

Research Article

The Effect of Tillage Management and Cover Crop Cultivation on the Components of the Soil Compression Curve at Different Moisture Conditions

H Bayat¹, E Ebrahimi^{2*}, F Bayazidi³

Received: December 17, 2022

Accepted: June 13, 2023

Revised: June 2, 2023

Published online: June 21, 2024

1-Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2-PhD of Soil Physics and Conservation, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Iran.

3-Former M.Sc. Student of Soil Science, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

* Corresponding Author, E-mail: Ebrahimi.soilphysic@yahoo.com

Abstract

Background and Objectives

Soil compaction is a crucial factor that limits plant growth and reduces yield. To assess the level of compaction, the compaction curve is used, which shows the relationship between compressive stress and void ratio. This curve comprises three main components: pre-compaction stress, compression index, and swelling index. The soil behaves elastically along the swelling line but becomes plastic and irreversible at the end of the virgin compaction line. The point where these two lines intersect is known as pre-compaction stress. The soil swelling index indicates its resilience and elasticity, while the compaction index reflects its ability to resist or undergo compaction. Some researchers have used the ratio of swelling index to compaction index to express soil's ability to recover after being subjected to stress. As long as applied stress does not exceed pre-compaction stress, soil exhibits elastic properties. To date, no comprehensive study has been conducted on how tillage type and cover crop type affect confined compression curve parameters. Therefore, this research aims to investigate how changing tillage systems and cover crop types impact soil compaction characteristics at different suctions.

Methodology

This study was conducted at Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, to investigate the effect of tillage type and cover crop type on the components of the confined compression curve. The cover crop factor was tested in three levels: *Vicia ash*, *Lathyrus sativus*, and no cover crop. The tillage factor was tested in three levels: conventional tillage, minimum tillage, and no tillage. The experiment was designed as a randomized complete block factorial with three replications over two consecutive crop years. The Experiments were conducted at three suctions of 6, 30, and 1500 kPa. The confined compression curve was measured using a uniaxial device under a loading rate of 1 mm min⁻¹. The test consisted of two stages: loading and unloading. During the loading stage, 100 readings were taken at 0.01 mm intervals with an additional force of 10 kPa applied to the sample at each interval. During the unloading stage, 33 readings were taken at 0.03 mm intervals. Finally, the components of the confined compaction curve including pre-compaction stress, compaction index, and swelling index were determined.

Findings

The results indicated that the highest compaction index values for suction levels of 30 and 1500 kPa were observed in the tillage treatment without cover crops, with values of 0.63 and 0.75, respectively. The effectiveness of tillage and cover crop types was found to be dependent on soil suction levels, with significant changes in soil compaction occurring at lower suctions. Conservation tillage was observed to improve soil compaction compared to conventional tillage. At the suction level of 6 kPa, the cover crop had a significant effect ($p < 0.05$) on the swelling index, while the effect of tillage on this parameter was not significant. The



reduction in compaction index due to cover crop application may be attributed to increased binding properties of soil particles, reduced deformation against external forces, and increased soil resilience. At the suction level of 6 kPa, higher moisture content resulted in differences in mechanical characteristics of the soil due to different cultivation systems and plant types. Overall, the results indicated that an increase in soil suction leads to an increase in pre-compression stress. However, no significant changes were observed in the three

parameters investigated at suctions of 1500 kPa and 30 kPa. It is possible that the interaction between tillage type, cover crop type, and moisture content at this suction level contributed to the increase in pre-compaction stress observed in the conservation tillage-cover crop treatment. This may be due to improvements in soil structure, which have a significant impact on soil compaction properties. At the matric suction of 1500 kPa, the highest compaction index value was observed in the tillage treatment without cover crops (0.754). At lower suctions, cover crops were found to reduce compressibility by increasing soil elasticity, while treatments without cover crops were more susceptible to compaction.

Conclusion

The findings revealed that the compaction index values were highest in the tillage treatment without cover crops at suction levels of 30 and 1500 kPa, indicating greater susceptibility to compaction in the absence of cover crops. The effectiveness of tillage and cover crops varied depending on soil suction levels, with notable changes in compaction occurring at lower suctions. It was observed that treatments that increase organic matter in the soil, decrease soil compressibility. Overall, the results have shown that using cover crops and conservation tillage systems in semi-arid areas plays an important role in reducing soil compaction.

Keywords: Cover crops, Minimum tillage, No-tillage, Pre-compaction stress, Swelling index

مقاله پژوهشی

اثر مدیریت شخم و کشت گیاهان پوششی بر شاخص‌های منحنی فشردگی خاک در شرایط رطوبتی مختلف

حسین بیات^۱، عیسی ابراهیمی^{۲*}، فرهاد بایزیدی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۲

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱

۱-دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان
 ۲- دکتری فیزیک و حفاظت خاک، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان
 ۳-دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان
 *مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Ebrahimi.soilphysic@yahoo.com

چکیده

فشردگی خاک یکی از مهمترین عوامل محدود کننده رشد ریشه گیاهان است. برای بررسی وضعیت فشردگی از منحنی فشردگی که بیانگر رابطه بین نسبت پوکی و تنش فشاری است، استفاده می‌شود. هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر تغییر سیستم خاک‌ورزی و نوع گیاه پوششی بر ویژگی‌های فشردگی خاک است. برای بررسی اثر نوع خاک‌ورزی و نوع گیاه پوششی بر شاخص‌های منحنی فشردگی محصور، فاکتور گیاه پوششی در سه سطح ماشک، خلر و بدون گیاه پوششی و فاکتور خاک‌ورزی نیز در سه سطح خاک‌ورزی مرسوم، کمینه‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی به صورت آزمون فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو سال زراعی متوالی انجام شد. آزمایش‌ها در سه مکش ماتریک خاک برابر ۶، ۳۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال انجام شد. منحنی فشردگی در تیمارهای مختلف با استفاده از دستگاه تک‌محوری اندازه‌گیری شد و سپس شاخص‌های منحنی فشردگی محصور شامل تنش پیش-تراکمی، شاخص فشردگی و شاخص تورم تعیین شدند. نتایج نشان داد که بیشینه مقدار شاخص فشردگی در مکش‌های ماتریک ۳۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال در تیمار خاک‌ورزی حداقل بدون گیاه پوششی برابر با ۰/۶۳ و ۰/۷۵ به دست آمده است. نتایج نشان داد که میزان تاثیر نوع خاک‌ورزی و نوع گیاهان پوششی تابعی از مقدار مکش خاک است و در مکش‌های ماتریک کم تغییرات معنی‌داری در فشردگی خاک رخ می‌دهد. همچنین مشاهده شد که خاک‌ورزی حفاظتی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم سبب بهبود وضعیت فشردگی خاک شده است. به‌طور کلی نتایج نشان داد که استفاده از گیاهان پوششی و سیستم خاک‌ورزی حفاظتی در مناطق نیمه خشک نقش مهمی در کاهش فشردگی خاک دارد.

واژه‌های کلیدی: بی‌خاک‌ورزی، تنش پیش-تراکمی، کمینه‌خاک‌ورزی، شاخص فشردگی، گیاهان پوششی

مقدمه

و همکاران ۲۰۰۴؛ کوآن و همکاران ۲۰۰۷؛ صفیح-هادی و همکاران ۲۰۰۹). کوآن و همکاران (۲۰۰۷) از نسبت C_s به C_c برای بیان قابلیت بازگرداندن خاک پس از اعمال تنش استفاده کردند. به طوری که خاک تا زمانی که مقدار تنش وارده بیشتر از P_c نباشد خاصیت کشسان از خود نشان می‌دهد.

