



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources



Soil Science Society of Iran

(OPEN ACCESS)

Effect of Nanoclay on Soil Physical Properties and Yield of Quinoa in Two Different Soil Textures

Elahe Daraei¹, Hossein Bayat^{*2}

1. Ph.D. Student of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: elahe.daraei69@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: h.bayat@basu.ac.ir, hbayat2001@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Evaluation of penetration resistance is necessary as a part of a sustainable management strategy to maintain the physical quality of the soil. Nanoclays are promising naturally occurring nanoparticles in soil amendment due to their low-cost and effective features. Natural nanoparticles are promising in improving soils and increasing plant yield, which has an impact on penetration resistance and other physical properties of soil. The quinoa plant, as a new strategic crop and alternative to wheat, is affected by the characteristics of the soil, including penetration resistance. However, the simultaneous effect of nanoclay on the physical characteristics of the soil and, as a result, on the yield and characteristics of the quinoa plant root has not been investigated in any research so far. The study aimed to improve the penetration resistance and soil water retention with the application of montmorillonite nanoclay and increase the root growth and yield of quinoa plants in two soil textures.
Article history: Received: 02.02.2024 Revised: 06.26.2024 Accepted: 06.29.2024	
Keywords: Nano montmorillonite, Penetration resistance, Root mass, Soil water retention	Materials and Methods: In this study, a factorial experiment with a completely randomized design was conducted. The first factor was montmorillonite nanoclay at two levels of zero (control without cultivation and with cultivation), and 3% by weight, and the second factor was soil at two levels of sandy loam and loam soil textures, in six replicates. Quinoa seeds were planted at a depth of 2 cm in the soil of all the columns except for the control without cultivation treatment on August 23, 2020, in the greenhouse of the Faculty of Agriculture of Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. At the end of the growing season (December 8, 2020), 3 replicates of each treatment were selected to measure root wet and dry mass and seed yield, as well as three more replicates were used to measure soil water retention and penetration resistance.
	Results: The results showed that the application of montmorillonite nanoclay decreased root mass by 26% and 54% in sandy loam and loam soils, respectively. The use of nanoclay increased the retention of soil water content at matric suctions of 10, 30 and 100 kPa in the range of 2% - 28%. The penetration resistance of loam texture was lower compared to sandy loam texture at matric suctions of 30 and 100 kPa (23% - 11%). The increase in the soil water content decreases the cohesive forces applied

between individual soil particles and decreases the frictional resistance caused by the sliding of the soil particles during the penetration of the growing roots, which was higher in loam soil texture.

Conclusion: The application of nanoclay in both soils increased the retention of water in the soil by changing the pore size distribution, porosity, and density of the soil. Soil resistance is highly dependent on soil moisture, and soil penetration resistance decreases with increasing soil moisture content. The results showed that the nanoclay increased root growth in loam soil by providing water and nutrients to the roots. While in sandy loam soil, due to the high ratio of coarse pores, the application percentage of nanoclay was low, and it did not have a significant effect. Also, despite the current high cost of nanoclay compared to other modifiers such as biochar, superabsorbent, etc., the authors believe that the findings of this study can help to develop a method to improve and manage sustainable agriculture.

Cite this article: Daraei, Elahe, Bayat, Hossein. 2025. Effect of Nanoclay on Soil Physical Properties and Yield of Quinoa in Two Different Soil Textures. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 15 (1), 79-100.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2025.22160.2135

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



اثر نانورس بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و عملکرد گیاه کینوا در دو بافت خاک متفاوت

الهه دارائی^۱، حسین بیات^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: elahe.daraei69@gmail.com
 ۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
 رایانامه: h.bayat@basu.ac.ir, hbayat2001@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۳ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹ واژه‌های کلیدی: جرم ریشه، مقاومت فروروی، نانو مونت موریلونیت، نگه‌داشت آب خاک	سابقه و هدف: ارزیابی مقاومت فروروی به‌عنوان بخشی از استراتژی مدیریت پایدار برای حفظ کیفیت فیزیکی خاک ضروری می‌باشد. نانورس‌ها به‌عنوان یک اصلاح‌کننده ارزان و مؤثر نسبت به سایر نانوذرات، نانوذرات طبیعی امیدوارکننده‌ای در اصلاح خاک‌ها و افزایش عملکرد گیاه هستند، که بر مقاومت فروروی و دیگر ویژگی‌های فیزیکی خاک تأثیر دارند. گیاه کینوا به‌عنوان یک محصول استراتژیک جدید و جایگزین گندم متأثر از ویژگی‌های خاک از جمله مقاومت فروروی است. با این وجود تأثیر هم‌زمان نانورس بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و به تبع آن بر عملکرد و خصوصیات ریشه گیاه کینوا، تاکنون در هیچ پژوهشی مورد بررسی واقع نشده است. بنابراین این مطالعه با هدف بهبود مقاومت فروروی و نگه‌داشت آب خاک با به‌کارگیری نانورس مونت‌موریلونیت و افزایش عملکرد و رشد ریشه گیاه کینوا در دو خاک متفاوت انجام شد. مواد و روش‌ها: در این پژوهش آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. فاکتور اول نانورس مونت‌موریلونیت در دو سطح صفر (شاهد بدون کشت و با کشت) و ۳ درصد وزنی و فاکتور دوم خاک در دو سطح خاک لوم شنی و لوم در شش تکرار بود. بذر کینوا در عمق دو سانتی‌متری در خاک تمامی ستون‌ها به جز شاهد بدون کشت، در تاریخ ۲ شهریور ۱۳۹۹ در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان کشت شد. در پایان فصل رشد (۱۸ آذر ۱۳۹۹)، سه تکرار از هر تیمار برای اندازه‌گیری جرم تر و خشک ریشه و عملکرد دانه و همچنین سه تکرار دیگر برای اندازه‌گیری نگه‌داشت آب و مقاومت فروروی خاک انتخاب شد. یافته‌ها: نتایج نشان داد که کاربرد نانورس مونت‌موریلونیت باعث کاهش جرم خشک ریشه به‌میزان ۲۶ و ۵۴ درصد به‌ترتیب در خاک لوم‌شنی و لوم شد. استفاده از نانورس بر افزایش

میزان ماندگاری آب در هر دو خاک در مکش‌های ماتریکی ۱۰، ۳۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال در حد ۲۸-۲٪ بود. مقاومت فروروی در بافت لوم نسبت به بافت لوم شنی در مکش‌های ماتریک ۳۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال (۱۱-۲۳٪) پایین‌تر بود. افزایش محتوای آب خاک باعث کاهش نیروهای چسبندگی اعمال شده بین تک‌تک ذرات خاک و کاهش مقاومت اصطکاکی ناشی از لغزش ذرات خاک در طول نفوذ ریشه‌های در حال رشد می‌شود که در بافت خاک لوم بیش‌تر بود.

نتیجه‌گیری: کاربرد نانورس در هر دو خاک با تغییر توزیع اندازه منافذ، تخلخل و تراکم خاک باعث افزایش ماندگاری آب در خاک شد. مقاومت خاک بسیار وابسته به رطوبت خاک است و مقاومت فروروی خاک با افزایش رطوبت خاک کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که سطح نانورس با تأمین آب و عناصر غذایی به ریشه باعث افزایش رشد ریشه در خاک لوم شد. در حالی‌که در خاک لوم شنی به دلیل بالا بودن نسبت منافذ درشت، درصد کاربرد نانورس کم بود و تأثیر معنی‌داری نداشت. همچنین با وجود هزینه بالای فعلی نانورس در مقایسه با سایر اصلاح‌کننده‌هایی مانند بیوجار، سوپرجاذب، نویسندگان بر این باورند که یافته‌های این مطالعه می‌تواند به توسعه روشی برای بهبود و مدیریت کشاورزی پایدار کمک کند.

استناد: دارائی، الهه، بیات، حسین (۱۴۰۴). اثر نانورس بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و عملکرد گیاه کینوا در دو بافت خاک متفاوت. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۵ (۱)، ۷۹-۱۰۰.

DOI: 10.22069/ejsms.2025.22160.2135



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

یکی از دلایل اصلی تخریب خاک، تراکم ناشی از عبور ماشین‌آلات و لگدمال کردن حیوانات است. تراکم خاک با افزایش چگالی خاک مشخص می‌شود، که منجر به افزایش مقاومت فروروی^۱ (PR)، کاهش تخلخل و کاهش جذب آب و عناصر غذایی توسط ریشه می‌شود (۱). مقاومت فروروی خاک به ویژگی‌های خاک مانند چگالی ظاهری، بافت، ساختمان، مواد سیمانی‌کننده، محتوای مواد آلی، کانی‌شناسی و محتوای آب خاک و خاکورزی بستگی دارد (۲). از PR می‌توان برای ارزیابی تراکم خاک استفاده کرد. زیرا حتی در مقادیر بالای آب خاک، PR در خاک‌های متراکم در مقایسه با خاک‌های غیر متراکم بیش‌تر است (۳).

افزایش مقاومت فروروی، ناشی از خشک شدن یا تراکم خاک، بر تخلخل خاک، تمام جنبه‌های رشد ریشه، عمق ریشه‌زایی، مورفولوژی سیستم ریشه، جذب آب و عناصر غذایی تأثیر می‌گذارد و به‌طور مؤثری باعث کاهش رشد و بهره‌وری و عملکرد محصول می‌شود (۴). بنابراین، می‌تواند یک رابطه متقابل بین مقاومت فروروی خاک و رشد و عملکرد سیستم ریشه وجود داشته باشد. بنگوگ و مولینز (۱۹۹۱) گزارش کردند که میزان طول ریشه با مقاومت در برابر نفوذ ریشه همبستگی منفی دارد، چرا که افزایش مقاومت خاک از نظر فیزیکی حجم خاک در تماس با ریشه‌ها را محدود می‌کند و مانع جذب آب و عناصر غذایی می‌شود (۵). PR بیش‌تر از ۲/۵ مگاپاسکال معمولاً منجر به اثرات نامطلوب بر رشد گیاه به‌ویژه برای محصولات یک ساله می‌شود (۶). ریشه‌های گیاه به‌طور بالقوه با افزایش مقاومت برشی خاک، به‌طور مستقیم از طریق مقاومت فروروی و به‌طور غیرمستقیم از طریق از دست دادن آب خاک

ناشی از تعرق، بر استحکام خاک تأثیر می‌گذارند. از سوی دیگر توسعه ریشه گیاهان به‌طور قابل‌توجهی تحت‌تأثیر خواص بیولوژیکی، مکانیکی و فیزیکوشیمیایی خاک است (۴).

