



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۲ | اسفند ۱۴۰۰ (ص ۳۰۳۱-۳۰۱۹)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.335187.669152>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Investigation of Soil Mechanical Resistance under Different Levels of Compaction and Cementation Treatments and the Effect of Maize and Wheat Root Development on It in Experimental Condition

EHSAN GHEZELBASH¹, MOHAMMAD HOSSEIN MOHAMMADI^{*}, MAHDI SHORAF¹

1. Department of Soil Science, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: Dec. 16, 2021- Revised: Jan. 4, 2022- Accepted: Jan. 8, 2022)

ABSTRACT

Increasing the soil mechanical resistance firstly strengthens the soil and causes its stability against external factors, and on the other hand, restricts root development and the process of root water uptake from around soil. In this study, the limitations and possible benefits of soil mechanical resistance in an optimal moisture condition were investigated. Two factors of compaction and cementation were used to increase the soil mechanical resistance at wet soil and to prevent the effects of moisture fluctuation on the initial soil mechanical resistance, a suction buffer system was used to stabilize soil moisture at the matric suction of 40 cm (aeration porosity equal to 10%). 132 experimental units at different levels of compaction (bulk densities equal to 1.52, 1.56, 1.6, 1.66, 1.69, and 1.71 Mg.m⁻³) and cementation (added cement equal to 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 and 1.5 percentage) treatments, maize and wheat plants were cultivated to determine the possible effect of root development on increasing the initial soil mechanical resistance. The results showed that the soil mechanical resistance increased from low to restricting values due to both compaction and cementation treatments, and a range of loose to strong soils was created due to these two treatments. Soil mechanical resistance in the control treatment and some initial levels of the two compaction and cementation treatments were in the range of loose soils, but the root development caused a significant increase in soil strength in control and compacted treatments. On the other hand, root development caused the soil limitation in terms of soil water availability to exceed the critical limit (2.5 MPa). Therefore, according to the expected function of the soil, changes in mechanical strength due to compaction, cement, and root development can be considered as an opportunity or constraint.

Keywords: Loose Soil, Strong Soil, Suction Buffer System, Moist Soil, Restricted Mechanical Resistance.

بررسی مقاومت مکانیکی خاک تحت سطوح مختلف تیمارهای تراکم و سیمانی شدن و تأثیر توسعه ریشه ذرت و گندم بر آن در شرایط آزمایشگاهی

احسان قزلباش^۱، محمدحسین محمدی^{۱*}، مهدی شرفا^۱

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۱۵ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸)

چکیده

افزایش مقاومت مکانیکی خاک از طرفی سبب مستحکم‌تر شدن خاک و ثبات آن در برابر عوامل بیرونی می‌شود و از طرفی سبب محدودیت توسعه ریشه و فرایند جذب آب توسط ریشه از خاک اطراف آن می‌گردد. در این مطالعه محدودیت‌ها و مزایای احتمالی ناشی از مقاومت مکانیکی خاک در وضعیت بهینه رطوبتی بررسی شد. از دو عامل تراکم و سیمانی کردن به منظور افزایش مقاومت به فروری خاک مرطوب استفاده شد و برای جلوگیری از اثرات نوسان رطوبت بر مقاومت مکانیکی اولیه خاک، از سامانه تثبیت مکش استفاده شد تا رطوبت خاک در مکش ماتریک ۴۰ سانتی‌متر (معادل با تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد) تثبیت گردد. ۱۳۲ واحد آزمایشی (گلدان) در سطوح مختلف تیمارهای تراکم (جرم مخصوص ظاهری معادل با ۱/۵۲، ۱/۵۶، ۱/۶، ۱/۶۶، ۱/۶۹ و ۱/۷۱ مگاگرم بر مترمکعب) و سیمان (سیمان اضافه شده معادل با صفر، ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹، ۱/۲ و ۱/۵ درصد جرمی) اقدام به کشت گیاهان ذرت و گندم شد تا اثر احتمالی توسعه ریشه بر افزایش مقاومت مکانیکی اولیه خاک در قالب یک آزمایش فاکتوریل و طرح کامل تصادفی تعیین گردد. نتایج نشان داد که مقاومت مکانیکی خاک در اثر هر دو تیمار تراکم و سیمان از مقادیر کم تا مقادیر محدودکننده افزایش یافت و دامنه‌ای از خاک‌های سست تا مستحکم در اثر این دو تیمار ایجاد شد. مقاومت مکانیکی خاک در تیمار شاهد و برخی سطوح اولیه دو تیمار تراکم و سیمان در حد خاک‌های سست قرار داشت ولی توسعه ریشه گیاه سبب شد استحکام خاک در تیمار شاهد و تراکم به مقدار قابل توجهی افزایش یابد. از طرفی توسعه ریشه سبب شد محدودیت خاک از نظر در دسترس بودن آب برای گیاه فراتر از حد بالای دامنه بحرانی (۲/۵ مگاپاسکال) قرار گیرد؛ بنابراین باتوجه به کارکرد مورد انتظار خاک، تغییرات مقاومت مکانیکی در اثر تراکم، سیمان و توسعه ریشه می‌تواند به‌عنوان فرصت یا محدودیت عمل نماید.

واژه‌های کلیدی: حد بحرانی مقاومت مکانیکی خاک، جذب آب، چسبندگی ذرات.

مقدمه

ناپایداری خاک در مقیاس‌های بزرگ‌تر سبب حذف توده‌های سطحی، مانند خزش خاک و رانش زمین می‌شود که پتانسیل تغییر کامل زمین منظر و تهدید حیات را دارد (Petley, 2012). درک چگونگی افزایش پایداری خاک در کاهش اثرات ناشی از فرسایش و هدررفت توده‌های خاکی ضروری است (Burak et al., 2021). فرسایش خاک در مقیاس‌های متنوعی ایجاد می‌شود، اما عامل همه آن‌ها در نتیجه غلبه نیروهای برشی حاصل از گرانش زمین بر نیروهای اصطکاکی که ذرات خاک را کنار هم نگه می‌دارند اتفاق می‌افتد. جایجایی توده‌های خاک بیش‌تر در شرایطی مشاهده می‌شود که خاک به وضعیت اشباع آبی نزدیک می‌شود و یا در مسیر جریان‌ات هیدرولیکی قرار می‌گیرد (Iverson, 2000).

خاک ذاتاً ناهمسانگرد^۱ است و در برابر نیروهای برشی تغییر وضعیت می‌دهد (Al-Karni & Al-Shamrani, 2000). در رخدادهای کوچک مقیاس، فرسایش ناشی از تنش برشی^۲ می‌تواند با تغییر موثر ویژگی‌های فیزیکی و بیولوژیکی خاک کنترل گردد (Burak et al., 2021).

رانش زمین عمدتاً در عمق ۲ متری ابتدایی خاک و پیرو بارش شدید باران رخ می‌دهد (Bordoni et al., 2016). چنین بارش‌هایی سبب افزایش ناگهانی مقدار آب خاک و کاهش مکش ماتریک می‌شود که خود باعث کاهش مقاومت مکانیکی خاک^۳ و فراهمی شرایط برای پدیده رانش زمین می‌شود (Montrasio & Valentino, 2008). کاشت گیاهان سبب افزایش مقاومت مکانیکی خاک‌های سست می‌شود و از این شیوه به طور موفقیت

* نویسنده مسئول: mhmohmad@ut.ac.ir

1- Anisotropic
2- Shear Stress
3- Soil Mechanical Resistance

اثر افزایش مقاومت مکانیکی خاک در مقادیر بهینه رطوبتی تاکنون بررسی نشده است.

