

## The Impact of Conservational Tillage Systems on Some Physical Properties of Silty Clay Loam Saline Soil

M. Tadayonnejad<sup>1\*</sup>, M. Yahyaabadi and M. Kazemi

(Received: 18 February 2023; Accepted: 5 April 2023)

### Abstract

The large area of saline soils in Iran and decreasing in quality of these soils require that the effectiveness of conservation tillage systems in such lands be investigated. This project aims to determine changes in soil physical properties in three different types of tillage system and plant residue management, including: 1) conventional tillage system and removal of crop residues from soil surface, 2) reduced tillage system and preservation of crop residues, and 3) no tillage system and preservation of crop residues in rotation of barley and safflower in a saline soil with irrigation water salinity of 5.35 dS/m for four years. Some soil physical properties such as bulk density and porosity, and aggregate stability indices of mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) were measured in soil samples prepared from the layers of 0–10, 10–20 and 20–30 cm. After each crop rotation period, water infiltration into the soil was measured and the modified Kostiakov model was fitted to obtain the optimized parameters. The results of variance analysis of the data in the four years of the experiment showed that the difference in most of the soil properties at the end of the experiment was significant due to the tillage treatments compared to the control. The highest MWD and GMD (2.53 and 1.90 mm, respectively), porosity (51.2%) and final infiltration rate (31 cm/h) were observed in the no-tillage system. while the lowest MWD and GMD (2.02 and 1.29 mm, respectively), porosity (47.8%) and final infiltration rate (3.5 cm/h) were recorded in the conventional tillage system. Overall, our findings showed that the increment in the soil organic matter due to the implementation of conservational tillage treatments improved the stability of soil aggregates and increased soil porosity and water infiltration into the soil.

**Keywords:** Aggregate stability, Crop rotation, Conservational tillage, Soil quality, Water infiltration into soil.

**Background and Objective:** Presence of sodium in the salt-affected soils causes the dispersion and disintegration of clay particles, which leads to the destruction of the soil structure and, as a result, poor aeration of the root growth environment and the reduction of root penetration and water storage in the soil. The binding of clay particles and maintaining the soil structure strongly depend on the soil salinity and sodicity, the soil organic matter content, the rate of wetting and the type of soil clays (2). Tillage practices could reduce the soil bulk density in the plow layer, which gradually returns to its initial level upon

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

\* Corresponding author, Email: m.tadayonnejad@gmail.com

consolidation due to natural processes. These changes depend on the type of soil and tillage tools (3). Hajabbasi et al. (4) studied the effects of different tillage methods on the MWD in Kabutarabad, Isfahan. In no-tillage treatment, the MWD was 20% higher than in other treatments. Water infiltration and microporosity in two soil types (i.e., silty loam and sandy loam) were significantly lower in the conventional tillage than in no-tillage, while no significant difference was observed for the macroporosity (1).

**Methods:** The current research was carried out at Kabutarabad agricultural research station, located in the southeast of Isfahan city, in fixed plots of the conservation agriculture experimental site for four years in split plots design. The main plots included three different types of tillage system and crop residue management, including: 1) conventional tillage and removal of residues from the field, 2) reduced tillage and preservation of residues, and 3) no tillage and preservation of residues. Soil layers of 0–10, 10–20 and 20–30 cm were considered as sub-plots. At the time of harvesting of each crop, soil samples were prepared from the three layers and physical properties were measured in the laboratory. After harvesting, the water infiltration into the soil was measured by the double rings method. The soil texture (i.e., percentages of sand, silt and clay) was determined by hydrometric method. Soil bulk density was determined by the core samples collected by using cylinders of 100 cm<sup>3</sup>. Wet and dry sieving methods were used to measure the aggregate stability and mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of the aggregates were calculated.

**Results:** Soil porosity was observed in the order of: no tillage > reduced tillage > conventional tillage and their values were 51.2, 50.4 and 47.8%, respectively. The highest soil porosity (i.e., 54.1%) was recorded in the no-tillage at the layer 10–20 cm and the lowest value (i.e., 47.9%) occurred at the layer 0–10 cm in the conventional tillage. The effects of tillage treatment, as well as the interaction effect of these treatments and the soil layer on the bulk density were not significant. The highest MWD and GMD (2.53 and 1.90 mm, respectively) were observed in the no-tillage, while the lowest values (2.02 and 1.29 mm, respectively) were recorded in the conventional tillage. In four years of the experiment, plots with conventional tillage had the lowest water infiltration rate.

**Conclusions:** Four years of research in saline soil showed that the reduced tillage and especially no tillage significantly increased soil porosity, infiltration rate and stability of soil aggregates. The increment in soil organic matter and lowered machinery traffic are the most important reasons for these positive effects. These effects became larger over time so that the most positive effect was observed in the fourth year of experiment.

#### References:

1. Azooz, R.H., Arshad, M.A., Franzluebbbers, A.J., 1996. Pore size distribution and hydraulic conductivity affected by tillage in Northwestern Canada. *Soil Science Society of America Journal* 60(4): 1197–1201.
2. Barzegar, A., 1995. Structural Stability and Mechanical Strength of Salt-affected Soils. PhD Thesis, Adelaide University, Australia.
3. Green, T.R., Ahuja, L.R., Benjamin, J.G., 2003. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma* 116(1-2): 3–27.
4. Hajabbasi, M.A, Mirlohi, A.F., Sadrarhami, M., 1999. Tillage effects on some physical properties of soil and maize yield in Lavark research farm. *Journal of Water and Soil Sciences* 3(3): 13–24. (In Persian with English abstract)



## تأثیر سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک لوم رسی سیلتی در شرایط شور

مسعود تدین‌نژاد<sup>۱\*</sup>، مجتبی یحیی‌آبادی و مهسا کاظمی

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۱۶)

### چکیده

مساحت زیاد خاک‌های شور در ایران و کاهش کیفیت این خاک‌ها ایجاب می‌کند که کارایی سامانه‌های کشاورزی حفاظتی در این‌گونه زمین‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرند. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک در سه نوع مدیریت متفاوت خاک‌ورزی و بقایای گیاهی شامل: (۱) خروج بقایا از مزرعه و خاک‌ورزی مرسوم، (۲) حفظ بقایا و کم‌خاک‌ورزی، و (۳) حفظ بقایا و بی‌خاک‌ورزی در تناوب جو و گلرنگ و در یک خاک شور و شوری آب آبیاری ۵/۳۵ دسی‌زیمنس بر متر به مدت چهار سال انجام شد. در پایان هر کشت نمونه‌های خاک از لایه‌های ۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متر تهیه شده و ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل چگالی ظاهری و تخلخل، و پایداری خاکدانه‌ها با شاخص‌های میانگین وزنی قطر (MWD) و میانگین هندسی قطر (GMD) تعیین شد. پس از هر دوره تناوب کشت، نفوذ آب به خاک اندازه‌گیری شده و با برآزش مدل کوستیاکوف اصلاح‌شده پارامترهای مربوطه تعیین شد. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در چهار سال آزمایش نشان داد که تفاوت اغلب ویژگی‌های خاک در پایان آزمایش در اثر اعمال تیمارهای خاک‌ورزی نسبت به شاهد معنی‌دار شد. به‌طوری‌که بیش‌ترین مقادیر MWD و GMD (به ترتیب ۲/۵۳ و ۱/۹۰ میلی‌متر)، تخلخل (۵۱/۲ درصد) و شدت نفوذ نهایی (۳۱ سانتی‌متر بر ساعت) در تیمار بی‌خاک‌ورزی و کم‌ترین مقادیر MWD و GMD (به ترتیب ۲/۰۲ و ۱/۲۹ میلی‌متر)، تخلخل (۴۷/۸ درصد) و شدت نفوذ نهایی (۳/۵ سانتی‌متر بر ساعت) در تیمار خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد. در کل نتایج این پژوهش نشان داد اجرای تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی باعث افزایش ماده آلی و بهبود پایداری خاکدانه‌ها، افزایش تخلخل و نفوذ آب به خاک شد.

واژه‌های کلیدی: پایداری خاکدانه، تناوب زراعی، خاک‌ورزی حفاظتی، شوری خاک، کیفیت خاک، نفوذ آب به خاک.

### مقدمه

فرسایش و تخریب شده است (۴۱). هدف از خاک‌ورزی حفاظتی کاهش شدت عملیات خاک‌ورزی و مدیریت بقایای گیاهی موجود در سطح خاک است. از جمله

حدود ۳۵۰ میلیون هکتار از زمین‌های جهان در اثر اجرای عملیات خاک‌ورزی شدید و نامناسب دچار

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

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.tadayonnejad@gmail.com

آب آبیاری و خاک قرار دارد. اثر تخریبی سدیمی بودن آب آبیاری بر ویژگی‌های فیزیکی خاک بستگی به شوری آب مورد استفاده دارد و با افزایش شوری آب حد بحرانی سدیمی بودن آب افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که میزان هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع خاک (در دامنه ۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر مکش ماتریک) با افزایش غلظت سدیم کاهش یافت و بسته به میزان شوری خاک مقدار آن متفاوت بود. افزایش شوری عصاره اشباع خاک (بیش از ۲ دسی‌زیمنس بر متر) آثار ناشی از تخریب ساختمان خاک و کاهش هدایت هیدرولیکی را تعدیل کرد (۲۷). فیضی (۱۲) اثر کیفیت آب را بر نفوذپذیری آبی خاک طی چهار سال در کرت‌های ثابت اندازه‌گیری کرد. شدت نفوذ نهایی آب در خاک تا شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر و نسبت جذب سدیم (SAR) برابر ۱۹ تغییر معنی‌داری نشان نداد ولی با افزایش بیش‌تر شوری و SAR آب، میزان نفوذ آب به خاک کاهش یافت.

