

اثر سامانه‌های خاک‌ورزی بر خصوصیات تراکمی یک خاک لوم رسی سیلنتی

مهسا کاظمی پور اسفهلان^۱، شجاع قربانی^{۲*}، مسعود تدین نژاد^۳، مجتبی نادری^۴، حسین شیرانی^۵

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹) تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷

چکیده

تراکم خاک یکی از عوامل موثر در کاهش کیفیت فیزیکی خاک است که می‌تواند تحت تأثیر نوع عملیات خاک‌ورزی، رابطه بین آب، خاک و گیاه و عملکرد محصول را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر نوع سامانه خاک‌ورزی بر مشخصه‌های تراکمی یک خاک با بافت لوم رسی سیلنتی انجام گردید. نمونه برداری پس از سه سال خاک‌ورزی پس از برداشت محصول جو صورت پذیرفت. نتایج در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار خاک‌ورزی مرسوم، کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی در ۶ تکرار تحلیل شد. مشخصه‌های تراکمی خاک شامل تنش پیش‌تراکمی، نمایه تراکم و نمایه تورم با آزمون تراکم تک محوری محصور تعیین شد. نتایج نشان داد که نوع سامانه خاک‌ورزی اثر معنی‌دار بر تنش پیش‌تراکمی خاک در سطح احتمال ۵٪ دارد به طوری که کمترین مقدار تنش پیش‌تراکمی با مقدار ۱۹/۹۵ kPa مربوط به تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم و بیشترین مقدار آن با مقدار ۳۱/۶۲ kPa مربوط به تیمار بی‌خاک‌ورزی می‌باشد. نمایه تراکم در تیمار خاک‌ورزی مرسوم نسبت به سایر تیمارها افزایش یافت. بررسی نتایج آزمون بارگذاری سیکلی نشان داد که تیمار بی‌خاک‌ورزی احتمالاً به تردهای متوالی ماشین، حساسیت کمتری داشته ولی این حساسیت در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و مرسوم بیشتر باشد. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان تیمار بی‌خاک‌ورزی را به عنوان یک سامانه خاک‌ورزی با استعداد کمتر در ایجاد فشردگی خاک بیان نمود که البته اجرای مکرر آن نیاز به زیرشکنی در هر چند سال جهت از بین بردن لایه‌های متراکم عمیق خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: خاک‌ورزی، تنش پیش‌تراکمی، نمایه تراکم، بارگذاری سیکلی

کاظمی پور م.، قربانی ش.، تدین نژاد م.، نادری م.، شیراتی ح. ۱۴۰۲. اثر سامانه‌های خاک‌ورزی بر خصوصیات تراکمی یک خاک لوم رسی سیلنتی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۱، شماره ۳. صفحه: ۱۲۱-۱۳۵.

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲- استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۳- استادیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان

۴- دانشیار، گروه مکانیک و بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۵- دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان

*پست الکترونیک: ghorbani-sh@sku.ac.ir

مقدمه

منحنی قابل استخراج است (Keller *et al.*, 2004; Rücknagel *et al.*, 2007; Keller *et al.*, 2011). تنش پیش‌تراکمی و نمایه تراکم معرف مشخصه‌های تراکمی خاک می‌باشند که از طریق رسم لگاریتم تنش قائم در مقابل نسبت پوکی خاک یا کرنش عمودی به دست می‌آیند. بر این اساس می‌توان منحنی تنش-نسبت پوکی را به دو ناحیه مجزا شامل ناحیه تغییر شکل کشسانی^۶ در تنش‌های پایین و ناحیه‌ی خط فشردگی بکر^۷ (VCL) در تنش بالاتر تقسیم کرد. اساساً اگر تنش اعمال شده بر خاک در ناحیه کشسانی باشد پس از باربرداری، تغییر شکل‌های خاک قابل برگشت بوده و اگر تنش در ناحیه VCL باشد باعث تغییر شکل‌های ماندگار (افزایش تراکم) در خاک می‌گردد. نقطه گذار بین ناحیه کشسانی و خط فشردگی بکر به عنوان تنش پیش‌تراکمی (σ_{pc}) شناخته می‌شود. این کمیت بیانگر حد استحکام مکانیکی خاک در تحمل بارگذاری خارجی می‌باشد. قدر مطلق شیب قسمت خطی منحنی فشردگی نمایه تراکم (C_c) نام دارد که بیانگر حساسیت تراکمی خاک در مقابل تنش خارجی می‌باشد. همچنین قدر مطلق شیب ناحیه کشسان به نمایه تورم (C_s) معروف است که بیانگر شدت برگشت پذیری تغییر شکل خاک (الاستیسیته) در ناحیه کشسان (Keller *et al.*, 2011).

مقادیر σ_{pc} برای محدود کردن تنش‌های وارده ناشی از تردد ماشین‌های کشاورزی و همچنین برای مدل‌سازی سامانه‌های مدیریت تردد و خاک‌ورزی و ارزیابی خطر تراکم خاک مورد نیاز است (Alexandrou & Earl, 1995). رامکینز و میلر (Römken & Miller, 1971) بیان کردند که σ_{pc} به عنوان شاخص مناسبی برای تخمین تراکم خاک و رشد ریشه می‌باشد به گونه‌ای که با افزایش σ_{pc} خاک، رشد و تراکم ریشه افزایش می‌یابد. در اثر عملیات خاک‌ورزی مرسوم^۸ به دلیل استفاده زیاد از ادوات خاک‌ورزی، پتانسیل فشردگی و تخریب ساختمان خاک افزایش می‌یابد. قابلیت تراکم خاک و تخریب ساختمان خاک در خاک‌ورزی مرسوم به طور چشم‌گیری بیشتر از خاک‌ورزی حفاظتی^۹ است که علت آن می‌تواند ضعیف‌تر بودن ساختمان و سستی خاکدانه‌ها در

به کاهش حجم منافذ یا افزایش جرم ظاهری خاک تحت تأثیر تنش‌های داخلی و خارجی خاک، تراکم خاک^۱ گفته می‌شود. در تراکم خاک، ابتدا منافذ بزرگ بین خاکدانه‌ای از بین رفته سپس خاکدانه‌ها تخریب شده و حجم منافذ ریز افزایش می‌یابد. تراکم خاک بر عملکرد گیاه و خاک از قبیل جوانه‌زنی بذر، رشد ریشه، عملکرد محصول، نفوذپذیری آب و زهکشی اثر منفی دارد (Fuentes *et al.*, 2004). حساسیت خاک به تراکم، به بافت خاک، شرایط آب و هوایی، تصمیمات مدیریتی (مانند زمان‌بندی عملیات مزرعه‌ای در رطوبت مناسب خاک) و برخی ویژگی‌های دیگر خاک بستگی دارد (Skaalsveen *et al.*, 2019). رفتار تراکمی خاک تحت تأثیر ویژگی‌های خاک مانند بافت و ساختمان خاک، فرآیندهای داخلی همچون سخت‌شدگی خاک نسبت به زمان و فرآیندهای خارجی چون اعمال بار با تردد روی سطح خاک است. همچنین، تراکم‌پذیری خاک تحت تأثیر روش‌های خاک‌ورزی و چگونگی تردد ماشین‌های کشاورزی (بارگذاری خارجی) دچار تغییر می‌شود (Mileusnic *et al.*, 2010).