بنابراین اثرات متقابل مقاومت مکانیکی خاک و توسعه ریشه بر هم از لحاظ توان جذب آب و استحکام خاک حائز اهمیت است. مقاومت مکانیکی خاک‌های خشک به‌عنوان یک عامل محدودکننده سبب افت رشد گیاه می‌شود، درحالی‌که مقاومت مکانیکی در خاک‌های مرطوب سبب نگهداشت مناسب ریشه و استقرار بهتر گیاه می‌گردد. فرضیه این تحقیق این است که مقاومت مکانیکی خاک در رطوبت بهینه نیز در اثر افزایش دو عامل تراکم و چسبندگی ذرات افزایش می‌یابد و اثرات متقابل خاک - ریشه نیز در هرکدام از آن‌ها متفاوت است؛ بنابراین برهم‌کنش‌های خاک - ریشه از منظر مقاومت مکانیکی خاک در ذرت و گندم به‌عنوان دو گیاه استراتژیک زراعی برای رسیدن به اهداف زیر بررسی شد؛ (۱) میزان افزایش مقاومت مکانیکی خاک در اثر دو عامل افزایش تراکم و سیمانی شدن و (۲) تعیین اثر توسعه ریشه دو رقم از گیاهان گندم و ذرت بر افزایش استحکام خاک در شرایط بهینه رطوبتی.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تعیین خصوصیات خاک

مقدار کافی از خاک سطحی زمین‌های کشاورزی جنوب شهرستان نظرآباد در استان البرز با مختصات جغرافیایی $35^{\circ} 53' 32''$ شمالی و $41^{\circ} 33' 50''$ شرقی جمع‌آوری و پس از خشک کردن و عبور از الک ۴ میلی‌متر به گلخانه منتقل گردید. ویژگی‌های رایج فیزیکی و شیمیایی خاک شامل جرم مخصوص ظاهری درجای خاک (BD)، کربن آلی (OC)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) و واکنش شیمیایی خاک (pH)، تعیین گردید (Pansu and Gautheyrou, 2007). توزیع اندازه ذرات خاک (PSD) به روش (Gee and Or, 2002) اندازه‌گیری شد. مطابق با جدول (۱)، شاخص یکنواختی خاک مورد مطالعه و شاخص انحنای به ترتیب برابر با ۱۸/۵ و ۸ بوده و علی‌رغم اینکه از نظر شاخص یکنواختی در دسته خاک‌های غیریکنواخت ($CU > 4$) قرار داشت، ولی شاخص انحنای آن نشانگر دانه‌بندی ضعیف خاک بود ($CC > 3$). بعلاوه منحنی مشخصه آب خاک (SWC) نیز با اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌های خاک دست نخورده در ۱۱ مکش شامل ۲۰، ۶۰، ۱۰۰، ۲۳۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۲۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر با استفاده از صفحات شن و صفحات تحت فشار تعیین شد (جدول ۲).

آمیزی برای جلوگیری از رانش زمین در نقاط حساس استفاده شده است (Tosi, 2007; Wu and Sidle, 1995). در دهه‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در رابطه با کمی‌سازی نقش سیستم ریشه گیاهان بر مقاومت مکانیکی خاک، بخصوص در جنگل‌ها و مراتع انجام شده است (Abe and Ziemer, 1991; Bischetti et al., 2009; Giadrossich et al., 2016; Mao et al., 2012; Norris et al., 2008; Schmidt et al., 2001; Schwarz et al., 2010; Stokes et al., 2008; Tosi, 2007). بنابراین انجام بررسی‌ها و تجزیه و تحلیل‌های مشابه در خاک‌های زراعی، بویژه در گیاهان استراتژیک کاملاً ضروری است (Bordoni et al., 2016). دامنه و یا حد بحرانی مشخصی برای تفکیک خاک‌های سست و مستحکم ذکر نشده است، با این وجود (Atkinson et al., 2020) مطالعه‌ای را برای بررسی برهمکنش خاک-ریشه در دو خاک سست و مستحکم انجام داده و خاک‌های دارای مقاومت به فروری ۱/۱ و ۲/۹ مگاپاسکال و جرم مخصوص ظاهری ۱/۲ و ۱/۶ مگاگرم بر مترمکعب را به ترتیب به‌عنوان خاک سست و مستحکم معرفی نمودند.

توسعه ریشه سبب بهبود ساختمان خاک و افزایش استحکام آن می‌شود، و از طرفی مقاومت مکانیکی خاک نیز اثر متقابلی بر رشد و توسعه ریشه دارد. خاک و ریشه باهم شرایط لازم برای رشد گیاه را فراهم می‌کنند، بنابراین بررسی برهم‌کنش‌های آن‌ها می‌تواند در پیش‌بینی وضعیت عملکردی گیاه کمک‌کننده باشد (Abdalla et al., 1969). مطالعه خصوصیات مکانیکی خاک و فیزیولوژی گیاه عوامل موثر بر توسعه ریشه را آشکار می‌سازد. در نتیجه فتوسنتز، فشار تورژسانسی و انرژی مکانیکی لازم برای توسعه ریشه و تغییر شکل خاک اطراف آن فراهم می‌شود (Silk and Wagner, 1980). فشار تورژسانسی به مقاومت ناشی از دیواره سلولی، مقاومت غشای سلولی و مقاومت خاک در برابر توسعه ریشه غلبه می‌کند (Dexter, 1987). توان گیاه برای غلبه بر مقاومت مکانیکی خاک تعیین‌کننده میزان توسعه ریشه، استقرار مناسب گیاه در خاک و در نتیجه توان جذب آب و مواد غذایی است.

اگر مقاومت مکانیکی خاک بیش از ۱/۵ مگاپاسکال شود سبب محدودسازی جذب آب از خاک توسط ریشه شده و در مقادیر بالاتر از ۲/۵ مگاپاسکال سبب توقف کامل آن می‌گردد (Groenevelt et al., 2001). مقدار رطوبت خاک تاثیر قابل توجهی بر مقاومت مکانیکی خاک می‌گذارد و با کاهش رطوبت، مقاومت مکانیکی افزایش می‌یابد، به همین دلیل مقاومت مکانیکی خاک و اثرات ناشی از آن همواره همراه با تغییرات رطوبت خاک بررسی شده است (Souza et al., 2021) و احتمال

جدول ۱- برخی خصوصیات اولیه فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

CC ($(D_{30})^2/D_{60}.D_{10}$)	CU (D_{60}/D_{10})	pH	قابلیت هدایت الکتریکی ($dS m^{-1}$)	کربن آلی ($kg.100kg^{-1}$)	جرم مخصوص ظاهری ($mg m^{-3}$)	ظرفیت تبادل کاتیونی ($cmol(+) kg^{-1}$)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	بافت خاک	خصوصیت
۸	۱۸/۵	۷/۸	۱/۱۴	۰/۱۳	۱/۵۲	۴/۹۱	۸۷/۶	۴/۱	۸/۳	شن لومی	مقدار

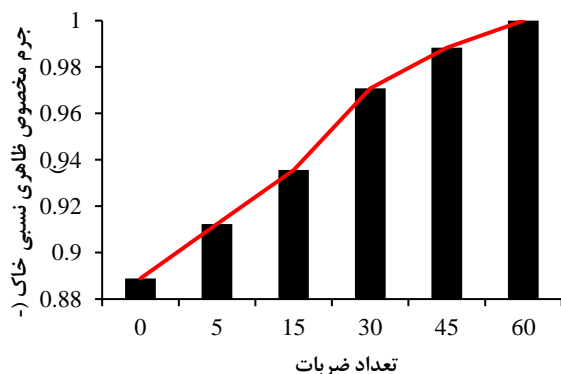
CU, coefficient of uniformity* : شاخص یکنواختی و CC, Curvature coefficient* : شاخص انحنا