لبرت و هورن (۱۹۹۱) و ایمهاف و همکاران (۲۰۰۴) نیز P_c را ظرفیت تحمل تنش وارده به خاک و یا مقاومت در برابر فشردگی نامیدند. مقاومت مکانیکی خاک به طور چشم‌گیری تحت تاثیر مقدار آب بوده به طوری که با کاهش پتانسیل آب خاک (منفی‌تر) نمونه خاک در برابر فشردگی مقاوم‌تر می‌شود (هورن و همکاران ۱۹۹۸). فشردگی ایجادشده به وسیله تردد ماشین، سبب تضعیف ساختمان خاک با پیامدهای کشاورزی و زیست محیطی می‌شود، که این ویژگی‌ها با استفاده از دو پارامتر P_c و C_c تعریف می‌شوند. این دو پارامتر تحت تأثیر چگالی ظاهری، مقدار آب و بافت خاک هستند. مقاومت مکانیکی به چگالی ظاهری خشک و مقدار اولیه آب نمونه بستگی دارد (اسچاورز و همکاران ۲۰۲۲؛ وی همکاران ۲۰۲۲؛ چن و همکاران ۲۰۲۲). تاثیر عملیات خاک‌ورزی بر رفتار خاک اساساً به تاثیر بر ساختمان خاک مربوط می‌شود (برونیک و لال ۲۰۰۵). شاراطه و همکاران (۲۰۰۶) با یک مطالعه ۲۰ ساله در حوضه پژوهش‌های انواع خاک‌ورزی و مدیریت بقایای گیاهی دریافتند که عملیات بی‌خاک-ورزی باعث بزرگ‌تر شدن اندازه خاکدانه‌ها، مقاومت بیشتر خاک (مقاومت در برابر فروروی و مقاومت برشی)، خیس‌شدگی و مقدار بقایای گیاهی بر جای مانده بیشتر بود. تانگ و همکاران (۲۰۰۹) نیز کاهش هدایت هیدرولیکی در طی فشردگی را یک فاکتور مهم و تاثیر-گذار بر منحنی فشردگی خاک دانست.

لبرت و هورن (۱۹۹۱) با اندازه‌گیری P_c در ۳۷ نمونه خاک، گزارش کردند که افزایش کربن آلی خاک سبب

فشردگی خاک به عنوان رفتار کمی خاک، تحت تاثیر تنش و فشارهای مشخص است که معمولاً این رفتار با تغییر چگالی ظاهری، درجه پوکی و تخلخل کل خاک بیان می‌شود. فشردگی خاک یکی از عوامل محدودکننده رشد ریشه گیاه و عملکرد محصول است که باعث کاهش نسبت پوکی، مواد غذایی قابل دسترس، آب و اکسیژن مورد نیاز گیاه می‌شود (سوآن ۱۹۹۰، چاکرابورتی و میستری ۲۰۱۷، اکویدو و ابروکو ۲۰۲۱). منحنی فشردگی خاک نشان‌دهنده رابطه بین مقدار تنش فشاری اعمال شده و برخی از پارامترهای وابسته به وضعیت فشردگی خاک، مانند نسبت پوکی است. به طوری که رفتار مکانیکی خاک و منحنی فشردگی به صورت یک رابطه نیمه لگاریتمی بین لگاریتم تنش فشاری و نسبت پوکی بیان می‌شود. در تعریف نمودار فشردگی دو قسمت مجزا از هم وجود دارد که به صورت دو خط از هم قابل تشخیص بوده که خط تورم (SL^1) و خط فشردگی بکر (VCL^2) می‌باشند. به کمک این منحنی سه ویژگی مهم فشردگی خاک قابل محاسبه است که عبارت‌اند از: شاخص تورم (C_s) که برابر شیب خط تورم است، شاخص فشردگی (C_c) که شیب خط بکر منحنی فشردگی است و همچنین تنش پیش-تراکمی^۲ (P_c) (کلر و همکاران ۲۰۱۱؛ بیات و همکاران ۲۰۱۸؛ ابراهیمی و همکاران ۲۰۲۱). نقطه تقاطع بین دو خط تورم و فشردگی بکر را P_c می‌گویند (جونور و پیرس ۱۹۹۵؛ بیات و همکاران ۲۰۱۸). رفتار خاک در بخش خط تورم از نوع کشسان (تغییر شکل برگشت‌پذیر) بوده اما در انتهای VCL ، حالت خمیری داشته و تغییر شکل خاک برگشت‌ناپذیر است (کولن و کوپپرز ۱۹۸۹؛ اتکینسون ۱۹۹۳). C_s نشانگر قابلیت ارتجاعی و کشسانی خاک (لارسون و همکاران ۱۹۸۰؛ هیو و همکاران ۲۰۲۲) و C_c بیانگر حساسیت خاک به فشردگی و یا مقاومت در برابر فشردگی است (ایمهاف

³ Precompression stress

¹ Swelling line

² Virgin compression line

به طوری که در این پژوهش ۲۷ واحد آزمایشی، هر یک به ابعاد ۱۲×۲۲ متر ایجاد شد. در CT از گاوآهن برگرداندار با عمق حداکثر ۳۰ سانتی متر و در MT از گاوآهن قلمی (خاکورزی سطحی با عمق کمتر از ۱۰ سانتی متر) استفاده شد. گیاه پوششی خمر و ماشک در اسفند ماه سال ۸۹ کاشته شد و در خرداد ماه ۹۰ قبل از رسیدن کامل گیاه پوششی با رعایت دقیق تیمارهای خاکورزی برداشت شد. در CT گیاه پوششی به طور کامل با خاک مخلوط و در NT گیاه پوششی بر روی سطح خاک باقی مانده و در خاکورزی با گاوآهن قلمی (MT) به صورت سطحی خاکورزی انجام گرفت. سپس گیاه اصلی (ذرت دانه‌ای) به صورت ردیفی با فاصله ردیفی ۷۵ سانتی متر کاشته شد. عملیات مشابه در سال ۹۰ - ۹۱ تکرار شد. سپس نمونه برداری در پایان مرحله برداشت محصول (گیاه ذرت)، از عمق ۰ تا ۱۰ سانتی متری در سال ۹۱ انجام شد. برای برداشت نمونه‌های دست نخورده سیلندرهای نمونه برداری از جنس استیل با قطر ۵/۳ و ارتفاع ۵ سانتی متر استفاده شد. از لایه رویی هر محل نمونه برداری تعداد ۳ نمونه دست نخورده به وسیله سیلندر و یک نمونه دست خورده برداشت شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از روش‌های مرسوم اندازه‌گیری شدند.

برای اندازه‌گیری میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)^۲ از روش کمپر و چیپل (۱۹۶۵) استفاده شد. بدین منظور مقدار ۳۰ گرم (W_1) از خاکدانه‌های هوا خشک شده که از الک ۸ میلی‌متر عبور داده شده و بر روی الک ۴ میلی‌متر باقی مانده بودند، توزین گردید. سری الک‌ها شامل ۴، ۲، ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی‌متر بودند. الک‌ها به مدت ۱۲/۵ دقیقه با شدت ۳۰ دور در دقیقه و دامنه ۲/۶ سانتی متر در داخل آب نوسان شدند. پس از ۱۲/۵ دقیقه نوسان کردن الک‌ها، محتویات هر الک درون یک پتری دیش شسته شد و در آون به مدت ۲۴ ساعت

کاهش مقدار P_c می‌شود. P_c در نسبت‌های حجمی پایین آب با افزایش کربن کاهش یافته ولی در مقادیر بالای رطوبت با افزایش کربن بیشتر شد (پریرا و همکاران ۲۰۰۷). همچنین این پژوهشگران بیان کردند که مقدار تنش پیش-تراکمی در کرت‌های خاکورزی با گاوآهن برگرداندار برابر ۵۲ کیلوپاسکال و در کرت بی‌خاک-ورزی برابر ۲۷۳ کیلوپاسکال به دست آمد که وابستگی مقاومت فشرده‌گی به تخلخل و سپس کربن آلی خاک را نشان می‌دهد. داویگا و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که افزایش ماده آلی منجر به کاهش P_c ، افزایش ضریب فشرده‌گی و الاستیسیته نمونه‌های غیراشباع می‌شود.

