

The Impact of Conservation Tillage Systems on Pore Size Distribution and some Hydraulic Properties of the Soil under Saline Conditions and Barley-safflower Rotation

M. Tadayonnejad^{1*}  and S. Shahmansouri² 

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 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 saline soils in Isfahan Province over four years. The studied properties included pore size distribution, field capacity (θ_{FC}), permanent wilting point (θ_{PWP}), plant-available water content (AWC), and the soil 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 highest amount of macropores (Macro-P) was found in the reduced tillage, no-tillage, and then conventional tillage treatments (0.032, 0.029, and 0.022 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectively). The reduced tillage treatment also had the highest amount of mesopores (Meso-P) and the θ_{FC} values in reduced tillage and no-tillage were significantly higher than the conventional tillage (0.250, 0.247, and 0.238 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectively). The AWC₁₀₀ values were similar across 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 water retention curves, particularly at low suction levels. Conservation tillage treatments increased the size of macropores and mesopores and improved hydraulic indices. The results indicate that conservation tillage can serve as a suitable alternative to conventional tillage in dry and saline conditions, improving soil conditions and water resource efficiency.

Keywords: Conservation tillage, field capacity, plant-available water, soil salinity, soil water retention curve.

Background and Objective: One of the major agricultural challenges in Iran and the world is soil and water salinity. Soil reclamation for saline soils requires significant amounts of water, making it essential to reconsider reclamation methods in light of water resource limitations. Various tillage methods can affect saline soils by altering the physical properties of the soil. Research indicates that conservation tillage can improve soil physical quality and enhance water retention (Steponavičienė et al., 2024). Additionally,

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@gmail.com

different tillage systems impact soil pore size. 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 of saline soils in Isfahan Province.

Methods: This research was conducted over four years at the Kabutarabad agricultural research station in Isfahan 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}), plant-available water content (AWC), and the soil water retention curve (WRC). The management practices included residue removal in conventional tillage and residue retention in reduced tillage and no-tillage systems. Soil samples were taken annually from a depth of 0 to 15 cm, and their physical properties were measured. Soil pores were classified into three major groups: macropores (Macro-p), mesopores (Meso-p), and micropores (Micro-p), based on data from the soil water retention curve. The soil water retention curve was obtained using sandboxes and pressure plate apparatus, and the study was conducted using a split-plot design in a completely randomized block design with three replications.

Results: The highest amount of Macro-P was observed in the conservation tillage treatments in the following order: reduced tillage, no-tillage, and conventional tillage (0.032, 0.029, and 0.022 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectively). This is attributed to the increased organic matter in the reduced tillage and no-tillage treatments. The reduced tillage treatment also had the highest amount of Meso-P (0.141 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), with a significant increase, especially in the fourth year. Over time, tillage systems had a greater impact on coarse and medium pores. The highest values of θ_{FC} were observed in the reduced tillage, no-tillage, and then conventional tillage treatments (0.250, 0.247, and 0.238 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectively). 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 in the reduced tillage and no-tillage treatments, but they were higher than those in conventional tillage. AWC₁₀₀ values were similar across treatments, but the highest value was for the no-tillage treatment (0.210 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). In the first and second years, there was little difference in the soil moisture characteristic curves among the treatments. However, in the third and fourth years, more distinct differences were observed, particularly at low suction levels. In these years, the no-tillage and reduced tillage treatments had higher volumetric moisture at low suctions compared to conventional tillage. Conventional tillage had lower θ_s values compared to the reduced tillage and no-tillage treatments. Over time, especially from the third year onward, θ_s values increased, which is attributed to the accumulation of organic matter and increased soil porosity.

Conclusions: This study investigated the impact of conservation tillage (no-tillage and reduced tillage) on soil physical and hydraulic properties over four years. The results showed that conservation tillage increased the size of macropores and mesopores, and improved hydraulic indices such as saturation moisture, field capacity, permanent wilting point, and plant-available water content. These positive effects were particularly noticeable at lower matric suctions. Other benefits of this method include the improvement of saline soil conditions through increased 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*

نسخه پیش از انتشار

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

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

چکیده

شوری آب و خاک یکی از چالش‌های عمده کشاورزی در ایران و جهان است و اصلاح خاک‌های شور نیازمند مصرف زیادی از آب است. بنابراین و 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 زراعی (FC)، نقطه پژمردگی دائم (PWP)، آب قابل استفاده گیاه (AWC)، و منحنی مشخصه رطوبتی (WRC) بود. مدیریت‌ها نیز شامل حذف بقایای گیاهی در خاک‌ورزی مرسوم و حفظ بقایا در کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی بودند. خاک محل اجرای این آزمایش دارای بافت لوم رسی سیلتی بود. برای آنالیز آماری از طرح کرت‌های خردشده در زمان در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی استفاده شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین مقدار منافذ درشت (Macro-P) به ترتیب در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی، بی‌خاک‌ورزی و سپس خاک‌ورزی مرسوم ($0.32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ، 0.29 و 0.22) مشاهده شد. تیمار کم‌خاک‌ورزی همچنین بالاترین مقدار منافذ متوسط (Meso-P) را دارا بود و مقادیر FC در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از خاک‌ورزی مرسوم بود (به ترتیب 0.25 ، 0.247 و 0.238). مقادیر AWC_{100} در بین تیمارها تفاوت معنی‌دار نداشت. در سال‌های سوم و چهارم، تفاوت‌های واضح‌تری در منحنی‌های مشخصه رطوبتی، به‌ویژه در مکش‌های کم، مشاهده شد. تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی باعث افزایش فراوانی منافذ درشت و متوسط و بهبود شاخص‌های هیدرولیکی 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، شور خاک، گنجایش زراعی، آب قابل استفاده گیاه.