"جرم مخصوص ظاهری نسبی" برای بیان تغییرات تراکم استفاده شد تا اولاً درجه تراکم خاک بهتر مشخص باشد و دوماً با توجه به حذف حفرات درشت خاک از پارامتری با درجه حساسیت بیش تر برای بیان وضعیت ساختمانی خاک استفاده شود. شکل (۱- الف) تغییرات جرم مخصوص ظاهری نسبی خاک و شکل (۱- ب) توزیع اندازه‌های ذرات خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای ایجاد تراکم در خاک از یک صفحه چوبی با قطر برابر با گلدان‌ها، یک استوانه چوبی بر روی صفحه و یک چکش ۲ کیلوگرمی که از ارتفاع ۱ متری بر روی استوانه رها می‌شد استفاده گردید (شکل ۲- الف). به این ترتیب ۵ سطح تراکم در اثر تعداد ضربات متفاوت ایجاد شد و جرم مخصوص ظاهری خاک به ۱/۶۶، ۱/۶، ۱/۵۶، ۱/۶۹ و ۱/۷۱ مگاگرم بر متر مکعب رسید.

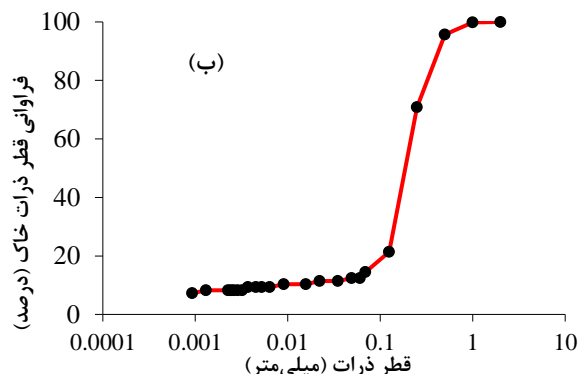
ایجاد سطوح مقاومت مکانیکی در خاک

مقاومت مکانیکی خاک مورد مطالعه از طریق دو روش الف) متراکم‌سازی^۱ و ب) افزودن سیمان (سیمانی کردن)^۲ و به شرح زیر تغییر داده شد:

الف) متراکم‌سازی: رطوبت بهینه تراکم خاک از طریق تست پروکتور تعیین شد (Carter, 1990) (جدول ۲)، و مشخص شد که در رطوبت ($kg.100kg^{-1}$) ۱۶ بیش‌ترین تراکم‌پذیری در خاک مورد مطالعه ایجاد می‌شود. پس از انتقال خاک به گلدان‌های ۱۹ کیلوگرمی، آب کافی برای رسیدن خاک هواخشک به رطوبت بهینه به آن اضافه شد (حدود ۳ لیتر). با توجه به این‌که جرم مخصوص ظاهری خاک در اثر ایجاد سطح پنجم تراکم به حداکثر مقدار خود رسید، بنابراین مطابق با (Da Silva et al., 1994) از



شکل ۱- جرم مخصوص ظاهری نسبی خاک (الف) و توزیع اندازه‌های ذرات (ب) در خاک مورد مطالعه



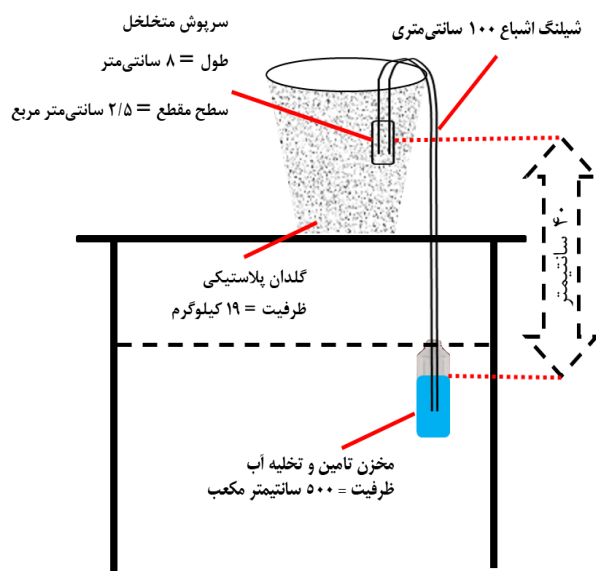
این پژوهش مقادیر ۱/۵، ۱/۲، ۰/۹، ۰/۶، ۰/۳ ($kg.100kg^{-1}$) سیمان با خاک ترکیب شد تا دامنه‌ای از مقاومت مکانیکی مختلف در خاک مورد مطالعه ایجاد گردد. مقدار متناظر سیمان با نسبت-های مذکور با خاک هواخشک ترکیب و پس از همگن‌سازی کافی، مخلوط خاک-سیمان بلافاصله به گلدان‌ها اضافه و با آب اشباع شد. در حالت اشباع نیز ترکیب خاک-سیمان به خوبی بهم زده شد تا برهمکنش کافی بین ذرات خاک و سیمان ایجاد گردد (شکل ۲- ب) و سپس گلدان به حال خود رها شد تا به رطوبت مناسب کشت برسد.

ب) سیمانی کردن: به منظور افزایش سطح چسبندگی ذرات، سیمان تیپ ۱ به خاک‌های مورد مطالعه اضافه شد تا مقاومت مکانیکی خاک بدون تغییرات محسوس توزیع اندازه‌های منافذ و با حداقل مقدار ماده چسبنده تا حدود مورد نظر افزایش یابد (Baldovino et al., 2020; Consoli et al., 2013). پس از چند سری پیش‌آزمایش در گلدان‌های با ظرفیت ۱ کیلوگرم و ترکیب مقادیر ۰/۵ تا ۵ درصد سیمان با خاک مورد مطالعه و اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی آن با پنترومتر جیبی در سطوح مختلف رطوبت، مقدار سیمان لازم جهت افزایش مقاومت مکانیکی خاک در ۵ سطح مختلف تعیین شد. مطابق با اهداف



شکل ۲- آماده سازی سطوح مختلف تیمارهای تراکم (الف) و سیمان (ب) در واحدهای آزمایشی مورد مطالعه

رطوبت از مخزن محتوی آب می شود. جزئیات بیش تر این سامانه و نحوه کارکرد آن توسط (Meskini-Vishkaee et al., 2015) ارائه شده است.



شکل ۳- نمایش مشخصات سامانه تثبیت مکش خاک، اجزای تشکیل دهنده و نحوه استقرار آن

کشت بذر ذرت و گندم در خاک و تغذیه گیاهان

به منظور تعیین تأثیر توسعه ریشه بر مقاومت مکانیکی خاک، از دو رقم ذرت (۷۰۳ و ۷۰۴ سینگل کراس^۱) و دو رقم گندم (پیشگام و سیروان) که در کشاورزی ایران رایج هستند استفاده

