زیرین خاک، که در اثر عملیات خاک‌ورزی و فشردگی ذرات ایجاد می‌شود، به دلیل کاهش اندازه منافذ، نفوذپذیری هوا را دشوارتر کرده و فرآیند تهویه را مختل می‌سازد.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمار ($F=2/18$, $P=0/156$)، عمق ($F=1/33$, $P=0/271$)، و اثر متقابل تیمار و عمق ($F=0/10$, $P=0/903$) بر کربن آلی خاک معنی‌دار نبود. شکل (۴-ب) کاهش کربن آلی خاک، از ۴/۸۴ درصد در خاک شاهد به ۴/۷۴ و ۴/۴۸ درصد به ترتیب برای تیمارهای تک خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد. در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر نیز کاهش کربن آلی مشاهده شد و این ویژگی، از ۴/۶۸ درصد در خاک شاهد به ۴/۵۵ و ۴/۴۲ درصد به ترتیب برای تک خاک‌ورزی و روش مرسوم کاهش یافت. نکته حائز اهمیت کاهش کمتر کربن آلی خاک در روش تک خاک‌ورزی به دلیل مراحل کمتر خاک‌ورزی نسبت به روش مرسوم بود. با این حال، نتایج تجزیه آماری اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای خاک‌ورزی و همچنین مقایسه بین تیمارهای خاک‌ورزی با خاک شاهد نشان نداد و این مورد مستلزم بررسی‌های بلندمدت می‌باشد. علی‌رغم تفاوت‌های مشاهده‌شده در روش‌های خاک‌ورزی، عدم وجود اختلاف معنی‌دار آماری در مقادیر کربن آلی بین تیمارها، در دوره زمانی کوتاه این پژوهش (فاصله زمانی کوتاه بین عملیات خاک‌ورزی و نمونه‌برداری) و همچنین بافت سنگین خاک که دارای ظرفیت نگهداری بالای کربن است، قابل توجیه می‌باشد (McLaughlin et al., 2024). با این وجود، اتخاذ تصمیم قطعی در خصوص انتخاب روش بهینه مدیریت خاک‌ورزی بر اساس تغییرات کربن آلی، نیازمند مطالعات بلندمدت است و نتایج حاصل از این پژوهش، به دلیل عدم وجود اختلاف معنی‌دار آماری، قادر به ارائه چنین نتیجه‌گیری جامعی نیست. روند کلی کاهش کربن آلی در تیمارهای خاک‌ورزی نسبت به تیمار شاهد را می‌توان به اکسید شدن مواد آلی نسبت داد (Liu et al., 2025). این پدیده در اثر بهم ریختگی فیزیکی خاک ناشی از عملیات خاک‌ورزی و افزایش تماس کربن آلی با اکسیژن هوا رخ می‌دهد. علاوه بر این، ورود جریان آب با محتوای اکسیژن محلول بالا در لایه‌های سطحی (صفر تا ۲ سانتی‌متر) در روزهای ابتدایی غرقابی، تجزیه میکروبی مواد آلی را تشدید می‌بخشد (Ponnamperuma, 1972). با این حال، این روند با گذشت زمان و تغییر متابولیسم میکروارگانیسم‌ها از هوازی به بی‌هوازی، همراه با کاهش دمای خاک، کند می‌شود (Qi et al., 2022). پژوهش‌های گذشته (Bameri et al., 2022; Qi et al., 2023; Liu et al., 2024)، نشان می‌دهد که کاهش چشمگیرتر کربن آلی در روش‌های خاک‌ورزی مرسوم در مقایسه با روش‌های کم‌خاک‌ورزی، به دفعات بیشتر و شدت بالاتر عملیات خاک‌ورزی و در نتیجه درهم ریختگی شدیدتر ساختار خاک مربوط می‌شود. اجرای دو مرحله عملیات خاک‌ورزی اولیه و ثانویه در این تیمار، فرآیند اکسیداسیون و تجزیه مواد آلی را تشدید کرده و مقدار کربن آلی در دسترس میکروارگانیسم‌ها را افزایش داده است. همچنین، شدت بالاتر خاک‌ورزی منجر به تخریب بیشتر خاکدانه‌ها و آزادسازی مقادیر بیشتری از کربن آلی محبوس شده در داخل آن‌ها، گردیده و آن‌ها را در معرض اکسیداسیون قرار داده است (McLaughlin et al., 2024). اراضی شالیزاری به دلیل ماهیت غرقابی و کاهش شدید پتانسیل ریداکس، مستعد انتشار گاز متان (CH_4) هستند (Qi et al., 2023). در بلندمدت برگردان کردن بقایا و کاهش شدت خاک‌ورزی سبب افزایش کربن آلی خاک خواهد شد (Liu et al., 2024; Chen et al., 2025).

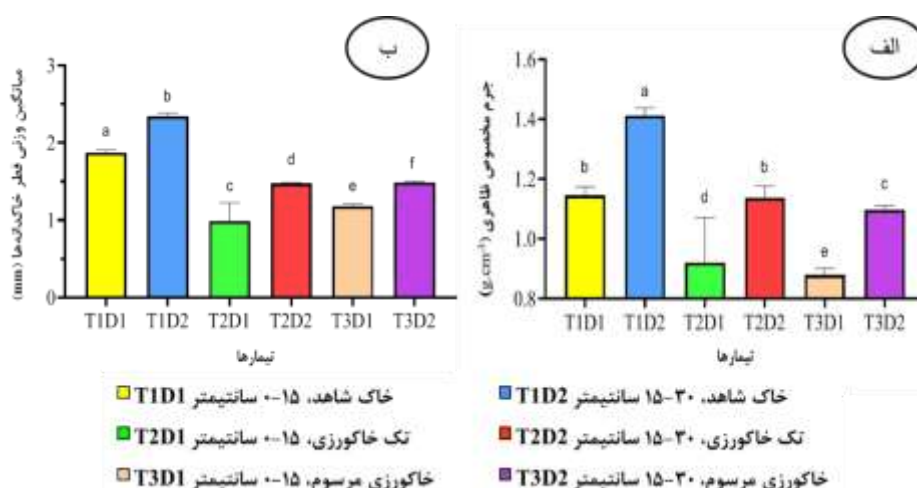
به‌طور کلی خصوصیات الکتروشیمیایی خاک بین دو روش خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری نداشت و هردو روش خاک‌ورزی شرایط الکتروشیمیایی مناسبی برای کشت برنج فراهم نمودند، اما برای تایید قابلیت جایگزینی رویکرد نوین تک‌خاک‌ورزی نیاز به بررسی طولانی مدت هردو روش خاک‌ورزی می‌باشد.