با توجه به اهمیت بحث فشرده‌گی خاک در تولید محصول و عدم وجود مطالعه جامع در مورد اثر مدیریت خاکورزی و انواع پوشش گیاهی بر شاخص‌های فشرده‌گی خاک، هدف این پژوهش بررسی اثر سه سیستم خاکورزی و دو نوع گیاه پوششی بر تغییرات شاخص-های منحنی فشرده‌گی شامل P_c ، C_c و C_s خاک است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا-همدان با مختصات ۴۸ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۱ دقیقه عرض شمالی واقع در ۵ کیلومتری غرب روستای دستجرد اجرا شد. مدیریت زراعی شامل داشت، برداشت، آبیاری، کوددهی، استفاده از سموم طبق نظر کارشناسان انجام شد. برای بررسی تاثیر سیستم‌های خاکورزی و نوع گیاه پوششی بر شاخص‌های مقاومتی (P_c ، C_s ، C_c)، فاکتور گیاه پوششی در سه سطح ماشک (C_1) (با نام علمی *Vicia*)، خمر (C_2) (با نام علمی *Lathyrus sativus*) و بدون گیاه پوششی (C_3) و فاکتور خاکورزی نیز در سه سطح خاکورزی مرسوم (CT)، خاکورزی حداقل^۱ (MT) و بدون خاکورزی (NT) به صورت آزمون فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو سال زراعی متوالی (۸۹ - ۹۰ و ۹۰ - ۹۱) اجرا شد.

² Mean weight diameter

¹ Minimum tillage

با نرخ بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. این آزمایش در دو مرحله بارگذاری و باربرداری صورت گرفت. به این صورت که در مرحله بارگذاری تعداد ۱۰۰ قرائت با فواصل ۰/۰۱ میلی‌متری که در هر یک از این فاصله‌ها به اندازه ۱۰ کیلو پاسکال به نیروی وارد شده بر نمونه اضافه می‌شود و در مرحله باربرداری تعداد ۳۳ قرائت با فواصل ۰/۰۳ میلی‌متری انجام شد. همچنین در برخی نمونه‌ها شروع خروج آب از خاک به عنوان پایان آزمایش در نظر گرفته شد (کولن، ۱۹۷۴).

مکش ۶ کیلوپاسکال به دلیل نزدیکی به مکش اشباع در نظر گرفته شد، از طرفی مکش اشباع در نظر گرفته نشد به دلیل اینکه حالت اشباع در غالب اراضی ماندگار نیست (به استثنا شالیزار). بنابراین نقطه‌ای از منحنی رطوبتی که حالت اشباع نباشد ولی دارای رطوبت زیاد باشد در نظر گرفته شد. در خصوص انتخاب نقطه ظرفیت زراعی؛ با در نظر گرفتن اهمیت شرایط بهینه رطوبتی خاک برای رشد گیاه در این نقطه، مطالعه رفتار تراکمی خاک و اینکه برای رشد ریشه گیاه موجب محدودیت خواهد شد یا خیر بسیار حائز اهمیت است. چرا که در تعیین دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت برای گیاه نیز وضعیت مقاومت فروری خاک در ظرفیت زراعی بسیار مهم بوده و مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. اما انتخاب نقطه رطوبتی کمتر از مکش ۰/۳ بار نیز برای مشخص کردن این نکته بود که آیا تیمارهای اعمال شده در این رطوبت نیز می‌توانند بر رفتار تراکمی اثر گذار باشند یا خیر؛ به عبارت دیگر دامنه تاثیر تیمارها بر رفتار تراکمی از نظر رطوبتی چقدر است. البته لازم به ذکر است که محدود بودن تعداد نقاط رطوبتی به علت محدودیت‌های آزمایشگاهی از نظر تعداد نمونه قابل برداشت، دستگاه‌های موجود و ... بود. با توجه به اینکه این نقطه از منحنی فشردگی خاک از نظر رشد گیاه و عملکرد آن از نظر رطوبتی تاثیر بسیار زیادی دارد، فشردگی خاک در این حالت نیز اهمیت زیادی دارد، چراکه فشردگی خاک با

خشک شد، سپس وزن شدند (W_2). در مرحله بعد نمونه‌ها بر روی همان الک زیر آب شسته شدند. سپس شن مانده بر روی هر الک پس از خشک شدن در آون توزین گردید (W_3). وزن آب خاکدانه‌های هوا خشک شده با قرار دادن ۱۰ گرم خاک هوا خشک از هر نمونه تیمار به مدت ۲۴ ساعت در آون اندازه‌گیری شد و بر پایه $g\ g^{-1}$ محاسبه شد (W_c). در نهایت از رابطه‌های ۱ و ۲ برای برآورد خاکدانه‌های پایدار در آب (WSA_i)^۱ استفاده شد. از روش کلوک (۱۹۸۶) جهت اصلاح شن استفاده شد.

$$WSA_i = (W_{2i} - W_{3i}) / (W_s - \sum W_{3i}) \quad [1]$$

$$W_s = (W_1 / (1 + W_c)) \quad [2]$$

W_s : جرم خشک کل خاکدانه‌ها.

برای محاسبه MWD از رابطه ۳ استفاده شد:

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i WSA_i \quad [3]$$

ا: شاخص کلاس اندازه و n: تعداد الک‌ها که در این آزمایش ۵ سری الک به کار رفت، x_i : میانگین قطر خاکدانه‌های به جا مانده بر روی هر الک که برابر میانگین قطر روزنه‌های الکی که خاکدانه‌ها بر روی آن به جا مانده و قطر روزنه الک بالایی آن بود.

برای انجام آزمایش فشردگی محصور از نمونه‌های دست‌نخورده استفاده شد. به طوری که هر یک از سه سیلندر برداشت شده از هر محل در یکی از مکش‌های ماتریک ۶ (در داخل دستگاه جعبه شن) و ۳۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال (در داخل دستگاه صفحه فشار) به تعادل رسیدند. در مرحله بعد آزمایش فشردگی محصور بر روی آنها انجام شد. برای انجام آزمایش فشردگی محصور، از دستگاه تک‌محوری (CBR) استفاده شد. در آزمایش فشردگی محصور، خاک در درون سیلندر فلزی توسط پیستون متحرک به سمت پایین متراکم شده و تنش فشاری روی پیستون و تغییر حجم خاک به طور پیوسته ثبت می‌شود (کولن، ۱۹۷۴). اعمال بار بر نمونه

¹ Water stable aggregates

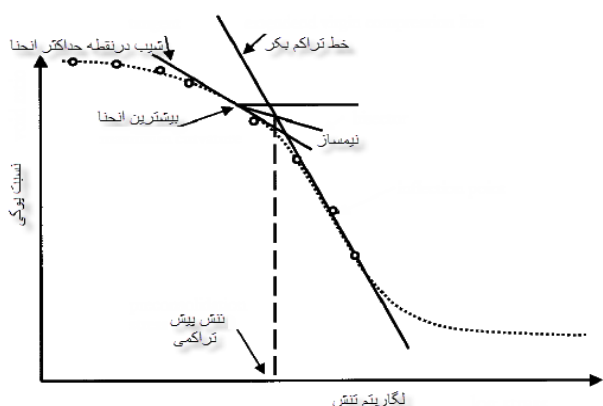
میانگین شیب منحنی از تنش ۱۰۰۰ تا ۸۰۰ کیلو پاسکال در مرحله باربرداری (رابطه ۸) به دست خواهد آمد.

$$C_c = \frac{bc}{\exp(1)} \quad [6]$$

$$C_{s,loading-25kPa} = \frac{e_0 - e_{25kPa}}{\log(25kPa)} \quad [7]$$

$$C_{s,unloading-800kPa} = \frac{e_{final} - e_{800kPa}}{\log(800kPa)} \quad [8]$$

همچنین برای به دست آوردن P_c از روش کاساگراندا (۱۹۳۶) (شکل ۱) استفاده شده است.



شکل ۱- روش کاساگراندا (۱۹۳۶) برای تنش پیش-تراکمی تجزیه و تحلیل آماری.

برای انجام تجزیه واریانس و مقایسه میانگین تیمارها از نرم افزار SAS 9.1 استفاده شد. مقایسه میانگین با آزمون دانکن در سطح ۵ درصد مورد تجزیه قرار گرفت.

نتایج و بحث

ویژگی‌های پایه

در جدول ۱ برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه نمایش داده شده است. بافت این خاک لوم سیلتی بود. pH خاک مورد مطالعه بیشتر از خنثی بوده و در دامنه قلیائیت معتدل قرار داشت. مقدار رسانایی الکتریکی نشان داد که خاک مورد نظر غیرشور است. میزان سنگریزه و پایداری خاکدانه‌های خاک مورد مطالعه کم و میزان چگالی ظاهری خاک مورد بررسی برابر با میزان چگالی ظاهری خاک‌های کشاورزی بود (کرسویل و همیلتون ۲۰۰۲) و دارای مقدار مناسبی برای

تغییر رطوبت خاک به صورت غیر مستقیم بر روی رشد گیاه تاثیر دارد.

