J. Soil Plant Interact. 2025; 15(4): 79–97. https://doi.org/10.47176/jspi.15.4.01893

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

The Impact of Conservation Tillage Systems on Soil Pore Size Distribution and Hydraulic Properties Under Saline Conditions and Barley-Safflower Rotation

Masoud Tadayonnejad[1*] and Shahrokh Shahmansouri[2]

1- Soil and Water Research Department; Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Esfahan, Iran

2- Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

* Corresponding author, Email: m.tadayonnejad@areeo.ac.ir

(Received: 4 November 2024; Revised: 18 January 2025; Accepted: 19 January 2025)

Abstract

Soil and water salinity is one of the major agricultural challenges in Iran and worldwide, and reclaiming saline soils requires substantial water consumption. Therefore, re-evaluating reclamation methods in the light of water resource limitations is essential. This study examined the effects of three tillage systems (conventional tillage, reduced tillage, and no-tillage) on the physical properties of a saline soil in Isfahan over four years. The studied soil properties included pore size distribution, field capacity (θ_{FC}), permanent wilting point (θ_{PWP}), available water content (AWC), and water retention curve (WRC). The management practices included residue removal in conventional tillage and residue retention in reduced tillage and no-tillage systems. The results showed that the macroporosity (Macro-P) values in the reduced tillage, no-tillage, and conventional tillage treatments were 0.032, 0.029, and 0.022 cm³ cm⁻³, respectively. The reduced tillage treatment also had the highest mesoporosity (Meso-P) and the θ_{FC} values in reduced tillage and no-tillage (0.250 and 0.247 cm³ cm⁻³, respectively) were significantly higher than in the conventional tillage (0.238 cm³ cm⁻³). The AWC_{100} values were similar across the treatments, but the highest value was for the no-tillage treatment (0.210 cm³ cm⁻³). In the third and fourth years, more distinct differences were observed in the WRCs, particularly at low matric suctions. Conservation tillage treatments increased the macropores and mesopores and improved the soil hydraulic indices. The results indicate that conservation tillage can serve as a suitable alternative to conventional tillage in the dry and saline conditions, improving soil conditions and water resource efficiency.

Keywords: Conservation tillage, Soil water retention curve, Soil salinity, Field capacity, Available water.

Background and Objective: One of the major agricultural challenges in Iran and the world is soil and water salinity. Reclamation of saline soils requires significant amounts of water, making it essential to reconsider reclamation methods in the light of water resource limitations. Conservation tillage can improve soil physical quality and enhance water retention (Steponavičienė et al., 2024). Researchers have reported an increase in macropores in no-tillage systems and an increase in micropores in conventional tillage systems (Bhattacharyya et al., 2006). Considering the salinity of soils and the arid and semi-arid climate in Iran, preserving plant residues and using conservation tillage methods could help prevent related problems. This study examines the effects of three types of tillage systems on the physical properties a saline soil in Isfahan.

Methods: This research was conducted over four years at the Kabutarabad agricultural research station to examine the effects of three tillage systems (conventional tillage, reduced tillage, and no-tillage) on soil physical properties, including pore size distribution, field capacity (θ_{FC}), permanent wilting point (θ_{PWP}), available water content (AWC),

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

and water retention curve (WRC). In the conventional tillage, the soil was fully plowed and all crop residues were removed. In the reduced tillage, a chisel plow was used, and in the no-tillage, direct seeding was performed with minimal traffic and standing residues of the previous crop (about 5 tons per hectare) were retained. The cropping pattern followed a rotation of barley in the first and third years, and safflower in the second and fourth years. Soil pores were classified into three major groups: macropores (Macro-P), mesopores (Meso-P), and micropores (Micro-P), based on the WRC data. The study was conducted using a split-plot design in a completely randomized block design with three replications.

Results: The Macro-P values in the reduced tillage, no-tillage, and conventional tillage treatments were 0.032, 0.029, and 0.022 $cm^3\ cm^{-3}$, respectively, attributed to the increased soil organic matter in the reduced tillage and no-tillage treatments. The reduced tillage also had the highest Meso-P (0.141 $cm^3\ cm^{-3}$), with a significant increase, especially in the fourth year. Over time, tillage systems had a greater impact on coarse and medium pores. The θ_{FC} values in reduced tillage and no-tillage (0.250 and 0.247 $cm^3\ cm^{-3}$, respectively) were significantly higher than in the conventional tillage (0.238 $cm^3\ cm^{-3}$). The presence of organic matter in the reduced tillage and no-tillage treatments led to a significant increase in θ_{FC} compared to conventional tillage. There was no significant difference between the θ_{PWP} values among the reduced tillage and no-tillage treatments, but they were higher than those in the conventional tillage. The AWC_{100} values were similar across the treatments, but the highest value was for the no-tillage (0.210 $cm^3\ cm^{-3}$). In the first and second years, there was little difference in the WRCs among the treatments. However, in the third and fourth years, more distinct differences were observed, particularly at low matric suctions. In these years, the no-tillage and reduced tillage had higher soil water retention at low matric suctions compared to the conventional tillage. Conventional tillage had lower saturated water content compared to the reduced tillage and no-tillage treatments. Over time, especially from the third year onward, saturated water content increased, which is attributed to the accumulation of soil organic matter and increased porosity.

Conclusions: This study investigated the impact of different tillage systems on soil physical and hydraulic properties over four years. The results showed that conservation tillage systems increased the macroporosity and mesoporosity, and improved soil hydraulic indices such as saturation water content, field capacity, permanent wilting point, and available water content. Other benefits of these systems include the improvement of saline conditions through increased soil organic matter and reduced evaporation. Additionally, conservation tillage, by preserving plant cover and minimizing soil disturbance, helps reduce moisture loss and enhance water use efficiency. These findings suggest that conservation tillage can serve as a suitable alternative to conventional tillage in dry and saline conditions, improving soil conditions and water resource efficiency.

References:

1. Steponavičienė, V., Žiūraitis, G., Rudinskienė, A., Jackevičienė, K., Bogužas, V., 2024. Long-term effects of different tillage systems and their impact on soil properties and crop yields. Agronomy 14(4), 870. https://doi.org/10.3390/agronomy14040870.
2. Bhattacharyya, R., Prakash, V., Kundu, S., Gupta, H., 2006. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. Soil Tillage Res. 86(2), 129–140. https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.018.

How to Cite: Tadayonnejad, M., Shahmansouri, S., 2025. The impact of conservation tillage systems on soil pore size distribution and hydraulic properties under saline conditions and barley-safflower rotation. J. Soil Plant Interact. 15(4), 79–97 (In Persian). https://doi.org/10.47176/jspi.15.4.01893

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۳؛ (۴)۱۵: ۹۷-۷۹، https://doi.org/10.47176/jspi.15.4.01893

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۵۰۱۴-۲۷۸۳ شاپا الکترونیکی: ۵۲۸۶-۲۷۸۳

مقاله پژوهشی

تأثیر سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی بر توزیع اندازه منافذ و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در شرایط شور و در تناوب کشت جو-گلرنگ

مسعود تدین‌نژاد[1*] و شاهرخ شاه‌منصوری[2]

۱- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

۲- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.tadayonnejad@areeo.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۱۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰)

چکیده

شوری آب و خاک یکی از چالش‌های عمده کشاورزی در ایران و جهان بوده و اصلاح خاک‌های شور نیازمند مصرف آب زیادی است. بنابراین با توجه به محدودیت منابع آب، بازنگری در روش‌های اصلاح این خاک‌ها ضروری است. در این پژوهش تأثیر سه نوع سامانه خاک‌ورزی (مرسوم، کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی) بر ویژگی‌های فیزیکی یک خاک شور در ایستگاه تحقیقاتی کشاورزی کبوترآباد در جنوب شرقی شهر اصفهان طی چهار سال بررسی شد. این ویژگی‌ها شامل توزیع اندازه منافذ، گنجایش مزرعه‌ای (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP})، آب قابل استفاده (AWC)، و منحنی مشخصه رطوبتی (WRC) خاک بود. مدیریت‌ها نیز شامل حذف بقایای گیاهی در خاک‌ورزی مرسوم و حفظ بقایا در سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی بودند. خاک مکان اجرای این آزمایش دارای بافت لوم رسی سیلتی بود. برای تجزیه آماری از طرح کرت‌های خردشده در زمان در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی استفاده شد. نتایج نشان داد که مقدار منافذ درشت (Macro-P) در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی، بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم به‌ترتیب برابر ۰/۰۳۲، ۰/۰۲۹ و ۰/۰۲۲ $cm^{-3}cm^{-3}$ بود. همچنین تیمار کم‌خاک‌ورزی بیش‌ترین مقدار منافذ متوسط (Meso-P) را دارا بود و مقادیر θ_{FC} در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی (به‌ترتیب ۰/۲۵۰ و ۰/۲۴۷ $cm^3\ cm^{-3}$) به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از خاک‌ورزی مرسوم (۰/۲۳۸ $cm^3\ cm^{-3}$) بود. مقادیر AWC_{100} در بین تیمارها تفاوت معنی‌دار نداشت. در سال‌های سوم و چهارم، تفاوت‌های واضح‌تری بین منحنی‌های WRC، به‌ویژه در مکش‌های ماتریک کم، مشاهده شد. تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی باعث افزایش فراوانی منافذ درشت و متوسط و بهبود شاخص‌های هیدرولیکی خاک شدند. نتایج نشان داد که خاک‌ورزی حفاظتی می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای خاک‌ورزی مرسوم در شرایط خشک و شور، بهبود شرایط خاک و بهره‌وری منابع آب را فراهم کند.

