

(OPEN ACCESS)

The effect of conservation agriculture on some soil properties in rainfed lands of Aqqala County, Golestan Province

Mohammad Mehdi Mirzaei¹, Faezeh Zaefarian^{*2},
Mohammad Esmail Asadi³, Samaneh Mahzari⁴

1. Ph.D. Student of Agronomy, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: mohands_mirzaei@yahoo.com
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Agronomy, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: fa_zaefarian@yahoo.com
3. Assistant Prof. and International Researcher of Soil and Water and Conservation Agriculture, Agricultural and Natural Resources Research and education Center, Gorgan, Iran. E-mail: iwc977127@yahoo.com
4. Ph.D. Graduate of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: samanemahzari@yahoo.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: The primary goal of soil research is to reassess agricultural ecosystems to achieve sustainable production and profitability while ensuring soil conservation as a non-renewable resource, supporting household livelihoods, and protecting natural resources in the best possible way. The type of cropping system creates countless changes in soil properties (physical, chemical, and biological properties of the soil). Rainfed areas are prone to land degradation and face periods of drought and water scarcity. Thus, selecting appropriate tillage methods and properly managing available resources are critical steps in empowering agriculture in line with sustainable farming principles. Due to minimal soil manipulation and preservation of crop residues in conservation agriculture, the soil as a growth and development environment can have different conditions in conservation and conventional agriculture in terms of physical and chemical properties. Conservation Agriculture (CA) is a set of management agricultural methods that can increase carbon sequestration in soils, improve soil conditions to increase crop growth, use nutrients and soil organic carbon (SOC). Accordingly, the present research was aimed to investigate the effect of conservation agriculture on some soil properties in rainfed lands.
Article history: Received: 03.16.2025 Revised: 05.27.2025 Accepted: 07.29.2025	
Keywords: Conservation, Infiltration rate, Organic carbon, Porosity	
	Materials and Methods: The present study was conducted as a randomized complete block design with three replications in Golestan Province, in two regions of Aq-Qala County, located in the northern part of the province at a latitude of 37°00' N and a longitude of 54°27' E. The experiment started on October 30, 2022, and ended on October 31, 2023. The characteristics of Region One (suburban area) and Region Two (Section Seven) are as follows, respectively: short-term average rainfall of 250–350 mm and 130–210 mm; average annual evaporation of 1800 mm and 2400 mm; long-term average minimum and maximum temperatures ranging from –5 to 39 °C and –12 to 49 °C; elevation above sea level

of -16 m and -6 m; soil texture ranging from silty clay loam to silty loam and clay loam or silty clay loam. The total area of the studied lands was 70 hectares in Region One and 80 hectares in Region Two. The dominant crop in Region One was wheat, while barley was the dominant crop in Region Two. The experimental treatments included conventional tillage in region one (CT₁), no-till for first year + residue conservation + no rotation in region one (NT₁₁), no-till for second year + residue conservation + no rotation in region one (NT₁₂), no-till for second year + residue conservation + rotation in region one (NT_{12R}), no-till for third year + residue conservation + rotation in region one (NT_{13R}), conventional tillage in region two (CT₂), no-till for first year + residue conservation + no rotation in region two (NT₂₁), and no-till for second year + residue conservation + no rotation in region two (NT₂₂). In order to examine the effect of sampling depth on soil physical and chemical properties as well as soil permeability and infiltration rate, soil samples were collected from four depths (0-5, 5-10, 10-20, and 20-30 cm) adjacent to the double-ring infiltrometer test sites to enhance the accuracy of permeability and infiltration tests in both conventional and conservation agriculture fields. Each sample was coded independently and transferred to the laboratory for analysis. Soil properties, including organic carbon content, electrical conductivity, porosity, and bulk density, were measured and calculated, while soil moisture, cumulative infiltration, and infiltration rate were assessed in the field. For soil moisture measurement, composite samples were collected at two growth stages- late stem elongation and early grain filling-for wheat in region one and barley in region two. After collection using an auger, soil samples were weighed, oven-dried at 105 °C for 24 hours, and reweighed to determine the gravimetric moisture content. Soil infiltration was measured using the double-ring infiltrometer method in a 10-meter radius at three randomly selected locations, with three replications per site, in late July 2023. Suspicious or erroneous data encountered during testing were excluded from the final results or retested. At the end of this stage, the final infiltration permeability values were recorded in centimeters per hour for each individual replication. Following laboratory and field calculations, the collected data were statistically analyzed using SAS software (version 9.4), and mean comparisons were performed using Duncan's multiple range test.

Results: The results showed that the highest amount of soil organic carbon with averages of 1.54, 1.46, 1.42 and 1.36 percent, at depths of 0-5, 10-5, 10-20 and 20-30 cm, respectively, the highest soil porosity with averages of 61.00, 33.67, 57.59 and 54.33 percent, at depths of 0-5, 10-5, 10-20 and 20-30 cm, respectively, the lowest soil electrical conductivity with averages of 1.25, 1.36 and 1.88 dS/m, at depths of 0-5, 10-5 and 10-20 cm, respectively, and the lowest soil bulk density with averages of 1.24, 1.26 and 1.28 g/cm³, at the same depths, respectively, was observed in the NT_{13R} treatment. In addition, the organic carbon content in the conventional tillage treatment (CT₁) at the depths of 10-20 cm and 20-30 cm was higher than in some no-tillage treatments. The NT_{12R} treatment, however, had the lowest porosity at all measured depths. According to the results, only at the deepest soil depth (20-30 cm) the NT₁₂ treatment exhibit the lowest electrical conductivity, while the highest electrical conductivity at all depths belonged to the conventional tillage treatments. Moreover, the minimum bulk density in the 20-30 cm soil depth was found for the CT₂ treatment, and there was no significant difference between this treatment

and the NT_{13R}, NT₁₂, and NT_{12R} treatments. Also, the highest soil moisture content with averages of 13.49 and 17.48 percent at depths of 0-10 and 10-30 cm, respectively, was observed in the NT_{12R} treatment. Notably, soil moisture in the no-tillage treatments NT_{12R} (Region 1) and NT₂₂ (Region 2) increased compared to the conventional tillage treatments for these regions (CT₁ and CT₂) by 46.3% and 85.4%, respectively, at the 0-10 cm soil depth, and by 37% and 35.9%, respectively, at the 10-30 cm soil depth. On the other hand, the highest cumulative infiltration and water infiltration rate in the soil with averages of 20.50 cm and 84.83 mm/h, respectively, were observed in the CT₁ treatment.

Conclusion: The results of the present study indicated that observing the three interconnected principles of conservation agriculture, including no-tillage + residue preservation + rotation, improved most soil properties over time, except for cumulative infiltration and water infiltration rate in the soil during the implementation of this study. The water infiltration rate in the soil may also increase with the passage of time and a longer history of conservation agriculture. Therefore, it can be concluded that no-tillage treatment has positive effects on soil properties, as it leads to an increase in soil organic carbon, a decrease in soil electrical conductivity, and a rise in soil moisture. However, achieving better results requires a multi-year period, which can even impact on crop yield. Overall, the findings of this study regarding soil chemical indicators revealed that conservation agriculture demonstrates different behaviors depending on various regions and climates. It is recommended that future research consider a variety of different environmental factors (such as rainfall, temperature, and heat) and management practices (such as different planters, tillage methods, crop varieties, and planting dates) to better explain the mechanisms of processes affecting soil chemical properties under conservation agriculture.

Cite this article: Mirzaei, Mohammad Mehdi, Zaefarian, Faezeh, Asadi, Mohammad Esmail, Mahzari, Samaneh. 2025. The effect of conservation agriculture on some soil properties in rainfed lands of Aqqala County, Golestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (3), 1-34.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23452.3796

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تأثیر کشاورزی حفاظتی بر برخی خصوصیات خاک در اراضی دیم شهرستان آق‌قلا، استان گلستان

محمد مهدی میرزایی¹، فائزه زعفریان^{2*}، محمد اسماعیل اسدی³، سمانه محضری⁴

1. دانشجوی دکتری زراعت، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: mohands_mirzaei@yahoo.com
2. نویسنده مسئول، استاد گروه زراعت، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: fa_zaefarian@yahoo.com
3. استادیار و پژوهشگر بین‌المللی خاک و آب و کشاورزی حفاظتی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: iwc977127@yahoo.com
4. دانش‌آموخته دکتری علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: samanemahzari@yahoo.com

چکیده	اطلاعات مقاله
سابقه و هدف: هدف اصلی در پژوهش‌های خاک، بازنگری در بوم‌سازگان کشاورزی به‌منظور دستیابی به روش‌های پایدار تولید و سودآوری است که ضمن حفاظت از خاک به‌عنوان یک منبع تجدیدناپذیر تأمین معیشت خانوارها و حفاظت از منابع طبیعی را به بهترین شکل در دستور کار قرار دهد. نوع سامانه کشت تغییرات بی‌شماری را در خصوصیات خاک (ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژی خاک) ایجاد می‌کند. مناطق دیم مستعد تخریب زمین بوده و با دوره‌های خشک و مسأله کمبود آب مواجه هستند. بنابراین، انتخاب روش‌های خاک‌ورزی مناسب و مدیریت صحیح منابع موجود، اقدامات مهمی برای توانمندسازی کشاورزی مطابق با اصول کشاورزی پایدار تلقی می‌شود. به‌دلیل حداقل دست‌کاری خاک و حفظ بقایای محصول در کشاورزی حفاظتی، خاک به‌عنوان محیط رشد و توسعه محصول می‌تواند به‌لحاظ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی شرایط متفاوتی را در کشاورزی حفاظتی و مرسوم داشته باشد. کشاورزی حفاظتی مجموعه‌ای از روش‌های مدیریتی است که می‌تواند جذب کربن در خاک را افزایش دهد و شرایط خاک را برای افزایش رشد محصول بهبود بخشد. بر این اساس هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی تأثیر کشاورزی حفاظتی بر برخی خصوصیات خاک در اراضی دیم است.	نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی تاریخ دریافت: 03/12/26 تاریخ ویرایش: 04/03/06 تاریخ پذیرش: 04/05/07 واژه‌های کلیدی: تخلخل، حفاظتی، سرعت نفوذ، کربن آلی

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در استان گلستان، در دو منطقه از شهرستان آق‌قلا واقع در شمال استان با عرض جغرافیایی 37 درجه و صفر دقیقه شمالی و طول جغرافیایی 54 درجه و 27 دقیقه شرقی در تاریخ 1401/8/8 شروع و

در تاریخ 1402/8/9 خاتمه یافت. ویژگی منطقه یک (حومه) و منطقه دو (بخش هفت) به ترتیب متوسط بارندگی کوتاه مدت 250-350 و 130-210 میلی متر، متوسط تبخیر سالیانه 1800 و 2400 میلی متر، متوسط حداقل و حداکثر درجه حرارت درازمدت 5- تا 39 و 12- تا 49 سانتی گراد، ارتفاع از سطح دریا 16- و 6- متر، دامنه بافت خاک سیلت رس لوم تا سیلت لوم و رس لوم یا سیلت رس لوم، مساحت کل اراضی مورد مطالعه 70 و 80 هکتار، کشت غالب منطقه یک گیاه گندم و کشت غالب در منطقه دو گیاه جو است. تیمارهای آزمایشی شامل خاک ورزی مرسوم در منطقه یک (CT₁)، سال اول بی خاک ورزی + حفظ بقایا + بدون تناوب در منطقه یک (NT₁₁)، سال دوم بی خاک ورزی + حفظ بقایا + بدون تناوب در منطقه یک (NT₁₂)، سال دوم بی خاک ورزی + حفظ بقایا + رعایت تناوب در منطقه یک (NT_{12R})، سال سوم بی خاک ورزی + حفظ بقایا + رعایت تناوب در منطقه یک (NT_{13R})، خاک ورزی مرسوم در منطقه دو (CT₂)، سال اول بی خاک ورزی + حفظ بقایا + بدون تناوب در منطقه دو (NT₂₁) و سال دوم بی خاک ورزی + حفظ بقایا + بدون تناوب در منطقه دو (NT₂₂) بودند. برای بررسی تأثیر عمق نمونه برداری روی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و همچنین میزان تراوش پذیری خاک، نمونه برداری از چهار عمق (صفر تا 5، 5 تا 10، 10 تا 20 و 20 تا 30 سانتی متری) خاک از مجاورت محل آزمایش استوانه مضاعف به منظور افزایش دقت آزمایش تراوش پذیری مزارع کشت مرسوم و کشاورزی حفاظتی انجام و هر نمونه مستقل کدگذاری و برای انجام آزمایش ها به آزمایشگاه منتقل شد و برخی خصوصیات شامل کربن آلی خاک، قابلیت هدایت الکتریکی خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک و تخلخل خاک، اندازه گیری و محاسبه شد و رطوبت خاک، نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب نیز در مزرعه اندازه گیری شدند. جهت اندازه گیری رطوبت خاک، طی دو مرحله اواخر ساقه دهی و اوایل دانه بندی گندم در منطقه یک و جو در منطقه دو به صورت مرکب پس از برداشت با مته نمونه برداری، خاک توزین و به مدت 24 ساعت در دمای 105 درجه سلسیوس در آون نگهداری و مجدداً توزین شد و درصد رطوبت وزنی خاک محاسبه شد. برای اندازه گیری تراوش پذیری خاک به روش استوانه مضاعف در یک شعاع 10 متری در سه تکرار برای هر محل در اواخر تیرماه سال 1402 انجام شد. از میان تکرارها، داده های مشکوک و یا داده هایی که در حین انجام آزمایش به هر دلیلی با مشکل مواجه بودند؛ از نتایج نهایی حذف و یا آزمایش مجدد صورت گرفت. در پایان این مرحله مقادیر تراوش پذیری نهایی به سانتی متر در ساعت برای هر تکرار جداگانه ثبت شد. بعد از اتمام محاسبات آزمایشگاهی و مزرعه ای، داده های حاصله با استفاده از نرم افزار SAS نسخه (9/4) مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند و مقایسه میانگین ها نیز به روش آزمون چنددامنه ای دانکن انجام شد.

