



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources



Soil Science Society of Iran

(OPEN ACCESS)

Effect of root systems and plant types on physicochemical quality and soil structure stability indices

Omid Eghbali¹, Hojat Emami^{*2}, Reza Khorasani³

1. Ph.D. Student, Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: eghbali.omid@mail.um.ac.ir

2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: hemami@um.ac.ir

3. Associate Prof., Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: khorasani@um.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Plant roots play a critical role in modifying soil properties, leading to significant changes that influence soil erodibility, land and crop management, and key soil-related processes such as microbial activity and tillage. Soil structure is particularly important because of its central role in soil health, sustainable agriculture, and carbon sequestration. Given the importance of soil structural stability for sustainable agricultural systems, and considering that plant root systems are among the most influential factors affecting soil physical properties, this study aimed to evaluate the effects of different root systems on soil physicochemical properties and structural stability. Specifically, the root systems of alfalfa, cumin, chickpea, wheat, and barley were investigated across different soil depths to assess their influence on soil quality and stability indices.
Article history: Received: 06.18.2024 Revised: 11.18.2024 Accepted: 11.18.2024	
Keywords: Mean weight diameter, Plant root, Root length diameter, Soil structure stability, Soil texture	
	Materials and Methods: This study was conducted using a randomized complete block design with three replications at the research farm of Ferdowsi University of Mashhad, Khorasan Razavi Province. Experimental plots measuring 10 × 100 m were managed with specific tillage systems, and five plant species representing different root systems-alfalfa, cumin, pea, wheat, and barley-were cultivated. At the end of the growing season (harvest time), both disturbed and undisturbed soil samples were collected at four depths (0-10, 10-20, 20-30, and 30-40 cm) from around the plant roots. Root samples of each plant species were also taken. The soil samples were analyzed for physicochemical properties, including macronutrients, water infiltration, and structural stability indices. Root traits, including root length density (RLD), were measured using root scanning techniques. Data were analyzed using SAS and R statistical software, and graphs were generated with Microsoft Excel.
	Results: The findings showed that the highest soil salinity occurred under wheat (2.3 dS m ⁻¹) and barley (1.6 dS m ⁻¹) cultivation within the 0-40 cm soil depth. The soil under cumin exhibited the greatest organic carbon content at 0-10 and 10-20 cm (0.79% and 0.76%, respectively), while the lowest value (0.2%) was observed at 30-40 cm. Total nitrogen content was highest under chickpea cultivation across 0-40 cm, with the maximum value (0.1%) recorded at 30-40 cm, significantly exceeding other crops.

Saturated hydraulic conductivity decreased with soil depth, with the maximum value (2.44 cm min^{-1}) at 0-10 cm under alfalfa and the minimum (0.49 cm min^{-1}) at 30-40 cm under wheat. The highest soil structural stability index (2.15%) was recorded under cumin, while the lowest (0.48%) was observed at 30-40 cm under alfalfa. On average, the soil stability index across all studied crops remained below 5%, indicating structural degradation due to insufficient organic carbon.

Conclusion: This study demonstrated that even crops with similar root system types exert distinct influences on soil physicochemical properties. Overall, cumin cultivation resulted in the lowest salinity, highest organic matter, and consequently improved soil structural stability. Alfalfa roots, in contrast, played a major role in generating macropores and enhancing saturated hydraulic conductivity.

Cite this article: Eghbali, Omid, Emami, Hojat, Khorasani, Reza. 2025. Effect of root systems and plant types on physicochemical quality and soil structure stability indices. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 15 (2), 121-142.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2025.22538.2159

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



تأثیر سیستم‌های ریشه‌ای و نوع گیاه بر کیفیت فیزیکوشیمیایی و شاخص‌های پایداری ساختمان خاک

امید اقبالی^۱، حجت امامی^{۲*}، رضا خراسانی^۳

۱. دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: eghbali.omid@mail.um.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استاد گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: hemami@um.ac.ir

۳. دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: khorasani@um.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸ واژه‌های کلیدی: بافت خاک، پایداری ساختمان خاک، چگالی طولی ریشه، ریشه گیاه، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها	سابقه و هدف: ریشه گیاه اثرات محسوسی بر خاک داشته و منجر به تغییرات معنی‌دار بر ویژگی‌های خاک می‌شود که این تغییرات تأثیر زیادی بر پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک، مدیریت صحیح زمین و محصول دارد و بسیاری از عوامل شناخته شده مؤثر بر خاک مانند فعالیت میکروارگانیسم‌ها و خاک‌ورزی و در نهایت ساختمان خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ساختمان خاک به دلیل تأثیر بر سلامت خاک، کشاورزی پایدار و ترسیب کربن از اهمیت فراوانی برخوردار است. با توجه به اهمیت پایداری ساختمان خاک در کشاورزی پایدار و تأثیر گیاهان با سیستم‌های مختلف ریشه‌ای (یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ویژگی‌های فیزیکی خاک) بر پایداری ساختمان و سایر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، هدف از این پژوهش بررسی تأثیر سیستم‌های ریشه‌ای گیاهان یونجه، زیره سبز، نخود، گندم و جو بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در اعماق متفاوت است. مواد و روش‌ها: این پژوهش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد، استان خراسان رضوی انجام شد. کرت‌ها با ابعاد ۱۰×۱۰ متر و با سیستم‌های خاک‌ورزی مشخص، مدیریت شده و گیاهان یونجه، زیره سبز، نخود، گندم و جو بر اساس سیستم‌های ریشه‌ای، انتخاب و کشت شدند. قبل از کشت و در انتهای فصل رشد (زمان برداشت محصول)، نمونه‌های خاک دست خورده و دست‌نخورده از چهار عمق ۰-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰ و ۳۰-۴۰ سانتی‌متری اطراف ریشه گیاهان جمع‌آوری شدند. هم‌چنین ریشه هر گیاه برداشت شد. نمونه‌های خاک برای ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی از جمله عناصر غذایی پرمصرف، نفوذپذیری و شاخص‌های پایداری ساختمان، آنالیز شدند. ویژگی‌های ریشه شامل چگالی طولی ریشه و چگالی ریشه اندازه‌گیری شد. از نرم‌افزار SAS برای آنالیز تجزیه

