



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 Shahmansouri² 

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 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, 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 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectively) were significantly higher than in the conventional tillage (0.238 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). The AWC_{100} values were similar across the treatments, but the highest value was for the no-tillage treatment (0.210 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). 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),



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 cm³ 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 cm³ 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 cm³ cm⁻³, respectively) were significantly higher than in the conventional tillage (0.238 cm³ 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 AWC₁₀₀ values were similar across the treatments, but the highest value was for the no-tillage (0.210 cm³ 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>



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

مسعود تدین‌نژاد^{۱*} و شاهرخ شاه‌منصوری^۲

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 به ترتیب برابر ۰/۳۲، ۰/۲۹ و ۰/۲۲ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ بود. همچنین تیمار کم‌خاک‌ورزی بیش‌ترین مقدار منافذ متوسط (Meso-P) را دارا بود و مقادیر θ_{FC} در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی (به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۲۴۷ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از خاک‌ورزی مرسوم (۰/۲۳۸ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) 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. ۱۴۰۳ ©.

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) مدیریت خاک‌ورزی به عنوان دو موضوع اساسی و قابل توجه در عملیات مدیریتی به منظور کاهش آلودگی 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 گاواهن 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 می‌کند (Bhattacharyya et al., 2012; Moussadek et al., 2023; Indoria et al., 2017; El Mekkaoui et al., 2023). Mekkaoui et al. (2023) دریافتند که سامانه‌های خاک‌ورزی

حفاظتی، به ویژه بی‌خاک‌ورزی، در میان مدت 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 قبل 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

مواد و روش ها

این پژوهش طی چهار سال در کرت های ثابت ایستگاه تحقیقات کشاورزی حفاظتی کبوترآباد در جنوب شرقی اصفهان انجام شد. خاک منطقه از نوع Fine, Mixed, Thermic, Typic Calciargids (Calcisols FAO) نیمه خشک 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 خاک ورزی و بقایای گیاهی به مدت چهار سال متوالی به اجرا درآمد: ۱- خاک ورزی مرسوم با خروج بقایا از مزرعه (به جز ریشه)، ۲- کم خاک ورزی با حفظ بقایا و ۳- بی خاک ورزی با حفظ بقایا. برای هر یک از تیمارهای مورد بررسی، عملیات آماده سازی زمین و کاشت به شرح زیر انجام شد: تیمار خاک ورزی مرسوم شامل شخم برگردان دار، دو مرحله دیسک متقاطع و در نهایت کاشت با استفاده از بذرکار-خطی کار-کودکار بود. تیمار کم خاک ورزی شامل استفاده از گاوآهن قلمی، ایجاد جوی و پشته و سپس کاشت با بذرکار-خطی کار-کودکار بود. تیمار بی خاک ورزی شامل کاشت مستقیم با بذرکار-خطی کار-کودکار و بدون انجام شخم بود. در قطعه های تیمارهای کم خاک ورزی و بی خاک ورزی تنها بقایای ایستاده محصول سال پیشین (در حدود ۵ تن در هکتار) حفظ شده و سایر بقایا از زمین خارج شدند اما در تیمار خاک ورزی مرسوم تمام بقایای گیاهان زراعی حذف گردید. در تیمار بی خاک ورزی، پس از خرد کردن بقایای ایستاده جو با استفاده از ساقه خردکن، ادوات کاشت و برداشت در مسیر ثابت با حداقل تردد وارد زمین شدند و کاشت مستقیم با خطی کار آمازون انجام شد. در این آزمایش، گیاهان جو رقم بهرخ و گلرنگ رقم صفا به صورت تناوبی کشت شدند؛ به این ترتیب که در سال های اول و سوم جو و در سال های دوم و چهارم گلرنگ کشت گردید.

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

بین سامانه ها تفاوت معنی دار نداشتند و سامانه بی خاک ورزی، همراه با سامانه کم خاک ورزی، به دلیل کربن آلی و ساختمان مناسب خاک، برای مدیریت آب در این مناطق مؤثرتر است.