در اثر عبور ماشین‌های کشاورزی بر روی خاک، مجموعه‌ای از تنش‌های فشاری و برشی بر خاک اعمال می‌شود. همچنین تکرار تردد ماشین در یک مکان باعث افزایش تراکم خاک می‌گردد. برای تعیین درجه تراکم‌پذیری خاک^۲ و حدود تنش مجاز به منظور جلوگیری از تراکم خاک، از شاخص‌های مختلفی از قبیل جرم مخصوص ظاهری خاک (Håkansson, 1988)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Alakukku, 1996)، تغییر در میزان تخلخل (Sohne, 1958)، نسبت پوکی (Koolen, 1974) و تنش پیش‌تراکمی^۳ (Horn, 1988) استفاده شده است. یکی از روش‌های ارزیابی تراکم‌پذیری خاک، استفاده از روابط تنش فشاری-کرنش حجمی حاصل از آزمون تراکم تک محوری محصور است. معمولاً این روابط به صورت نسبت پوکی یا کرنش حجمی در برابر لگاریتم تنش فشاری قائم نشان داده می‌شود (شکل ۱). کمیت‌های مکانیکی مانند تنش پیش‌تراکمی (σ_{pc})، نمایه تراکم^۴ (C_c) و نمایه تورم^۵ (C_s) از این

6. Elastic deformation
7. Virgin compression line
8. Conventional-Tillage
9. Conservation-Tillage

1. Soil compaction
2. Degree of compressibility
3. Precompaction stress
4. Compression index
5. Swelling index

خاک و پایداری مکانیکی آن می‌تواند تغییر کند. تعیین تراکم‌پذیری خاک، نیازمند شاخصی است که مقدار تغییر در ویژگی‌های خاک را نشان دهد. هر چند تنش پیش‌تراکمی به عنوان معیار تعیین کننده محدوده بارگذاری کشسان خاک جهت پیشگیری از افزایش تراکم خاک مورد توجه قرار گرفته است، با این حال با اعمال بارگذاری سیکلی در مقادیر کمتر از تنش پیش‌تراکم، باز هم تغییر شکل‌های ماندگار در خاک اتفاق می‌افتد که این رفتار می‌تواند در ساختمان‌های مختلف خاک (بسته به سامانه خاک‌ورزی تحت اجرا در چندین سال) متفاوت باشد. با توجه به اینکه بررسی حساسیت تراکمی خاک تحت بارگذاری سیکلی (تکرار تردد) در اراضی شور و خشک منطقه اصفهان و تحت سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی مورد مطالعه قرار نگرفته است، هدف از این پژوهش ارزیابی مشخصه‌های تراکم‌پذیری خاک (شامل تنش پیش‌تراکمی، نمایه تراکم و نمایه تورم) و بررسی حساسیت تراکمی خاک تحت بارگذاری سیکلی در سامانه‌های خاک‌ورزی مرسوم، کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی در خاک‌های شور منطقه اصفهان (ایستگاه تحقیقات شوری کبوترآباد) بود. نتایج این مطالعه می‌تواند در مدیریت مناسب و پایدار خاک جهت جلوگیری از افزایش تراکم در حین تردد ماشین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

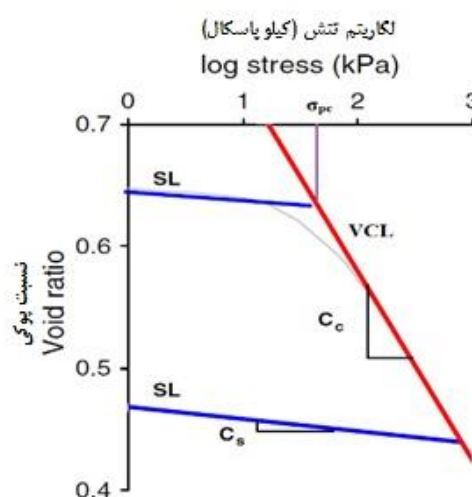
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و مشخصات خاک

این مطالعه در ایستگاه تحقیقاتی کبوترآباد در جنوب شرقی شهرستان اصفهان انجام شد. مختصات جغرافیایی مکان آزمایش شامل عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۰ دقیقه و ۲۹/۹۸ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۵۰ دقیقه و ۴/۱۳ ثانیه شرقی و ارتفاع ۱۵۴۴ متر از سطح دریا می‌باشد.

خاک منطقه مورد مطالعه از نظر تیپ اراضی بر روی تراس آبرفتی اول رودخانه زاینده رود تشکیل شده و تکامل یافته است. سری غالب خاک Fine, Mixed, Typic Calciargids (Calcisols FAO) می‌باشد. این سری خاک از سری‌های غالب طبقه‌بندی شده II خاک‌های مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران است.

خاک‌ورزی مرسوم باشد (Pytko, 2001). چاپلین و همکاران (Chaplain *et al.*, 2011) طی مطالعه‌ای در مورد تأثیر سامانه خاک‌ورزی بر جرم مخصوص ظاهری و مقاومت مکانیکی در خاک سیلنتی در دانمارک دریافتند که تیمار بی‌خاک‌ورزی^۱ مقاومت مکانیکی بالاتری در برابر تراکم دارد که دلیل آن افزایش مقادیر تنش پیش‌تراکمی در رطوبت نزدیک به اشباع و کاهش تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر ساختمان خاک است.



شکل ۱- منحنی تراکم خاک که نسبت پوکی در برابر لگاریتم تنش را نشان می‌دهد. σ_{pc} ، VCL ، C_c و C_s به ترتیب نشانگر خط فشردگی بکر، تنش پیش‌تراکمی، نمایه تورم و نمایه تراکم می‌باشند (Tang *et al.*, 2009).

Figure 1. Soil compression curve that shows the void ratio versus log stress. VCL , σ_{pc} , C_s and C_c are: Virgin compression line, Pre-compression stress, Swelling index and Compression index respectively (Tang *et al.*, 2009).

با توجه به اینکه عملیات خاک‌ورزی حفاظتی، تأثیر زیادی بر ساختمان خاک دارد و مقاومت مکانیکی خاک را بهبود می‌بخشد، در دهه‌های اخیر به عنوان جایگزینی مناسب برای عملیات خاک‌ورزی مرسوم مورد توجه ویژه قرار گرفته است. از دیگر سو، برای دستیابی به کشاورزی پایدار، حفظ پایداری ساختمان خاک در برابر تنش‌های وارده ضروری است. تنش‌های ناشی از تردد ماشین‌های کشاورزی عامل اساسی در ایجاد تراکم خاک می‌باشد که تأثیر آن بر خاک بر اساس نوع سامانه خاک‌ورزی می‌تواند متفاوت باشد چرا که تحت اجرای سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی، ساختمان

تیمارهای خاک‌ورزی و نمونه برداری

خاک روئین^۱ جهت کاهش تعداد نمونه‌برداری مدنظر قرار گرفت.

برای انجام آزمون‌های تراکم و اندازه‌گیری خصوصیات مرتبط با تراکم‌پذیری خاک، نمونه‌های استوانه‌ای دست نخورده از خاک مزرعه از عمق ۲۰-۱۰ سانتی‌متر با سیلندرهای فولادی با قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر برداشت شدند. جداول (۱) و (۲) برخی خصوصیات اندازه‌گیری شده خاک مورد مطالعه را قبل و بعد از اعمال تیمارها نشان می‌دهند. بافت خاک مورد مطالعه در محدوده بافتی لوم رسی سیلتی قرار داشت.

بخش‌های مختلف زمین مورد مطالعه به مدت سه سال متوالی (۱۳۹۷-۱۴۰۰) تحت تیمارهای مختلف خاک‌ورزی (خاک‌ورزی مرسوم، کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی) قرار گرفت. در هر سه سال زراعی، مزرعه تحت تناوب زراعی و الگوی کشت گلرنگ- جو قرار داشت. نمونه‌برداری از خاک در سومین سال زراعی در خرداد ماه ۱۴۰۰ پس از برداشت جو انجام شد. با توجه به هدف این مطالعه که مقایسه خصوصیات فیزیکی و رفتار تراکمی تحت تیمارهای مختلف خاک‌ورزی بود، لایه ۲۰-۱۰ سانتی‌متر به عنوان لایه میانی

جدول ۱- مشخصات بافت خاک مورد مطالعه

Table 1. Properties of studied soil

Depth (cm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	pH	EC (dS.m ⁻¹)	OC (%)	Bd (Mg.m ⁻³)
10-20	20	49	31	7.4	6.2	0.49	1.23

جدول ۲- برخی خصوصیات خاک مورد مطالعه بعد از اعمال تیمارها

Table 2. Some properties of studied soil after applying treatments

Type of tillage	pH	EC (dS.m ⁻¹)	OC (%)
Conventional-tillage	7.38	6.54	0.73
Minimum-tillage	7.44	6.71	0.62
No-tillage	7.42	5.73	0.58

کم‌خاک‌ورزی با حفظ ۳۰٪ از بقایا، فقط از گاو آهن قلمی^۴ با عمق ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد و پس از آن کاشت با یک بذرکار- خطی‌کار- کودکار آمزون (Direct seed-) انجام شد. در قطعه بی‌خاک‌ورزی هیچ‌گونه عملیات خاک‌ورزی بر روی زمین اجرا نشد. در این قطعه 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 آمزون انجام شد (جدول ۳).