حاج‌عباسی و همکاران (۱۸) در کبوترآباد اصفهان آثار شیوه‌های مختلف خاک‌ورزی بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) را بررسی کردند. در تیمار بی‌خاک‌ورزی، مقدار MWD به میزان ۲۰٪ بیش‌تر از سایر تیمارها بود. همچنین در تیمار بی‌خاک‌ورزی میزان ماده آلی خاک حدود ۴۰٪ نسبت به سایر تیمارها افزایش نشان داد. نتایج پژوهش رضایی و اسدی (۳۱) در سه سال آزمایش نشان داد که حفظ بقایای گیاهی جو در زراعت ذرت موجب افزایش MWD، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) و درصد ماده آلی خاک نسبت به سوزاندن بقایای گیاهی گردیده (۳۱) و اثر باقی‌مانده آن در کشت جو بر MWD و GMD معنی‌دار شد (۳۲).

پژوهش حاضر به‌دنبال این سؤال اساسی است که خاک‌ورزی حفاظتی (کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی) در مقایسه با کشاورزی مرسوم چه آثاری بر ویژگی‌های فیزیکی خاک در شرایط شور دارند؟ به دیگر سخن هدف اصلی این پژوهش تعیین تأثیر سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در شرایط شور است.

اولین آزمایش‌های خاک‌ورزی حفاظتی در سال ۱۹۴۱ به‌طور توأم در آمریکا و کانادا با استفاده از خاک‌پوش کاه و کلش و به‌منظور کاهش فرسایش و افزایش ذخیره رطوبت در دیم‌زارهای مناطق نیمه‌خشک انجام شد (۲).

افزایش میزان سدیم در خاک در شرایط شور موجب پراکنش ذرات رس شده که منجر به تخریب ساختمان خاک و در نتیجه تهویه نامناسب محیط رشد ریشه و کاهش توان نفوذ ریشه و ذخیره آب در خاک می‌شود. اتصال ذرات رس و حفظ ساختمان خاک بستگی شدیدی به نوع املاح، میزان مواد آلی خاک، سرعت خیس‌شدن و نوع رس خاک دارد (۶). چنین خاک‌هایی به‌طور معمول حتی در مواقعی که تردد ماشین‌های کشاورزی بر روی آن‌ها انجام نگرفته به‌علت ساختمان ضعیف نیز متراکم می‌شوند. یک لایه خاک شور که معمولاً درصد سدیم آن زیاد است، ممکن است منجر به وجود آمدن یک لایه متراکم با چگالی ظاهری زیاد شود که برای نفوذ ریشه گیاه و زهکشی آب محدودیت ایجاد می‌کند (۲۲).

خاک‌ورزی چگالی ظاهری خاک را در لایه شخم کاهش می‌دهد که به تدریج به میزان اولیه خود به‌علت تحکیم در اثر نیروهای طبیعی برمی‌گردد. این تغییرات به نوع خاک و ابزارهای خاک‌ورزی به‌کار برده شده بستگی دارد (۱۶). نتایج پژوهش بدلیکوا (۵) نشان داد که افزایش شدت خاک‌ورزی موجب افزایش چگالی ظاهری و کاهش تخلخل خاک شد. نتایج پژوهش‌های سروکینا و توماس (۳۸) نشان داد که با افزایش ماده آلی، چگالی ظاهری خاک کاهش می‌یابد. در این پژوهش افزایش میزان ماده آلی خاک تا میزان ۱/۲۶ درصد موجب افزایش شدید پایداری خاکدانه‌ها شد ولی افزایش بیش‌تر آن بر پایداری خاکدانه تأثیر چندانی نشان نداد.

نفوذپذیری آبی و تخلخل ریز در دو نوع خاک لوم سیلت و لوم شنی به‌طور معنی‌داری در روش خاک‌ورزی مرسوم کم‌تر از روش بی‌خاک‌ورزی گزارش شده است درحالی‌که از نظر تخلخل درشت اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (۴). هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری آبی خاک به‌شدت تحت تأثیر کیفیت

## مواد و روش‌ها

این پژوهش در ایستگاه تحقیقات کشاورزی کبوترآباد واقع در جنوب شرقی شهر اصفهان در کرت‌های ثابت سایت آزمایشی کشاورزی حفاظتی انجام شد. مختصات جغرافیایی مکان آزمایش "۲۹/۵۲' ۳۰" شمالی و "۵۱° ۵۰' ۵/۶۲" شرقی و ارتفاع آن ۱۵۴۴ متر از سطح دریا است. زمین‌های ایستگاه بر روی واحد تراس‌های آبرفتی رودخانه‌ای و از نظر ژئومورفولوژیکی روی تراس اول رودخانه زاینده‌رود تشکیل و تکامل یافته‌اند. زمین‌های این ایستگاه جزو زمین‌های کلاس II طبقه‌بندی شده‌اند. بر اساس نقشه بیوکلیماتیک ایران (روش آمبرژه) ایستگاه کبوترآباد در اقلیم خشک سرد قرار دارد. میانگین مقدار بارندگی سالانه منطقه برابر ۱۴۲/۴ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. نوسان میانگین دمای سالانه مابین ۴- تا ۳۷/۱ درجه سلسیوس گزارش شده است. سری غالب خاک ایستگاه کبوترآباد اصفهان Fine, Mixed, Thermic, Typic Calciargids (Calcisols FAO) بود که این سری خاک از سری‌های غالب خاک‌های مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران است (۳۸).

این آزمایش به صورت کرت‌های خردشده اجرا شده و تجزیه و تحلیل شد. کرت‌های اصلی شامل سه نوع مدیریت متفاوت خاک‌ورزی و بقایای گیاهی: ۱- خاک‌ورزی مرسوم و خروج بقایا از مزرعه، ۲- کم‌خاک‌ورزی و حفظ بقایا، و ۳- بی‌خاک‌ورزی و حفظ بقایا، و لایه‌های ۱۰-۰، ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متری به عنوان کرت‌های فرعی بود. عرض هر کرت آزمایش حداقل ۳ متر با توجه به عرض دستگاه کارنده (۲/۸ تا ۳ متر) در نظر گرفته شد. طول هر کرت آزمایشی ۳۰ متر بود. در نتیجه مساحت کاشت هر کرت فرعی حداقل برابر ۷۵ مترمربع و مساحت هر کرت اصلی برابر ۳۰۰ مترمربع بود. عملیات آماده‌سازی زمین و کاشت تیمار خاک‌ورزی مرسوم شامل شخم برگردان‌دار، دو مرحله دیسک متقاطع و سپس کاشت با بذرکار-خطی کار-کودکار و عملیات آماده‌سازی زمین و کاشت تیمار کم‌خاک‌ورزی شامل گاو آهن قلمی، ایجاد جوی

و سپس کاشت با بذرکار-خطی کار-کودکار و عملیات آماده-سازی زمین و کاشت تیمار بی‌خاک‌ورزی شامل کاشت مستقیم با بذرکار-خطی کار-کودکار و بدون شخم بود. در قطعه کم-خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی تنها بقایای ایستاده محصول حفظ شده و بقیه بقایا از زمین خارج شد. در قطعه خاک‌ورزی مرسوم کل بقایای گیاهان زراعی حذف شدند. در قطعه بی‌خاک‌ورزی پس از خرد کردن بقایای ایستاده جو با ساقه خردکن، ادوات کاشت و برداشت در یک مسیر ثابت با حداقل تردد وارد زمین شد و کاشت مستقیم روی زمین مسطح با خطی کار آمازون انجام شد. گیاهان جو و گلرنگ در تناوب کشت استفاده شد. در سال اول و سوم کشت جو و در سال دوم و چهارم کشت گلرنگ انجام شد. خاک مکان اجرای این آزمایش آهکی (۴۵ درصد آهک) و کلاس بافت خاک لوم رسی سیلتی بود. ادوات خاک‌ورزی استفاده شده در این پژوهش به شرح زیر بود:

۱- بذرکار-خطی کار-کودکار آمازون<sup>۱</sup>: کششی، مجهز به موزع مکانیکی (استوانه‌ای شیاردار) نوع شیار بازکن: قلمی با قابلیت قراردادن کود پایین‌تر از بذر، فاصله ردیف‌های کشت ۱۵ سانتی‌متر، عرض کار ۲۵۰ سانتی‌متر، عمق کار قابل تنظیم بین ۲ تا ۷ سانتی‌متر.

۲- گاوآهن قلمی<sup>۲</sup>: سوارشونده، ۹ شاخه متصل به یک میل افزار دو ردیفه، پهنای تیغه ۷ سانتی‌متر، عمق کار ۱۰-۸ سانتی‌متر.