واریانس و از Microsoft Excel برای رسم نمودارها استفاده شد. هم‌چنین مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که بیش‌ترین مقدار شوری در خاک زیرکشت گیاه گندم و جو (به‌ترتیب ۲/۳ و ۱/۶ دسی‌زیمنس بر متر) در عمق‌های ۰ تا ۴۰ سانتی‌متر خاک مشاهده شد. خاک زیرکشت گیاه زیره سبز حاوی بیش‌ترین مقادیر کربن آلی در عمق‌های ۰-۱۰ و ۱۰-۲۰ سانتی‌متر بود (به‌ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۷۶ درصد) و کم‌ترین مقدار کربن آلی خاک (۰/۲ درصد) در عمق ۴۰-۳۰ سانتی‌متری مشاهده شد. مقدار نیتروژن در خاک زیرکشت گیاه نخود (۴۰-۰ سانتی‌متر) به‌طور معنی‌دار بیش‌تر از سایر گیاهان بود و بیش‌ترین مقدار آن در عمق ۴۰-۳۰ سانتی‌متری خاک (۰/۱ درصد) به‌دست آمد. با افزایش عمق خاک، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک کاهش یافت و بیش‌ترین آن در عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری (۲/۴۴ سانتی‌متر بر دقیقه) گیاه یونجه و کم‌ترین آن در عمق ۴۰-۳۰ سانتی‌متری (۰/۴۹ سانتی‌متر بر دقیقه) گیاه گندم به‌دست آمد. بیش‌ترین مقدار شاخص پایداری ساختمان خاک (۲/۱۵ درصد) در خاک زیر کشت گیاه زیره سبز و کم‌ترین مقدار آن (۰/۴۸ درصد) در عمق ۴۰-۳۰ سانتی‌متری خاک زیرکشت یونجه به دست آمد. میانگین شاخص پایداری خاک در تمام گیاهان مورد مطالعه کم‌تر از ۵ درصد بود که نشان‌دهنده تخریب ساختمان خاک ناشی از مقدار ناکافی کربن آلی در خاک است.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که گیاهان حتی با یکسان بودن نوع سیستم ریشه، اثرات متفاوتی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارند. به‌طورکلی خاک زیرکشت گیاه زیره سبز کم‌ترین شوری و بیش‌ترین ماده آلی را داشت در نتیجه باعث افزایش شاخص پایداری ساختمان خاک شد. هم‌چنین سیستم ریشه گیاه یونجه در ایجاد منافذ درشت و افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بسیار مؤثر بود.

استناد: اقبالی، امید، امامی، حجت، خراسانی، رضا (۱۴۰۴). تأثیر سیستم‌های ریشه‌ای و نوع گیاه بر کیفیت فیزیکوشیمیایی و شاخص‌های پایداری ساختمان خاک. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۵ (۲)، ۱۴۲-۱۲۱.

DOI: 10.22069/ejsms.2025.22538.2159



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

توانایی خاک برای تولید، نتیجه فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است که توازن پایدار آن‌ها به همراه مدیریت مناسب، موجب تداوم باروری خاک می‌گردد (۱). آگاهی از تأثیر این فرآیندها بر ریشه گیاهان و تأثیر ریشه گیاهان بر ویژگی‌های خاک برای بررسی تأثیر روش‌های مدیریتی خاک بر تولید محصول ضروری است. سیستم‌های کشت متفاوت و انتخاب نوع گیاه برای کشت، اثرات محسوسی بر خاک داشته و منجر به تغییرات معنی‌دار بر ویژگی‌های خاک می‌شوند. این تغییرات تأثیر زیادی بر رشد محصول، پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک و مدیریت صحیح زمین و محصول داشته و بسیاری از عوامل شناخته شده مؤثر بر خاک مانند فعالیت‌های ریشه، میکروارگانیسم‌ها و خاک‌ورزی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۲).

در بین ویژگی‌های فیزیکی خاک، ساختمان خاک به دلیل تأثیر بر سلامت خاک، کشاورزی پایدار و ترسیب کربن از اهمیت فراوانی برخوردار است. پایداری ساختمان خاک بر حرکت و ذخیره‌سازی آب در خاک، تهویه، کاهش فرسایش، رشد محصول، حفظ و ارتقاء توان تولید و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی تأثیرگذار است (۳). پایداری ساختمان خاک یک شاخص پیچیده برای ارزیابی است که با دامنه وسیعی از ویژگی‌های خاک و مدیریت گیاه سنجیده می‌شود. فرآیندهایی مانند شخم، سیستم کشت و کار و گیاهان بر ساختمان خاک و خاکدانه‌سازی تأثیر دارند (۴). ساختمان خاک می‌تواند بر توزیع ریشه‌ها در خاک تأثیرگذار باشد با این حال ریشه‌های گیاهان نیز قادر هستند ساختمان خاک را برای سازگاری با رشد خود تغییر دهند (۵).

ساختار، عملکرد و بیولوژی ریشه در گیاهان مختلف آثار گوناگونی بر خاک و پایداری خاک دارد

به گونه‌ای که تأثیر گیاهان تک‌په‌ای نسبت به دولپه‌ای و گیاهان علفی نسبت به غلات (به دلیل حجم بیش‌تر زیست‌توده ریشه) بیش‌تر است. ویژگی‌های ریشه مانند چگالی، وزن خشک، طول و سطح ریشه برای توصیف اثر آن بر پایداری ساختمان و فرسایش خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند اما نتایج بیش‌تر مطالعات نشان می‌دهد که شکل ریشه نقش بسیار مهمی بر ویژگی‌های خاک دارد که مرتبط با گونه گیاهی و ویژگی‌های خاک (مانند بافت و چگالی ظاهری) متغیر است (۶). ریشه‌های گیاه می‌توانند از طریق افزایش مواد آلی خاک، علاوه بر اثرات فوری و کوتاه‌مدت‌شان، تأثیر طولانی‌مدت بر ساختمان خاک داشته باشند (۷). در این رابطه انتظامی و همکاران (۲۰۲۱) بیان کردند حضور ریشه و بافت خاک اثر معنی‌داری بر پایداری ساختمان خاک دارد و اثر سیستم ریشه‌ای راست (گلرنگ) بر پایداری ساختمان خاک بیش‌تر از سیستم ریشه‌ای افشان (گندم) بود (۸). در پژوهشی حسینی رامشه (۲۰۱۷) نشان داد که خاکدانه‌سازی و پایداری خاکدانه‌ها در اطراف ریشه گیاهان مشهودتر است و همبستگی قوی بین طول و حجم ریشه و خاکدانه‌سازی در خاک وجود دارد (۹). کاریزو و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر بقایای گیاهی و فعالیت ریشه گیاه را بر خاکدانه‌سازی و پایداری خاکدانه‌ها در خاک‌هایی با مقادیر متفاوت کربن و شرایط بدون شخم بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اضافه کردن بقایا و وجود گیاه با ریشه‌های فعال، خاکدانه‌سازی را افزایش و فرآیند تخریب خاکدانه را کاهش می‌دهد (۱۰).