طرح آماری مورد آزمایش

این پژوهش در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی^۲ با سه تیمار خاک‌ورزی مرسوم، کم‌خاک‌ورزی و بی-خاک‌ورزی با ۶ تکرار در بافت خاک لوم رسی سیلتی در تناوب گلرنگ-جو، با متوسط مواد آلی ۰/۵۹ درصد در رطوبتی حجمی معادل ۱۶-۱۴ درصد اجرا شد. روش آبیاری به صورت نواری و دور و حجم آب آبیاری در تمامی تیمارها یکسان بود. کل حجم آب مصرفی حدود ۷ هزار مترمکعب در هکتار طی دوره رشد جو محاسبه گردید. در قطعه خاک‌ورزی مرسوم، بقایای خرد شده جو توسط ساقه خردکن^۳، با گاو آهن برگردان‌دار در خاک مدفون شد. برای آماده سازی زمین از شخم برگردان‌دار تا عمق ۲۵ سانتی-متری با دو مرحله دیسک متقاطع استفاده شد. اما در قطعه

2. Stalk shredder
3. Chisel Piller

1- Top soil
1. Randomized complete block design

جدول ۳- مشخصات ادوات خاک‌ورزی مورد استفاده در آزمایش

Table3. Characteristics of tillage implements used

Tillage implements	Characteristics
Direct seed-fertilizer Amazone, NT 250, Germany	Amazone (NT,250) direct seed-fertilizer, Tine type opener, Inter-row space 15 cm, and 2.5 meters wide, work depth 2-7cm
Chisel plow	Mounted, 9 stem, width share 7 cm, work width 8-10 cm
Stalk shredder	Mounted, vertical share, work width 18 cm
Moldboard plow	Mounted, 3 Bottom with a 35 cm, work width 25-30 cm

بارگذاری گام به گام در سطوح تنش ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰، ۱۶۰، ۳۲۰، ۶۴۰ کیلو پاسکال قرار گرفتند. زمان تاخیر در انتهای هر گام سه دقیقه در نظر گرفته شد تا اجازه خروج آب از نمونه‌ها در حین آزمون داده شده و از افزایش فشار آب مغذی جلوگیری شود. پس از آزمون، منحنی لگاریتم تنش-نسبت پوکی برای هر نمونه تهیه شد و از آن مشخصه‌های تراکمی استخراج شدند.

آزمون بارگذاری سیکلی ثابت

از نمونه‌های دست نخورده مزرعه‌ای برای انجام آزمون‌های بارگذاری تکراری نیز استفاده شد. برای این منظور هر نمونه تحت بارگذاری-باربرداری تکراری (در ۱۰ سیکل متوالی) قرار گرفت. سطح تنش اعمالی در این آزمون ۵۰٪ تنش پیش‌تراکمی تعیین شده از آزمون محصور بود. علت انتخاب این سطح از تنش در آزمون بارگذاری تکراری بررسی حساسیت تراکمی خاک در ناحیه کشسان (کوچک‌تر از تنش پیش‌تراکمی) بود. از آزمون بارگذاری تکراری می‌توان یک ارزیابی از حساسیت تراکمی خاک در تکرار تردد ماشین انجام داد. همچنین می‌توان دریافت که حتی با اعمال تنش در محدوده‌ای کمتر از تنش پیش‌تراکمی، تا چه حد امکان افزایش تراکم (تغییر شکل‌های برگشت ناپذیر) می‌تواند وجود داشته باشد (Keller et al., 2012).

روش تخمین تنش پیش‌تراکمی از خاک

به منظور تعیین مشخصه تنش پیش‌تراکمی از منحنی‌های برازش شده بر نسبت پوکی-لگاریتم تنش مربوط به آزمایش CCT از مدل رایانه‌ای نوشته شده در برنامه Matlab, 2015a بر اساس روش داویدسکی و کولن (Dawidowski & Koolen, 1994) استفاده شد. در ابتدا تابع گمپرتز (۱۸۲۵) مطابق رابطه (۱) با استفاده از نرم افزار Matlab, 2015a بر داده‌های بارگذاری منحنی تراکم محصور برازش شد و پارامترهای a ، b ، c ، m به دست آمدند (Keller et al., 2011):

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos et al., 1962) و قرائت غلظت سوسپانسیون در ۱۴ زمان و جداسازی شن با الک انجام شد. کلاس بافت خاک با استفاده از مثلث بافت خاک به روش آمریکایی (شن: ۲-۰/۰۵، سیلت: ۰/۰۵-۰/۰۲ و رس: ۰/۰۲ < میلی‌متر) تعیین شد. جرم مخصوص ظاهری (ρ_b) نمونه‌ها با روش برداشت نمونه دست نخورده با استفاده از استوانه‌هایی به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر مربع تعیین گردید (Black, 1986 & Hartge). برای اندازه‌گیری سریع رطوبت خاک و جلوگیری از حفاری خاک از اعماق ۲۰-۱۰ سانتی‌متری در زمان عملیات خاک‌ورزی از دستگاه رطوبت‌سنج (Moisture Meter, SM01, Iran) استفاده شد. با قرار گرفتن حسگر دستگاه در عمق مورد نظر در زمان چند دقیقه رطوبت وزنی خاک در حافظه داخلی دستگاه ثبت و ذخیره شد.

اندازه‌گیری شاخص‌های استحکام مکانیکی و تراکمی خاک

آزمایش فشردگی محصور^۱ (CCT)

مشخصه‌های تراکمی خاک (تنش پیش‌تراکمی، نمایه تراکم C_c و نمایه تورم C_s) با آزمون فشردگی تک محوری محصور با دستگاه کشش و فشار (SANTAM, STM20, Iran) اندازه‌گیری شد. از آنجا که رفتار تراکمی خاک و تنش پیش‌تراکمی اساساً تابعی از پتانسیل آبی خاک است (Schjønning & Lamande, 2018) و چون با برداشت نمونه‌های دست نخورده از مکان‌های مختلف مزرعه، تغییرات رطوبت و جرم مخصوص ظاهری در نمونه‌ها وجود دارد، به منظور قیاس نمونه‌ها از نظر رفتار و مقاومت تراکمی، میزان رطوبت تمامی نمونه‌ها پس از اشباع شدن در مکش ۱۰۰ هکتوپاسکال متعادل شد. سپس نمونه‌ها تحت آزمون تک‌محوری محصور (همراه با سیلندر) تحت

4. Confined compression test

و نقطه عطف از روش مشتق‌گیری استفاده گردید. با استفاده از ضرایب معادلات برازش شده، معادلات با دستور "syms" به صورت پارامتری بیان شدند. در ادامه با استفاده از دستور diff مشتق اول و با دوبار اجرای این دستور مشتق دوم توابع برازش شده (به صورت پارامتری) محاسبه شدند. با استفاده از نقطه انحنای بیشینه و محاسبه شیب خط مماس بر نقطه مزبور، خط مماس بر این نقطه برای تابع محاسبه شد. در انتهای برنامه نیز مقادیر R^2 ، R^2_{adj} ، $RMSE$ برازش تابع گمپرتز جهت ارزیابی کیفیت برازش به دست آمد.

تجزیه و تحلیل آماری

برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌های حاصل از این پژوهش از آنالیز واریانس در اندازه‌گیری‌های مکرر ۱ و برای مقایسه میانگین از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. برای تجزیه آماری از نرم افزار STATISTICA.8 و برای رسم نمودارها از نرم افزار EXCEL استفاده شد.

نتایج و بحث

میزان رطوبت به دست آمده بین تیمارهای مورد مطالعه نشان می‌دهد که نوع خاک‌ورزی اثر معنی‌داری بر میزان رطوبت خاک در سطح احتمال ۵ درصد داشته است (جدول ۴). جدول (۵) نتایج مقایسه میانگین شاخص‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده آن است که میزان رطوبت خاک در تیمار خاک‌ورزی مرسوم نسبت به کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی بیشتر است.

$$e = a + c \exp \{- \exp [b (\log \sigma - m)]\} \quad (1)$$

در معادله فوق a ، b ، c و m پارامترهای برازشی هستند، e نسبت پوکی ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) و σ نیز بیان‌گر تنش (kPa) است. این تابع به شکلی است که مجانب افقی آن در حد بالای تنش نشان دهنده‌ی بیشینه‌ی تراکم قابل دستیابی در یک خاک می‌باشد. تنش پیش‌تراکمی تنش متناظر با نقطه بیشینه انحنای تابع گمپرتز در نظر گرفته شد (Gregory *et al.*, 2006). برای یافتن نقطه بیشینه انحنای از مشتق دوم تابع گمپرتز (معادله ۲) استفاده شد:

$$\frac{de}{d(\log \sigma)} = [b^2 c \exp(b(\log \sigma) - m)] * [\exp(b(\log \sigma) - m) - 1] \quad (2)$$