با استفاده از فرمول نشست (رابطه ۴) مقدار نسبت پوکی معادل با هر تنش فشاری به دست آمد. منحنی فشردگی، نسبت پوکی در برابر تنش فشاری را بیان می‌کند که تغییرات حجم خاک به چه صورت است. در نهایت از تنش قائم لگاریتم گرفته و با رسم آن در برابر نسبت پوکی منحنی فشردگی محصور به دست آمد. این آزمایش، منحنی تنش-کرنش خاک در حالت غیراشباع را بیان می‌کند و کرنش حجمی ایجاد شده به دلیل خروج هوا از خاک است (کولن و کوپرز ۱۹۸۹).

از رابطه چهار برای محاسبه و ترسیم منحنی تراکم استفاده می‌شود و نتایج این فرمول به صورت عددی و مستقل در قالب جدول و شکل گزارش نمی‌شود. این فرمول مقادیر نسبت پوکی در محور y نمودار تنش-کرنش را می‌دهد. از رابطه ۵ برای محاسبه شاخص تراکم (C_c) و از رابطه ۶ برای محاسبه شاخص تورم (C_s) استفاده می‌شود.

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad [4]$$

H ارتفاع نمونه، e_0 نسبت پوکی اولیه، Δe تغییرات نسبت پوکی و ΔH تغییرات ارتفاع نمونه می‌باشد. مدل گمپرتز (۱۸۲۵)، (رابطه ۵) با استفاده از نرم افزار Solver Excel 2010 بر داده‌های بارگذاری تراکم محصور برازش شد.

$$e = a + c \exp\{-\exp[b(\sigma - m)]\} \quad [5]$$

در رابطه فوق e نسبت پوکی و σ تنش بر حسب کیلوپاسکال و a ، b ، c و m ضرایب تجربی مدل بوده که با برازش مدل بر داده‌های آزمایشگاهی تراکم محصور به دست آمدند.

شاخص تراکم (C_c) بر اساس رابطه ۶ محاسبه شد. گرگوری و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند که شاخص تورم (C_s) بر اساس میانگین شیب منحنی از تنش صفر تا ۲۵ کیلوپاسکال در حالت بارگذاری (رابطه ۷) و

رشد گیاهان است.

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

در جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس پارامتر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها تحت تاثیر تیمار گیاه پوششی و

نوع خاکورزی آمده است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها تحت تاثیر نوع گیاه پوششی و نوع سیستم خاکورزی قرار دارد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه.

شن (%)	رس (%)	سیلت (%)	سنگریزه (%)	pH
۲۷/۵۶	۷/۰۰	۶۵/۴۴	۸/۰۰	۷/۸۵
EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	CEC ($\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1} \text{ soil}$)	چگالی ظاهری (g cm^{-3})	MWD (mm)	CaCO ₃ (%)
۱۷۶/۸۴	۱۰/۹۰	۱/۴۳	۱/۵۰	۱۹/۸۸

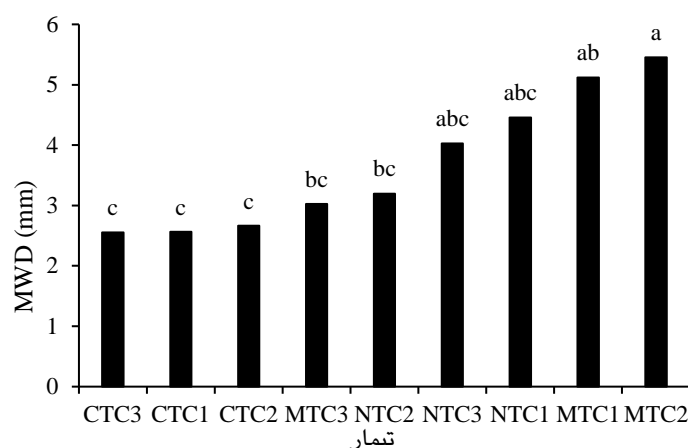
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس پارامتر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها.

MSE	درجه	منبع تغییرات
MWD	آزادی	
۰/۰۱۱ ^(ns)	۲	تکرار
۳/۸۱*	۲	خاکورزی
۲/۱۹*	۲	گیاه پوششی
۴/۱۶*	۴	اثر متقابل
۳/۶۶	۱۶	خطا

*, نشان دهنده تاثیر معنی‌دار در سطح ۵ درصد؛ (ns)، بدون تاثیر معنی‌دار می‌باشند.

شده است، افزایش MWD نشان دهنده بهبود وضعیت ساختمان خاک ناشی از خاکورزی حفاظتی است. همچنین مشاهده می‌شود که کاشت گیاهان پوششی نیز در مقایسه با تیماری که گیاه پوششی ندارد دارای مقدار MWD بالاتری هستند. بیشترین مقدار MWD در تیمار خاکورزی حداقل در دو نوع گیاه پوششی خلر و ماشک به ترتیب برابر با ۵/۴۵ و ۵/۱۲ میلی‌متر به دست آمد.

در شکل ۲ نتایج مقایسه میانگین پارامتر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) در تیمارهای مختلف نمایش داده شده است. نتایج مقایسه میانگین نشان می‌دهد که MWD تحت تاثیر خاکورزی و نوع گیاه پوششی است و تغییر هر کدام سبب ایجاد تغییر معنی‌داری در MWD شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از خاکورزی‌های حفاظتی سبب افزایش MWD



شکل ۲- مقایسه میانگین پارامتر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها.

CT، MT و NT به ترتیب؛ خاک‌ورزی مرسوم، خاک‌ورزی حداقل و بدون خاک‌ورزی، C_1 ، گیاه پوششی ماشک؛ C_2 ، گیاه پوششی خلر؛ C_3 ، بدون گیاه پوششی؛ C_n (CTC_n ، MTC_n ، NTC_n)، برهم‌کنش سطوح مختلف دو فاکتور خاک‌ورزی و گیاه پوششی؛ میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌دار ندارند.

نیروی خارجی می‌تواند باشد.

خاک‌ورزی تاثیر معنی‌داری بر ضریب C_c نداشت، اما گیاه پوششی تاثیر معنی‌داری بر این متغیر داشت (جدول ۳). به طوری‌که نبود گیاه پوششی در دو نوع خاک‌ورزی CT و MT سبب افزایش معنی‌دار C_c شده و بین دو نوع گیاه پوششی در این دو خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. در تیمار NT نیز، عدم وجود گیاه پوششی نسبت به ماشک، C_c را به طور معنی‌داری افزایش داد (شکل ۳). وجود گیاه پوششی باعث افزایش ماده آلی خاک می‌شود (لیبمن و دیویس ۲۰۰۰؛ کوداچه و همکاران ۲۰۲۲، سیتز و همکاران ۲۰۲۲). افزایش ماده آلی باعث کاهش فشردگی خاک و در نتیجه کاهش مقدار C_c می‌شود (ژانگ و همکاران ۲۰۰۵؛ سوراوی و همکاران ۲۰۲۱). بنابراین نبود گیاهان پوششی سبب افزایش C_c می‌شود. احتمالاً کاهش C_c در اعمال گیاهان پوششی به دلیل افزایش خاصیت پیونددهندگی ذرات خاک و کاهش تغییرشکل خاک در برابر نیروهای خارجی و افزایش قابلیت ارتجاع خاک باشد (سوان ۱۹۹۰؛ مصدقی و همکاران ۲۰۰۸). حمزا و اندرسون (۲۰۰۵) و خیمنز و همکاران (۲۰۰۸) گیاهان پوششی را راهکار خوبی برای