سامانه های خاک ورزی مختلف تأثیر متفاوتی بر توزیع اندازه منافذ خاک دارند. (Bhattacharyya et al. (2006 افزایش منافذ درشت پیوسته در سامانه بی خاک ورزی را به فعالیت بیش تر جانوران خاک زی 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 خاک ورزی مرسوم به دلیل مخلوط و سست شدن خاک، منافذ درشت و ریز بیش تری نسبت به سامانه بی خاک ورزی وجود دارد. (Veiga et al. (2008 در یک پژوهش ۹ ساله گزارش کردند که در سامانه بی خاک ورزی، افزایش منافذ درشت به دلیل افزایش ماده آلی خاک رخ داده است، درحالی که در سامانه خاک ورزی مرسوم، منافذ ریز به دلیل بهم خوردگی و فشردگی خاک به مرور زمان افزایش یافته است.

با بررسی پژوهش های پیشین، مشخص می شود که نتایج تأثیر روش های خاک ورزی بر ویژگی های خاک بسته به اقلیم منطقه و نوع خاک ورزی متفاوت است. به علت شرایط نفوذ بهتر آب آبیاری و آبشویی بهتر نمک ها در سامانه خاک ورزی مرسوم، تمایل بیش تری برای کاربرد این روش در شرایط شور وجود دارد. این یافته ها ضرورت انجام پژوهش های بیش تر در این زمینه را نشان می دهد تا بهترین سامانه خاک ورزی برای هر منطقه مشخص شود (Wang et al., 2020). با توجه به وجود خاک های شور و آب و هوای خشک و نیمه خشک در کشور، به نظر می رسد حفظ بقایای گیاهی در خاک و استفاده از روش های خاک ورزی حفاظتی یکی از راهکارهای پیشگیری و مقابله با مشکلات بیان شده باشد. بنابراین، این پژوهش با هدف تعیین آثار سه سامانه خاک ورزی بر توزیع اندازه منافذ، نگهداشت آب و منحنی مشخصه رطوبتی خاک در شرایط شور در مرکز تحقیقات کشاورزی استان اصفهان انجام شد.

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:

$$\theta(h) = \theta_s \quad h \leq h_{cVG} \quad (9)$$

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times \left[1 + m \left(\frac{(h - h_{cVG})}{(h_{0VG} - h_{cVG})} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right]^{-m} \quad h > h_{cVG} \quad (10)$$

که در این معادله، θ مقدار رطوبت حجمی در مکش ماتریک h ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)، و θ_r و θ_s به ترتیب بیانگر رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) 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

و از نظر شوری دارای محدودیت بود ($EC = 5.35 \text{ dS/m}$) و مقدار نسبت جذب سدیم (SAR) آن برابر ۴/۶۷ بود. در پایان هر سال، نمونه‌های خاک دست‌نخورده از لایه ۰-۱۵ 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):

$$\text{Macro-P} = \theta_s - \theta_{10} \quad (1)$$

$$\text{Meso-P} = \theta_{10} - \theta_{100} \quad (2)$$

$$\text{Micro-P} = \theta_{100} \quad (3)$$

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

$$\text{AFP} = \theta_s - \theta_{100} \quad (4)$$

مقدار رطوبت حجمی در مکش ماتریک ۳۰۰ هکتوپاسکال (θ_{300}) به عنوان گنجایش مزرعه‌ای (θ_{FC}) و مقدار رطوبت در مکش ماتریک ۱۵۰۰۰ هکتوپاسکال (θ_{15000}) به عنوان 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 (به ترتیب AWC_{100} و AWC_{300}) محاسبه شد (Reynolds et al., 2008):

$$\theta_{FC} = \theta_{300} \quad (5)$$

$$\theta_{PWP} = \theta_{15000} \quad (6)$$

$$\text{AWC}_{100} = \theta_{FC} - \theta_{PWP} = \theta_{100} - \theta_{15000} \quad (7)$$

$$\text{AWC}_{300} = \theta_{FC} - \theta_{PWP} = \theta_{300} - \theta_{15000} \quad (8)$$

نمونه‌های خاک دست‌نخورده ابتدا از زیر اشباع شده و سپس منحنی مشخصه رطوبتی آن‌ها با استفاده از جعبه شن در

درشت ناشی از مواد آلی در تیمار بی خاک ورزی سبب افزایش مقدار θ_s در خاک شده است در صورتی که تیمار کم خاک ورزی با دارا بودن مقدار بیش تر Macro-P مقدار θ_s کمتری را داشت هر چند تفاوت معنی داری بین آن ها وجود نداشت (جدول ۲). به عبارت دیگر منافذ درشت ناشی از به هم خوردن خاک تأثیر کمتری در نگهداشت آب داشته و این منافذ درشت ناشی از مواد آلی هستند که سبب افزایش مقدار θ_s (در مکش های ماتریک کم) شده اند.