یافته ها: نتایج نشان داد که بیشترین مقدار کربن آلی خاک در عمق های صفر تا 5، 5 تا 10، 10 تا 20 و 20 تا 30 سانتی متری به ترتیب با میانگین های 1/54، 1/46، 1/42 و 1/36 درصد، بیشترین تخلخل خاک در عمق های صفر تا 5، 5 تا 10، 10 تا 20 و 20 تا 30 سانتی متری به ترتیب با میانگین های 61/00، 33/67، 57/59 و 54/33 درصد، کمترین میزان هدایت الکتریکی خاک در عمق های صفر تا 5، 5 تا 10، 10 تا 20 سانتی متر به ترتیب با میانگین های 1/25، 1/36 و 1/88 دسی زیمنس بر متر و کمترین جرم مخصوص ظاهری خاک به ترتیب با

میانگین‌های ۱/۲۴، ۱/۲۶ و ۱/۲۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب در تیمار NT_{13R} مشاهده شد. هم‌چنین میزان کربن آلی تیمار خاک‌ورزی مرسوم (CT₁) در عمق‌های ۱۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر بیش‌تر از برخی تیمارهای بی‌خاک‌ورزی بود. از طرف دیگر، کم‌ترین میزان تخلخل در تمامی عمق‌ها برای تیمار NT_{12R} ثبت شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، تنها در پائین‌ترین عمق خاک (۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) تیمار NT₁₂ کم‌ترین میزان هدایت الکتریکی را داشت؛ درحالی‌که بیش‌ترین میزان هدایت الکتریکی در همه عمق‌ها مربوط به تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم بود. هم‌چنین کم‌ترین جرم مخصوص ظاهری در عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر خاک مربوط به تیمار CT₂ بود که بین این تیمار و تیمارهای NT_{13R}، NT₁₂ و NT_{12R} اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. علاوه‌براین، بیش‌ترین میزان رطوبت خاک با میانگین‌های ۱۳/۴۹ و ۱۷/۴۸ درصد به‌ترتیب در عمق‌های صفر تا ۱۰ و ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر مربوط به تیمار NT_{12R} بود. از طرفی رطوبت خاک در تیمارهای بی‌خاک‌ورزی NT_{12R} (منطقه یک) و NT₂₂ (منطقه دو) نسبت به تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم مربوط به این مناطق (CT₁ و CT₂) در عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متر خاک به‌ترتیب افزایش ۴۶/۳ و ۸۵/۴ درصدی و در عمق ۳۰-۱۰ سانتی‌متر به‌ترتیب افزایش ۳۷ و ۳۵/۹ درصدی داشتند از طرف دیگر، بیش‌ترین نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک به‌ترتیب با میانگین‌های ۲۰/۵۰ سانتی‌متر و ۸۴/۸۳ میلی‌متر بر ساعت در تیمار CT₁ رؤیت شد.

نتیجه‌گیری: نتایج پژوهش حاضر بیانگر آن بود که رعایت اصول سه‌گانه به‌هم‌پیوسته کشاورزی حفاظتی شامل بی‌خاک‌ورزی + حفظ بقایا + تناوب با گذشت زمان سبب بهبود اکثر خصوصیات خاک به‌جز نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک در طول مدت اجرای این پژوهش شد که با گذشت زمان و سابقه طولانی‌تر کشاورزی حفاظتی سرعت نفوذ آب در خاک نیز امکان افزایش وجود دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تیمار بی‌خاک‌ورزی اثرات مثبتی روی خصوصیات خاک دارد؛ به‌طوری‌که تیمار بی‌خاک‌ورزی سبب افزایش میزان کربن آلی خاک، کاهش هدایت الکتریکی خاک و افزایش میزان رطوبت خاک گردید؛ اما برای حصول نتایج بهتر نیاز به یک دوره چندساله است که می‌تواند حتی در عملکرد گیاه زراعی هم اثرگذار باشد. به‌طورکلی نتایج این پژوهش در بخش شاخص‌های شیمیایی خاک نشان داد که کشاورزی حفاظتی با توجه به مناطق و اقلیم‌های مختلف، رفتارهای متفاوتی از خود نشان داده است. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده عوامل محیطی (مانند بارندگی، دما، درجه حرارت) و مدیریتی مختلف (مانند انواع کارنده‌ها، انواع خاک‌ورزی، نوع ارقام، تاریخ کاشت) را برای توضیح بهتر فرآیندهای تأثیرگذار کشاورزی حفاظتی بر خواص شیمیایی خاک، در نظر گرفته شود.

استناد: میرزایی، محمد مهدی، زعفریان، فائزه، اسدی، محمد اسماعیل، محضری، سمانه (۱۴۰۴). تأثیر کشاورزی حفاظتی بر برخی خصوصیات خاک در اراضی دیم شهرستان آق‌قلا، استان گلستان. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۲ (۳)، ۱-۳۴.

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23452.3796



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

هدف اصلی در پژوهش‌های خاک، بازنگری در بوم‌سازگان کشاورزی به‌منظور دستیابی به‌روش‌های پایدار تولید و سودآوری است که ضمن حفاظت از خاک به‌عنوان یک منبع تجدیدناپذیر (1) تأمین معیشت خانوارها و حفاظت از منابع طبیعی را به‌بهترین شکل در دستور کار قرار دهد (2 و 3). سامانه کشت مرسوم که در آن از ادوات شخم و دیسک به‌عنوان وسیله اصلی آماده‌سازی بستر بذر و کنترل علف‌های‌هرز استفاده می‌شود (4)، تغییرات بی‌شماری را در خصوصیات خاک (ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک) ایجاد می‌کند (5). از یک‌طرف، وارونگی خاک¹ در خاک‌ورزی مرسوم منجر به تولید رواناب و رسوب شده و از طرف دیگر، فراوانی و شدت عملیات خاک‌ورزی، جرم مخصوص ظاهری خاک و کربن آلی خاک را در لایه زیر گاوآهن تغییر می‌دهد (6).

مناطق دیم مستعد تخریب زمین بوده و با دوره‌های خشک و مسأله کمبود آب مواجه هستند. بنابراین، انتخاب روش‌های خاک‌ورزی مناسب و مدیریت صحیح منابع موجود، از جمله اقدامات مهم برای توانمندسازی کشاورزی مطابق با اصول کشاورزی پایدار است (7). اتخاذ فناوری‌های مقرون‌به‌صرفه حفاظت از منابع مانند کشاورزی حفاظتی می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌نیاز ضروری برای دستیابی به افزایش بهره‌وری عمل کند (8) و یک رویکرد اکوسیستمی برای بهبود و حفظ بهره‌وری و افزایش سود و منابع پایه باشد (3). سه اصل به‌هم پیوسته کشاورزی حفاظتی شامل عدم خاک‌ورزی یا حداقل بهم‌خوردگی خاک، حفظ بقایای گیاهی روی سطح خاک یا پوشش دائمی خاک و تناوب زراعی با تنوع

گیاهی در کنار سایر روش‌های یکپارچه و مناسب مدیریت کشاورزی است (9). به‌دلیل حداقل دستکاری خاک و حفظ بقایای محصول در کشاورزی حفاظتی، خاک به‌عنوان محیط رشد و توسعه محصول می‌تواند به‌لحاظ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی شرایط متفاوتی را در کشاورزی حفاظتی و مرسوم داشته باشد (10). این در حالی است که اثر نوع خاک‌ورزی روی این خصوصیات به شرایط محیطی از جمله دما، رطوبت یا بارندگی و مدت‌زمان استفاده از سیستم کشت انتخابی وابسته است (11 و 12). سوزا و همکاران (2021) در پژوهشی اعلام کردند که بهبود و حفظ خواص شیمیایی خاک در کشاورزی حفاظتی به شرایط آب و هوایی (دما و بارندگی) بستگی دارد (13). بی‌خاک‌ورزی با کاهش اثرات منفی مرتبط با شخم که شامل تخریب ساختار خاک‌دانه‌ها، کاهش محتوای کربن آلی، تشدید اتلاف آب و افزایش شستشوی نیتрат است؛ ذخیره‌سازی آب خاک و حفظ کود را افزایش می‌دهد (14). وجود پوشش کاه و کلش نیز موجب می‌شود فرسایش مستقیم خاک توسط قطرات باران تا حدی کنترل شود و پدیده فشردگی خاک کم‌تر و رواناب کاهش یابد (15). کاه، کلش و پوشش سطح خاک علاوه‌بر حفظ رطوبت بیش‌تر و نفوذ بیش‌تر آب، با کاهش تبخیر و تعرق از سطح خاک به افزایش عملکرد گیاه زراعی کمک می‌کند (16). حفظ رطوبت خاک در کشاورزی حفاظتی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم، به‌ویژه در زمین‌های دیم، در فصل رشد و در زمان‌هایی که بارندگی کم است، می‌تواند بسیار مفید باشد (17). با اجرای کشاورزی حفاظتی در اثر حفظ بقایا در سطح خاک و کاهش خاک‌ورزی، فرسایش خاک کاهش یافته و با حفاظت از خاک به‌عنوان یک خدمت بوم‌سازگانی²،

می‌توان اثرات ناشی از فرسایش را به‌طور معنی‌دار در مزارع کاهش داد (18). عدم خاک‌ورزی به‌تنهایی، به‌دلیل حفظ رطوبت بیش‌تر در خاک منجر به افزایش عملکرد محصول شده است (19). بررسی مروری بر مطالعات کشاورزی حفاظتی، به مزایای بی‌شمار کشاورزی حفاظتی از جمله افزایش کربن آلی و عناصر غذایی، کاهش فرسایش خاک، کاهش مصرف سوخت و نیروی کار و غیره اشاره دارد (20).

عملکرد و مزایای بی‌خاک‌ورزی برای تأثیرگذاری بر شاخص‌های فیزیکی خاک می‌تواند به‌تعدادی از عوامل خاک، نحوه مدیریت و در نهایت اقلیم بستگی داشته باشد. زمان مدیریت بی‌خاک‌ورزی و کلاس بافتی خاک می‌تواند عوامل اصلی تأثیرگذار بر شاخص‌های فیزیکی خاک باشند (21). کاهش تراوش‌پذیری خاک در اثر فشردگی باعث افزایش رواناب در سطح مزرعه می‌شود و در نتیجه فرسایش خاک را افزایش می‌دهد (22). سیستم‌های خاک‌ورزی مرسوم با کاربردهای خاک‌ورزی فشرده منجر به تخریب خاک می‌شود (23). فشردگی خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک را افزایش داده و باعث کاهش تهویه خاک می‌گردد (22). با توجه به تغییرات آب و هوایی در اثر افزایش حوادث خشکسالی و طوفان‌های طولانی، مدیریت بی‌خاک‌ورزی نقش مهمی در تأمین افزایش نفوذ، کاهش هدررفت آب سطحی توسط رواناب و افزایش آب در دسترس گیاه خواهد داشت (24).

فشردگی خاک باعث کاهش حجم خلل و فرج خاک می‌شود و در نتیجه جرم مخصوص ظاهری خاک را افزایش می‌دهد. بنابراین جرم مخصوص ظاهری خاک می‌تواند به‌عنوان یکی از شاخص‌های تشخیص و کمی‌سازی فشردگی خاک به‌کار رود. جرم مخصوص ظاهری خاک در حالت طبیعی و

بدون فشردگی خاک برای بافت‌های مختلف در دامنه مشخصی قرار می‌گیرد و چنانچه مقدار جرم مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شده از حد بالایی دامنه طبیعی فراتر رود، نشان‌دهنده وقوع فشردگی در خاک است، از طرف دیگر نمی‌توان در مورد اثر خاک‌ورزی حفاظتی بر جرم مخصوص ظاهری خاک اظهارنظر قطعی کرد زیرا اثر این روش خاک‌ورزی بر جرم مخصوص ظاهری خاک براساس شرایط اقلیمی، بافت خاک و نوع محصول تغییر می‌کند (22). نتایج تعدادی از پژوهش‌های انجام شده نشان‌دهنده عدم تأثیر معنی‌دار خاک‌ورزی حفاظتی بر جرم مخصوص ظاهری خاک است (25). جرم مخصوص ظاهری و تراوش‌پذیری لایه‌های سطحی خاک در بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم بیش‌تر بوده و به‌طورکلی خاک‌ورزی حفاظتی باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری لایه سطحی خاک می‌شود (26). نتایج پژوهشی در کرواسی نیز نشان می‌دهد که روش کم‌خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم، جرم مخصوص ظاهری لایه صفر تا 20 سانتی‌متری خاک را افزایش می‌دهد (27). نتایج مقایسه اثر خاک‌ورزی مرسوم و بی‌خاک‌ورزی بر جرم مخصوص ظاهری خاک در استان مازندران نشان می‌دهد که بی‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم جرم مخصوص ظاهری خاک را افزایش می‌دهد (28)؛ در صورتی که بررسی اثر خاک‌ورزی بر جرم مخصوص ظاهری خاک در ترکیه نشان می‌دهد که روش کم‌خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم، جرم مخصوص ظاهری خاک را کاهش می‌دهد (29). نتایج پژوهشی دیگر در هند نیز نشان می‌دهد که در سامانه کشت برنج - برنج، روش بی‌خاک‌ورزی جرم مخصوص ظاهری خاک را در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم کاهش می‌دهد (30).

اثرات کشاورزی حفاظتی و مرسوم بر خصوصیات خاک زراعی تا حد زیادی به عمق نمونه برداری (خاک سطحی یا خاک عمقی) بستگی دارد (5). به عنوان مثال، بهترین تغییر در خصوصیات فیزیکی خاک در زمین های کشاورزی حفاظتی فقط در عمق صفر تا 10 سانتی متری به دست آمد و این بهبود خصوصیات فیزیکی خاک با افزایش عمق به طور معنی داری کاهش یافت (31). نتایج مطالعه ای نشان داد که در خاک های رسی در عمق صفر تا 10 سانتی متر تأثیر کشاورزی حفاظتی بر همه شاخص های کیفیت خاک مثبت بود؛ اما شاخص کیفیت خاک با افزایش عمق خاک، تغییرات چشمگیری نداشت (31).

از آنجائی که در حدود 70 درصد اراضی استان به کشت دیم اختصاص دارد و اکثر این اراضی در بخش های شمالی استان شامل شهرستان های گنبد، آق قلا و گمیشان قرار دارند؛ بنابراین ضرورت دارد راه کارهایی جهت کاهش فرسایش آبی و خاکی، سیل و رواناب، ریزگردها، کاهش تبخیر و ذخیره رطوبت، کاهش مصرف سوخت و انرژی، کاهش هزینه های تولید و نیروی کار، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای، کاهش مصرف نهاده های مصنوعی، افزایش خدمات اکوسیستمی، افزایش تنوع زیستی خاک، افزایش کربن آلی در خاک، بهبود سلامت و حاصلخیزی خاک به منظور پایداری تولید محصولات و معیشت اقتصادی خانوار خصوصاً در اراضی دیم با تأکید بر حفظ منابع خاک و آب و محیط زیست برای نسل های آینده و تاب آوری در برابر تغییرات اقلیم و خشکسالی صورت گیرد.

بنابراین، با توجه به تأثیر کشاورزی حفاظتی بر شاخص های فیزیکی و کیفی خاک، این مطالعه با هدف ارزیابی اثر این سامانه کشاورزی و مرسوم بر برخی خصوصیات خاک در اعماق متفاوت در اراضی

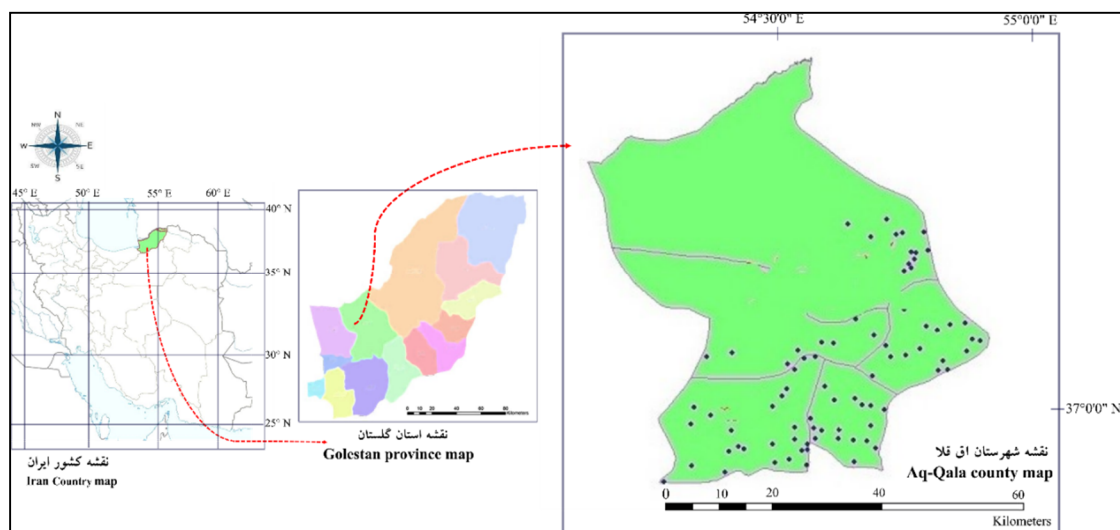
دیم شهرستان آق قلا انجام شد. استفاده از شیوه های نوین کشاورزی (حفاظتی) مانند بی خاک وری که در حقیقت نوعی کشاورزی هوشمند اقلیمی است؛ در شرایط فعلی مواجه با اثرات تغییرات اقلیمی (بحران آب و خشکسالی، سیل، افزایش ریزگردها و غبار، گرمایش کره زمین، آلودگی های زیست محیطی و تخریب خاک) نقش مهمی در حفاظت از منابع خاک و آب، پایداری تولید و کاهش اثرات زیست محیطی دارد.