تغییرات ناشی از تأثیر ریشه بر ساختمان خاک از طریق اصلاح محیط فیزیکی خاک و دسترسی به آب و عناصر غذایی، می‌تواند بر تولید بالقوه محصول تأثیرگذار باشد (۱۱). درک اثرات تغییرات ناشی از ریشه (شکل ریشه) بر ویژگی‌های خاک و جذب آب و عناصر غذایی و بازخورد نهایی آن‌ها بر رشد گیاه و

تولید محصول یک جنبه حیاتی از امنیت غذایی آینده است. در مورد نقش مدیریت‌های زراعی بر کیفیت خاک، پژوهش‌های بیش‌تر متمرکز بر عملیات خاک‌ورزی و اثر اصلاح‌کننده‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک است و کم‌تر به سهم گیاهان با سیستم‌های ریشه‌ای متفاوت بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک پرداخته شده است. هم‌چنین عمده پژوهش‌های انجام شده در مورد ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در لایه‌های سطحی خاک بوده است (عمدتاً ۲۰-۰ سانتی‌متر). ولی بیش‌تر ویژگی‌های خاک به‌ویژه کربن آلی خاک، پایداری خاکدانه‌ها، ویژگی‌های ریشه و تراکم ریشه، با عمق خاک تغییر می‌کنند (۱۲). بنابراین، با توجه به اهمیت پایداری ساختمان خاک در کشاورزی پایدار و عوامل مؤثر بر کیفیت فیزیکی خاک با در نظر گرفتن عمق خاک، پژوهشی با اهداف بررسی تأثیر گیاهان با سیستم‌های مختلف ریشه (یونجه، گندم، جو، نخود و زیره سبز) بر برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در عمق‌های متفاوت انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در پنج قطعه زمین کشاورزی مجاور هم با بافت یکسان در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد واقع در استان خراسان رضوی انجام شد ($22^{\circ} 40' 59''$ شرقی و $18^{\circ} 14' 36''$ شمالی). اقلیم منطقه خشک و نیمه‌خشک و متوسط دمای سالانه و متوسط بارندگی سالانه به‌ترتیب $13/4$ درجه سانتی‌گراد و $92/4$ میلی‌متر بود. زمین‌های محل اجرای آزمایش قبل از کاشت با عملیات خاک‌ورزی (زیرشکن، گاواهن، دیسک، لوور، سیکلوتیلر و فارو) مدیریت و بستر کاشت آماده شد. قبل از کاشت ویژگی‌های خاک و آب آبیاری بررسی شدند (جدول‌های ۱ و ۲). گیاه جو

(*H. vulgare*) واریته سهند با سیستم ریشه افشان، گندم (*T. aestivum* L.) واریته پیشگام با سیستم ریشه افشان، زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) واریته سبزوار با سیستم ریشه راست، نخود (*Cicer arietinum* L.) واریته هاشم با سیستم ریشه راست و یونجه (*Medicago sativa* L.) واریته همدانی با سیستم ریشه مرکب (ترکیبی از ریشه راست و افشان) انتخاب و در قطعاتی با ابعاد 10×100 متر (1000 مترمربع) کشت شدند. زمین‌های زیرکشت یونجه، زیره سبز و نخود به‌صورت جوی و پشته آماده و بذرها روی پشته‌ها کشت شدند. گندم و جو نیز به‌صورت ردیفی کشت شدند. در کشت یونجه، پشته‌ها با فاصله 50 و ارتفاع 10 سانتی‌متر و برای کشت نخود فاصله ردیف‌ها، 30 و زیره سبز، 20 سانتی‌متر تعیین شد. برای کشت گندم و جو، 150 کیلوگرم بذر و برای یونجه نیز 20 کیلوگرم بذر در هکتار استفاده شد. نخود با تراکم 20 بوته در مترمربع و زیره سبز نیز 50 بوته در مترمربع کشت شدند. یونجه در اواخر شهریور، گندم و جو در مهر و نخود و زیره سبز در اسفند کشت شدند و نمونه‌برداری خاک و ریشه برای همه گیاهان در خرداد انجام شد. آبیاری با آب چاه و به صورت غرقابی و برای یونجه، با فاصله زمانی 15 روز، نخود و زیره سبز با فاصله زمانی 10 روز، گندم و جو نیز به صورت کرتی و 5 مرتبه در طول کشت انجام شد. به‌طورکلی برای همه قطعات، 100 کیلوگرم در هکتار اوره و 50 کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم و 100 کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل استفاده شد. قبل از کشت نیز 40 تن در هکتار کود دامی (گاوی پوسیده) با خاک مخلوط گردید. قابل ذکر است که گیاهان جو، گندم، نخود و زیره سبز برای 3 سال و یونجه 6 سال زراعی متوالی در زمین‌های تعیین شده کشت و با روش‌های یکسان مدیریت می‌شدند.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل مورد مطالعه.

Table 1. Soil physical and chemical properties of the study site.

کربن آلی OC	پتاسیم قابل استفاده K	فسفر قابل استفاده P	نیتروژن کل N	هدایت الکتریکی EC	کربنات کلسیم معادل CaCO ₃	په‌اش pH	بافت Texture
%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	dS m ⁻¹	%	-	-
0.37	125	5.00	0.05	0.80	10.65	7.84	Silt loam

جدول ۲- ویژگی‌های آب آبیاری.

Table 2. Irrigation water properties.