در سال های سوم و چهارم، بیش ترین 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 خاک ورزی مرسوم، اگرچه در کوتاه مدت Macro-P افزایش یافت، اما در درازمدت به دلیل تردد ماشین های کشاورزی و کاهش فعالیت جانوران خاکزی، این مقدار کاهش یافته و در سال چهارم به کم ترین حد خود رسید. این یافته با نتایج Bhattacharyya et al. (2006) که کاهش Macro-P را در سامانه خاک ورزی مرسوم به دلیل تردد ماشین های کشاورزی گزارش کردند، هم خوانی دارد. مقادیر Macro-P در تیمارهای کم خاک ورزی و بی خاک ورزی 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 یافته های Roseberg and McCoy (1992) که افزایش Macro-P در سامانه بی خاک ورزی به دلیل افزایش ماده آلی خاک با گذشت زمان را گزارش کردند، هم خوانی دارد. تیمارهای کم خاک ورزی و بی خاک ورزی در سال های چهارم و سوم دارای مقادیر Macro-P بیش تری بودند.

آثار اصلی و برهم کنش بین آن ها بر مقادیر منافذ متوسط (Meso-P) در سطح پنج درصد معنی دار شد (جدول ۱). خاک در سامانه کم خاک ورزی در بین تیمارهای مورد بررسی دارای بیش ترین مقدار Meso-P بود (جدول ۲). بین مقادیر Meso-P تیمارهای بی خاک ورزی و خاک ورزی مرسوم تفاوت معنی دار وجود نداشت اما مقدار Meso-P در بی خاک ورزی بیش تر بود

سطح یک درصد بر مقادیر کربن آلی (OC) معنی دار شد (جدول ۱). ترتیب مقادیر OC به صورت بی خاک ورزی، کم خاک ورزی و مرسوم مشاهده شد (جدول ۲)، که دلیل آن حفظ بقایای آلی در سامانه های بی خاک ورزی و کم خاک ورزی 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 سامانه های خاک ورزی گزارش کرده اند. افزایش OC در روش خاک ورزی مرسوم را می توان به حضور بقایای ریشه های محصول و علف های هرز در خاک نسبت داد. از سوی دیگر، افزایش مقدار OC در تیمار بی خاک ورزی نسبت به خاک ورزی مرسوم تقریباً دو برابر بود (جدول ۲ و ۴). مقدار کم کربن آلی خاک در تیمارهای خاک ورزی مرسوم را می توان به در دسترس قرار گرفتن مواد آلی تازه برای جانداران تجزیه کننده، خرد شدن خاک دانه ها در اثر شخم و در نتیجه تهویه بیش تر و تسریع در اکسیداسیون مواد آلی نسبت داد.

توزیع اندازه منافذ خاک

اثر اصلی سامانه خاک ورزی در سطح یک درصد و اثر اصلی سال و برهم کنش بین آن ها در سطح پنج درصد بر مقدار منافذ درشت (Macro-P) معنی دار شد (جدول ۱). بیش ترین مقدار Macro-P به ترتیب در تیمارهای کم خاک ورزی، بی خاک ورزی و خاک ورزی مرسوم مشاهده شد. این یافته با نتایج Safadoust et al. (2007) هم خوانی دارد. آن ها در پژوهشی تأثیر سامانه های خاک ورزی بر توزیع اندازه منافذ خاک را مورد بررسی قرار داده و بیان کردند که بیش ترین مقدار Macro-P در سامانه کم خاک ورزی مشاهده شد. بین مقادیر Macro-P سامانه کم خاک ورزی و بی خاک ورزی تفاوت معنی دار وجود نداشت (جدول ۲). تیمار کم خاک ورزی از طریق به هم زدن خاک (هر چند به مقدار کم تر از خاک ورزی مرسوم) و وجود مواد آلی سبب مقدار Macro-P بیش تر شده است. از طرفی تیمار بی خاک ورزی با افزایش ماده آلی خاک سبب افزایش Macro-P شده است (جدول ۲). نکته قابل توجه این است که منافذ