شکل ۴. اثر روش‌های خاک‌ورزی بر خصوصیات شیمیایی خاک: (الف) پتانسیل اکسید و احیاء، (ب) کربن آلی

اثر روش‌های خاک‌ورزی بر خصوصیات فیزیکی خاک

اثر روش‌های خاک‌ورزی بر جرم مخصوص ظاهری و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خاک در شکل ۵ آورده شده است. نتایج تجزیه واریانس دو طرفه نشان داد که اثر تیمار ($F=217/64$, $P<0/001$)، عمق ($F=358/85$, $P<0/001$) معنی‌دار بود در حالی که اثر متقابل ($F=1/91$, $P=0/19$)، بر جرم مخصوص ظاهری خاک معنی‌دار نشد. همانطور که در شکل (۵-الف) مشاهده می‌شود، هر دو روش خاک‌ورزی سبب کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری خاک در هر دو عمق مورد بررسی شده‌اند اما شدت کاهش در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر بیشتر بود که ناشی از تاثیر مستقیم و شدید واحدهای خاک‌ورزی می‌باشد (Hamid, 2024). در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متری خاک، روش‌های خاک‌ورزی سبب کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری خاک از ۱/۱۴۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک شاهد به ۰/۹۲ و ۰/۸۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب به ترتیب برای تک خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم شدند اما مقایسه دو روش خاک‌ورزی در عمق سطحی اختلاف معنی‌داری نشان نداد. در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک نیز کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری نسبت به خاک شاهد (از ۱/۴۱۴ به ۱/۱۳۷ و ۱/۰۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب به ترتیب برای تک خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم) مشاهده شد اما همچنان مقایسه بین دو روش خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری نشان نداد. رابطه میان رطوبت خاک و تراکم‌پذیری آن تابعی از رطوبت بهینه تراکم است؛ به نحوی که افزایش رطوبت تا حد آستانه بهینه، موجب تسهیل عملیات خاک‌ورزی و افزایش تراکم می‌گردد. به گونه‌ای که در رطوبت‌های فراتر از اشباع، عملیات خاک‌ورزی به جای فشردگی، موجب کاهش تراکم می‌گردد (Frene et al., 2024). در شرایط غرقابی، کاهش مقاومت برشی و نیروهای بین‌ذره‌ای، انرژی مکانیکی ادوات را به جای فشردگی، صرف تخریب خاکدانه‌ها، تعلیق ذرات رس و ایجاد ساختمانی بازتر می‌کند که نتیجه آن کاهش جرم مخصوص ظاهری است (Reynolds et al., 2009; Mari et al., 2015). این کاهش در خاک‌های با پتانسیل تورم و انقباض بالا نیز به دلیل جذب آب و افزایش حجم خاک تشدید می‌شود (Rezaee et al., 2024). در این مطالعه، جرم مخصوص ظاهری خاک در لایه صفر تا ۱۵ سانتی‌متری هر دو تیمار خاک‌ورزی نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری داشت که ناشی از کاهش تراکم، تخریب خاکدانه‌ها و تغییر توزیع تخلخل است. این روند در لایه ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری نیز با شدت کمتری مشاهده شد. برخلاف خاک‌ورزی در شرایط خشک که موجب افزایش تراکم می‌شود، گل‌خراپی در شرایط غرقاب به دلیل پراکندگی ذرات، جرم مخصوص را کاهش می‌دهد. با این حال، این اثر ناپایدار است؛ به طوری که با گذشت زمان و وقوع پدیده نشست، ذرات خاک مجدداً ته‌نشین شده و موجب افزایش تدریجی تراکم تا زمان برداشت می‌شوند (Mohanty et al., & Sharma De Datta, 1985, Mousavi et al., 2009). (Sharma and De Datta, 1985) با اجرای طرحی اعلام کردند که جرم مخصوص ظاهری خاک رسی مورد بررسی از ۰/۸۳ به ۰/۵۳ و در خاک لوم رسی از ۱/۱۶ به ۰/۸۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب در اثر گل‌خراپی کاهش یافت، ولی با گذشت زمان و ته‌نشینی ذرات، به ویژه ذرات رس در اثر پدیده نشست خاک، جرم مخصوص ظاهری یک خاک گل‌خراپ و غرقاب شده افزایش می‌یابد (افزایش مجدد جرم مخصوص از ۰/۵۳ به ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک رسی). (Mohanty et al., 2006) بیان نمودند که ۱۵ روز پس از گل‌خراپی تا زمان برداشت، جرم مخصوص ظاهری خاک افزایش یافته بود.

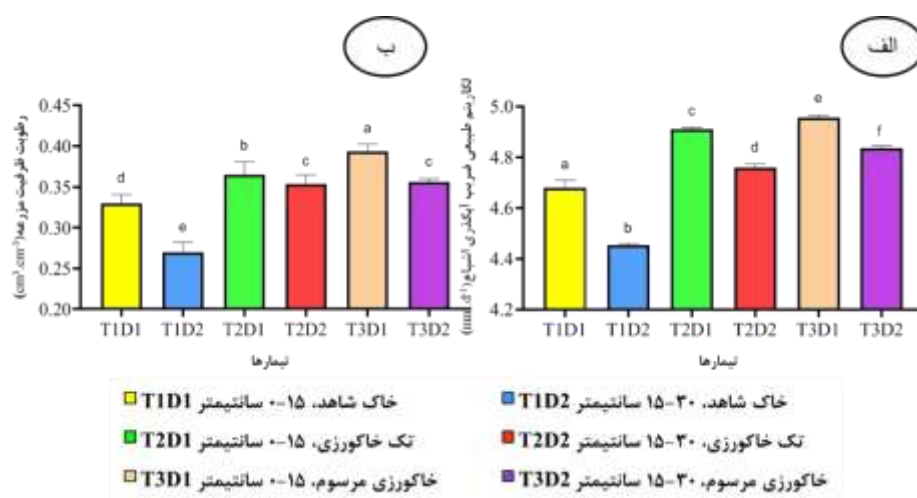


شکل ۵. اثر روش‌های خاک‌ورزی بر خصوصیات فیزیکی خاک: (الف) جرم مخصوص ظاهری، (ب) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