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@gmail.com

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 بگذارد (Afyuni and Mosaddeghi, 2001). در پژوهش (Bandaranayake et al., 1998) مدیریت آبیاری و مدیریت خاک‌ورزی به عنوان دو موضوع اساسی و قابل توجه در عملیات مدیریتی به منظور کاهش آسبویی 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 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 مواد آلی، کاهش تنوع زیستی، تغییر منافذ خاک و افزایش خروج آب 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 بلندمدت 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 بر سطح خاک، توزیع منافذ را بهبود داده، 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 سیستم بی‌خاک‌ورزی با افزایش ماده آلی و تخلخل خاک، نفوذ و نگهداشت آب را در مناطق نیمه‌خشک اسپانیا بهبود بخشیدند. همچنین، این روش در کاهش رواناب و فرسایش مؤثر بوده و در پژوهش‌های درازمدت مانند مطالعه‌ای در اتریش، افزایش مواد آلی در لایه سطحی خاک و رشد ظرفیت نگهداری آب را نشان داده است (Steponavičienė et al., 2024).

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

یکی از ویژگی‌های مهم هیدرولیکی خاک، منحنی مشخصه رطوبتی است. پژوهش‌ها در مورد تأثیر سامانه‌های خاک‌ورزی بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک به دلیل پیچیدگی شرایط خاک و آبیاری محدود است. (Ahmadi et al., 2022) در پژوهشی دریافتند که تفاوت قابل توجهی بین منحنی مشخصه رطوبتی سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی مشاهده نشد. (Farahani et al., 2022) در بررسی منحنی مشخصه رطوبتی نشان دادند که سامانه بی‌خاک‌ورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل تجمع بیشتر مواد آلی، بیش‌ترین رطوبت اشباع را در عمق ۱۵- سانتی‌متری خاک دارد و توانایی بهتری برای نگهداشت آب در مکش‌های بالاتر و نگهداشت آب دارد. آن‌ها همچنین بیان کردند بین سامانه‌ها مقدار رطوبت باقی‌مانده در عمق ۱۵-۰

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) نیمه‌خشک ایران رایج است (Tomanian, 2013). خاک محل آزمایش شامل ۴۵ درصد آهک با بافت لوم رسی سیلتی بود. در آغاز آزمایش، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک ۶/۴۶ dS/m و pH آن ۷/۴ ثبت شد.

سه نوع مدیریت مختلف در زمینه خاک‌ورزی و مدیریت بقایای گیاهی به مدت چهار سال متوالی به اجرا درآمد: ۱- خاک‌ورزی مرسوم با خروج بقایا از مزرعه (به جز ریشه)، ۲- کم‌خاک‌ورزی با حفظ بقایا و ۳- بی‌خاک‌ورزی با حفظ بقایا. برای هر یک از تیمارهای مختلف 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 تیمار کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی تنها بقایای ایستاده محصول سال قبل (در حدود ۵ تن در هکتار) حفظ 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 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 صغه به صورت 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

سانتی‌متری تفاوت معنی‌دار وجود نداشت. این سامانه، 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 اندازه ذرات 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 سیستم را به دلیل عدم شخم و حفظ ساختار طبیعی خاک را 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 سیستم بی‌خاک‌ورزی افزایش منافذ درشت به دلیل افزایش مواد آلی رخ داده است، درحالی‌که در سیستم مرسوم، منافذ ریز به دلیل شخم زدن و فشرده‌سازی 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. در روش خاک‌ورزی مرسوم، به علت ایجاد نفوذ بهتر آب آبیاری و شستشوی بهتر نمک‌ها تمایل بیش‌تری برای کاربرد این روش در شرایط شور هست. این یافته‌ها ضرورت انجام پژوهش‌های بیشتر در این زمینه را نشان می‌دهد تا بهترین نوع خاک‌ورزی برای هر منطقه مشخص گردد (Wang et al., 2020). با توجه به وجود خاک‌های شور و آب و هوای خشک و نیمه‌خشک در کشور، به نظر 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 اثرات سه نوع سامانه خاک‌ورزی بر اندازه منافذ، نگهداشت آب و منحنی مشخصه رطوبتی خاک در شرایط شور در مرکز تحقیقات کشاورزی استان اصفهان انجام شد.

هکتوپاسکال و با استفاده از صفحه فشاری در مکش های ۳۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ هکتوپاسکال اندازه گیری شد (CEN, 2001). پس از رسیدن به تعادل، رطوبت نمونه ها به روش وزنی اندازه گیری شد. در نهایت، بر داده های منحنی مشخصه رطوبتی (WRC) معادله ون گنوختن-کوسوگی (۱۹۹۴) برازش داده شد.