۳- ساقه خردکن<sup>۳</sup>: سوار شونده، عرض کار ۱۸ سانتی‌متر، تیغه‌ها چکشی، حرکت تیغه‌ها به صورت عمودی، دارای دو کفشک برای تنظیم ارتفاع از سطح خاک.

۴- گاوآهن برگردان‌دار<sup>۴</sup>: سوارشونده، ۳ خیشه، عرض برش هر خیش ۳۵ سانتی‌متر، عمق کار ۳۰-۲۵ سانتی‌متر.

منبع آب آبیاری سفره آب زیرزمینی با شوری برابر ۵/۳۵ دسی‌زیمنس بر متر و تعیین زمان آبیاری به کمک TDR و بر اساس ۵۰ درصد تخلیه مجاز رطوبتی (در دامنه رطوبتی ۱۵ تا ۲۰ درصد وزنی) انجام شد.

1. Direct seed-fertilizer Amazone, NT 250, Germany
2. Chisel plow
3. Stalk shredder
4. Moldboard plow

یا گروه  $i$  (mm)،  $w_i$  نسبت وزن خشک خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی هر الک به وزن کل خاکدانه‌ها،  $W_i$  وزن خاکدانه‌ها در هر یک از کلاس‌های مربوطه و  $n$  تعداد گروه‌های خاکدانه است.

همچنین آزمایش الک خشک روی نمونه‌های خاک هوا-خشک عبور داده شده از الک ۸ میلی‌متری انجام شد. ابتدا نمونه خاک مورد نظر توزین شده و بر روی بالاترین الک ریخته شد و به مدت ده دقیقه تکان داده شد. در نهایت خاکدانه‌های مانده روی هر الک وزن شده، درصد عبوری از هر الک تعیین شده و مقادیر MWD و GMD با روابط ۱ و ۲ محاسبه شد.

پس از هر دوره تناوب کشت، اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک به روش استوانه مضاعف<sup>۱</sup> انجام شد (۱۷). برای برازش داده‌های نفوذ تجمعی در برابر زمان از مدل کوستیاکوف-لوئیس (رابطه ۳) در برنامه Excel (ابزار Solver) و از طریق حداقل کردن مجموع مربعات خطای (SSE) تفاضل داده‌های صحرایی و برآورد مدل استفاده شد:

$$i = Kbt^{b-1} + A \quad (3)$$

$$I = Kt^b + At \quad (4)$$

که  $i$  و  $I$  به ترتیب شدت نفوذ ( $\text{cm min}^{-1}$ ) و نفوذ تجمعی ( $\text{cm}$ )،  $A$  شدت نفوذ نهایی ( $\text{cm min}^{-1}$ )، و  $K$  ( $\text{cm min}^{-b}$ ) و  $b$  (-) ضرایب تجربی است.

تجزیه آماری بر اساس کرت‌های دوبار خرد شده که تیمار خاک‌ورزی کرت اصلی، تیمار لایه خاک کرت فرعی و فاکتور سال مشابه کرت فرعی-فرعی در نظر گرفته شد. برای پی‌بردن به اثر تیمارها از جدول تجزیه واریانس ANOVA و برای مقایسه میانگین‌ها از روش LSD به کمک نرم‌افزارهای SAS و MSTATC استفاده گردید.

## نتایج و بحث

### درصد تخلخل خاک

اثر اصلی خاک‌ورزی، عمق خاک و سال بر تخلخل خاک

در زمان برداشت هر محصول در هر کرت آزمایشی نمونه‌های خاک از لایه‌های ۰-۲۰، ۱۰-۳۰ و ۰-۳۰ سانتی‌متر تهیه شده و ویژگی‌های فیزیکی خاک (تخلخل، چگالی ظاهری، پایداری خاکدانه) در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. همچنین پس از برداشت محصول، نفوذ آب به خاک به روش حلقه‌های مضاعف اندازه‌گیری شد.

### اندازه‌گیری‌های ویژگی‌های فیزیکی خاک

برای تعیین بافت خاک با روش هیدرومتری (۱۴) مقادیر شن، سیلت و رس خاک اندازه‌گیری شد. چگالی ظاهری خاک با روش برداشت نمونه دست‌نخورده به وسیله استوانه‌های استیل ۱۰۰ سانتی‌متر مکعبی تعیین گردید (۸). پس از اشباع‌نمودن نمونه‌های خاک، تخلخل خاک در نقطه اشباع (۰ kPa) به دست آمد. برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها از روش الک تر استفاده شد (۲۸). ابتدا نمونه‌های خاک پس از هوا-خشک‌شدن از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شد. سپس ۲۰ گرم از خاک الک-شده (با پیش‌تیمار مرطوب کردن آهسته به وسیله اسپری آب و اتانول به منظور خروج هوا از خاکدانه‌ها) بر روی یک سری الک به ترتیب از بالا به پایین (۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر) ریخته شد و با سرعت ۳۰ نوسان در دقیقه به مدت زمان ۵ دقیقه تحت الک تر قرار گرفت. سپس مقدار خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک پس از خشک‌شدن در آون و تصحیح شن، وزن شد. از داده‌های حاصله، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با معادله وان‌باول (۴۰) (رابطه ۱) و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها با معادله مازوراک (۲۶) (رابطه ۲) محاسبه گردید:

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n W_i \log x_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2)$$

که در آن‌ها MWD میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)، GMD میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (mm)،  $x_i$  میانگین (میانگین حسابی) اندازه خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی هر الک

1. Double rings

جدول ۱. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تخلخل، چگالی ظاهری (BD) و پایداری خاکدانه‌ها (میانگین وزنی قطر، MWD، و میانگین هندسی قطر، GMD) خاک در ترکیب چهار سال اجرای آزمایش.

**Table 1.** Variance analysis (mean square) of soil porosity, bulk density (BD) and aggregates stability (mean weight diameter, MWD, and geometric mean diameter, GMD) in the combination of four years experiment.

GMD <sub>Wet</sub>	MWD <sub>Dry</sub>	GMD <sub>Dry</sub>	MWD <sub>Wet</sub>	BD	Porosity	DF	Source of variance
0.088 <sup>ns</sup>	0.071 <sup>ns</sup>	0.014 <sup>ns</sup>	0.268 <sup>ns</sup>	0.030 <sup>ns</sup>	15.624 <sup>ns</sup>	2	Block
3.422 <sup>**</sup>	0.914 <sup>*</sup>	0.067 <sup>**</sup>	2.352 <sup>**</sup>	0.005 <sup>ns</sup>	114.768 <sup>**</sup>	2	Tillage (A)
0.165	0.134	0.004	0.091	0.028	5.131	4	Error
0.338 <sup>*</sup>	0.018 <sup>ns</sup>	0.024 <sup>**</sup>	3.235 <sup>**</sup>	0.001 <sup>ns</sup>	150.846 <sup>**</sup>	2	Soil depth (B)
0.172 <sup>ns</sup>	0.086 <sup>ns</sup>	0.001 <sup>ns</sup>	0.210 <sup>ns</sup>	0.010 <sup>ns</sup>	23.169 <sup>**</sup>	4	A × B
0.084	0.055	0.003	0.092	0.008	2.027	12	Error
6.545 <sup>**</sup>	4.590 <sup>**</sup>	0.381 <sup>**</sup>	18.373 <sup>**</sup>	0.212 <sup>**</sup>	172.871 <sup>**</sup>	3	Year (C)
1.129 <sup>**</sup>	0.0327 <sup>**</sup>	0.025 <sup>**</sup>	0.255 <sup>*</sup>	0.003 <sup>ns</sup>	27.244 <sup>**</sup>	6	A × C
0.034 <sup>ns</sup>	0.162 <sup>ns</sup>	0.016 <sup>**</sup>	0.531 <sup>**</sup>	0.008 <sup>ns</sup>	6.666 <sup>ns</sup>	6	B × C
0.156 <sup>ns</sup>	0.026 <sup>ns</sup>	0.001 <sup>ns</sup>	0.177 <sup>ns</sup>	0.005 <sup>ns</sup>	7.017 <sup>ns</sup>	12	A × B × C
0.112	0.088	0.004	0.110	0.008	6.345	54	Error
20.7	7.5	3.32	14.4	7.4	5.0	-	CV

\*\* : معنی‌دار در سطح ۱٪، \* : معنی‌دار در سطح ۵٪، ns : عدم معنی‌داری،

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

Source of variance: منابع تغییرات، DF: درجه آزادی، Porosity: تخلخل، BD: چگالی ظاهری، MWD<sub>Wet</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Mean weight diameter in wet sieving)، GMD<sub>Dry</sub>: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک (Geometric mean diameter in dry sieving)، MWD<sub>Dry</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک (Mean weight diameter in dry sieving)، GMD<sub>Wet</sub>: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Geometric mean diameter in wet sieving)، Block: تکرار، Tillage (A): خاک‌ورزی، Error: خطا، Soil depth (B): عمق خاک، Year (C): سال، CV: ضریب تغییرات

مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش خاک‌ورزی و عمق خاک تنها بر تخلخل خاک معنی‌دار شد (شکل ۱-ا). بیش‌ترین تخلخل خاک (برابر ۵۴/۱ درصد) در تیمار بی‌خاک‌ورزی در لایه ۰-۲۰ سانتی‌متر و کم‌ترین آن (برابر ۴۷/۹ درصد) در لایه ۰-۱۰ سانتی‌متر تیمار خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد. به‌طور کلی اختلاف بین تیمارها در لایه ۰-۲۰ سانتی‌متری بیش‌تر از سایر لایه‌ها بود و در لایه ۰-۳۰ سانتی‌متری این اختلاف کم‌تر شد (شکل ۱-ا). در شکل (۱-ب) درصد تخلخل خاک در سه لایه متفاوت خاک و در پایان سال اول و نیز پایان سال چهارم پژوهش نشان داده شده است. در سال اول تخلخل خاک در سه تیمار خاک‌ورزی تقریباً مشابه هم و در لایه رویین بیش‌تر از لایه زیرین خاک بود. اما در سال چهارم آزمایش تفاوت مقدار

معنی‌دار شد. همچنین اثر برهم‌کنش خاک‌ورزی و عمق خاک و نیز اثر برهم‌کنش خاک‌ورزی و سال بر تخلخل خاک معنی‌دار گردید (جدول ۱).