تغییرات شاخص‌های منحنی فشردگی خاک در مکش

۶ کیلوپاسکال

در جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس تغییرات شاخص‌های منحنی فشردگی شامل P_c ، C_c و C_{SL} نمایش داده شده است. همانگونه که مشخص است تغییرات معنی‌دار در نتیجه تغییر نوع گیاه پوششی رخ داده است. تیمارهای مختلف خاک‌ورزی و گیاه پوششی تاثیر معنی‌داری بر P_c نداشتند (جدول ۳) که ممکن است به دلیل رطوبت زیاد خاک مورد آزمایش باشد. در مکش ۶ کیلوپاسکال رطوبت در خاک نسبت به دیگر مکش‌ها بیشتر است، رطوبت در خاک باعث پیچیده شدن شرایط فشردگی خاک شده است. با مقایسه میانگین مقادیر تیمارها می‌توان دریافت که تیمار NTC_2 ، P_c را به طور معنی‌داری نسبت به تیمار CTC_2 افزایش داد (شکل ۲). خاک تحت تیمار NT نسبت به خاک خاک‌ورزی شده سبب افزایش چگالی ظاهری، کاهش تخلخل کل و تخلخل تهویه‌ای شده که منجر به مقاومت مکانیکی بیشتر تیمار NT در برابر تنش خارجی گردیده است (دا ویگا و همکاران، ۲۰۰۷). از دلایل دیگر افزایش P_c در NT نسبت به CT، دست نخورده بودن خاک در NT و افزایش آستانه تحمل خاک در برابر

کاهش اثر فشردگی خاک معرفی کردند. استیسیویچ و کلادیکو (۲۰۰۵) بیان کردند که استفاده از گیاهان پوششی سبب بهبود مقاومت ساختمان خاک می‌شود، بنابراین استفاده از این گیاهان باعث کاهش فشردگی خاک در مزرعه شد. بین سه سطح خاک‌ورزی در C_1 و C_3 تفاوتی مشاهده نشد ولی در C_2 ، MT موجب کاهش معنی‌دار C_c نسبت به NT شد. شاید مخلوط شدن گیاهان پوششی با خاک در عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری در MT باعث افزایش دامنه تحمل خاک نسبت به تنش اعمال شده در مقایسه با NT شده است که، در آن بقایا در سطح خاک مانده و تاثیر کمی در افزایش مقاومت خاک داشته است. همچنین تغییرات C_c در خاک‌ورزی‌های مختلف را به اثر این فعالیت‌ها بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نسبت داد. در همین راستا ریچرت و همکاران (۲۰۱۸) و پش و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که بین پایداری خاکدانه و C_c همبستگی منفی وجود دارد. این موضوع در حالی است که در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده، همبستگی مثبت بین C_c و میانگین قطرات خاکدانه‌ها گزارش شده است (بلانکو-کانکیو و لال ۲۰۰۷؛ خیائو و همکاران ۲۰۲۲).

گیاه پوششی تاثیر معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) بر C_{SL} داشت ولی اثر خاک‌ورزی بر این پارامتر معنی‌دار نبود (جدول ۲). مقایسه میانگین تیمارها در شکل ۳ نشان داد که تیمار MTC_3 نیز مقدار این ضریب را نسبت به تیمار MTC_1 و هر سه تیمار گیاه پوششی در NT افزایش داد. اما سه سطح گیاه پوششی در دو تیمار

کاهش اثر فشردگی خاک معرفی کردند. استیسیویچ و کلادیکو (۲۰۰۵) بیان کردند که استفاده از گیاهان پوششی سبب بهبود مقاومت ساختمان خاک می‌شود، بنابراین استفاده از این گیاهان باعث کاهش فشردگی خاک در مزرعه شد. بین سه سطح خاک‌ورزی در C_1 و C_3 تفاوتی مشاهده نشد ولی در C_2 ، MT موجب کاهش معنی‌دار C_c نسبت به NT شد. شاید مخلوط شدن گیاهان پوششی با خاک در عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری در MT باعث افزایش دامنه تحمل خاک نسبت به تنش اعمال شده در مقایسه با NT شده است که، در آن بقایا در سطح خاک مانده و تاثیر کمی در افزایش مقاومت خاک داشته است. همچنین تغییرات C_c در خاک‌ورزی‌های مختلف را به اثر این فعالیت‌ها بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نسبت داد. در همین راستا ریچرت و همکاران (۲۰۱۸) و پش و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که بین پایداری خاکدانه و C_c همبستگی منفی وجود دارد. این موضوع در حالی است که در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده، همبستگی مثبت بین C_c و میانگین قطرات خاکدانه‌ها گزارش شده است (بلانکو-کانکیو و لال ۲۰۰۷؛ خیائو و همکاران ۲۰۲۲).

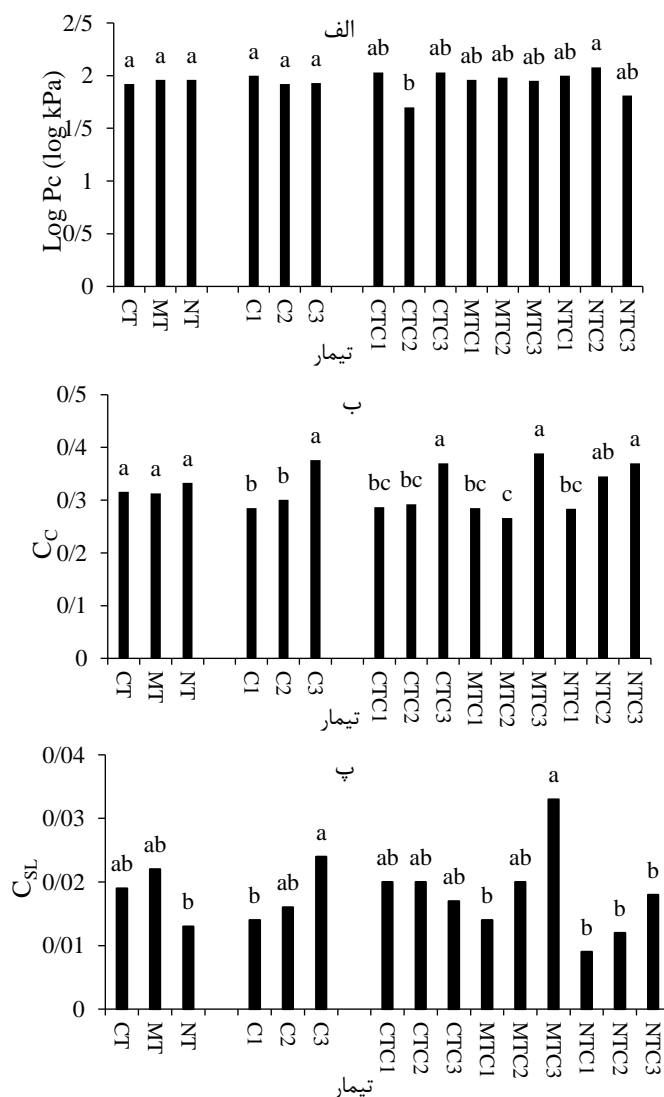
گیاه پوششی تاثیر معنی‌داری (در سطح احتمال ۵ درصد) بر C_{SL} داشت ولی اثر خاک‌ورزی بر این پارامتر معنی‌دار نبود (جدول ۲). مقایسه میانگین تیمارها در شکل ۳ نشان داد که تیمار MTC_3 نیز مقدار این ضریب را نسبت به تیمار MTC_1 و هر سه تیمار گیاه پوششی در NT افزایش داد. اما سه سطح گیاه پوششی در دو تیمار

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس پارامترهای منحنی فشردگی محصور در مکش ۶ کیلوپاسکال.

MSE			درجه آزادی	منبع تغییرات
C_{SL}	C_c	$\log P_c$		
۰/۰۰۰۱ ^(ns)	۰/۰۰۰۱ ^(ns)	۰/۰۱۱ ^(ns)	۲	تکرار
۰/۰۰۰۲ ^(ns)	۰/۰۰۰۹ ^(ns)	۰/۰۰۵۹ ^(ns)	۲	خاک‌ورزی
۰/۰۰۰۲۳*	۰/۰۲۱**	۰/۰۱۶ ^(ns)	۲	گیاه پوششی
۰/۰۰۰۰۷ ^(ns)	۰/۰۰۲۱ ^(ns)	۰/۰۷۵ ^(ns)	۴	اثر متقابل
۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۳۵۷	۱۶	خطا

P_c ، تنش پیش-تراکمی (کیلوپاسکال)؛ C_c ، شاخص فشردگی؛ C_{SL} ، شاخص تورم بارگذاری؛ *، نشان دهنده تاثیر معنی‌دار در سطح ۵ درصد؛ **،

نشان دهنده تاثیر معنی دار در سطح ۱ درصد؛ (ns)، بدون تاثیر معنی دار می باشند.