مواد و روش ها

پژوهش حاضر در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی در سال 1401-1402 با سه تکرار در استان گلستان، در دو منطقه از شهرستان آق قلا واقع در شمال استان با عرض جغرافیایی 37 درجه و صفر دقیقه شمالی و طول جغرافیایی 54 درجه و 27 دقیقه شرقی اجرا شد (شکل های 1 و 2). این نکته قابل ذکر است که به سبب ویژگی های اکولوژیکی متفاوت دو منطقه (جدول 1)، تیمارهای مرتبط با سامانه کشت حفاظتی در این دو منطقه با یکدیگر تفاوت داشت. تیمارهای آزمایشی شامل خاک وری مرسوم در منطقه یک (حومه) (CT₁)، سال اول بی خاک وری + حفظ بقایا + بدون تناوب در منطقه یک (NT₁₁)، سال دوم بی خاک وری + حفظ بقایا + بدون تناوب در منطقه یک (NT₁₂)، سال دوم بی خاک وری + حفظ بقایا + رعایت تناوب در منطقه یک (NT_{12R})، سال سوم بی خاک وری + حفظ بقایا + رعایت تناوب در منطقه یک (NT_{13R})، خاک وری مرسوم در منطقه دو (بخش هفت) (CT₂)، سال اول بی خاک وری + حفظ بقایا + بدون تناوب در منطقه دو (NT₂₁) و سال دوم بی خاک وری + حفظ بقایا + بدون تناوب در منطقه دو (NT₂₂) بودند. در ضمن مدیریت زراعی

سال در هر منطقه مورد مطالعه مدیریت (کودهای پایه و سرک، مبارزه با علف‌های هرز و بیماری‌های قارچی) زراعی به‌طور یکسان انجام شد (شکل 3).

مزارع (تغذیه، مبارزه با آفات و بیماری‌ها و علف‌های هرز) به‌سبب شرایط اقلیمی و محصول زراعی متفاوت، به‌طور مجزا در هر منطقه به اجرا درآمد، ولی طی دو



شکل 1- نقشه جغرافیایی موقعیت منطقه مورد مطالعه، شهرستان آق‌قلا، استان گلستان.

Figure 1. Geographical map of the location of the study area, Aq Qala county, Golestan province.



شکل 2- تصاویری از محل اجرای مناطق مورد مطالعه منطقه یک تصویر بالا و منطقه دو تصویر پایین، شهرستان آق‌قلا، استان گلستان.

Figure 2. Images of the study areas: Region One on the top image and Region Two on the bottom image, Aq Qala County, Golestan Province.



شکل 3- تصاویر برخی تیمارها و عملیات صحرایی مناطق مورد مطالعه، شهرستان آق قلا، استان گلستان.

Figure 3. Images of some treatments and field operations in the study areas, Aq Qala County, Golestan Province.

علف‌های هرز و آفات در برخی مزارع بی‌خاک‌ورزی، تردد ادوات (سم‌پاش بوم‌دار پشت تراکتوری و ساقه‌خردکن) به‌منظور مبارزه شیمیایی و مکانیکی بیش‌تر شد (جدول 1).

به‌دلیل این‌که در منطقه دوم، بی‌خاک‌ورزی روشی نوپا محسوب می‌شود و در حقیقت زمینی نبوده که سابقه اجرای سه سال بی‌خاک‌ورزی را داشته باشد بنابراین در این منطقه تیمار سال سوم استفاده نشد. ذکر این نکته لازم است که به‌سبب تراکم بیش‌تر

جدول 1- مشخصات جغرافیایی، آب‌وهوایی و زراعی دو منطقه مورد مطالعه.

Table 1. Geographical, climatic and agricultural characteristics of the two study regions.

منطقه دو Region 2	منطقه یک Region 1	مشخصات کلی General characteristics
18000	15000	وسعت کل اراضی براساس خرد اقلیم (هکتار) Total land area by microclimate (ha)
80	70	مساحت کل اراضی منطقه (هکتار) Total area of the region's land (ha)
25	5	میانگین فاصله محدوده مورد مطالعه تا مرکز شهر (کیلومتر) Average distance from the study area to the city center (km)
کم - بازده Low-yield	متوسط - بازده Medium-yield	درجه کیفیت اراضی Land quality level
رس لوم / سیلت رس لوم Clay-Loam / Silty-Clay-Loam	سیلت رس لوم / سیلت لوم Silty-Clay-Loam / Silty-Loam	دامنه بافت خاک Soil texture range
6-35.5	4.5-7.2	دامنه شوری خاک در عمق 0-30 سانتی‌متر (دسی‌زیمنس بر متر) Soil salinity range at a depth of 0-30 cm (dS/m)
308	345	متوسط بارندگی درازمدت (میلی‌متر) Long-term average rainfall (mm)
-12 to 49	-5 to 39	متوسط حداقل و حداکثر درجه حرارت درازمدت (سانتی‌گراد) Long-term average minimum and maximum temperatures (°C)
2400	1800	متوسط تبخیر سالیانه (میلی‌متر) Average annual evaporation (mm)
-6	-16	ارتفاع از سطح دریا (متر) Altitude (m)
جو Barley	گندم Wheat	محصول اصلی مزارع The main crop of the farms
ندارد No	دارد Yes	امکان تناوب (دارد/ ندارد) Possibility of crop rotation (yes/no)
بیش‌تر More	کم‌تر Less	تردد و چرای دام بعد برداشت Post-harvest livestock movement and grazing
4	6	میانگین تعداد تردد ادوات در تیمارهای بی‌خاک‌ورزی Average number of agricultural machinerys traffics in no-till treatments during the study period (times)
3	4	میانگین تعداد تردد ادوات در تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم Average number of agricultural machinerys traffics in conventional tillage treatments during the study period (times)

اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی، شیمیایی خاک:

برای بررسی تأثیر عمق نمونه‌برداری بر روی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و همچنین میزان تراوش‌پذیری خاک، نمونه‌برداری از چهار عمق (صفر تا پنج، پنج تا 10، 10 تا 20 و 20 تا 30 سانتی‌متری) خاک از مجاورت محل آزمایش استوانه مضاعف (به جهت افزایش دقت آزمایش تراوش‌پذیری) مزارع کشت مرسوم و کشاورزی حفاظتی انجام و هر نمونه مستقل کدگذاری و برای انجام آزمایش‌ها به آزمایشگاه منتقل و خصوصیات مختلف کربن آلی خاک (OC)، به‌روش اکسیداسیون (32)، هدایت الکتریکی (EC)، به‌روش عصاره گل اشباع و دستگاه هدایت‌سنج (33)، جرم مخصوص ظاهری (BD)، به‌روش روش کلوخه (34) و رطوبت وزنی (SM) به‌روش درصد تفاوت وزنی (USDA, 2004) و تراوش‌پذیری خاک به‌روش استوانه مضاعف با استفاده از نقشه محدوده مورد مطالعه و انطباق نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی در محدوده یاد شده، تعداد 20 نقطه آزمایشی در یک پراکندگی مناسب در محدوده مطالعات برای انجام آزمایش‌های تراوش‌پذیری انتخاب و سپس پیرامون هر یک از این نقاط در یک شعاع 10 متری، در سه محل کاملاً تصادفی آزمایش‌های تراوش‌پذیری به‌روش استوانه‌های مضاعف در سه تکرار برای هر محل در اواخر تیرماه انجام شد. از میان تکرارها، داده‌های مشکوک و یا داده‌هایی که در حین انجام آزمایش به‌هر دلیلی با مشکل مواجه بودند؛ از نتایج نهایی حذف و یا آزمایش مجدد صورت گرفت. در پایان این مرحله مقادیر تراوش‌پذیری نهایی به سانتی‌متر در ساعت برای هر تکرار جداگانه ثبت شد (35)، اندازه‌گیری شد. تعداد نمونه‌ها براساس مساحت مزرعه مورد مطالعه متغیر بود؛ اما به‌طور متوسط سه نمونه از هر عمق از هر تکرار مزرعه (سه تکرار و از هر تکرار سه

نمونه از هر عمق که مجموعاً 27 نمونه از هر تیمار) به‌روش الگوی تصادفی W (زیگزاگی) برداشته شد. به دلیل این‌که در مراحل حساس نیاز آبی گیاه در طول دوره رشد یعنی اواخر ساقه‌دهی و اوایل دانه‌بندی عمق نفوذ ریشه جهت دریافت رطوبت به ترتیب 10 و 30 سانتی‌متر بود؛ بنابراین برای تعیین درصد رطوبت وزنی و سنجش ذخیره رطوبت در زمان مراحل حساس گیاه در تیمارها، نمونه‌ها از دو عمق صفر تا 10 و 10 تا 30 سانتی‌متری در تاریخ 20 اسفند 1401 و 10 اردیبهشت 1402 در طی دو مرحله اواخر ساقه‌دهی و اوایل دانه‌بندی گندم در منطقه یک و گیاه جو در منطقه دو به‌صورت مرکب پس از برداشت با مته نمونه‌برداری خاک، توزین و به مدت 24 ساعت در دمای 105 درجه سلسیوس در آون نگهداری و مجدداً توزین شد.

اندازه‌گیری و محاسبه نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب به خاک: برای اندازه‌گیری و محاسبه نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب به خاک از روش دابل رینگ یا استوانه دوگانه استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها در تیرماه سال 1402 انجام شد (25).

تجزیه و تحلیل آماری: بعد از اتمام محاسبات آزمایشگاهی و مزرعه‌ای، داده‌های حاصله ابتدا وارد نرم‌افزار Excel شده و با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه 9/4) (36) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. مقایسه میانگین‌ها نیز به‌روش آزمون چنددامنه‌ای دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

کربن آلی خاک: نتایج تجزیه واریانس داده‌های کربن آلی خاک در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی نشان داد که از نظر آماری اثر تیمارهای خاک‌ورزی بر کربن

آلی خاک در عمق‌های مختلف آن معنی‌دار بود ($P < 0/01$) (جدول 2). با توجه به این‌که در تیمارهای کشاورزی حفاظتی بقایای گیاهی در سطح خاک حفظ می‌گردد، بنابراین معنی‌دار بودن اختلاف بین تیمارهای خاک‌ورزی از نظر کربن آلی خاک قابل پیش‌بینی است. نتایج مقایسه میانگین میزان کربن آلی خاک در عمق‌های مختلف خاک نشان داد میزان کربن آلی در تیمارهای بی‌خاک‌ورزی در عمق‌های صفر تا پنج و پنج تا 10 سانتی‌متری خاک در مقایسه با تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم بیش‌تر بود که این به‌سبب حفظ بقایای گیاهی و عدم دستکاری مکانیکی خاک در خاک‌ورزی حفاظتی است که موجب افزایش کربن آلی در خاک در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم در لایه‌های سطحی می‌شود. براساس یافته‌های به‌دست آمده، بیش‌ترین میزان کربن آلی خاک در همه عمق‌ها با اختلاف معنی‌دار نسبت به سایر تیمارها مربوط به تیمار بی‌خاک‌ورزی NT_{13R} بود؛ و تنها در عمق صفر تا پنج سانتی‌متر اختلاف معنی‌داری بین این تیمار و تیمار بی‌خاک‌ورزی NT₁₁ مشاهده نشد (شکل 4). نتایج مطالعه المیکویی و همکاران (2023) نشان داد که میزان ماده آلی خاک در عمق‌های صفر تا 13 و 13 تا 26 سانتی‌متر در تیمار بی‌خاک‌ورزی (به‌ترتیب 1/96 و 1/75 درصد) بیش‌تر از خاک‌ورزی مرسوم (به‌ترتیب 1/33 و 1/10 درصد) بود (37). هم‌چنین لیو و همکاران (2021) بیان نمودند که روش بی‌خاک‌ورزی سبب افزایش معنی‌دار کربن آلی خاک در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم شده است (38). ژونگ و ژنگ (2020) بیان داشتند که در روش بی‌خاک‌ورزی کربن آلی 39/9 درصد بیش‌تر از خاک‌ورزی سنتی است (39). میلان و همکاران (2019) با ارزیابی خصوصیات شیمیایی خاک در

تیمار بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم در یک مزرعه کشاورزی حفاظتی ایالت کلرادو آمریکا اعلام کردند که کشاورزی حفاظتی بعد از 2/5 سال منجر به افزایش کربن آلی شد که حمایت از جوامع میکروبی به‌خصوص کرم خاکی را در پی داشته است (40). در مطالعه‌ای دیگر نیز شهپاز و همکاران (2017) گزارش دادند که کربن آلی خاک در خاک‌ورزی حفاظتی (3/57 g/kg) اندکی بیش‌تر از خاک‌ورزی مرسوم (3/56 g/kg) بود (41). که تمامی این نتایج در توافق با یافته‌های مطالعه حاضر می‌باشد. پژوهش‌گران بیان داشتند که علت اولیه از دست رفتن ماده آلی خاک دستکاری خاک می‌باشد و این مشکل می‌تواند با اعمال کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی که اثرات تخریبی کم‌تری در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم دارند، حل شود (42). نتایج مطالعات متعدد نشان‌دهنده تأثیر افزایش بی‌خاک‌ورزی بر میزان کربن آلی خاک در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم می‌باشند (5، 29، 30 و 43).

میزان کربن آلی تیمار خاک‌ورزی مرسوم CT₁ در عمق‌های 10 تا 20 و 20 تا 30 سانتی‌متر بیش‌تر از برخی تیمارهای بی‌خاک‌ورزی بجز تیمار NT_{13R} در منطقه یک بود (شکل 4) که می‌تواند ناشی از این امر باشد که در خاک‌ورزی مرسوم نیز مخلوط شدن بقایای گیاهی با خاک اتفاق می‌افتد که موجب افزایش میزان کربن آلی خاک در این تیمار می‌گردد و در نتیجه مقدار کربن آلی خاک را در این تیمار به‌میزان کربن آلی در تیمارهای بی‌خاک‌ورزی نزدیک کرده یا بیش‌تر می‌کند (44). نتایج مطالعه حاضر هم‌چنین نشان داد که میزان کربن آلی خاک با افزایش عمق خاک کاهش داشت که با نتایج پژوهش‌های قبلی مطابقت دارد (37 و 38).