واژه‌های کلیدی: خاک‌ورزی حفاظتی، منحنی مشخصه رطوبتی خاک، شوری خاک، گنجایش مزرعه‌ای، آب قابل استفاده.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

شوری آب و خاک از مشکلات مهم کشاورزی در ایران و جهان است که به عواملی مانند سنگ‌های مادری، کمبود بارندگی، آبیاری با آب نامناسب و تبخیر زیاد مرتبط است. حدود ۱۳ درصد از زمین‌های قابل کشت جهان شور و سدیمی هستند. با توجه به مصرف زیاد آب برای اصلاح این خاک‌ها و محدودیت منابع آب، بازنگری در روش‌های اصلاح ضروری است (Barzegar, 1995). روش‌های گوناگون خاک‌ورزی با تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک ممکن است بر میزان شوری در خاک تأثیر بگذارند (Afyuni and Mosaddeghi, 2001). در پژوهش Bandaranayake et al. (1998) آبیاری و مدیریت خاک‌ورزی به‌عنوان دو موضوع اساسی و قابل توجه در عملیات مدیریتی به‌منظور کاهش آبشویی در ناحیه ریشه معرفی شد. Tadayonnejad et al. (2023) تأثیر سامانه‌های خاک‌ورزی مختلف بر ویژگی‌های فیزیکی یک خاک شور را بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که استفاده از سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی منجر به افزایش تخلخل و نفوذ آب به خاک نسبت به روش خاک‌ورزی مرسوم شد. همچنین، آن‌ها ترویج کشاورزی حفاظتی را در مناطق خشک، نیمه‌خشک و شور توصیه کرده و بیان کردند که این اقدام در درازمدت می‌تواند به کاهش مشکلات خاک‌های این مناطق کمک کند.

شناخت تأثیر سامانه‌های خاک‌ورزی برای حفظ خاک، منابع آب و تولید پایدار ضروری است. استفاده از گاوآهن در خاک‌ورزی مرسوم و گذر زمان باعث کاهش ماده آلی، کاهش تنوع زیستی، تغییر منافذ خاک و افزایش زهکشی می‌شود (Mašek et al., 2008; Mekkaoui et al., 2023). سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی با کاهش آسیب به خاک، بهبود ویژگی‌های فیزیکی مانند نگهداشت آب، نفوذپذیری، تهویه و تخلخل، کیفیت خاک را ارتقا داده و تولید پایدار را با کاهش هزینه‌ها تسهیل می‌کنند (Bhattacharyya et al., 2012; Moussadek et al., 2022; Indoria et al., 2017; El Mekkaoui et al., 2023). Mekkaoui et al. (2023) دریافتند که سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی، به‌ویژه بی‌خاک‌ورزی، در میان‌مدت و درازمدت کیفیت فیزیکی خاک را بهبود داده و برای مناطق نیمه‌خشک مانند مراکش مناسب هستند.

روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی، مانند بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی، با حفظ بقایای گیاهی روی سطح خاک، توزیع منافذ را بهبود بخشیده، مواد آلی را افزایش داده و ذخیره رطوبت خاک را تقویت می‌کنند (Karlen et al., 2011). Fernández et al. (2009) در پژوهشی نشان دادند که سامانه بی‌خاک‌ورزی با افزایش ماده آلی و تخلخل خاک، نفوذ آب به خاک و نگهداشت آب خاک را در مناطق نیمه‌خشک اسپانیا بهبود بخشیدند. همچنین، این روش در کاهش رواناب و فرسایش مؤثر بوده و در پژوهش‌های درازمدت مانند پژوهشی در اتریش، افزایش ماده آلی و گنجایش نگهداری آب در لایه رویین خاک را سبب شده است (Steponavičienė et al., 2024).

خاک‌ورزی بر رطوبت قابل استفاده خاک برای گیاه تأثیر می‌گذارد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که خاک در سامانه بی‌خاک‌ورزی رطوبت قابل استفاده بیش‌تری نسبت به روش‌های کم‌خاک‌ورزی و مرسوم دارد. همچنین، افزایش ماده آلی با کمک ترشحات میکروبی و کمپلکس‌های حاصل از تجزیه بقایای آلی، نگهداری رطوبت خاک در گنجایش مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی دائم را بهبود می‌بخشد (Riahinia., 2017; Emerson, 1995).

یکی از ویژگی‌های هیدرولیکی مهم خاک، منحنی مشخصه رطوبتی (WRC) خاک است. پژوهش‌های زیادی در مورد تأثیر سامانه‌های خاک‌ورزی بر WRC خاک به دلیل پیچیدگی شرایط خاک و آبیاری انجام نشده است. Ahmadi et al. (2022) دریافتند که تفاوت قابل توجهی بین WRC خاک در سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی مشاهده نشد. Farahani et al. (2022) با بررسی WRC خاک در لایه ۱۵-۰ سانتی‌متری نشان دادند که سامانه بی‌خاک‌ورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل تجمع بیش‌تر مواد آلی، بیش‌ترین رطوبت اشباع خاک را داشته و توانایی بهتری برای نگهداشت آب در مکش‌های ماتریک زیاد داشت. آن‌ها همچنین بیان کردند مقادیر رطوبت باقی‌مانده خاک

بین سامانه‌ها تفاوت معنی‌دار نداشتند و سامانه بی‌خاک‌ورزی، همراه با سامانه کم‌خاک‌ورزی، به دلیل کربن آلی و ساختمان مناسب خاک، برای مدیریت آب در این مناطق مؤثرتر است.

سامانه‌های خاک‌ورزی مختلف تأثیر متفاوتی بر توزیع اندازه منافذ خاک دارند. Bhattacharyya et al. (2006) افزایش منافذ درشت پیوسته در سامانه بی‌خاک‌ورزی را به فعالیت بیش‌تر جانوران خاک‌زی نسبت داده و همچنین افزایش منافذ ریز در این سامانه را به دلیل شرایط بدون شخم و حفظ ساختار طبیعی خاک گزارش کردند. Safadoust et al. (2007) گزارش کردند که در خاک‌ورزی مرسوم به دلیل مخلوط و سست شدن خاک، منافذ درشت و ریز بیش‌تری نسبت به سامانه بی‌خاک‌ورزی وجود دارد. Veiga et al. (2008) در یک پژوهش ۹ ساله گزارش کردند که در سامانه بی‌خاک‌ورزی، افزایش منافذ درشت به دلیل افزایش ماده آلی خاک رخ داده است، درحالی‌که در سامانه خاک‌ورزی مرسوم، منافذ ریز به دلیل بهم‌خوردگی و فشردگی خاک به مرور زمان افزایش یافته است.

با بررسی پژوهش‌های پیشین، مشخص می‌شود که نتایج تأثیر روش‌های خاک‌ورزی بر ویژگی‌های خاک بسته به اقلیم منطقه و نوع خاک‌ورزی متفاوت است. به علت شرایط نفوذ بهتر آب آبیاری و آبشویی بهتر نمک‌ها در سامانه خاک‌ورزی مرسوم، تمایل بیش‌تری برای کاربرد این روش در شرایط شور وجود دارد. این یافته‌ها ضرورت انجام پژوهش‌های بیش‌تر در این زمینه را نشان می‌دهد تا بهترین سامانه خاک‌ورزی برای هر منطقه مشخص شود (Wang et al., 2020). با توجه به وجود خاک‌های شور و آب و هوای خشک و نیمه‌خشک در کشور، به‌نظر می‌رسد حفظ بقایای گیاهی در خاک و استفاده از روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی یکی از راهکارهای پیشگیری و مقابله با مشکلات بیان‌شده باشد. بنابراین، این پژوهش با هدف تعیین آثار سه سامانه خاک‌ورزی بر توزیع اندازه منافذ، نگهداشت آب و منحنی مشخصه رطوبتی خاک در شرایط شور در مرکز تحقیقات کشاورزی استان اصفهان انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش طی چهار سال در کرت‌های ثابت ایستگاه تحقیقات کشاورزی حفاظتی کبوترآباد در جنوب شرقی اصفهان انجام شد. خاک منطقه از نوع Fine, Mixed, Thermic, Typic Calciargids (Calcisols FAO) است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران رایج است (Tomanian, 2013). خاک مکان آزمایش شامل ۴۵ درصد آهک با بافت لوم رسی سیلتی بود. در آغاز آزمایش، رسانایی الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC) برابر ۶/۴۶ dS/m و pH آن برابر ۷/۴ تعیین شد.

سه نوع مدیریت مختلف خاک‌ورزی و بقایای گیاهی به مدت چهار سال متوالی به اجرا درآمد: ۱- خاک‌ورزی مرسوم با خروج بقایا از مزرعه (به‌جز ریشه)، ۲- کم‌خاک‌ورزی با حفظ بقایا و ۳- بی‌خاک‌ورزی با حفظ بقایا. برای هر یک از تیمارهای مورد بررسی، عملیات آماده‌سازی زمین و کاشت به شرح زیر انجام شد: تیمار خاک‌ورزی مرسوم: شامل شخم برگردان‌دار، دو مرحله دیسک متقاطع و در نهایت کاشت با استفاده از بذرکار-خطی‌کار-کودکار بود. تیمار کم‌خاک‌ورزی: شامل استفاده از گاوآهن قلمی، ایجاد جوی و پشته و سپس کاشت با بذرکار-خطی‌کار-کودکار بود. تیمار بی‌خاک‌ورزی: شامل کاشت مستقیم با بذرکار-خطی‌کار-کودکار و بدون انجام شخم بود. در قطعه‌های تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی تنها بقایای ایستاده محصول سال پیشین (در حدود ۵ تن در هکتار) حفظ شده و سایر بقایا از زمین خارج شدند اما در تیمار خاک‌ورزی مرسوم تمام بقایای گیاهان زراعی حذف گردید. در تیمار بی‌خاک‌ورزی، پس از خرد کردن بقایای ایستاده جو با استفاده از ساقه‌خردکن، ادوات کاشت و برداشت در مسیر ثابت با حداقل تردد وارد زمین شدند و کاشت مستقیم با خطی‌کار آمازون انجام شد. در این آزمایش، گیاهان جو رقم بهرخ و گلرنگ رقم صفه به‌صورت تناوبی کشت شدند؛ به این ترتیب که در سال‌های اول و سوم جو و در سال‌های دوم و چهارم گلرنگ کشت گردید.