شکل ۳- مقایسه میانگین پارامترهای منحنی فشردگی الف) P_c ، ب) C_c ، پ) C_{SL} در مکش ۶ کیلو پاسکال.

CT، MT و NT به ترتیب؛ خاکورزی مرسوم، خاکورزی حداقل و بدون خاکورزی، C_1 ، گیاه پوششی ماشک؛ C_2 ، گیاه پوششی خمر؛ C_3 ، بدون گیاه پوششی؛ C_n (CTC_n ، MTC_n ، NTC_n)، برهم کنش سطوح مختلف دو فاکتور خاکورزی و گیاه پوششی؛ P_c ، تنش پیش-تراکمی؛ C_c ، شاخص فشردگی؛ C_{SL} ، شاخص تورم بارگذاری؛ در هر بخش از ستون‌ها، میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی دار ندارند.

تغییرات شاخص‌های منحنی فشردگی خاک در مکش

۳۰ کیلو پاسکال

در جدول ۴ آنالیز واریانس تغییرات ویژگی‌های منحنی فشردگی ناشی از نوع خاکورزی و نوع پوشش گیاهی نمایش داده شده است. همانگونه که مشخص است در مکش ۳۰ کیلو پاسکال تیمارها تاثیر معنی داری نداشتند

و هیچ کدام از شاخص‌های منحنی فشردگی تغییر معنی-داری از خود نشان ندادند. در شکل ۴ نتایج مقایسه میانگین تغییرات C_c نمایش داده شده است. در تیمار MT، C_3 سبب افزایش معنی دار C_c نسبت به C_2 گردید. کوآن و همکاران (۲۰۰۷) بیان کردند که با کاهش مقدار مواد آلی فشردگی خاک افزایش می‌یابد، بنابراین در تیمارهایی که مواد آلی در آنها پایین است انتظار بر این است که

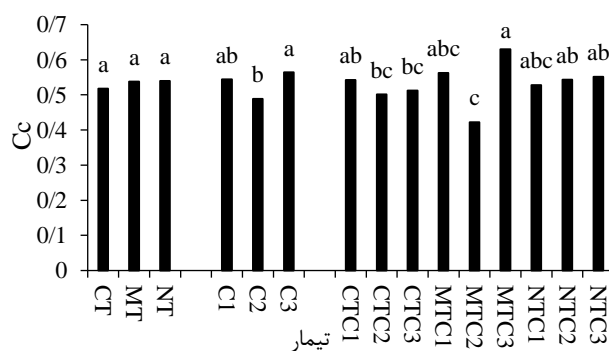
رطوبت هستند (هورن و همکاران ۱۹۹۸). در مکش ۶ کیلوپاسکال مقدار رطوبت بیشتر بوده و ویژگی‌های مکانیکی خاک اختلاف خود را در اثر سیستم‌های کشت و گیاهان مختلف بهتر نشان داده‌اند. به‌طور کلی نتایج نشان داد که با افزایش مکش در خاک (کاهش رطوبت) P_c افزایش خواهد یافت. دلیل افزایش P_c در مکش‌های بالا مربوط به کاهش رطوبت خاک است، خشک شدن خاک سبب افزایش شاخص‌های فشردگی خاک می‌شود، این موضوع در مطالعات پیشین خیائو و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش شده است. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که در مکش‌های کم (۶ کیلوپاسکال) مقادیر کم C_c (شکل ۳) و در مکش‌های بیشتر (۳۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) بیشینه مقادیر C_c برای CT به دست آمد (شکل‌های ۴ و ۶). علت این مسئله تغییر کمتر در ساختار خاک به علت وجود رطوبت در منافذ خاک (شرایط غیر اشباع) و جلوگیری از فشردگی در مکش ۶ کیلوپاسکال است.

خاصیت فشردگی بالاتری داشته باشند. آراگون و همکاران (۲۰۰۰) نیز دریافتند که یک رابطه منفی بین حداکثر فشردگی و مقدار مواد آلی خاک وجود دارد. مصدقی و همکاران (۲۰۰۰b) گزارش کردند که مواد آلی علاوه بر افزایش دامنه تردپذیری، فشردگی خاک را کاهش داده و سبب کاهش فشردگی خاک در خاک‌های زیرین نیز می‌شود. مقدار P_c تحت تاثیر تیمارهای مختلف قرار نگرفت (جدول ۳). وگلر و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند که خاک‌ورزی حفاظتی در طول یک دوره ۱۰ ساله باعث افزایش مقاومت خاک در برابر تنش در لایه رویی، در مقایسه با CT شد و مقدار P_c در CT، ۲۱ کیلوپاسکال و در خاک‌ورزی حفاظتی ۲۸ کیلوپاسکال گزارش شد. تعداد پارامترهایی که در مکش ۳۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال تحت تاثیر تیمارها قرار گرفتند، نسبت به مکش ۶ کیلوپاسکال، بسیار کمتر هستند. علت این موضوع را می‌توان به تغییر مقدار رطوبت نسبت داد، چراکه ویژگی‌های مکانیکی خاک به شدت تابع مقدار

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس شاخص‌های منحنی فشردگی در مکش ۳۰ کیلوپاسکال.

منبع تغییرات	درجه آزادی	MSE		
		C_{SL}	C_c	Log P_c
تکرار	۲	۰/۰۰۰۹ ^(ns)	۰/۰۰۷۳ ^(ns)	۰/۰۱۲۷ ^(ns)
خاک‌ورزی	۲	۰/۰۰۰۰۰۶ ^(ns)	۰/۰۰۲۷ ^(ns)	۰/۰۱۵۳ ^(ns)
گیاه پوششی	۲	۰/۰۰۰۰۰۵ ^(ns)	۰/۰۲۷۵ ^(ns)	۰/۰۰۱۱ ^(ns)
اثر متقابل	۴	۰/۰۰۰۰۰۸ ^(ns)	۰/۰۲۱۷ ^(ns)	۰/۰۵۶۴ ^(ns)
خطا	۱۶	۰/۰۰۰۰۰۵	۰/۰۰۷۴	۰/۰۴۰

P_c ، تنش پیش تراکمی (کیلوپاسکال)؛ C_c ، شاخص فشردگی؛ C_{SL} ، شاخص تورم بارگذاری؛ (ns)، بدون تاثیر معنی‌دار می‌باشند.



شکل ۴- مقایسه میانگین شاخص فشردگی در مکش ۳۰ کیلوپاسکال.

CT, MT و NT به ترتیب؛ خاک‌ورزی مرسوم، خاک‌ورزی حداقل و بدون خاک‌ورزی، C₁، گیاه پوششی ماشک؛ C₂، گیاه پوششی خمر؛ C₃، بدون گیاه پوششی؛ C_n (CTC_n، MTC_n، NTC_n)، برهم‌کنش سطوح مختلف دو فاکتور خاک‌ورزی و گیاه پوششی؛ در هر بخش از ستون‌ها میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌دار ندارند.

مشخص است در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال نیز همانند مکش ۳۰ کیلوپاسکال تغییرات معنی‌داری در سه پارامتر مورد بررسی رخ نداده است، به جز اثر گیاه پوششی بر مقادیر C_C، که معنی‌دار شد.

تغییرات شاخص‌های منحنی فشردگی خاک در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال

در جدول ۵ آنالیز واریانس تغییرات شاخص‌های منحنی فشردگی ناشی از تغییر سیستم خاک‌ورزی و نوع پوشش گیاهی نمایش داده شده است. همانگونه که

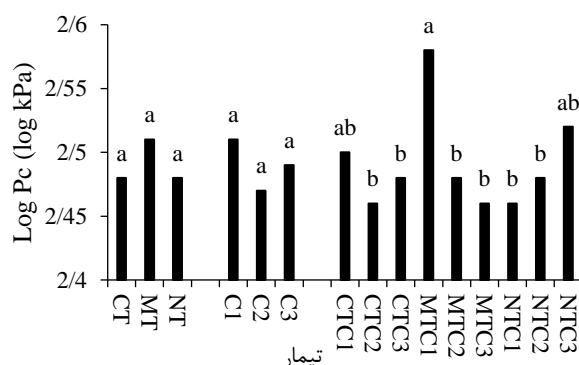
جدول ۵- تجزیه واریانس شاخص‌های منحنی فشردگی در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال.