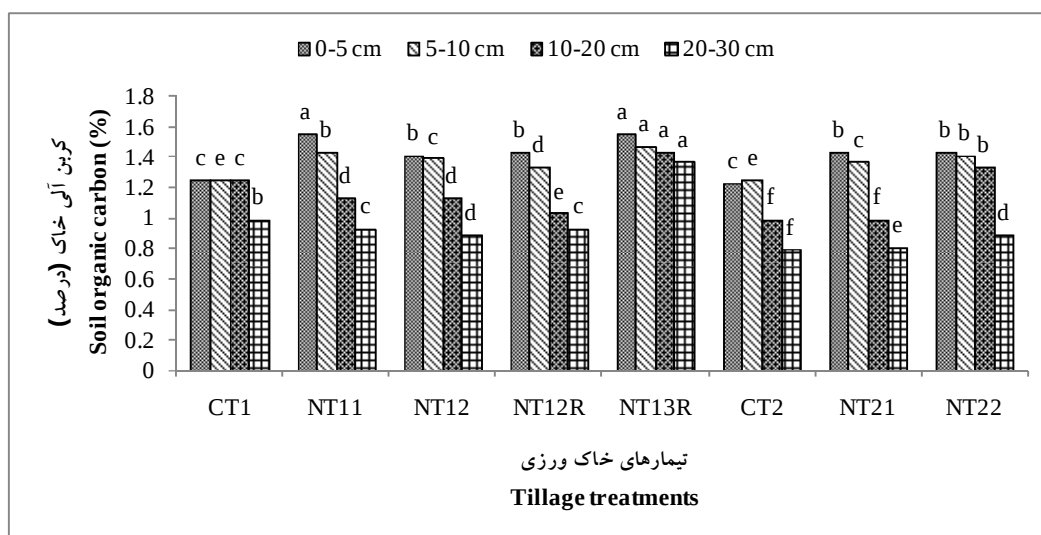
جدول 2- تجزیه واریانس داده‌های میزان کربن آلی در عمق‌های مختلف خاک در تیمارهای خاک‌ورزی.

Table 2. Analysis of variance of organic carbon content at different soil depths in tillage treatments.

عمق خاک Soil depth				درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییر Sources of variation
20-30	10-20	5-10	0-5		
0.007**	0.008**	0.007**	0.005*	2	بلوک Block
0.10**	0.09**	0.02**	0.04**	7	تیمار Treatment
0.0001	0.0001	0.0001	0.001	14	خطا Error
6.83	4.78	4.59	5.22		ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation (%)

* و ** به ترتیب نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال 5 و 1 درصد است

* and ** indicate significant differences at the 5 and 1 percent probability levels, respectively



شکل 4- مقایسه میانگین میزان کربن آلی خاک (درصد) تحت تأثیر روش‌های خاک‌ورزی در عمق‌های مختلف خاک (حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها (تیمارها) است).

Figure 4. Mean comparison of soil organic carbon content (percent) under the influence of tillage methods at different soil depths (Similar letters in each column indicate no significant difference between means (treatments)).

مورد تأثیر کشاورزی حفاظتی بر افزایش و یا کاهش کربن آلی وجود دارد. اوگلی و همکاران (2019) یک مجموعه داده جامع جهانی از 178 منطقه آزمایشی را با 1205 مشاهده گردآوری کردند و دریافتند که ذخیره‌سازی کربن آلی خاک تحت مدیریت بی‌خاک‌ورزی در برخی از انواع خاک و شرایط اقلیمی

در خاک‌های با ساختار ضعیف و خاک‌ورزی مرسوم، در دسترس بودن بیش‌تر کربن آلی همراه با افزودن نیتروژن به لایه‌های سطحی‌تر، باعث تحریک بخش میکروبی خاک می‌شود و در نتیجه، فرآیندهای تجزیه کربن آلی افزایش می‌یابد و منجر به از دست دادن کربن آلی خاک می‌شود (45). نتایج متناقضی در

می‌تواند بالاتر باشد، اما این احتمال وجود دارد که کشاورزی حفاظتی در آب و هوای خشک و سرد نسبت به آب و هوای استوایی، تأثیر کم‌تری در افزایش مقدار کربن آلی داشته باشد (46). الوی و همکاران (2023) در متاآنالیز جهانی به این نتیجه رسیدند که مدت زمان اجرای کشاورزی حفاظتی، تأثیر زیادی بر کربن آلی خاک و عناصر غذایی دارد و بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم به‌طور قابل‌توجهی باعث افزایش کربن آلی خاک شده است (5).

قابلیت هدایت الکتریکی خاک: نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به قابلیت هدایت الکتریکی خاک نشان داد که این ویژگی خاک در عمق‌های مختلف تحت تأثیر تیمارهای مختلف خاک‌ورزی قرار گرفت و اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای خاک‌ورزی از نظر قابلیت هدایت الکتریکی در عمق‌های مختلف خاک مشاهده شد ($P < 0/01$) (جدول 3). نتایج مقایسه میانگین قابلیت هدایت الکتریکی در عمق‌های مختلف خاک تحت تأثیر تیمارهای خاک‌ورزی نشان داد که در

تمامی عمق‌ها، میزان قابلیت هدایت الکتریکی خاک در تیمارهای بی‌خاک‌ورزی کم‌تر از تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم بود. کم‌ترین میزان قابلیت هدایت الکتریکی در اعماق صفر تا پنج، پنج تا 10 و 10 تا 20 سانتی‌متر خاک برای تیمار NT_{13R} ثبت شد که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشت. با توجه به نتایج به‌دست آمده، تنها در پائین‌ترین عمق خاک (20 تا 30 سانتی‌متر) تیمار NT₁₂ کم‌ترین میزان قابلیت هدایت الکتریکی را ثبت کرد و در این عمق تیمار NT_{13R} در رتبه بعدی از نظر کم‌ترین میزان قابلیت هدایت الکتریکی خاک قرار گرفت (شکل 5). از طرف دیگر، بیش‌ترین میزان قابلیت هدایت الکتریکی در همه عمق‌ها مربوط به تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم بود. در لایه‌های سطحی‌تر خاک یعنی عمق صفر تا پنج و پنج تا 10 سانتی‌متر، تیمار خاک‌ورزی مرسوم در منطقه یک (CT₁) به‌سبب بارش بیش‌تر باران در این منطقه (جدول 1) قابلیت هدایت الکتریکی کم‌تری را نسبت به تیمار خاک‌ورزی مرسوم منطقه دو (CT₂) داشت (شکل 5).

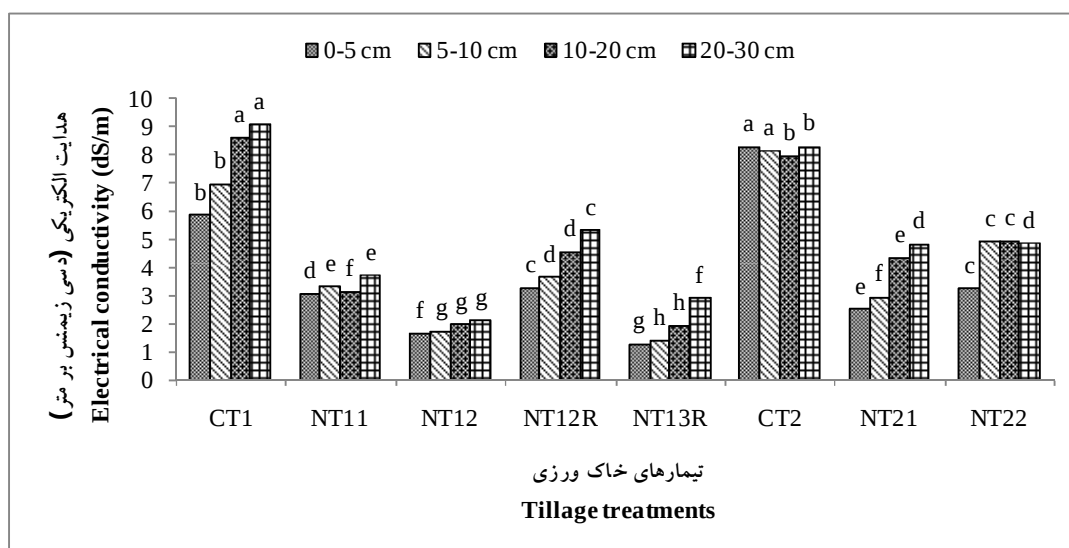
جدول 3- تجزیه واریانس داده‌های هدایت الکتریکی در عمق‌های مختلف خاک در تیمارهای خاک‌ورزی.

Table 3. Analysis of variance of electrical conductivity at different soil depths in tillage treatments.

عمق خاک Soil depth				درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییر Sources of variation
20-30	10-20	5-10	0-5		
0.03**	0.02**	0.02**	0.03**	2	بلوک Block
17.93**	18.69**	17.24**	16.25**	7	تیمار Treatment
0.0004	0.00003	0.0001	0.003	14	خطا Error
3.38	4.12	5.29	4.63		ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation (%)

* و ** به ترتیب نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال 5 و 1 درصد است

* and ** indicate significant differences at the 5 and 1 percent probability levels, respectively



شکل 5- مقایسه میانگین هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) تحت تأثیر روش‌های خاک‌ورزی در عمق‌های مختلف خاک (حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها (تیمارها) است).

Figure 5. Mean comparison of electrical conductivity (dS/m) under the influence of tillage methods at different soil depths (Similar letters in each column indicate no significant difference between means (treatments)).

خاک‌ورزی نشان داد که میزان تخلخل در تیمار NT_{13R} در همه عمق‌ها به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سایر تیمارها بود. هم‌چنین تیمار CT₁ در دو عمق بالایی خاک (صفر تا پنج و پنج تا 10 سانتی‌متر) بیش‌ترین تخلخل را بعد از تیمار NT_{13R} ثبت کرد، اما در عمق‌های 10 تا 20 و 20 تا 30 سانتی‌متر، بیش‌ترین تخلخل بعد از تیمار NT_{13R} به‌ترتیب مربوط به تیمارهای NT₁₂ و CT₂ بود هر چند اختلاف معنی‌داری بین تیمار NT₁₂ و CT₁ از نظر میزان تخلخل در عمق 10 تا 20 سانتی‌متر وجود نداشت. از طرف دیگر، کم‌ترین میزان تخلخل در تمامی عمق‌ها برای تیمار NT_{12R} ثبت شد (شکل 6). درصد تخلخل خاک رابطه معکوسی با میزان فشردگی آن دارد، به‌طوری‌که با افزایش فشردگی خاک، میزان تخلخل آن کاهش می‌یابد. یکی از عوامل فشردگی خاک فراوانی تردد ادوات کشاورزی می‌باشد که افزایش تردد سبب افزایش جرم مخصوص ظاهری و فشردگی خاک می‌شود (48). مطالعات نشان دادند که بخش اعظمی از کل فشردگی خاک ناشی از اولین

نتایج متناقضی با توجه به تأثیر کشاورزی حفاظتی بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک از مطالعات مختلف در گذشته گزارش شده است. لیو و همکاران (2019) و ژونگ و ژنگ (2020) خاطرنشان کردند که تجمع پتاسیم، کلسیم و منیزیم باعث افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک در زمین‌های کشاورزی حفاظتی شد (39) که متفاوت با نتایج مطالعه حاضر است. در تناقض با این نتایج، کالون و گورپریت (2014) کاهش قابلیت هدایت الکتریکی را در تیمارهای کشاورزی حفاظتی گزارش کردند (47) که با یافته‌های مطالعه حاضر مطابقت دارد.

تخلخل خاک: نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به تخلخل خاک در عمق‌های مختلف در تیمارهای خاک‌ورزی نشان داد که میزان تخلخل خاک در تمامی عمق‌های مورد مطالعه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمارهای خاک‌ورزی قرار گرفت و اختلاف معنی‌داری بین تیمارها از نظر درصد تخلخل مشاهده شد ($P < 0/01$) (جدول 4). نتایج مقایسه میانگین میزان تخلخل خاک در عمق‌های مختلف متأثر از روش‌های

علف‌های هرز و آفات اقدام به سمپاشی می‌کنند که این امر مستلزم چندین بار تردد ادوات در مزرعه است که می‌تواند موجب فشردگی لایه‌های بالایی خاک شود. در این مطالعه نیز به سبب تعداد بیش‌تر تردد در برخی تیمارهای بی‌خاک‌ورزی، میزان تخلخل خاک در این تیمارها در مقایسه با تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم کم‌تر به‌دست آمد، اما در تیمار بی‌خاک‌ورزی سال سوم (NT_{13R}) به‌دلیل کاهش تردد ادوات نسبت به سال‌های اول و دوم (به‌دلیل کاهش تراکم علف هرز و آفات) میزان تخلخل خاک بیش‌تر از تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم بود (شکل 6).

تردد یا ترددهای اولیه ماشین‌های کشاورزی است (49) و 10 بار عبور این ادوات می‌تواند تا عمق 50 سانتی‌متری خاک را تحت‌تأثیر قرار دهد (50). هم‌چنین در مطالعه دیگر، دورنر و همکاران (2022) بیان داشتند که افزایش تردد ادوات و فشردگی خاک سبب کاهش حجم خلل و فرج خاک می‌گردد که این امر خود موجب افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک و مقاومت بیش‌تر خاک به نفوذ آب در آن می‌شود (51). در سال اول و دوم بی‌خاک‌ورزی به‌سبب افزایش تراکم علف‌های هرز و شیوع برخی آفات، کشاورزان به ناچار به دفعات جهت مبارزه با

جدول 4- تجزیه واریانس داده‌های تخلخل خاک در عمق‌های مختلف خاک در تیمارهای خاک‌ورزی.

Table 4. Analysis of variance of soil porosity at different soil depths in tillage treatments.

عمق خاک Soil depth				درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییر Sources of variation
20-30	10-20	5-10	0-5		
1.04 ^{ns}	2.17 ^{**}	2.17 [*]	0.79 ^{ns}	2	بلوک Block
71.33 ^{**}	63.90 ^{**}	80.00 ^{**}	73.33 ^{**}	7	تیمار Treatment
0.42	0.17	0.36	0.65	14	خطا Error
3.36	6.82	5.17	4.53		ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation (%)

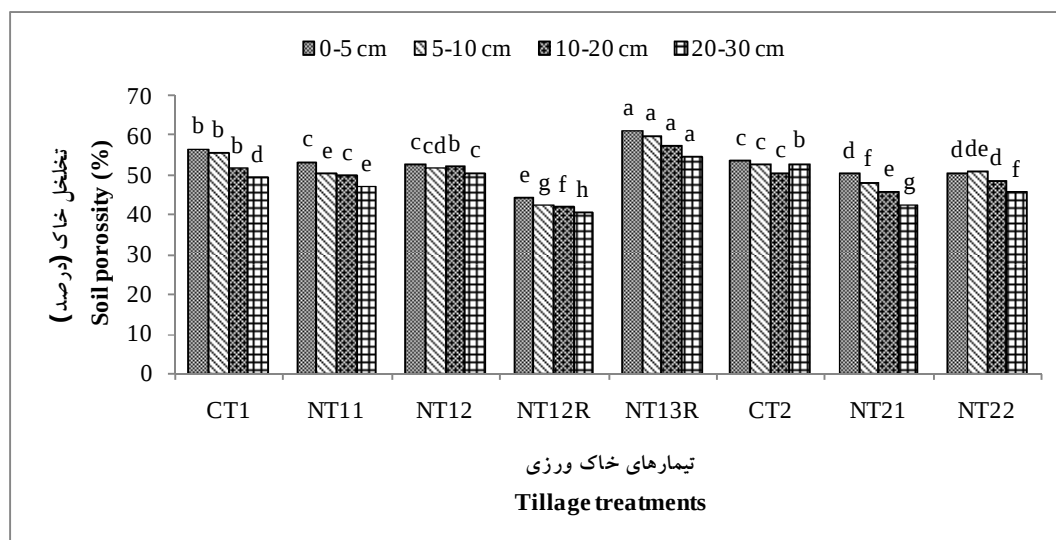
^{ns}، * و ** به‌ترتیب نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار و وجود اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال 5 و 1 درصد است
^{ns}, * and ** indicate no significant difference and significant difference at the 5 and 1 percent probability levels, respectively

تخلخل بیش‌تر خاک در تیمار خاک‌ورزی مرسوم (46/77 درصد) در مقایسه با خاک‌ورزی حفاظتی (43/94 درصد) بود (41). پژوهش‌گران بیان داشتند که دست‌کاری بیش‌تر خاک سبب افزایش تخلخل خاک می‌گردد؛ به‌طوری‌که کم‌ترین تخلخل در تیمار بی‌خاک‌ورزی و بیش‌ترین آن در خاک‌ورزی مرسوم به‌دست آمد (53 و 54). با توجه به نتایج مطالعه حاضر، میزان تخلخل خاک با افزایش عمق خاک در

تخلخل بیش‌تر خاک در خاک‌ورزی مرسوم در مقایسه با بی‌خاک‌ورزی در نتایج مطالعات متعددی گزارش شده است. عظیم‌زاده و همکاران (2002) گزارش کردند که تخلخل خاک در عمق صفر تا 10 سانتی‌متر خاک در خاک‌ورزی مرسوم بیش‌تر از بی‌خاک‌ورزی بود که به‌سبب کم‌تر بودن وزن مخصوص ظاهری خاک است (52). نتایج مطالعه شهباز و همکاران (2017) نیز نشان‌دهنده میزان

وزن مخصوص ظاهری بیش‌تر سامانه مرسوم در این عمق‌ها نسبت دادند (52).