کانی‌شناسی خاک رس یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت خاک است و دانش مناسب از کانی‌شناسی رسی خاک دارای پیامدهای عملی قابل‌توجهی در کاربرد و مدیریت کودها است. تأثیر ترکیب کانی‌شناسی خاک بر بهره‌وری خاک به دو روش است؛ (۱) بر واکنش‌های شیمیایی تنظیم‌کننده دسترسی و جذب عناصر غذایی تأثیر می‌گذارد و (۲) بر ویژگی‌های فیزیکی کنترل‌کننده پارامترهای خاک تأثیر می‌گذارد (۷). از طرفی علم نانو برای علوم خاک اهمیت حیاتی دارد، زیرا بسیاری از ترکیبات طبیعی خاک‌ها نانوذرات هستند یا دارای ویژگی‌های مقیاس نانو می‌باشند. امروزه استفاده از پلیمرهای آلی کاتیونی و نانومواد به‌طور قابل‌توجهی برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک، مقاومت برشی، پایداری و تراکم‌پذیری توسعه یافته است. بنابراین نانورس دارای ویژگی‌های منحصر به‌فردی مانند سطح ویژه بالا هستند که مقدار آب خاک را تغییر می‌دهند و از نوسانات ناگهانی مقدار آب خاک جلوگیری می‌کنند (۸). بنابراین مواد در مقیاس نانو به‌دلیل اندازه بسیار کوچکشان، مساحت سطح ویژه بسیار بالایی دارند. از این‌رو به‌طور بسیار فعالی با دیگر ذرات خاک واکنش می‌دهند. به دلیل داشتن همین ویژگی‌ها حتی در صورت استفاده بسیار کم از این ذرات در محیط خاک، رفتار فیزیکی-شیمیایی و مکانیکی خاک را به‌طور بسیار ویژه و قابل‌توجه تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. نانورس‌ها مواد غیرسمی و کم‌هزینه‌ای هستند که به‌صورت تجاری از خاک رس‌های طبیعی که از منابع به راحتی در دسترس هستند تولید می‌شوند. عدم وجود پیوند شیمیایی بین لایه‌های هندسی رس منجر به افزایش

1- Penetration resistance

استفاده کاربردی وسیع‌تر از این فناوری در زمینه خاکشناسی و تولید محصول مهمی هم‌چون کینوا هموار سازد. با توجه به بررسی منابع انجام شده در هیچ مطالعه‌ای اثر نانورس مونت‌موریلونیت بر سیستم ریشه و افزایش عملکرد گیاه کینوا، کاهش مقاومت فروری و افزایش ظرفیت نگهداشت آب خاک مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین هدف از این پژوهش تعیین مقدار اثر نانورس مونت‌موریلونیت بر ریشه‌زایی و افزایش عملکرد گیاه کینوا به‌عنوان یک گیاه استراتژیک برای تأمین امنیت غذایی، افزایش مقدار آب خاک و کاهش مقاومت فروری در دو بافت خاک متفاوت بود. در این پژوهش فرض بر این بود که نانورس با تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی و حاصلخیزی خاک رشد و عملکرد کینوا را افزایش دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و نمونه‌برداری: نمونه‌برداری این مطالعه در دو نقطه مختلف از زمین‌های کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان واقع در کیلومتر ۵ جاده همدان-تهران با موقعیت جغرافیایی $32^{\circ} 18' E$ و $52^{\circ} 54' N$ (بافت Sandy loam) و از مزرعه آموزشی-تحقیقاتی عباس‌آباد، واقع در دانشگاه بوعلی‌سینا همدان با موقعیت جغرافیایی $48^{\circ} 28' E$ و $26^{\circ} 47' N$ (بافت Loam) با میانگین بلندمدت بارندگی سالانه ۳۲۱ میلی‌متر و دما ۱۲ درجه سانتی‌گراد (سایت هواشناسی استان همدان، ۲۰۲۲)، رژیم رطوبتی Xeric، رژیم حرارتی Mezic و رده‌بندی Inceptisols انجام شد. در هر دو منطقه، نمونه‌برداری از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک مزرعه تحت کشت گندم به‌صورت مرکب با بیل انجام شد. هم‌چنین یک نمونه دست‌نخورده با استفاده از

ظرفیت لایه‌ها می‌شود که سبب جذب و دفع بهتر آب می‌شود (۹). هم‌آوری و پراکنش ذرات رس می‌تواند نقش مهمی در هدایت و نگهداشت آب در خاک داشته باشد. یکی از عوامل مهم که باعث افزایش هم‌آوری می‌شود غلظت الکترولیت است (۱۰). کاهش لایه دوگانه پخشیده به‌دلیل افزایش غلظت الکترولیت منجر به کاهش دافعه الکترواستاتیک می‌شود که منجر به حرکت ذرات نانورس به سمت یکدیگر و خاکدانه‌سازی می‌شود (۱۱). این امر باعث افزایش تخلخل و کاهش جرم مخصوص ظاهری می‌شود. ذو و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که توزیع اندازه منافذ می‌تواند نگهداشت آب خاک را تحت‌تأثیر قرار دهد (۱۲). در یک آزمایش لایسیمتر، مشخص شد که کاربرد نانوذرات تنها با افزودن ۳ درصد وزنی، ظرفیت نگهداشت آب خاک را تا ۱۸۰ درصد افزایش داد (۱۳).

دانه کینوا هزاران سال است که در منطقه آند در آمریکای جنوبی مصرف می‌شود و در دهه اخیر محبوبیت زیادی در خارج از آمریکای جنوبی به‌دست آورده است، و به‌عنوان جایگزینی برای گندم مورد استفاده قرار گرفته است. دانه‌های کینوا به‌دلیل مشخصات تغذیه‌ای‌شان دارای پروتئین بالای ۱۱ تا ۱۸ درصد بوده و شامل تمام اسید آمینه‌های ضروری است (۱۴). جهت مقایسه لازم به‌ذکر است که دانه‌های غلاتی مانند برنج، ذرت و ارزن دارای مقدار پروتئین ۷ تا ۱۰ درصد می‌باشند، که این نشان از ارزشمندی دانه کینوا است. اگرچه مطالعات زیادی برای بررسی اثر تیمارهای مختلف بر توسعه سیستم ریشه، عملکرد گیاه، مقاومت فروری خاک و مقدار آب خاک انجام شده است، ولی داده‌های واقعی آزمایشگاهی در خصوص تأثیر ذرات نانو بر متغیرهای فوق، به‌دلیل کمبود مطالعاتی از این گونه اندک می‌باشد. انجام چنین مطالعاتی می‌تواند راه را برای

آنالیز خاک: ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اولیه خاک‌ها بر روی نمونه‌های هوا خشک، که از الک ۲ میلی‌متری و برای برخی آزمایش‌ها از الک ۰/۵ میلی‌متری عبور داده شده بود، تعیین شد (جدول ۱).

سیلندرهای استیل به قطر داخلی ۵/۳ و ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متر برای تعیین چگالی ظاهری مزرعه برداشت شد. سپس خاک‌ها به آزمایشگاه فیزیک خاک دانشگاه بوعلی‌سینا همدان منتقل شده و (خاک دست‌خورده) بعد از هوا خشک نمودن از الک ۴/۷۵ میلی‌متری به‌صورت دستی عبور داده شد.

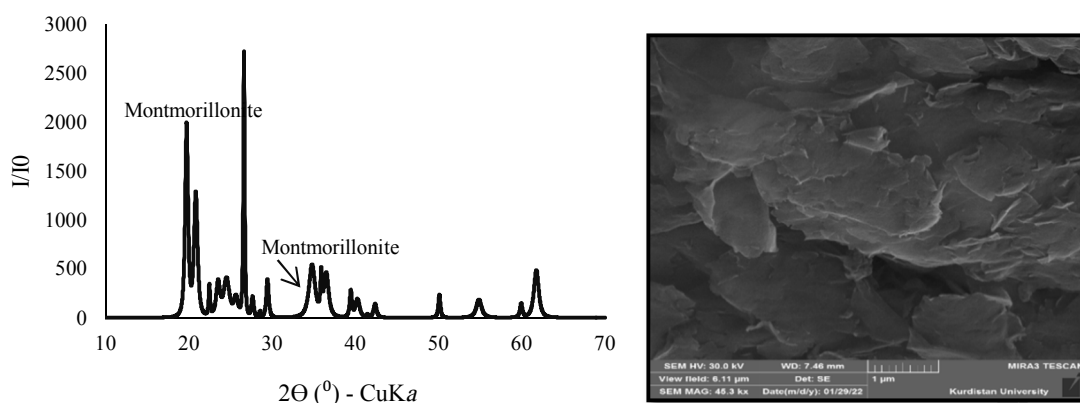
جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد آزمایش.

Table 1. Physicochemical characteristics of experimental soils.

منبع Reference	خاک لوم Loam soil	خاک لوم شنی Sandy loam soil	واحد Unit	پارامترها Parameters
	47	76	%	شن (۰/۰۵-۲/۰ mm) Sand (0.05-2.0 mm)
(15)	37	13	%	سیلت (۰/۰۰۲-۰/۰۵ mm) Silt (0.002-0.05 mm)
	16	11	%	رس (< ۰/۰۰۲ mm) Clay (< 0.002 mm)
	Loam	Sandy loam	-----	بافت Texture
(16)	1.06	1.35	g cm ⁻³	چگالی ظاهری Bulk Density
(17)	7.74	8.48	-----	اسیدیته pH
(18)	0.13	0.13	dS m ⁻¹	هدایت الکتریکی EC
(19)	5.3	14.13	%	کربنات کلسیم CaCO ₃
(20)	2.1	0.69	%	کربن آلی Organic carbon

۲۰ بین ۱۰ تا ۷۰ درجه ترسیم شد. قله‌های مشخص شده به‌عنوان نانو مونت‌موریلونیت نشان‌دهنده خاک رس متورم ۲:۱ است و ویژگی‌های رس نوع نانو مونت‌موریلونیت را تأیید می‌کند. پیک‌های دیگر ناخالصی‌های مربوط به کوارتز هستند. مورفولوژی نانو مونت‌موریلونیت ورقه‌های نامنظم، موج‌دار، چروکیده، تار و پودی یا لانه زنبوری است (شکل ۱).