استقرار سامانه تثبیت رطوبت و مکش ماتریک خاک

به منظور کنترل سطح رطوبت خاک در حد بهینه رشد گیاه، از یک سامانه ساده تثبیت رطوبت استفاده شد که سبب کنترل نوسان رطوبت و مکش ماتریک شد (شکل ۳). این سامانه از یک کلاهک متخلخل به طول ۸ سانتی متر و سطح مقطع ۲/۵ سانتی-متر مربع، یک شیلنگ رابط ۱۰۰ سانتی متری متصل به سرپوش و یک مخزن تأمین و تخلیه آب به حجم ۵۰۰ سانتی متر مکعب تشکیل شد. این سامانه ساده قبل از استقرار در خاک گلدان از نظر توان تأمین، حفظ و تخلیه آب آزموده شد و سپس به مدت ۲۴ ساعت درون آب مقطر قرار گرفت تا سرپوش متخلخل اشباع از آب گردد. سپس شیلنگ رابط نیز پر از آب شده و از هوا تخلیه گردید تا یک محیط اشباع پیوسته ایجاد شود. سر دیگر شیلنگ نیز درون مخزن تأمین و تخلیه که محتوی حجم مشخصی آب بود قرار گرفت و پس از اطمینان از عدم ورود هوا به سامانه، با فرض بر این که تراکم ریشه در سطح خاک بیش تر است سرپوش در یک سوم ابتدایی عمق خاک (حدوداً ۵ تا ۱۵ سانتی-متری) مستقر شد. بر اساس اصل ستون آب آویزان^۱ اختلاف ارتفاع بین سرپوش متخلخل و مخزن تأمین و تخلیه آب، تعیین کننده مکش اعمال شده از طرف سرپوش متخلخل بر خاک است و در مقادیر رطوبت بیش تر از رطوبت نظیر با آن مکش (θ_h) سبب تخلیه آب از خاک و در مقادیر رطوبت کم تر سبب تأمین

خاک تخلیه کرده و رطوبت و مکش را به ترتیب به مقدار ۲۰ درصد جرمی و ۴۰ سانتی متر می‌رساند، بنابراین مقدار کافی رطوبت برای گیاه در مراحل مختلف رشد از این طریق تأمین شد. میانگین رطوبت اشباع در تیمارهای مورد مطالعه، رطوبت و مکش نظیر تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد به‌عنوان که یکی از حدود بالای رطوبت قابل استفاده توسط گیاه (Da Silva et al., 1994; Grable and Siemer, 1968)، به ترتیب برابر با $30 \text{ (kg.100kg}^{-1}\text{)}$ ، $20 \text{ (kg.100kg}^{-1}\text{)}$ و $40 \text{ (kg.100kg}^{-1}\text{)}$ سانتی متر بود (جدول ۲). بنابراین با استفاده از سامانه کنترل مکش خاک و با برقراری اختلاف ارتفاع ۴۰ سانتی متری بین مخزن تأمین و تخلیه رطوبت و سرپوش متخلخل، مکش خاک در این حد تثبیت شد.

شد. برای این منظور تعداد ۵ تا ۷ بذر از رقم مورد مطالعه در سطح خاک قرار داده شد و با خاک پوشانیده شد. در روز بیستم پس از استقرار جوانه‌ها در خاک، یک جوانه که از نظر ظاهری شرایط برتری را داشت حفظ و سایر جوانه‌ها به همراه ریشه از خاک حذف شدند (Jin et al., 2013).

آبیاری و تغذیه گیاه در طول رشد

آبیاری گلدان‌های آزمایشی به صورت روزانه و با اضافه کردن آب به سطح خاک گلدان انجام می‌شد. به منظور جلوگیری از تخریب ساختمان خاک سطحی از یک پخش کننده پلاستیکی برای توزیع آهسته آب در سطح خاک استفاده شد. با توجه به این که سامانه تثبیت مکش زمان کمی پس از آبیاری مقدار رطوبت اضافی را از

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه

مقاومت به فروروی اولیه (MPa)	رطوبت بهینه تراکم- پذیری (kg.100kg^{-1})	میانگین مکش نظیر تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد (cm)	میانگین رطوبت نظیر تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد (kg.100kg^{-1})	میانگین (-) n	میانگین $100 \times \alpha$ (h.m^{-1})	میانگین رطوبت اشباع (kg.100kg^{-1})	خصوصیت مقدار
۰/۵۳	۱۶	۴۰	۲۰	۲/۶۱	۲/۶	۳۰	

(Davidson, 1965)، بنابراین به منظور اطمینان کافی اندازه-گیری‌ها در ۵ تکرار در هر گلدان انجام شد و نمودار تغییرات مقاومت مکانیکی خاک با افزایش تراکم و نسبت سیمانی شدن تعیین گردید.

برای تبیین تغییرات مقاومت مکانیکی خاک در اثر رشد و توسعه ریشه گیاهان ذرت و گندم، رابطه تجربی (۱) به شرح ذیل تعیین شد.

$$R = a \cdot R_0^b \quad (\text{رابطه ۱})$$

(R_0) و (R) به ترتیب مقاومت مکانیکی خاک قبل از کاشت و پس از برداشت گیاه برحسب (MPa) و a و b پارامترهای تجربی معادله هستند.

به منظور جلوگیری از اثر کمبود عناصر غذایی بر رشد و توسعه ریشه و اندام هوایی گیاهان، از محلول نیم - هوگلدن برای تغذیه گیاه (کشت شده در محیط با زهکشی مداوم) و از محلول سولفات آمونیوم برای جلوگیری از افزایش اسیدیته ناشی از سیمان استفاده گردید (Haynes and Swift, 1987).

اندازه‌گیری و تخمین مقاومت مکانیکی خاک

مقاومت مکانیکی خاک در دو مرحله قبل از کاشت گیاه و پس از برداشت اندام هوایی و با استفاده از فرو سنج مخروطی دیجیتال (Eijkelkamp) ساخت کشور هلند، با مخروط ۶۰ درجه و قطر پایه ۱ سانتی متر اندازه‌گیری شد (شکل ۴). حداقل تکرار لازم برای اندازه‌گیری مقاومت به فروروی خاک ۳ مرتبه است



شکل ۴- فروسنج مخروطی مورد استفاده برای اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی خاک

دو رقم از گیاه ذرت و دو رقم از گیاه گندم در پنج سطح مقاومت مکانیکی خاک و در دو مرحله قبل از کاشت و پس از برداشت، در

طرح آزمایش

در این مطالعه چهل تیمار شامل تیمار متراکم شده، تیمار سیمان،

رقم‌های ۷۰۴ و پیشگام از این محدوده نیز گذر نماید. شکل (۵) نشان داد، رشد و توسعه ریشه در سطوح اولیه تراکم تاثیر بیش-تری بر مقاومت مکانیکی خاک نسبت به سطوح انتهایی داشته و در جرم مخصوص ظاهری نسبی ۰/۹۱ و ۰/۹۴ همواره سبب افزایش بیش از دو برابری مقاومت مکانیکی شد، درحالی که در جرم مخصوص ظاهری نسبی بیش‌تر از ۰/۹۹ حداقل تشدید در مقاومت مکانیکی خاک ایجاد گردید و حتی در رقم‌های ۷۰۳ و سیروان اختلافی بین مراحل قبل و بعد از کشت از نظر مقاومت مکانیکی مشاهده نشد.