همه تیمارها کاهش یافت. عظیم‌زاده و همکاران (2002) کم‌تر بودن تخلخل خاک در عمق‌های پائین‌تر در خاک‌ورزی مرسوم نسبت به بی‌خاک‌ورزی را به



شکل 6- مقایسه میانگین تخلخل خاک (درصد) تحت تأثیر روش‌های خاک‌ورزی در عمق‌های مختلف خاک (حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها (تیمارها) است).

Figure 6. Mean comparison of soil porosity (percent) under the influence of tillage methods at different soil depths (Similar letters in each column indicate no significant difference between means (treatments)).

(صفر تا پنج، پنج تا 10 و 10 تا 20 سانتی‌متر) در تیمار NT_{13R} که سابقه سال سوم را در بی‌خاک‌ورزی داشت به‌دست آمد، اگر چه اختلاف معنی‌داری بین این تیمار با تیمار CT₁ در عمق صفر تا پنج سانتی‌متر و با تیمارهای NT₁₂، CT₁ و NT_{12R} در عمق 10 تا 20 سانتی‌متر مشاهده نشد (شکل 7). هم‌چنین کم‌ترین جرم مخصوص ظاهری در عمق 20 تا 30 سانتی‌متر خاک مربوط به تیمار CT₂ بود که بین این تیمار و تیمارهای NT_{13R}، NT₁₂ و NT_{12R} اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. همان‌طور که از نتایج مشخص است، روش بی‌خاک‌ورزی در سال‌های اول و دوم به‌سبب عدم دستکاری خاک و تردد بیش‌تر ادوات به‌سبب مبارزه با علف‌های هرز و آفات که در این روش خاک‌ورزی تراکم آن‌ها افزایش یافته، موجب افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک در مقایسه با

جرم مخصوص ظاهری خاک: نتایج تجزیه واریانس داده‌های جرم مخصوص ظاهری خاک در عمق‌های مختلف نشان داد که اثر تیمارهای خاک‌ورزی بر این ویژگی خاک در تمامی عمق‌های مورد مطالعه معنی‌دار بود ($P < 0/01$) (جدول 5). پژوهش‌ها نشان دادند که فشردگی خاک موجب کاهش حجم منافذ بزرگ در خاک (تخلخل) شده و افزایشی را در جرم مخصوص ظاهری خاک القا می‌کند (51). همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در مطالعه حاضر تیمارهای خاک‌ورزی اثرات متفاوتی را بر فشردگی و در نتیجه تخلخل خاک داشتند که یکی از نتایج آن در جرم مخصوص ظاهری خاک مشاهده شد، جایی که تیمار NT_{13R} با بیش‌ترین میزان تخلخل، کم‌ترین جرم مخصوص ظاهری را داشته است (شکل 7). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که کم‌ترین جرم مخصوص ظاهری در سه عمق بالایی

بیان داشتند که با افزایش فعالیت بیولوژیکی و تنوع زیستی خاک در سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی (61)؛ بعد از یک دوره پنج تا 10 ساله در این سامانه‌ها، جرم مخصوص ظاهری خاک نسبت به سال‌های قبل آن کاهش می‌یابد (37 و 54) که مطابق با نتایج پژوهش حاضر است. از طرف دیگر، نتایج خان و همکاران (2017) و لیو و همکاران (2021) نشان‌دهنده جرم مخصوص ظاهری خاک بیش‌تر در خاک‌ورزی مرسوم نسبت به کم‌خاک‌ورزی بود (38). یافته‌های به‌دست آمده در برخی مطالعات بیانگر عدم تأثیرگذاری معنی‌دار خاک‌ورزی حفاظتی بر جرم مخصوص ظاهری خاک بودند (25 و 62). ذکر این نکته لازم است که در انتهای فصل رشد، به‌هم‌خوردگی زیاد خاک در خاک‌ورزی مرسوم و پودر شدن بیش از حد آن باعث می‌شود که رس خاک در اثر آبیاری‌های پیاپی به‌صورت متراکم درآمده و در نتیجه جرم مخصوص ظاهری خاک در این روش خاک‌ورزی به حد جرم مخصوص ظاهری در تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی برسد (63).

خاک‌ورزی مرسوم شد (شکل 7). نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان می‌دهد وزن مخصوص ظاهری خاک در تیمارهای بی‌خاک‌ورزی (به‌استثنای تیمار NT_{13R}) نسبت به تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم بیش‌تر بود. نتایج برخی از پژوهش‌ها نشان می‌دهد که خاک‌ورزی حفاظتی سبب افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک گردید (55). عظیم‌زاده و همکاران (2002) وزن مخصوص ظاهری کم‌تر در خاک‌ورزی مرسوم را به افزایش خلل و فرج خاک در عمق‌های سطحی به‌سبب دستکاری بیش‌تر خاک نسبت دادند (52). هم‌چنین، عنابی میلانی و سالک زمانی (2015) بیان نمودند که جرم مخصوص ظاهری بیش‌تر در روش بی‌خاک‌ورزی به‌سبب حرکت ادوات کشاورزی بیش‌تر در این تیمار است (56). نتایج مشابه با یافته‌های مطالعه حاضر در پژوهش‌های متعدد دیگر به‌دست آمده که همگی بیانگر جرم مخصوص ظاهری خاک بیش‌تر در تیمار بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم بود (37، 41، 54، 57، 58 و 59). سامانه بی‌خاک‌ورزی منجر به فشردگی بیش‌تر خاک به‌ویژه در خاک‌های رسی می‌شود (60)، اما پژوهش‌گران

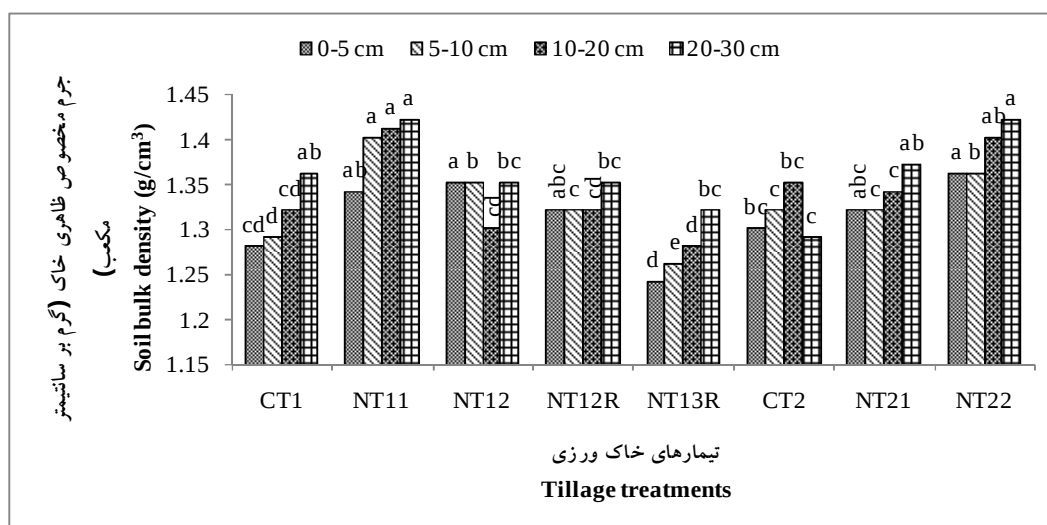
جدول 5- تجزیه واریانس داده‌های جرم مخصوص ظاهری خاک در عمق‌های مختلف خاک در تیمارهای خاک‌ورزی.

Table 5. Analysis of variance of soil bulk density at different soil depths in tillage treatments.

عمق خاک Soil depth				درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییر Sources of variation
20-30	10-20	5-10	0-5		
0.003 ^{ns}	0.007 ^{**}	0.01 ^{**}	0.01 ^{**}	2	بلوک Block
0.006 ^{**}	0.006 ^{**}	0.006 ^{**}	0.005 ^{**}	7	تیمار Treatment
0.001	0.0009	0.00005	0.0006	14	خطا Error
5.50	6.21	3.54	4.67		ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation (%)

^{ns} و ^{**} به‌ترتیب نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار و وجود اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال 5 و 1 درصد است

^{ns} and ^{**} indicate no significant difference and significant difference at the 5 and 1 percent probability levels, respectively



شکل 7- مقایسه میانگین جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی متر مکعب) تحت تأثیر روش‌های خاک‌ورزی در عمق‌های مختلف خاک (حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها (تیمارها) است).

Figure 7. Mean comparison of soil bulk density (g/cm^3) under the influence of tillage methods at different soil depths (Similar letters in each column indicate no significant difference between means (treatments)).

است (65). در مطالعه حاضر نیز این رابطه معکوس مشاهده شد جایی که به‌عنوان مثال تیمار بی‌خاک‌ورزی $\text{NT}_{13\text{R}}$ با بیش‌ترین تخلخل خاک کم‌ترین جرم مخصوص ظاهری را نتیجه داد. ذکر این نکته لازم است که در مطالعه حاضر، تردد و چرای دام در منطقه دو بعد برداشت باعث فشردگی مضاعف زمین و تراکم شد (جدول 1).

نتایج مطالعات متعدد نشان داده‌اند که کشاورزی حفاظتی اثرات قابل توجهی بر کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک دارد (66). به‌عنوان مثال، در یک مطالعه دوساله، بی‌خاک‌ورزی جرم مخصوص ظاهری را 20 درصد در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم در 10 سانتی‌متر بالایی افزایش داد (67)، در مقابل در یک مطالعه 30 ساله، بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم تنها چهار درصد جرم مخصوص ظاهری را بیش‌تر نمود (68). کاسام و همکاران (2022) اعلام کردند که تغییر در خصوصیات خاک با اجرای کشاورزی حفاظتی، به‌شدت تخریب خاک در گذشته بستگی دارد (69). بنابراین فقط با در نظر گرفتن تعداد سال اجرای کشاورزی حفاظتی نمی‌توان

در پژوهشی، کینوشیتا و همکاران (2017) بیان داشتند که در خاک‌هایی با کربن آلی بالا جرم مخصوص ظاهری خاک کم‌تر است (64) که با نتیجه به‌دست آمده برای تیمار بی‌خاک‌ورزی $\text{NT}_{13\text{R}}$ در مطالعه حاضر مطابقت دارد (شکل‌های 4 و 7). نتایج مطالعه حاضر نشان داد که با افزایش عمق خاک جرم مخصوص ظاهری آن افزایش یافت. عظیم‌زاده و همکاران (2002) بیان نمودند که کم‌ترین جرم مخصوص ظاهری خاک در عمق صفر تا 10 سانتی‌متر به‌دست آمد و در عمق‌های پائین‌تر جرم مخصوص ظاهری خاک افزایش داشت (52). عمق‌های پائین‌تر خاک به‌دلیل داشتن درصد رس بیش‌تر و تمرکز فشارهای خارجی وارد بر خاک در لایه‌های پائین، معمولاً دارای جرم مخصوص ظاهری بیش‌تری است (44). یافته‌های مطالعات قبلی دیگر نیز نشان‌دهنده افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک با افزایش عمق است (38، 57 و 59) که در توافق با نتایج مطالعه حاضر می‌باشند. جرم مخصوص ظاهری خاک به‌طور معکوس با تخلخل خاک مرتبط است و یک شاخص برای ظرفیت آب و انتقال آن در خاک

انتظار بهبود خصوصیات فیزیکی خاک را داشت و نیاز است که درجه تخریب خاک در گذشته هم بررسی و مقایسه شود. با این حال، علت کاهش مقادیر جرم مخصوص ظاهری خاک را پس از یک دوره طولانی مدت بی‌خاک‌ورزی، حفظ بقایای گیاهی گزارش کردند هرچند که خاطرنشان کردند که مقادیر جرم مخصوص ظاهری بیش‌تر احتمالی در روش‌های بی‌خاک‌ورزی، زیر مقادیر آستانه جرم مخصوص ظاهری است که ممکن است برای جوانه‌زنی بذر، رشد ریشه و رشد گیاه مضر باشد. از طرف دیگر، شیرانی و همکاران (2002) نیز به این نتیجه رسیدند که با چند سال اجرای کشاورزی حفاظتی نمی‌توان انتظار بهبود شاخص‌های فیزیکی خاک را داشت (70).