مقدار تخلخل خاک در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی به‌ترتیب در تیمار بی‌خاک‌ورزی < تیمار کم‌خاک‌ورزی < تیمار خاک‌ورزی مرسوم بود. تخلخل خاک در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی به‌ترتیب ۶ و ۷ درصد نسبت به خاک‌ورزی مرسوم افزایش داشت (جدول ۲) که با نتایج صفادوست و همکاران (۳۳) و افیونی و مصدقی (۱) همخوانی دارد. گیرس (۱۵) نیز گزارش کرد که در شرایط کشت بی-خاک‌ورزی، تراکم خاک به‌علت افزایش مواد آلی و کاهش تردد ماشین‌های کشاورزی کاهش می‌یابد.

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر خاک‌ورزی بر تخلخل و پایداری خاکدانه‌ها (میانگین وزنی قطر، MWD، و میانگین هندسی قطر، GMD)

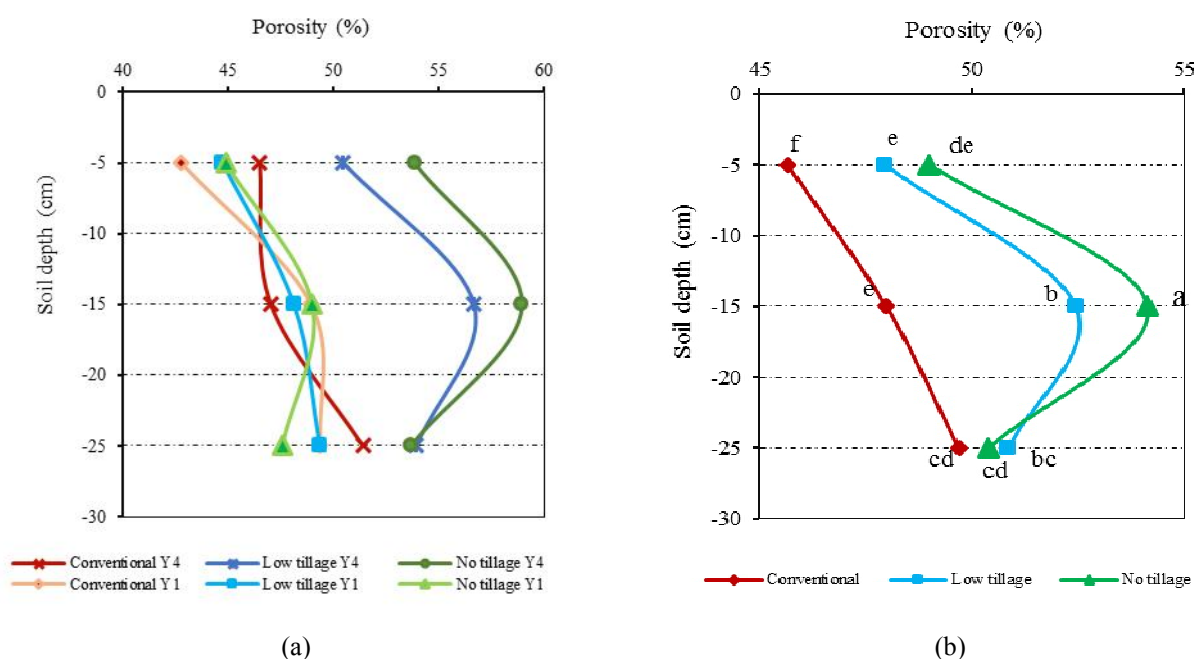
**Table 2.** Mean comparisons of soil porosity and aggregate stability (mean weight diameter, MWD, and geometric mean diameter, GMD) as affected by tillage system

GMD <sub>Wet</sub>	MWD <sub>Dry</sub>	GMD <sub>Dry</sub>	MWD <sub>Wet</sub>	Porosity	Tillage system
----- mm -----				%	
1.29 <sup>b</sup>	3.78 <sup>a</sup>	1.74 <sup>b</sup>	2.02 <sup>b</sup>	47.8 <sup>b</sup>	Conventional tillage
1.67 <sup>ab</sup>	4.01 <sup>a</sup>	1.78 <sup>ab</sup>	2.35 <sup>a</sup>	50.4 <sup>a</sup>	Reduced tillage
1.90 <sup>a</sup>	4.08 <sup>a</sup>	1.83 <sup>a</sup>	2.53 <sup>a</sup>	51.2 <sup>a</sup>	No tillage

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، Porosity: تخلخل، MWD<sub>Wet</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Mean weight diameter in wet sieving)، GMD<sub>Dry</sub>: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک (Geometric mean diameter in dry sieving)، MWD<sub>Dry</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک (Mean weight diameter in dry sieving)، GMD<sub>Wet</sub>: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Geometric mean diameter in wet sieving)



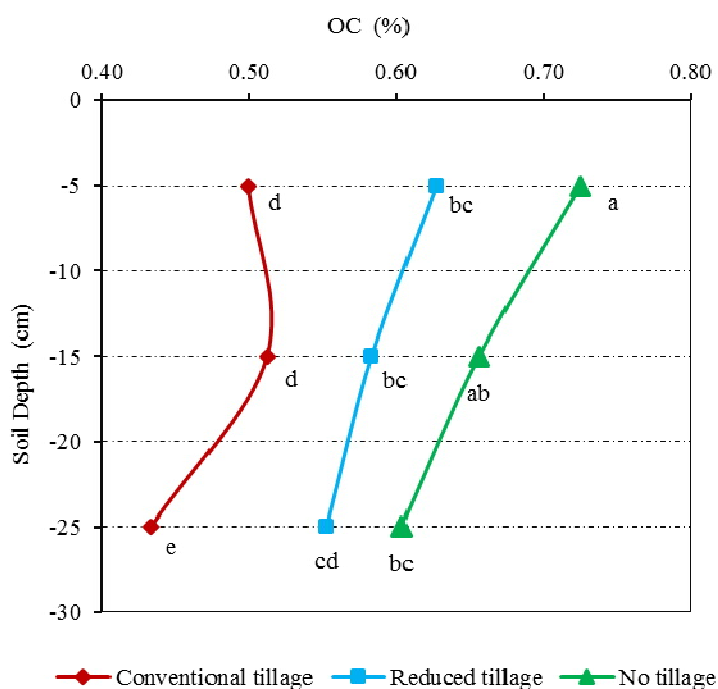
شکل ۱. (a) اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر درصد تخلخل خاک در پایان سال‌های اول و چهارم اجرای آزمایش در سه لایه مختلف خاک، (b) مقایسه میانگین چهارساله اثر برهم‌کنش سیستم خاک‌ورزی و لایه خاک بر درصد تخلخل خاک؛ میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

**Fig. 1. (a)** The effect of tillage systems on the soil porosity at the first and fourth years of the experiment at three different soil layers, (b) mean comparisons of four-years average of the interaction effect of tillage system and soil layer on the soil porosity; numbers with similar letters are not significantly different (LSD,  $p < 0.05$ ).

سانتی متری بیش‌ترین تخلخل (برابر ۵۹ درصد) و در تیمار خاک‌ورزی مرسوم در همین لایه کم‌ترین تخلخل (برابر ۴۷

تخلخل خاک در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی بیش‌تر مشاهده شد به‌گونه‌ای که در تیمار بی‌خاک‌ورزی در لایه ۲۰-۱۰





شکل ۲. اثر برهم‌کنش سیستم خاک‌ورزی و لایه خاک بر درصد کربن آلی (OC); میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Fig. 2. The interaction effect of tillage system and soil layer on the organic carbon content (OC); numbers with similar letters are not significantly different (LSD,  $p < 0.05$ )

مؤثر بود.