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

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times \left[1 + m \left(\frac{h^\circ - h_{cVG}^\circ}{h_0 VG^\circ - h_{cVG}^\circ} \right)^{1-m} \right]^{-m} \quad (10)$$

در این معادله θ مقدار رطوبت حجمی در یک مکش ماتریک h ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، θ_s و θ_r به ترتیب بیانگر رطوبت باقی مانده 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 ون گنوختن-کوسوگی بر داده های منحنی مشخصه رطوبتی و بهینه سازی پارامترهای برازش مدل از ابزار Solver در برنامه MS Excel استفاده شد (Kosugi, 1994).

در این پژوهش، برای بررسی تأثیر نوع سامانه خاک ورزی (در سه سطح) و سال (در چهار سال) و همچنین اثر برهم کنش بین این عوامل بر اندازه منافذ، نگهداشت آب، و پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی خاک، از طرح کرت های خرد شده در زمان در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار استفاده شد. تحلیل داده ها با استفاده از نرم افزار SAS 9.6 انجام شد و مقایسه میانگین ها به روش LSD در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت. همچنین، رسم نمودارهای مورد نیاز با استفاده از نرم افزار Sigma Plot 12.3 انجام شد.

نتایج و بحث

کربن آلی خاک

اثرات اصلی سامانه خاک ورزی، زمان و برهم کنش بین آن ها در 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

و از نظر شوری دارای محدودیت بود ($EC = 5.35 \text{ ds/m}$). مقدار SAR آن ۴/۶۷ بود. در پایان هر سال نمونه خاک از عمق ۱۵-۰ سانتی متری تهیه شده و ویژگی های فیزیکی و هیدرولیکی آن در آزمایشگاه اندازه گیری شد. کربن آلی به روش والکی بلک اندازه گیری شد (Walkley and Black, 1934). بررسی تأثیر سیستم های خاک ورزی بر توزیع اندازه منافذ خاک، منافذ به سه گروه اصلی درشت (Macro-P)، متوسط (Meso-P) و ریز (Micro-P) تقسیم بندی می شوند. این دسته بندی بر اساس منحنی مشخصه رطوبتی 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 در مکش ماتریک صفر، ده و صد هکتوپاسکال است. مقدار تخلخل تهویه ای نیز که به عنوان یک شاخص مهم کیفیت فیزیکی خاک به شمار می آید از رابطه زیر به دست آمد (Reynolds et al., 2008).

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

مقدار رطوبت در مکش ماتریک ۳۰۰ هکتوپاسکال (θ_{300}) به عنوان گنجایش زراعی (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).

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

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

$$AWC_{100} = \theta_{FC} - \theta_{PWP} = \theta_{100} - \theta_{15000} \quad (7)$$

$$AWC_{300} = \theta_{FC} - \theta_{PWP} = \theta_{300} - \theta_{15000} \quad (8)$$

نمونه ها ابتدا از زیر اشباع شدند و سپس منحنی مشخصه رطوبتی آن ها با استفاده از جعبه شن در مکش های ماتریک (h) ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۷۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۳۰۰

جدول ۱. تجزیه واریانس رطوبت باقی مانده (θ_r)، رطوبت اشباع (θ_s)، شیب منحنی مشخصه رطوبتی (m)، مکش ورود هوا (h_{cVG})، مکش در نقطه عطف منحنی (h_{ovG})، کربن آلی (OC)، تخلخل درشت ($Macro-P$)، تخلخل میانه ($Meso-P$)، تخلخل ریز ($Micro-P$)، گنجایش زراعی (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP})، مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه (AWC_{100} و AWC_{300}) و تخلخل تهویه ای (AFP) در ترکیب ۴ 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 (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 porosity (AFP) in the combination of four years experiment.

Source of variance	DF	θ_r	θ_s	m	h_{cVG}	h_{ovG}	OC	$Macro-P$	$Meso-P$	$Micro-P$	θ_{FC}	θ_{PWP}	AWC_{100}	AWC_{300}	AFP
		Mean squares													
Tillage (A)	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	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)	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 ^{**}
Tillage(A)×Year(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	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

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

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

Source of variance: منبع تغییرات، DF: درجه آزادی، Tillage (A): خاک ورزی، Replication: تکرار، Year (B): سال، Error: خطا، CV: ضریب تغییرات، m : شیب منحنی مشخصه رطوبتی، θ_r : رطوبت باقی مانده، θ_s : رطوبت اشباع، h_{cVG} : مکش ورود هوا، h_{ovG} : مکش در نقطه عطف منحنی، OC : کربن آلی، $Macro-P$: تخلخل درشت، $Meso-P$: تخلخل میانه، $Micro-P$: تخلخل ریز، θ_{FC} : گنجایش زراعی، θ_{PWP} : نقطه پژمردگی دائم، AWC_{100} : مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه بین مکش ۱۰۰ سانتی متر و نقطه پژمردگی دائم، AWC_{300} : مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه بین مکش ۳۰۰ سانتی متر و نقطه پژمردگی دائم و AFP : تخلخل تهویه ای.