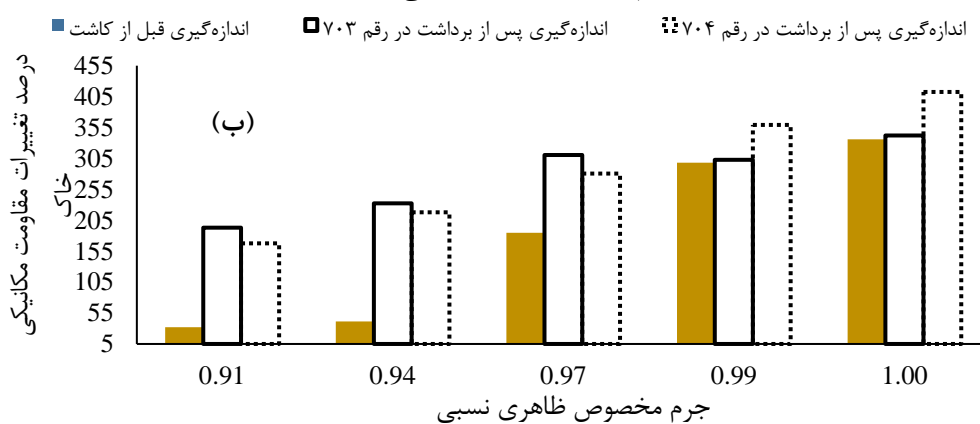
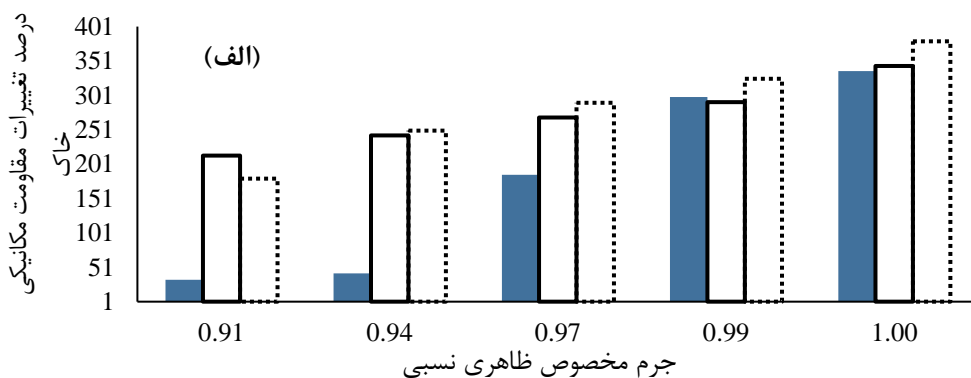
تغییرات مقاومت مکانیکی خاک در برابر مقدار سیمان در مراحل قبل از کاشت و پس از برداشت اندام هوایی گیاه در شکل (۶) (الف، ذرت و ب، گندم) مشاهده می‌گردد. وجه تمایز تیمار سیمانی شده با تیمار تراکم در این است که مقاومت مکانیکی خاک در تیمار سیمان از طریقی به‌جز تشدید جرم مخصوص ظاهری افزایش یافت و خاک در تمام تیمارها دارای جرم مخصوص ظاهری اولیه ($1/52 \text{ Mg.m}^{-3}$) بود. پیش از کشت گیاه، مقاومت مکانیکی خاک تنها در سطح اول تیمار سیمان (۰/۳ درصد سیمان) مقداری کم‌تر از ۱ مگاپاسکال داشت و از ۰/۵۳ مگاپاسکال در تیمار شاهد به ۳/۰۴ مگاپاسکال در تیمار پنجم خاک سیمانی (۱/۵ درصد سیمان) افزایش یافت و به عبارتی در اثر افزایش چسبندگی ذرات خاک در حضور سیمان حدود ۵۰۰ درصد افزایش (شش برابر) در مقاومت مکانیکی ایجاد شد. بین سطوح متوالی تیمار سیمان اختلاف معنی‌داری از نظر مقاومت مکانیکی وجود نداشت ($P\text{-Value} = 0.4$)، و دامنه وسیعی از مقاومت مکانیکی مورد مطالعه قرار گرفت. مقاومت مکانیکی خاک با اضافه نمودن ۰/۹ کیلوگرم سیمان بر صد کیلوگرم خاک به مقدار بیش از حد پایین دامنه تنش‌زا (۱/۵ مگاپاسکال) و با اضافه نمودن ۱/۲ کیلوگرم سیمان بر صد کیلوگرم خاک به حد نهایی این دامنه (۲/۵ مگاپاسکال) رسید. با اضافه نمودن ۱/۵ کیلوگرم سیمان بر صد کیلوگرم خاک هم مقاومت مکانیکی خاک به مقدار قابل توجهی از دامنه محدودکننده ۱/۵ تا ۲/۵ مگاپاسکال (Da Silva et al., 1994; Groenevelt et al., 2001) عبور و تا مقدار ۳ مگاپاسکال در مرحله قبل از کاشت افزایش یافت. تیمار خاک سیمانی به طور میانگین مقاومت مکانیکی معادل با ۱/۶ مگاپاسکال ایجاد کرد و کشت گیاه و رشد و توسعه ریشه به طور میانگین سبب افزایش ۶۲ درصدی مقاومت مکانیکی خاک در مرحله پس از برداشت شد. این سبب شد تیمار خاک سیمانی در سطح ۰/۶ کیلوگرم سیمان بر صد کیلوگرم خاک نیز به دامنه محدودکننده مقاومت مکانیکی (۱/۵ تا ۲/۵ مگاپاسکال برسد) و در

قالب یک آزمایش فاکتوریل و طرح کامل تصادفی مورد مقایسه قرار گرفت. یک تیمار شاهد نیز به‌ازای هر یک از ارقام مورد مطالعه (۴ رقم) در نظر گرفته شد که تحت‌تأثیر هیچ‌کدام از تیمارهای تراکم و سیمان قرار نگرفت؛ بنابراین در مجموع ۴۴ تیمار مورد مطالعه قرار گرفت که هرکدام شامل ۳ تکرار بود و به‌این ترتیب ۱۳۲ واحد آزمایشی (گلدان) در طی یک مطالعه گلخانه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. تجزیه و تحلیل آماری و مقایسه میانگین نتایج نیز با استفاده از نرم‌افزار spss انجام شد.

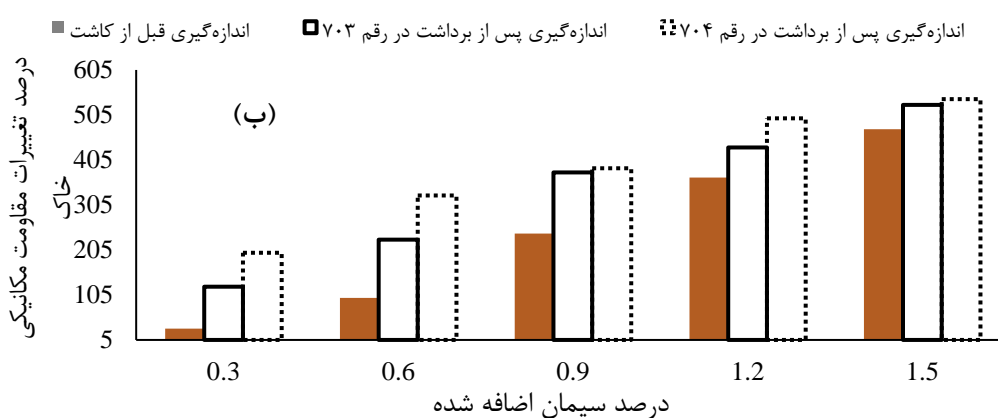
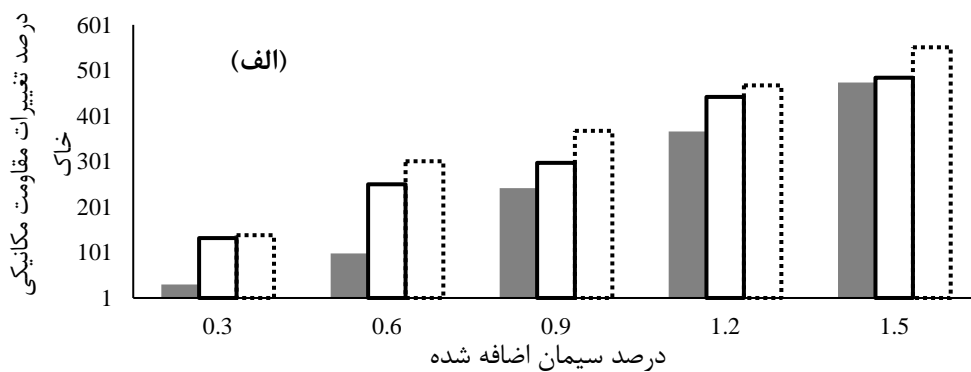
یافته‌ها