نتایج تجزیه واریانس دو طرفه نشان داد که اثر تیمار ($F=825/43$, $P<0/001$)، عمق ($F=2091/96$, $P<0/001$)، و اثر متقابل ($F=1210/40$, $P<0/001$) بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها معنی‌دار بود. بر اساس شکل (۵-ب)، هر دو سامانه خاک‌ورزی موجب کاهش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) شدند که این کاهش عمدتاً ناشی از تخریب خاکدانه‌ها تحت اثر نیروی برشی ادوات خاک‌ورز در شرایط رطوبتی اشباع است. در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر، مقدار MWD در خاک شاهد ۱/۸۷ میلی‌متر بود که پس از اعمال تیمارها به ۰/۹۹ میلی‌متر در تک‌خاک‌ورزی و ۱/۱۸ میلی‌متر در خاک‌ورزی مرسوم کاهش یافت. نتایج مقایسه‌ای در لایه صفر تا ۱۵ سانتی‌متری نشان داد که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار کم‌خاک‌ورزی به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمار خاک‌ورزی مرسوم است. این تفاوت عمدتاً به ماهیت عملکردی ادوات خاک‌ورزی وابسته است؛ به‌طوری که روتواتور به دلیل شعاع برش کوچک‌تر و مکانیسم برش دورانی با تیغه‌های متعدد، منجر به خرد شدن شدیدتر خاکدانه‌ها در مقایسه با گاواهن (که دارای شعاع برش بزرگ‌تری است) می‌گردد (Tisdall & Adem, 1982). علاوه بر این، پارامترهای عملیاتی شامل سرعت دورانی محور توان‌دهی و سرعت پیشروی تراکتور نقش تعیین‌کننده‌ای در اندازه ذرات ایفا می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که هرچه دوران محور تواندهی آهسته‌تر و سرعت پیشروی تراکتور بیشتر باشد، ذرات درشت‌تری ایجاد می‌گردد در حالی که اگر سرعت دوران محور تواندهی زیاد و سرعت پیشروی تراکتور آهسته باشد ذرات ریزتری را ایجاد می‌کند (Hamid, 2024). شواهد پژوهشی حاکی از آن است که روتواتور در مقایسه با گاواهن (حتی در صورت تجهیز به چرخ‌های قفسه‌ای)، کارایی بالاتری در گل‌خرابی و تخریب ساختار خاک دارد، به‌نحوی که تعداد دفعات تردد مورد نیاز برای دستیابی به شرایط مشابه گل‌خرابی با روتواتور به‌مراتب کمتر از گاواهن است (Shrivastava & Datta, 2001). به‌طور کلی، عملیات گل‌خرابی با تغییر توزیع اندازه خاکدانه‌ها، منجر به کاهش کسر خاکدانه‌های درشت و افزایش نسبت ذرات ریز می‌گردد. در این راستا، مطالعات پیشین کاهش قابل‌توجه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (از ۱/۲۷ به ۰/۵ میلی‌متر) و همچنین کاهش درصد خاکدانه‌های پایدار در آب در بازه قطری ۱ تا ۸ میلی‌متر را گزارش کرده‌اند (Sharma and De Datta, 1985). تأیید این یافته‌ها در پژوهش‌های دیگر (Mondal et al., 2016) نیز نشان می‌دهد که نسبت خاکدانه‌های درشت در اراضی فاقد گل‌خرابی، ۱۸ تا ۳۳ درصد بیشتر از اراضی تحت عملیات گل‌خرابی است که گویای تخریب ساختار خاکدانه‌ها در اثر عملیات خاک‌ورزی در شرایط غرقابی است. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که عملیات خاک‌ورزی در شرایط اشباع به‌طور معنی‌داری ساختار خاک را تغییر داده و با کاهش اندازه خاکدانه‌ها، ویژگی‌های فیزیکی خاک را در جهت سازگاری با شرایط کشت برنج تحت تأثیر قرار می‌دهد.

با توجه به اینکه ضریب آب‌گذری اشباع (Ks) خاک از توزیع لاگ نرمال پیروی می‌کند، ابتدا لگاریتم طبیعی این متغیر محاسبه و سپس تحلیل‌های آماری بر اساس مقادیر لگاریتمی انجام شد. تجزیه واریانس دو طرفه بر روی لگاریتم طبیعی ضریب آب‌گذری اشباع نشان داد که اثر تیمار ($F=825/43$, $P<0/001$)، عمق ($F=574/96$, $P<0/001$)، و اثر متقابل ($F=21/75$, $P<0/001$) معنی‌دار است. نتایج (شکل ۶-الف) نشان می‌دهد در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر، هر دو روش خاک‌ورزی موجب افزایش Ks نسبت به خاک شاهد شدند؛

به‌طوری‌که مقدار آن از ۱۰۸/۲۴ میلی‌متر بر ساعت در شاهد به ۱۳۵/۷۶ و ۱۴۲/۲۴ میلی‌متر بر ساعت به‌ترتیب در تک‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم رسید. شدت افزایش در روش مرسوم بیشتر بود و اختلاف معنی‌داری بین دو روش مشاهده شد. افزایش کمتر در تک‌خاک‌ورزی به دفعات کمتر عملیات و در نتیجه تغییرات ساختاری محدودتر نسبت داده می‌شود. در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر نیز روند افزایشی مشاهده شد، اما شدت آن کمتر از لایه سطحی بود که بیانگر محدودیت عمق مؤثر ادوات خاک‌ورز است. در این عمق، K_s از ۸۵/۹۲ میلی‌متر بر ساعت در شاهد به ۱۱۶/۵۶ و ۱۲۶/۰۸ میلی‌متر بر ساعت به‌ترتیب در تک‌خاک‌ورزی و روش مرسوم افزایش یافت و اختلاف دو روش معنی‌دار بود. در اراضی شالیزاری، پایداری ساختار خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع به شدت تحت تأثیر فرآیند گل‌خرابی قرار دارد. در خاک‌های گل‌خراب‌شده، ذرات رس به‌صورت منفرد و پراکنده در منافذ اشباع مستقر شده و سرعت نفوذ را کاهش می‌دهند. جهت‌گیری ذرات رس در این شرایط، نقش تعیین‌کننده‌ای در ویژگی‌های هیدرولیکی دارد؛ به‌گونه‌ای که تبدیل ساختار باز به ساختار موازی (در اثر فشردگی و جهت‌گیری مجدد ذرات)، موجب کاهش تخلخل کل و هدایت هیدرولیکی می‌گردد. در حالی که ایجاد ساختار بازتر، افزایش تخلخل و متعاقباً افزایش ضریب آب‌گذری اشباع را در پی دارد (Sharma and De Datta, 1985).