منبع آب آبیاری، آب چاه عمیق از سفره آب زیرزمینی بوده

و از نظر شوری دارای محدودیت بود (EC= 5.35 dS/m) و مقدار نسبت جذب سدیم (SAR) آن برابر ۴/۶۷ بود. در پایان هر سال، نمونه‌های خاک دست‌نخورده از لایه ۱۵-۰ سانتی‌متری تهیه شده و ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی آن در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. کربن آلی خاک به روش والکی‌بلک اندازه‌گیری شد (Walkley and Black, 1934). برای بررسی تأثیر سیستم‌های خاک‌ورزی بر توزیع اندازه منافذ خاک، منافذ در سه گروه اصلی درشت (Macro-P)، متوسط (Meso-P) و ریز (Micro-P) در نظر گرفته شدند. این دسته‌بندی بر اساس منحنی مشخصه رطوبتی خاک و تعاریف علمی رایج ارائه شده است (Klute, 1986; Schafer, 1982):

$$\text{Macro-P}=\theta_s-\theta_{10} \quad (۱)$$

$$\text{Meso-P}=\theta_{10}-\theta_{100} \quad (۲)$$

$$\text{Micro-P}=\theta_{100} \quad (۳)$$

که در آن θ_s، θ_{10} و θ_{100} به‌ترتیب مقدار رطوبت حجمی در مکش‌های ماتریک صفر، ۱۰ و ۱۰۰ هکتوپاسکال است. مقدار تخلخل پر از هوا (AFP) یا تخلخل تهویه‌ای نیز به‌عنوان یک شاخص مهم کیفیت فیزیکی خاک از رابطه زیر به‌دست آمد (Reynolds et al., 2008):

$$\text{AFP}=\theta_s-\theta_{100} \quad (۴)$$

مقدار رطوبت حجمی در مکش ماتریک ۳۰۰ هکتوپاسکال (θ_{300}) به‌عنوان گنجایش مزرعه‌ای (θ_{FC}) و مقدار رطوبت در مکش ماتریک ۱۵۰۰۰ هکتوپاسکال (θ_{15000}) به‌عنوان نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) در نظر گرفته شد. تفاوت مقدار θ_{100} یا θ_{300} با θ_{15000} نیز برابر آب قابل استفاده خاک برای گیاه (به‌ترتیب AWC_{100} و AWC_{300}) محاسبه شد (Reynolds et al., 2008):

$$\theta_{FC}=\theta_{300} \quad (۵)$$

$$\theta_{PWP}=\theta_{15000} \quad (۶)$$

$$AWC_{100}=\theta_{FC}-\theta_{PWP}=\theta_{100}-\theta_{15000} \quad (۷)$$

$$AWC_{300}=\theta_{FC}-\theta_{PWP}=\theta_{300}-\theta_{15000} \quad (۸)$$

نمونه‌های خاک دست‌نخوده ابتدا از زیر اشباع شده و سپس منحنی مشخصه رطوبتی آن‌ها با استفاده از جعبه شن در مکش‌های ماتریک (h) ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۷۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ هکتوپاسکال و با استفاده از صفحه فشاری در مقادیر h برابر ۳۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ هکتوپاسکال اندازه‌گیری شد (CEN, 2001). پس از رسیدن به تعادل، رطوبت نمونه‌ها به روش وزنی اندازه‌گیری شد. در نهایت، بر داده‌های WRC معادله ون‌گنوختن-کوسوگی (۱۹۹۴) برازش داده شد:

$$\theta(h)=\theta_s \qquad h \le h_{cVG} \quad (۹)$$

$$\theta(h)=\theta_r+(\theta_s-\theta_r)\times\left[1+m\left(\frac{(h-h_{cVG})}{(h_{0VG}-h_{cVG})}\right)^{\frac{1}{1-m}}\right]^{-m} \qquad h>h_{cVG} \quad (۱۰)$$

که در این معادله، θ مقدار رطوبت حجمی در مکش ماتریک h ($cm^3\ cm^{-3}$)، و θ_r و θ_s به‌ترتیب بیانگر رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع ($cm^3\ cm^{-3}$) هستند. پارامتر m با شیب ناحیه دوم منحنی WRC ارتباط دارد، h_{0VG} مکش ماتریک (hPa) در نقطه عطف و h_{cVG} مکش ورود هوا است. برای برازش معادله ون‌گنوختن-کوسوگی بر داده‌های WRC و بهینه‌سازی پارامترهای برازش مدل از ابزار Solver در برنامه MS Excel استفاده شد (Kosugi, 1994).

در این پژوهش، برای بررسی تأثیر نوع سامانه خاک‌ورزی (در سه سطح) و سال (در چهار سال) و همچنین اثر برهم‌کنش بین این عوامل بر اندازه منافذ، نگهداشت آب، و پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک، از طرح کرت‌های خردشده در زمان در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار استفاده شد. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.6 انجام شد و مقایسه میانگین‌ها به روش LSD در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت. همچنین، رسم نمودارهای مورد نیاز با استفاده از نرم‌افزار Sigma Plot 12.3 انجام شد.

نتایج و بحث

کربن آلی خاک

آثار اصلی سامانه خاک‌ورزی، زمان و برهم‌کنش بین آن‌ها در

سطح یک درصد بر مقادیر کربن آلی (OC) معنی‌دار شد (جدول ۱). ترتیب مقادیر OC به‌صورت بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و مرسوم مشاهده شد (جدول ۲)، که دلیل آن حفظ بقایای آلی در سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی است. طی ۴ سال، مقادیر OC در تمامی تیمارها افزایش یافت (جدول ۳). Riahinia et al. (2017) نیز افزایش OC را با گذشت زمان در تمامی سامانه‌های خاک‌ورزی گزارش کرده‌اند. افزایش OC در روش خاک‌ورزی مرسوم را می‌توان به حضور بقایای ریشه‌های محصول و علف‌های هرز در خاک نسبت داد. از سوی دیگر، افزایش مقدار OC در تیمار بی‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم تقریباً دو برابر بود (جدول ۲ و ۴). مقدار کم کربن آلی خاک در تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم را می‌توان به در دسترس قرار گرفتن مواد آلی تازه برای جانداران تجزیه‌کننده، خرد شدن خاک‌دانه‌ها در اثر شخم و در نتیجه تهویه بیش‌تر و تسریع در اکسیداسیون مواد آلی نسبت داد.

توزیع اندازه منافذ خاک

اثر اصلی سامانه خاک‌ورزی در سطح یک درصد و اثر اصلی سال و برهم‌کنش بین آن‌ها در سطح پنج درصد بر مقدار منافذ درشت (Macro-P) معنی‌دار شد (جدول ۱). بیش‌ترین مقدار Macro-P به‌ترتیب در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی، بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد. این یافته با نتایج Safadoust et al. (2007) همخوانی دارد. آن‌ها در پژوهشی تأثیر سامانه‌های خاک‌ورزی بر توزیع اندازه منافذ خاک را مورد بررسی قرار داده و بیان کردند که بیش‌ترین مقدار Macro-P در سامانه کم‌خاک‌ورزی مشاهده شد. بین مقادیر Macro-P سامانه کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی تفاوت معنی‌دار وجود نداشت (جدول ۲). تیمار کم‌خاک‌ورزی از طریق به‌هم‌زدن خاک (هر چند به مقدار کم‌تر از خاک‌ورزی مرسوم) و وجود مواد آلی سبب مقدار Macro-P بیش‌تر شده است. از طرفی تیمار بی‌خاک‌ورزی با افزایش ماده آلی خاک سبب افزایش Macro-P شده است (جدول ۲). نکته قابل توجه این است که منافذ درشت ناشی از مواد آلی در تیمار بی‌خاک‌ورزی سبب افزایش مقدار θ_s در خاک شده است درصورتی‌که تیمار کم‌خاک‌ورزی با دارا بودن مقدار بیش‌تر Macro-P مقدار θ_s کم‌تری را داشت هر چند تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها وجود نداشت (جدول ۲). به عبارت دیگر منافذ درشت ناشی از به‌هم‌خوردن خاک تأثیر کم‌تری در نگهداشت آب داشته و این منافذ درشت ناشی از مواد آلی هستند که سبب افزایش مقدار θ_s (در مکش‌های ماتریک کم) شده‌اند.

در سال‌های سوم و چهارم، بیش‌ترین مقدار Macro-P مشاهده شد که ناشی از افزایش ماده آلی و تأثیر آن بر خاک بود (جدول ۴). مواد آلی برای تأثیرگذاری نیاز به زمان کافی برای تجزیه دارند. در سامانه خاک‌ورزی مرسوم، اگرچه در کوتاه‌مدت Macro-P افزایش یافت، اما در درازمدت به دلیل تردد ماشین‌های کشاورزی و کاهش فعالیت جانوران خاک‌زی، این مقدار کاهش یافته و در سال چهارم به کم‌ترین حد خود رسید. این یافته با نتایج Bhattacharyya et al. (2006) که کاهش Macro-P را در سامانه خاک‌ورزی مرسوم به دلیل تردد ماشین‌های کشاورزی گزارش کردند، هم‌خوانی دارد. مقادیر Macro-P در تیمارهای کم‌خاکورزی و بی‌خاک‌ورزی به جز سال دوم روند افزایشی داشتند. افزودن بقایای آلی به خاک و تجزیه آن سبب افزایش Macro-P به مرور زمان شده است. این نتیجه با یافته‌های Roseberg and McCoy (1992) که افزایش Macro-P در سامانه بی‌خاک‌ورزی به دلیل افزایش ماده آلی خاک با گذشت زمان را گزارش کردند، هم‌خوانی دارد. تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی در سال‌های چهارم و سوم دارای مقادیر Macro-P بیش‌تری بودند.

آثار اصلی و برهم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر منافذ متوسط (Meso-P) در سطح پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). خاک در سامانه کم‌خاک‌ورزی در بین تیمارهای مورد بررسی دارای بیش‌ترین مقدار Meso-P بود (جدول ۲). بین مقادیر Meso-P تیمارهای بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم تفاوت معنی‌دار وجود نداشت اما مقدار Meso-P در بی‌خاک‌ورزی بیش‌تر بود

جدول ۱. تجزیه واریانس رطوبت باقی‌مانده (θ_r)، رطوبت اشباع (θ_s)، شیب منحنی مشخصه رطوبتی (m)، مکش ورود هوا (h_{cVG})، مکش در نقطه عطف منحنی (h_{0VG})، کربن آلی (OC)، تخلخل درشت (Macro-P)، تخلخل میانه (Meso-P)، تخلخل ریز (Micro-P)، گنجایش مزرعه‌ای (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP})، مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه (AWC_{100} و AWC_{300}) و تخلخل پر از هوا (AFP) در ترکیب چهار سال اجرای آزمایش.

Table 1. Variance analysis of residual water content (θ_r), saturated water content (θ_s), slope of water retention curve (m), air entry suction (h_{cVG}), matric suction at the inflection point of the curve (h_{0VG}), organic carbon (OC), macroporosity (Macro-P), mesoporosity (Meso-P), microporosity (Micro-P), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), plant available water (AWC_{100} and AWC_{300}) and air-filled porosity (AFP) in the combination of four years experiment.