MSE			درجه آزادی	منبع تغییرات
C _{SL}	C _C	Log P _c		
۰/۰۰۰۰۰۰ ^(ns)	۰/۰۰۵۱ ^(ns)	۰/۰۰۲۲ ^(ns)	۲	تکرار
۰/۰۰۰۰۰۰ ^(ns)	۰/۰۱۱۱ ^(ns)	۰/۰۰۱۴ ^(ns)	۲	خاک‌ورزی
۰/۰۰۰۰۰۸ ^(ns)	۰/۰۴۹*	۰/۰۰۳۲ ^(ns)	۲	گیاه پوششی
۰/۰۰۰۰۰۱ ^(ns)	۰/۰۳۱ ^(ns)	۰/۰۰۶۱ ^(ns)	۴	اثر متقابل
۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۱۱۴	۰/۰۰۱۷	۱۶	خطا

P_c، تنش پیش-تراکمی (کیلوپاسکال)؛ C_C، شاخص فشردگی؛ C_{SL}، شاخص تورم بارگذاری؛ *، نشان دهنده تاثیر معنی‌دار در سطح ۵ درصد؛ (ns)، بدون تاثیر معنی‌دار می‌باشند.

فشردگی خاک بسیار بالا بوده است. در همین راستا دکستر (۱۹۸۸) بیان کرد که مقاومت خاک تابعی از ویژگی ذرات اولیه خاک (شن، سیلت و رس) است که این ویژگی‌ها اثر خود را در ساختمان خاک نشان می‌دهند. پیرا و همکاران (۲۰۰۷) یک رابطه رگرسیونی بین مکش ماتریک و P_c ارائه دادند و دریافتند که با افزایش مکش (تا ۵۰۰ کیلوپاسکال) مقدار P_c به طور منظم افزایش یافت اما در مکش‌های بیشتر از ۵۰۰ کیلوپاسکال روند تغییرات P_c به صورت نامنظم بود. علت این موضوع را می‌توان به نقش تغییر مقدار آب در منافذ خاک نسبت داد. چراکه تغییر مقدار آب سبب تغییر در ویژگی‌های فشردگی خاک می‌شود.

در شکل‌های ۵ و ۶، به ترتیب مقایسه میانگین تغییرات C_C و P_c نمایش داده شده است. نتایج نشان داده است که بیشینه مقدار LogP_c در شرایط خاک‌ورزی حداقل برابر ۲/۵۱ کیلوپاسکال به دست آمده است. مقدار P_c در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال تحت تاثیر تیمار MTC₁ افزایش معنی‌داری نسبت به سایر تیمارها به جز CTC₁ و NTC₃ نشان داد (شکل ۵). افزایش P_c در تیمار خاک‌ورزی حفاظتی-گیاه پوششی ماشک به علت برهمکنش نوع خاک‌ورزی و نوع گیاه پوششی با مقدار رطوبت در این مکش می‌باشد. همچنین دلیل اصلی این مسئله را شاید بتوان به بهبود وضعیت ساختمان خاک نسبت داد، چراکه تاثیر ساختمان خاک بر خصوصیات

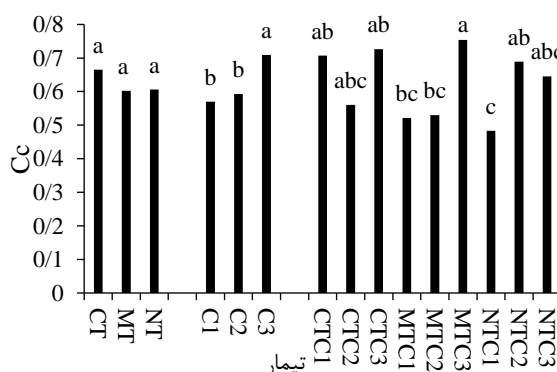


شکل ۵- مقایسه میانگین تنش پیش تراکمی در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال.

CT، MT و NT به ترتیب؛ خاکورزی مرسوم (برگرداندار)، خاکورزی حداقل (چیزل) و بدون خاکورزی، C₁، گیاه پوششی ماشک؛ C₂، گیاه پوششی خلر؛ C₃، بدون گیاه پوششی؛ C_n (NTC_n، MTC_n، CTC_n)، برهم‌کنش سطوح مختلف دو فاکتور خاکورزی و گیاه پوششی؛ در هر بخش از ستون‌ها میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌دار ندارند.

اشاره شد گیاهان پوششی به علت افزایش قابلیت کشسانی خاک فشردگی را کاهش می‌دهند و تیمار C₃ (بدون گیاه پوششی) بیشتر مستعد فشردگی است.

در شکل ۶ مقایسه میانگین تغییرات C_c ناشی از تغییر نوع گیاه پوششی و سیستم خاکورزی نمایش داده شده است. بیشینه مقدار C_c در تیمار MTC₃ برابر ۰/۷۵۴ به دست آمده است. همانطور که در مکش‌های ماتریک کم‌تر



شکل ۶- مقایسه میانگین شاخص فشردگی در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال.

CT، MT و NT به ترتیب؛ خاکورزی مرسوم، خاکورزی حداقل و بدون خاکورزی، C₁، گیاه پوششی ماشک؛ C₂، گیاه پوششی خلر؛ C₃، بدون گیاه پوششی؛ C_n (NTC_n، MTC_n، CTC_n)، برهم‌کنش سطوح مختلف دو فاکتور خاکورزی و گیاه پوششی؛ در هر بخش از ستون‌ها میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌دار ندارند.

آمد. یکی از علل افزایش P_c در کشت NT نسبت به CT دست نخورده بودن خاک در کشت NT و افزایش آستانه تحمل خاک در برابر نیروی خارجی باشد. در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال اثر متقابل MTC₁ بیشینه مقدار P_c را به همراه داشت. به‌طورکلی با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که در مکش پایین، یعنی ۶ و ۳۰ کیلوپاسکال، نسبت به مکش دیگر ۱۵۰۰ کیلوپاسکال

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش اثر سه نوع مختلف خاکورزی شامل CT، MT و NT و همچنین دو نوع گیاه پوششی ماشک و خلر بر ویژگی‌های منحنی فشردگی محصور در سه مکش ماتریک ۶، ۳۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال مورد بررسی قرار گرفت. در مکش ۶ کیلوپاسکال حداکثر P_c مربوط به NT و گیاه خلر (۱۲۰/۲ کیلوپاسکال) به دست

آمده نشان داد که استفاده از خاک‌ورزی‌های حفاظتی شامل NT و MT سبب بهبود وضعیت فشردگی خاک می‌شود و گیاهان پوششی نیز تاثیر مهمی بر ارتقای پایداری خاک دارند. همچنین نتایج نشان داد که برهمکنش سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی و نوع گیاه پوششی باعث افزایش پایداری خاک و کاهش تخریب‌های ناشی از فشردگی خاک می‌شود. بنابراین توصیه می‌شود در اراضی دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک، همانند بخش عمده‌ای از اراضی ایران، از خاک‌ورزی حفاظتی و گیاهان پوششی در تناوب زراعی برای بهبود وضعیت فشردگی خاک و جلوگیری از سایر عوامل مخرب استفاده گردد.