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

Table 1. Variance analysis of residual water content (θ_t), saturated water content (θ_s), slope of water retention curve (m), air entry suction (h_{evg}), matric suction at the inflection point of the curve (h_{ovg}), organic carbon (OC), macroporosity (Macro-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	DF	θ_t	θ_s	m	h_{evg}	h_{ovg}	OC	Macro-P	Meso-P	Micro-P	θ_{FC}	θ_{PWP}	AWC_{100}	AWC_{300}	AFP
منبع تغییرات	درجه آزادی														
Mean squares															
Tillage (A) خاک ورزی	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 (%)	-	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
ضریب تغییرات	-														

ns: معنی دار در سطح ۱٪، * : معنی دار در سطح ۵٪ و ** : عدم معنی داری،

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

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر خاک ورزی بر رطوبت باقی مانده (θ_t)، رطوبت اشباع (θ_s)، شیب منحنی مشخصه رطوبتی (m)، مکش ورود هوا (h_{eVG})، مکش در نقطه عطف منحنی (h_{ovG})، کریب آلی (OC)، تخلخل درشت (Macro-P)، تخلخل میانه (Meso-P)، تخلخل ریز (Micro-P) و 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_t), saturated water content (θ_s), slope of water retention curve (m), air entry suction (h_{eVG}), matric suction at the inflection point of the curve (h_{ovG}), 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 خاک ورزی	θ_t cm ³ cm ⁻³	θ_s cm ³ cm ⁻³	m -	h_{eVG} hPa	h_{ovG} hPa	OC %	Macro-P	Meso-P	Micro-P	θ_{FC} cm ³ cm ⁻³	θ_{pwp} cm ³ cm ⁻³	AWC ₁₀₀	AWC ₃₀₀	AFP
Conventional tillage خاک ورزی 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 کم خاک ورزی	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 بی خاک ورزی	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، میانگین هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی دار ندارند.

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

جدول ۳. مقایسه میانگین مقادیر رطوبت باقی مانده (θ_r)، رطوبت اشباع (θ_s)، شیب منحنی مشخصه رطوبتی (m)، مکش ورود هوا (h_{ovg})، مکش در نقطه عطف منحنی (h_{ovg})، کرن آلی (OC)، تخلخل درشت (Macro-P)، تخلخل میانه (Meso-P)، تخلخل ریز (Micro-P)، گنجایش مزرعهای (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{bwp})، 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_{eVG}), matric suction at the inflection point of the curve (h_{ovG}), 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	θ_r	θ_s	m	h_{eVG}	h_{ovG}	OC	Macro-P	Meso-P	Micro-P	θ_{FC}	θ_{PWP}	AWC_{100}	AWC_{300}	AFP
سال	$cm^3 cm^{-3}$	$cm^3 cm^{-3}$	-	hPa	hPa	%				$cm^3 cm^{-3}$				
First	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
اولین														
Second	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
دومین														
Third	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 ^{be}	0.204 ^a	0.122 ^a	0.168 ^a
سومین														
Forth	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
چهارمین														

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, $p < 0.05$).

Table 4. Mean comparisons of the interaction effect of tillage system in different years of the experiment on the residual water content (θ_s), slope of water retention curve (m), air entry suction (h_{eG}), matric suction at the inflection point of the curve (h_{vG}), organic carbon (OC), macroporosity (Macro-P), mesoporosity (Meso-P), microporosity (Micro-P), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), plant available water (AWC₁₀₀ and AWC₃₀₀) and air-filled porosity (AFP).

Table 4. Mean comparisons of the interaction effect of tillage system in different years of the experiment on the residual water content (θ_s), slope of water retention curve (m), air entry suction (h_{eG}), matric suction at the inflection point of the curve (h_{vG}), organic carbon (OC), macroporosity (Macro-P), mesoporosity (Meso-P), microporosity (Micro-P), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), plant available water (AWC₁₀₀ and AWC₃₀₀) and air-filled porosity (AFP).