شکل ۶. اثر روش‌های خاک‌ورزی بر خصوصیات فیزیکی خاک؛ الف) ضریب آب‌گذری اشباع، ب) رطوبت ظرفیت زراعی

در این مطالعه، هدایت هیدرولیکی اشباع در اراضی شالیزاری به شدت تحت تأثیر تغییرات ساختاری ناشی از گل‌خرابی قرار دارد. در این فرآیند، تخریب خاکدانه‌ها و پراکندگی ذرات رس موجب تغییر آرایش منافذ و ویژگی‌های انتقال آب در خاک می‌شود. جهت‌گیری و نحوه استقرار ذرات رس نقش مهمی در این فرآیند دارد؛ به‌طوری‌که افزایش تخلخل و منافذ درشت، هدایت هیدرولیکی را افزایش می‌دهد، در حالی که تجمع ذرات ریز و انسداد منافذ می‌تواند موجب کاهش آن شود (Sharma and De Datta, 1985). نتایج این پژوهش نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع در لایه صفر تا ۱۵ سانتی‌متری بیشتر از لایه ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری بود. این موضوع را می‌توان به تراکم کمتر، تخلخل بیشتر و فراوانی بالاتر منافذ درشت در لایه سطحی نسبت داد. در مقابل، تراکم بیشتر لایه‌های زیرین، تجمع ذرات ریز و آغاز تشکیل سخت‌لایه شخم، موجب کاهش پیوستگی منافذ و محدود شدن جریان آب شده است. همچنین، خاک‌ورزی مرسوم به دلیل شدت بیشتر عملیات و کاهش بیشتر تراکم خاک، هدایت هیدرولیکی بالاتری نسبت به کم‌خاک‌ورزی ایجاد کرد که با نتایج (Mousavi et al., 2009) همخوانی دارد. با این حال، افزایش هدایت هیدرولیکی پس از گل‌خرابی ماهیتی موقتی دارد؛ زیرا پس از زهکشی، ذرات رس معلق به تدریج در منافذ درشت ته‌نشین شده و در اثر پدیده نشست، بخشی از منافذ مؤثر مسدود می‌شوند که این امر به کاهش تدریجی هدایت هیدرولیکی منجر می‌شود (Kirchhof et al., 2002). از سوی دیگر، در خاک‌های رسی به دلیل پدیده‌های انبساط و انقباض، وضعیت انتقال آب همواره پویا بوده و تحت تأثیر تغییرات رطوبتی قرار دارد (Rezaee et al., 2023). بنابراین، تغییرات هدایت هیدرولیکی مشاهده‌شده در این پژوهش را می‌توان نتیجه برهم‌کنش میان کاهش تراکم، انبساط خاک و افزایش اولیه تخلخل و بازآرایی تدریجی ذرات خاک پس از گل‌خرابی دانست.

تجزیه واریانس دو طرفه بر روی رطوبت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه نشان داد که اثر تیمار ($F=76/15$, $P<0/001$)، عمق ($F=47/62$, $P<0/001$) و اثر متقابل ($F=7/06$, $P<0/009$) معنی‌دار بود. رطوبت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه (شکل ۵-ب) در هر دو

تیمار خاک‌ورزی و در هر دو عمق مورد بررسی نسبت به خاک شاهد افزایش یافت. در عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر، رطوبت ظرفیت مزرعه در خاک شاهد ۳۳ درصد بود که با اجرای تک‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم به ترتیب به ۳۶/۶ و ۳۹/۵ درصد رسید. در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر نیز روند افزایشی مشابهی مشاهده شد، هرچند شدت تغییرات کمتر از لایه سطحی بود؛ به‌طوری‌که مقدار رطوبت از ۲۷ درصد در خاک شاهد به ۳۵/۴ و ۳۵/۶ درصد به‌ترتیب در تک‌خاک‌ورزی و روش مرسوم افزایش یافت. مقایسه دو روش در هر عمق اختلاف معنی‌داری نشان نداد، اما هر دو تیمار نسبت به شاهد افزایش معنی‌دار داشتند. برخلاف رطوبت نقطه پژمردگی دائم که عمدتاً تابعی از بافت خاک است، میزان رطوبت و مکش در نقطه ظرفیت مزرعه به شدت تحت تأثیر ساختار خاک، توزیع اندازه منافذ و اقدامات مدیریتی قرار دارد (Dexter, 2004). عملیات خاک‌ورزی در شرایط غرقابی با کاهش تراکم خاک و تخریب ساختار خاکدانه‌ها تحت نیروهای مکانیکی، موجب بازآرایی ذرات و افزایش فضای بین‌خاکدانه‌ای می‌شود. این تغییرات به‌طور کلی منجر به افزایش تخلخل کل نسبت به تیمار شاهد شده و ظرفیت نگهداری آب خاک، به‌ویژه در منافذ ریز را ارتقا می‌دهد (Dexter, 2004; Reynolds, 2009; Shakouri et al., 2021). در این راستا، خاک‌های دارای پتانسیل انبساط و انقباض بالا، به دلیل توانایی در نگهداری آب میان لایه‌های ساختمانی، ظرفیت بالاتری برای حفظ رطوبت نشان می‌دهند (Rezaee et al., 2023). نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که شدت عملیات گل‌خرابی نقش تعیین‌کننده‌ای در منحنی مشخصه رطوبتی دارد. برای مثال، (Mohanty et al., 2004) گزارش کردند که در تیمارهای با چهار و هشت بار تردد ادوات، میزان رطوبت خاک در مکش‌های یکسان تا ۲۵ درصد بیش از تیمار شاهد بوده است. بررسی روند زمانی نشان می‌دهد که با وجود کاهش کلی رطوبت در طول دوره آزمایش، تیمار با هشت بار تردد به‌طور مداوم رطوبت بیشتری را نسبت به تیمار چهار بار تردد حفظ کرده است که این امر به افزایش حجم منافذ ریز در اثر گل‌خرابی شدیدتر نسبت داده می‌شود. یافته‌های (Yoshida and Adachi, 2002) در بررسی خاک‌های رسی نیز مؤید همین موضوع است؛ آن‌ها مشاهده کردند که در لایه سطحی (صفر تا ۴ سانتی‌متر)، محتوای رطوبتی در تمامی سطوح مکش با افزایش شدت گل‌خرابی، روند افزایشی معنی‌داری داشته است. این شواهد بیانگر آن است که مدیریت شدت خاک‌ورزی در شرایط غرقاب از طریق تعدیل توزیع اندازه منافذ، ابزاری کارآمد برای کنترل پویایی رطوبت در اراضی شالیزاری محسوب می‌شود.