شکل (۵) تغییرات مقاومت مکانیکی خاک در اثر اعمال تراکم نسبت به شاهد را در مراحل قبل از کاشت و پس از برداشت گیاه (الف، ذرت و ب، گندم) نشان می‌دهد. خاک شاهد مقاومت مکانیکی معادل با ۰/۵۳ مگاپاسکال داشت (جدول ۲) و پس از افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک تا $1/6 \text{ Mg.m}^{-3}$ افزایش آن قبل از کاشت گیاه کم‌تر از ۵۰ درصد بود. با این حال، افزایش مجدد جرم مخصوص ظاهری خاک (تا $1/66 \text{ Mg.m}^{-3}$)، مقاومت مکانیکی را با فشرده‌سازی منافذ خاک تا حدود سه برابر (۲۰۰ درصد) افزایش داد و آن را تا مقادیر محدودکننده (۱/۵ مگاپاسکال) رساند. همچنین در آخرین سطح تیمار تراکم ($1/71 \text{ Mg.m}^{-3}$) نیز با تشدید فشرده‌گی منافذ افزایش حدود ۴/۵ برابری در مقاومت مکانیکی خاک نسبت به تیمار شاهد در مرحله قبل از کاشت مشاهده شد. بین هیچ‌کدام از دو سطح متوالی تیمار تراکم در مرحله قبل از کاشت اختلاف معنی‌داری از نظر مقاومت مکانیکی خاک وجود نداشت ($P\text{-Value} = 0.45$)، و دامنه‌ای از مقادیر بدون محدودیت (کمتر از ۱/۵ مگاپاسکال) تا تنش‌زا (۱/۵ تا ۲/۵ مگاپاسکال) در اثر این تیمار ایجاد گردید. همچنین کاشت گیاه و توسعه ریشه نیز سبب شد مقاومت مکانیکی خاک پس از برداشت اندام هوایی نسبت به مرحله قبل از کاشت افزایش یابد. میانگین مقاومت مکانیکی خاک در تیمارهای مورد مطالعه و پیش از کشت برابر با ۱/۳ مگاپاسکال بود و رشد و توسعه گیاهان ذرت و گندم به طور میانگین سبب افزایش ۴۵ درصدی مقاومت مکانیکی خاک شد. مقاومت مکانیکی خاک قبل از کاشت گیاه در جرم مخصوص ظاهری نسبی بیش‌تر از ۰/۹۷ به مقادیر محدودکننده تعیین شده توسط محققین یعنی ۱/۵ تا ۲/۵ مگاپاسکال رسید (Da Silva et al., 1994; Groenevelt et al., 2001) درحالی‌که رشد و توسعه ریشه سبب شد تمام سطوح تراکم در این محدوده قرار داشته و حتی در سطح آخر تراکم

سطح ۱/۲ کیلوگرم سیمان بر صد کیلوگرم خاک نیز از این دامنه عبور کند.



شکل ۵- تغییرات مقاومت مکانیکی خاک در اثر تراکم (جرم مخصوص ظاهری) در مراحل پیش‌و پس از توسعه ریشه. الف) دو رقم گیاه ذرت، ب) دو رقم گیاه گندم



شکل ۶- تغییرات مقاومت مکانیکی خاک در اثر اضافه کردن سیمان (چسبندگی ذرات) در مراحل پیش‌و پس از توسعه ریشه. الف) دو رقم گیاه ذرت، ب) دو رقم گیاه گندم



			۰/۶	۱/۴۴	۱/۲۶	۱			۰/۴	۱/۵۳	۱/۴۸	۱
				۱/۸۴	۲/۱۲	۲				۱/۵۷	۱/۸۵	۲
۰/۰۰۰۳	۰/۹۷	۱/۸		۲/۵۴	۲/۴۸	۳	۰/۰۰۰۴	۰/۹۶	۱/۷۵	۲/۰۸	۲/۰۶	۳
				۳/۰۴	۳/۰۱	۴				۲/۳۷	۲/۲۵	۴
				۳/۴۴	۳/۴۵	۵				۲/۴۵	۲/۵۴	۵
گیاه ذرت - رقم ۷۰۳												
				۱/۱۱	۱/۰۸	۰				۱/۳۹	۱/۰۸	۰
				۱/۳۰	۱/۲۳	۱				۱/۵۳	۱/۶۶	۱
۰/۰۰۰۳	۰/۹۷	۱/۶	۰/۶	۱/۶۶	۱/۸۶	۲	۰/۰۰۰۸	۰/۸۵	۱/۷	۰/۳۳	۱/۵۶	۲
				۲/۳۰	۲/۱۱	۳				۱/۹۷	۱/۹۵	۳
				۲/۷۶	۲/۸۷	۴				۲/۲۰	۲/۰۷	۴
				۳/۱۲	۳/۱۰	۵				۲/۲۷	۲/۳۵	۵
گیاه گندم - رقم پیشگام												
				۱/۴۳	۱/۳۱	۰				۱/۲۵	۱/۳۰	۰
				۱/۶۴	۱/۵۸	۱				۱/۴۲	۱/۴۹	۱
۰/۰۰۰۲	۰/۹۸	۲	۰/۵	۲/۰۲	۲/۲۶	۲	۰/۰۰۰۱	۰/۹۸	۱/۷۵	۰/۴۵	۱/۵۴	۲
				۲/۶۶	۲/۵۸	۳				۲/۱۶	۲/۱۳	۳
				۳/۱۱	۳/۱۷	۴				۲/۴۳	۲/۵۰	۴
				۳/۴۵	۳/۳۹	۵				۲/۶۳	۲/۶۰	۵
گیاه گندم - رقم سیرون												
				۱/۱۳	۱/۲۲	۰				۱/۳۶	۱/۴۱	۰
				۱/۳۳	۱/۱۸	۱				۱/۵۰	۱/۵۵	۱
۰/۰۰۰۰۰۶	۰/۹۹	۱/۷	۰/۶	۱/۷۲	۱/۷۴	۲	۰/۰۰۰۱	۰/۹۴	۱/۷۵	۰/۳۴	۱/۷۰	۲
				۲/۴۱	۲/۵۳	۳				۲/۰۴	۲/۰۲	۳
				۲/۹۱	۲/۸۲	۴				۲/۲۳	۲/۲۷	۴
				۳/۳۱	۳/۳۲	۵				۲/۳۷	۲/۳۴	۵

* = شاهد

بحث

کشت شده بستگی داشت (جدول ۳). در مطالعه‌ای که (Burak et al., 2021) برای بررسی افزایش مقاومت برشی خاک انجام دادند، مقاومت مکانیکی خاک در حضور ریشه گیاهان ذرت و جو به بین ۱۵ تا ۴۵ درصد افزایش یافت. درحالی‌که در این مطالعه، نسبت افزایش مقاومت مکانیکی خاک بدون کشت نسبت به تیمار شاهد در اثر سطح اول و آخر تراکم به ترتیب ۳۲ و ۳۳۵ درصد است، درحالی‌که این تغییرات پس از کشت به طور میانگین به ترتیب ۱۸۸ و ۳۶۹ درصد بود (شکل ۴). یکی از علل این اختلاف تثبیت رطوبت خاک در حدود زیاد و مقاومت مکانیکی اولیه کم است که با اعمال تیمارهای تراکم و سیمانی شدن و همچنین در اثر رشد و توسعه ریشه با شدت زیادی افزایش یافت. با این حال، رشد و توسعه ریشه اختلاف بین سطوح تراکم را تعدیل کرده است و اختلاف حدود ۱۰ برابری در خاک بدون کشت تا حدود ۲ برابر تعدیل شده است و می‌توان نتیجه گرفت در خاک کشت شده اثر افزایش جرم مخصوص ظاهری نسبی بر مقاومت مکانیکی خاک افت می‌کند. اگرچه مقاومت مکانیکی خاک در مراحل پیش از کاشت و پس از برداشت تیمار سیمانی شدن از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۳)، با این حال، مقادیر اولیه مقاومت مکانیکی خاک در تیمار سیمانی شدن بیشتر از تیمار تراکم بود و توسعه ریشه سبب افزایش مقاومت مکانیکی خاک در حدود بحرانی و محدودکننده شد که بر اهمیت حضور گیاه در خاک در رابطه با تغییرات مقاومت مکانیکی خاک تاکید می‌کند. میزان فراهمی آب خاک برای گیاه قبل از کشت گیاه تا