Tillage system	Year	θ_t	θ_s	m	I_{avg}	I_{avg}	OC	Macro-P	Meso-P	Micro-P	θ_{TC}	θ_{pwp}	AWC ₁₀₀	AWC ₃₀₀	AFP
سامانه خاک و زری		cm ³ cm ⁻³	-	-	hPa	hPa	%				cm ³ cm ⁻³				
Conventional tillage خاک و زری مرسوم	First اولین	0.113 ^a	0.470 ^e	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 ^e	0.334 ^a	0.000 ^e	19.6 ^a	0.391 ^g	0.019 ^{cd}	0.124 ^{bcd}	0.327 ^{cd}	0.227 ^e	0.128 ^{bcd}	0.199 ^{ad}	0.099 ^e	0.143 ^{bc}
	Third سومین	0.096 ^{def}	0.479 ^e	0.286 ^{bc}	0.000 ^e	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 ^{de}	0.150 ^{bc}
	Forth چهارمین	0.085 ^{ef}	0.473 ^e	0.228 ^e	1.738 ^{ab}	9.30 ^{bc}	0.593 ^e	0.018 ^d	0.123 ^{bcd}	0.332 ^c	0.252 ^{bc}	0.125 ^{cd}	0.206 ^{ad}	0.126 ^{ab}	0.140 ^{bc}
	First اولین	0.103 ^{ad}	0.464 ^e	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 ^{ab}	0.181 ^{de}	0.106 ^e	0.141
	Second دومین	0.084 ^f	0.478 ^e	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 ^{bc}	0.123 ^{abc}	0.153 ^{bc}
	Third سومین	0.101 ^{ade}	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 ^{de}	0.206 ^a
No tillage بی خاک و زری	First اولین	0.098 ^{af}	0.469 ^e	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 ^{ef}	0.478 ^e	0.268 ^{cd}	0.000 ^e	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 ^e
	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}	0.222 ^a	0.133 ^a	0.160 ^b
	Forth چهارمین	0.110 ^{ab}	0.539 ^a	0.313 ^{ab}	0.000 ^e	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 ^{bc}	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, $p < 0.05$).

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 $1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 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 متوسط بافت برای بیشترین عملکرد محصول، AFP بیش‌تر از $0.12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ تا $0.17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ضروری است. درحالی‌که AFP کم‌تر از $0.1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 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 ($p < 0.01$). 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

(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

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

به نظر می‌رسد سامانه‌های خاک‌ورزی با گذشت زمان بر تمامی گروه‌های منافذ خاک با اندازه‌های مختلف (ریز، متوسط و درشت) اثر گذاشته‌اند. با توجه به مطالب بیان‌شده، این اثر بیش‌تر بر منافذ درشت و متوسط خاک بوده است. حضور بقایای گیاهی و فعالیت بیولوژیک مانند کرم‌های خاکی ممکن است باعث ایجاد منافذ درشت شده باشد. 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 شده است. در ضمن منافذ ریز نظیر با نگهداشت آب در مکش ماتریک ۱۰۰ هکتوپاسکال در نظر گرفته شده‌اند. بدیهی است که وجود مواد آلی سبب افزایش نگهداشت آب خاک در این مکش شده است. 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
لثار اصلی و برهم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر گنجایش مزرعه‌ای (θ_{FC}) در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). ترتیب مقادیر θ_{FC} به‌صورت کم‌خاک‌ورزی < بی‌خاک‌ورزی < خاک‌ورزی مرسوم بود. تفاوت بین مقادیر این شاخص در سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی معنی‌دار نشد. وجود مواد آلی سبب افزایش معنی‌دار مقادیر θ_{FC} در سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم 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 نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بیش‌تر است. بین مقادیر θ_{FC} در

طول چهار سال به غیر از سال دوم تغییر معنی‌دار ایجاد نشد. با این حال افزایش کمی در مقدار θ_{FC} در سال‌های سوم و چهارم مشاهده شد (جدول ۳). بیش‌ترین مقادیر θ_{FC} در سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی در سال‌های سوم و چهارم مشاهده شد که به افزایش مواد آلی مرتبط است. بیش‌ترین مقادیر OC در سال‌های سوم و چهارم در تیمارهای بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی مشاهده شد (جدول ۳ و ۴).