رطوبت خاک: با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌های رطوبت خاک در عمق‌های مختلف تحت تأثیر تیمارهای خاک‌ورزی، اثر تیمارهای مورد مطالعه بر حفظ رطوبت در خاک در عمق‌های مورد مطالعه معنی‌دار بود (جدول 6). با توجه به این‌که در تیمارهای بی‌خاک‌ورزی به‌ویژه با سابقه دو و سه سال بقایای گیاهی در لایه سطحی حفظ می‌شوند، بنابراین بیش‌تر بودن میزان رطوبت خاک و وجود اختلاف معنی‌دار آن‌ها با خاک‌ورزی مرسوم قابل پیش‌بینی بود. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که میزان رطوبت در عمق صفر تا 10 سانتی‌متر خاک به‌ترتیب در تیمارهای NT_{12R}، NT₂₂، NT_{13R} و NT₁₂ به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم CT₁ و CT₂ بود، در حالی‌که بین تیمارهای NT_{12R} و NT₂₂ اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. هم‌چنین تیمار بی‌خاک‌ورزی NT₁₁ نیز اختلاف معنی‌داری با تیمار خاک‌ورزی مرسوم CT₁ نداشت و علی‌رغم بیش‌تر بودن میزان رطوبت در تیمار CT₁ نسبت به تیمار بی‌خاک‌ورزی NT₂₁، اما این اختلاف معنی‌دار نبود (شکل 8). نتایج مقایسه میانگین در عمق 10 تا 30 سانتی‌متر خاک نیز تا حدودی مشابه عمق سطحی‌تر

(صفر تا 10 سانتی‌متر) بود، به‌طوری‌که میزان رطوبت خاک در تیمارهای NT_{12R}، NT₂₂ و NT_{13R} به‌صورت معنی‌داری بیش‌تر از تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم (CT₁ و CT₂) بود. در این عمق اگرچه میزان رطوبت اندازه‌گیری‌شده در تیمار بی‌خاک‌ورزی NT₁₂ نسبت به تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم (CT₁ و CT₂) بیش‌تر بود؛ اما اختلاف مشاهده شده بین تیمارهای NT₁₂ و CT₁ معنی‌دار نبود (شکل 8). نتایج بررسی فعل و انفعالات طولانی‌مدت سه تیمار خاک‌ورزی مرسوم، کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی در یک آب و هوای استوایی نیمه‌خشک نشان داد که در روش بی‌خاک‌ورزی رطوبت خاک 28/8 درصد بیش‌تر از خاک‌ورزی مرسوم بود (39). در مطالعه حاضر نیز میزان رطوبت خاک در تیمارهای بی‌خاک‌ورزی NT_{12R} (منطقه یک) و NT₂₂ (منطقه دو) نسبت به تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم مربوط به این مناطق (CT₁ و CT₂) در عمق صفر تا 10 سانتی‌متر خاک به‌ترتیب افزایش 46/3 و 85/4 درصدی و در عمق 10 تا 30 سانتی‌متر به‌ترتیب افزایش 37 و 35/9 درصدی داشتند که در توافق با نتایج پژوهش فوق است. در پژوهش دیگر نیز میزان رطوبت خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با تیمار خاک‌ورزی مرسوم در تمامی عمق‌های مورد مطالعه (صفر تا 10، 10 تا 20، 20 تا 30، 30 تا 40 و 40 تا 50 سانتی‌متر) افزایش 2/7 درصدی را نشان داد (59). در پژوهشی اسدی و صادق‌نژاد (2020) با بررسی بهره‌وری آب و عملکرد سویا در سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی و بقایای گیاهی بیان نمودند پوشش سطح زمین با بقایای گیاهی باعث می‌شود رطوبت بیش‌تر ناشی از بارندگی‌ها در خاک ذخیره شود و بیش‌تر آب کاربردی آبیاری نیز برای استفاده گیاه در خاک نفوذ کند و کاشت در شرایط بی‌خاک‌ورزی و حفظ بقایا بهبود بهره‌وری آب سویا نسبت به‌روش مرسوم به‌مقدار 15/3 درصد را نشان داد (71). ژونگ و ژونگ

(2020) فعل و انفعالات طولانی مدت سه تیمار خاک‌ورزی مرسوم، کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی را در یک آب و هوای استوایی نیمه خشک بررسی کردند و به نتیجه رسیدند که در روش بی‌خاک‌ورزی رطوبت خاک 28/8 درصد بیش‌تر از خاک‌ورزی سنتی به دست آمد (39).

محضرری و همکاران (2023) در برآورد منافع اقتصادی کشاورزی حفاظتی در مزارع گندم به این نتیجه رسیدند که مدیریت کشاورزی از طریق اجرای صحیح اصول به هم پیوسته کشاورزی حفاظتی منجر به بیشترین کاهش مصرف آب با 42 و 34 درصد در شهرستان آق‌قلا و بندرترکمن شد که باعث کاهش هزینه و سودآوری کشاورزان شد (72) و از آنجائی‌که آق‌قلا و بندرترکمن در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارند این موضوع اهمیت کشاورزی حفاظتی در مناطق خشک را گوشزد می‌کند. نتایج مطالعات متعددی نشان می‌دهد که تیمار بی‌خاک‌ورزی اثر افزایشی بر میزان رطوبت خاک در مقایسه با تیمار خاک‌ورزی مرسوم دارد (37، 44 و 73) که با یافته‌های مطالعه حاضر مطابقت دارند. این افزایش پتانسیل ذخیره رطوبت خاک به واسطه به هم خوردگی کم‌تر خاک و به دنبال آن تخریب کم‌تر لوله‌های موئین در خاک است (74).

در مطالعه‌ای افضل‌نیا و کرمی (2018) بیان نمودند که تأثیر بی‌خاک‌ورزی و حفظ بقایا در آن بر میزان رطوبت خاک با توجه به فصل کشت و زمان اندازه‌گیری رطوبت متفاوت است؛ به‌طوری‌که در فصل گرم (کشت بهاره) تفاوت بین بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم از نظر حفظ رطوبت بیش‌تر مشخص می‌شود و نقش بقایای گیاهی در این فصل اهمیت بیش‌تری می‌یابد (44). این پژوهش‌گران هم‌چنین بیان داشتند که تأثیر نوع خاک‌ورزی بر حفظ رطوبت در ابتدا و انتهای فصل متفاوت است؛ چرا که در ابتدای فصل، نوع خاک‌ورزی و مقدار بقایای گیاهی موجود تنها عوامل تعیین‌کننده در میزان رطوبت خاک می‌باشند؛ درحالی‌که در انتهای فصل به سبب کامل شدن تاج پوشش و پوشش کامل سطح مزرعه توسط گیاه زراعی نقش بقایای گیاهی کم‌رنگ‌تر می‌شود. با توجه به این‌که بخشی از زمان اندازه‌گیری رطوبت در مطالعه حاضر در اوایل اردیبهشت‌ماه بود؛ این امکان وجود دارد که نقش بقایای گیاهی کاهش یافته و به سبب انجام نمونه‌برداری در ابتدای فصل گرم تأثیر تیمارهای بی‌خاک‌ورزی با سابقه یک سال به خوبی معنی‌دار نشده و اختلاف آن‌ها با خاک‌ورزی مرسوم معنی‌دار نشد (شکل 8).

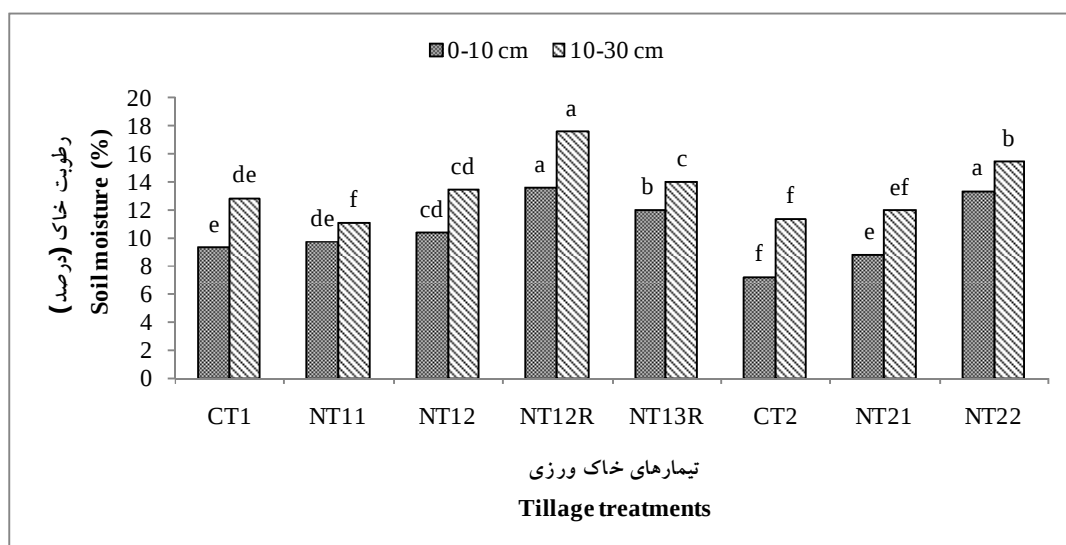
جدول 6- تجزیه واریانس داده‌های رطوبت خاک در عمق‌های مختلف خاک در تیمارهای خاک‌ورزی.

Table 6. Analysis of variance of soil moisture at different soil depths in tillage treatments.

عمق خاک Soil depth		درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییر Sources of variation
10-30	0-10		
0.006 ^{ns}	0.14 ^{**}	2	بلوک Block
14.38 ^{**}	15.15 ^{**}	7	تیمار Treatment
0.018	0.0008	14	خطا Error
5.01	4.70		ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation (%)

^{ns} و ^{**} به ترتیب نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار و وجود اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال 5 و 1 درصد است

^{ns} and ^{**} indicate no significant difference and significant difference at the 5 and 1 percent probability levels, respectively



شکل 8- مقایسه میانگین رطوبت خاک (درصد) تحت تأثیر روش‌های خاک‌ورزی در عمق‌های مختلف خاک (حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها (تیمارها) است).

Figure 8. Mean comparison of soil moisture (percent) under the influence of tillage methods at different soil depths (Similar letters in each column indicate no significant difference between means (treatments)).

تفاوت بین میزان تراوش‌پذیری آب در خاک در روش‌های مختلف خاک‌ورزی قابل توجه است، اما تغییر در خصوصیات فیزیکی خاک در اثر روش‌های خاک‌ورزی نیاز به زمان دارد که یک یا دو سال اعمال این روش‌ها به‌نظر تأثیر چشمگیری بر خصوصیات فیزیکی خاک نخواهد داشت، بنابراین نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ در برخی تیمارها اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند.

نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک؛ نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک در تیمارهای خاک‌ورزی نشان داد که روش‌های خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک داشتند (جدول 7). با توجه به متفاوت بودن میزان بهم‌خوردگی خاک و مدیریت بقایای گیاهی به‌ویژه در سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم،

جدول 7- تجزیه واریانس داده‌های نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک در تیمارهای خاک‌ورزی.

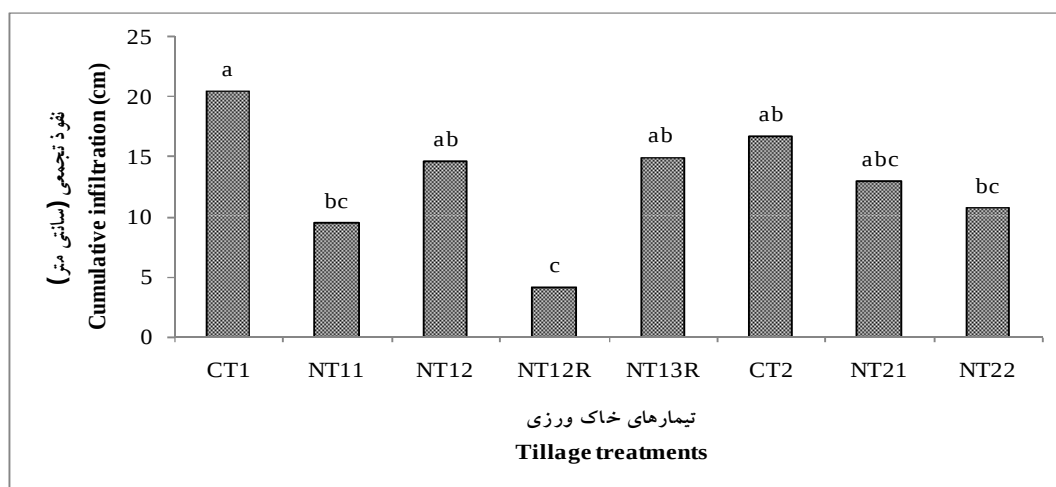
Table 7. Analysis of variance of cumulative infiltration and water infiltration rate in soil in tillage treatments.

سرعت نفوذ آب در خاک Water infiltration rate in soil	نفوذ تجمعی Cumulative infiltration	درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییر Sources of variation
313.02 ^{ns}	19.07 ^{ns}	2	بلوک Block
3044.29 ^{**}	79.19 [*]	7	تیمار Treatment
146.52	24.40	14	خطا Error
8.26	6.64	ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation (%)	

^{ns}، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار و وجود اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال 5 و 1 درصد است
^{ns}، *، and ** indicate no significant difference and significant difference at the 5 and 1 percent probability levels, respectively

داشتند. نتایج در این رابطه نشان می‌دهند که بی‌خاک‌ورزی پس از سه سال (NT_{13R}) در مقایسه با تیمارهای بی‌خاک‌ورزی دیگر کاهش کم‌تری را در میزان نفوذ و سرعت آب در خاک موجب شد، طوری‌که تیمار NT_{13R} اختلاف معنی‌داری با تیمار خاک‌ورزی مرسوم CT₂ از نظر مقدار نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک نشان نداد (شکل‌های 9 و 10).

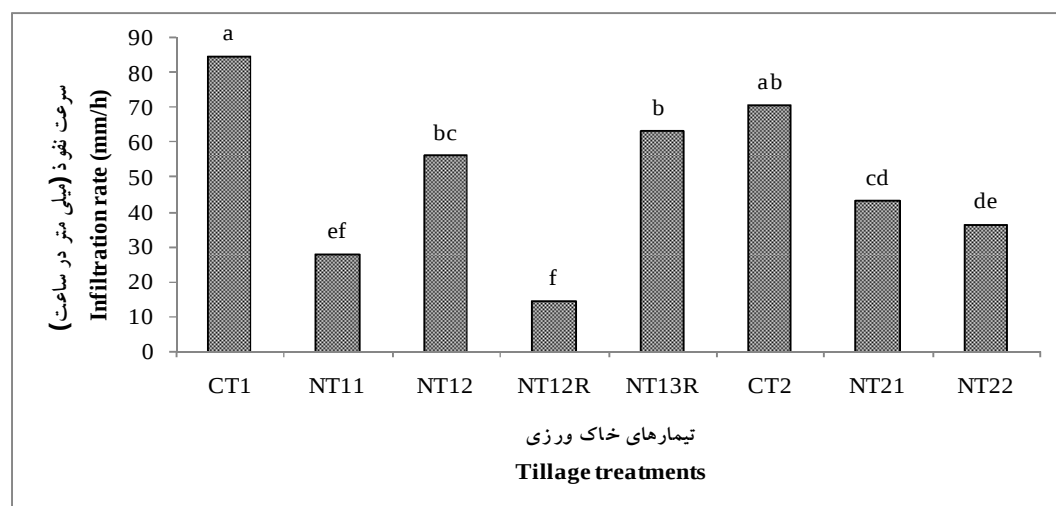
نتایج مقایسه میانگین تیمارهای مختلف خاک‌ورزی از نظر نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک نشان داد که تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم در هر دو منطقه مورد مطالعه (CT₁ و CT₂) بیش‌ترین مقدار نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک را داشته‌اند (شکل‌های 9 و 10). با توجه به نتایج به‌دست آمده، تیمارهای بی‌خاک‌ورزی در هر دو منطقه از این نظر مقادیر کم‌تری را نسبت تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم



شکل 9- مقایسه میانگین نفوذ تجمعی (سانتی‌متر) تحت تأثیر روش‌های خاک‌ورزی

(حروف مشابه در ستون‌ها نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها (تیمارها) است).

Figure 9. Mean comparison of cumulative infiltration (cm) under the influence of tillage methods (Similar letters in columns indicate no significant difference between means (treatments)).



شکل 10- مقایسه میانگین سرعت نفوذ آب در خاک (میلی‌متر در ساعت) تحت تأثیر روش‌های خاک‌ورزی

(حروف مشابه در ستون‌ها نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها (تیمارها) است).

Figure 10. Mean comparison of water infiltration rate in soil (mm/h) under the influence of tillage methods (Similar letters in columns indicate no significant difference between means (treatments)).