ویژگی نانوذرات: نانورس مونت‌موریلونیت از شرکت معتبر Nano shel (<https://www.nanoshel.com>) با درجه خلوص ۹۹٪ خریداری شد. نمونه نانو مونت‌موریلونیت با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD) (شکل ۲)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) (شکل ۱) و تکنیک جذب BET N₂ (جدول ۲) مورد ارزیابی قرار گرفت. پیک‌های پراش در زاویه



شکل ۱- الگوی XRD و FESEM نانورس مونت موریلونیت.

Figure 1. XRD and FESEM of Montmorillonite nanoclay.

جدول ۲- ویژگی‌های ساختاری نانوذره مورد استفاده در پژوهش.

Table 2. Selected structural properties of the nanoparticle used in this study.

Montmorillonite	واحد	پارامترها Parameters
White	-----	رنگ Color
4.33	m ² g ⁻¹	سطح ویژه Specific surface area
47.04	nm	میانگین قطر منافذ Mean pore diameter
<80	nm	اندازه ذرات Particle size
115.95	nm	اندازه کریستال Crystallite size

رس مونت‌موریلونیت) بدون کشت (NC)، همه آن‌ها در ۶ تکرار و در مجموع ۳۶ نمونه آزمایشی تهیه گردید. سپس، بذر کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) رقم Gizal در عمق ۲ سانتی‌متری خاک تمام ستون‌ها به‌جز تیمار بدون کشت، در تاریخ ۲ شهریور ۱۳۹۹ در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا همدان کشت شد. با توجه به این‌که در حجم مشخصی از ستون‌ها و بر طبق چگالی مزرعه در داخل ستون‌ها خاک ریخته شد، تخلخل کل خاک را تعیین نموده و حجم آب هر دور آبیاری براساس تخلخل کل هر ستون خاک تعیین گردید. اولین آبیاری پس از کاشت

طراحی آزمایش: در این مطالعه آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. فاکتور اول نانوذرات رس در دو سطح صفر و ۳ درصد وزنی و فاکتور دوم نوع خاک با دو بافت لوم شنی و لوم در شش تکرار بود. نمونه‌های خاک پس از آماده‌سازی با نانوذرات در ستون‌های U-PVC (قطر داخلی ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر) به‌طور همگن با جرم مخصوص ظاهری خاک مزرعه ریخته شدند. تیمارها عبارت بودند از: خاک‌های تیمار شده با ۳ درصد نانوذرات رس مونت‌موریلونیت، شاهد (صفر درصد رس مونت‌موریلونیت) با کشت و شاهد (صفر درصد

صفحه‌های فشاری (۲۱) استفاده شد. آزمایش‌ها در آزمایشگاه با دمای متوسط 3 ± 23 درجه سانتی‌گراد انجام شد.

در پایان فصل رشد پس از خشک شدن بوته‌ها بذرگیری انجام شد و عملکرد دانه آن‌ها نیز اندازه‌گیری شد (۲۲). ریشه گیاه با شستشو به‌طور کامل از خاک خارج شد (۲۳). برای اندازه‌گیری جرم ریشه‌ها در حالت تر و خشک از روش توزین با ترازو دیجیتالی دارای دقت 0.01 گرم استفاده شد. برای این منظور ریشه‌ها درون پاکت قرار گرفتند و جرم ریشه‌های تر به‌دست آمد. در گام بعدی پاکت‌ها با قرار گرفتن در آورن با دمای 70 درجه سانتی‌گراد به‌مدت 48 ساعت خشک شده و جرم ریشه‌های خشک به‌دست آمد (۲۴).

انجام شد. به‌منظور تسریع در امر جوانه‌زنی آبیاری در روزهای اول کشت هر دو روز یک بار انجام شد، که از خشک شدن بذر و جوانه‌ها جلوگیری شود و بعد از جوانه‌زدن و استقرار گیاهچه آبیاری قبل از رسیدن به حالت پژمردگی دائم انجام می‌شد.

در پایان فصل رشد (۱۸ آذر ۱۳۹۹) از هر تیمار سه تکرار برای اندازه‌گیری جرم ریشه و عملکرد دانه و همچنین سه تکرار دیگر برای اندازه‌گیری رطوبت خاک و مقاومت فروروی خاک استفاده شدند. از تمام تکرارهای مربوط به اندازه‌گیری رطوبت خاک و مقاومت فروروی خاک، نمونه‌های دست‌نخورده با استفاده از سیلندرهای استیل به قطر داخلی $5/3$ و ارتفاع $4/5$ سانتی‌متر برداشت شد. برای به‌دست آوردن درصد رطوبت حجمی نمونه‌های دست‌نخورده در مکش‌های 10 ، 30 و 100 کیلوپاسکال از

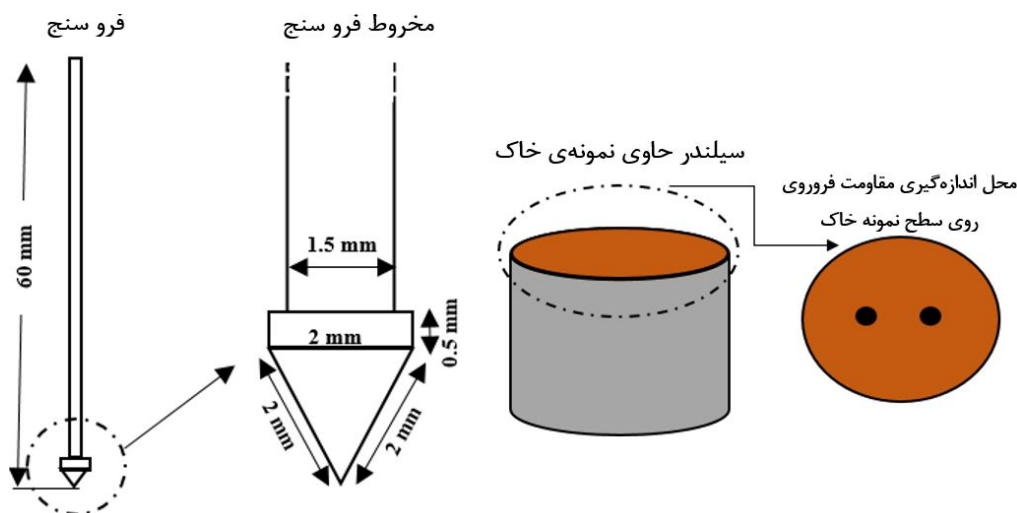


شکل ۲- شمایی از ستون‌های خاک و کشت گیاه.

Figure 2. A figure of soil columns and plant cultivation.

ژئوتکنیکال) با زاویه مخروط 30 درجه، قطر مخروط 2 mm و با سرعت فروروی 2 mm min^{-1} اندازه‌گیری شد (شکل ۳).

مقاومت فروروی (PR) مقاومت فروروی بر روی نمونه‌ها در درون سیلندرهایی به قطر $5/3$ و ارتفاع $4/5$ سانتی‌متر، در مکش‌های 10 ، 30 و 100 کیلوپاسکال با دستگاه فروسنج ریز (مدل ژجیانگ



شکل ۳- شکل شماتیک فروسنج ریز.

Figure 3. Schematic diagram of the mini-probe.

رطوبت حجمی، با استفاده از آنالیز واریانس و مقایسه میانگین با آزمون چنددامنه‌ای دانکن ارزیابی شد. از آزمون پیرسون برای بررسی همبستگی بین متغیرهای مورد مطالعه استفاده شد (۲۵). در تجزیه و تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار SAS 9.4 استفاده شد.

نتایج و بحث

اثر نانورس مونت موریلونیت بر پارامترهای گیاهی: نتایج تجزیه واریانس‌ها نشان داد که تأثیر بافت خاک بر وزن تر و خشک ریشه در سطح ۰/۰۱، تأثیر سطح کاربرد نانورس مونت موریلونیت بر جرم تر و خشک ریشه در سطح ۰/۰۱ و اثر برهمکنش بین بافت خاک و سطح کاربرد نانورس بر جرم خشک ریشه در سطح ۰/۰۵ آماری معنی‌دار شد (جدول ۳). در حالی‌که اثر بافت خاک، سطح کاربرد و برهمکنش بین بافت خاک و سطح کاربرد بر عملکرد دانه معنی‌دار نبود (جدول ۳).

اندازه‌گیری نیرو در آزمون مقاومت فروروی با استفاده از رینگ یک کیلونیوتنی در دو نقطه هر نمونه و در هر نقطه در ۶ عمق ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ سانتی‌متری انجام شد. سپس میانگین ۱۲ اندازه‌گیری تقسیم بر مساحت قاعده مخروط به‌عنوان مقاومت فروروی برای آن نمونه در نظر گرفته شد.

$$F = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_{12}}{12} \quad (1)$$

$$PR = \frac{F}{A} \quad (2)$$

که، F میانگین ۱۲ اندازه‌گیری (N)، A مساحت سطح قاعده مخروط (m^2) و PR مقاومت فروروی بر حسب پاسکال می‌باشد.

آنالیز آماری: بررسی تأثیر نانورس مونت موریلونیت و سطوح کاربرد آن بر مقاومت فروروی در دو بافت خاک متفاوت و همچنین پارامترهای عملکرد گیاه (جرم تر و خشک ریشه و عملکرد دانه) و درصد

جدول ۳- تجزیه واریانس پارامترهای عملکردی، مقاومت فروروی و رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف تحت تیمار نانورس مونت‌موریلونیت.