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 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 مرسوم تقریباً دو برابر بود (جدول ۲ و ۴). پایین بودن کربن آلی در تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم را می‌توان به در دسترس قرار گرفتن مواد آلی تازه برای جانداران تجزیه‌کننده، خرد شدن خاک‌دانه‌ها بر اثر شخم و در نتیجه تهویه بیشتر و تسریع 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 مقادیر منافذ درشت (Macro-P) معنی‌دار شد (جدول ۱). بیش‌ترین مقدار Macro-P به ترتیب 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 اندازه منافذ را مورد بررسی قرار دادند 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 برهم زدن 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 مواد آلی 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 در صورتی‌که 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 مکش کم) شده‌اند.

در سال سوم و چهارم، بیش‌ترین مقدار Macro-P مشاهده شد که ناشی از افزایش مواد 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 Roseberg and McCoy (1992) که افزایش Macro-P در سامانه بی‌خاک‌ورزی به دلیل افزایش مواد آلی با گذشت زمان را گزارش کردند، هم‌خوانی دارد. بیش‌ترین مقادیر Macro-P مربوط به تیمارهای کم‌خاک‌ورزی در سال چهارم و سوم و پس از آن تیمارهای بی‌خاک‌ورزی در چهارم و سوم بود.

اثرات اصلی و برهم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر منافذ متوسط (Meso-P) در سطح پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). 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 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

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر خاک‌ورزی بر رطوبت باقی مانده (θ_r)، رطوبت اشباع (θ_s)، شیب منحنی مشخصه رطوبتی (m)، مکش ورود هوا (h_{eVG})، مکش در نقطه عطف منحنی (h_{oVG})، کربن آلی (OC)، تخلخل درشت ($Macro-P$)، تخلخل میانه ($Meso-P$)، تخلخل ریز ($Micro-P$)، گنجایش زراعی (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP})، مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه (AWC_{100}) و (AWC_{300}) و تخلخل تهویه‌ای (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_{eVG}), matric suction at the inflection point (h_{oVG}), organic carbon (OC), macroporosity ($Macro-P$), mesoporosity ($Meso-P$), microporosity ($Micro-P$), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP) and plant as affected by tillage system available water (AWC_{100} and AWC_{300}) and Air porosity (AFP)

Tillage system	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
	$cm^3 cm^{-3}$	$cm^3 cm^{-3}$	-	hPa	hPa	%				$cm^3 cm^{-3}$	$cm^3 cm^{-3}$	$cm^3 cm^{-3}$	$cm^3 cm^{-3}$	
Conventional tillage	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	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	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, $p < 0.05$).

Tillage: خاک‌ورزی، Conventional tillage: خاک‌ورزی مرسوم، Reduced tillage: کم خاک‌ورزی، No tillage: بی خاک‌ورزی، m : شیب منحنی مشخصه رطوبتی، θ_r : رطوبت باقی مانده، θ_s : رطوبت اشباع، h_{eVG} : مکش ورود هوا، h_{oVG} : مکش در نقطه عطف منحنی، OC : کربن آلی، $Macro-P$: تخلخل درشت، $Meso-P$: تخلخل میانه، $Micro-P$: تخلخل ریز، θ_{FC} : گنجایش زراعی، θ_{PWP} : نقطه پژمردگی دائم، AWC_{100} : مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه بین مکش ۱۰۰ سانتی‌متر و نقطه پژمردگی دائم، AWC_{300} : مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه بین مکش ۳۰۰ سانتی‌متر و نقطه پژمردگی دائم و AFP : تخلخل تهویه‌ای.

جدول ۳. مقایسه میانگین مقادیر رطوبت باقی مانده (θ_r)، رطوبت اشباع (θ_s)، شیب منحنی مشخصه رطوبتی (m)، مکش ورود هوا (h_{eVG})، مکش در نقطه عطف منحنی (h_{oVG})، کربن آلی (OC)، تخلخل درشت (Macro-P)، تخلخل میانه (Meso-P)، تخلخل ریز (Micro-P)، گنجایش زراعی (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP})، مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه (AWC_{100} و AWC_{300}) و تخلخل تهویه ای (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 (h_{oVG}), organic carbon (OC), macroporosity (Macro-P), mesoporosity (Meso-P), microporosity (Micro-P), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP) and plant available water (AWC_{100} and AWC_{300}) and Air porosity (AFP) in four years of the experiment

Year	θ_r 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
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
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
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 ^{bc}	0.204 ^a	0.122 ^a	0.168 ^a
Forth	0.101 ^a	0.516 ^a	0.276 ^a	0.615 ^a	10.3 ^a	0.880 ^a	0.029 ^a	0.148 ^b	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 معنی دار ندارند.