Source of variance منبع تغییرات	DF درجه آزادی	θ_r	θ_s	m	h_{cVG}	h_{0VG}	OC	Macro-P	Meso-P	Micro-P	θ_{FC}	θ_{PWP}	AWC_{100}	AWC_{300}	AFP
							Mean squares								
Tillage (A) خاک‌ورزی	2	0.00002^{ns}	0.003^{**}	0.006^{**}	0.924^{ns}	125.2^{**}	0.36^{**}	0.0003^{**}	0.0007^{**}	0.002^{**}	0.0004^{**}	0.0002^{*}	0.001^{**}	0.00006^{ns}	0.002^{**}
Replication تکرار	6	0.001	0.001	0.0003	0.283	8.59	0.0008	0.0001	0.0001	0.00006	0.00006	0.00002	0.0001	0.00004	0.0001
Year (B) سال	3	0.0002^{ss}	0.005^{**}	0.001^{*}	0.318^{ns}	19.1^{ns}	1.06^{**}	0.0001^{*}	0.002^{**}	0.0006^{**}	0.0006^{**}	0.0003^{**}	0.001^{**}	0.0004^{*}	0.002^{**}
A × B	6	0.0004^{**}	0.001^{**}	0.005^{**}	1.98^{*}	29.3^{*}	0.046^{**}	0.0005^{*}	0.0008^{**}	0.002^{**}	0.0004^{**}	0.00009^{*}	0.0002^{*}	0.0004^{**}	0.001^{**}
Error خطا	18	0.0001	0.0001	0.0004	0.591	9.46	0.014	0.0003	0.00008	0.0001	0.00005	0.00004	0.0002	0.00009	0.0001
CV (%) ضریب تغییرات	-	9.46	2.72	7.34	37.9	29.8	4.7	21.4	7.04	3.41	2.89	4.51	7.57	8.41	7.43

**: معنی‌دار در سطح ۱٪، *: معنی‌دار در سطح ۵٪ و ^{ns}: عدم معنی‌داری،

**: significant at the 1 %, *: significant at the 5 %, ^{ns}: non-significant,

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر خاک‌ورزی بر رطوبت باقی‌مانده (θ_r)، رطوبت اشباع (θ_s)، شیب منحنی مشخصه رطوبتی (m)، مکش ورود هوا (h_{cVG})، مکش در نقطه عطف منحنی (h_{0VG})، کربن آلی (OC)، تخلخل درشت (Macro-P)، تخلخل میانه (Meso-P)، تخلخل ریز (Micro-P)، گنجایش مزرعه‌ای (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP})، مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه (AWC_{100} و AWC_{300}) و تخلخل پر از هوا (AFP).

Table 2. Mean comparisons of residual water content (θ_r), saturated water content (θ_s), slope of water retention curve (m), air entry suction (h_{cVG}), matric suction at the inflection point of the curve (h_{0VG}), organic carbon (OC), macroporosity (Macro-P), mesoporosity (Meso-P), microporosity (Micro-P), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), plant available water (AWC_{100} and AWC_{300}) and air-filled porosity (AFP) as affected by tillage system.

Tillage system سامانه خاک‌ورزی	θ_r	θ_s	m	h_{cVG}	h_{0VG}	OC	Macro-P	Meso-P	Micro-P	θ_{FC}	θ_{PWP}	AWC_{100}	AWC_{300}	AFP
	$cm^3\ cm^{-3}$		-	hPa		%	$cm^3\ cm^{-3}$							
Conventional tillage خاک‌ورزی مرسوم	0.100^a	0.474^b	0.285^a	0.527^a	13.3^a	0.400^c	0.022^b	0.126^b	0.324^b	0.238^b	0.127^b	0.197^b	0.111^a	0.148^b
Reduced tillage کم‌خاک‌ورزی	0.099^a	0.498^a	0.242^b	0.843^a	6.91^b	0.653^b	0.032^a	0.141^a	0.321^b	0.250^a	0.134^a	0.187^b	0.115^a	0.174^a
No tillage بی‌خاک‌ورزی	0.098^a	0.504^a	0.272^a	0.290^a	10.7^a	0.730^a	0.029^a	0.129^b	0.343^a	0.247^a	0.133^a	0.210^a	0.115^a	0.157^b

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

In each column, numbers with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

جدول ۳. مقایسه میانگین مقادیر رطوبت باقی‌مانده (θ_r)، رطوبت اشباع (θ_s)، شیب منحنی مشخصه رطوبتی (m)، مکش ورود هوا (h_{cVG})، مکش در نقطه عطف منحنی (h_{0VG})، کربن آلی (OC)، تخلخل درشت (Macro-P)، تخلخل میانه (Meso-P)، تخلخل ریز (Micro-P)، گنجایش مزرعه‌ای (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP})، مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه (AWC_{100} و AWC_{300}) و تخلخل پر از هوا (AFP) در چهار سال اجرای آزمایش.

Table 3. Mean comparisons of residual water content (θ_r), saturated water content (θ_s), slope of water retention curve (m), air entry suction (h_{cVG}), matric suction at the inflection point of the curve (h_{0VG}), organic carbon (OC), macroporosity (Macro-P), mesoporosity (Meso-P), microporosity (Micro-P), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), plant available water (AWC_{100} and AWC_{300}) and air-filled porosity (AFP) in four years of the experiment.

Year سال	θ_r	θ_s	m	h_{cVG}	h_{0VG}	OC	Macro-P	Meso-P	Micro-P	θ_{FC}	θ_{PWP}	AWC_{100}	AWC_{300}	AFP
	$cm^3\ cm^{-3}$		-	hPa		%	$cm^3\ cm^{-3}$							
First اولین	0.105^{a}	0.468^{b}	0.253^{b}	0.557^{a}	8.94^{a}	0.103^{d}	0.028^{ab}	0.121^{c}	0.319^{b}	0.247^{a}	0.139^{a}	0.180^{b}	0.108^{b}	0.149^{b}
Second دومین	0.094^{a}	0.476^{b}	0.275^{a}	0.297^{a}	12.3^{a}	0.638^{c}	0.023^{b}	0.122^{c}	0.327^{ab}	0.233^{b}	0.125^{c}	0.202^{a}	0.107^{b}	0.144^{b}
Third سومین	0.096^{a}	0.508^{a}	0.260^{ab}	0.744^{a}	9.71^{a}	0.758^{b}	0.032^{a}	0.137^{b}	0.335^{a}	0.252^{a}	0.130^{bc}	0.204^{a}	0.122^{a}	0.168^{a}
Forth چهارمین	0.101^{a}	0.516^{a}	0.276^{a}	0.615^{a}	10.3^{a}	0.880^{a}	0.029^{a}	0.148^{a}	0.337^{a}	0.248^{a}	0.132^{b}	0.205^{a}	0.115^{ab}	0.178^{a}

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

In each column, numbers with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سامانه خاک‌ورزی در سال‌های مختلف ازمایش بر رطوبت باقی‌مانده (θ_r)، رطوبت اشباع (θ_s)، شیب منحنی مشخصه رطوبتی (m)، مکش ورود هوا (h_{cVG})، مکش در نقطه عطف منحنی (h_{0VG})، کربن آلی (OC)، تخلخل درشت (Macro-P)، تخلخل میانه (Meso-P)، تخلخل ریز (Micro-P)، گنجایش مزرعه‌ای (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP})، مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه (AWC_{100} و AWC_{300}) و تخلخل پر از هوا (AFP).

Table 4. Mean comparisons of the interaction effect of tillage system in different years of the experiment on the residual water content (θ_r), saturated water content (θ_s), slope of water retention curve (m), air entry suction (h_{cVG}), matric suction at the inflection point of the curve (h_{0VG}), organic carbon (OC), macroporosity (Macro-P), mesoporosity (Meso-P), microporosity (Micro-P), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), plant available water (AWC_{100} and AWC_{300}) and air-filled porosity (AFP).

Tillage system سامانه خاک‌ورزی	Year	θ_r	θ_s	m	h_{cVG}	h_{0VG}	OC	Macro-P	Meso-P	Micro-P	θ_{FC}	θ_{PWP}	AWC_{100}	AWC_{300}	AFP
		$cm^3\ cm^{-3}$		-	hPa		%	$cm^3\ cm^{-3}$							
Conventional tillage خاک‌ورزی مرسوم	First اولین	0.113^{a}	0.470^{c}	0.291^{bc}	0.368^{c}	11.4^{bcd}	0.095^{h}	0.025^{bcd}	0.135^{b}	0.309^{d}	0.244^{c}	0.137^{ab}	0.172^{e}	0.107^{de}	0.160^{b}
	Second دومین	0.107^{abc}	0.473^{c}	0.334^{a}	0.000^{c}	19.6^{a}	0.391^{g}	0.019^{cd}	0.124^{bcd}	0.327^{cd}	0.227^{e}	0.128^{bcd}	$0.199^{a/d}$	0.099^{e}	0.143^{bc}
	Third سومین	$0.096^{b/f}$	0.479^{c}	0.286^{bc}	0.000^{c}	13.0^{bc}	0.523^{f}	0.027^{bcd}	0.123^{bcd}	0.330^{cd}	0.229^{de}	0.120^{d}	0.209^{abc}	0.109^{cde}	0.150^{bc}
	Forth چهارمین	0.085^{ef}	0.473^{c}	0.228^{e}	1.738^{ab}	$9.30^{b/e}$	0.593^{e}	0.018^{d}	0.123^{bcd}	0.332^{c}	0.252^{bc}	0.125^{cd}	$0.206^{a/d}$	0.126^{ab}	0.140^{bc}
Reduced tillage کم‌خاک‌ورزی	First اولین	$0.103^{a/d}$	0.464^{c}	0.233^{e}	0.480^{bc}	7.31^{de}	0.106^{h}	0.029^{abc}	0.112^{d}	0.323^{cd}	0.249^{c}	0.142^{a}	0.181^{de}	0.106^{e}	0.141
	Second دومین	0.084^{f}	0.478^{c}	0.222^{e}	0.890^{abc}	6.77^{de}	0.780^{cd}	0.024^{bcd}	0.129^{bc}	0.318^{cd}	0.247^{c}	0.124^{cd}	$0.194^{b/e}$	0.123^{abc}	0.153^{bc}
	Third سومین	$0.101^{a/e}$	0.515^{b}	0.226^{e}	1.894^{a}	5.64^{e}	0.810^{c}	0.038^{a}	0.156^{a}	0.320^{cd}	0.262^{a}	0.139^{a}	0.182^{de}	0.123^{abc}	0.194^{a}
	Forth چهارمین	0.108^{ab}	0.536^{ab}	0.288^{bc}	0.107^{c}	7.91^{cde}	0.917^{b}	0.039^{a}	0.168^{a}	0.324^{cd}	0.240^{cd}	0.133^{abc}	0.191^{cde}	0.107^{cde}	0.206^{a}
No tillage بی‌خاک‌ورزی	First اولین	$0.098^{a/f}$	0.469^{c}	0.236^{de}	0.821^{abc}	8.06^{cde}	0.107^{h}	0.029^{abc}	0.115^{cd}	0.324^{cd}	0.246^{c}	0.137^{ab}	0.187^{cde}	0.110^{cde}	0.144^{bc}
	Second دومین	$0.091^{c/f}$	0.478^{c}	0.268^{cd}	0.000^{c}	$10.6^{b/e}$	0.743^{d}	0.026^{bcd}	0.113^{d}	0.337^{bc}	0.224^{e}	0.125^{cd}	0.213^{abc}	0.099^{e}	0.139^{c}
	Third سومین	0.091^{def}	0.531^{ab}	0.269^{cd}	0.339^{c}	$10.5^{b/e}$	0.940^{b}	0.030^{ab}	0.132^{b}	0.355^{ab}	0.265^{a}	0.132^{abc}	0.223^{a}	0.133^{a}	0.160^{b}
	Forth چهارمین	0.110^{ab}	0.539^{a}	0.313^{ab}	0.000^{c}	13.6^{b}	1.130^{a}	0.031^{ab}	0.154^{a}	0.356^{a}	0.251^{bc}	0.139^{a}	0.217^{ab}	$0.112^{b/e}$	0.186^{a}