Table 3. Analysis of the variance of the yield parameters, penetration resistance and volumetric water content at different matric suctions in the soils with montmorillonite nanoclay treatments.

%CV	بافت خاک × سطح کاربرد Soil texture × Application rate	سطح کاربرد Application rate	بافت خاک Soil texture	منابع تغییر S.O.V
میانگین مربع‌ها Mean of squares				
	1	1	1	درجه آزادی DF
	0.09*	0.17**	0.37**	جرم خشک ریشه Root dry mass
	4.01 ^{ns}	16.62**	35.5**	جرم تر ریشه Root wet mass
	0.88 ^{ns}	0.84 ^{ns}	5.60 ^{ns}	عملکرد دانه Seed yield
	2	2	1	درجه آزادی DF
14.32	0.01 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.01 ^{ns}	PR _{10kPa}
13.82	0.01 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.03*	PR _{30kPa}
18.41	0.01 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.30**	PR _{100kPa}
22.29	0.001*	0.002*	0.08**	θ_{10kPa}
26.2	0.001*	0.001*	0.07**	θ_{30kPa}
28.9	0.001**	0.0008*	0.04**	θ_{100kPa}

** معنی‌داری در سطح ۱٪، * معنی‌داری در سطح ۵٪ و ^{ns} غیرمعنی‌دار در سطح ۵٪.

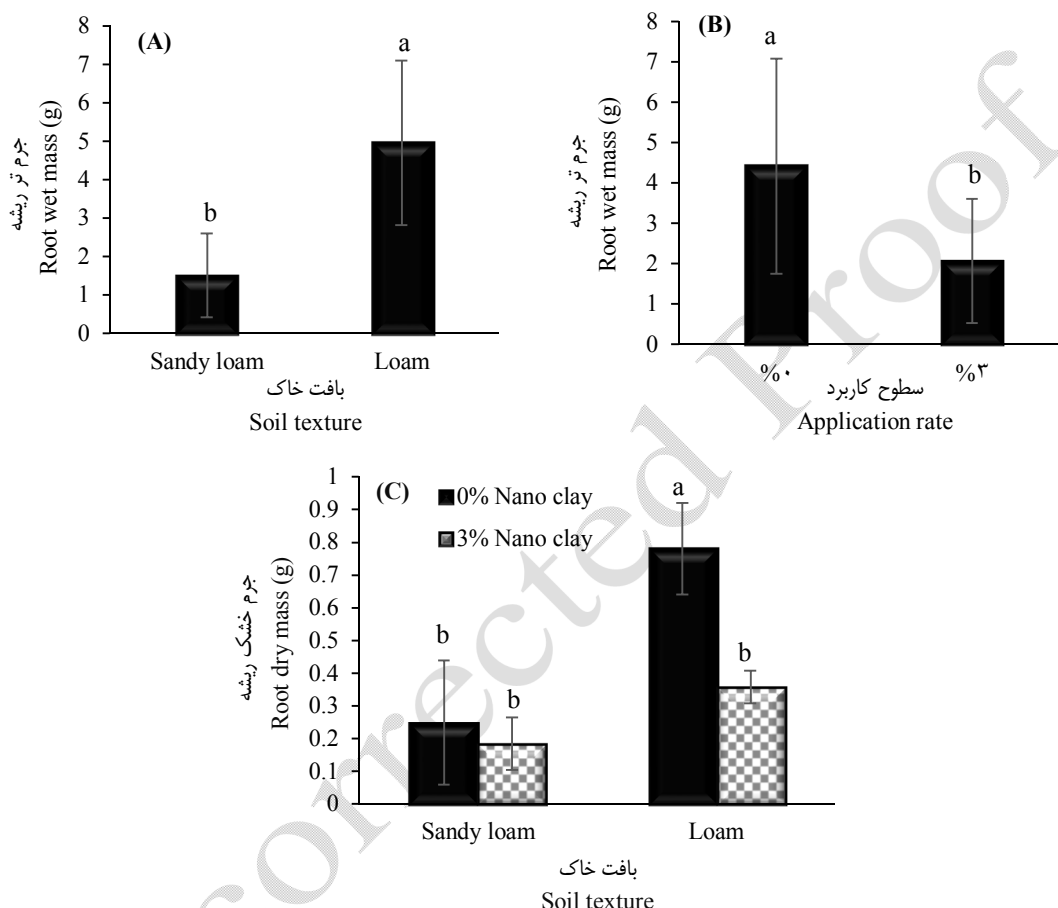
** significant at the 1% level, * significant at the 5% level and ^{ns} non-significant at the 5% level

کاربرد نانورس مونت‌موریلونیت در خاک‌هایی با بافت متفاوت بر پارامترهای گیاهی مانند جرم ریشه و عملکرد دانه تأثیر متفاوتی دارد. هم‌چنین پژوهش‌گران دیگری (۲۷ و ۲۸) یافته‌های قابل مقایسه‌ای را گزارش کرده‌اند که نشان می‌دهد رشد ریشه می‌تواند توسط تراکم خاک محدود شود. آن‌ها نشان دادند که ریشه کینوا در خاک‌های متراکم کوتاه‌تر، ضخیم‌تر و با وزن بیش‌تر می‌باشند، درحالی‌که در خاک‌های غیرمتراکم ریشه‌های گیاه کینوا بلندتر، نازک‌تر و با وزن کم‌تری است. کورنئو و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که با تولید ریشه‌های بلند و نازک، گیاه مواد فتوسنتزی (کربن) کم‌تری را به انبساط ریشه اختصاص می‌دهد و ریشه حجم بیش‌تری از خاک را

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که جرم تر ریشه در خاک لوم ۲۲۶٪ بیش‌تر از خاک لوم شنی شد (شکل ۴A). کاربرد نانورس مونت‌موریلونیت جرم تر ریشه را ۵۳٪ کاهش (معنی‌دار) داد (شکل ۴B). کاربرد نانورس جرم خشک ریشه را در خاک لوم شنی ۲۶٪ و در خاک لوم ۵۴٪ نسبت به شاهد بدون نانورس کاهش داد (شکل ۴C). کینوا نسبت به سطح بالای آب تحمل کم‌تری دارد و با افزایش مقدار آب رشد و عملکرد آن کاهش می‌یابد (۲۶). احتمالاً کاربرد نانورس با افزایش محتوای آب در خاک محدودیت‌هایی را در رشد ریشه ایجاد کرده است و سبب ایجاد ریشه‌های نازک‌تر و طولانی‌تر با جرم کم‌تر در خاک شده است. نتایج نشان می‌دهد که

سبب به وجود آمدن ریشه‌های بلندتر و با وزن کم‌تر شده است. جرم مخصوص ظاهری در تیمار ۳٪ نانورس و شاهد با کشت در خاک لوم به ترتیب ۱/۲۹ و ۱/۲۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب و در خاک لوم‌شنی به ترتیب ۱/۴۹ و ۱/۵۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب بود.

برای یافتن آب و عناصر غذایی کاوش می‌کند (۲۹). بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که در خاک‌های تیمار شده با نانورس به سبب ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها تراکم خاک حاوی نانو کم‌تر از خاک بدون نانوذرات است و همین علت



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر جرم تر ریشه (A و B) و جرم خشک ریشه (C).

در هر شکل، وجود حروف مشابه بر روی هر یک از ستون‌ها نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشد. خطوط عمودی بر روی ستون‌ها انحراف استاندارد را نشان می‌دهند.

Figure 4. Means comparison of the effect of different treatments, on root wet mass (A and B) and root dry mass (C).

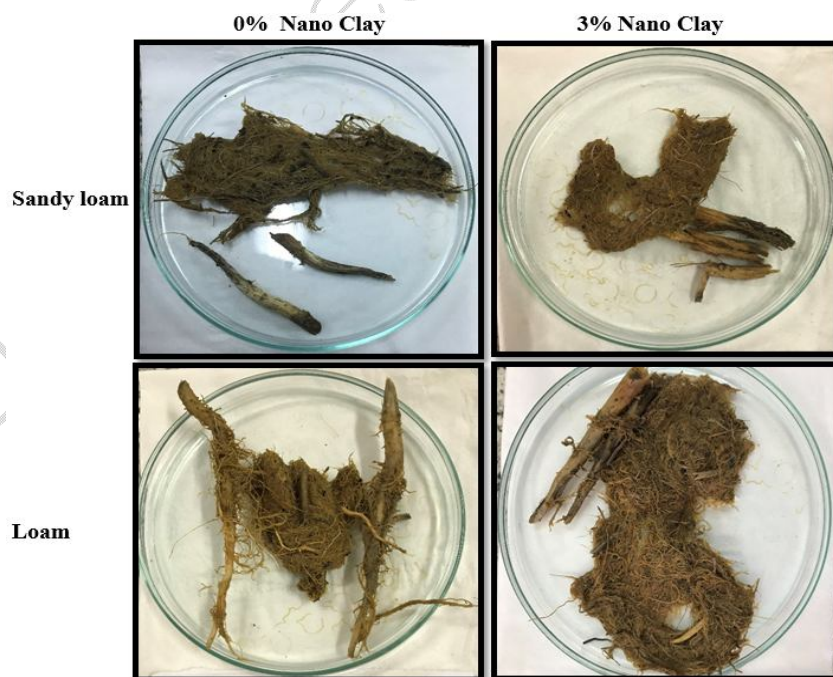
At each figure, similar letters on the columns indicate no significant difference at $P < 0.05$ according to Duncan's test. Error bars indicate the standard deviations.