اثر روش‌های خاک‌ورزی بر عملکرد محصول برنج

در این پژوهش، افزون بر بررسی اثرات دو روش تک خاک‌ورزی و مرسوم بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، گیاه برنج با رقم هاشمی به علت مرسوم بودن در منطقه مورد مطالعه کشت گردید و عملکرد محصول در هر یک از این روش‌ها با سه تکرار مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه میانگین برخی خصوصیات عملکرد محصول در دو روش خاک‌ورزی در جدول ۲ آورده شده است. مقایسه دو روش خاک‌ورزی بر اساس صفات عملکردی اندازه‌گیری شده مثل تعداد پنجه در بوته، تعداد خوشه در متر مربع و وزن هزار دانه تفاوت معنی‌داری را نشان نداد زیرا هر دو روش از دیدگاه فرایندی (یعنی گل‌خرابی) مشابه یکدیگر بودند. نتایج عملکرد محصول در روش تک خاک‌ورزی در مرحله اولیه طرح قابل قبول بوده و اختلاف بسیار ناچیزی با روش مرسوم داشت، اما همچنان برای تایید قابلیت جایگزینی روش تک خاک‌ورزی نیاز به بررسی درازمدت این روش در مقایسه با روش خاک‌ورزی مرسوم دارد.

جدول ۳. اثر روش‌های خاک‌ورزی بر برخی خصوصیات عملکردی محصول برنج

روش خاک‌ورزی	تعداد پنجه در بوته		تعداد خوشه در متر مربع		وزن هزار دانه (گرم)		عملکرد (کیلوگرم در هکتار)
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	
تک خاک‌ورزی	۱۵	۱/۴۱	۳۶۴	۰/۹۴	۲۸/۳۶	۰/۱۹	۴۱۷۲/۳۳
خاک‌ورزی مرسوم	۱۵	۰/۸۲	۳۶۶	۲/۱۶	۲۸/۴	۰/۰۵	۴۱۷۲/۷

* نتایج تجزیه آماری اختلاف معنی‌دار بین تیمارها برای هیچ یک از صفات عملکردی اندازه‌گیری شده نشان نداد.

نکته قابل توجه در روش تک خاک‌ورزی میزان مصرف آب (جدول ۳) می‌باشد. همانطور که گفته شد در روش تک خاک‌ورزی عملیات گل‌خرابی و تسطیح به‌طور همزمان باهم و در یک مرحله انجام شد که تنها به یک مرحله غرقاب شدن نیاز داشت. اما در روش مرسوم خاک‌ورزی، قبل از انجام هر مرحله از فرایند آماده‌سازی زمین، نیاز به غرقاب کردن می‌باشد و مقدار مصرف آب را افزایش می‌دهد. بنابراین روش تک خاک‌ورزی، اختلاف و صرفه‌جویی چشمگیری در مصرف آب نسبت به روش مرسوم برای آماده‌سازی اراضی شالیزاری برای کشت برنج داشته و از ارجحیت بالایی برخوردار می‌باشد.



جدول ۳. مقایسه دو روش خاک‌ورزی از نظر اقتصادی

روش	مراحل خاک‌ورزی	مدت زمان برای یک هکتار (ساعت)	هزینه مراحل در هکتار (ریال)*	مصرف سوخت در هکتار (لیتر)	مصرف آب
خاک‌ورزی مرسوم	شخم اولیه	۳۴	۸۰,۰۰۰,۰۰۰	۵۰	سه مرحله
	گلخراپی	۲۲/۵	۶۰,۰۰۰,۰۰۰		
	تسطیح	۱۲/۵	۵۰,۰۰۰,۰۰۰		
تک خاک‌ورزی	گلخراپی+تسطیح	۷/۵	۳۰,۰۰۰,۰۰۰	۳۵	یک مرحله

* هزینه مراحل شامل مجموع حق الزحمه کارگر و ادوات می‌باشد. هزینه‌ها بر اساس جدول تعرفه خدمات مکانیزه کشاورزی سال ۱۴۰۳ و مصاحبه با خدمه ادوات سال‌های گذشته گزارش گردیده است.