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

Year: سال، First: اولین، Second: دومین، Third: سومین، Forth: چهارمین، m: شیب منحنی مشخصه رطوبتی، θ_r : رطوبت باقی مانده، θ_s : رطوبت اشباع، h_{eVG} : مکش ورود هوا، h_{oVG} : مکش در نقطه عطف منحنی، OC: کربن آلی، Macro-P: تخلخل درشت، Meso-P: تخلخل میانه، Micro-P: تخلخل ریز، θ_{FC} : گنجایش زراعی، θ_{PWP} : نقطه پژمردگی دائم، AWC_{100} : مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه بین مکش ۱۰ سانتی متر و نقطه پژمردگی دائم، AWC_{300} : مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه بین مکش ۳۰ سانتی متر و نقطه پژمردگی دائم و AFP: تخلخل تهویه ای.

انتشار

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر برهمکنش سامانه خاک‌ورزی در سال‌های مختلف آزمایش بر رطوبت باقی‌مانده (θ_r)، رطوبت اشباع (θ_s)، شیب منحنی مشخصه رطوبتی (m)، مکش ورود هوا (h_{eVG})، مکش در نقطه عطف منحنی (h_{ovG})، کربن آلی (OC)، تخلخل درشت (Macro-P)، تخلخل میانه (Meso-P)، تخلخل ریز (Micro-P)، گنجایش زراعی (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP})، مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه (AWC_{100} و AWC_{300}) و تخلخل تهویه‌ای (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_{eVG}), matric suction at the inflection point (h_{ovG}), organic carbon (OC), macroporosity (Macro-P), mesoporosity (Meso-P), microporosity (Micro-P), field capacity (FC), permanent wilting point (PWP) and plant available water (AWC_{100} and AWC_{300}) and Air porosity (AFP)

Tillage system	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
		$cm^3 cm^{-3}$	$cm^3 cm^{-3}$	-	hPa	%	$cm^3 cm^{-3}$								
Conventional tillage	First	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	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	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	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	First	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	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	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	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	First	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	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	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	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, $p < 0.05$).

Tillage: خاک‌ورزی، Conventional tillage: خاک‌ورزی مرسوم، Reduced tillage: کم‌خاک‌ورزی، No tillage: بی‌خاک‌ورزی، Year: سال، First: اولین، Second: دومین، Third: سومین، Forth: چهارمین، m: شیب منحنی

مشخصه رطوبتی، θ_r : رطوبت باقی‌مانده، θ_s : رطوبت اشباع، h_{eVG} : مکش ورود هوا، h_{ovG} : مکش در نقطه عطف منحنی، OC: کربن آلی، Macro-P: تخلخل درشت، Meso-P: تخلخل میانه، Micro-P: تخلخل ریز، θ_{FC} :

گنجایش زراعی، θ_{PWP} : نقطه پژمردگی دائم، AWC_{100} : مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه بین مکش ۱۰۰ سانتی‌متر و نقطه پژمردگی دائم، AWC_{300} : مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه بین مکش ۳۰۰ سانتی‌متر و

نقطه پژمردگی دائم و AFP: تخلخل تهویه‌ای.

مقادیر تخلخل تهویه‌ای (AFP) بزرگ‌تر از $0/10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ برای جلوگیری از کاهش عملکرد محصول به دلیل کمبود تهویه در منطقه ریشه توصیه می‌شود (White, 2005). Carter (1988) بیان کرد که در خاک‌های ریزبافت و متوسط برای بیش‌ترین عملکرد محصول در منطقه ریشه $0/12-0/17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ $\text{AFP} >$ است. درحالی‌که $0/10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ $\text{AFP} <$ 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 برهم‌خوردن خاک در تیمار کم‌خاک‌ورزی سبب AFP یا به عبارت دیگر مجموع منافذ درشت و متوسط بیش‌تر شده است. این نتیجه با Safadoust et al. (2007) هم‌خوانی دارد. آن‌ها گزارش کردند که مجموع منافذ درشت و متوسط (تفاوت رطوبت بین مکش صفر و صد هکتوپاسکال) در سامانه کم‌خاک‌ورزی دارای بیش‌ترین مقدار است. تغییرات مقادیر AFP در دو سال اول انجام آزمایش معنی‌دار نشد اما در سال 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 تیمار کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی روند افزایشی مشاهده شد (جدول ۴). دلیل این یافته را می‌توان به افزایش منافذ درشت در اثر افزودن مواد آلی نسبت داد.

به نظر می‌رسد سامانه‌های خاک‌ورزی با گذشت زمان بر تمامی گروه‌های منافذ با اندازه‌های مختلف (ریز، متوسط و درشت) اثر گذاشته‌اند. با توجه به مطالب بیان‌شده این اثر

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 شد و تغییر معنی‌دار وجود نداشت (جدول ۴). اما تیمارهای بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی در چهار سال روند افزایشی داشتند که دلیل آن افزایش مواد آلی خاک و بهبود ساختمان است. بیش‌ترین مقدار Meso-P در تیمار کم‌خاک‌ورزی سال چهارم مشاهده شد (جدول ۴).