که با استفاده از مشتق دوم، تابع انحنای با رابطه ۳ محاسبه شد:

$$K = \frac{d^2 e / d(\log \sigma)^2}{[1 + (\frac{de}{d(\log \sigma)})^2]^{3/2}} \quad (3)$$

برای یافتن نقطه بیشینه انحنای، اکسترمم رابطه ۳ محاسبه (معادله ۴) و تنش متناظر آن به عنوان تنش پیش‌تراکمی تعیین شد:

$$\frac{dx}{d \log \sigma} = 0 \quad (4)$$

برای اجرای مراحل فوق، در ابتدا داده‌های لگاریتم تنش-نسبت پوکی هر نمونه خاک ذخیره شده در فایل اکسل با استفاده از دستور "xlsread" به برنامه نوشته شده در مطلب فراخوانده شد. در ابتدا با مقادیر اولیه فرضی برای پارامترها، تابع گمپرتز تا یافتن حداقل خطای برازش آزمون شد و پس از همگرایی پارامترها، با محاسبه تابع انحنای (رابطه ۳)، نقطه بیشینه انحنای مشخص شد. برای تعیین نقطه انحنای بیشینه

جدول ۴- جدول تجزیه واریانس پارامترهای مورد مطالعه

Table 4. Analysis Variance of studied Parameters

Source of variation	Degree of freedom	Mean square					
		Θ_m (%)	Bd (Mg.m^{-3})	OC (%)	σ_{pc} (kPa)	C_s	C_c
Tillage types	2	17.803*	0.00398*	0.0192	102.783*	0.003092 ^{ns}	0.010301*
Block	5	0.0967	0.000065	0.01186	0.119	0.0006904	0.000282
Error	10	0.086	0.00007	0.007	0.009	0.00763	0.000831

* معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ^{ns}: غیرمعنی‌دار

* The mean difference is significant at the 5% level, ns is non-significant.

Θ_m : Soil moisture, Bd: Bulk density, OC: Organic matter, σ_{pc} : Precompression stress, C_s : Swelling index, C_c : Compression index

نمود بهتر آب به لایه‌های زیرین خاک می‌باشد. در خاک-ورزی مرسوم به دلیل خرد شدن بیشتر خاکدانه‌ها به وسیله

افزایش درصد رطوبت خاک در عمق ۲۰-۱۰ سانتی‌متر در تیمار خاک‌ورزی مرسوم به دلیل درصد تخلخل بیشتر و

میکرومتر) در ۲۵ سانتی متری خاک سطحی در خاک‌ورزی مرسوم، نسبت به خاکی که به صورت بدون خاک‌ورزی کشت گردیده بیشتر است (رینالدو و همکاران، ۱۹۹۴). همچنین، سیلوا و همکاران (Silva et al., 2005) گزارش دادند تفاوت معنی‌داری بین نوع سامانه خاک‌ورزی از نظر منافذ درشت و ریز خاک وجود دارد. روزبرگ و مک‌کوی (Roseberg. & McCoy, 1992) نیز دریافتند که خاک-ورزی مرسوم تخلخل کل خاک را افزایش می‌دهد.

گاوآهن برگردان‌دار، تخلخل کل و حجم منافذ ریز خاک افزایش می‌یابد. لذا، از آنجایی که منافذ ریز خاک مسوول نگهداری آب هستند، رطوبت خاک در تیمار خاک‌ورزی مرسوم بیشتر از سایر تیمارها شده است. همچنین، در روش خاک‌ورزی مرسوم به علت پایین بودن جرم مخصوص ظاهری و بیشتر بودن تخلخل خاک، ظرفیت نگهداری آب بیشتر بوده و بالطبع حجم بیشتری از آب را در خود جای می‌دهد.

رینالدو و همکاران (Reynaldo et al., 1994) دریافتند که تخلخل کل و منافذ انتقال دهنده آب (بزرگتر از ۵۰

جدول ۵- مقایسه میانگین پارامترهای اندازه‌گیری شده تحت تأثیر سامانه خاک‌ورزی

Table 5. Mean comparison of the measured characteristics under tillage systems

Type of tillage	Θ_m (%)	Bd ($Mg.m^{-3}$)	OC (%)	σ_{pc} (kPa)	C_s	C_c
Conventional-tillage	26.27a	1.15c	0.73a	19.95c	0.080a	0.386a
Minimum-tillage	23.15b	1.17b	0.62a	25.11b	0.088a	0.324b
No-tillage	21.47c	1.22a	0.58a	31.62a	0.106a	0.271c

میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک دارند با هم اختلاف معنی‌داری ندارند.

The means with a common letter are not significantly difference.

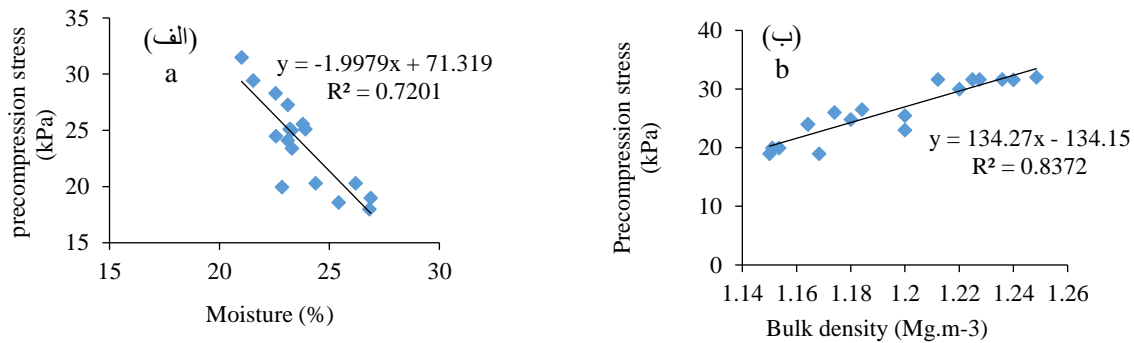
σ_{pc} در تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی بیشتر از تیمار خاک-ورزی مرسوم بود (جدول ۴). انجام خاک‌ورزی عمیق در سامانه خاک‌ورزی مرسوم سبب تخریب دائمی خاکدانه‌های پایدار شده که متعاقباً مقاومت مکانیکی خاک را کاهش می‌دهد (Wiermann et al., 2000). در سامانه خاک‌ورزی مرسوم به دلیل به هم خوردن دائمی خاک حساسیت آن به تراکم زیاد و σ_{pc} کم می‌شود (Horn et al., 1994). خاک شخم نخورده به دلیل تشکیل خاکدانه‌های پایدار و پیوستگی خلل و فرج تا عمق بیشتر، مقاومت تحمل بار بیشتری دارد (Horn, 1988).

با کاهش رطوبت خاک، تنش پیش‌تراکمی افزایش و در نتیجه خطر تراکم کاهش می‌یابد. افزایش مقدار رطوبت خاک موجب کاهش نیروهای نگهدارنده ذرات خاک شده و ظرفیت تحمل بار خاک را کاهش می‌دهد (شکل ۲ الف). در رطوبت‌های بالا، آب بین ذرات نیروی اصطکاک بین ذرات را کاهش داده و سبب کاهش نیروی چسبندگی توسط ذرات خاک شده، لذا حرکت ذرات را نسبت به هم بیشتر نموده و تراکم‌پذیری خاک را افزایش می‌دهد (Ghuman & Lal, 1992). وینهوف و مک‌براید (Veenhof & McBride, 1996) گزارش دادند که σ_{pc} به طور معنی‌دار و

اثر خاک‌ورزی بر جرم مخصوص ظاهری در عمق ۲۰-۱۰ سانتی‌متری در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). بیشترین میزان جرم مخصوص ظاهری مربوط به تیمار بی‌خاک‌ورزی می‌باشد (جدول ۵). علت افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک در روش بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با سایر روش‌های خاک‌ورزی این است که در روش بی‌خاک-ورزی فقط در زمان کاشت، در لایه سطحی خاک تا عمق قرار گرفتن بذر شکافی ایجاد شده و اعماق پایین‌تر از عمق کاشت دست نخورده باقی می‌ماند، همچنین در طی چندین سال متوالی بر روی مزرعه تردد ماشین انجام می‌شود که متعاقباً جرم مخصوص ظاهری افزایش می‌یابد. حداقل اختلاط خاک و در عین حال عبور ماشین‌های کشاورزی باعث افزایش این خصوصیت در تیمار بی‌خاک‌ورزی می‌گردد (Afzalnia et al., 2011). نتایج بررسی محققین نشان داد که بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با گاوآهن برگردان-دار باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری و مقاومت خاک و کاهش درصد تخلخل می‌شود (Cassel et al., 1995; Logsdion et al., 1999). تجزیه آماری وجود اختلاف معنی‌دار نوع سامانه خاک‌ورزی بر تنش پیش‌تراکمی در سطح احتمال ۵ درصد را نشان می‌دهد (جدول ۵). مقادیر