با توجه به جدول مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش تیمارهای خاک‌ورزی در سال‌های مختلف آزمایش بر تخلخل خاک (جدول ۴)، میزان تخلخل کل خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی در سال آخر اجرای آزمایش برابر ۵۵/۵ درصد و بیش‌ترین میزان را داشته است. سیلوا و همکاران (۳۴) گزارش دادند تفاوت معنی‌داری بین سامانه‌های خاک‌ورزی از نظر منافذ درشت و ریز خاک وجود دارد. به نظر می‌رسد در درازمدت با افزایش میزان مواد آلی خاک که منجر به افزایش فعالیت بیولوژیک و حجم منافذ خاک می‌شود درصد تخلخل خاک در روش بی‌خاک‌ورزی افزایش یافت. فرارز و همکاران (۱۳) نیز در پژوهشی سه ساله گزارش کردند که در یک خاک لومی، تخلخل درشت تحت سامانه خاک‌ورزی حفاظتی از سامانه خاک‌ورزی مرسوم بیش‌تر بود.

درصد) مشاهده شد (شکل ۱-ب). پیوانلی و همکاران (۲۰۰۶) گزارش دادند که علاوه بر کاهش تردد ماشین‌های کشاورزی در سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم میزان ماده آلی خاک نقش مهمی در افزایش تخلخل خاک دارد. همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود حفظ بقایای گیاهی در تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی نسبت به تیمار خاک‌ورزی مرسوم باعث افزایش ماده آلی در لایه‌های مختلف خاک شد (شکل ۲).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر اصلی زمان بر تخلخل خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است (جدول ۱). میزان تخلخل خاک با گذشت زمان افزایش یافت (جدول ۳). کشت‌های متوالی (سال چهارم نسبت به سال اول در تیمار خاک‌ورزی مرسوم) و نیز اجرای تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی در افزایش میانگین تخلخل خاک در کل تیمارها با گذشت زمان

جدول ۳. مقایسه میانگین مقادیر چگالی ظاهری، تخلخل و پایداری خاکدانه‌های (میانگین وزنی قطر، MWD، و میانگین هندسی قطر، GMD) خاک در چهار سال اجرای آزمایش

**Table 3.** Mean comparisons of soil bulk density, porosity and aggregate stability (mean weight diameter, MWD, and geometric mean diameter, GMD) in four years of the experiment

GMD <sub>Wet</sub>	MWD <sub>Dry</sub>	GMD <sub>Dry</sub>	MWD <sub>Wet</sub>	Porosity	Bulk density	Year
----- mm -----				(%)	(g cm <sup>-3</sup> )	
1.23 <sup>b</sup>	3.39 <sup>b</sup>	1.61 <sup>a</sup>	1.11 <sup>c</sup>	47.2 <sup>b</sup>	1.32 <sup>a</sup>	First
1.42 <sup>b</sup>	3.93 <sup>ab</sup>	1.85 <sup>a</sup>	2.54 <sup>b</sup>	48.1 <sup>b</sup>	1.17 <sup>b</sup>	Second
1.50 <sup>b</sup>	4.15 <sup>ab</sup>	1.82 <sup>a</sup>	2.53 <sup>b</sup>	51.3 <sup>a</sup>	1.14 <sup>b</sup>	Third
2.34 <sup>a</sup>	4.35 <sup>a</sup>	1.86 <sup>a</sup>	3.02 <sup>a</sup>	52.5 <sup>a</sup>	1.12 <sup>b</sup>	Forth

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,  $p < 0.05$ ).

Year: سال، First: نخستین، Second: دومین، Third: سومین، Forth: چهارمین، Bulk density: چگالی ظاهری، Porosity: تخلخل، MWD<sub>Wet</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Mean weight diameter in wet sieving)، GMD<sub>Dry</sub>: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک (Geometric mean diameter in dry sieving)، MWD<sub>Dry</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک (Mean weight diameter in dry sieving)، GMD<sub>Wet</sub>: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Geometric mean diameter in wet sieving).

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش تیمارهای خاک‌ورزی در سال‌های مختلف آزمایش بر تخلخل خاک و پایداری خاکدانه‌ها (میانگین وزنی قطر، MWD، و میانگین هندسی قطر، GMD).

**Table 4.** Mean comparisons of the interaction effect of tillage treatments in different years of the experiment on the soil porosity and stability of aggregates (mean weight diameter, MWD, and geometric mean diameter, GMD).

GMD <sub>Wet</sub>	MWD <sub>Dry</sub>	GMD <sub>Dry</sub>	MWD <sub>Wet</sub>	Porosity	Year	Tillage system
----- mm -----				%		
1.23 <sup>d</sup>	3.40 <sup>b</sup>	1.60 <sup>a</sup>	0.94 <sup>f</sup>	47.0 <sup>c</sup>	First	Conventional tillage
1.29 <sup>d</sup>	3.91 <sup>ab</sup>	1.79 <sup>a</sup>	2.44 <sup>de</sup>	47.5 <sup>c</sup>	Second	
1.16 <sup>d</sup>	3.88 <sup>ab</sup>	1.78 <sup>a</sup>	2.17 <sup>e</sup>	48.3 <sup>c</sup>	Third	
1.48 <sup>cd</sup>	3.91 <sup>ab</sup>	1.79 <sup>a</sup>	2.54 <sup>cde</sup>	48.3 <sup>c</sup>	Forth	
1.23 <sup>d</sup>	3.42 <sup>b</sup>	1.62 <sup>a</sup>	1.17 <sup>f</sup>	47.4 <sup>c</sup>	First	Reduced tillage
1.45 <sup>cd</sup>	3.91 <sup>ab</sup>	1.85 <sup>a</sup>	2.57 <sup>cd</sup>	48.4 <sup>c</sup>	Second	
1.53 <sup>cd</sup>	4.22 <sup>ab</sup>	1.84 <sup>a</sup>	2.55 <sup>cd</sup>	52.2 <sup>b</sup>	Third	
2.48 <sup>b</sup>	4.51 <sup>a</sup>	1.81 <sup>a</sup>	3.12 <sup>ab</sup>	53.7 <sup>ab</sup>	Forth	
1.23 <sup>d</sup>	3.36 <sup>b</sup>	1.59 <sup>a</sup>	1.22 <sup>f</sup>	47.1 <sup>c</sup>	First	No tillage
1.52 <sup>cd</sup>	3.98 <sup>ab</sup>	1.90 <sup>a</sup>	2.61 <sup>cd</sup>	48.5 <sup>c</sup>	Second	
1.79 <sup>c</sup>	4.33 <sup>ab</sup>	1.83 <sup>a</sup>	2.87 <sup>bc</sup>	53.6 <sup>ab</sup>	Third	
3.07 <sup>a</sup>	4.65 <sup>a</sup>	1.98 <sup>a</sup>	3.40 <sup>a</sup>	55.5 <sup>a</sup>	Forth	

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: نخستین، Second: دومین، Third: سومین، Forth: چهارمین، Porosity: تخلخل، MWD<sub>Wet</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Mean weight diameter in wet sieving)، GMD<sub>Dry</sub>: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک (Geometric mean diameter in dry sieving)، MWD<sub>Dry</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک (Mean weight diameter in dry sieving)، GMD<sub>Wet</sub>: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Geometric mean diameter in wet sieving).

## چگالی ظاهری

آثار تیمارهای مختلف خاک‌ورزی و اثر برهم‌کنش روش‌های مختلف خاک‌ورزی و لایه خاک بر چگالی ظاهری خاک معنی‌داری نشد (جدول ۱) که با نتایج بیات و همکاران (۷) و هیل و همکاران (۲۱) هم‌خوانی دارد. نتایج نشان داد اثر زمان بر چگالی ظاهری خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). چگالی ظاهری خاک در پایان سال اول اجرای آزمایش بیش‌تر از سال آخر پس از برداشت بود که به ترتیب برابر ۱/۳۲ و ۱/۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌دست آمد (جدول ۳).

## میانگین وزنی و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها

با توجه به نتایج تجزیه واریانس، خاک‌ورزی بر میانگین وزنی قطر (MWD) و میانگین هندسی قطر (GMD) خاکدانه‌ها تأثیر معنی‌دار داشت (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین (جدول ۲) نشان می‌دهد تیمار بی‌خاک‌ورزی تأثیر چشم‌گیری بر MWD و GMD خاکدانه‌ها داشت، به طوری که بیش‌ترین مقادیر آن‌ها (به روش ال‌ک‌تر) در تیمار بی‌خاک‌ورزی به ترتیب برابر ۲/۵۳ و ۱/۹۰ میلی‌متر و کم‌ترین مقادیر آن‌ها در تیمار خاک‌ورزی مرسوم به ترتیب برابر ۲/۰۲ و ۱/۲۹ میلی‌متر مشاهده شد. تردد ماشین‌های کشاورزی در مزرعه با وارد کردن نیرو به خاکدانه‌ها باعث شکستن شدن آن‌ها شده و در نتیجه باعث افزایش ذرات ریز در خاک می‌شود (۱۹). همچنین مواد آلی خاک با کاهش قابلیت خیس شدن خاک و کاهش شدت نفوذ آب به خاکدانه به‌علت دارا بودن مواد آب‌گریز موجب جلوگیری از فروپاشی خاکدانه‌ها و با افزایش پیوند بین ذرات خاک، پایداری خاکدانه‌ها را افزایش می‌دهد (۱۰). عدم خروج بقایای گیاهی از مزرعه و نیز کاهش اکسیدایون مواد آلی در سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی منجر به پایداری بیش‌تر ساختمان خاک در این تیمارها شد.