منبع	په‌اش	هدایت الکتریکی	کربنات	بی‌کربنات
-	pH	EC	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻
-	-	dS m ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
چاه	8.1	0.72	0.1	2.6

و پس از توزین و تصحیح شن، میانگین وزنی قطر ذرات خاک در هر دو حالت مرطوب و خشک با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$MWD = \sum (X_i \times W_i) \quad (1)$$

در رابطه ۱، X_i میانگین قطر منافذ دو الک متوالی را نشان می‌دهد و W_i نشان‌دهنده نسبت جرمی توده خاک باقی‌مانده در هر الک به کل جرم خاک پس از اصلاح شن است. شاخص پایداری ساختمان خاک (SI)^۱ که برای ارزیابی ساختمان در خاک‌های کشت شده به کار می‌رود، براساس رابطه ۲ و مقادیر متغیرهای کربن آلی (OC)، رس (Clay) و سیلت (Silt) تعیین شد (۲۱).

$$SI = \frac{1.724OC}{Silt+Clay} \times 100 \quad (2)$$

مقدار SI برابر با ۵ درصد یا کمتر نشان‌دهنده تخریب ساختمان خاک ناشی از کاهش قابل‌توجه در مقدار کربن آلی خاک است. اگر $5 \leq SI \leq 7$ باشد، خطر

برای بررسی و مقایسه تأثیر گیاهان با سیستم‌های ریشه‌ای مختلف بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، از طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار استفاده شد. نمونه‌های خاک از چهار عمق ۱۰-۰، ۲۰-۱۰، ۳۰-۲۰ و ۴۰-۳۰ سانتی‌متر جمع‌آوری شدند. بافت خاک به روش پییت (۱۳) و کربنات کلسیم معادل با استفاده از روش تیتراسیون برگشتی با NaOH (۱۴) تعیین شدند. مقدار ماده آلی خاک به روش اکسایش تر (۱۵) اندازه‌گیری شد. pH در گل اشباع و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع (۱۶) اندازه‌گیری شدند. مقادیر فسفر قابل‌استخراج از خاک به روش اولسن (۱۷)، نیتروژن کل خاک با کج‌لدال (۱۸) و پتاسیم قابل‌استفاده با استات آمونیوم (۱۹) اندازه‌گیری شدند.

برای تعیین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خاک (MWD) به روش تر و خشک، از مجموعه‌ای از الک‌ها با قطرهای ۴، ۲، ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی‌متر استفاده شد (۲۰). ذرات خاک باقی‌مانده روی هر الک در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند

1- Structure Stability Index

بالای تخریب ساختمان خاک به دلیل محتوای کربن آلی ناکافی را نشان می‌دهد. اگر مقدار $7 \leq SI \leq 9$ باشد، نشان‌دهنده خطر نسبتاً پایین تخریب ساختمان خاک است. در نهایت اگر مقدار SI بیش از ۹ درصد باشد، نشان‌دهنده وجود مقدار کافی کربن آلی در خاک است که پایداری ساختمان خاک را تضمین می‌کند (۲۲).

هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) در نمونه‌های دست‌نخورده به روش بار ثابت تعیین شد. رابطه ۳، برای تعیین Ks استفاده شد (۲۳).

$$K_s = \frac{V L}{\Delta H A t} \quad (3)$$

در این رابطه، V، L، ΔH، A و t به ترتیب نشان‌دهنده حجم آب خروجی از ستون خاک، طول ستون خاک، اختلاف پتانسیل هیدرولیکی دو سر ستون خاک، سطح مقطع ستون خاک و مدت زمان رسیدن به تعادل است.

در انتهای فصل کشت (اوایل فصل تابستان)، از ریشه گیاهان به همراه خاک محتوی آن، نمونه برداشت شد. در این پژوهش برای کاهش خطا و کم‌ترین صدمه به ریشه گیاه از یک جعبه فلزی با ابعاد ۱۵×۲۵×۲۵ سانتی‌متر برای نمونه‌برداری از ریشه و خاک اطراف آن استفاده شد (۲۴). نمونه‌های ریشه به همراه خاک همراه آن به آزمایشگاه منتقل شد. سپس ریشه‌ها پس از عبور خاک از الک ۰/۵ میلی‌متر، با دقت شسته شده و جمع‌آوری شدند. ریشه‌های جمع‌آوری شده وزن شدند. طول ریشه‌ها نیز با اسکن ریشه تعیین شد. چگالی طول ریشه^۱ (RLD) با تقسیم طول ریشه بر حجم خاک و چگالی ریشه^۲ (RD) با اندازه‌گیری وزن تر ریشه بر حجم خاک تعیین گردید. وزن خشک ریشه نیز بعد از قرارگیری ریشه به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، به دست آمد.

(۲۵). برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS و برای رسم نمودارها از Microsoft Excel و برای مقایسه میانگین‌ها نیز از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های ریشه گیاهان مورد مطالعه: چگالی طولی ریشه و چگالی ریشه دو ویژگی مهم و پرکاربرد ریشه گیاهان هستند که بر کربن آلی خاک، پایداری خاکدانه‌ها و پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک تأثیر به‌سزایی دارند (۲۶). نتایج اندازه‌گیری RLD و RD در گیاهان متفاوت نشان داد که RLD در گیاهان جو و گندم (ریشه افشان) با زیره سبز و نخود (ریشه راست) و با یونجه (ریشه مرکب) تفاوت معنی‌دار وجود داشت (جدول ۳). بیش‌ترین میانگین چگالی طولی ریشه به ترتیب در جو (۰/۲۵۶۷ سانتی‌متر در سانتی‌مترمکعب خاک)، گندم (۰/۱۹۳۳ سانتی‌متر در سانتی‌مترمکعب خاک)، سپس یونجه (۰/۱۶۳۳ سانتی‌متر در سانتی‌مترمکعب خاک) و در آخر در نخود (۰/۰۹ سانتی‌متر در سانتی‌مترمکعب خاک) و زیره سبز (۰/۰۲ سانتی‌متر در سانتی‌مترمکعب خاک) مشاهده شد. درحالی‌که روند تغییرات چگالی ریشه در گیاهان مورد مطالعه متفاوت بود. بیش‌ترین چگالی ریشه در یونجه (۰/۰۰۹۳ گرم در سانتی‌مترمکعب خاک) با سیستم ریشه‌ای مرکب مشاهده شد و پس از آن، بیش‌ترین مقادیر چگالی ریشه گیاه به ترتیب در گندم (۰/۰۰۶۷) < جو (۰/۰۰۲۷) < زیره سبز (۰/۰۰۱۳) و نخود (۰/۰۰۰۸) به دست آمد.