از مهم‌ترین نکات قابل توجه در انتخاب روش‌های خاک‌ورزی، بررسی این روش‌ها از لحاظ اقتصادی-زیست‌محیطی می‌باشد، زیرا انتخاب روش خاک‌ورزی تنها یک تصمیم فنی یا زراعی نیست، بلکه پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم بر معیشت کشاورزان، بهره‌وری منابع و حتی پایداری جوامع دارد. بخش عمده هزینه‌های کشت برنج، صرف اجرای عملیات خاک‌ورزی می‌گردد و روش‌های مختلف با توجه به ماشین‌ها، سوخت، نیروی کار و زمان متفاوت، از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی هزینه‌های تولید را دستخوش تغییر می‌کنند و به طور مستقیم بر درآمد کشاورز موثر اند (چادھاری و همکاران، ۲۰۲۵). همانطور که در جدول ۴ آمده است، روش تک خاک‌ورزی تنها با ۷/۵ ساعت، از لحاظ مدت زمان خاک‌ورزی بسیار کوتاه‌تر از روش مرسوم می‌باشد. این موضوع افزایش بهره‌وری نیروی کار، امکان مدیریت سطوح بزرگتر در زمان کوتاه‌تر و هماهنگی بیشتر با تقویم زراعی را به دنبال دارد. هزینه‌های روش مرسوم بیش از ۶ برابر روش تک خاک‌ورزی بوده و به لحاظ مصرف سوخت ۱۵ لیتر در هکتار بیشتر از روش تک خاک‌ورزی، به علت مدت زمان بیشتر کار پاورتی‌لر می‌باشد. مصرف سوخت و زمان کار کمتر، سبب کاهش انتشار گازهای آلاینده از ادوات می‌گردد و در نتیجه سبب کنترل ورود گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر می‌گردد که به نوبه خود در تغییر اقلیم و گرمایش زمین موثر خواهد بود (نما و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین دفعات کمتر ورود به زمین توسط ادوات خاک‌ورزی سبب کاهش آلاینده‌های بیولوژیکی و فرسایش خاک را در پی دارد و می‌تواند سبب کاهش استفاده از سموم، آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها گردد و متعاقباً منجر به کاهش آلاینده‌های شیمیایی اراضی توسط این مواد گردد (چن و همکاران، ۲۰۲۵). این موضوع علاوه بر جنبه‌های زیست‌محیطی، سبب صرفه‌جویی در هزینه کشاورزان پس از اجرای کشاورزی و در طول دوره رشد خواهد گردید. روش مرسوم خاک‌ورزی شالیزار به علت زمان‌بر بودن، به نیروی کار بیشتری نیاز دارد و در زمان کوتاه سبب افزایش اشتغال فصلی می‌شود، اما روش تک خاک‌ورزی با توجه به مدت زمان کمتر، نیاز به نیروی کار را کاهش می‌دهد که ممکن است سبب کاهش فرصت‌های شغلی سنتی و فصلی گردد اما در مقابل، فرصت‌های جدید در زمینه تعمیر، نگهداری و بهره‌برداری از ماشین‌آلات پیشرفته و پیچیده ایجاد می‌کند. این نکته حائز اهمیت است که باید سیاست‌های حمایتی مانند آموزش مهارت‌های جدید، ارائه کمک‌های مالی برای خرید تجهیزات مکانیزه و توسعه خدمات فنی، مدیریت گردد تا چالش‌هایی نظیر کاهش اشتغال فصلی را حل کند.

نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی روش‌های خاک‌ورزی مرسوم به‌ویژه در کشت برنج که محصولی راهبردی است در شرایط اقلیمی ایران ضروری می‌باشد. در این پژوهش سعی شد تا شیوه‌ای جدید برای جایگزینی روش مرسوم خاک‌ورزی در شالیزارها معرفی و مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین برای این هدف، پژوهشی با دو روش خاک‌ورزی مرسوم و تک خاک‌ورزی در یک خاک دست‌نخورده به عنوان خاک شاهد طراحی و اجرا شد. این پژوهش نشان داد که دو روش تک خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم در بخش زیادی از خصوصیات فیزیکی و الکتروشیمیایی مورد پژوهش فعلی اختلاف معنی‌داری ندارند که ناشی از مکانیسم (گلخراپی) مشابه دو روش خاک‌ورزی می‌باشد، اما در برخی از موارد مانند حفظ بیشتر کربن آلی، ضریب آب‌گذری اشباع کمتر و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های کوچکتر، روش تک خاک‌ورزی از ارجحیت و تناسب بیشتری برای کشت برنج برخوردار می‌باشد. همچنین مصرف آب در روش تک خاک‌ورزی، حداکثر به یک سوم روش مرسوم کاهش یافت که نشان‌دهنده اختلاف چشم‌گیر در مصرف آب و بهبود کارایی مصرف آب بود. نتایج مقایسه آماری عملکرد محصول برنج نیز اختلاف معنی‌داری نشان نداد و این اختلاف در دو روش خاک‌ورزی بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی بود. ارزیابی اولیه روش تک خاک‌ورزی به عنوان روشی جایگزین برای روش مرسوم آماده‌سازی اراضی شالیزاری نشان داد که این روش قابلیت جایگزین شدن با روش مرسوم را دارا می‌باشد. اما به دلیل اینکه این روش برای اولین بار اجرا شده است، نیاز به بررسی طولانی مدت دارد تا نقاط ضعف احتمالی این روش

آشکار گردد. همچنین به علت محدودیت هزینه و عملیات در مقیاس مزرعه‌ای، هر تیمار در یک قطعه انجام شد. هدف پژوهش حاضر، ارائه شواهد مزرعه‌ای از پاسخ خاک به دو روش خاک‌ورزی در مقیاس کاربردی مزرعه بوده است و نه تعمیم مستقیم نتایج به تمامی اراضی شالیزاری. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، ارزیابی این تیمارها در چند مزرعه مستقل و تحت شرایط اقلیمی متفاوت نیز انجام شود. با وجود این محدودیت و ماهیت مزرعه‌ای آزمایش، اعتبار عملی یافته‌ها را برای مدیریت خاک در اراضی شالیزاری تقویت می‌کند. از محدودیت‌های دیگر این پژوهش عدم امکان استفاده از روتواتور در اراضی با پوشش سطحی سنگ‌ریزه‌دار به علت آسیب به تیغه‌ها، نیازمند تخصص فنی کافی برای استفاده از تراکتور و روتواتور و همچنین محدودیت در مساحت‌های خیلی کوچک به علت دامنه حرکت تراکتور می‌باشد. برای ادامه پژوهش‌ها در آینده، پیشنهاد می‌گردد این روش خاک‌ورزی در انواع خاک‌های غالب شالیزاری که سابقه کشت برنج دارند مورد پژوهش قرار گیرد. بعلاوه تاثیر رطوبت در هنگام نمونه‌برداری پس از اجرای روش‌های خاک‌ورزی و همچنین تاثیر روش‌های خاک‌ورزی در ۴ دوره زمانی سه ماهه مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به اینکه در این پژوهش به ازای هر مرحله دو تردد اجرا شده بود، برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌گردد تعداد ترددهای مختلف مورد آزمون قرار گیرند.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: دانشجو: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در طول آماده‌سازی این اثر، نویسندگان از نرم‌افزار ChatGPT به منظور بررسی دستور زبان و املاء استفاده کردند. پس از استفاده از این نرم‌افزار، نویسندگان مطالب را در صورت نیاز بررسی و ویرایش کرده و مسئولیت کامل محتوای نشریه را بر عهده می‌گیرند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران به خاطر حمایت‌ها در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

از گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران به سبب فراهم نمودن تجهیزات تشکر می‌گردد.