اصطکاکی بیشتری بین آن‌ها است. بنابراین، جابجایی و آرایش مجدد ذرات جامد به موقعیت اولیه با افزایش جرم ظاهری خاک دشوارتر می‌شود (Paz & Gue Rif, 2000). در این مطالعه به منظور تعدیل اثر جرم مخصوص ظاهری خاک بر σ_{pc} از شاخص نسبت σ_{pc} تقسیم بر جرم مخصوص ظاهری جهت مقایسه استفاده گردید. این شاخص می‌تواند بعنوان یک شاخص نرمال شده نسبت به جرم مخصوص ظاهری اولیه خاک مورد مقایسه قرار گیرد مقادیر میانگین این شاخص برای خاک‌ورزی مرسوم، کم خاک‌ورزی و بی-خاک‌ورزی به ترتیب ۱۷/۳۵، ۲۱/۴۶ و ۲۵/۹۲ کیلوپاسکال بدست آمد که نشان دهنده پایداری مکانیکی بیشتر خاک در سامانه بی‌خاک‌ورزی می‌باشد.

لگاریتمی دارای همبستگی منفی با رطوبت خاک است. مصدقی و همکاران (Mosaddeghi *et al.*, 2006) در بررسی رابطه بین σ_{pc} و محتوای رطوبتی خاک، دریافتند که رابطه معکوس و معنی‌دار بین σ_{pc} و رطوبت خاک وجود دارد. رفتار تراکمی خاک و تغییرات σ_{pc} تابعی از پتانسیل آبی خاک و جرم مخصوص ظاهری آن می‌باشد (Lamande, 2018): به طوری که σ_{pc} با افزایش جرم مخصوص ظاهری، روند افزایشی نشان داد (شکل ۲ ب). اساساً تغییر شکل زمانی اتفاق می‌افتد که برخی ذرات خاک قادر به جدا شدن و حرکت در ارتباط با یکدیگر باشند. این جابجایی توسط نیروهای اصطکاکی و پیوندهای موجود بین ذرات محدود می‌شود. خاک متراکم، فضای منفذی قابل دسترس کمتری برای جابجایی ذرات دارد و نیروهای



شکل ۲- تنش پیش تراکمی تابعی از (الف) رطوبت و (ب) جرم مخصوص ظاهری
Figure 2. Pre-compression stress as a function of Moisture (a) and Bulk density (b)

(Ekwue *et al.*, 2014). از طرفی مقدار ماده‌ی آلی خاک تفاوت معنی‌داری در تیمارهای خاک‌ورزی نداشت. ماده آلی به سبب خاصیت ارتجاعی از انتقال تنش‌ها به خاک زیر سطحی جلوگیری می‌کند و موجب برگشت‌پذیری تراکم خاک پس از تردد ماشین می‌شود (O'Sullivan, 1992). سوان (Soane, 1990) تأثیر مثبت مواد آلی بر مقاومت به تراکم خاک را تشریح نمود. وی دریافت که ماده آلی ممکن است موجب افزایش مقاومت به تراکم (کاهش نمایه تراکم) و افزایش قابلیت ارتجاعی خاک در برابر تنش‌های مکانیکی (افزایش نمایه تورم) شود. ولی به نظر می‌رسد که تأثیر ماده آلی بر تراکم‌پذیری خاک بستگی به رطوبت خاک در زمان اعمال بار نیز دارد (Soane, 1990). مقاومت برشی خاک با افزایش مقدار رطوبت کاهش می‌یابد اما تغییر آن با مقدار ماده آلی در همه خاک‌ها یکسان نیست (Ekwue *et al.*,

نتایج نشان داد که تغییر سامانه خاک‌ورزی بر نمایه تورم تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۴). برای تیمار مرسوم نمایه تراکم در مقایسه با سایر تیمارها بزرگتر می‌باشد که نشان دهنده حساسیت بیشتر این خاک به تراکم‌پذیری می‌باشد. فاکتورهایی همچون بافت، میزان رطوبت، جرم مخصوص ظاهری، ماده آلی و نوع سامانه خاک‌ورزی بر مقاومت خاک به تراکم اثر می‌گذارند (Hamza & Anderson, 2005). رطوبت خاک مهمترین فاکتور تأثیرگذار بر تراکم خاک است. افزایش رطوبت خاک موجب کاهش ظرفیت تحمل بار خاک می‌شود (Lipiec *et al.*, 2005). با توجه به نتایج، ویژگی‌های مکانیکی خاک و نمایه تراکم بیشتر تحت تأثیر شرایط رطوبتی خاک می‌باشند. نمایه تراکم به شدت متأثر از میزان رطوبت خاک است به طوری که کاهش رطوبت، تنش پیش تراکمی را افزایش و نمایه تراکم (C_c) را کاهش می‌دهد

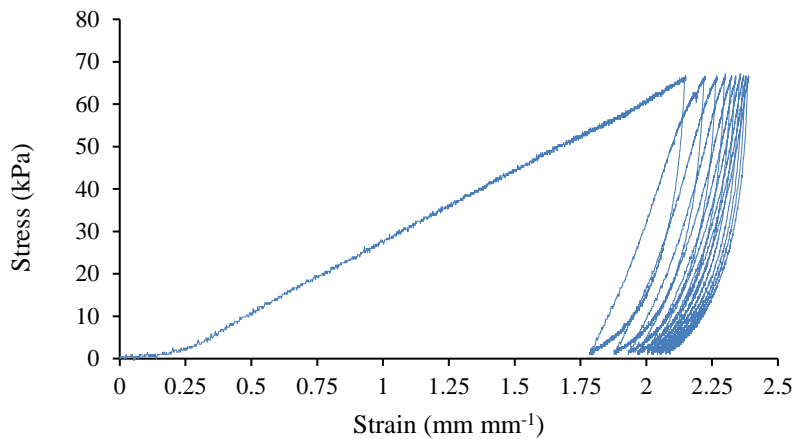
تنش پیش‌تراکمی به عنوان یک شاخص مقاومت مکانیکی خاک بیانگر مرز بین تغییر شکل‌های کشسانی و خمیری خاک می‌باشد ولی نمی‌توان آن را به عنوان یک مرز دقیق بلکه بعنوان یک ناحیه گذار از تغییر شکل‌های کشسانی به خمیری توجیه نمود. کلر و همکاران (Keller *et al.*, 2012) نشان دادند که یک حاشیه اطمینان برای عدم وقوع تراکم با تردد ماشین، در نظر گرفتن مقاومت مکانیکی خاک تا حد نصف تنش پیش‌تراکمی می‌باشد و برای نگه داشتن تغییر شکل ماندگار خاک در حد صفر، محدوده تنش کمتر از ۰/۱ تنش پیش‌تراکم به عنوان محدوده مجاز تنش گزارش شد. همچنین، تکرار تردد ماشین با مشخصات یکسان بر روی یک نقطه از خاک می‌تواند باعث افزایش تراکم گردد ولی حساسیت تراکمی خاک‌های مختلف در تکرار بارگذاری ممکن است بسته به خصوصیات فیزیکی و ساختمان خاکدانه‌ها متفاوت باشد (Peth & Horn, 2006). بررسی نتایج نشان می‌دهد که میزان نشست خاک با تکرار سیکل‌های بارگذاری به مرور کاهش یافته که می‌تواند به دلیل افزایش مقاومت تراکمی خاک در تکرار بارگذاری به دلیل کرنش-سختی^۱ باشد. میزان نشست در خاک تحت تیمار خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی به جهت سست بودن ساختمان خاک نسبت به تیمار بی‌خاک‌ورزی افزایش بیشتری نشان داد.

بنابراین، خاکی که مرتب تحت عملیات خاک‌ورزی سالیانه قرار گرفته و نرم شود نسبت به تراکم خاک در اثر ترددهای پی‌درپی حساسیت بیشتری دارد. همچنین اگر خاک در اولین بارگذاری نشست قابل توجهی داشته باشد (سست باشد)، در بارگذاری‌های مجدد نیز حساسیت بیشتری به تراکم دارد (Pytka, 2001).