یانگ و واندر (۴۰) با بررسی آثار خاک‌ورزی با گاواهن برگردان‌دار و سامانه بی‌خاک‌ورزی بر اندازه و پایداری خاکدانه‌ها مشاهده کردند که در تیمار بی‌خاک‌ورزی، MWD خاکدانه‌ها نسبت به تیمار گاواهن برگردان‌دار بزرگ‌تر است. نتایج نشان داد اثر زمان بر MWD خاکدانه‌ها در سطح یک

درصد معنی‌دار بود. مقدار MWD خاکدانه‌ها در زمان پس از برداشت بیش‌تر از زمان پس از کاشت بوده است. بدین مفهوم که با گذشت زمان پس از انجام عملیات خاک‌ورزی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها افزایش یافته است که دلیل آن افزایش مقدار کربن آلی خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی می‌تواند باشد. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش تیمارهای خاک‌ورزی در سال‌های مختلف بر پایداری خاکدانه‌ها نشان داد که بیش‌ترین MWD خاکدانه‌ها در سال آخر اجرای آزمایش و از تیمار بی‌خاک‌ورزی حاصل شد. حاج‌عباسی و همت (۲۰) گزارش کردند که سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی شامل خاک‌ورزی مرسوم و خاک‌ورزی حفاظتی در سال اول تأثیری بر پایداری خاکدانه نداشتند ولی پس از چهار سال، سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی دارای آثار مثبت و معنی‌دار بر پایداری ساختمان خاک بودند. لال و همکاران (۲۳) نیز گزارش کردند که در تیمار بی‌خاک‌ورزی MWD خاکدانه‌های مقاوم در برابر آب نسبت به سایر روش‌های خاک‌ورزی بیش‌تر بود. در تیمار بی‌خاک‌ورزی به دلیل تردد اندک ماشین‌های کشاورزی، ساختمان خاک بدون تغییر مانده و پایداری خاکدانه‌ها حفظ شده و در نتیجه میانگین وزنی خاکدانه‌ها نسبت به سایر روش‌های خاک‌ورزی بیش‌تر شده است. نتایج مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش لایه‌های خاک در سال‌های مختلف بر پایداری خاکدانه‌ها در جدول (۵) نشان داده شده است. لایه سطحی خاک کم‌ترین پایداری خادانه را نشان داد که احتمالاً به دلیل اکسیداسیون بیش‌تر مواد آلی و کاهش نقش آن‌ها در اتصال ذرات خاک است. همچنین مشاهده می‌شود پایداری خاکدانه‌ها در سال چهارم نسبت به سال اول در همه لایه‌های خاک بیش‌تر است. آلوارز و همکاران (۳) مناسب بودن سامانه بی‌خاک‌ورزی را در افزایش پایداری خاکدانه‌ها در آب گزارش کردند. شرایط آب و هوایی، فعالیت‌های بیولوژیکی و مدیریت خاک را می‌توان از عوامل خارجی مؤثر بر خاکدانه‌های پایدار در آب دانست (۲۹). به‌طور کلی تأثیر افزایش سامانه کشت حفاظتی را می‌توان به عدم انجام شخم متداول و وجود بقایای گیاهی و حفظ ساختار و افزایش

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر برهم کنش لایه خاک در سال‌های مختلف آزمایش بر پایداری خاکدانه‌ها (میانگین وزنی قطر، MWD، و میانگین هندسی قطر، GMD)

**Table 5.** Mean comparisons of the interaction effect of soil layer in different years of the experiment on the stability of soil aggregates (mean weight diameter, MWD, and geometric mean diameter, GMD)

GMD <sub>Dry</sub> (mm)	MWD <sub>Wet</sub>	Year	Soil depth (cm)
1.51 <sup>a</sup>	1.01 <sup>f</sup>	First	0 - 10
1.84 <sup>a</sup>	2.12 <sup>e</sup>	Second	
1.81 <sup>a</sup>	2.32 <sup>de</sup>	Third	
1.85 <sup>a</sup>	2.38 <sup>de</sup>	Forth	
1.63 <sup>a</sup>	1.13 <sup>f</sup>	First	10 - 20
1.86 <sup>a</sup>	2.68 <sup>cd</sup>	Second	
1.81 <sup>a</sup>	2.78 <sup>c</sup>	Third	
1.86 <sup>a</sup>	3.17 <sup>ab</sup>	Forth	
1.68 <sup>a</sup>	1.19 <sup>f</sup>	First	20 - 30
1.84 <sup>a</sup>	2.83 <sup>bc</sup>	Second	
1.83 <sup>a</sup>	2.49 <sup>cde</sup>	Third	
1.87 <sup>a</sup>	3.50 <sup>a</sup>	Forth	

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,  $p < 0.05$ ).

Soil depth: عمق خاک، Year: سال، First: نخستین، Second: دومین، Third: سومین، Forth: چهارمین، MWD<sub>Wet</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Mean weight diameter in wet sieving)، GMD<sub>Dry</sub>: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک (Geometric mean diameter in dry sieving)

کم‌ترین میزان را در بین تیمارهای خاک‌ورزی داشته است که با نتایج پژوهش‌های آروز و ارشد (۴) هم‌خوانی دارد. با توجه به این موضوع که این خاک ریزبافت است، افزایش نفوذپذیری آبی آن می‌تواند جنبه مثبتی برای این خاک باشد.

منحنی‌های نفوذ تجمعی و برازش مدل کوستیاکوف-لوئیس بر آنها در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی به تفکیک سال اجرای آزمایش در شکل (۳) آورده شده است. در هر چهار سال اجرای آزمایش، خاک‌ورزی مرسوم کم‌ترین مقدار نفوذ آب به خاک را داشت. رمضانی و همکاران (۳۰) نشان دادند که با کاهش تردد ماشین‌های خاک‌ورزی در خاک مقدار تخلخل درشت و همچنین سرعت جریان آب در خاک افزایش می‌یابد. لیتچ و الکایسی (۲۵) نشان دادند که خاک‌ورزی به دلیل تخریب منافذ درشت و افزایش منافذ ریز، نفوذ آب به خاک را کاهش می‌دهد.

مقاومت خاکدانه‌ها ربط داد و اثر کاهنده دو سامانه مرسوم را می‌توان به خاک‌ورزی شدید و شکستن ساختار خاکدانه‌ها و کاهش ثبات آن‌ها مربوط دانست (۳۵). توزیع اندازه خاکدانه‌ها و ثبات آن‌ها می‌تواند به طور چشم‌گیری تحت تأثیر نوع خاک-ورزی قرار بگیرد (۳۶). در واقع می‌توان با توجه نتایج به دست آمده رابطه مستقیمی بین شدت خاک‌ورزی و کاهش پایداری خاکدانه‌ها (کاهش MWD و GMD خاکدانه‌ها) عنوان کرد (۹).

#### نفوذپذیری آبی خاک

ضرایب معادله نفوذ بر اساس مدل کوستیاکوف-لوئیس در سه روش خاک‌ورزی در پایان کشت در هر سال در جدول (۶) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقادیر پارامتر A در هر چهار سال اجرای آزمایش در تیمار خاک‌ورزی مرسوم

جدول ۶. پارامترهای بهینه‌شده مدل کوستیاکوف-لوئیس در سه سیستم خاک‌ورزی در چهار سال

**Table 6.** The optimized parameters of Kostiakov-Lewis model in three tillage systems in four years

Conventional tillage	Reduced tillage	No tillage	Unit	Parameter	Year
0.05	0.128	0.609	cm min <sup>-1</sup>	A	First
2.4	4.6	6.0	cm min <sup>b</sup>	K	
0.38	0.53	0.44	-	b	
0.995	0.983	0.994	-	R <sup>2</sup>	
0.05	0.469	0.05	cm min <sup>-1</sup>	A	Second
1.2	5.0	6.1	cm min <sup>b</sup>	K	
0.49	0.34	0.66	-	b	
0.995	0.990	0.996	-	R <sup>2</sup>	
0.05	0.424	0.839	cm min <sup>-1</sup>	A	Third
1.51	8.1	5.0	cm min <sup>b</sup>	K	
0.48	0.47	0.33	-	b	
0.995	0.984	0.991	-	R <sup>2</sup>	
0.06	0.636	0.05	cm min <sup>-1</sup>	A	Forth
2.5	10.4	4.5	cm min <sup>b</sup>	K	
0.29	0.19	0.60	-	b	
0.994	0.991	0.988	-	R <sup>2</sup>	

Year: سال، First: نخستین، Second: دومین، Third: سومین، Forth: چهارمین، Parameter: پارامتر، Unit: واحد، Conventional tillage: خاک‌ورزی مرسوم، Reduced tillage: کم‌خاک‌ورزی، No tillage: بی‌خاک‌ورزی، A: شدت نفوذ نهایی (Final infiltration rate)، K و b: ضرایب تجربی (Empirical coefficients)، R<sup>2</sup>: ضریب تبیین (Coefficient of determination).

جدول ۷. نفوذ تجمعی در ۶۰ دقیقه (I<sub>60</sub>) در سه روش خاک‌ورزی در چهار سال و درصد افزایش آن در دو تیمار خاک‌ورزی حفاظتی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم.