همان‌طور که نتایج مطالعه حاضر نشان داد بیش‌ترین نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک در تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم بدست آمد. مطالعات قبلی نیز گزارش کردند که خاک‌ورزی مرسوم بیش‌ترین مقدار نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک را داشت و این امر به دستکاری بیش‌تر خاک در تیمار خاک‌ورزی مرسوم نسبت داده شد که سبب افزایش مقدار آن‌ها در مقایسه با تیمار بی‌خاک‌ورزی شد (44). عنابی میلانی و سالک زمانی (2015) نیز سرعت نفوذ آب را در خاک در خاک‌ورزی مرسوم با گاوآهن برگردان‌دار بیش‌تر از بی‌خاک‌ورزی گزارش کردند و این امر را به علت عمیق بودن شخم در خاک‌ورزی مرسوم دانستند (56). سرعت نفوذ آب در خاک در خاک‌های فشرده به سبب کاهش تخلخل کل خاک و عمدتاً تعداد منافذ بزرگ کاهش می‌یابد. آب در خاک‌های فشرده نشده نسبت به خاک‌های فشرده شده از یک بافت خاک سریع‌تر نفوذ می‌کند (75). در مطالعه‌ای دیگر، شهباز و همکاران (2017) بیان داشتند که سرعت نفوذ آب در خاک در خاک‌ورزی مرسوم (25/35 mm/h) بیش‌تر از خاک‌ورزی حفاظتی (22/95 mm/h) بود (41). نتایج مطالعه وانگ و همکاران (2023) نیز نشان داد که مقاومت به نفوذ آب در خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی بیش‌تر از تیمار خاک‌ورزی مرسوم بود؛ به طوری که خاک‌ورزی مرسوم افزایش 21/6 تا 23/6 درصدی را در سرعت نفوذ آب در خاک در مقایسه با تیمار بی‌خاک‌ورزی در عمق 30-80 سانتی‌متر خاک نشان داد (59).

از طرف دیگر، مطالعات متعددی نشان دادند که میزان نفوذ آب در خاک در روش بی‌خاک‌ورزی بیش‌تر از خاک‌ورزی مرسوم بود. به عنوان مثال، نتایج مطالعه امانی و همکاران (2016) نشان داد که میزان تراوش‌پذیری خاک در بی‌خاک‌ورزی (12/1 mm/h) بیش‌تر از خاک‌ورزی مرسوم (6/8 mm/h) بود (76). گودرزی و همکاران (2021) نیز سرعت نفوذ آب در

خاک را در روش بی‌خاک‌ورزی دو برابر سرعت نفوذ در روش خاک‌ورزی مرسوم اعلام کردند (73). سوراب و همکاران (2021) با مطالعه تأثیر تیمارهای خاک‌ورزی و شیوه‌های مدیریت بقایای گیاهی بر شاخص‌های کیفیت خاک در سیستم کشت برنج-گندم در هند نشان دادند که کم‌ترین مقاومت به نفوذ در تیمارهای بی‌خاک‌ورزی و کشت مستقیم بود که دلیل آن را مقدار بیش‌تر کربن آلی و رطوبت خاک در زمان نمونه‌برداری اعلام کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که عملیات خاک‌ورزی باعث افزایش تراکم در خاک، افزایش جرم مخصوص ظاهری و در نتیجه افزایش مقاومت در برابر نفوذ آب می‌شود (77). در مطالعه حاضر نیز مشاهده می‌شود که میزان نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی با سه سال سابقه (NT_{13R}) اختلاف معنی‌داری با تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم نداشت، بنابراین می‌توان بیان داشت که با گذشت چند سال از روش بی‌خاک‌ورزی میزان فشردگی خاک با اصلاح ساختمان خاک کاهش یافته و نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک افزایش می‌یابد.

به‌طور کلی، به نظر می‌رسد مدت‌زمان طولانی‌تری نیاز است تا شاخص‌های فیزیکی خاک در تیمارهای کشاورزی حفاظتی به‌طور قابل‌توجهی بهبود یابند. سوزا و همکاران (2018) هم‌چنین بهبود اندک خصوصیات فیزیکی خاک را در نه سال اجرای بی‌خاک‌ورزی به دلیل افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک، افزایش خلل و فرج ریز و کاهش خلل و فرج درشت، گزارش کردند (78). چلیک و همکاران (2021) نتیجه گرفتند که بهترین تغییر در خصوصیات فیزیکی خاک در زمین‌های کشاورزی حفاظتی فقط در عمق صفر تا 10 سانتی‌متری به دست آمد و این بهبود خصوصیات فیزیکی خاک با افزایش عمق به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (31). ژونگ و ژونگ (2020) با ارزیابی طولانی‌مدت سه تیمار خاک‌ورزی

مرسوم، کم خاک ورزی و بی خاک ورزی در یک آب و هوای استوایی نیمه خشک بیان داشتند که اجرای طولانی مدت کشاورزی حفاظتی باعث افزایش قابل توجه عناصر غذایی در خاک، بیومس میکروبی خاک، افزایش فعالیت های آنزیمی، بهبود خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کاهش گازهای گلخانه ای می شود (39). چلیک و همکاران (2021) با ارزیابی شاخص کیفیت خاک در عمق های صفر تا 10، 10 تا 20 و 20 تا 30 سانتی متری خاک های رسی ترکیه نتیجه گرفتند که بی خاک ورزی به شرط اجرای آن در دوره های زمانی طولانی مدت، بهترین روش برای حفظ عملکرد و کیفیت کلی خاک در آب و هوای مدیترانه ای است (31). بلانکو - کانکویی و رويس (2018) اعلام کردند که عملکرد و مزایای بی خاک ورزی برای تأثیرگذاری بر شاخص های فیزیکی خاک می تواند به تعدادی از عوامل خاک، نحوه مدیریت و در نهایت اقلیم بستگی داشته باشد. زمان مدیریت بی خاک ورزی و نوع بافت خاک می تواند عوامل اصلی تأثیرگذار بر شاخص های فیزیکی خاک باشند و به طور کلی بیان کردند که تأثیر قطعی بر شاخص های فیزیکی خاک تا حدودی دشوار است (21).

همبستگی صفات مورد مطالعه: با توجه به نتایج به دست آمده در جدول 8، مقدار کربن آلی خاک همبستگی منفی و معنی داری در سطح یک درصد با میزان قابلیت هدایت الکتریکی شوری خاک (EC) داشت. این امر نشان می دهد که با افزایش میزان کربن آلی در خاک، شوری خاک کاهش می یابد که یکی از دلایل آن افزایش فعالیت بیولوژیکی خاک و تولید توده زنده بیش تر است (79). کاهش شوری خاک در نتیجه افزایش کربن آلی خاک را هم چنین می توان به توانایی کربن آلی به صورت محلول در آزادسازی عناصر تبدلی و وارد کردن عناصر به محلول خاک و سرانجام آبشویی آنها به ویژه سدیم نسبت داد (80).

با توجه به نتایج مطالعه حاضر، همبستگی مثبت و معنی داری در سطح پنج درصد بین کربن آلی خاک و میزان تخلخل و رطوبت خاک مشاهده شد (جدول 8). بر این اساس با افزایش میزان کربن آلی خاک میزان تخلخل خاک با اصلاح ساختمان خاک و نیز میزان رطوبت خاک افزایش می یابد که با نتایج ملکی و همکاران (2018) مطابقت دارد. این پژوهشگران نیز همبستگی بالا و مثبتی (0/95) را بین کربن آلی خاک و میزان رطوبت آن گزارش کردند (81). نتایج مطالعه حاضر هم چنین نشان داد که همبستگی مثبت و معنی داری بین میزان قابلیت هدایت الکتریکی (شوری) خاک و نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک وجود داشت. هم چنین همبستگی مثبت بالا و معنی داری در سطح یک درصد بین تخلخل خاک و سرعت نفوذ آب در خاک مشاهده شد (جدول 8)، که نشان دهنده این واقعیت است که تخلخل بالا و به عبارت دیگر فشردگی کم تر خاک سبب افزایش سرعت نفوذ آب در خاک می گردد که در توافق با نتایج فرخ نواز و همکاران (2012) (75) و دورنر و همکاران (2022) (51) می باشد است. یافته های مطالعه حاضر نشان داد که جرم مخصوص ظاهری خاک همبستگی منفی و معنی داری در سطح پنج درصد با سرعت نفوذ آب در خاک داشت (جدول 8) که این در توافق با نتایج مطالعه اوکوری و نیراج (2022) (65) است که بیان داشتند با کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک ظرفیت آب و میزان انتقال آن را در خاک افزایش می دهد. نتایج هم چنین آشکار ساختند که یک همبستگی مثبت و معنی دار در سطح پنج درصد بین میزان رطوبت خاک و نفوذ تجمعی آب در خاک وجود داشت؛ در حالی که بین میزان رطوبت خاک و سرعت نفوذ آب در خاک همبستگی منفی و معنی داری در سطح پنج درصد مشاهده شد (جدول 8).

جدول 8- نتایج همبستگی بین خصوصیات اندازه‌گیری شده خاک.

Table 8. Correlation results between measured soil properties.

سرعت نفوذ آب Water infiltration rate	نفوذ تجمعی Cumulative infiltration	رطوبت Moisture	جرم مخصوص ظاهری Bulk density	تخلخل Porosity	هدایت الکتریکی Electrical conductivity	کربن آلی Organic carbon
						1 کربن آلی Organic carbon
					1 هدایت الکتریکی Electrical conductivity	-0.62**
				1 تخلخل Porosity	-0.03	0.50*
			1 جرم مخصوص ظاهری Bulk density	-0.39	-0.07	-0.01
		1 رطوبت Moisture	0.03	-0.37	-0.36	0.41*
	1 نفوذ تجمعی Cumulative infiltration	0.42*	0.06	-0.33	0.44*	-0.28
1 سرعت نفوذ آب Water infiltration rate	-0.15	-0.50*	-0.49*	0.72**	0.42*	-0.06

نتیجه‌گیری کلی

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که تیمارهای مختلف خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر خصوصیات خاک داشتند، به‌طوری‌که تیمار بی‌خاک‌ورزی سبب افزایش میزان کربن آلی خاک، کاهش قابلیت هدایت الکتریکی خاک و افزایش میزان رطوبت خاک شد، درحالی‌که این تیمار در سال‌های اول سبب فشردگی خاک و کاهش تخلخل به‌سبب تردد بالای ادوات کشاورزی و در نتیجه افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک شده است؛ اما با گذشت چند سال با اصلاح ساختمان خاک میزان تخلخل و جرم مخصوص ظاهری خاک بهبود می‌یابد. از طرف دیگر در تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم به‌سبب دستکاری بیش‌تر خاک و تخلخل بیش‌تر، نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب در خاک بیش‌تر از تیمارهای بی‌خاک‌ورزی بود؛ اما با گذشت چند سال اختلاف بین خاک‌ورزی

مرسوم و بی‌خاک‌ورزی از این نظر کاهش یافته و معنی‌دار نبود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تیمار بی‌خاک‌ورزی اثرات مثبتی روی خصوصیات خاک دارد؛ اما برای حصول نتایج بهتر نیاز به یک دوره چند ساله است و بعد از طی این دوره تأثیر معنی‌داری بر خصوصیات خاک داشته که می‌تواند در عملکرد گیاه زراعی هم اثرگذار باشد. به‌طورکلی نتایج این پژوهش در بخش شاخص‌های شیمیایی خاک نشان داد که کشاورزی حفاظتی با توجه به مناطق و اقلیم‌های مختلف، رفتارهای متفاوتی از خود نشان داده است. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده عوامل محیطی (مانند بارندگی، دما، درجه حرارت) و مدیریتی مختلف (نظیر انواع کارنده‌ها، انواع خاک‌ورزی، نوع ارقام، تاریخ کاشت) را برای توضیح بهتر فرآیندهای تأثیرگذار کشاورزی حفاظتی بر خواص شیمیایی خاک، در نظر گرفته شود.

تقدیر و تشکر

به این وسیله از همکاری و مساعدت بخش فنی مهندسی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان و آزمایشگاه بخش خصوصی خاک شناسی، کمال تشکر و قدردانی به عمل می آید.

داده ها، اطلاعات و دسترسی

داده های این پژوهش مربوط به رساله دکتری نویسنده اول می باشد که با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی می باشند.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این پژوهش به شکل ذیل

است:

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها می باشد.

حمایت مالی

حمایت مالی این پژوهش در قالب گرنت دانشجویی نویسنده اول این مطالعه بوده است.

منابع

- 1.Asadi, M. E. (2024). Soil, the life beneath our feet. Virast Publication, Gorgan, Iran, 46p. [In Persain]
- 2.Coulibaly, S. F., Aubert, M., Brunet, N., Bureau, F., Legras, M., & Chauvat, M. (2022). Short-term dynamic responses of soil properties and soil fauna under contrasting tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 215, 105191.
- 3.Kassam, A. (2019). Advances in conservation agriculture Volume 1: Systems and science. Burleigh Dodds, Science Publishing, Cambridge, UK.
- 4.Kassam, A. (2020). Advances in Conservation Agriculture, Volume 2: Practice and Benefits. Burleigh Dodds, Science Publishing, Cambridge, UK.
- 5.Lv, L., Gao, Z., Liao, K., Zhu, Q., & Zhu, J. (2023). Impact of conservation tillage on the distribution of soil nutrients with depth. *Soil and Tillage Research*, 225, 105527.
- 6.Jin, H., Hongwen, L., Xiaoyan, W., McHugh, A. D., Wenying, L., Huanwen, G., & Kuhn, N. J. (2007). The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China. *Soil and Tillage Research*, 94, 493-502.
- 7.Breza-Boruta, B., Kotwica, K., & Bauza-Kaszewska, J. (2021). Effect of tillage system and organic matter management interactions on soil chemical properties and biological activity in a spring wheat short-time cultivation. *Energies*, 14(21), 7451.
- 8.Jayaraman, S., Dalal, R. C., Patra, A. K., & Chaudhari, S. K. (2021). Conservation agriculture: A sustainable approach for soil health and food security. Springer Singapore, Singapore.