ماده آلی باعث افزایش چسبندگی خاک می‌شود، اما استفاده بیش از حد از ماده آلی می‌تواند خاک را تضعیف و مقاومت خاک را کاهش دهد (Wuddivira *et al.*, 2013). اکوئه و همکاران (Ekwue *et al.*, 2014) گزارش کردند که با افزودن بقایا به خاک، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی خاک کاهش یافته و در نتیجه ظرفیت باربری خاک کاهش می‌یابد. ایتانا و کومیا (Etana & Comia, 1995) مشاهده کردند که افزایش مقدار رس موجب افزایش نمایه تراکم و افزایش مواد آلی موجب کاهش نمایه تراکم می‌شود. ژنگ و هارتگه (Zhang & Hartge, 1995) گزارش نمودند که مخلوط کردن ماده آلی با خاک موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری می‌شود، ولی تأثیری بر نمایه تراکم نداشت. محققان دیگری همانند ایموف و همکاران (Imhoff *et al.*, 2004) در مطالعه مشخصه‌های تراکمی نمونه خاک دست نخورده با درصد ماده آلی متفاوت مشاهده کردند که ماده آلی تأثیر معنی‌داری بر تنش پیش‌تراکمی و نمایه تراکم نداشت. در صورتی که برخی محققین همچون ایموف و همکاران (Imhoff *et al.*, 2004) و کلر و آرویدسون (Keller & Arvidsson, 2007) نتوانستند تأثیر مواد آلی را بر نمایه تراکم یا تورم در زمان نمونه‌برداری خاک‌ها از مکان‌های متفاوت پیدا کنند.

تراکم پذیری خاک تحت بارگذاری سیکلی

در شکل ۳ نتایج مقایسه اعمال ۱۰ سیکل متوالی بارگذاری با بیشینه تنش معادل ۵۰٪ تنش پیش‌تراکمی برای خاک تحت عملیات خاک‌ورزی نشان داده شده است. بررسی منحنی‌های بارگذاری سیکلی نشان می‌دهد که در بارگذاری سیکلی اگرچه اعمال تنش در یک سطح ثابت است و کم‌تر از تنش پیش‌تراکمی خاک تحت این نوع بارگذاری افزایش تراکم نشان می‌دهد. از این نتیجه می‌توان دریافت که اگرچه



شکل ۳- روند تغییرات بارگذاری سیکلی ثابت، تحت خاک‌ورزی مرسوم

Figure 3. Stress-strain curves under loading-unloading cycle under Conventional tillage system

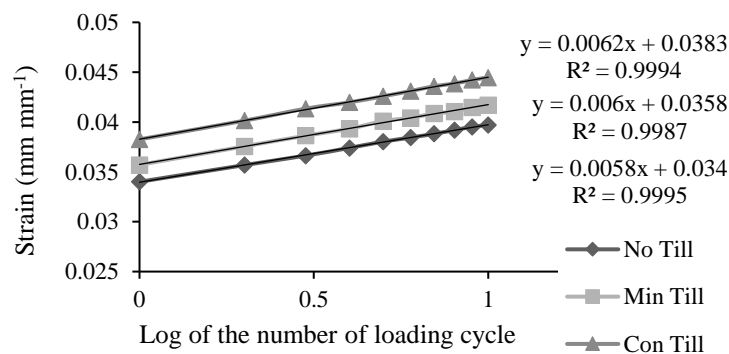
فرآیند بارگذاری سیکلی، سبب می‌شود ذرات ریز رسی و سیلتی بین ذرات سیلت درشت و شن قرار گیرد. قرار گرفتن ذرات ریز رسی و سیلتی در بین ذرات درشت خاک در اثر بارگذاری سیکلی در رطوبت بالا موجب از بین رفتن منافذ درشت در نتیجه افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک می‌شود. در نتیجه منجر به یکنواخت شدن کامل سیستم خلل و فرج خاک شده و ممکن است منجر به افزایش کرنش ماندگار در خاک بشود.

با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری میزان کرنش افزایش یافت. با توجه به شیب منحنی‌ها، بارگذاری مجدد سبب مقداری افزایش در کرنش جمعی در تیمار خاک‌ورزی مرسوم نسبت به سایر تیمارها شد. کانیالس و سالوخه (Canillas & Salokhe, 2002) فشردگی خاک را در اثر عبور تایلر ادوات به منظور تخمین فشردگی در خاک‌های زراعی مدل‌سازی نمودند. بار عمودی روی محور و تعداد عبور تایلر مهمترین عواملی بودند که بر فشردگی خاک تأثیر داشتند. به طوری که با یک بار عبور تایلر با بار محوری ۳ kN، در مقادیر جرم مخصوص ظاهری و شاخص مخروطی بیش از ۱۳٪ افزایش مشاهده شد و اکثر فشردگی خاک در سه عبور اول تایلر بود. نشست‌های تدریجی کوچک تحت بارگذاری مکرر منجر به کاهش حجم منافذ و تغییر شکل غیرقابل بازگشت خاک می‌شود (Peth et al., 2010). این مطابق با آزمایش‌های تردد مزرعه‌ای است که در آن عمق شیار تردد با عبور مکرر در یک بار ثابت تایلر در همان مسیر افزایش می‌یابد (Lipiec et al., 1992; Naderi-Boldaji et al., 2014). لیپیک و همکاران (Lipiec et al., 1992) تغییر شکل در خاک لوم

میزان کرنش (نشست) در انتهای هر بارگذاری در مقابل لگاریتم تعداد سیکل‌های بارگذاری در هر سه نوع خاک-ورزی در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، کاهش نسبت پوکی به صورت یک روند خطی در هر سه نوع تیمار صورت می‌گیرد و می‌توان تغییر حجم خاک را به صورت تابع لگاریتمی از تکرار بار توصیف کرد. شیب خط نمودار لگاریتم تعداد بارگذاری‌ها-نسبت پوکی بیانگر یک شاخص برای حساسیت خاک در مقابل تغییرات حجم در بارگذاری سیکلی است. با توجه به معادلات برازش شده، همبستگی و ضرایب همبستگی با $R^2 < 0.99$ ، بیشترین میزان شیب (حساسیت تراکمی به بارگذاری سیکلی) مربوط به تیمار خاک‌ورزی مرسوم می‌باشد (شکل ۴). با توجه به شکل (۴) در تیمار خاک‌ورزی مرسوم نسبت به سایر تیمارها حد کشسانی خاک کاهش یافت، بنابراین مقدار بیشینه تنش که خاک می‌تواند تحمل کند نیز کاهش یافته و در تنش‌های پایین‌تر کرنش ماندگار در خاک ایجاد می‌شود. نتایج پت و هورن (Peth & Horn, 2006) نشان داد که ویژه برای خاک‌های چسبنده، فرضیه الاستیک بودن خاک در محدوده قبل از تنش پیش‌تراکمی توجیه نمی‌شود و تغییر شکل تحت بارگذاری تکراری از یک قانون لگاریتمی تبعیت می‌کند. در بارگذاری سیکلی ثابت، کرنش جمعی خاک بسته به شرایط خاک و میزان رطوبت تغییر پیدا می‌کند. بررسی منحنی‌های بارگذاری سیکلی نشان می‌دهد که در رطوبت‌های بالا، بارگذاری سیکلی سبب به هم ریختن هلال آب اطراف ذرات خاک و خاکدانه‌های خاک می‌شود. در رطوبت بالا، آب به صورت عامل لغزنده بین ذرات خاک عمل کرده و طی

یک عمق خاص افزایش می‌یابد. این تغییرات در بافت‌ها و رطوبت‌های متفاوت خاک یکسان نبوده است (Pytko, 2005). اساساً در یک ماده الاستیک با تکرار بارگذاری (بارگذاری و باربرداری) در صورتی که تنش در محدوده الاستیک باشد، پس از باربرداری تغییری در خصوصیات ماده (مثلاً جرم ظاهری یا حجم) ایجاد نمی‌شود در حالی که رفتار یک ماده غیر الاستیک (مانند خاک) متفاوت بوده و با تکرار تردد تأیر میزان تراکم (جرم مخصوص ظاهری) افزایش یافته در همین راستا توزیع تنش‌های تماسی بین سطح لاستیک و خاک به تدریج در عمق‌های زیرین خاک نیز گسترش یافته و باعث افزایش تنش در اعماق خاک می‌شود (Boussinesq, 1885).