در این مطالعه مقاومت مکانیکی خاک در شرایط بهینه رطوبتی (مکش ۴۰ سانتی‌متر و رطوبت جرمی 0.2 kg.kg^{-1}) که سبب ایجاد تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد و سهولت فراهمی آب خاک برای گیاه می‌شد (Da Silva et al., 1994) بررسی گردید که از طرفی می‌تواند سبب ایجاد شرایط لازم جهت لغزش خاک شود و از طرف دیگر تنش کم‌آبی برای ریشه گیاه ایجاد نمی‌کند. مقاومت مکانیکی خاک در این وضعیت مرطوب تا جرم مخصوص ظاهری نسبی 0.94 در تیمار تراکم و نسبت 0.3 کیلوگرم سیمان بر صد کیلوگرم خاک در تیمار سیمانی شدن، قبل از این که رشد و توسعه ریشه در آن اتفاق بیفتد کم‌تر از ۱ مگاپاسکال بود که در دسته خاک‌های سست و مستعد لغزش قرار می‌گیرند (Atkinson et al., 2020). از طرفی مقاومت به فروروی خاک در سطح آخر تیمار سیمان (۱/۵ درصد سیمان) به ۳ مگاپاسکال رسید و این تیمار در دسته خاک‌های مستحکم (Atkinson et al., 2020) گرفت. کشت گیاه و رشد و توسعه ریشه سبب شد مقاومت به فروروی خاک در سطح چهارم تیمار سیمان (۱/۲ درصد سیمان) هم به حد خاک مستحکم برسد. با این وجود در تیمار تراکم علی‌رغم این‌که مقاومت به فروروی خاک پس از کشت گیاه همواره افزایش یافت اما هیچگاه به حد خاک‌های مستحکم نرسید. بنابراین کشت گیاه همواره سبب افزایش استحکام خاک شد اما میزان افزایش تبدیل خاک سست به خاک مستحکم در درجه اول به نوع عامل ایجاد کننده مقاومت مکانیکی خاک و در درجه دوم به نوع گیاه

تخمین میزان تغییرات مقاومت مکانیکی خاک پس از رشد و توسعه ریشه حائز اهمیت است. در جدول (۴) مشاهده شد که معادله (۱) قادر بود به خوبی میزان این تغییرات در سطوح مختلف تیمار شاهد، تراکم و سیمان را در خاک مورد مطالعه برازش دهد. تفاوت معنی داری در توان معادله تجربی (۱) از نظر برازش اثرات گیاهان ذرت و گندم و رقم‌های این گیاهان بر مقاومت مکانیکی خاک مشاهده نشد، بنابراین پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات پیش‌رو استفاده از این معادله تجربی را برای تخمین مقاومت مکانیکی خاک در اثر کشت گیاه و توسعه ریشه، به منظور اهداف مختلف مدیریتی در زمینه ارتقای قوام خاک یا تغییرات رطوبت قابل استفاده مورد بررسی قرار داد.

نتیجه‌گیری

یافته‌های تحقیق بر دو رخداد کلی دلالت داشت که عبارت‌اند از این‌که؛ اولاً مقاومت مکانیکی خاک از طریق سطوح مختلف دو عامل تراکم و سیمان افزایش یافت و ثانیاً در هریک از این سطوح، کشت گیاه و توسعه ریشه سبب تشدید مقاومت مکانیکی خاک در شرایط رطوبتی بهینه شد. با این حال اثر توسعه ریشه بر مقاومت مکانیکی خاک تنها در تیمار شاهد و تراکم تا مقاومت مکانیکی اولیه ۱ مگاپاسکال معنی‌دار بود؛ بنابراین اثر توسعه ریشه گیاهان مورد مطالعه در این تحقیق بر افزایش استحکام خاک پس از استقرار در خاک به میزان مقاومت مکانیکی اولیه خاک و به عبارتی عامل ایجادکننده مقاومت مکانیکی خاک داشت؛ بنابراین نه تنها منشأ ایجادکننده مقاومت مکانیکی خاک بر میزان استحکام خاک تأثیرگذار بود، بلکه میزان تشدید مقاومت مکانیکی خاک در اثر رشد و توسعه ریشه نیز تحت تأثیر این عامل قرار داشت. علی‌رغم تصورات قبلی، در این مطالعه مشاهده شد که مقادیر بالای مقاومت مکانیکی تنها محدود به خاک‌های خشک نیست، بلکه در شرایط بهینه رطوبتی نیز مقاومت مکانیکی خاک در اثر تراکم، سیمانی شدن و رشد و توسعه ریشه تشدید می‌شود؛ بنابراین بسته به کاربردی که خاک دارد این ویژگی می‌تواند کمک‌کننده یا محدودکننده باشد. باتوجه به این‌که جابه‌جایی‌های خاک عمدتاً در خاک‌های با رطوبت بالا اتفاق می‌افتد، از این طریق می‌توان به تثبیت آن‌ها کمک کرد. از طرفی ممکن است در خاک مرطوب نیز مقاومت مکانیکی زیاد خاک از توسعه ریشه و جذب آب جلوگیری نماید و این در اهداف کشاورزی یک چالش محسوب می‌شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

جرم مخصوص ظاهری نسبی ۰/۹۷ در دامنه محدودکننده (۲) - ۱/۵ مگاپاسکال، (Groenevelt et al., 2001) قرار نگرفت اما کشت گیاه سبب شد مقاومت به فروروی در همان جرم مخصوص ظاهری نسبی ۰/۹۱ در دامنه محدودکننده قرار گیرد. در تیمار سیمان و قبل از کشت به جز دو سطح اول (۰/۳ و ۰/۶ درصد سیمان) مقاومت به فروروی در دامنه محدودکننده قرار داشت و کشت گیاه و توسعه ریشه سبب شد در سطح دوم نیز مقاومت به فروروی به دامنه محدودکننده برسد. با این حال، مقاومت به فروروی در سطح اول تیمار سیمان حتی پس از کشت گیاه هم به دامنه محدودکننده نرسید و این نشان می‌دهد تغییرات مقاومت مکانیکی از دیدگاه آب قابل استفاده برای گیاه نیز بستگی به نوع عامل ایجادکننده مقاومت مکانیکی خاک دارد. در خاک‌های زراعی به دلیل فقدان منافذ زیستی و تخریب ساختمان خاک، مقاومت مکانیکی بحرانی کمتر از خاک جنگل‌ها و مراتع است (de Lima et al., 2020) که باعث می‌شود افزودن تراکم و سیمان در این خاک‌ها محدودیت مضاعفی ایجاد کند. با این حال، بر اساس مفهوم گنجایش آب جمعی حد بحرانی مقاومت مکانیکی خاک برابر با مقداری است که در آن جذب آب از خاک توسط ریشه متوقف می‌شود (Groenevelt et al., 2001)، اما در این مطالعه علی‌رغم اینکه در تعداد قابل توجهی از اندازه‌گیری‌های قبل و پس از کشت، مقاومت مکانیکی خاک بیش‌تر از حد بالای دامنه محدودکننده در این مفهوم (۲/۵ مگاپاسکال) بود، با این حال رشد گیاه و توسعه ریشه در خاک اتفاق افتاده است و این به معنای جذب آب از خاک توسط ریشه و عدم توقف آن است.