عناصر غذایی، دما و غیره) بستگی دارد (۳۰). بنابراین با توجه به این دو نکته می‌توان یکی از علت‌های کاهش جرم ریشه را حضور ناخالصی ژنوتیپ Titicaca در بذره‌ای با ژنوتیپ Gizal گیاه کینوا دانست که با توجه به تفاوت ارتفاع این دو ژنوتیپ،

کینوا دارای ریشه‌های قوی، عمیق و منشعب است که بسته به ارتفاع گیاه، ریشه می‌تواند تا عمق ۱/۵ متری خاک نفوذ کند. از طرفی رشد و نمو ریشه گیاهان به عوامل مختلفی مانند ژنوتیپ، بافت خاک، ساختار و شرایط محیطی (در دسترس بودن آب و

می‌یابد. در حالی‌که افزودن نانورس تأثیر معنی‌داری بر جرم خشک ریشه در خاک لوم شنی نداشت (شکل ۵C). ناتوانی ریشه در دسترسی به آب معمولاً به تراکم کم ریشه نسبت داده می‌شود و رابطه خطی بین تراکم ریشه و دسترسی به آب وجود دارد (۳۴). در برخی پژوهش‌ها نتایجی برخلاف نتایج این پژوهش گزارش شده است که با در دسترس بودن آب خاک برای ریشه گیاه، رشد ریشه و در نتیجه جرم آن افزایش می‌یابد (۳۵). رشد ریشه به ویژگی‌های محصول، محتوای آب خاک، بافت و ساختمان خاک بستگی دارد. همچنین تراکم خاک می‌تواند بر رشد تأثیر بگذارد به این صورت که در ابتدا باعث اختلال در دسترسی ریشه به آب خاک می‌شود و تأثیر کلیدی بر فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، تنفس و جذب مواد معدنی دارد، رشد و نمو گیاه را مختل می‌کند و در صورت ادامه، محتوای آب گیاه، تقسیم سلولی، گسترش سطح برگ، رشد ساقه و تکثیر سلول‌های ریشه را کاهش می‌دهد (۳۶).

رشد و جرم ریشه گیاه را تحت تأثیر قرار دادند. همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد تحت تأثیر کاربرد نانورس رشد طولی ریشه‌های گیاه کینوا افزایش یافته و حجم بالایی از ستون خاک مورد آزمایش را احاطه کرده بودند، در حالی‌که همین ریشه‌ها جرم زیادی نداشتند (شکل ۵). با رشد ریشه‌های بلند و نازک، گیاه مواد فتوسنتزی (کربن) کم‌تری را به افزایش جرم ریشه اختصاص می‌دهد در حالی‌که ریشه‌ها حجم بیش‌تری از خاک را به خود اختصاص می‌دهند (۳۱). پس می‌توان گفت با کاربرد نانورس چگالی ریشه گیاه کینوا در خاک لوم کاهش یافته است. نتایج نشان داد با کاهش اندازه ذرات خاک، سطح ویژه به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد (۳۲). بنابراین با کاربرد نانورس در خاک لوم، میانگین اندازه ذرات کاهش یافته و به‌تبع آن، سطح ویژه افزایش می‌یابد که موجب افزایش نگه‌داشت آب در خاک می‌گردد (۳۳) و همان‌طور که در بالا ذکر شد با کاربرد نانورس در خاک تراکم خاک نسبت به شاهد با کشت، کم‌تر شده و رشد ریشه‌های نازک با وزن کم‌تر در خاک افزایش



شکل ۵- ریشه گیاه کینوا در بافت خاک لوم شنی و لوم در تیمار شاهد و ۳٪ نانورس مونت موریلونیت.

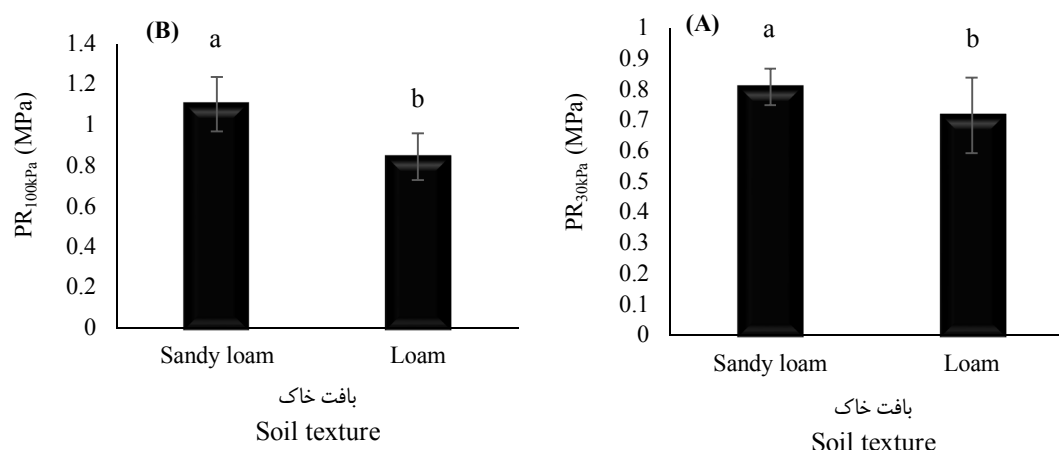
Figure 5. The root of quinoa plant in sandy loam and loam soils in the control and 3% montmorillonite nano clay.

اثر نانورس مونت‌موریلونیت بر مقاومت فروروی: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر فاکتور بافت خاک بر مقاومت فروروی در مکش ۱۰۰ کیلوپاسکال ($P < 0.01$) و ۳۰ کیلوپاسکال ($P < 0.05$) معنی‌دار بود. اما تأثیر سطوح کاربرد نانورس مونت‌موریلونیت و برهمکنش بین دو فاکتور بافت خاک و سطح کاربرد نانورس بر هیچ‌کدام از پارامترها معنی‌دار نبود (جدول ۳).

مقاومت فروروی در مکش ۳۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال بافت خاک لوم به‌ترتیب ۱۱٪ و ۲۳٪ کم‌تر از بافت لوم شنی بود (شکل ۶). مقاومت خاک به شدت به رطوبت خاک بستگی دارد، زیرا افزایش محتوای آب خاک ذرات خاک را جدا می‌کند، انجسام و اصطکاک را کاهش می‌دهد و بنابراین مقاومت فروروی را کاهش می‌دهد. با توجه به این‌که خاک‌های لوم منافذ ریز و متوسط بیش‌تری نسبت به خاک‌های لوم شنی دارند، نگهداشت آب در آن بیش‌تر و نوسانات ناگهانی آب در آن کم‌تر است. جدا از تغییرات ناشی از بافت، مقاومت فروروی خاک تحت‌تأثیر محتوای آب خاک است. محتوای آب و چگالی ظاهری خاک (نسبت پوکی) دو مورد از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مقاومت فروروی هستند. گزارش شده است که PR با کاهش تراکم (یعنی با افزایش مواد آلی و در پی آن افزایش نسبت پوکی) به‌دلیل کاهش تعداد نقاط تماس بین ذرات که در برابر حرکت آب و تغییر شکل اطراف نفوذسنج مقاومت می‌کنند، کاهش می‌یابد (۳۷). اکثر مطالعاتی که تأثیر بافت را بررسی می‌کند، گزارش کرده‌اند که افزایش مقدار رس خاک باعث افزایش PR می‌شود. هم‌چنین، برخی از مطالعات گزارش کرده‌اند که PR با افزایش محتوای ریز خاک افزایش می‌یابد. در مقابل پایین و همکاران (۱۹۹۸) دریافتند که PR در یک خاک ریز با افزایش محتوای ریز (سیلت به‌علاوه رس (> 60 میکرومتر)) از ۱۴٪ تا ۲۹٪ کاهش یافته است (۳۸). تغییرات ناشی از بافت

در PR به‌علت تغییراتی در نسبت پوکی است. افزایش محتوای خاک رس باعث افزایش درجه تشکیل ساختمان می‌شود که منجر به کاهش PR می‌شود. بنابراین علت این کاهش را می‌توان به حساسیت مقاومت فروروی به مقدار بحرانی یا حد آستانه ذرات ریز خاک نسبت داد، که اگر محتوای ریز خاک (سیلت به‌علاوه رس (> 60 میکرومتر)) بیش‌تر از مقدار بحرانی شود سبب افزایش نگهداشت آب خاک و در نتیجه کاهش مقاومت فروروی خاک می‌شود. از این‌رو، تغییرات مقاومت فروروی نه‌تنها به مواد معدنی اولیه خاک بلکه به تغییرات در ساختمان خاک (که به نوبه خود تحت‌تأثیر عواملی مانند محتوای ماده آلی و کانی‌شناسی است) بستگی دارد (۳۷).

کشت گیاه سبب افزایش مواد آلی در خاک می‌شود. مواد آلی دامنه رطوبتی خاک را تغییر داده و با افزایش رطوبت (شکل ۷) سبب کاهش مقاومت فروروی در خاک می‌شود (۳۹). خاک لوم به‌علت وجود مواد آلی و منافذ ریز و متوسط بیش‌تر، جرم مخصوص ظاهری کم‌تر، مقاومت فروروی پایین‌تری نسبت به خاک لوم شنی دارد. مقاومت فروروی به بافت خاک، توزیع اندازه ذرات و شکل ذرات خاک بستگی دارد، بنابراین وجود مواد آلی بیش‌تر (جدول ۱) در خاک لوم به‌علت ایجاد حالت پوکی مقاومت فروروی خاک را کاهش می‌دهد (۴۰). علاوه‌بر این، فعالیت میکروارگانیسم‌ها، ریشه و نیروهای فیزیکی ریشه‌های در حال رشد، بر ساختار منافذ خاک اطراف تأثیر می‌گذارد. چندین مطالعه، بر روی انواع مختلف خاک، شواهدی از تخلخل تغییر یافته در نزدیکی سطوح ریشه ارائه می‌دهند (۴۱، ۴۲ و ۴۳). به‌طور کلی، مشخص شده است که این تغییرات در ویژگی‌های خاک به‌صورت افزایش انتقال آب خاک به جهت‌هایی که جهت ریشه‌ها را دنبال می‌کنند آشکار می‌شوند (۴۴ و ۴۵).



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر مقاومت فروروی در مکش ۳۰ کیلوپاسکال (A) و ۱۰۰ کیلوپاسکال (B). در هر شکل، وجود حروف مشابه بر روی هر یک از ستون‌ها نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشد. خطوط عمودی بر روی ستون‌ها انحراف استاندارد را نشان می‌دهند.

Figure 6. Means comparison of effect of different treatments, on penetration resistance at 30 kPa (A) and 100 kPa (B) matric suctions.

At each figure, similar letters on the columns indicate no significant difference at $P < 0.05$ according to Duncan's test. Error bars indicate the standard deviations.