سیلنتی را تابعی از لگاریتم تعداد عبور چرخ‌ها یافتند که شیب تغییرات در خاک مرطوب، بزرگتر بود. کولی و همکاران (Kulli *et al.*, 2003) اثرات مکانیکی اعمال شده بر روی تخلخل و جرم مخصوص ظاهری خاک در اثر عبور ماشین برداشت چغندر در یک خاک لومی شنی را مورد بررسی قرار دادند. افزایش مقدار جرم مخصوص ظاهری و کاهش تخلخل در اثر اعمال نیروهای مکانیکی به خاک، به وضوح به چشم می‌خورد. این اثر در مورد تیماری که چندین بار مورد تردد ماشین قرار گرفته بود، نسبت به تیماری که در آن تنها یک بار تردد صورت گرفته بود، بیشتر بود. برخی تحقیقات نشان می‌دهند که با تکرار تردد بر روی سطح یک خاک با مشخصات فیزیکی معلوم، میزان تنش قائم وارده در



شکل ۴- تغییرات میزان کرنش (نشست) در مقابل لگاریتم تعداد سیکل بارگذاری تحت سامانه خاک‌ورزی

Figure 4. Strain/sinkage evolution as a function of logarithm of the number of loading cycle under different tillage system

خاک می‌باشد. نوع سامانه خاک‌ورزی، تنش پیش‌تراکمی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و کمترین مقدار آن در تیمار خاک‌ورزی مرسوم به دست آمد. همچنین نوع سامانه خاک‌ورزی سایر مشخصه‌های تراکمی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به طوری که نمایه تراکم به دلیل کاهش در مقدار تنش پیش‌تراکمی در تیمار خاک‌ورزی مرسوم افزایش یافته و تیمار بی‌خاک‌ورزی مقاومت مکانیکی بالاتری در برابر تراکم دارد. بررسی آزمون بارگذاری سیکلی نشان داد که خاک مورد بررسی، تحت عملیات بی‌خاک‌ورزی نسبت به سایر تیمارها در یک تنش وارده ثابت، حساسیت کمتری داشته و مقدار نشست (تراکم) کمتری نسبت به سایر تیمارها دارد. قابلیت تراکم خاک و تخریب ساختمان خاک و خاکدانه‌ها در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم بیشتر است که علت آن می‌تواند ضعیف‌تر بودن ساختمان و سستی خاکدانه‌ها در عمق ۲۰-۱۰ سانتی‌متری خاک باشد. کاربرد مداوم

نتیجه‌گیری کلی

تراکم خاک یکی از عوامل موثر در کاهش کیفیت فیزیکی خاک است که می‌تواند تحت تأثیر نوع عملیات خاک‌ورزی، رابطه بین خاک، آب و گیاه و عملکرد محصول را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین تعیین ظرفیت باربری خاک (تنش در آستانه تراکم) و نمایه تراکم خاک (حساسیت به تراکم) و همچنین افزایش تراکم تحت تکرار تردد ماشین، می‌تواند نقش کلیدی در جلوگیری از تراکم بیشتر خاک و حفظ کیفیت فیزیکی خاک داشته باشد. به نظر می‌رسد استفاده از تنش پیش‌تراکمی که در واقع حد گذار بین رفتار الاستیک و پلاستیک خاک می‌باشد، می‌تواند به عنوان معیاری برای محدود کردن تنش‌های وارده از طرف ماشین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این مطالعه نشان داد که نوع سامانه خاک‌ورزی، مقدار رطوبت، جرم مخصوص ظاهری از عوامل تأثیرگذار بر تنش پیش‌تراکمی

کشت، تنش‌های خارجی، وضعیت رطوبتی، میزان ماده آلی خاک و خصوصیات ذاتی خاک بر تنش پیش‌تراکمی تأثیرگذار هستند، پیشنهاد می‌شود در بررسی اثر سامانه‌های خاک‌ورزی به خصوص در درازمدت در اقلیم‌های مختلف به اثرات این ویژگی‌ها بر تنش پیش‌تراکمی توجه شود و اطلاعات آن به نقشه‌های موجود جهت برنامه‌ریزی خاک‌ورزی افزوده شود.

گلاوآهن برگردان‌دار در سامانه خاک‌ورزی مرسوم سبب تخریب خاکدانه‌های پایدار شده که منجر به کاهش پایداری آن در مقابل بارگذاری نسبت به سامانه خاک‌ورزی حفاظتی می‌شود. با توجه به اینکه تنش پیش‌تراکمی به طور مستقیم در مطالعات خاک‌ورزی و تردد در مزرعه قابل کاربرد است می‌تواند به عنوان معیاری در برنامه‌ریزی‌های خاک‌ورزی و مدیریت تردد در مزرعه در محدوده زمانی و رطوبتی مناسب جهت خاک‌ورزی استفاده شود. با توجه به اینکه تاریخچه

Reference

- Afzalnia S., Behaen M.A., Karami A., Dezfuli A., and Ghasari A. 2011. Effect of conservation tillage on the soil properties and cotton yield. In: Proceedings of 11th International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture, Sept., 21-23, Istanbul, Turkey, pp. 36.
- Alakukku L. 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. Short-term effects on the properties of clay and organic soils. *Soil and Tillage Research*, 37(4): 211-222.
- Alexandrou A., and Earl R. 1995. In situ determination of the pre-compaction stress of a soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61(1): 67-71.
- Anon 2003b. Soil Cone Penetrometer. ASAE standard S313.3. DEC94. ASAE STANDARDS. The 45th Ed. ASAE. St. Joseph. MI 49085-9659. USA.
- Black G.R., and Hartge K.H. 1986. Bulk density. In: Methods of Soil Analysis. Part1. 2nd editio. ASA and SSSA. Madison. WI.
- Blanco-Canqui H., Lal R., Owens L.B., Post W.M., and Izaurraide R.C. 2005. Strength properties and organic carbon of soils in the north Appalachian region. *Soil Science Society American Journal*, 69(3): 663-673.
- Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Journal of Agronomy*, 54(5): 464-465.
- Boussinesq J. 1885. Application des Potentiels al'etudedel'e quilibre et du Mouvement des Solides E/lastiques. Gauthier-Villars. Paris.
- Canillas E.C., and Salokhe V.M. 2002. Modeling compaction in agricultural soils. *Journal of Terramechanics*, 39(2): 71-84.
- Cassel D.K., Raczowski C.W., and Denton H.P. 1995. Tillage effects on corn production and soil physical properties. *Soil Science Society American Journal*, 59(5): 1436-1443.
- Chaplain, V. Défossez, P. Richard, G. Tessier D., and Roger-Estrade J. 2011. Contrasted effects of no-till on bulk density of soil and mechanical resistance. *Soil and Tillage Research*, 111(2): 105-114.
- Dawidowski J.B., and Koolen A.J. 1994. Computerized determination of the pre-consolidation stress in compaction testing of field core samples. *Soil and Tillage Research*, 31(2-3): 277-282.
- Ekwue E.I., Birch R.A. and Chadee N.R. 2014. A comparison of four instruments for measuring the effects of organic matter on the strength of compacted agricultural soils. *Biosystems Engineering*. 127: 176-188.
- Etana A., and Comia R. 1995. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four soils. In: Compaction effects of mechanical stress of some Swedish arable soils (Ph. D. Thesis), Reports and Dissertations 24, Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- Ghuman B.S., and Lal R. 1992. Effects of soil wetness at the time of land clearing on physical properties and crop response on an ultisoil in southern Nigeria. *Soil and Tillage Research*. 22(1-2), 1-11.
- Erbach D.C., Benjamin J.G., Cruse R.M., Elamin A., Mukhtar S., and Choi H. 1992. Soil and corn response to tillage with Paraplow. *Transaction of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 35(5): 1347-1354.
- Fuentes J.P., Flury M., and Bezdicek D. 2004. Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional till, and no-till. *Soil Science Society American Journal*, 68(5): 1679-1688.