مقاومت مکانیکی خاک در این مطالعه بدون کاهش آب خاک و در حد بهینه رطوبتی معادل با مکش نظیر ۴۰ سانتی‌متر از مقادیر کم تا تعیین‌کننده افزایش یافت. تیمارهای تراکم و سیمانی شدن و همچنین توسعه ریشه سبب شد خاک مرطوب از حالت سست تا مستحکم و از وضعیت بدون محدودیت برای گیاه به حدود محدودکننده برسد؛ بنابراین علی‌رغم این‌که مقادیر بالای مقاومت مکانیکی خاک همواره در خاک‌های خشک مطالعه شده بود (Souza et al., 2021) در این مطالعه افزایش مقاومت مکانیکی خاک در اثر تیمارهای مورد مطالعه و توسعه ریشه گیاه، به صورت مستقل از رطوبت مشاهده شد.

تأثیر توسعه ریشه بر مقاومت مکانیکی خاک و تغییر وضعیت خاک از حالت سست به مستحکم یا بدون محدودیت تا محدودیت‌زا در این مطالعه ثابت شد (شکل‌های ۵ و ۶)، بنابراین

REFERENCES

Abdalla, A., Hettiaratchi, D., and Reece, A. (1969). The mechanics of root growth in granular media.

Journal of Agricultural Engineering Research, 236-248.



- Abe, K., and Ziemer, R.R. (1991). Effect of tree roots on a shear zone: modeling reinforced shear stress. *Canadian Journal of Forest Research*, 1012-1019.
- Al-Karni, A.A., and Al-Shamrani, M.A. (2000). Study of the effect of soil anisotropy on slope stability using method of slices. *Computers and Geotechnics*, 83-103.
- Atkinson, J.A., Hawkesford, M.J., Whalley, W.R., Zhou, H., and Mooney, S.J. (2020). Soil strength influences wheat root interactions with soil macropores. *Plant, Cell & Environment*, 235-245.
- Baldovino, J.d.J.A., Izzo, R.L.d.S., Pereira, M.D., Rocha, E.V.d.G., Rose, J.L., and Bordignon, V.R. (2020). Equations controlling tensile and compressive strength ratio of sedimentary soil-cement mixtures under optimal compaction conditions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 04019320.
- Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Epis, T., and Morlotti, E. (2009). Root cohesion of forest species in the Italian Alps. *Plant and Soil*, 71-89.
- Bordoni, M., Meisina, C., Vercesi, A., Bischetti, G., Chiaradia, E., Vergani, C., Chersich, S., Valentino, R., Bittelli, M., and Comolli, R. (2016). Quantifying the contribution of grapevine roots to soil mechanical reinforcement in an area susceptible to shallow landslides. *Soil and Tillage Research*, 195-206.
- Burak, E., Dodd, I.C., and Quinton, J.N. (2021). Do root hairs of barley and maize roots reinforce soil under shear stress? *Geoderma*, 114740.
- Carter, M. (1990). Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian Journal of Soil Science*, 425-433.
- Consoli, N.C., Festugato, L., da Rocha, C.G., and Cruz, R.C. (2013). Key parameters for strength control of rammed sand-cement mixtures: Influence of types of portland cement. *Construction and Building Materials*, 591-597.
- Da Silva, A., Kay, B., and Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1775-1781.
- Davidson, D.T. (1965). Penetrometer measurements. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 472-484.
- de Lima, R.P., Tormena, C.A., Figueiredo, G.C., da Silva, A.R., and Rolim, M.M. (2020). Least limiting water and matric potential ranges of agricultural soils with calculated physical restriction thresholds. *Agricultural Water Management*, 106299.
- Dexter, A. (1987). Mechanics of root growth. *Plant and Soil*, 303-312.
- Gee, G.W., and Or, D. (2002). 2.4 Particle-size analysis. *Methods of soil analysis. Part*, 255-293.
- Giadrossich, F., Cohen, D., Schwarz, M., Seddaiu, G., Contran, N., Lubino, M., Valdés-Rodríguez, O.A., and Niedda, M. (2016). Modeling bio-engineering traits of *Jatropha curcas* L. *Ecological Engineering*, 40-48.
- Grable, A.R., and Siemer, E. (1968). Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. *Soil Science Society of America Journal*, 180-186.
- Groenevelt, P., Grant, C., and Semetsa, S. (2001). A new procedure to determine soil water availability. *Soil Research*, 577-598.
- Haynes, R., and Swift, R. (1987). Effect of trickle fertigation with three forms of nitrogen on soil pH, levels of extractable nutrients below the emitter and plant growth. *Plant and Soil*, 211-221.
- Iverson, R.M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water resources research*, 1897-1910.
- Jin, K., Shen, J., Ashton, R.W., Dodd, I.C., Parry, M.A., and Whalley, W.R. (2013). How do roots elongate in a structured soil? *Journal of Experimental Botany*, 4761-4777.
- Mao, Z., Saint-Andre, L., Genet, M., Mine, F.-X., Jourdan, C., Rey, H., Courbaud, B., and Stokes, A. (2012). Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: choosing cohesion models. *Ecological Engineering*, 55-69.
- Meskini-Vishkaee, F., Mohammadi, M.H., Neyshabouri, M.R., and Shekari, F. (2015). Evaluation of canola chlorophyll index and leaf nitrogen under wide range of soil moisture. *International Agrophysics*, 83-90.
- Montrasio, L., and Valentino, R. (2008). A model for triggering mechanisms of shallow landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1149-1159.
- Norris, J.E., Stokes, A., Mickovski, S.B., Cammeraat, E., Van Beek, R., Nicoll, B.C., and Achim, A. (2008). Slope stability and erosion control: ecotechnological solutions. *Springer Science & Business Media*. 1402066767.
- Pansu, M., and Gautheyrou, J. (2007). Handbook of soil analysis: mineralogical, organic and inorganic methods. *Springer Science & Business Media*. 3540312110.
- Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 927-930.
- Schmidt, K., Roering, J., Stock, J., Dietrich, W., Montgomery, D., and Schaub, T. (2001). The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal*, 995-102.
- Schwarz, M., Preti, F., Giadrossich, F., Lehmann, P., and Or, D. (2010). Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy). *Ecological Engineering*, 285-291.
- Silk, W.K., and Wagner, K.K. (1980). Growth-sustaining water potential distributions in the primary corn root: A noncompartmented continuum model. *Plant Physiology*, 859-863.
- Souza, R., Hartzell, S., Ferraz, A.P.F., de Almeida, A.Q., de Sousa Lima, J.R., Antonino, A.C.D., and de Souza, E.S. (2021). Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled

- environments. *Soil and Tillage Research*, 104768.
- Stokes, A., Norris, J.E., Van Beek, L., Bogaard, T., Cammeraat, E., Mickovski, S.B., Jenner, A., Di Iorio, A., and Fourcaud, T. (2008). How vegetation reinforces soil on slopes. Slope stability and erosion control: ecotechnological solutions. Springer .
- Tosi, M. (2007). Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology*, 268-283.
- Wu, W., and Sidle, R.C. (1995). A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water resources research*, 2097-2110.