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

In each column, numbers with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

(جدول ۲). مقایسه میانگین اثر سال بر مقادیر Meso-P نشان داد که روند تغییرات آن افزایشی است (جدول ۳). وجود مواد آلی و تجزیه آن علاوه بر افزایش Macro-P، سبب افزایش Meso-P نیز شده است. بیش‌ترین مقدار Meso-P در سال چهارم انجام آزمایش مشاهده شد. مقدار Meso-P تیمار خاک‌ورزی مرسوم در سال اول بیش‌ترین مقدار خود را داشت و در سه سال آخر انجام آزمایش تقریباً ثابت شده و تغییر معنی‌داری نداشت (جدول ۴). اما تیمارهای بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی در چهار سال روند افزایشی داشتند که دلیل آن افزایش ماده آلی و بهبود ساختمان خاک است. بیش‌ترین مقدار Meso-P در تیمار کم‌خاک‌ورزی سال چهارم مشاهده شد (جدول ۴).

نتایج تجزیه واریانس آثار اصلی و برهم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر منافذ ریز (Micro-P) نشان داد که بین این مقادیر تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد وجود دارد (جدول ۱). مقادیر Micro-P در تیمار بی‌خاک‌ورزی بیش‌تر از سایر تیمارها بود و پس از آن، تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی قرار داشتند (جدول ۲). به‌نظر می‌رسد نگهداشت آب در مکش ماتریک ۱۰۰ هکتوپاسکال که نظیر منافذ ریز بوده، وجود مواد آلی و حفظ ساختار طبیعی خاک باعث پایداری خاک‌دانه‌ها و کاهش فشردگی شده و در نتیجه سبب نگهداشت آب بیش‌تر شده است. این نتیجه با یافته‌های Bhattacharyya et al. (2006) هم‌خوانی دارد. آن‌ها ذخیره بیش‌تر رطوبت خاک به دلیل افزایش منافذ ریز در سامانه بی‌خاک‌ورزی را گزارش کردند. مقایسه میانگین اثر سال بر مقادیر Micro-P روند افزایش این شاخص در ۴ سال انجام آزمایش را نشان می‌دهد. بین مقادیر Micro-P در سامانه خاک‌ورزی مرسوم در طول چهارسال (به جز سال اول) تغییر معنی‌دار مشاهده نشد (جدول ۴)، هرچند این روند افزایشی بود. Safadoust et al. (2007) افزایش Micro-P در سامانه خاک‌ورزی مرسوم را گزارش کردند. در سامانه کم‌خاک‌ورزی، تغییر معنی‌داری در مقادیر Micro-P در طول چهار سال انجام آزمایش مشاهده نشد (جدول ۴). اما در سامانه بی‌خاک‌ورزی، مقادیر Micro-P روند افزایشی داشته و در سال چهارم به دلیل وجود مواد آلی و کمک به نگهداشت آب به بیش‌ترین مقدار خود رسید (جدول ۴). Bauer and Black (1981) و Jong (1983) افزایش نگهداشت آب در مکش ماتریک ۱۰۰ هکتوپاسکال را به دلیل افزایش مواد آلی گزارش کردند.

مقادیر تخلخل پر از هوا (AFP) بزرگ‌تر از ۰/۱ $cm^3\ cm^{-3}$ برای جلوگیری از کاهش عملکرد محصول به دلیل کمبود تهویه در منطقه ریشه توصیه می‌شود (White, 2005). Carter (1988) بیان کرد که در خاک‌های ریز بافت و متوسط‌بافت برای بیش‌ترین عملکرد محصول، AFP بیش‌تر از ۰/۱۲ تا $cm^3 \cdot cm^{-3}$ ۰/۱۷ ضروری است. درحالی‌که AFP کم‌تر از ۰/۱۰$cm^3\ cm^{-3}$ باعث بروز بیماری‌های ریشه‌ای و اختلال در رشد گیاه می‌شود (Drewry et al., 2008). مقادیر AFP تیمارهای مورد بررسی در دامنه مطلوب بود (جدول ۲). اثر سامانه خاک‌ورزی، سال و برهم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر AFP معنی‌دار شد ($p < ۰/۰۱$). بیش‌ترین مقدار AFP به‌ترتیب مربوط به تیمار کم‌خاک‌ورزی، بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم بود (جدول ۲). این نتیجه با نتایج Roseberg and McCoy (1992) هم‌خوانی دارد. آن‌ها بیان کردند که AFP در خاک‌ورزی مرسوم نسبت به سامانه بی‌خاک‌ورزی به‌طور معنی‌دار کم‌تر است. وجود مواد آلی همزمان با به‌هم‌خوردن خاک در تیمار کم‌خاک‌ورزی سبب AFP یا به عبارت دیگر مجموع منافذ درشت و متوسط بیش‌تر شده است. این نتیجه با یافته‌های Safadoust et al. (2007) هم‌خوانی دارد. آن‌ها گزارش کردند که مجموع منافذ درشت و متوسط (تفاوت رطوبت بین مکش‌های ماتریک صفر و ۱۰۰ هکتوپاسکال) در سامانه کم‌خاک‌ورزی دارای بیش‌ترین مقدار است. تغییرات مقادیر AFP در دو سال اول انجام آزمایش معنی‌دار نشد اما در سال‌های سوم و چهارم تغییرات معنی‌دار شد (جدول ۳). از سال سوم به بعد با تجزیه مواد آلی و تأثیر آن بر منافذ درشت و متوسط، AFP افزایش یافت. مقادیر AFP در خاک‌ورزی مرسوم در طول چهار سال، روند کاهشی داشت اما در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی روند افزایشی

مشـــاهده شـــد (جدول ۴). دلیل این یافته را می‌توان به افزایش منافذ درشت خاک در اثر افزودن مواد آلی نسبت داد.

به نظر می‌رسـد سـامانه‌های خاک‌ورزی با گذشـت زمان بر تمامی گروه‌های منافذ خاک با اندازه‌های مختلف (ریز، متوسط و درشـت) اثر گذاشـته‌اند. با توجه به مطالب بیان‌شـده، این اثر بیش‌تر بر منافذ درشت و متوسطخاک بوده است. حضور بقایای گیاهی و فعالیت بیولوژیک مانند کرم‌های خاکی ممکن اســـت باعث ایجاد منافذ درشـت شـده باشـد. در طول زمان و فعالیت موجودات خاک‌زی، منافذ متوسط افزایش یافته‌اند. کاهش تراکم خاک در اثر استفاده از سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی نیز نقش مهمی در بهبود این گروه از منافذ دارد. عدم جابجایی خاک و حفظ بقایای گیاهی، موجب افزایش منافذ ریز نیز شـــده اســـت. در ضـــمن منافذ ریز نظیر با نگهداشـــت آب در مکش ماتریک ۱۰۰ هکتوپاسـکال در نظر گرفته شـده‌اند. بدیهی اسـت که وجود مواد آلی سـبب افزایش نگهداشـت آب خاک در این مکش شـــده اســـت. به‌طور کلی عواملی مانند افزایش مواد آلی خاک و فعالیت بیولوژیک و کاهش تراکم خاک در این تغییرات نقش کلیدی داشتند.

گنجایش مزرعه‌ای، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس

آثار اصـــلی و برهم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر گنجایش مزرعه‌ای (θ_{FC}) در سـطح یک درصـد معنی‌دار شـد (جدول ۱). ترتیب مقـادیر θ_{FC} بـه‌صـــورت کم‌خـاک‌ورزی > بی‌خـاک‌ورزی > خاک‌ورزی مرســـوم بود. تفاوت بین مقادیر این شـــاخص در سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی معنی‌دار نشـد. وجود مواد آلی سـبب افزایش معنی‌دار مقادیر θ_{FC} در ســـامانه‌های بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی نسـبت به خاک‌ورزی مرســـوم شده است. پژوهشگران زیادی افزایش θ_{FC} به دلیل افزایش ماده آلی خاک را گزارش دادند (Bauer and Black, 1981; Riley, 1981; Jong, 1983). Riahinia et al. (2017) بیان کردند که گنجایش مزرعه‌ای در سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی نسـبت به خاک‌ورزی مرسـوم بیش‌تر اسـت. بین مقادیر θ_{FC} در طول چهار سال به غیر از سال دوم تغییر معنی‌دار ایجاد نشد. با این‌حال افزایش کمی در مقدار θ_{FC} در سـال‌های سـوم و چهارم مشـاهده شـد (جدول ۳). بیش‌ترین مقادیر θ_{FC} در سـامانه‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی در ســـال‌های ســـوم و چهارم مشـــاهده شـــد که به افزایش مواد آلی مرتبط اســـت. بیش‌ترین مقـادیر OC در ســـال‌هـای ســـوم و چهـارم در تیمـارهـای بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی مشاهده شد (جداول ۳ و ۴).