1- Root Length Density

2- Root Density

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر نوع گیاه (جو، گندم، زیره سبز، نخود و یونجه) بر چگالی طولی ریشه و چگالی ریشه.
 Table 3. Mean comparisons of plant type effect (barley, wheat, cumin, pea & alfalfa) on root length diameter & root density.

چگالی ریشه RD g cm ⁻³	چگالی طولی ریشه RLD cm cm ⁻³	نوع گیاه Plant type
0.0027 ^c	0.2567 ^b	جو (<i>H. vulgare</i>)
0.0067 ^b	0.1933 ^{bc}	گندم (<i>T. aestivum</i> L.)
0.0013 ^c	0.02 ^d	زیره سبز (<i>Cuminum cyminum</i> L.)
0.0008 ^c	0.09 ^d	نخود (<i>Cicer arietinum</i> L.)
0.0093 ^b	0.1633 ^c	یونجه (<i>Medicago sativa</i> L.)

در هر ستون اعداد دارای یک حرف مشترک معنی‌دار نیستند

In each column, numbers with the same letter are not significantly different

می‌شود، درحالی‌که سیستم ریشه جو تمایل بیش‌تری به عناصر اسیدی و کاهش pH محیط اطراف ریشه شود. چنین تفاوت‌هایی در جذب عناصر می‌تواند به تغییرات pH خاک منجر شود (۲۹). به‌طورکلی کاشت گیاهان موجب کاهش pH خاک شد. کاهش pH خاک زیرکشت گیاهان را می‌توان به ترشح اسیدهای آلی، ترشح یون پروتون، تولید گاز کربنیک توسط ریشه و فعالیت ریزجانداران محیط ریزوسفر نسبت داد (۳۰، ۳۱). در این رابطه مات و آیان (۲۰۱۱) دریافتند که بعد از سه سال، بذركاری یونجه سبب افزایش ماده آلی، فسفر، کلسیم و کاهش میزان pH، هدایت الکتریکی، پتاسیم و منیزیم شد (۳۲). داتا و همکاران (۲۰۱۵) با بررسی ویژگی خاک‌های سدیمی و اجزای کربن آلی در کاربری‌های مختلف شمال غرب هند به این نتیجه رسیدند که با افزایش عمق، مقدار pH خاک در همه کاربری‌ها افزایش یافت (۳۳).

pH خاک: نتایج تجزیه واریانس اثر نوع گیاه کشت شده و عمق خاک بر ویژگی‌های مختلف خاک نشان داد که اثرات اصلی عمق خاک و نوع گیاه کشت شده بر pH در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. اما اثر متقابل نوع گیاه و عمق خاک معنی‌دار نشد (جدول ۴). بیش‌ترین مقدار pH خاک مربوط به تیمار یونجه و pH خاک در تیمار جو به‌طور معنی‌داری از تمام گیاهان دیگر کم‌تر بود (جدول ۵). ترکیبات شیمیایی آزاد شده توسط ریشه گیاه در ریزوسفر می‌تواند فرآیندهای شیمیایی خاک را تحریک کرده و در نتیجه بر pH آن تأثیرگذار باشند (۲۷). یونجه و جو دارای سیستم متابولیک مشخصی هستند که می‌تواند منجر به تغییراتی در ترشحات آن‌ها شود (۲۸). سیستم ریشه گیاه مستقیماً بر ترشح و جذب عناصر توسط گیاهان تأثیرگذار است. این امکان وجود دارد که سیستم ریشه یونجه به‌طور مؤثر عناصر قلیایی را جذب و باعث افزایش pH خاک اطراف ریشه

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر نوع گیاه کشت شده و عمق خاک بر ویژگی‌های خاک.

Table 4. Analysis of variance for cultivated plant type and soil depth on soil properties.

CaCO ₃	OC%	EC	pH	درجه آزادی Df	منبع تغییر S.O.V
0.018 ^{ns}	0.0013*	0.001 ^{ns}	0.002 ^{ns}	2	تکرار R
0.13*	0.032**	0.29**	0.065*	3	عمق خاک Soil Depth
3.96**	0.21**	2.31**	0.38**	4	نوع گیاه Plant Types
0.22**	0.0016**	0.10**	0.014 ^{ns}	12	عمق خاک × نوع گیاه Soil Depth × Plant Types
0.042	0.00026	0.018	0.019	23	خطا Error
3.62	2.97	13.4	11.88	-	ضریب تغییرات CV (%)

*، ** و ^{ns} به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و بدون معنی‌داری*، ** and ^{ns} significant at $P \leq 0.01$, $P \leq 0.05$ and non-significant, respectively

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر عمق خاک و نوع گیاه بر پ‌هاش خاک.

Table 5. Mean comparisons of the soil depth and plant type effect on soil pH.

pH	عمق خاک (سانتی‌متر) Soil depth (cm)	pH	نوع گیاه Plant type
7.30 ^b	0-10	7.57 ^a	یونجه Alfalfa
7.29 ^b	10-20	7.12 ^c	جو Barley
7.48 ^a	20-30	7.14 ^c	گندم Wheat
7.42 ^{ab}	30-40	7.52 ^{ab}	نخود Pea
		7.40 ^b	زیره سبز Cumin