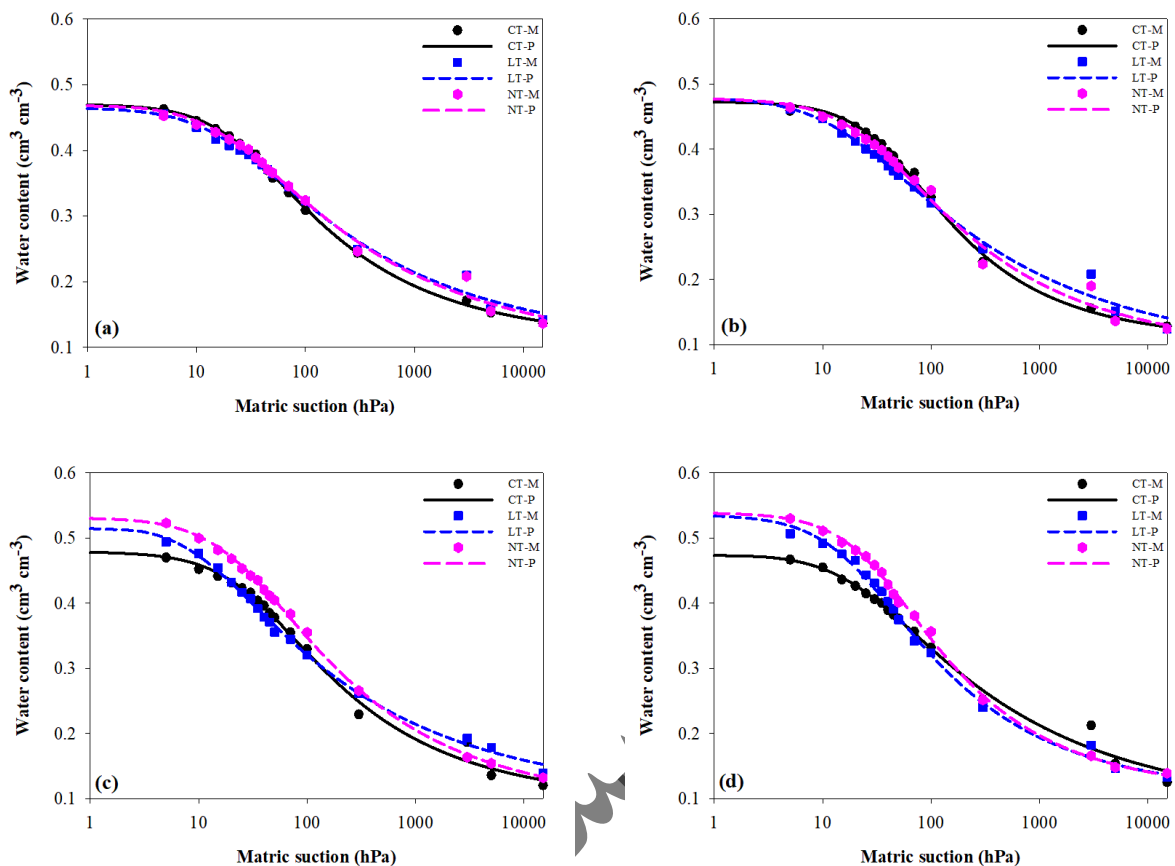
نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی و برهم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر منافذ ریز (Micro-P) نشان داد که بین این مقادیر تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد وجود دارد (جدول ۱). بیش‌ترین مقادیر Micro-P به‌ترتیب مربوط به تیمار بی‌خاک‌ورزی، خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی بود (جدول ۲). به‌نظر می‌رسد در مکش ۱۰۰ هکتوپاسکال که 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 به دلیل افزایش منافذ ریز در سامانه بی‌خاک‌ورزی را گزارش کردند. مقایسه میانگین اثر سال بر مقادیر Micro-P روند افزایش این شاخص را 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 دادند. در سامانه کم‌خاک‌ورزی در مقادیر Micro-P در طول چهار سال انجام آزمایش تغییر معنی‌داری ایجاد 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 ۱۰۰ هکتوپاسکال را به دلیل افزایش مواد آلی گزارش کردند.

بیش تر بر منافذ درشت و متوسط بوده است. حضور بقایای گیاهی و فعالیت بیولوژیکی 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 ۱۰۰ هکتوپاسکال در نظر گرفته شده‌اند. بدیهی است که وجود مواد آلی سبب افزایش نگهداشت آب در این مکش شده است. به‌طور کلی عواملی مانند افزایش مواد آلی خاک، فعالیت بیولوژیکی و کاهش تراکم خاک در این تغییرات نقش کلیدی داشتند.

گنجایش زراعی، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس
اثرات اصلی و برهم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر گنجایش زراعی (θ_{FC}) در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). ترتیب مقادیر θ_{FC} به صورت کم‌خاک‌ورزی < بی‌خاک‌ورزی < کم‌خاک‌ورزی مرسوم بود. تفاوت بین مقادیر کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی معنی‌دار نشد. وجود مواد آلی سبب افزایش معنی‌دار مقادیر θ_{FC} در سامانه بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم شده است. پژوهشگران زیادی افزایش θ_{FC} به دلیل افزایش مواد آلی را گزارش دادند (Bauer and Black, 1981; Riley, 1981; Jong, 1983). Riahinia et al. (2017) بیان کردند که گنجایش زراعی در سامانه 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 سال سوم و چهارم مشاهده شد (جدول ۳). بیش‌ترین مقادیر θ_{FC} در سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی در سال سوم و چهارم مشاهده شد که دلیل آن به افزایش مواد آلی مرتبط است. بیش‌ترین مقادیر OC در سال‌های سوم و چهارم تیمارهای بی‌خاک‌ورزی