رطوبت حجمی در مکش ماتریک ۱۰۰ kPa را به‌ترتیب نسبت به شاهد بدون کشت و شاهد با کشت در خاک لوم شنی ۲۰ و ۲۷٪ افزایش و در خاک لوم ۱۱٪ کاهش و ۲٪ افزایش داد (شکل ۷). کاهش رطوبت حجمی نمونه‌های دارای کشت در خاک با بافت لومی در هر سه مکش نسبت به شاهد بدون کشت را می‌توان به سیستم ریشه‌ای گیاه نسبت داد به‌طوری‌که ریشه‌های گیاه رشد کرده و خاکدانه‌های اطراف ریشه تحت فشار اعمال شده توسط ریشه در حال رشد قرار گرفته و به‌صورت موضعی فشرده می‌شود که همین عمل منجر به کاهش تخلخل در آن ناحیه شده است (۴۶)، در نتیجه کاهش تخلخل باعث کاهش نگهداشت آب در خاک شد. ولی در بقیه تیمارها روند افزایشی بود، که این نتایج به‌علت تأثیر اندازه ذرات نانورس در افزایش ذرات ریز خاک، افزایش درصد منافذ ریز و تخلخل خاک است که بر نگهداشت محتوای آب خاک مؤثر می‌باشند. علاوه‌بر

اثر نانورس مونت‌موریلونیت بر رطوبت حجمی: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر فاکتور بافت خاک و سطح کاربرد نانورس مونت‌موریلونیت بر رطوبت حجمی در هر سه مکش ماتریک ۱۰، ۳۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال به‌ترتیب در سطح ۱ و ۵ درصد، و اثر برهمکنش بین دو فاکتور بافت خاک و سطح کاربرد نانورس مونت‌موریلونیت بر رطوبت حجمی در هر سه مکش ۱۰، ۳۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال ($P < 0.05$) و ($P < 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد (شکل ۷)، کاربرد نانورس مونت‌موریلونیت رطوبت حجمی در مکش ۱۰ kPa را به‌ترتیب نسبت به شاهد بدون کشت و شاهد با کشت در خاک لوم شنی ۲۲ و ۲۵٪ افزایش و در خاک لوم ۱٪ کاهش و ۴٪ افزایش، رطوبت حجمی در مکش ۳۰ kPa را به‌ترتیب نسبت به شاهد بدون کشت و شاهد با کشت در خاک لوم شنی ۲۳ و ۲۸٪ افزایش و در خاک لوم ۶٪ کاهش و ۲٪ افزایش داد و

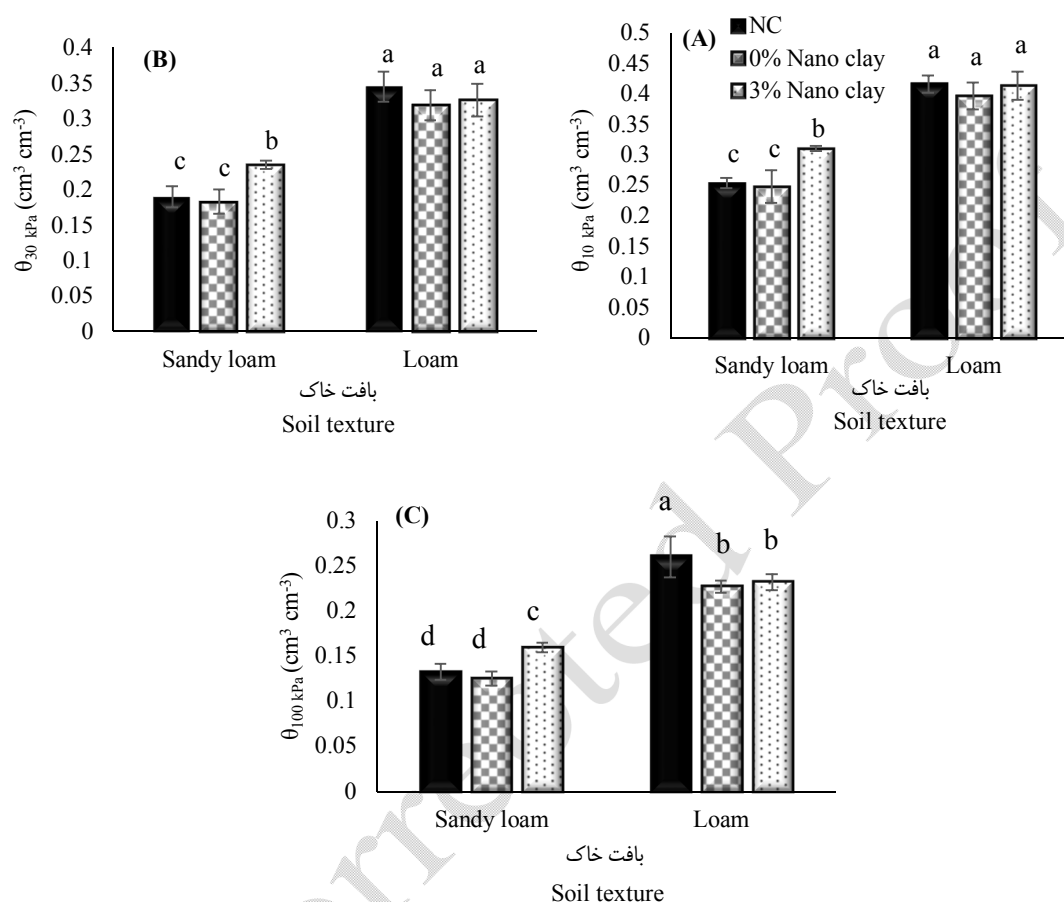
این کاربرد نانورس به دلیل افزایش درصد بارهای منفی سبب می شود ذرات خاک مقدار آب بیشتری را نگهداری کنند (۴۷). همچنین دامنه اندازه منافذ در نمونه های حاوی نانورس بیش تر از خاک بدون نانو رس است (۴۸). نانورس به دلیل سطح ویژه بالا و اندازه بسیار کوچک، با پر کردن جزئی فضاهای درشت، تمایل به افزایش منافذ ریز بین ذرات خاک دارد (۴۹). کاهش تعداد منافذ بزرگ تر و افزایش تعداد منافذ کوچک تر باعث تغییر در توزیع اندازه منافذ در سیستم خاک می شود. در مکش ماتریک پایین (۱۰ کیلو پاسکال)، آب تمایل به خروج از منافذ بزرگ دارد و تنها در منافذ کوچک تر باقی می ماند. بنابراین تخلیه آب برای خاک دارای نانورس کم تر از خاک بدون نانورس می باشد، در نتیجه می توان قابلیت نگهداری آب خاک را تا حدودی با کاربرد نانورس بهبود بخشید، و با کاهش اثرات نامطلوب مرتبط با تنش و نوسانات آبی، به طور هم زمان سبب تقویت رشد و عملکرد محصول کینوا و افزایش بهره وری آب در مناطق خشک و نیمه خشک شد. به طور کلی نانورس با سه مکانیسم نگهداشت آب در خاک را افزایش می دهد، (الف) نانورس به دلیل تخلخل درون ذره ای خود تخلخل جدیدی را در خاک ایجاد می کند، (ب) ذرات نانو منافذ جدیدی را بین ذرات نانورس و خاک تشکیل می دهند و (ج) نانورس می تواند به تشکیل ساختمان بهتر خاک بین نانورس و ذرات خاک کمک کند (۵۰). با توجه به این که خاک های درشت بافت لوم شنی دارای تخلخل و سطح ویژه کمتری نسبت به خاک های متوسط بافت لوم هستند، خاک های درشت بافت لوم شنی با افزودن نانورس متخلخل، بهره بیشتری برده اند (شکل ۶). افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک، همراه با کاهش

مقاومت خاک ناشی از کاهش چگالی ظاهری خاک می تواند شرایط مطلوب تر برای تولید محصول ایجاد کند (۵۱). خاک عمدتاً با هیدراتاسیون سطحی، هیدراتاسیون کاتیونی، پیوندهای هیدروژنی تشکیل شده توسط مولکول های آب و گروه های عاملی حامل اکسیژن، آب را نگهداری می کند (۵۲). نانورس با افزایش بار منفی و سطوح جذب در خاک می تواند مکان های جذب مولکول آب و عناصر غذایی برای گیاهان را افزایش دهد.

نتایج همبستگی: نتایج همبستگی بین پارامترهای مقاومت فروروی، پارامترهای گیاهی و رطوبت حجمی در شکل ۸ نشان داد که همبستگی بالایی بین تمام پارامترها وجود دارد. همان طور که نتایج نشان می دهد تمام همبستگی بین مقاومت فروروی و پارامترهای گیاهی جرم تر ریشه و عملکرد دانه منفی می باشد، به این معنی است که با افزایش مقاومت فروروی خاک توان رشد ریشه کاهش می یابد که در نتیجه کاهش رشد ریشه، جرم ریشه و عملکرد دانه کاهش یافته است. پژوهشگران گزارش کردند که اثر محدودکننده فشردگی خاک ممکن است به دلیل رشد محدود سیستم ریشه، اثرات فیزیکی و فیزیولوژیکی بر رشد و بهره وری گیاهان ایجاد کند (۵۳ و ۵۴). مقاومت خاک بر تکثیر و طویل شدن ریشه ها تأثیر منفی می گذارد. رشد ریشه برای بهره وری گیاهان ضروری است، به ویژه در محیط هایی که با دسترسی کم آب و عناصر غذایی مواجه است (۵۴). از طرفی نتایج نشان داد که همبستگی آب خاک با مقاومت فروروی منفی و با عملکرد دانه و جرم تر ریشه مثبت می باشد. بنابراین با مقدار کافی رطوبت خاک، مقاومت فروروی کاهش و رشد ریشه و عملکرد گیاه افزایش می یابد. مقدار کافی رطوبت در ناحیه ریشه، عامل

منجر به افزایش تهویه و جذب عناصر غذایی توسط ریشه می‌شود و در نهایت تأثیر مثبتی بر عملکرد کینوا دارد (۵۵).