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از کلیه افراد به خاطر مطالعه متن مقاله حاضر و ارائه نظرهای ارزشمند سپاسگزاری نمایند.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.



منابع

شکوری، مریم؛ شعبانپور، محمود؛ دواتگر، ناصر و وظیفه دوست، مجید (۱۳۹۹). ارزیابی کیفیت خاک در خاک‌های شالیزاری با عملکردهای متفاوت (مطالعه موردی: کوچصفهان استان گیلان). مجله پژوهش‌های آب و خاک ایران، ۵۱(۱۲)، ۳۱۶۱-۳۱۷۶.

وزارت جهاد کشاورزی. (۱۴۰۱). *آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ (جلد اول: محصولات زراعی)*. مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات، معاونت برنامه‌ریزی و امور اقتصادی، وزارت جهاد کشاورزی، تهران، ایران.

REFERENCES

- Assouline, S., Tessier, D., & Tavares-Filho, J. (1997). Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: Experimental results and modeling. *Soil Science Society of America Journal*, 61(2), 390–398.
- Bahmaniar, M. A. (2008). The influence of continuous rice cultivation and different waterlogging periods on the morphology, clay mineralogy, Eh, pH and K in paddy soils. *Eurasian Soil Science*, 41(1), 87–92.
- Bameri, A., Lotfi, M., & Khaleghi, M. (2022). The effect of tillage and puddling on some soil physical properties and rice yield in paddy lands (Case study: Ghaemshahr City). *Applied Soil Research*, 10(3), 30–42.
- Chen, Y., Zhang, F., Gao, Q., & Ma, Q. (2025). Impacts of different tillage and straw management systems on herbicide degradation and human health risks in agricultural soils. *Applied Sciences*, 15(14), Article 7840.
- Choudhary, O. P., Kahlon, M. S., & Chandhi, R. S. (2025). Blending traditional knowledge of farmers in agriculture with modern scientific technologies in the state of Punjab. In O. P. Choudhary et al. (Eds.), *Blending Indian farmers' traditional knowledge in agriculture with modern scientific technologies: A way forward* (pp. 27–49). Springer.
- Ciollaro, G., & Lamaddalena, N. (1998). Effect of tillage on the hydraulic properties of a vertic soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71(2), 147–155.
- Dekamedhi, B., & Dedaita, S. K. (1995). Effect of greenmanure and prilled urea on the changes of electrochemical properties of soil under lowland rice. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 43(4), 572–577.
- Dewanti, A. N., & Mandang, T. (2022). Analysis of soil puddling method and the effect on soil physical properties and rice plant growth. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1038(1), 012062.
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3–4), 201–214.
- Ebrahimi, M., Majidian, M., & Alizadeh, M. R. (2022). Effect of different planting techniques and puddling methods on soil properties, growth, yield, and grain quality characteristics of rice (*Oryza sativa* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(19), 2543–2557.
- Frene, J. P., Pandey, B. K., & Castrillo, G. (2024). Under pressure: Elucidating soil compaction and its effect on soil functions. *Plant and Soil*, 502, 267–278.
- Gava, O., Ardakani, Z., Delalic, A., & Monaco, S. (2024). Environmental impacts of rice intensification using high-yielding varieties: Evidence from Mazandaran, Iran. *Sustainability*, 16(6), 2563.
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1, Physical and mineralogical methods* (2nd ed., Agronomy Monograph No. 9, pp. 383–411). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
- Grossman, R. B., & Reinsch, T. G. (2002). Bulk density and linear extensibility. In J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 4, physical methods* (SSSA Book Series No. 5, pp. 201–228). Soil Science Society of America.
- Grover, D., Dahiya, B., Mishra, A. K., Kalonia, N., Rani, P., & Sharma, S. (2024). Renovating conservation agriculture: Management and future prospects. In *Technological approaches for climate-smart agriculture* (pp. 375–407). Springer.
- Hamid, A. (2024). Field comparison between two rotary plows under different speed and number of shares. *Tikrit Journal for Agricultural Sciences*, 24(3), 85–101.
- Jamison, V. C. (1953). Changes in air–water relationships due to structural improvement of soils. *Soil Science*, 76(2), 143–152.
- Jihad-e-Agriculture. (2022). *Agricultural statistics of the year 2020–2021* (Vol. 1: Agronomy crops). Information and Communication Technology Center, Deputy of Planning and Economics, Ministry of Jihad-e-Agriculture, Tehran, Iran. (In Persian).
- Kalita, J., Ahmed, P., & Baruah, N. (2020). Puddling and its effect on soil physical properties and growth of