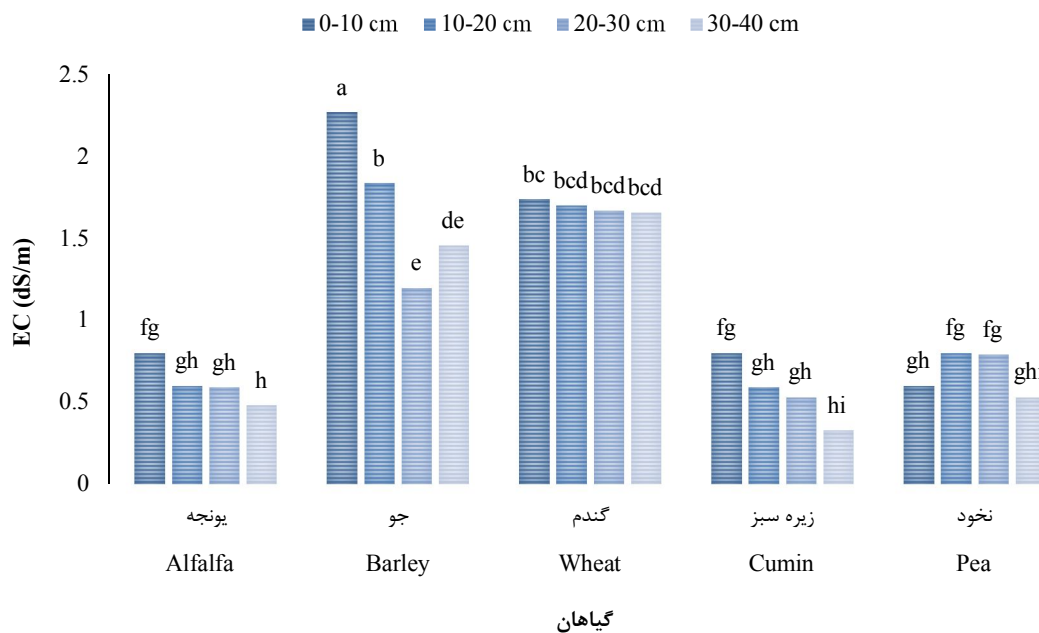
زیر کشت جو و گندم مشاهده شد و بین مقادیر میانگین شوری خاک در اعماق مختلف در مزارع زیر کشت نخود، یونجه و زیره سبز اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۱). علاوه بر این، مقدار شوری خاک سطحی (۱۰-۰ سانتی‌متر) در مزارع زیر کشت جو به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سایر عمق‌ها بود.

هدایت الکتریکی خاک (EC): تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که هم اثرات اصلی و هم اثرات متقابل عمق خاک و نوع گیاه کشت شده در سطح احتمال یک درصد برای هدایت الکتریکی خاک (EC) معنی‌دار بودند (جدول ۴). نتایج این پژوهش نشان داد که بیش‌ترین مقدار شوری خاک در مزارع

(جدول ۴)، به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار میانگین کربن آلی خاک مربوط به عمق‌های ۱۰-۲۰ سانتی‌متری خاک (۰/۷۹٪) و ۱۰-۲۰ سانتی‌متری خاک (۰/۷۶٪) زیرکشت گیاه زیره سبز و کم‌ترین مقدار آن در عمق ۳۰-۴۰ سانتی‌متری خاک (۰/۲۰٪) زیرکشت یونجه مشاهده شد (شکل ۲). با افزایش عمق خاک نیز مقدار کربن آلی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. پژوهش‌های گذشته نیز نشان داده است که ویژگی‌هایی از ریشه مانند موفولوژی، فیزیولوژی، هم‌زیستی و خصوصیات شیمیایی آن در گونه‌های متفاوت گیاهی بر مقدار کربن آلی خاک، تأثیرگذاراند (۳۶). زیست‌توده ریشه برای ورود کربن آلی به خاک مهم است ولی با این وجود در بعضی گونه‌ها توزیع نسبی آن با کربن آلی خاک در عمق یک متری سطح خاک رابطه مستقیم ندارد (۳۷، ۳۸). یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که سیستم ریشه‌ای گیاهان در اعماق مختلف خاک می‌تواند به تغییرات در پویایی ماده آلی خاک کمک کند.

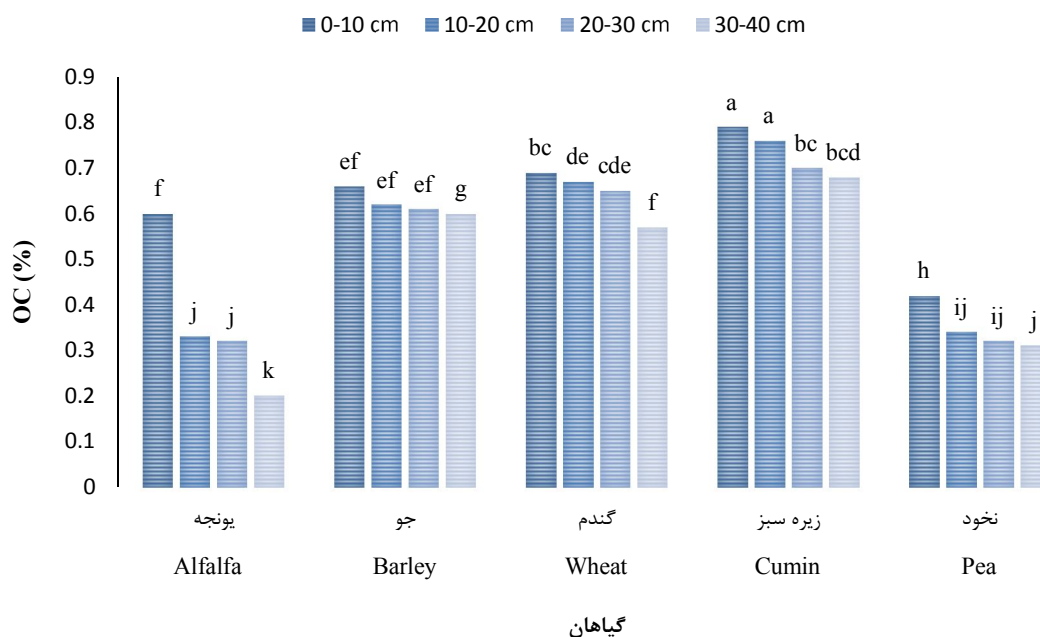
کم‌تر بودن تعداد دفعات آبیاری و بقایای گیاهی در مقایسه با سایر گیاهان و در نتیجه تبخیر آب از سطح خاک به‌ویژه در فصل گرم می‌تواند موجب تجمع املاح در سطح خاک زیرکشت گندم و جو شده باشد (۳۴). در مزارع زیر کشت یونجه و زیره سبز، تنها بین مقدار شوری خاک سطحی و خاک در بیش‌ترین عمق مورد مطالعه (۳۰-۴۰ سانتی‌متر) اختلاف معنی‌داری وجود داشت. نتایج بیانگر عدم تغییر شوری خاک در عمق‌های مختلف مورد مطالعه در مزارع زیر کشت گندم و نخود بود. نتایج پژوهش جهان‌تیغ (۲۰۲۱) نیز بیانگر کاهش مقدار شوری خاک با افزایش عمق به‌دلیل تجمع مواد آلی در سطح خاک بوده است (۳۵).