اختلاف بین ویژگی‌های فشردگی به خوبی مشخص می‌شود و علت این موضوع را باید به مقدار بیشتر رطوبت در این مکش‌ها نسبت داد. ویژگی‌های فشردگی خاک وابستگی زیادی به مقدار رطوبت موجود در خاک دارند و با افزایش مقدار رطوبت تغییرات آنها به طور معنی‌داری قابل مشاهده است. به‌طورکلی منحنی فشردگی خاک در همه مکش‌ها کمتر تحت تاثیر خاک‌ورزی بود. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که خاک‌ورزی‌های حفاظتی باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک شده است، بهبود وضعیت مکانیکی خاک سبب کاهش فرسایش، افزایش عملکرد و افزایش حاصلخیزی خاک خواهد شد. به‌طورکلی نتایج به دست

منابع مورد استفاده

- Aragón A, Garcia MG, Filgueira RR and Pachepsky YA, 2000. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; the relationship with organic carbon and water content. *Soil and Tillage Research* 56(3-4): 197-204.
- Atkinson J 1993. *An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations: Through Critical State Soil Mechanics*. McGraw-Hill Book Company (UK) Ltd.
- Bayat H, Ebrahimi E and Fallah M, 2018. Estimation of soil moisture using confined compression curve parameters. *Geoderma* 318: 64-77.
- Blanco-Canqui H and Lal R, 2007. Regional assessment of soil compaction and structural properties under no-tillage farming. *Soil Science Society of America Journal* 71: 1770-1778
- Bronick CJ and Lal R, 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124(1-2): 3-22.
- Casagrande A, 1936. The determination of pre-consolidation load and its practical significance. Vol.3, P.60, In: *Proceedings of International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Cambridge.
- Chakraborty K and Mistri B, 2017. Estimation of soil compaction from bulk density and its effect on crop production: A case study of Burdwan-I Block, West Bengal. *Indian Journal of Spatial Science* 8(2): 101-107.
- Chen F, Sun X and Lu H, 2022. Influence of water content on the mechanical characteristics of mudstone with high smectite content. *Geofluids*. <https://doi.org/10.1155/2022/9855213>
- Cresswell HP and Hamilton GJ, 2002. Bulk density and pore space relations. Pp.35-58, In: McKenzie NJ, Cresswell H and Coughlan K. (eds.), *Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation: A Laboratory Melbourne Handbook*, CSIRO Publishing, Australia.
- Da Veiga M, Horn R, Reinert DJ and Reichert JM, 2007. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. *Soil and Tillage Research* 92(1-2): 104-113.
- Derpsch R, Friedrich T, Kassam A and Li H, 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 3(1): 1-25.
- Dexter AR, 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research* 11(3-4): 199-238.
- Ebrahimi E, Bayat H and Fallah M, 2021. Relationship of soil moisture characteristic curve and mechanical properties in Entisols and Inceptisols of Iran. *Geoderma Regional* 27: e00434.
- Hamza MA and Anderson WK, 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, Richards BG, Gräsle W, Baumgartl T and Wiermann C, 1998. Theoretical principles for modelling soil strength and wheeling effects a review. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 161(4): 333-346.
- Huo L, Liu J, Abbas A, Ding Q, Wang H, Zhou Z and Bai Z, 2022. Effects of dry bulk density and water content on compressive characteristics of wet clayey paddy soil. *Agronomy Journal* 114(4): 2598-2607.
- Imhoff S, Da Silva AP and Fallow D, 2004. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of America Journal* 68(1): 17-24.
- Jimenez RL, Gonçalves WG, de Araújo Filho JV, de Assis RL, Pires FR and Silva GP, 2008. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho Growth of cover crops under different levels of soil compaction of a Typic Red Latosol. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi* 12(2): 116-121.
- Junior MD and Pierce FJ, 1995. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil technology* 8(2): 139-151.
- 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. Pp.513–583, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*.
- Keller T, Lamandé M, Schjønning P and Dexter AR, 2011. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma* 163(1-2): 13-23.
- Kemper WD and Rosenau RC, 1986. Aggregate stability and size distribution. Pp.425–442, In: Klute A, (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Kemper WD and Chepil WS, 1965. Size distribution of aggregates. Pp.499–510, In: Klute A, (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Koolen AJ and Kuipers H, 1989. Soil deformation under compressive forces. Pp. 37-52, In: *Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils*, Springer, Dordrecht.
- Koolen AJ, 1974. A method for soil compactibility determination. *Journal of Agricultural Engineering Research* 19(3): 271-278.
- Koudahe K, Allen SC and Djaman K, 2022. Critical review of the impact of cover crops on soil properties. *International Soil and Water Conservation Research* 10(3): 343-354
- Kuan HL, Hallett PD, Griffiths BS, Gregory AS, Watts CW and Whitmore AP, 2007. The biological and physical stability and resilience of a selection of Scottish soils to stresses. *European Journal of Soil Science* 58(3): 811-821.
- Larson WE, Gupta SC and Useche RA, 1980. Compression of agricultural soils from eight soil orders 1. *Soil Science Society of America Journal* 44(3): 450-457.
- Lebert M and Horn R, 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil and Tillage Research* 19(2-3): 275-286.
- Liebman M and Davis AS, 2000. Integration of soil, crop and weed management in low-external-input farming systems. *Weed Research Oxford* 40(1): 27-48.
- Lin L, Han S and Wang E, 2016. Effect of organic matter and clay content on compression rebound characteristics of black soil. *Acta Pedologica Sinica* 53: 1138–1147
- Mahboubi AA, Lal R and Faussey NR, 1993. Twenty-eight years of tillage effects on two soils in Ohio. *Soil Science Society of America Journal* 57(2): 506-512.
- Mosaddeghi MR, Hajabbasi MA, Hemmat A and Afyuni M, 2000a. Compactibility of Lavark soil as affected by soil moisture content and farmyard manure. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 3(4): 27-40. (In Persian with English abstract).
- Mosaddeghi MR, Hajabbasi MA, Hemmat A and Afyuni M, 2000b. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil and Tillage Research* 55(1-2): 87-97.
- Klute A and Dirksen C, 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity. Pp. 687-734, In: Klute A, (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Okovido JO and Obroku EO, 2021. Study of density and void ratio relation for reconstituted tropical residual soil at varying fines contents. *Nigerian Journal of Technology* 40(3): 371-378.

- Pereira JO, Défossez P and Richard G, 2007. Soil susceptibility to compaction by wheeling as a function of some properties of a silty soil as affected by the tillage system. *European Journal of Soil Science* 58(1): 34-44.
- Pesch C, Lamandé M, de Jonge LW, Norgaard T, Greve MH and Moldrup P, 2020. Compression and rebound characteristics of agricultural sandy pasture soils from South Greenland. *Geoderma* 380: 114608.
- Pytko J, 2001. Load effect 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.
- Reichert JM, Mentges MI, Rodrigues MF, Cavalli JP, Awe GO and Mentges LR, 2018. Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture. *Catena* 165: 345-357.
- Saffih-Hdadi K, Défossez P, Richard G, Cui YJ, Tang AM and Chaplain V, 2009. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. *Soil and Tillage Research* 105(1): 96-103.
- Schwarz D, Pagáč M, Petruš J and Polzer S, 2022. Effect of water-induced and physical aging on mechanical properties of 3D printed elastomeric polyurethane. *Polymers* 14(24): 5496.
- Seitz D, Fischer LM, Dechow R, Wiesmeier M and Don A, 2022. The potential of cover crops to increase soil organic carbon storage in german croplands. *Plant and Soil* 1-17.
- Sharratt B, Zhang M and Sparrow S, 2006. Twenty years of tillage research in subarctic Alaska: I. Impact on soil strength, aggregation, roughness, and residue cover. *Soil and Tillage Research* 91(1-2): 75-81.
- Soane BD, 1990. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research* 16(1-2): 179-201.
- Stengel P, 1990. Characterization of the structural state of the soil. Objectives and methods. *Soil structure and its evolution, Laon (France)* 9: 15-36.
- Stipešević B and Kladičko EJ, 2005. Effects of winter wheat cover crop desiccation times on soil moisture, temperature and early maize growth. *Plant Soil Environment* 51(6): 255-61.
- Suravi KN, Attenborough K, Taherzadeh S, Macdonald AJ, Powlson DS, Ashton RW and Whalley WR, 2021. The effect of organic carbon content on soil compression characteristics. *Soil and Tillage Research* 209: 104975.
- Tang AM, Cui YJ, Eslami J and Défossez P, 2009. Analysing the form of the confined uniaxial compression curve of various soils. *Geoderma* 148(3-4): 282-290.
- Vogeler I, Horn R, Wetzels H and Krümmelbein J, 2006. Tillage effects on soil strength and solute transport. *Soil and Tillage Research* 88(1-2): 193-204.
- Wei P, Zheng YY, Xiong Y, Zhou S, Al-Zaoari K and Zaoui A, 2022. Effect of water content and structural anisotropy on tensile mechanical properties of montmorillonite using molecular dynamics. *Applied Clay Science* 228: 106622.
- Xiao Z, Yu N, An J, Zou H and Zhang Y, 2022. Soil compressibility and resilience based on uniaxial compression loading test in response to soil water suction and soil organic matter content in Northeast China. *Sustainability* 14(5): 2620.
- Zhang B, Horn R and Hallett PD, 2005. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 69(3): 864-871.