و کم‌خاک‌ورزی وجود داشت (جدول ۳ و ۴).
اثرات اصلی و برهم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر نقطه پژمردگی دائم θ_{PWP} معنی‌دار شد (جدول ۱). بیش‌ترین مقدار θ_{PWP} به ترتیب مربوط به کم‌خاک‌ورزی، بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم بود. تفاوت بین مقادیر θ_{PWP} سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی بسیار کم و معنی‌دار نشد (جدول ۲). پژوهشگران زیادی افزایش نگهداشت آب در θ_{PWP} را گزارش کردند (McBride and Mackintosh, 1984; Beke and Maccormick, 1985; Bell and Van Keulen, 1995). بیش‌ترین مقادیر θ_{PWP} در سال 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 در سال دوم فقط 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 وجود مواد آلی در خاک بر مقادیر 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 مواد آلی است. به نظر می‌رسد که اثر مواد آلی بر نگهداشت آب در مکش‌های زیاد نیاز به مدت زمان (بیش از ۴ سال) و تجزیه بیش‌تر مواد آلی دارد.

مقادیر آب قابل دسترس (AWC_{100}) در بین تیمارهای مورد بررسی بسیار نزدیک به هم است. با این حال 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 طبق نتایج Riahinia et al. (2017) بین هر سه تیمار خاک‌ورزی تفاوت معنی‌داری وجود



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

Figure 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 repetitions). CT: Conventional tillage, LT: Low tillage, NT: No tillage.

بیش‌ترین مقدار AWC_{300} در سال سوم و سپس چهارم مشاهده شد (جدول ۳). به نظر حضور مواد آلی سبب افزایش اندک مقادیر AWC_{300} در سال 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 اندازه‌گیری شده برای منحنی مشخصه رطوبتی به همراه برازش مدل ون‌گنوختن-کوسوگی بر آن‌ها برای تیمارهای مورد بررسی ارائه شده است. مدل ون‌گنوختن-

داشت به طوری که 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 مشاهده 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). همان‌طور که پیش از این بیان شد تأثیر حفظ مواد آلی در خاک بر مقادیر نگهداشت آب در مکش‌های زیاد کم‌تر است.

کوسوگی به خوبی بر داده‌های اندازه‌گیری شده 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 و ورود هوا (h_{eVG})، مکش در نقطه عطف (h_{0VG}) و شیب (m) منحنی مشخصه رطوبتی است. ولی در مدل ون‌گنوختن مکش و 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 سال اول و دوم منحنی مشخصه رطوبتی تیمارهای مورد بررسی تفاوت چندانی با هم ندارند. در سال سوم و چهارم در منحنی مشخصه رطوبتی تیمارهای مورد بررسی به ویژه در مکش‌های کم تفاوت ایجاد شد. رطوبت حجمی در تیمار بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی در مکش‌های کم نسبت به تیمار خاک‌ورزی مرسوم افزایش پیدا کرد. این تفاوت ناشی از تغییر توزیع اندازه منافذ در تیمارهای بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی است. به نظر می‌رسد از سال سوم به بعد اثر نگهداشت بقایای آلی در زمین در تیمار بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی بر رطوبت حجمی در مکش‌های کم مثبت بوده است. در مکش‌های زیاد تفاوت چندانی در بین منحنی مشخصه رطوبتی تیمارهای مورد بررسی مشاهده نشد.

نتایج تجزیه واریانس اثر نوع سامانه خاک‌ورزی، سال و برهم‌کنش بین آن‌ها بر پارامترهای مدل ون‌گنوختن-کوسوگی در جدول (۱) ارائه شده است. اثرات 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) غیر معنی‌دار و اثر برهم‌کنش بین آن‌ها معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین پارامترهای مدل ون‌گنوختن-کوسوگی در جداول (۲-۴) 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 (جدول ۱ و ۲). بیش‌ترین مقدار θ_r در سال اول و کم‌ترین مقدار آن مربوط به سال دوم بود. اثر زمان بر مقادیر θ_r در سال دوم کاهش یافته اما سپس افزایش یافته است (جدول ۲). به نظر می‌رسد پس از سال دوم منافذ ریز 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 باعث خرد شدن خاک‌دانه‌ها و تغییر توزیع منافذ می‌شود که منجر به افزایش منافذ ریز می‌گردد که آب را به‌صورت غیرقابل دسترس نگه می‌دارند و مقدار θ_r را افزایش می‌دهد. کم‌ترین مقدار آن مربوط به تیمار کم‌خاک‌ورزی در سال دوم بود.