کربن آلی خاک: در این مطالعه، تغییرات مقادیر کربن آلی بین گیاهان مختلف و در اعماق مختلف نفوذ ریشه در خاک مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر عمق خاک، نوع گیاه و اثر متقابل آن‌ها بر کربن آلی در سطح احتمال یک درصد ($P < 0.01$) معنی‌دار شد



شکل ۱- برهم‌کنش عمق خاک و نوع گیاه بر هدایت الکتریکی خاک.

Figure 1. Interaction effect of the soil depth and plant type on EC.

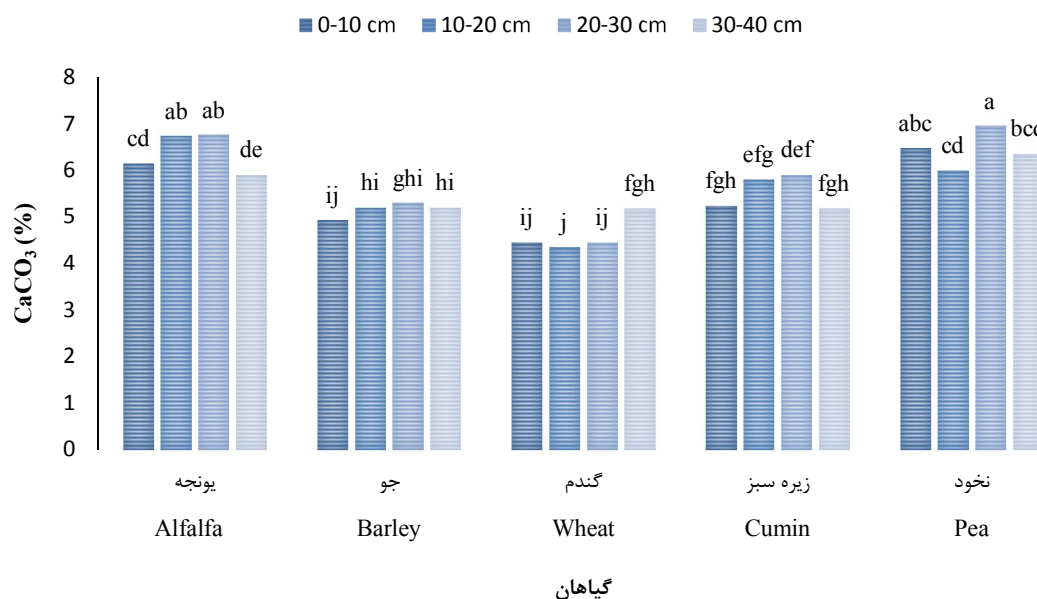


شکل ۲- برهمکنش عمق خاک و نوع گیاه بر کربن آلی خاک.

Figure 2. Interaction effect of the soil depth and plant type on OC.

رسوب کربنات کلسیم یا توانایی سیستم ریشه‌ای گندم برای محدود کردن تجمع کربنات کلسیم در این عمق خاص با ترشح اسیدهای آلی مانند سیترات و اگزالات به محیط ریزوسفر باشد (۳۹). تجزیه و تحلیل آماری نشان می‌دهد که مقدار کربنات کلسیم در خاک زیر کشت گیاه جو از نظر عمق در محدوده ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر نسبت به سایر اعماق تفاوت معنی‌داری نداشت. ترشحات ریشه و pH خاک اطراف ریشه نیز بر مقدار کربنات کلسیم خاک تأثیرگذار است. یافته‌ها نشان داد که تغییرات کربنات کلسیم خاک مشابه روند تغییرات pH خاک اطراف ریشه در گیاهان مختلف بود (جدول ۵)، به طوری‌که بیش‌ترین pH در خاک محیط اطراف ریشه یونجه و نخود و کم‌ترین آن در خاک محیط اطراف ریشه گیاهان جو و گندم بود.

کربنات کلسیم (CaCO_3): نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی و متقابل عمق خاک و نوع گیاه بر کربنات کلسیم خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر عمق خاک و نوع گیاه نشان داد که بیش‌ترین میانگین کربنات کلسیم با مقدار ۶/۹۶ درصد برای گیاه نخود در عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متری مشاهده شد. از طرفی کم‌ترین میانگین کربنات کلسیم ۴/۶۱ درصد مربوط به گیاه گندم و در عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متری به دست آمد (شکل ۳). زیاد بودن کربنات کلسیم می‌تواند ذاتی باشد یا این‌که در اثر آبشویی از عمق‌های بالایی باشد ولی مقدار آب آبیاری به اندازه‌ای نبوده که به لایه‌های پایین‌تر انتقال یابد. در مورد گندم کم‌ترین مقدار کربنات کلسیم در عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متری مشاهده شد که می‌تواند به دلیل تأثیر عمق نفوذ ریشه بر فرآیند



شکل ۳- برهمکنش عمق خاک و نوع گیاه بر کربنات کلسیم خاک.

Figure 3. Interaction effect of the soil depth and plant type on soil calcium carbonate.

عناصر غذایی پرمصرف خاک: نتایج ارائه شده در جدول ۶ نشان می‌دهد که اثر عمق خاک، نوع گیاه و اثر متقابل آنها بر میزان عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در سطح احتمال یک درصد ($P < 0.01$) معنی‌دار بود.

جدول ۶- تجزیه واریانس غلظت عناصر پرمصرف در خاک، تحت تأثیر نوع گیاه و عمق خاک.

Table 6. Analysis of variance for macronutrient concentration in soil affected by plant type and soil depth.