**Table 7.** Cumulative infiltration in 60 minutes (I<sub>60</sub>) in three tillage methods in four years and its increase percentage in two conservational tillage treatments compared to conventional tillage.

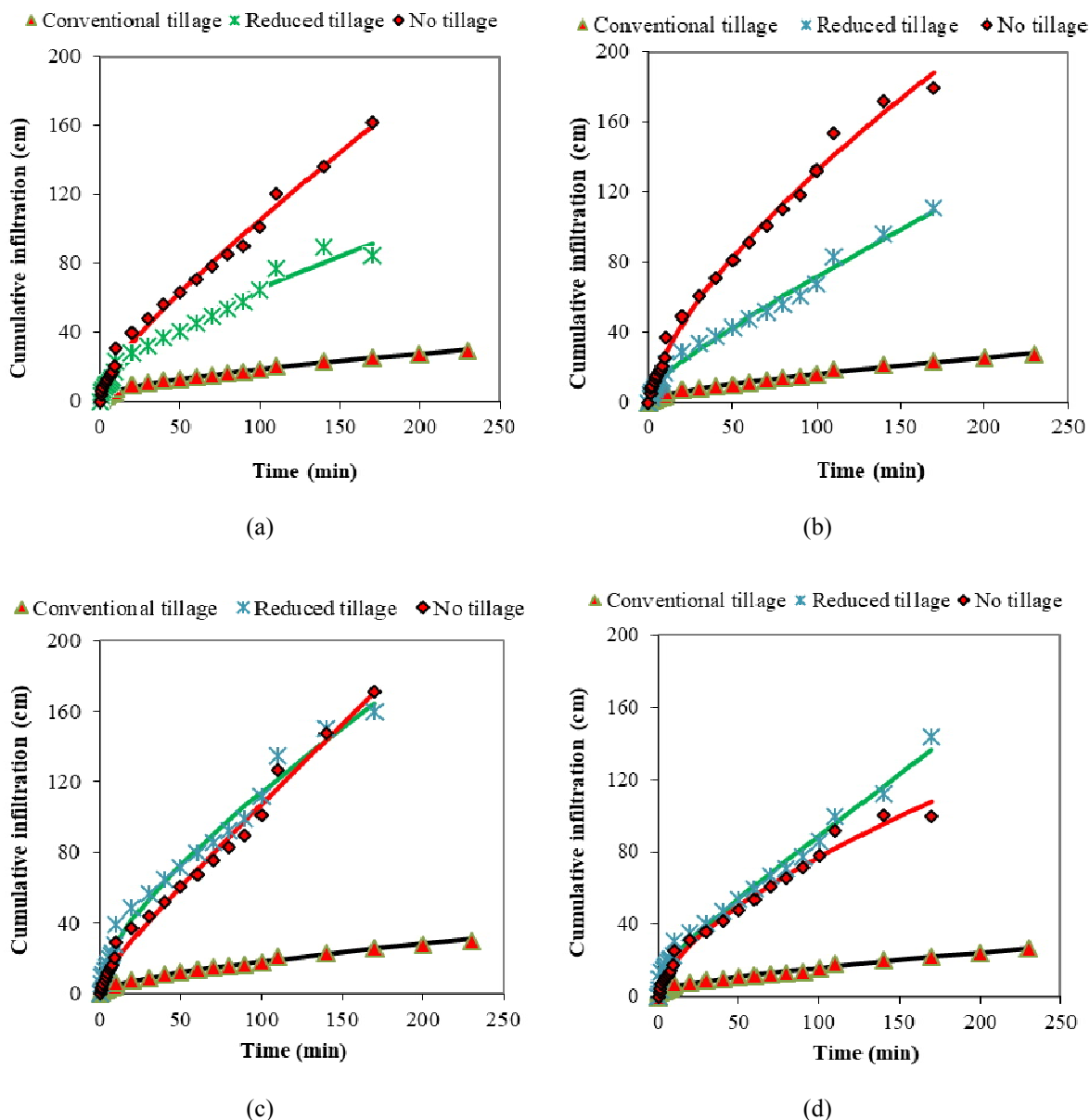
Increase in the I <sub>60</sub> compared to the conventional tillage (%)		I <sub>60</sub> (cm)			Year
No tillage	Reduced tillage	Conventional tillage	Reduced tillage	No tillage	
403	235	14.3	47.9	72.0	First
691	314	11.8	48.8	93.4	Second
426	514	13.3	81.7	70.0	Third
368	410	12.0	61.3	56.2	Forth

Year: سال، First: نخستین، Second: دومین، Third: سومین، Forth: چهارمین، Conventional tillage: خاک‌ورزی مرسوم، Reduced tillage:

کم‌خاک‌ورزی، No tillage: بی‌خاک‌ورزی

در ۶۰ دقیقه بین دو تا بیش از شش برابر نسبت به خاک‌ورزی مرسوم افزایش داشت. پیوستگی منافذ و فعالیت چند ساله جانداران خاکزی مانند کرم‌های خاکی و ایجاد منافذ درشت در

مقادیر نفوذ تجمعی در ۶۰ دقیقه در هر سه روش خاک‌ورزی و نیز درصد افزایش آن در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و بی-خاک‌ورزی در جدول (۷) آورده شده است. مقادیر نفوذ تجمعی



شکل ۳. منحنی‌های نفوذ تجمعی و برازش مدل کوستیاکوف-لوئیس در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی در (a) سال اول، (b) سال دوم، (c) سال سوم، و (d) سال چهارم اجرای آزمایش.

**Fig. 3.** Cumulative infiltration curves and fitting of Kostiakov-Lewis model in different tillage treatments in (a) the first year, (b) the second year, (c) the third year, and (d) the fourth year of the experiment.

چگالی ظاهری همبستگی منفی ( $p < 0.01$ ) داشت گرچه همبستگی معنی‌داری با رسانایی الکتریکی خاک نداشت. چگالی ظاهری خاک با پایداری خاکدانه‌ها و کربن آلی همبستگی منفی ( $p < 0.01$ ) و با رسانایی الکتریکی خاک همبستگی معنی‌داری نداشت. مقادیر MWD و GMD تر و خشک با یکدیگر

خاک، منجر به حرکت سریع‌تر و بیش‌تر آب در منافذ درشت و نهایتاً افزایش نفوذ تجمعی شده است.

بررسی همبستگی بین ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده در این پژوهش (جدول ۸) نشان داد که تغییرات تخلخل خاک با پایداری خاکدانه‌ها و کربن آلی همبستگی مثبت ( $p < 0.01$ ) و با

جدول ۸. همبستگی بین ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده در این پژوهش  
**Table 8.** Correlation between the measured soil properties in this research

OC	EC	MWD <sub>Wet</sub>	GMD <sub>Dry</sub>	MWD <sub>Dry</sub>	GMD <sub>Wet</sub>	BD	Porosity	
							1	Porosity
						1	-0.33**	BD
					1	-0.35**	0.56**	GMD <sub>Wet</sub>
				1	0.61**	-0.49**	0.52**	MWD <sub>Dry</sub>
			1	0.70**	0.52**	-0.58**	0.46**	GMD <sub>Dry</sub>
		1	0.73**	0.62**	0.57**	-0.59**	0.58**	MWD <sub>Wet</sub>
	1	-0.21*	-0.20*	-0.10 <sup>ns</sup>	0.07 <sup>ns</sup>	0.15 <sup>ns</sup>	-0.13 <sup>ns</sup>	EC
1	-0.30 <sup>ns</sup>	0.36**	0.20*	0.37**	0.52**	-0.22*	0.34**	OC

\*\* : معنی دار در سطح ۱٪، \* : معنی دار در سطح ۵٪، <sup>ns</sup> : عدم معنی داری،

\*\* : significant at 1 %, \* : significant at 5 %, <sup>ns</sup> : non-significant

OC: کربن آلی (Organic carbon)، EC: رسانایی الکتریکی (Electrical conductivity)، MWD<sub>Wet</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Mean weight diameter in wet sieving)، GMD<sub>Dry</sub>: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک (Geometric mean diameter in dry sieving)، MWD<sub>Dry</sub>: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک (Mean weight diameter in dry sieving)، GMD<sub>Wet</sub>: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Geometric mean diameter in wet sieving)، BD: چگالی ظاهری (Bulk density)، Porosity: تخلخل.

به گونه‌ای که در سال چهارم بیش‌ترین آثار مثبت مذکور مشاهده شد. به صورت کلی و به همین علت پیشنهاد می‌شود که ترویج کشاورزی حفاظتی در مناطق خشک و نیمه‌خشک و شور انجام شود و این امر در درازمدت می‌تواند از مشکلات ویژه خاک‌های این مناطق بکاهد.

### تشکر و سپاسگزاری

از مؤسسه تحقیقات خاک و آب و نیز معاونت پژوهشی 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.

همبستگی ( $p < 0.01$ ) داشتند و MWD تر و GMD خشک با رسانایی الکتریکی همبستگی منفی ( $p < 0.05$ ) نشان دادند. کربن آلی با MWD تر و خشک و GMD تر ( $p < 0.01$ ) و همچنین با GMD خشک ( $p < 0.05$ ) همبستگی داشت. تغییرات GMD خشک و MWD تر با تغییرات رسانایی الکتریکی همبستگی منفی داشتند.