لثار اصلی و برهم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) معنی‌دار شد (جدول ۱). بیش‌ترین مقدار θ_{PWP} به‌ترتیب مربوط به سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی، بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم بود. تفاوت بین مقادیر θ_{PWP} در سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی اندک بود و معنی‌دار نشد (جدول ۲). پژوهشگران زیادی افزایش نگهداشت آب در θ_{PWP} را در اثر افزایش ماده آلی خاک در سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی گزارش کردند (McBride and Mackintosh, 1984; Beke and Maccormick, 1985; Bell and Van Keulen, 1995). بیش‌ترین مقادیر θ_{PWP} در سال‌های اول و چهارم مشاهده شد (جدول ۳). با بررسی اثر برهم‌کنش سامانه خاک‌ورزی و سال بر مقادیر θ_{PWP} مشخص شد که این شاخص در سال چهارم در تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی به میزان کمی نسبت به سال 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 سپس تا سال چهارم هرچند به مقدار کم اما روند افزایشی به خود گرفت (جدول ۴). مقدار θ_{PWP} در تیمار بی‌خاک‌ورزی در طول ۴ سال کمی افزایش یافت (جدول ۴). به نظر می‌رسد 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 سال) و تجزیه بیش‌تر مواد آلی دارد.

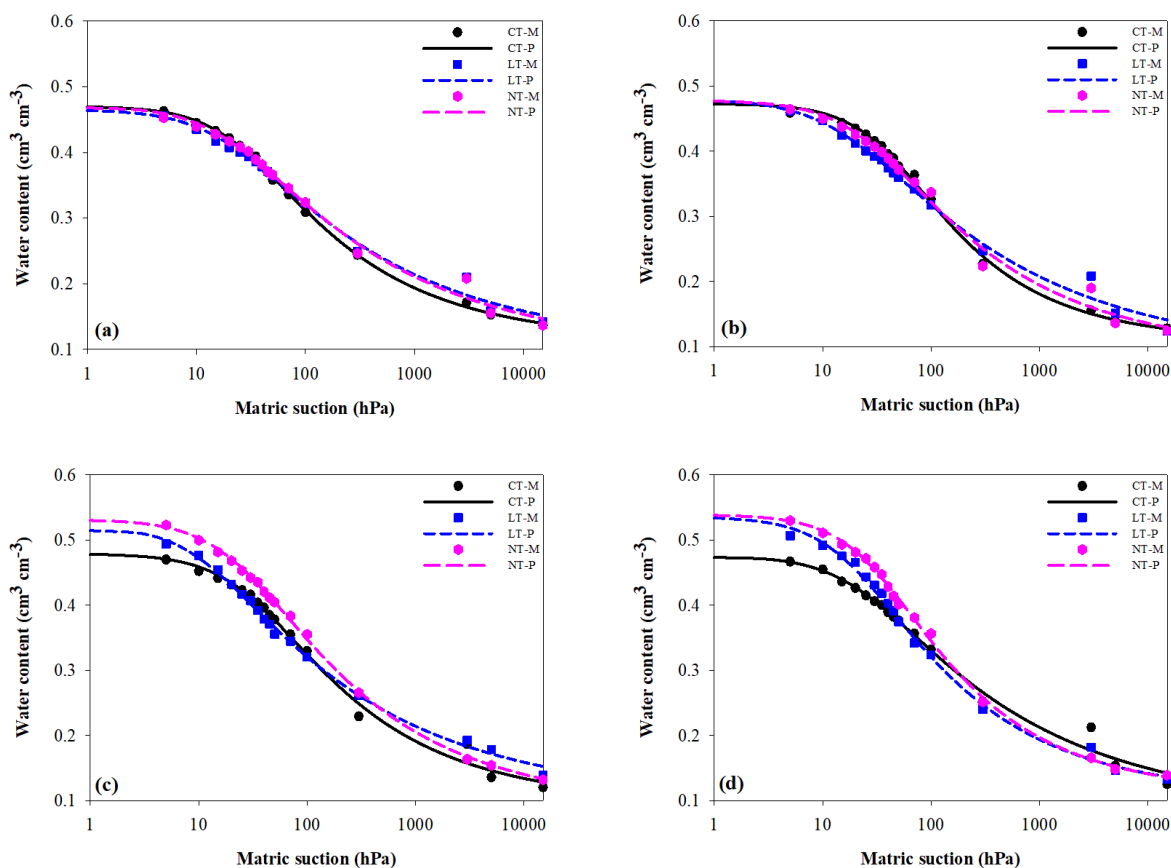
عطف (h_{0VG}) و شیب (m) منحنی مشخصه رطوبتی است. ولی در مدل ون گنوختن مکش ورود هوا وجود ندارد و پارامتر α برابر مکش در نقطه عطف منحنی نیست، هر چند که با آن ارتباط دارد (Shahmansouri, 2022; Kosugi, 1994). با توجه به شکل (۱) می توان بیان کرد که در سال های اول و دوم WRC خاک تیمارهای مورد بررسی تفاوت چندانی با هم ندارند. در سال های سوم و چهارم، منحنی های WRC در تیمارهای مورد بررسی به ویژه در مکش های ماتریک کم تفاوت ایجاد شد. نگهداشت آب خاک در تیمارهای بی خاک ورزی و کم خاک ورزی در مکش های ماتریک کم نسبت به تیمار خاک ورزی مرسوم افزایش یافت. این تفاوت ناشی از تغییر توزیع اندازه منافذ خاک در تیمارهای بی خاک ورزی و کم خاک ورزی است. به نظر می رسد از سال سوم به بعد اثر نگهداشت بقایای آلی در زمین در تیمار بی خاک ورزی و کم خاک ورزی بر نگهداشت آب خاک در مکش های ماتریک کم مثبت بوده است. در مکش های ماتریک زیاد تفاوت چندانی بین منحنی های مشخصه رطوبتی خاک تیمارهای مورد بررسی مشاهده نشد.