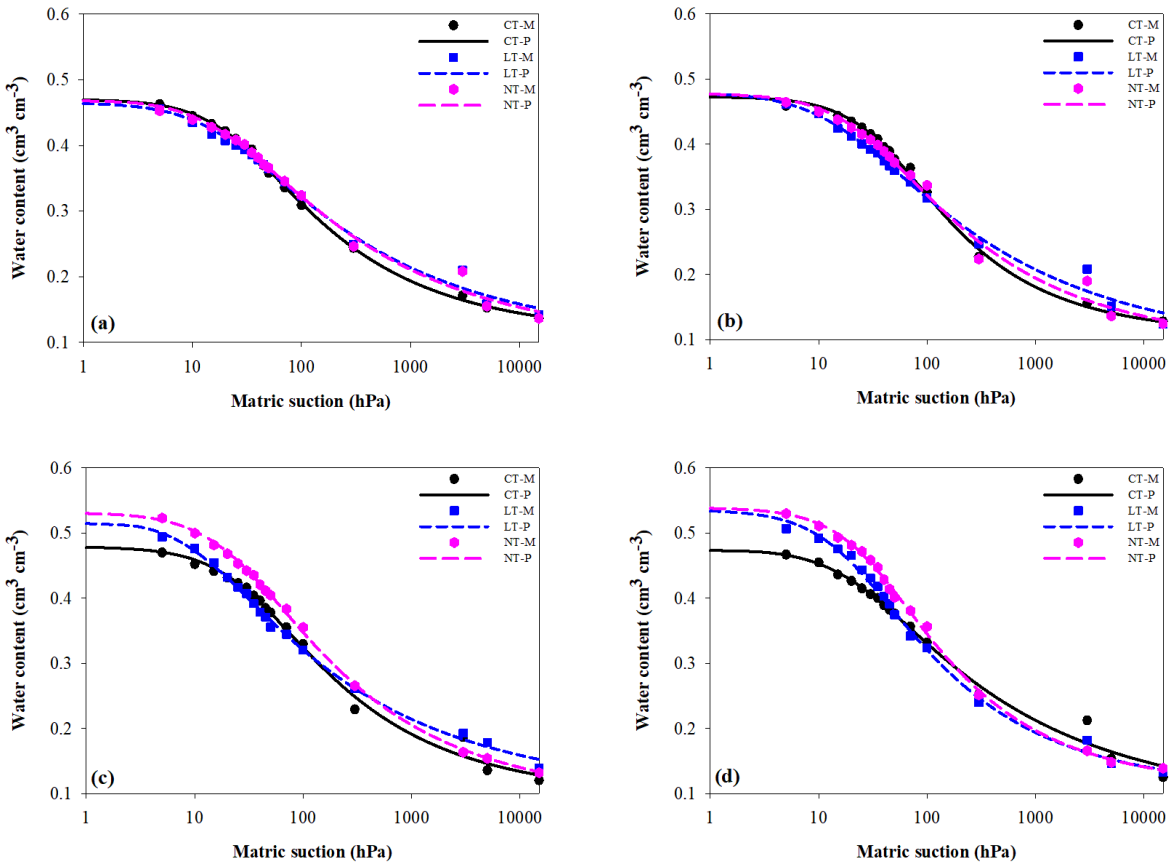
آثار اصـــلی و برهم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) معنی‌دار شـــد (جدول ۱). بیش‌ترین مقدار θ_{PWP} به‌ترتیب مربوط به ســـامانه‌های کم‌خاک‌ورزی، بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسـوم بود. تفاوت بین مقادیر θ_{PWP} در سـامانه‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی اندک بود و معنی‌دار نشد (جدول ۲). پژوهشگران زیادی افزایش نگهداشت آب در θ_{PWP} را در اثر افزایش مـاده آلی خـاک در ســـامـانـه‌هـای بی‌خـاک‌ورزی و کم‌خـاک‌ورزی گزارش کردنـد (McBride and Mackintosh, 1984; Beke and Maccormick, 1985; Bell and Van Keulen, 1995). بیش‌ترین مقـادیر θ_{PWP} در ســـال‌هـای اول و چهـارم مشـــاهده شـــد (جدول ۳). با بررســـی اثر برهم‌کنش ســـامانه خاک‌ورزی و سال بر مقادیر θ_{PWP} مشخص شد که این شاخص در سال چهارم در تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی به میزان کمی نسـبت به سـال اول کاهش یافت. با این حال در تیمار کم‌خاک‌ورزی از سال دوم تا چهارم روند افزایشی بود. به بیان دیگر مقادیر θ_{PWP} در تیمار کم‌خاک‌ورزی تنها در سال دوم کاهش یافت و ســـپس تا ســـال چهارم هرچند به مقدار کم اما روند افزایشـــی به خود گرفت (جدول ۴). مقدار θ_{PWP} در تیمار بی‌خاک‌ورزی در طول ۴ سال کمی افزایش یافت (جدول ۴). به نظر می‌رســـد تأثیر ماده آلی خاک بر θ_{PWP} کم‌تر از تأثیر آن بر نگهداشت آب در θ_{FC} بود. Rawls et al. (2003) گزارش کردند که نگهداشت آب در θ_{FC} نسبت به θ_{PWP} بیش‌تر تحت تأثیر ماده آلی است. به‌نظر می‌رسد که اثر ماده آلی بر نگهداشت آب خاک در مکش‌های ماتریک زیاد نیاز به زمان (بیش از ۴ ســـال) و تجزیه بیش‌تر مواد آلی دارد.

مقادیر آب قابل دسترس (AWC_{100}) در بین تیمارهای مورد بررسی بسیار نزدیک به هم است. با این‌حال بیش‌ترین مقدار AWC_{100} مربوط به تیمار بی‌خاک‌ورزی بود (جدول ۲). Ahmadi et al. (2022) افزایش AWC_{100} در سامانه بی‌خاک‌ورزی را نسبت به خاک‌ورزی مرسوم به دلیل افزایش مواد آلی گزارش دادند. همچنین براساس نتایج Riahinia et al. (2017) بین هر سه تیمار خاک‌ورزی تفاوت معنی‌داری وجود داشت به‌طوری‌که آب قابل استفاده گیاه در تیمار بی‌خاک‌ورزی > تیمار کم‌خاک‌ورزی > خاک‌ورزی مرسوم بود. روند تغییرات AWC_{100} در چهار سال انجام آزمایش افزایشی بود که در سه سال آخر آزمایش این افزایش معنی‌دار نشد (جدول ۳). بیش‌ترین مقدار AWC_{100} در تیمار بی‌خاک‌ورزی در سال سوم مشاهد شد (جدول ۴). مقادیر AWC_{300} در بین سه تیمار خاک‌ورزی معنی‌دار نشد هر چند که این مقدار در تیمار بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی کمی بیش‌تر بود (جدول ۲). همان‌طورکه پیش از این بیان شد تأثیر حفظ مواد آلی در خاک بر مقادیر نگهداشت آب در مکش‌های ماتریک زیاد کم‌تر است. بیش‌ترین مقدار AWC_{300} در سال سوم و سپس سال چهارم مشاهده شد (جدول ۳). به نظر می‌رسد حضور مواد آلی سبب افزایش اندک مقادیر AWC_{300} در سال‌های سوم و چهارم شده است. بیش‌ترین مقدار AWC_{300} همانند AWC_{100} در تیمار بی‌خاک‌ورزی در سال سوم مشاهده شد (جدول ۴).

منحنی مشخصه رطوبتی (WRC)

در شکل (۱) داده‌های اندازه‌گیری‌شده برای WRC به همراه برازش مدل ون‌گنوختن-کوسوگی بر آن‌ها برای تیمارهای مورد بررسی ارائه شده است. مدل ون‌گنوختن-کوسوگی به‌خوبی بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده برازش یافته است (R^2=0.988–0.999)، که نشان از توان‌مندی این مدل برای مدل‌سازی منحنی نگهداشت آب (WRC) در خاک دارد. از دلایل برتری این مدل نسبت به مدل رایج ون‌گنوختن، مفهوم فیزیکی مستقل سه پارامتر آن در رابطه با مکش ورود هوا (h_{cVG})، مکش در نقطه عطف (h_{0VG}) و شیب (m) منحنی مشخصه رطوبتی است. ولی در مدل ون‌گنوختن مکش ورود هوا وجود ندارد و پارامتر α برابر مکش در نقطه عطف منحنی نیست، هر چند که با آن ارتباط دارد (Shahmansouri, 2022; Kosugi, 1994). با توجه به شکل (۱) می‌توان بیان کرد که در سال‌های اول و دوم WRC خاک تیمارهای مورد بررسی تفاوت چندانی با هم ندارند. در سال‌های سوم و چهارم، منحنی‌های WRC در تیمارهای مورد بررسی به ویژه در مکش‌های ماتریک کم تفاوت ایجاد شد. نگهداشت آب خاک در تیمارهای بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی در مکش‌های ماتریک کم نسبت به تیمار خاک‌ورزی مرسوم افزایش یافت. این تفاوت ناشی از تغییر توزیع اندازه منافذ خاک در تیمارهای بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی است. به‌نظر می‌رسد از سال سوم به بعد اثر نگهداشت بقایای آلی در زمین در تیمار بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی بر نگهداشت آب خاک در مکش‌های ماتریک کم مثبت بوده است. در مکش‌های ماتریک زیاد تفاوت چندانی بین منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک تیمارهای مورد بررسی مشاهده نشد.

نتایج تجزیه واریانس اثر نوع سامانه خاک‌ورزی، سال و بر هم‌کنش بین آن‌ها بر پارامترهای مدل ون‌گنوختن-کوسوگی در جدول (۱) ارائه شده است. آثار اصلی و برهم‌کنش بین آن‌ها بر برخی از پارامترها معنی‌دار و بر بعضی از آن‌ها معنی‌دار نبود (جدول ۱). اثر نوع سامانه خاک‌ورزی و سال بر مقادیر رطوبت باقی‌مانده (θ_r) غیرمعنی‌دار و اثر برهم‌کنش بین آن‌ها معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین پارامترهای مدل ون‌گنوختن-کوسوگی در جداول ۲، ۳ و ۴ ارائه شده است. تفاوت مقادیر θ_r در سه سامانه خاک‌ورزی بسیار کم بود. با این وجود بیش‌ترین مقدار θ_r مربوط به سامانه خاک‌ورزی مرسوم بود. هر چند این تفاوت مقادیر بسیار کم بوده و می‌توان آن را نادیده گرفت (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر زمان بر مقادیر θ_r در جدول (۳) ارائه شده است. تفاوت مقادیر θ_r در بین سال‌های انجام آزمایش بسیار کم بود و معنی‌دار نشد (جداول ۱ و ۲). بیش‌ترین مقدار θ_r در سال اول و کم‌ترین مقدار آن مربوط به



شکل ۱. منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک در سال‌های اول (a)، دوم (b)، سوم (c) و چهارم (d) انجام آزمایش؛ نقاط داده‌های اندازه‌گیری‌شده و منحنی‌ها برازش مدل ون‌گنوختن-کوسوگی را نشان می‌دهند (منحنی‌ها میانگین تکرارهای آزمایشی است). CT: خاک‌ورزی مرسوم، LT: کم‌خاک‌ورزی، NT: بی‌خاک‌ورزی.