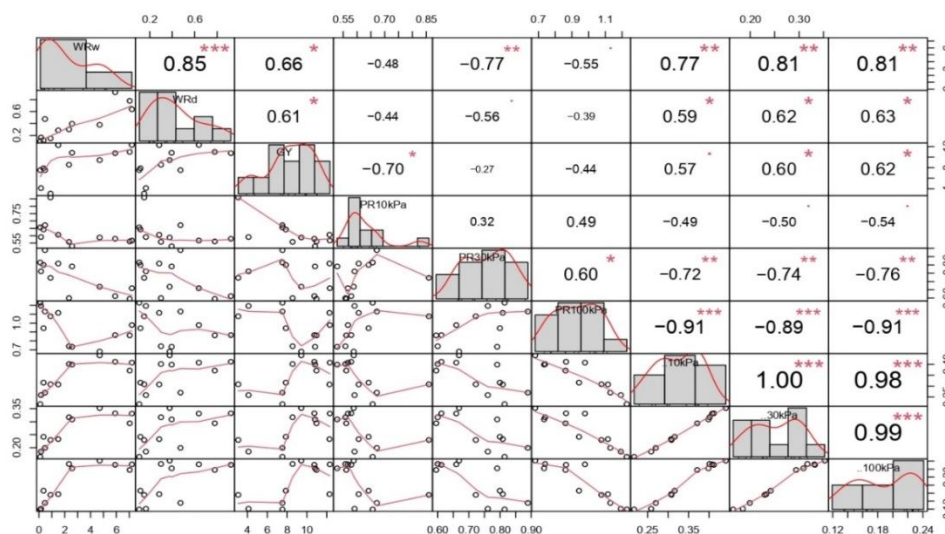
مهمی برای استفاده کارآمد از عناصر غذایی موجود به‌شمار می‌آید. مویینا و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند افزایش رطوبت در خاک و کاهش تراکم خاک



شکل ۷- مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارهای مختلف بر رطوبت حجمی در مکش ماتریک ۱۰ کیلوپاسکال (A)، ۳۰ کیلوپاسکال (B) و ۱۰۰ کیلوپاسکال (C). NC: شاهد بدون کشت.

در هر شکل، وجود حروف مشابه بر روی هر یک از ستون‌ها نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشد. خطوط عمودی بر روی ستون‌ها انحراف استاندارد را نشان می‌دهند.

Figure 7. Means comparison of effect of different treatments, on volumetric moisture content at 10 kPa (A), 30 kPa (B) and 100 kPa (C) matric suctions, NC: Control without cultivation. At each figure, similar letters on the columns indicate no significant difference at $P < 0.05$ according to Duncan's test. Error bars indicate the standard deviations.



شکل ۸- نمودار همبستگی پیرسون بین مقاومت فروری خاک و پارامترهای گیاهی.

WR_w: جرم تر ریشه، WR_d: جرم خشک ریشه و GY عملکرد دانه، PR_{10kPa}، PR_{30kPa} و PR_{100kPa} به ترتیب مقاومت فروری در مکش‌های ۱۰، ۳۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال و θ_{10kPa} ، θ_{30kPa} و θ_{100kPa} به ترتیب رطوبت حجمی در مکش‌های ۱۰، ۳۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال.

Figure 8. Pearson rank correlations between soil penetration resistance and plant parameters. WR: root fresh weight and GY Seed yield, PR_{10kPa}, PR_{30kPa} and PR_{100kPa} are penetration resistance at matric suctions of 10, 30 and 100 kPa, respectively, and θ_{10kPa} , θ_{30kPa} , θ_{100kPa} are volumetric moisture content at matric suctions of 10, 30 and 100 kPa, respectively.

نتیجه‌گیری کلی

برای اثر بیش‌تر در این بافت خاک باید مقدار بهینه‌ای از نانورس مورد استفاده قرار گیرد. به‌طورکلی این مطالعه نشان داد که در خاک درشت بافت به‌علت کم بودن منافذ نگه‌داشت آب، با کاربرد نانورس می‌توان آن را در مقایسه با خاک متوسط بافت بیش‌تر بهبود داد. از طرفی رشد ریشه و عملکرد کینوا به‌شدت تحت‌تأثیر بافت خاک، محتوای رطوبت، چگالی ظاهری و محتوای ماده آلی و عناصر غذایی خاک است. علی‌رغم این‌که نانوذرات رس در این مطالعه بر عملکرد دانه و مقاومت فروری در مکش‌ها ۱۰، ۳۰ و ۱۰۰ کیلوپاسکال تأثیر مثبتی نداشت، ولی با توجه به پتانسیل این نوع از نانوذرات در تغییر منافذ خاک، جرم مخصوص ظاهری، خاکدانه‌سازی و توانایی جذب بالا نیاز به پژوهش‌های بیش‌تر در این خصوص بوده و انجام پژوهش مشابه در خاک‌ها و شرایط مختلف توصیه می‌گردد.

در این مطالعه اثر کاربرد صفر و سه درصد وزنی نانورس مونتموریلونیت در دو بافت خاک سبک و متوسط را بر مقاومت فروری، نگه‌داشت آب خاک و جرم ریشه و عملکرد دانه بررسی شد. نتایج نشان داد کاربرد نانورس در هر دو بافت خاک با تغییر در توزیع اندازه منافذ، تخلخل و چگالی خاک جذب و نگه‌داشت آب در خاک را افزایش داد، ولی اثر آن در خاک درشت بافت بیش‌تر و مؤثرتر بود. مقاومت خاک به شدت به رطوبت خاک بستگی دارد و با افزایش مقدار رطوبت خاک مقاومت در برابر نفوذ خاک کاهش یافت. نتایج نشان داد سطح نانورس با در اختیار گذاشتن آب و عناصر غذایی برای ریشه، رشد را در خاک لوم افزایش داد. در حالی‌که در خاک لوم شنی چون به نسبت منافذ درشت بالا درصد کاربرد نانورس پایین بود اثر قابل‌ملاحظه‌ای نداشت. بنابراین

منابع

1. Benevenuto, P. A., de Moraes, E. G., Souza, A. A., Vasques, I. C., Cardoso, D. P., Sales, F. R., Severiano, E. C., Homem, B. G., Casagrande, D. R., & Silva, B. M. (2020). Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures. *Ecological Indicators*, 117, 106647. doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106647.
2. Tavares Filho, J., Feltran, C. T. M., Oliveira, J. F. D., & Almeida, E. D. (2012). Modelling of soil penetration resistance for an oxisol under no-tillage. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 89-95. doi.org/10.1590/S0100-06832012000100010.
3. Souza, R., Hartzell, S., Ferraz, A. P. F., de Almeida, A. Q., de Sousa Lima, J. R., Antonino, A. C. D., & de Souza, E. S. (2021). Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments. *Soil and Tillage Research*, 205, 104768. doi.org/10.1016/j.still.2020.104768.
4. Kumi, F., Obour, P. B., Arthur, E., Moore, S. E., Asare, P. A., Asiedu, J., Angnuureng, D. B., Atiah, K., Amoah, K. K., & Amponsah, S. K. (2023). Quantifying root-induced soil strength, measured as soil penetration resistance, from different crop plants and soil types. *Soil and Tillage Research*, 233, 105811. doi.org/10.1016/j.still.2023.105811.
5. Bengough, A., & Mullins, C. (1991). Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two sandy loam soils. *Plant and Soil*, 131, 59-66. doi.org/10.1007/BF00010420.
6. Whalley, W., To, J., Kay, B., & Whitmore, A. (2007). Prediction of the penetrometer resistance of soils with models with few parameters. *Geoderma*, 137 (3-4), 370-377. doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.029.
7. Kome, G. K., Enang, R. K., Tabi, F. O., & Yerima, B. P. K. (2019). Influence of clay minerals on some soil fertility attributes: A review. *Open Journal of Soil Science*, 9, 155-188. doi.org/10.4236/ojss.2019.99010.
8. Ahmadi, H., & Shafiee, O. (2019). Experimental comparative study on the performance of nano-sio2 and microsilica in stabilization of clay. *The European Physical Journal Plus*, 134, 459. doi.org/10.1140/epjp/i2019-12918-1.
9. Roustaei, M., Sabetraftar, M., Taherabadi, E., & Bayat, M. (2023). Compressive and tensile strength of nano-clay stabilised soil subjected to repeated freeze-thaw cycles. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 45 (3), 221-230. doi.org/10.2478/sgem-2023-0009.
10. Taha, O. M. E., & Taha, M. R. (2016). Soil-water characteristic curves and hydraulic conductivity of nanomaterial-soil-bentonite mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, 9 (1), 12. doi.org/10.1007/s12517-015-2038-6.
11. Schmitz, R. M. (2006). Can the diffuse double layer theory describe changes in hydraulic conductivity of compacted clays? *Geotechnical & Geological Engineering*, 24, 1835-1844. doi.org/10.1007/s10706-005-3365-2.
12. Xu, L., Ma, M. Y., Lan, T. G., Wang, Y. X., & Lu, S. F. (2023). Exploring soil water retention hysteresis in the entire suction range and microstructure evolution of loess: The influence of sediment depths. *Engineering Geology*, 328, 107373. doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107373.
13. Schaller, J., Frei, S., Rohn, L., & Gilfedder, B. S. (2020). Amorphous silica controls water storage capacity and phosphorus mobility in soils. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 94. doi.org/10.3389/fenvs.2020.00094.
14. Ballegaard, A. S. R., Sancho, A. I., Zhou, C., Knudsen, N. P. H., Rigby, N. M., Bang-Berthelsen, C. H., Gupta, S., Mackie, A. R., Lübeck, M., & Pilegaard, K. (2023). Allergenicity evaluation of quinoa proteins—a study in brown norway rats. *Food and Chemical Toxicology*, 182, 114118. doi.org/10.1016/j.fct.2023.114118.