اثرات اصلی (سامانه خاک‌ورزی و سال) و برهم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر رطوبت اشباع (θ_s) معنی‌دار شد (جدول ۱). تفاوت مقدار 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 خاک لوم سیلت و لوم شنی را گزارش کردند. Bhattacharyya et al. (2006) در بررسی اثر انواع سامانه خاک‌ورزی بر ویژگی‌های هیدرولیکی در چهار سال بیان کردند که رطوبت اشباع در سامانه بی‌خاک‌ورزی نسبت به 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 برهم زدن ساختمان خاک، خرد کردن بقایای آلی و کاهش تجمع خاکدانه‌های پایدار،

معمولاً تأثیر منفی بر θ_s دارد. این فرآیند باعث کاهش مقدار مواد آلی در لایه سطحی 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 نسبت داد (Tadayonnejad et al., 2023). مقادیر θ_s در سال 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 سال 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 و کاهش فرسایش را در شمال غربی مراکش بهبود بخشیده 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) 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 در مکش‌های کم را در سامانه بی‌خاک‌ورزی گزارش کردند درحالی‌که گنجایش مزرعه 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 سال سوم و چهارم و تیمار کم‌خاک‌ورزی در سال چهارم است (جدول ۴).

پارامتر m با شیب ناحیه دوم منحنی مشخصه رطوبتی ارتباط دارد. با افزایش m ، شیب منحنی WRC بیش‌تر می‌شود که بیانگر

افزایش شیب ناحیه غیر اشباع شدن این منحنی است. مقدار پارامتر m بین صفر و یک است (Kosugi, 1994). اثر سامانه خاک‌ورزی، سال و بر هم‌کنش بین آن‌ها بر مقادیر m معنی‌دار شد (جدول ۱). مقادیر m در چهار سال انجام آزمایش در دامنه $0/253-0/273$ متغیر بود. بیش‌ترین مقدار آن مربوط به سال چهارم است. این سال دارای بیش‌ترین مقادیر منافذ متوسط و ریز نیز بود (جدول ۳). با گذشت زمان و اعمال سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی منافذ متوسط و ریز روند صعودی داشته‌اند 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 نوع منافذ 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 سال سوم و چهارم روند مقدار m کاهش شد (جدول ۴). به نظر می‌رسد خاک‌ورزی مرسوم در کوتاه مدت اثر مثبت داشته و در دراز مدت 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 مواد آلی بر افزایش 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 ۲). مقدار h_{cVG} در تیمار خاک‌ورزی مرسوم در سال چهارم افزایش پیدا کرد که نشان از اثر منفی این سامانه در دراز مدت بر مقادیر منافذ درشت است. در تیمار خاک‌ورزی مرسوم منافذ درشت در سال چهارم به کم‌ترین مقدار خود رسید (جدول ۳). مقدار h_{cVG} در تیمار بی‌خاک‌ورزی در سال چهارم صفر شد (جدول ۴). پارامتر h_{ovG} برابر با فراوان‌ترین منافذ در خاک است

و مکش در نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی را نشان می‌دهد. منحنی مشخصه رطوبتی با افزایش h_{0VG} به سمت 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 گزارش‌های 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 قطعات 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، بررسی‌ها نشان داد که در طی چهار سال انجام آزمایش، افزایش مواد آلی تأثیر به‌سزایی بر افزایش فراوانی منافذ درشت و متوسط داشته است، درحالی‌که تأثیرات کم‌تری بر منافذ ریز دیده شد. از طرفی در خاک‌ورزی مرسوم با گذشت چهار سال منافذ درشت و متوسط کاهش یافته و منافذ ریز افزایش پیدا کردند. در روش بی‌خاک‌ورزی، بقایای آلی و فعالیت میکروارگانسیم‌ها باعث تشکیل خاکدانه‌های پایدار می‌شوند که به بهبود ساختمان خاک می‌شود. 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 زراعی، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترسی به‌طور قابل

توجهی مثبت بود. این نکته مهم است که اثر افزایش موادآلی و افزایش نگهداشت آب بیش‌تر در مکش‌های کم 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 مواد آلی در خاک، توانایی خاک در مقابله با اثرات 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 بهم‌زدن در خاک، سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی می‌توانند از طریق کاهش تبخیر و افزایش نگهداشت آب از حرکت نمک‌ها به سمت بالا جلوگیری کنند، که این امر در خاک‌های شخم‌زده و شور بسیار رایج است. به‌طور کلی، کم‌تر دست‌خوردن خاک در سال‌های خشک می‌تواند منجر به کاهش تلفات رطوبت شود. این اثر مثبت به دلیل بهبود توزیع لندازه منافذ در خاک و حفظ ساختمان آن است. از سوی دیگر، به‌هم‌خوردگی بیش از حد خاک ممکن است منجر به از دست رفتن رطوبت، کاهش مواد آلی و تخریب ساختمان خاک شود. بنابراین، خاک‌ورزی حفاظتی می‌تواند به عنوان جایگزینی مناسب برای خاک‌ورزی معمولی 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.

تضاد منافع

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

1. Afyuni, M., Mosaddeghi, M., 2001. Impact of Tillage System on Soil Physical Properties and Bromide Leaching. *J. Water Soil Sci.* 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., 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 Science Society of America Journal*, 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, Akbar. 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. *Methods of Soil Analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 635–662.
23. Kosugi, K.i., 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. Envir. 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. Tadayonjad, 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.* 14(1): 53–69. 10.47176/jspi.14.1.01891.
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>.