Fig. 1. Water retention curves in the first (a), second (b), third (c) and fourth (d) years of the experiment; The points are measured data and the curves show the fit of the van Genuchten-Kosugi model (the curves are the average of experimental replications). CT: Conventional tillage, LT: Low tillage, NT: No tillage.

سال دوم بود. اثر زمان بر مقادیر θ_r در سال دوم کاهشی اما سپس افزایش یافته است (جدول ۲). به نظر می‌رسد پس از سال دوم منافذ ریز خاک کمی افزایش پیدا کرده است. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش سامانه خاک‌ورزی و سال در جدول (۴) ارائه شده است. لازم به ذکر است که تفاوت بین مقادیر θ_r هر چند کم اما معنی‌دار بود (جدول ۴). بیش‌ترین مقدار θ_r مربوط به تیمار خاک‌ورزی مرسوم در سال اول است. در خاک‌ورزی مرسوم، عملیات شخم موجب خرد شدن خاک‌دانه‌ها و تغییر در توزیع منافذ خاک می‌شود. این تغییرات باعث افزایش منافذ ریز می‌گردد که موجب افزایش آب غیرمویینه و θ_r می‌شود. کم‌ترین مقدار این پارامتر (θ_r) مربوط به تیمار کم‌خاک‌ورزی در سال دوم بود.

آثار اصلی (سامانه خاک‌ورزی و سال) و برهم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر رطوبت اشباع (θ_s) معنی‌دار شد (جدول ۱). تفاوت مقادیر θ_s در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی معنی‌دار شد. مقدار θ_s در تیمار خاک‌ورزی مرسوم از دو تیمار کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی کم‌تر بود (جدول ۲). این یافته با نتایج سایر پژوهشگران همخوانی دارد. Azooz and Arshad (1996)، θ_s بیش‌تر تحت سامانه بی‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم در خاک‌های لوم سیلت و لوم شنی را گزارش کردند.

Bhattacharyya et al. (2006) با بررسی اثر سامانه‌های خاک‌ورزی بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در چهار سال بیان کردند که رطوبت اشباع خاک در سامانه بی‌خاک‌ورزی نسبت به سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم بیش‌تر بود. به نظر می‌رسد نگهداشت بقایای آلی در زمین سبب افزایش θ_s در تیمارهای بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی شده است. شخم به دلیل به‌هم‌زدن ساختمان خاک، خرد کردن بقایای آلی و کاهش خاکدانه‌های پایدار، معمولاً تأثیر منفی بر θ_s دارد. این فرآیند باعث کاهش مقدار ماده آلی در لایه رویین خاک و از بین بردن منافذ پایدار می‌شود که در نگهداری رطوبت نقش دارند.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر اصلی زمان بر مقادیر θ_s در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است (جدول ۱). با گذشت زمان مقدار θ_s افزایش یافت. دلیل این یافته را می‌توان به تجمع مواد آلی و افزایش تخلخل خاک نسبت داد (Tadayonnejad et al., 2023). مقادیر θ_s در سال‌های اول و دوم تفاوت معنی‌دار نداشت. به نظر می‌رسد که اثر ماده آلی بر افزایش مقادیر θ_s از سال سوم به بعد نمایان شده است زیرا تجزیه مواد آلی و تأثیر بر ساختمان خاک به زمان بیش‌تری نیاز دارد. افزایش مقادیر θ_s در سال‌های سوم و چهارم انجام آزمایش به‌خوبی قابل مشاهده است (جدول ۳ و شکل ۱). این یافته با نتایج Mekkaoui et al. (2021) که بیان کردند سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی از طریق انباشت ماده آلی، θ_s را افزایش داده و سبب کاهش فرسایش را در شمال غربی مراکش شده است.

مقادیر θ_s در تیمار خاک‌ورزی مرسوم در چهار سال انجام آزمایش تفاوت معنی‌دار نداشت. اما در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی روند افزایشی مقادیر θ_s در چهار سال انجام آزمایش به‌خوبی قابل مشاهده است (جدول ۴). این نتیجه با یافته‌های Ferreras et al. (2000) هم‌خوانی‌دارد. آن‌ها افزایش θ_s با گذشت زمان در سامانه بی‌خاک‌ورزی را گزارش دادند. همچنین Yuan et al. (2023) در پژوهشی افزایش نگهداشت آب خاک در مکش‌های ماتریک کم را در سامانه بی‌خاک‌ورزی گزارش کردند درحالی‌که گنجایش مزرعه‌ای تغییری نکرد. نکته قابل توجه این است که در دو سال ابتدایی مقادیر θ_s در همه سامانه‌های خاک‌ورزی تفاوت معنی‌دار نداشت و اثر مواد آلی بر نگهداشت آب از سال سوم نمایان شده است. بیش‌ترین مقدار θ_s مربوط به تیمارهای بی‌خاک‌ورزی در سال‌های سوم و چهارم و تیمار کم‌خاک‌ورزی در سال چهارم است (جدول ۴).

پارامتر m با شیب ناحیه دوم WRC ارتباط دارد. با افزایش m، شیب منحنی WRC بیش‌تر می‌شود که بیانگر افزایش شیب ناحیه غیراشباع‌شدن این منحنی است. مقدار پارامتر m بین صفر و یک متغیر است (Kosugi, 1994). اثر سامانه خاک‌ورزی، سال و برهم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر m معنی‌دار شد (جدول ۱). مقادیر m در چهار سال انجام آزمایش در دامنه ۰/۲۵۳ تا ۰/۲۷۳ متغیر بود. بیش‌ترین مقدار آن مربوط به سال چهارم است (جدول ۳). با گذشت زمان و اعمال سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی منافذ متوسط و ریز خاک روند صعودی داشته و باعث افزایش مقادیر m شده‌اند (جدول ۳). پارامتر m رابطه مستقیمی با منافذ ریز (Micro-P) و متوسط (Meso-P) دارد. با افزایش m، مقدار هر دو گروه منافذ خاک افزایش یافت، اما این رابطه برای منافذ متوسط قوی‌تر است (جدول ۳). سامانه خاک‌ورزی مرسوم در سال دوم باعث افزایش مقدار m شد اما در سال‌های سوم و چهارم روند تغییر مقدار m کاهشی شد (جدول ۴). به نظر می‌رسد خاک‌ورزی مرسوم در کوتاه‌مدت اثر مثبت داشته و در درازمدت باعث کاهش منافذ متوسط و درشت می‌شود. مقادیر m در دو سامانه کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی در چهار سال روند افزایشی داشته که دلیل آن را می‌توان تأثیر مثبت مواد آلی بر منافذ متوسط و ریز دانست (جدول ۴).

پارامتر h_{cVG} برابر با مکش ورود هوا بوده و به قطر بزرگ‌ترین منافذ در خاک مرتبط است. قطر بزرگ‌ترین منافذ با افزایش h_{cVG} کاهش می‌یابد. اثر سامانه خاک‌ورزی و سال بر مقادیر h_{cVG} معنی‌دار نشد (جدول ۱). با این‌حال کم‌ترین مقدار h_{cVG} مربوط به تیمار بی‌خاک‌ورزی بود. به‌نظر می‌رسد تیمار بی‌خاک‌ورزی به دلیل وجود مواد آلی، خاکدانه‌سازی و ایجاد منافذ درشت سبب نفوذ بهتر هوا به خاک شده است (جدول

۲). مقدار h_{cVG} در تیمار خاک‌ورزی مرسوم در سال چهارم افزایش پیدا کرد که نشان از اثر منفی این سامانه در درازمدت بر مقادیر منافذ درشت است. در تیمار خاک‌ورزی مرسوم منافذ درشت خاک در سال چهارم به کم‌ترین مقدار خود رسید (جدول ۳). مقدار h_{cVG} در تیمار بی‌خاک‌ورزی در سال چهارم برابر صفر شد (جدول ۴). پارامتر h_{0VG} مرتبط با فراوان‌ترین منافذ در خاک است و مکش ماتریک در نقطه عطف WRC را نشان می‌دهد. منحنی WRC با افزایش h_{0VG} به‌سمت راست (یعنی مکش‌های ماتریک بیش‌تر) جابجا می‌شود. اثر سامانه خاک‌ورزی و اثر برهم‌کنش سامانه خاک‌ورزی و سال بر مقادیر h_{0VG} معنی‌دار شد (جدول ۱). بیش‌ترین مقدار h_{0VG} مربوط به تیمار خاک‌ورزی مرسوم بود که بیش‌ترین منافذ متوسط را نیز داشت (جدول ۲).

اثر تیمارهای خاک‌ورزی بر عملکرد جو و گلرنگ به‌طور مفصل در گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی بحث شده است اما شایان ذکر است که اثر تیمارهای خاک‌ورزی بر عملکرد دانه جو معنی‌دار نبود و بیش‌ترین افزایش معنی‌دار عملکرد بیولوژیک گلرنگ به میزان ۱۵ تن در هکتار در تیمار کم‌خاک‌ورزی به‌دست آمد. همچنین بیش‌ترین افزایش معنی‌دار عملکرد دانه گلرنگ به میزان ۴/۵ تن در هکتار در تیمار بی‌خاک‌ورزی حاصل شد (Gandomkar, 2023).