15. Elfaki, J. T., Gafer, M. A., Sulieman, M. M., & Ali, M. E. (2016). Hydrometer method against pipette method for estimating soil particle size distribution in some soil types selected from Central Sudan. *International Journal of Engineering Research and Advanced Technology*, 2 (2), 25-41.
16. Okalebo, J. R., Gathua, K. W., & Woomer, P. L. (2002). Laboratory methods of soil and plant analysis: A working manual second edition. Sacred Africa. 126p.
17. Tomas, G. W. (1996). P. 475-490. In: D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston & M. E. Sumner (Ed.). Soil pH and soil acidity. No. 5, Methods of soil analysis: part 3 chemical methods. Madison, Wisconsin (USA): *Soil Sci. Soc. Am. Inc.* doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16.
18. Rhoades, J. D. (1996). P. 417-435. In: D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, & M. E. Sumner (Ed.). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. No. 5, Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods. Madison, Wisconsin (USA): *Soil. Sci. Soc. Am. Inc.* doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14.
19. McLean, E. O. (1983). P. 199-224. In: A. L. Page (Ed.). Soil pH and lime requirement. No. 9, Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties, Madison, Wisconsin (USA): *Soil Sci. Soc. Am. Inc.* doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c12.
20. Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37 (1), 29-38.
21. Vereecken, H., Weynants, M., Javaux, M., Pachepsky, Y., Schaap, M. G., & Van Genuchten, M. T. (2010). Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten-Mualem soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone Journal*, 9 (4), 795-820. doi.org/10.2136/vzj2010.0045.
22. Okuyama, L. A., Federizzi, L. C., & Barbosa Neto, J. F. (2004). Correlation and path analysis of yield and its components and plant traits in wheat. *Ciência Rural*, 34, 1701-1708. doi.org/10.1590/S0103-84782004000600006.
23. Sattelmacher, B. (1987). Methods for measuring root volume and for studying root morphology. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 150 (1), 54-55. doi.org/10.1002/jpln.19871500112.
24. Misra, R., & Ahmed, M. (1987). Root parameters and their measurement. *Manual of Irrigation Agronomy Oxford & IBH Publishing Company*, 319-326. doi.org/10.1007/978-3-642-67282-8_12.
25. Guo, Z., Li, P., Yang, X., Wang, Z., Lu, B., Chen, W., Wu, Y., Li, G., Zhao, Z., & Liu, G. (2022). Soil texture is an important factor determining how microplastics affect soil hydraulic characteristics. *Environment International*, 165, 107293. doi.org/10.1016/j.envint.2022.107293.
26. Isobe, K., Uziie, K., Hitomi, S., Furuya, U., & Ishii, R. (2012). Agronomic studies on quinoa (chenopodium quinoa willd.) cultivation in japan-effects of day and night temperature after flowering time on seed thickening. *Japanese Journal of Crop Science*, 81, 167-172. doi.org/10.1626/jcs.81.167.
27. Ahmadi, S. H., Solgi, S., & Sepaskhah, A. R. (2019). Quinoa: A super or pseudo-super crop? Evidences from evapotranspiration, root growth, crop coefficients, and water productivity in a hot and semi-arid area under three planting densities. *Agricultural Water Management*, 225, 105784. doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105784.
28. Mirsafi, S. M., Sepaskhah, A. R., & Ahmadi, S. H. (2024). Quinoa growth and yield, soil water dynamics, root growth, and water use indicators in response to deficit irrigation and

- planting methods. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 100970. **doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100970.**
29. Corneo, P. E., Keitel, C., Kertesz, M. A., & Dijkstra, F. A. (2017). Variation in specific root length among 23 wheat genotypes affects leaf $\delta^{13}\text{C}$ and yield. *Agriculture, ecosystems & environment*, 246, 21-29. **doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.012.**
30. Hssan, S., Inglese, P., Gristina, L., Liguori, G., Novara, A., Louhaichi, M., & Sortino, G. (2019). Root growth and soil carbon turnover in opuntia ficus-indica as affected by soil volume availability. *European Journal of Agronomy*, 105, 104-110. **doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.012.**
31. Mirsafi, S. M., Sepaskhah, A. R., & Ahmadi, S. H. (2024). Quinoa growth and yield, soil water dynamics, root growth, and water use indicators in response to deficit irrigation and planting methods. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 100970. **doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100970.**
32. Brady, N. C. (2010). *The Nature and Properties of Soils*. MacMillan Publishing Company. New York. 750p.
33. Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*: Academic press. Waltham.
34. Zhang, X., Whalley, P., Ashton, R., Evans, J., Hawkesford, M., Griffiths, S., Huang, Z., Zhou, H., Mooney, S., & Whalley, W. (2020). A comparison between water uptake and root length density in winter wheat: Effects of root density and rhizosphere properties. *Plant and Soil*, 451, 345-356. **doi.org/10.1007/s11104-020-04530-3.**
35. Asseng, S., Ritchie, J., Smucker, A., & Robertson, M. (1998). Root growth and water uptake during water deficit and recovering in wheat. *Plant and soil*, 201, 265-273. **doi.org/10.1023/A:1004317523264.**
36. Farajollahi, Z., Eisvand, H. R., Nazarian-Firouzabadi, F., & Nasrollahi, A. H. (2023). Nano-fe nutrition improves soybean physiological characteristics, yield, root features and water productivity in different planting dates under drought stress conditions. *Industrial Crops and Products*, 198, 116698. **doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116698.**
37. Buchanan, S., So, H., Kopittke, P., & Menzies, N. (2010). Influence of texture in bauxite residues on void ratio, water holding characteristics, and penetration resistance. *Geoderma*, 158, 421-426. **doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.06.016.**
38. Pabin, J., Lipiec, J., Włodek, S., Biskupski, A., & Kaus, A. (1998). Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. *Soil and Tillage Research*, 46, 203-208. **doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00098-1.**
39. Gupta, S., Schneider, E., Larson, W., & Hadas, A. (1987). Influence of corn residue on compression and compaction behavior of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 51, 207-212. **doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100010043x.**
40. Ilek, A., Kucza, J., & Szostek, M. (2017). The effect of the bulk density and the decomposition index of organic matter on the water storage capacity of the surface layers of forest soils. *Geoderma*, 285, 27-34. **doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.09.025.**
41. Koebernick, N., Daly, K. R., Keyes, S. D., Bengough, A. G., Brown, L. K., Cooper, L. J., George, T. S., Hallett, P. D., Naveed, M., & Raffan, A. (2019). Imaging microstructure of the barley rhizosphere: Particle packing and root hair influences. *New Phytologist*, 221 (4), 1878-1889. **doi.org/10.1111/nph.15516.**
42. Mair, A., Dupuy, L., & Ptashnyk, M. (2023). Can root systems redistribute soil water to mitigate the effects of drought? *Field Crops Research*, 300, 109006. **doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109006.**

43. Anselmucci, F., Andò, E., Viggiani, G., Lenoir, N., Arson, C., & Sibille, L. (2021). Imaging local soil kinematics during the first days of maize root growth in sand. *Scientific reports*, 11 (1), 22262. doi.org/10.1038/s41598-021-01056-1.
44. Lange, B., Lüscher, P., & Germann, P. F. (2009). Significance of tree roots for preferential infiltration in stagnic soils. *Hydrology and earth system sciences*, 13 (10), 1809-1821. doi.org/10.5194/hess-13-1809-2009.
45. Beff, L., Günther, T., Vandoorne, B., Couvreur, V., & Javaux, M. (2013). Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using electrical resistivity tomography. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17 (2), 595-609. doi.org/10.5194/hess-17-595-2013.
46. Ali, W., Hussain, S., Chen, J., Hu, F., Liu, J., He, Y., & Yang, M. (2023). Cover crop root-derived organic carbon influences aggregate stability through soil internal forces in a clayey red soil. *Geoderma*, 429, 116271. doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116271.
47. AlSaeedi, A. H. (2022). Enhancement of soil water characteristics curve (swcc) and water use efficiency of cucumber (*cucumis sativus* L.) in sandy soils by using silica nanoparticles. *Journal of King Saud University-Science*, 34 (4), 101926. doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101926.
48. Zhou, B., & Chen, X. (2017). Effect of nano-carbon on water holding capacity in a sandy soil of the loess plateau. *Earth Sciences Research Journal*, 21 (4), 189-195. doi.org/10.15446/esrj.v21n4.66104.
49. Zhou, B., & Chen, X. (2017). Effect of nano-carbon on water holding capacity in a sandy soil of the loess plateau. *Earth Sciences Research Journal*, 21 (4), 189-195. doi.org/10.15446/esrj.v21n4.66104.
50. Yakupoglu, T., Oztas, T., Kiray, F., & Demirkol, B. (2015). Effect of some polymers on soil-water losses and sediment size depending on initial aggregate size under sequential simulated rainfall. *Procedia Environmental Sciences*, 29, 21. doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.134.
51. Zhou, H., Chen, C., Wang, D., Arthur, E., Zhang, Z., Guo, Z., Peng, X., & Mooney, S. J. (2020). Effect of long-term organic amendments on the full-range soil water retention characteristics of a vertisol. *Soil and Tillage Research*, 202, 104663. doi.org/10.1016/j.still.2020.104663.
52. Arthur, E., Tuller, M., Moldrup, P., & de Jonge, L. W. (2020). Clay content and mineralogy, organic carbon and cation exchange capacity affect water vapour sorption hysteresis of soil. *European Journal of Soil Science*, 71 (2), 204-214. doi.org/10.1111/ejss.12853.
53. Grzesiak, S., Grzesiak, M. T., Filek, W., Hura, T., & Stabryła, J. (2002). The impact of different soil moisture and soil compaction on the growth of triticales root system. *Acta Physiologiae Plantarum*, 24, 331-342. doi.org/10.1007/s11738-002-0059-8.
54. Otto, R., Silva, A. D., Franco, H. C. J., Oliveira, E. D., & Trivelin, P. C. O. (2011). High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil and tillage research*, 117, 201-210. doi.org/10.1016/j.still.2011.10.005.
55. Mobeena, S., Thavaprakash, N., Vaiyapuri, K., Djanaguiraman, M., Geethanjali, S., & Geetha, P. (2023). Influence of different types of soils on the growth and yield of quinoa (*chenopodium quinoa* wild.). *Journal of Applied and Natural Science*, 15 (1), 365-370. doi.org/10.31018/jans.v15i1.4321.