9. Cordeau, S. (2024). Moving conservation agriculture from principles to a performance-based production system. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 39(12), 1-7.
10. Kassam, A., Friedrich, T., & Derpsch, R. (2019). Global spread of conservation agriculture. *International Journal of Environmental Studies*, 76, 29-51.
11. Gülser, F., Salem, S., & Gülser, C. (2020). Changes in some soil properties of wheat fields under conventional and reduced tillage systems in Northern Iraq. *Eurasian Journal of Soil Science*, 9, 314-320.
12. Nouri, A., Lee, J., Yoder, D. C., Jagadamma, S., Walker, F. R., Yin, X., & Arelli, P. (2020). Management duration controls the synergistic effect of tillage, cover crop, and nitrogen rate on cotton yield and yield stability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 301, 107007.
13. Souza, M., Júnior, V. M., Kurtz, C., dos Santos Ventura, B., Lourenzi, C. R., Lazzari, C. J. R., Ferreira, G. W., Brunetto, G., Loss, A., & Comin, J. J. (2021). Soil chemical properties and yield of onion crops grown for eight years under no-tillage system with cover crops. *Soil and Tillage Research*, 208, 104-117.
14. Zhang, H., Wang, B., Li Liu, D., Zhang, M., Leslie, L. M., & Yu, Q. (2020). Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: A case study of a catchment in tropical Australia. *Journal of Hydrology*, 585, 22-48.
15. Wu, L., Liu, X., Chen, J., Yu, Y., & Ma, X. (2022). Overcoming equifinality: time-varying analysis of sensitivity and identifiability of SWAT runoff and sediment parameters in an arid and semiarid watershed. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(3), 10-21.
16. Ricci, G. F., Jeong, J., De Girolamo, A. M., & Gentile, F. (2020). Effectiveness and feasibility of different management practices to reduce soil erosion in an agricultural watershed. *Land Use Policy*, 90, 104306.
17. Devkota, M., Devkota, K. P., & Kumar, S. (2022). Conservation agriculture improves agronomic, economic, and soil fertility indicators for a clay soil in a rainfed Mediterranean climate in Morocco. *Agricultural Systems*, 201, 103-107.
18. Moushani, S., Kazemi, H., Soltani, A., Asadi, M. E., & Hoseinalizadeh, M. (2021). Estimation and comparison of soil erosion in conservation and conventional agricultural systems (case study: Soybean agricultural lands in Gorgan county). *Applied Soil Research*, 9(2), 61-72.
19. Denardin, L. G. D. O., Carmona, F. D. C., Veloso, M. G., Martins, A. P., de Freitas, T. F. S., Carlos, F. S., & Anghinoni, I. (2019). No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. *Soil and Tillage Research*, 186, 64-69.
20. Friedrich, T. (2022). The ongoing search for sustainable agriculture. *Journal of Plant Science and Phytopathology*, 6, 133-134.
21. Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326(15), 164-200.
22. Afzalnia, S. (2021). Conservation Tillage. Research Institute of Agricultural Engineering Press, Karaj, Iran, 278p. [In Persain]
23. Karayel, D., & Šarauskis, E. (2019). Environmental impact of no-tillage farming. *Environmental Research Engineering and Management*, 75(1), 7-12.
24. Liu, L., & Basso, B. (2020). Impacts of climate variability and adaptation strategies on crop yields and soil organic carbon in the US Midwest. *PLoS ONE*, 15(1), e0225433.
25. Rasouli, F., Kiani Pouya, A., & Afzalnia, S. (2012). Effect of conservation tillage methods on soil salinity. In: Proceedings of 8th International Soil Science Congress, May 15-17, Izmir, Turkey, pp. 171.

26. Malecka, I., Blecharczyk, A., Sawinska, Z., & Dobrzeniecki, T. (2012). The effect of various long-term tillage systems on soil properties and spring barley yield. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 36(2), 217-226.
27. Bogunovic, I., Pereira, P., Galic, M., Bilandzija, D., & Kisic, I. (2020). Tillage system and farmyard manure impact on soil physical properties, CO₂ emissions, and crop yield in an organic farm located in a Mediterranean environment (Croatia). *Environmental Earth Sciences*, 79(3), 70.
28. Safahani Langeroodi, A. R., Dadgar, T., Pasani, R., & Alavian, M. (2016). Effect of long term residue management, tillage and application of nitrogen fertilizer on grain yield of maize (*Zea mays* L.) and soil properties. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 18(1), 32-48. [In Persain]
29. Çay, A. (2018). Impact of different tillage management on soil and grain quality in the Anatolian paddy rice production. *Plant, Soil and Environment*, 64(7), 303-309.
30. Yadav, G. S., Datta, R., Pathan, Sh. I., Lal, R., Meena, R. S., Babu, S., Das, A., Bhowmik, S. N., Datta, M., Saha, P., & Mishra, P. K. (2017). Effects of conservation tillage and nutrient management practices on soil fertility and productivity of rice (*Oryza sativa* L.) -rice system in North Eastern region of India. *Sustainability*, 9, 1-17.
31. Çelik, İ., Günal, H., Acir, N., Barut, Z. B., & Budak, M. (2021). Soil quality assessment to compare tillage systems in Cukurova Plain, Turkey. *Soil and Tillage Research*, 208, 104892.
32. 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.
33. Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (1982). Methods of soil analysis-chemical and microbiological properties, 2nd edn. Madison, WI: ASA. Inc. and SSSA, Inc.
34. Carter, D. L., Mortland, M. M., & Kemper, W. D. (1986). Specific surface. Methods of soil analysis: Part 1. *Physical and Mineralogical Methods*, 5, 413-423.
35. Ebrahimi, K., & Nayebloui, F. (2009). Estimation of basic infiltration rate using artificial neural network - case study, Aburaihan campus farm. *Journal of Water and Soil Conservation*, 16(1), 37-56.
36. SAS Institute. (2017). SAS/STAT users, version 9.4.3. SAS Institute, Cary, NC, USA.
37. El Mekkaoui, A., Moussadek, R., Mrabet, R., Douaik, A., El Haddadi, R., Bouhlal, O., Elomari, M., Ganoudi, M., Zouahri, A., & Chakiri, S. (2023). Effects of tillage systems on the physical properties of soils in a semi-arid region of Morocco. *Agriculture*, 13, 683.
38. Liu, Z., Cao, S., Sun, Z., Wang, H., Qu, S., Lei, N., He, J., & Dong, Q. (2021). Tillage effects on soil properties and crop yield after land reclamation. *Scientific Reports*, 11, 1-12.
39. Zhong, S., & Zeng, H. C. (2020). Long-term interactions of reduced tillage and different amounts of residue retaining improved soil environment in a semi-arid tropical climate. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 80(2), 197-208.
40. Melman, D. A., Kelly, C., Schneekloth, J., Calderón, F., & Fonte, S. J. (2019). Tillage and residue management drive rapid changes in soil macro fauna communities and soil properties in a semiarid cropping system of Eastern Colorado. *Applied Soil Ecology*, 143, 98-106.
41. Shahbaz, M., Kuzyakov, Y., & Heitkamp, F. (2017). Decrease of soil organic matter stabilization with increasing inputs: Mechanisms and controls. *Geoderma*, 304, 76-82.
42. Bahadar, K. M., Arif, M., & Khan, M. A. (2007). Effect of tillage and zinc application methods on weeds and yield

- of maize. *Pakistan Journal of Botany*, 39, 1583-1591.
43. Nandan, R. V., Singh, S., Singh, Sh., Kumar, V., Hazra, K. K., Nath, Ch. P., Poonia, Sh., Malik, R. K., Bhattacharyya, R., & McDonald, A. (2019). Impact of conservation tillage in rice-based cropping systems on soil aggregation, carbon pools and nutrients. *Geoderma*, 340, 104-114.
44. Afzalnia, S., & Karami, A. (2018). Effect of conservation tillage on soil properties and corn yield in the corn-wheat rotation. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 49(1), 129-137. [In Persain]
45. Chen, Z. D., Dikgwatlhe, S. B., Xue, J. F., Zhang, H. L., Chen, F., & Xiao, X. P. (2015). Tillage impacts on net carbon flux in paddy soil of the southern China. *Journal of Cleaner Production*, 103, 70-76.
46. Ogle, S. M., Alsaker, C., Baldock, J., Bernoux, M., Breidt, F. J., McConkey, B., Regina, K., & Vazquez-Amabile, G. G. (2019). Determine where no-till management can store carbon in soils and mitigate greenhouse gas emissions. *Scientific Reports*, 9, 11665.
47. Kahlon, M. S., & Gurpreet, S. (2014). Effect of tillage practices on soil physico-chemical characteristics and wheat straw yield. 2014. *International Journal of Agricultural Sciences*, 4(10), 289-293.
48. Botta, G. F., Antille, D. L., Bienvenido, F., Rivero, D., Avila-Pedraza, E. A., Contessotto, E. E., Ghelfi, D. G., Nistal, A. I., Pelizzari, F. M., Rocha-Meneses, L., & Ezquerro Canalejo, A. (2020). Effect of cattle trampling and farm machinery traffic on soil compaction of an *Entic Haplustoll* in a semiarid region of Argentina. *Agronomy Research*, 18(S2), 1163-1176.
49. Silva, S., Barros, N., Costa, L., & Leite, F. (2008). Soil compaction and eucalyptus growth in response to forwarder traffic intensity and load. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 32, 921-932.
50. Hamza, M., & Anderson, W. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82, 121-145.
51. Dörner, J., Bravo, S., Stoorvogel, M., Dec, D., Valle, S., Clunes, J., Horn, R., Uteau, D., Wendroth, O., Lagos, L., & Zúñiga, F. (2022). Short - term effects of compaction on soil mechanical properties and pore functions of an Andisol. *Soil and Tillage Research*, 221, 105396.
52. Azimzadeh, S. M., Koochakie, A., & Pala, M. (2002). Effect of different tillage methods on bulk density, porosity, soil moisture content and yield of wheat under dryland conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 4(3), 209-224.
53. Aikins, S. H. M., & Afuakwa, J. J. (2012). Effect of four different tillage practices on soil physical properties under cowpea. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 2151-7525.
54. Alam, M. K., Islam, M. M., Salahin, N., & Hasanuzzaman, M. (2014). Effect of tillage practices on soil properties and crop productivity in wheat-mungbean-rice cropping system under subtropical climatic conditions. *Hindawi Publishing Corporation*, 2014, 1-15.
55. Taser, O., & Metinoglu, F. (2005). Physical and mechanical properties of a clay soil as affected by tillage systems for wheat growth. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-soil and Plant*, 55, 186-191.
56. Onnabi Milani, A., & Salek Zamani, A. (2015). Evaluating the effect of tillage on soil water content, infiltration and safflower yield. *Water Research in Agriculture*, 29(2), 195-207.
57. Li, J., Wang, Y., Guo, Z., Li, J., Tian, C., Hua, D., Shi, C., Wang, H., Han, J., & Xu, Y. (2020). Effects of conservation tillage on soil physicochemical properties and crop yield in an arid loess plateau, China. *Scientific Reports*, 10, 4716.

58. Jabro, J. D., Stevens, W. B., Iversen, W. M., Sainju, U. M., & Allen, B. L. (2021). Soil cone index and bulk density of a sandy loam under no-till and conventional tillage in a corn-soybean rotation. *Soil and Tillage Research*, 206, 104842.
59. Wang, Y., Yang, S., Sun, J., Liu, Z., He, X., & Qiao, J. (2023). Effects of tillage and sowing methods on soil physical properties and corn plant characters. *Agriculture*, 13, 600.
60. Fernández, R., Quiroga, A., Zorati, C., & Noellemeyer, E. (2010). Carbon contents and respiration rates of aggregate size fractions under no-till and conventional tillage. *Soil and Tillage Research*, 109(2), 103-109.
61. Jordán, A., Zavala, L. M. A., & Gil, J. (2010). Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena*, 81(1), 77-85.
62. Logsdon, S. D., & Karlen, D. L. (2004). Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 78, 143-149.
63. Afzalnia, S., & Zabihi, J. (2014). Soil compaction variation during corn growing season under conservation tillage. *Soil and Tillage Research*, 137, 1-6.
64. Kinoshita, R., Schindelbeck, R. R., & Harold, M. (2017). Quantitative soil profile-scale assessment of the sustainability of long-term maize residue and tillage management. *Soil and Tillage Research*, 174, 34-44.
65. Okorie, B. O., & Niraj, Y. (2022). Effects of different tillage practices on soil fertility properties: A review. *International Journal of Agriculture and Environmental Research*, 8(1), 176-193.
66. Das, T. K., Ghosh, S., Das, A., Sen, S., Datta, D., Ghosh, S., Raj, R., Behera, B., Roy, A., Vyas, A. K., & Rana, D. S. (2021). Conservation agriculture impacts on productivity, resource - use efficiency and environmental sustainability: A holistic review. *Indian Journal of Agronomy*, 66, 111-127.
67. Guan, D., Zhang, Y., Al-Kaisi, M. M., Wang, Q., Zhang, M., & Li, Z. (2015). Tillage practices effect on root distribution and water use efficiency of winter wheat under rain-fed condition in the north China plain. *Soil and Tillage Research*, 146, 286-295.
68. Fan, R. Q., Yang, X. M., Drury, C. F., Reynolds, W. D., & Zhang, X. P. (2014). Spatial distributions of soil chemical and physical properties prior to planting soybean in soil under ridge-, no- and conventional-tillage in a maize-soybean rotation. *Soil Use and Management*, 30, 414-422.
69. Kassam, A., Friedrich, T., & Derpsch, R. (2022). Successful experiences and lessons from conservation Agriculture worldwide. *Agronomy*, 12(4), 769.
70. Shirani, H., Hajabbasi, M. A., Afyuni, M., & Hemmat, A. (2002). Effects of farmyard manure and tillage systems on soil physical properties and corn yield in central Iran. *Soil and Tillage Research*, 68, 101-108.
71. Asadi, M. E., & Sadeghnezhad, H. (2020). Investigation of crop water productivity and yield in different systems of tillage and crop residues. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, 21(74), 83-96. [In Persian]
72. Mahzari, S., Kiani, F., Asadi, M. E., Rezaee, A., & Kassam, A. (2023). Estimating the economic benefits of conservation agriculture in wheat fields (case study: Golestan province). *Water and Soil Science*, 33(4), 150-165. [In Persian]
73. Goodarzi, M., Hydayatipour, A., & Tahmasebi, M. (2021). Investigating the effect of conservation agriculture methods on soil moisture retention and bean yield. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 15(2), 369-378. [In Persian]
74. Truman, C. C., & Rowland, D. L. (2005). Conservation tillage to manage water and supplemental irrigation in Georgia. Proceedings of the Georgia Water Resources Conference, University of Georgia.

75. Farrakh Nawaz, M., Bourri , G., & Trolard, F. (2012). Soil compaction impact and modelling: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 291-309.
76. Amani, S., Zamani, D. M., & Mohammadi, A. (2016). Effect of conservation tillage methods on soil physical and mechanical properties of wheat in the region Khandab state Markazi. *Journal of Biosystems Engineering*, 5(2), 59-82. [In Persain]
77. Saurabh, K., Rao, K. K., Mishra, J. S., Kumar, R., Poonia, S. P., Samal, S. K., Roy, H. S., Dubey, A. K., Kumar Choubey, A., Mondal, S., Bhatt, B. P., Verma M., & Malik, R. K. (2021). Influence of tillage based crop establishment and residue management practices on soil quality indices and yield sustainability in rice-wheat cropping system of Eastern Indo-Gangetic plains. *Soil and Tillage Research*, 206, 104841.
78. Souza, L. H. C., Matos, E. S., Magalhães, C. A. S., de la Torre, E., Lamas, F. M., & Lal, R. (2018). Soil carbon and nitrogen stocks and physical properties under no-till and conventional tillage cotton-based systems in the Brazilian Cerrado. *Land Degradation and Development*, 29(10), 3405-3412.
79. Keshavarz, P., Zangiabadi, M., & Abbaszadeh, M. (2013). Relationship between soil organic carbon and wheat grain yield as affected by soil clay content and salinity. *Journal of Soil Research*, 27(3), 359-371. [In Persain]
80. Hassantabar Shobi, S., Sadegh-Zadeh, F., Bahmanyar, M. A., & Jalili, B. (2018). Reclamation of saline- sodic soil with clay texture using dissolved organic carbon. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 8(1), 159-174. [In Persain]
81. Maleki, S., Tazik, N., Javdanipour, E., & Mohammadi, M. (2018). The relationship between soil organic carbon and some soil characteristics, a solution for predicting environmental sustainability. 2nd National Conference on Knowledge and Technology of Agricultural Sciences, Natural Resource and Environment of Iran, Tehran, Iran. [In Persain]