### نتیجه‌گیری

چهار سال پژوهش در شرایط آب و خاک شور نشان داد که سامانه کم‌خاک‌ورزی و به‌ویژه سامانه بی‌خاک‌ورزی به‌طور معنی‌داری باعث افزایش تخلخل خاک، نفوذ آب به خاک و پایداری خاکدانه‌ها می‌شود. افزایش ماده آلی خاک و کاهش تردد ماشین‌های کشاورزی در مزرعه از مهم‌ترین دلایل این تأثیر مثبت است. این آثار مثبت با گذشت زمان افزایش می‌یابد.

## منابع مورد استفاده

1. Afyuni, M., Mosaddeghi, M.R., 2001. Impact of tillage system on soil physical properties and bromide leaching. *Journal of Water and Soil Sciences* 5(2): 39–53. (In Persian with English abstract)
2. Allmaras, R.R., Dowdy, R.H., 1985. Conservation tillage systems and their adoption in the United States. *Soil and Tillage Research* 5(2): 197–222.
3. Alvarez, R., Steinbach, H.S., 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research* 104: 1–15.
4. Azooz, R.H., Arshad, M.A., Franzluebbers, A.J., 1996. Pore size distribution and hydraulic conductivity affected by tillage in Northwestern Canada. *Soil Science Society of America Journal* 60(4): 1197–1201.
5. Badalíková, B., 2010. Influence of soil tillage on soil compaction. In: Dedousis, A.P., Bartzanas, T. (Eds.), *Soil Engineering*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 19–30.
6. Barzegar, A., 1995. Structural Stability and Mechanical Strength of Salt-affected Soils. PhD Thesis, Adelaide University, Australia.
7. Bayat, H., Mahboubi, A.A., Hajabbasi, M., Mosaddeghi, M.R., 2008. Tillage and tractor effects on bulk density, cone index and structural stability of a sandy loam soil. *Journal of Water and Soil Sciences* 11(42): 451–461. (In Persian with English abstract)
8. Black, G.R., Hartge, K.H., 1989. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2<sup>nd</sup> Edition, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 363–375.
9. Calegari, A., Rheinheimer, D.S., Tourdonnet C.D.S., Tessier, D., Hargrove, W.L., Ralisch, R., Guimar, M.F., Filho, J.T., 2010. Effect of soil management and crop rotation on physical properties in a long term experiment in Southern Brazil. In: 19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia, August 29–32.
10. Chenu, C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D., 2000. Organic matter influence on clay wet ability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 64(4): 1479–1486.
11. De Vita, P., Di Paolo, E., Fecondo, G., Di Fonzo, N., Pisante, M., 2007. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy. *Soil and Tillage Research* 92(1–2): 69–78.
12. Feizi, M., 2016. Effect of irrigation water quality on soil infiltration. In: *Proceedings of the 15<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress*, Esfahan, Iran, pp. 1–5. (In Persian with English abstract)
13. Ferreras, L.A., Costa, J.L., Garcia, F.O., Pecorari, C., 2000. Effects of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern “Pampa” of Argentina. *Soil and Tillage Research* 54: 31–39.
14. Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 399–411.
15. Geerse, T., 2010. Seedbed Preparation in an Organic Minimum Tillage System. MSc. Thesis, Farm Technology Wageningen University, The Netherlands.
16. Green, T.R., Ahuja, L.R., Benjamin, J.G., 2003. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma* 116(1-2): 3–27.
17. Haise, H.R., Donnan, W.W., Phelan, J.T., Lawhon, L.F., Shockley, D.G., 1956. The use of cylinder infiltrometers to determine the intake characteristics of irrigated soils. Publ ARS41 USDA. Agricultural Research Service and Soil Conservation Service. Washington DC.
18. Hajabbasi, M.A., Hemmat, A., Asadi A., 1999. The effect of different tillage methods on some physical properties of soil and some morphological properties of wheat root. In: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress*, Mashhad, Iran. (In Persian with English abstract)
19. Hajabbasi, M.A., Mirlohi, A.F., Sadrarhami, M., 1999. Tillage effects on some physical properties of soil and maize yield in Lavark research farm. *Journal of Water and Soil Sciences* 3(3): 13–24. (In Persian with English abstract)
20. Hajabbasi, M.A., Hemmat, A., 2000. Tillage impacts on aggregate stability and crop productivity in a clay-loam soil in central Iran. *Soil and Tillage Research* 56: 205–212.
21. Hill, R.L., Cruse, R.M., 1985. Tillage effect on bulk density and soil strength of two Mollisols. *Soil Science Society of America Journal* 74: 1270–1273.
22. Júnnyor, W.D.S.G., Maria, I.C.D., Araujo-Junior, C.F., Lima, C.C.D., Vitti, A.C., Figueiredo, G.C., Dechen, S.C.F., 2019. Soil compaction on traffic lane due to soil tillage and sugarcane mechanical harvesting operations. *Scientia Agricola* 76: 509–517.
23. Lal, R., Mahboubi, A., Fausey, N.R., 1994. Long-term tillage and rotation effects on properties of central Ohio soils. *Soil Science Society of America Journal* 58: 517–22.
24. Li, W., Jun, L., Juan, L., Wei-xia, B.A.I., 2014. Effects of tillage rotation and fertilization on soil aggregates and organic carbon content in corn field in Weibei Highland. *National Library of Medicine Ying yong Sheng Tai Xue Bao*



- 25(3): 759–768.
25. Licht, M., Al-Kaisi, M., 2012. Less tillage for more water. Integrated Crop Management News, Iowa State University Extension and Outreach, Department of Agronomy, pp. 1–4.
26. Mazurak, A.P., 1950. Aggregation of inorganic particles in Hesperia sandy loam. *Soil Science Society of America Journal* 14: 28–34.
27. Mokhtar, M., Mossadeghi, M.R., Mahboubi, A.A., 2016. Effect of water quality on unsaturated hydraulic conductivity of two soils with different textures. In: Proceedings of the 15<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress. Esfahan, Iran, pp. 1–7. (In Persian with English abstract)
28. Nimmo, J.R., Perkins, K.S., 2002. Aggregate stability and size distribution. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 4. Physical Methods. Agronomy Monograph, Vol. 9.* ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 317–328.
29. Peng, X., Hallet, P.D., Zhang, B., Horn, R., 2011. Physical response of rigid and non-rigid soils to analogues of biological exudates. *European Journal of Soil Science* 62: 676–684.
30. Ramezani, N., Barzegar, A.R., Sayyad, G., Haghnia, G.H., Mansuri, Y., 2012. Effect of compaction on physical and hydraulic properties of a loamy soil. *Iranian Journal of Soil and Water* 26(1): 214–225. (In Persian with English abstract)
31. Rezaei, M., Asadi, A., 2003. The effect of different tillage methods on the stability of soil particles. In: Proceedings of the 8<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress, August 944–946. (In Persian with English abstract)
32. Rezaei, M., Asadi, A., Mizanzadeh, M., 2012. The residual effect of plant residue management and different methods of corn tillage on the stability of soil aggregates in the barley-corn rotation. In: Conference on Studying The Issues of Tillage and Grain Protection. Karaj, Iran. (In Persian with English abstract)
33. Safadoust, A., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nouroozi, A., Asadian, Gh., 2007. Short-term tillage and manure influences on soil structural properties. *Journal of Water and Soil Sciences* 11(41): 91–101. (In Persian with English abstract)
34. Silva, R.B., Lancas, K.P., Miranda, E.E.V., 2005. Prediction and spatial variability of soil dynamic properties in sugar cane field of Sao Paulo State-Brazil. In: 5<sup>th</sup> European Conference on Precision Agriculture, Uppsala, Sweden, pp. 441–448.
35. Singh Kahlon, M., Lal, R., Varughese, M.A., 2013. Twenty two years of tillage and mulchin impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio. *Soil and Tillage Research* 126: 151–158.
36. Singh, A., Phogat, V.K., Dahiya, R., Batra, S.D., 2014. Impact of long-term zero till wheat on soil physical properties and wheat productivity under rice–wheat cropping system. *Soil and Tillage Research* 140: 98–105.
37. Sorokina, M.N., Thomas, G.W., 1996. Physical characteristics of Kentucky soils with different tillage history. In: Proceedings of 19<sup>th</sup> Conference of Southern Conservation Tillage, The University of Tennessee, July 23–25, pp. 131–137.
38. Tomanian, N., 2013. A detailed soil study of the Kabutarabad Agricultural Research Station. Soil and Water Research Institute, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research Center, pp. 1–73.
39. Van Bavel, C.H.M., 1950. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society of America Journal* 1949(14): 20–23.
40. Yang, X., Wander, M., 1998. Temporal changes in dry aggregate size and stability: tillage and crop effects on a silty loam Mollisol in Illinois. *Soil and Tillage Research* 49: 173–183.
41. Yonsial-Muti, M., Solhjo, A.A., Sharifi, A., Javadi, A., Ashrafi, S.R., Taki, O., 2014. Guide to conservation tillage and its application. First ed., Publication of Agricultural Education. Karaj, Iran.