نتایج تجزیه واریانس اثر نوع سامانه خاک ورزی، سال و برهم کنش بین آن ها بر پارامترهای مدل ون گنوختن-کوسوگی در جدول (۱) ارائه شده است. آثار اصلی و برهم کنش بین آن ها بر برخی از پارامترها معنی دار و بر بعضی از آن ها معنی دار نبود (جدول ۱). اثر نوع سامانه خاک ورزی و سال بر مقادیر رطوبت باقی مانده (θ_r) غیر معنی دار و اثر برهم کنش بین آن ها معنی دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین پارامترهای مدل ون گنوختن-کوسوگی در جداول ۲، ۳ و ۴ ارائه شده است. تفاوت مقادیر θ_r در سه سامانه خاک ورزی بسیار کم بود. با این وجود بیش ترین مقدار θ_r مربوط به سامانه خاک ورزی مرسوم بود. هر چند این تفاوت مقادیر بسیار کم بوده و می توان 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 سال های انجام آزمایش بسیار کم بود و معنی دار نشد (جداول ۱ و ۲). بیش ترین مقدار θ_r در سال اول و کم ترین مقدار آن مربوط به

مقادیر آب قابل دسترس (AWC_{100}) در بین تیمارهای مورد بررسی بسیار نزدیک به هم است. با این حال بیش ترین مقدار AWC_{100} مربوط به تیمار بی خاک ورزی بود (جدول ۲). Ahmadi et al. (2022) افزایش AWC_{100} در سامانه بی خاک ورزی را نسبت به خاک ورزی مرسوم به دلیل افزایش مواد آلی گزارش دادند. همچنین براساس نتایج Riahinia et al. (2017) بین هر سه تیمار خاک ورزی تفاوت معنی داری وجود داشت به طوری که آب قابل استفاده گیاه در تیمار بی خاک ورزی < تیمار کم خاک ورزی < خاک ورزی مرسوم بود. روند تغییرات AWC_{100} در چهار سال انجام آزمایش افزایشی بود که در سه سال آخر آزمایش این افزایش معنی دار نشد (جدول ۳). بیش ترین مقدار AWC_{100} در تیمار بی خاک ورزی در سال سوم مشاهده شد (جدول ۴). مقادیر AWC_{300} در بین سه تیمار خاک ورزی معنی دار نشد هر چند که این مقدار در تیمار بی خاک ورزی و کم خاک ورزی کمی بیش تر بود (جدول ۲). همان طور که پیش از این بیان شد تأثیر حفظ مواد آلی در خاک بر مقادیر نگهداشت آب در مکش های ماتریک زیاد کم تر است. بیش ترین مقدار AWC_{300} در سال سوم و سپس سال چهارم مشاهده شد (جدول ۳). به نظر می رسد حضور مواد آلی سبب افزایش اندک مقادیر AWC_{300} در سال های سوم و چهارم شده است. بیش ترین مقدار AWC_{300} همانند AWC_{100} در تیمار بی خاک ورزی در سال سوم مشاهده شد (جدول ۴).