- rice and post-rice crops: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(4), 503–510.
- Keskin, B., Akdeniz, H., & Yalcin, H. (2011). Effects of different tillage systems on soil properties in the southeastern Anatolia region of Turkey. *African Journal of Agricultural Research*, 6(4), 910–917.
- Kirchhof, G., Priyono, S., Utomo, W. H., Adisarwanto, T., Dacanay, E. V., & So, H. B. (2000). The effect of soil puddling on the soil physical properties and the growth of rice and post-rice crops. *Soil and Tillage Research*, 56(1–2), 37–50.
- Liu, J., Wang, X., Zhang, H., Li, Y., Zhao, Y., & Chen, F. (2024). Long-term in situ straw returning increased soil aggregation and aggregate-associated organic carbon fractions in a paddy soil. *Heliyon*, 10(11), e32392.
- Liu, J., Yang, L., Adams, J. M., Zhang, L., Wang, J., Wei, R., & Zhou, C. (2025). Divergent biotic–abiotic mechanisms of soil organic carbon storage between bulk and rhizosphere soils of rice paddies in the Yangtze River Delta. *Journal of Environmental Management*, 389, 126179.
- Mari, I. A., Changying, J., Leghari, N., Chandio, F. A., Arslan, C., & Hassan, M. (2015). Impact of tillage operation on soil physical, mechanical and rheological properties of paddy soil. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 21(5), 940–946.
- McLaughlin, N. B., Drury, C. F., Reynolds, W. D., Yang, X., & Burt, S. D. (2024). Effects of long-term monocropping, rotation cropping, and fertilization on energy and fuel requirements for fall moldboard plowing in a clay-loam soil. *Soil and Tillage Research*, 237, 105990.
- Mishra, V. K., & Saha, R. (2007). Soil physical behaviour and rice (*Oryza sativa* L.) yield under different sources of organics, methods of puddling and zero tillage. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 77(4), 219–225.
- Mohanty, M., Painuli, D. K., & Mandal, K. G. (2004). Effect of puddling intensity on temporal variation in soil physical conditions and yield of rice (*Oryza sativa* L.) in a Vertisol of central India. *Soil and Tillage Research*, 76(2), 83–94.
- Mondal, S., Kumar, S., Haris, A. A., Dwivedi, S. K., Bhatt, B. P., & Mishra, J. S. (2016). Effect of different rice establishment methods on soil physical properties in drought-prone rainfed lowlands of Bihar, India. *Soil Research*, 54(8), 997–1006.
- Mousavi, S. F., Yousefi-Moghadam, S., Mostafazadeh-Fard, B., Hemmat, A., & Yazdani, M. R. (2009). Effect of puddling intensity on physical properties of a silty clay soil under laboratory and field conditions. *Paddy and Water Environment*, 7(1), 45–54.
- Nimmo, J. R., & Perkins, K. S. (2002). Aggregate stability and size distribution. In J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 4, physical methods* (SSSA Book Series No. 5, pp. 317–328). Soil Science Society of America.
- Ponnamperuma, F. N. (1972). The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy*, 24, 29–96.
- Qi, J. Y., Han, S. W., Lin, B. J., Xiao, X. P., Jensen, J. L., Munkholm, L. J., & Zhang, H. L. (2022). Improved soil structural stability under no-tillage is related to increased soil carbon in rice paddies: Evidence from literature review and field experiment. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102248.
- Qi, J. Y., Yao, X. B., Duan, M. Y., Huang, X. W., Fan, M. Y., Yang, Y., Zhang, H. L., & Tang, X. R. (2023). Effects of contrasting tillage managements on the vertical distribution of plant- and microbial-derived carbon in rice paddy. *Science of the Total Environment*, 892, 164348.
- Rabenhorst, M. C., Hively, W. D., & James, B. R. (2009). Measurements of soil redox potential. *Soil Science Society of America Journal*, 73(2), 668–674.
- Ramasamy, M., Ghosh, S., Yadav, K. K., Chitra, M., Dhivya, B., Kanth, S. S., & Karthickraja, A. (2024). The role of organic farming in enhancing soil structure and crop performance: A comprehensive review. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(10), 890–904.
- Reeves, D. W. (1997). The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 43(1–2), 131–167.
- Rehman, S. U., Ijaz, S. S., Din, A. M. U., Al-Dosary, M. A., Ansar, M., Fatima, S., & Yang, H. (2025). Combined effects of reduced tillage and strip intercropping on soil carbon sequestration in semi-arid environment. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25(2), 3124–3139.
- Reynolds, W. D. (2002). Hydraulic conductivity. In J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 4. Physical methods* (pp. 802–809). Soil Science Society of America.
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., & Yang, X. M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3–4), 252–263.
- Rezaee, L., Davatgar, N., Moosavi, A. A., & Sepaskhah, A. R. (2024). Assessing the impact of soil shrinkage and pore size dynamics on rice crop yield in expansive clay soils. *Soil and Tillage Research*, 244, 106261.



- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3, Chemical methods* (SSSA Book Series No. 5, pp. 417–435). Soil Science Society of America.
- Sajwan, K. S., & Lindsay, W. L. (1986). Effects of redox on zinc deficiency in paddy rice. *Soil Science Society of America Journal*, 50(5), 1264-1269.
- Salokhe, V. M., Miah, M. H., & Hoki, M. (1993). Puddling effects on some physical properties of Bangkok clay soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 56(1), 59–71
- Shakouri, M., Shabanpour, M., Davatgar, N., & Vazifehdoust, M. (2021). Assessment of soil quality in paddy soils with different yields (Case study: Kouchesfahan, Guilan Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(12), 3161–3176. (In Persian).
- Sharma, P. K., & De Datta, S. K. (1985). Puddling influence on soil, rice development, and yield. *Soil Science Society of America Journal*, 49(6), 1451–1457.
- Shen, B., Wang, X., Zhang, Y., Zhang, M., Wang, K., Xie, P., & Ji, H. (2020). The optimum pH and Eh for simultaneously minimizing bioavailable cadmium and arsenic contents in soils under organic fertilizer application. *Science of the Total Environment*, 711, 135229.
- Shrivastava, A. K., & Datta, R. K. (2001). Performance evaluation of an animal drawn puddling implements under controlled soil-bin conditions. *Journal of Terramechanics*, 38(3), 121-131.
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3, Chemical methods* (SSSA Book Series No. 5, pp. 475–490). Soil Science Society of America.
- Tisdall, J. M., & Adem, H. H. (1986). Effect of water content of soil at tillage on size-distribution of aggregates and infiltration. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 26(2), 193–195.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38.
- Wang, Y., Tang, C., Wu, J., Liu, X., & Xu, J. (2013). Impact of organic matter addition on pH change of paddy soils. *Journal of Soils and Sediments*, 13(1), 12–23.
- Yang, Y., Meng, Z., Li, H., Gao, Y., Li, T., & Qin, L. (2025). Soil porosity as a key factor of soil aggregate stability: Insights from restricted grazing. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1535193.
- Yoshida, S., & Adachi, K. (2002). Influences of puddling practices on shrinkage characteristics of clayey paddy soils. *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, 218, 163–172.