نتیجه‌گیری

خاک‌ورزی حفاظتی (بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) سبب افزایش تمامی منافذ خاک (درشت، متوسط و ریز) به نسبت‌های متفاوت شد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که در طی چهار سال انجام آزمایش، افزایش مواد آلی تأثیر به‌سزایی بر افزایش فراوانی منافذ درشت و متوسط خاک داشته است، درحالی‌که آثار کم‌تری بر منافذ ریز خاک دیده شد. از طرفی در خاک‌ورزی مرسوم با گذشت چهار سال، فراوانی منافذ درشت و متوسط کاهش یافته و فراوانی منافذ ریز افزایش پیدا کردند. در روش بی‌خاک‌ورزی، بقایای آلی و فعالیت ریزجانداران باعث تشکیل خاکدانه‌های پایدار و بهبود ساختمان خاک می‌شوند. حفظ خاکدانه‌ها بدون تخریب ناشی از شخم، موجب پایداری خاک و نفوذپذیری بهتر آن می‌شود. تأثیر خاک‌ورزی حفاظتی با گذر زمان بر شاخص‌های مختلف از جمله رطوبت اشباع، گنجایش مزرعه‌ای، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس به‌طور قابل توجهی مثبت بود. این نکته مهم است که اثر مثبت ماده آلی و افزایش نگهداشت آب در مکش‌های ماتریک کم بیش‌تر مشهود بود.

یکی از مشکلات خاک‌های خشک و شور، کمبود مواد آلی است که منجر به کاهش توانایی خاک در نگهداری رطوبت می‌شود. با اجرای روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و افزایش ماده آلی خاک، توانایی خاک در مقابله با آثار منفی خشکی و شوری بهبود می‌یابد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، خاک‌ورزی نامناسب می‌تواند باعث بالا آمدن نمک‌ها به سطح خاک شود و شوری را افزایش دهد. با حفظ پوشش گیاهی و کاهش به‌هم‌زدن خاک، سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی می‌توانند از راه کاهش تبخیر و افزایش نگهداشت آب از حرکت نمک‌ها به‌سمت بالا جلوگیری کنند، که این فرایند در خاک‌های شخم‌زده و شور بسیار رایج است. به‌طور کلی، دست‌خوردگی کم‌تر خاک در سال‌های خشک می‌تولند منجر به کاهش هدررفت رطوبت خاک شود. این اثر مثبت به دلیل بهبود توزیع اندازه منافذ و حفظ ساختمان خاک است. از سوی دیگر، به‌هم‌خوردگی بیش از حد خاک ممکن است منجر به از دست رفتن رطوبت، کاهش ماده آلی و تخریب ساختمان خاک شود. بنابراین، خاک‌ورزی حفاظتی می‌تولند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای خاک‌ورزی مرسوم در شرایط خشک و شور، باعث کاهش هزینه و افزایش کارآیی مصرف آب شود.

تشکر و سپاسگزاری

از مؤسسه تحقیقات خاک و آب و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان بابت همکاری در اجرای این پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچگونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده References

1. Afyuni, M., Mosaddeghi, M.R., 2001. Impact of tillage system on soil physical properties and bromide leaching. J. Sci. Technol. Agric. Nat. Resour. 5(2), 39–53. (In Persian with English abstract)
2. Ahmadi, F., 2022. The Effects of Conservation Tillage on Physical and Hydraulic Properties of Soil in A Semiarid Region. MSc Thesis. Urmia University. Urmia. Iran.
3. Azooz, R., Arshad, M., 1996. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. Can. J. Soil Sci. 76(2), 143–152. https://doi.org/10.4141/cjss96-021.
4. Bandaranayake, W., Butters, G., Hamdi, M., Prieksat, M., Ellsworth, T., 1998. Irrigation and tillage management effects on solute movement. Soil Tillage Res. 46(3–4), 165–173. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00029-4.
5. Barzegar, A., 1995. Structural Stability and Mechanical Strength of Salt-affected Soils. PhD Thesis, Adelaide University, Australia.
6. Bauer, A., Black, A., 1981. Soil carbon, nitrogen, and bulk density comparisons in two cropland tillage systems after 25 years and in virgin grassland. Soil Sci. Soc. Am. J. 45(6), 1166–1170. https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500060032x.
7. Beke, G., Maccormick, M., 1985. Predicting volumetric water retentions for subsoil materials from Colchester County, Nova Scotia. Can. J. Soil Sci. 65(1), 233–236. https://doi.org/10.4141/cjss85-026.
8. Bell, M., Van Keulen, H., 1995. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 59(3), 865–871. https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900030034x.
9. Bhattacharyya, R., Prakash, V., Kundu, S., Gupta, H., 2006. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. Soil Tillage Res. 86(2), 129–140. https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.018.
10. Bhattacharyya, R., Tuti, M., Kundu, S., Bisht, J., Bhatt, J., 2012. Conservation tillage impacts on soil aggregation and carbon pools in a sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. Soil Sci. Soc. Am. J. 76(2), 617–627. https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0320.
11. Carter, M., 1988. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. Soil Tillage Res. 12(1), 37–51. https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90054-2.
12. CEN, 2001. European Committee for Standardisation CEN/TC 223. Soil Improvers and Growing Media- Extraction of Water Soluble Nutrients. EN 13652, pp. 15.
13. Drewry, J., Cameron, K., Buchan, G., 2008. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing—a review. Soil Res. 46(3), 237–256. https://doi.org/10.1071/SR07125.
14. El Mekkaoui, A., Moussadek, R., Mrabet, R., Douaik, A., El Haddadi, R., Bouhlal, O., Chakiri, S., 2023. Effects of tillage systems on the physical properties of soils in a semi-arid region of Morocco. Agriculture 13(3), 683. https://doi.org/10.3390/agriculture13030683.
15. Emerson, W., 1995. Water-retention, organic-C and soil texture. Soil Res. 33(2), 241–251. https://doi.org/10.1071/SR9950241.
16. Fernández-Ugalde, O., Virto, I., Bescansa, P., Imaz, M., Enrique, A., Karlen, D., 2009. No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone, semiarid soils. Soil Tillage Res. 106(1), 29–35. https://doi.org/10.1016/j.still.2009.09.012.
17. Farahani, E., Emami, H., Forouhar, M., 2022. Effects of tillage systems on soil organic carbon and some soil physical properties. Land Degrad. Dev. 33(8), 1307–1320. https://doi.org/10.1002/ldr.4221.
18. Ferreras, L., Costa, J., Garcia, F., Pecorari, C., 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern "Pampa" of Argentina. Soil Tillage Res. 54(1-2), 31–39. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00102-6.
19. Gandomkar, A., 2023. Optimization N recomendation in barley-safflower rotation at conservation agriculture and salinity condition. Soil and Water Research Institute. Report No. 2563. http://www.swri.ir/_DouranPortal/Documents/2563_20240630_082306.pdf
20. Indoria, A.K., Rao, C.S., Sharma, K.L., Reddy, K.S., 2017. Conservation agriculture 2013; a panacea to improve soil physical health. Curr. Sci. 112(1), 52–61.
21. Jong, R.d., 1983. Soil water desorption curves estimated from limited data. Can. J. Soil Sci. 63(4), 697–703.

https://doi.org/10.4141/cjss83-071.
22. Klute, A., 1986. Water retention: laboratory methods. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods. ASA/SSSA, Madison, WI, pp. 635–662.
23. Kosugi, K., 1994. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. Water Resour. Res. 30(4), 891–901. https://doi.org/10.1029/93WR02931.
24. Mcbride, R., Mackintosh, E., 1984. Soil survey interpretations from water retention data: I. Development and validation of a water retention model. Soil Sci. Soc. Am. J. 48(6), 1338–1343. https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800060028x.
25. Moussadek, R., Laghrour, M., Mrabet, R., Van Ranst, E., 2022. Crop yields under climate variability and no-tillage system in dry areas of Morocco. Ecol. Eng. Environ. Tech. 24 (1). https://doi.org/10.12912/27197050/155024.
26. Rawls, W., Pachepsky, Y.A., Ritchie, J., Sobecki, T., Bloodworth, H., 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. Geoderma 116(1–2), 61–76. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6.
27. Reynolds, W., Drury, C., Yang, X., Tan, C., 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. Geoderma 146(3–4), 466–474. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.017.
28. Riahinia., F., 2017. Study of The Effects of Tillage Management on Soil Quality Indices. MSc Thesis, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.
29. Roseberg, R., McCoy, E., 1992. Tillage-and traffic-induced changes in macroporosity and macropore continuity: Air permeability assessment. Soil Sci. Soc. Am. J. 56(4), 1261–1267. https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600040042x.
30. Safadoust, A., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A., Nouroozi, A., Asadian, G., 2007. Short-term tillage and manure influences on soil structural properties. J. Water Soil Sci. 11(41), 91–101. (In Persian with English abstract)
31. Schafer, W.M., 1982. Saline and Sodic Soils in Montana. Montana State University. Cooperative Extension Service. Bulletin (USA)(1123).
32. Shahmansouri, S., 2022. The Effect of Drying and Wetting Cycles on Hydraulic and Aeration Characteristics and Oxygen Diffusion in Greenhouse Growth Media. MSc Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
33. Steponavičienė, V., Žiūraitis, G., Rudinskienė, A., Jackevičienė, K., Bogužas, V., 2024. Long-term effects of different tillage systems and their impact on soil properties and crop yields. Agronomy 14(4), 870. https://doi.org/10.3390/agronomy14040870.
34. Tadayonnejad, M., Yahyaabadi, M., Kazemi, M., 2023. The impact of conservational tillage systems on some physical properties of silty clay loam saline soil. J. Soil Plant Interact. 14(1), 53–69. 10.47176/jspi.14.1.01891. (In Persian with English abstract)
35. Tomanian, N., 2013. Detailed Soil Study of The Kabutarabad Agricultural Research Station. Soil and Water Research Institute, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research Center, pp. 1–73.
36. Veiga, M.d., Reinert, D.J., Reichert, J.M., Kaiser, D.R., 2008. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a Southern Brazilian Hapludox. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32. 1437–1446.
37. 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 Sci. 37(1), 29–38.
38. Wang, J., Pan, Z., Pan, F., He, D., Pan, Y., Han, G., Zhang, J., 2020. The regional water-conserving and yield-increasing characteristics and suitability of soil tillage practices in Northern China. Agric. Water Manag. 228, 105883. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105883.
39. White, R.E., 2005. Principles and Practice of Soil Science: The Soil as a Natural Resource. John Wiley & Sons.
40. Yuan, J., Sadiq, M., Rahim, N., Tahir, M.M., Liang, Y., Zhuo, M., Li, G., 2023. Changes in soil properties and crop yield under sustainable conservation tillage Systems in spring wheat agroecosystems. Land 12(6), 1253. https://doi.org/10.3390/land12061253.