- Gompertz B. 1825. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of Royal Society of London*, 115: 513–585.
- Gregory A.S., Whalley W.R., Watts C.W., Bird N.R.A., Hallett P.D., and Whitmore A.P. 2006. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil and Tillage Research*, 89(1): 45-57.
- Halfmann D. 2005. Management system effects on water infiltration and soil physical properties (M. Sc. Thesis), Faculty of Texas Tech University.
- Håkansson I. 1988. A method for characterizing the state of compactness of the plough soil. *Soil and Tillage Research*, 16(1-2): 105-120.
- Hamza M.A., and Anderson W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2): 121–145.
- Horn R. 1988. Compressibility of arable lands. In: J., Drescher, R., Horn, and M., de Boodt (Eds.) *Impact of water and external forces on soil structure*. Catena, Supplement 11. pp. 53-71. Catena. Cremligen-Destedt.
- Horn R., Taubner H., Wuttke M., and Baumgartl T. 1994. Soil physical properties related to soil structure. *Soil and Tillage Research*, 30(2-4): 187-216.
- Imhoff S., Da Silva A.P., and Fallow D. 2004. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society American Journal*, 68(1): 17–24.
- Keller T., and Arvidsson J. 2007. Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. *European Journal of Soil Science*, 58(6): 1373–1381.
- Keller T., Arvidsson J., Dawidowski J.B., and Koolen A.J. 2004. Soil precompression stress II. A comparison of different tests and stress displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil and Tillage Research*, 77(1): 97-108.
- Keller T., Arvidsson J., Schjonning P., Lamande M., Stettler M., and Weisskopf. P. 2012. In situ subsoil Stress-Strain behavior in relation to soil Precompression stress. *Soil Science Society American Journal*, 177: 490-497.
- Keller T., Lamande M., Schjonning P., and Dexter A.R. 2011. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, 163(1-2): 13–23.
- Koolen A.J., 1974. A method for soil compatibility determination. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 19: 271–278.
- Kulli B., Gysi M., and Flühler H. 2003. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. *Soil and Tillage Research*, 70(1): 29-40.
- Lipiec J., Szustak S., and Tarkiewicz S. 1992. Soil compaction: responses of soil physical properties and crop growth. *Zeszyty Problemowe Postępowania Nauk Rolniczych*, 398: 113–117.
- Logsdon S.D., Karspar T.C., and Cambardella C.A. 1999. Depth incremental soil properties under no-till or chisel management. *Soil Science Society American Journal*, 63(1): 197-200.
- Mileusnic Z.I., Petrovic D.V., and Devic M.S. 2010. Comparison of tillage systems according to fuel consumption. *Energy*, 35(1): 221-228.
- Minaei S. 1984. Multipass effects of wheel and track type vehicles on soil compaction (M. SC. Thesis), Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Mosaddeghi M.R., Hemmat A., Hajabbasi M.A., and Vafaeian M. 2006. Plate sinkage versus confined compression tests for in situ soil compressibility studies. *Biosystems Engineering*, 93: 325-334.
- Naderi-Boldaji M., Alimardani R., Hemmat A., Sharifi A., Keyhani A., Tekeste M.Z., and Keller T. 2014. 3D finite element simulation of a single-tip horizontal penetrometer– soil interaction. Part II: soil bin verification of the model in a clay loam soil. *Soil and Tillage Research*, 144: 211–219.
- O’Sullivan M.F. 1992. Uniaxial compaction effects on soil physical properties in relation to soil type and cultivation. *Soil and Tillage Research*, 24(3): 257–269.
- Paz A., and Gue Rif J. 2000. Influence of initial packing density, water content and load applied during compaction on tensile strength of dry soil structural units. *Advances in Geocology*, 32(1): 55–63.
- Peth S., and Horn R. 2006. The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. *Journal of Plant Nutrition Soil Science*, 169(3): 401–410.
- Peth S., Rostek J., Zink A., Mordhorst A., and Horn R. 2010. Soil testing of dynamic deformation processes of arable soils. *Soil and Tillage Research*, 106(2): 317–328.

- Pytko J. 2001. Load effected upon soil stress and deformation state in structured and disturbed sandy loam for two tillage treatments. *Soil and tillage Research*, 59(1-2):13-25.
- Pytko J. 2005. Effects of repeated rolling of agricultural tractors on soil stress and deformation state in sand and loess. *Soil and Tillage Research*, 82(1): 77-88.
- Römken M.J.M., and Miller R.D. 1971. Predicting root size and frequency from one-dimensional consolidation data: a mathematical model. *Plant and Soil*, 35: 237-248.
- Roseberg R., and McCoy E. 1992. Tillage-and traffic-induced changes in macroporosity and macropore continuity: air permeability assessment. *Soil Science Society of America Journal*, 56(4): 1261-1267.
- Rücknagel J., Hofmann B., Paul R., Christen O., and Hülsbergen K.J. 2007. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. *Soil and Tillage Research*, 63: 1309-1313.
- Reynaldo C.A., Stenberg M., Nelson P., Redberg T., and Håkansson H. 1994. Soil and crop responses to different tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 29: 335-355.
- Schjønning P., and Lamandé M. 2018. Models for prediction of soil pre-compression stress from readily available soil properties. *Geoderma*, 320:115-125.
- Silva R.B., Lancas K.P., and Miranda E.E.V. 2005. Prediction and spatial variability of soil dynamic properties in sugar cane field of Sao Paulo State-Brazil, European Conference on Precision Agriculture, Uppsala, Sweden. 5th Ed. pp. 441-448.
- Skaalsveen K., Ingrama J., and Clarke L.E. 2019. The effect of no-till farming on the soil functions of water purification and retention in north-western Europe: A literature review. *Soil and Tillage Research*, 189: 98-109.
- Soane B.D. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research*, 16(1-2): 179-201.
- Sohne W. 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agricultural Engineering* 39(1): 276-281.
- Tang A.M., Cui Y.J., Eslami J., and Defossez P. 2009. Analyzing the form of the confined uniaxial compression curve of various soils. *Geoderma*, 149(3-4): 282-290.
- Wiermann C., Werner D., Horn R., Rostek J., and Werner B. 2000. Stress/strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. *Soil and Tillage Research*, 53(2): 117-128.
- Veenhof D.W., and MaBride R.A. 1996. Overconsolidation in agricultural soils: I. Compression and consolidation behavior of remolded and structured soils. *Soil Science Society of America Journal*, 60(1): 362-373.
- Wuddivira, M.N., Stone R.J. and Ekwue E.I. 2013. Influence of cohesive and disruptive forces on strength and erodibility of tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 133: 40-48.
- Zhang H., and Hartge K.H. 1995. Mechanical properties of soils as influenced by the incorporation of organic matter. IN: K. H. Hartge, and B. A. Stewart, (Eds). *Soil structure, its development and function*. CRC Press, Boca Raton, USA. pp. 93-108.

Effect of Tillage Systems on Compaction Characteristics of a Silty Clay Loam Soil

Mahsa kazemipour Esfahlan¹, Shoja Ghorbani^{*2}, Masoud Tadayonnejad³, Mojtaba Naderi⁴, Hossein Shirani⁵

(Received: August, 2022

Accepted: January, 2023)

Abstract

Soil compaction is one of the effective factors in reducing soil physical quality, which due to tillage operations can affect the relationship between water, soil and crop yield. The aim of this study was to investigate the effect of some tillage treatments on the compaction behavior of a silty clay loam soil. Core sampling was carried out during three years of tillage after barley harvest. The experiments were conducted as a randomized complete block design with three treatments i.e. conventional tillage, reduced tillage and no-tillage in 6 replications. Soil compaction characteristics including pre-compression stress, compression index and swelling index were determined based on confined compression test (CCT) at 100 hPa matric suction. The results showed that the tillage treatment had a significant effect on pre-compression stress, bulk density and soil moisture at the confidence level of %5. The lowest amount of pre-compression stress with a value of 19.95kPa is related to conventional tillage treatments and the highest value with a value of 31.62 kPa is related to non-tillage treatment. The compression index was showed the highest value in conventional tillage compared to other treatments. The results of cyclic loading-unloading at a constant stress level (i.e. 50% of pre-compression stress) showed that the studied soil was less sensitive to repeated loading for no-tillage than reduced and conventional tillage treatments which can be attributed to weaker structure for the later. As the conclusion, the no-tillage treatment can be described as a treatment being less susceptible to compaction. However, consecutive implementation of this tillage treatment might require subsoiling operations every few years to disturbed the deep subsoil hard pans.

Keywords: Tillage, Pre-compression stress, Compression index, Repeated loading

Kazemipour M., Ghorbani Sh., Tadayonnejad M., Naderi M., Shirani H. 2023. Effect of tillage systems on compaction characteristics of a silty clay loam soil. *Applied Soil Research*. 11(3): 121-135.

1. Ph.D. Student of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University Iran

2. Professor of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University Iran

3. Assistant Professor of Soil Science, Agriculture and Natural Resources Research Center of Isfahan, Iran

4. Associated Professor of Mechanical Engineering of Biosystem, Shahrekord University Iran

5. Associated Professor of Soil Science, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran

*Corresponding Author Email: ghorbani-sh@sku.ac.ir