منحنی مشخصه رطوبتی (WRC)

در شکل (۱) داده های اندازه گیری شده برای WRC به همراه برازش مدل ون گنوختن-کوسوگی بر آن ها برای تیمارهای مورد بررسی ارائه شده است. مدل ون گنوختن-کوسوگی به خوبی بر داده های اندازه گیری شده برازش یافته است ($R^2=0.988-0.999$), که نشان از توانمندی این مدل برای مدل سازی منحنی نگهداشت آب (WRC) در خاک دارد. از دلایل برتری این مدل نسبت به مدل رایج ون گنوختن، مفهوم فیزیکی مستقل سه پارامتر آن در رابطه با مکش ورود هوا (h_{0VG}), مکش در نقطه



شکل ۱. منحنی های مشخصه رطوبتی خاک در سال های اول (a)، دوم (b)، سوم (c) و چهارم (d) انجام آزمایش؛ نقاط داده های اندازه گیری شده و منحنی ها برازش مدل ون گنوختن-کوسوگی را نشان می دهند (منحنی ها میانگین تکرارهای آزمایشی است). CT: خاک ورزی مرسوم، LT: کم خاک ورزی، NT: بی خاک ورزی.

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.

مقدار این پارامتر (θ_r) مربوط به تیمار کم خاک ورزی در سال دوم بود.

آثار اصلی (سامانه خاک ورزی و سال) و برهم کنش بین آنها بر مقادیر رطوبت اشباع (θ_s) معنی دار شد (جدول ۱). تفاوت مقادیر θ_s در تیمارهای مختلف خاک ورزی معنی دار شد. مقدار θ_s در تیمار کم خاک ورزی مرسوم از دو تیمار کم خاک ورزی و بی خاک ورزی کم تر بود (جدول ۲). این یافته با نتایج سایر پژوهشگران همخوانی دارد. (Azooz and Arshad 1996)، θ_s بیش تر تحت سامانه بی خاک ورزی نسبت به خاک ورزی مرسوم در خاک های لوم سیلت و لوم شنی را گزارش کردند.

سال دوم بود. اثر زمان بر مقادیر θ_r در سال دوم کاهشی اما سپس افزایش یافته است (جدول ۲). به نظر می رسد پس از سال دوم منافذ ریز خاک کمی افزایش پیدا کرده است. مقایسه میانگین اثر برهم کنش سامانه خاک ورزی و سال در جدول (۴) ارائه شده است. لازم به ذکر است که تفاوت بین مقادیر θ_r هر چند کم اما معنی دار بود (جدول ۴). بیش ترین مقدار θ_r مربوط به تیمار کم خاک ورزی مرسوم در سال اول است. در خاک ورزی مرسوم، عملیات شخم موجب خرد شدن خاک دانه ها و تغییر در توزیع منافذ خاک می شود. این تغییرات باعث افزایش منافذ ریز می گردد که موجب افزایش آب غیر مویینه و θ_r می شود. کم ترین

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 این حال کم‌ترین مقدار h_{cVG} مربوط به تیمار بی‌خاک‌ورزی بود. به نظر می‌رسد تیمار بی‌خاک‌ورزی به دلیل وجود مواد آلی، خاکدانه‌سازی و ایجاد منافذ درشت سبب نفوذ بهتر هوا به خاک شده است (جدول

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 به هم زدن 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 روین 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 به خوبی 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 به خوبی قابل مشاهده است (جدول ۴). این نتیجه با یافته‌های Ferreras et al. (2000) هم‌خوانی دارد. 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 در حالی که گنجایش مزرعه‌ای تغییری نکرد. نکته

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 کارایی 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.

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

تضاد منافع

شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچگونه تضاد منافع با شخص،

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](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., McCormick, 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](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](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00102-6).
19. Gandomkar, A., 2023. Optimization N recommendation 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](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>.