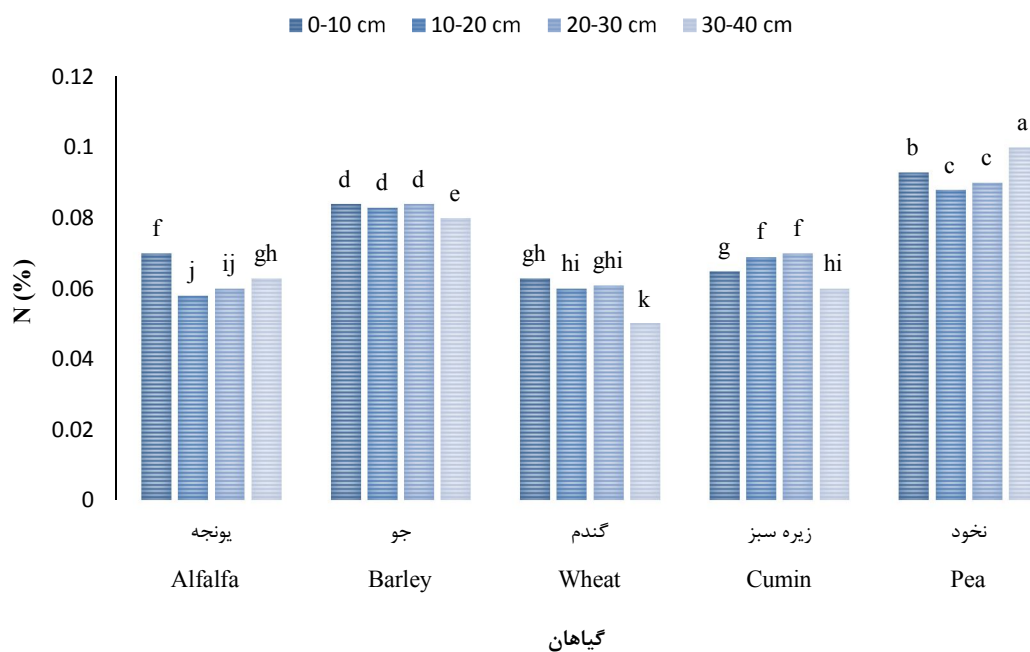
پتاسیم K	فسفر P	نیتروژن N	درجه آزادی Df	منابع تغییر S.O.V
0.04 ^{ns}	0.000015 ^{ns}	0.92 ^{ns}	2	تکرار R
1.40 ^{**}	0.018 ^{**}	73.79 ^{**}	3	عمق خاک Soil Depth
35.00 ^{**}	0.97 ^{**}	471739 ^{**}	4	نوع گیاه Plant Types
1.16 ^{**}	0.13 ^{**}	52.25 ^{**}	12	عمق خاک × نوع گیاه Soil Depth × Plant Types
0.069	0.0015	1.78	23	خطا Error
4.53	4.77	1.79	-	ضریب تغییرات CV (%)

*, ** و ^{ns} به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و بدون معنی‌داری

*, ** and ^{ns} significant at $P \leq 0.01$, $P \leq 0.05$ and non-significant, respectively

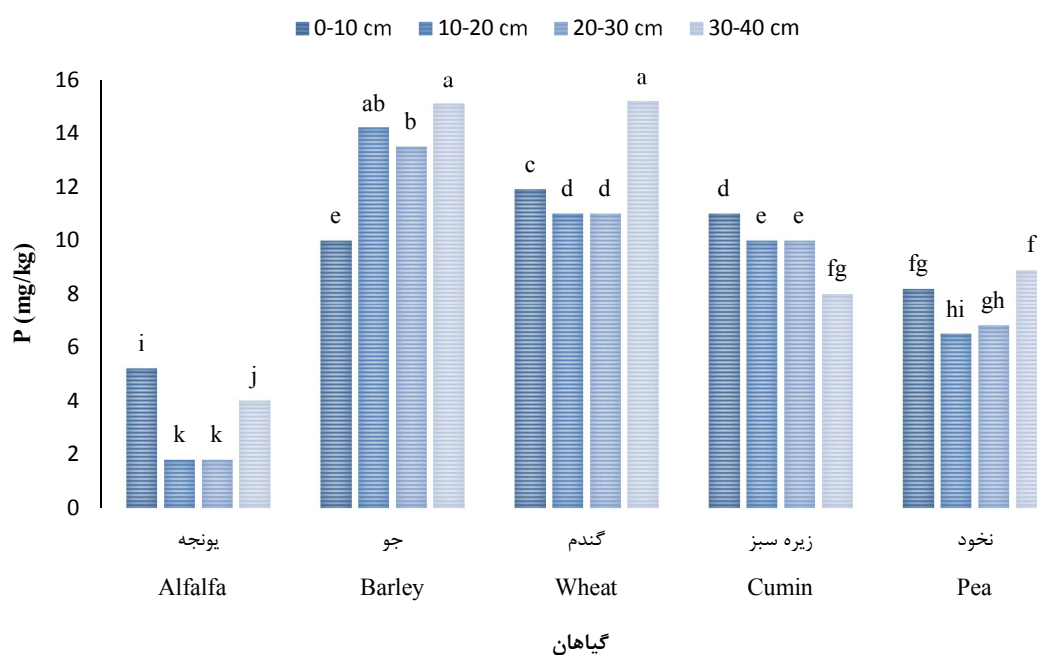
بیشترین مقدار نیتروژن خاک مربوط به گیاه نخود در عمق ۳۰-۴۰ سانتی متری خاک (۰/۱٪) و کمترین مقدار آن مربوط به گیاه گندم در عمق ۳۰-۴۰ سانتی متری خاک (۰/۰۵٪) می باشد (شکل ۴). نتایج نشان داد که مقدار نیتروژن خاک در تمام عمق های خاک زیر کشت نخود به طور معنی داری بیش از سایر محصولات مورد مطالعه بود. گیاه نخود با توانایی تثبیت نیتروژن در گره های تثبیت کننده خود، بخشی از نیتروژن مورد نیاز خود را در طی رشد تأمین می کند که مقدار آن با توجه به نوع سویه همزیست، جمعیت باکتری های همزیست بومی، میزان کود مصرفی، رقم بذر گیاه، شرایط خاک و اقلیم منطقه متفاوت است (۴۰، ۴۱). نیتروژن تثبیت شده توسط گیاهان تیره لگومینوز و تجزیه بقایای آن ها پس از برداشت محصول موجب افزایش نیتروژن خاک می شود. بیشترین مقدار فسفر خاک مربوط به گیاه گندم (۱۴/۲ میلی گرم بر کیلوگرم) و جو (۱۴/۱ میلی گرم بر کیلوگرم) در عمق ۳۰-۴۰ سانتی متری خاک و کمترین مقدار آن مربوط به گیاه یونجه در اعماق ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی متری خاک (۱/۷۹ میلی گرم بر کیلوگرم) بود (شکل ۵). بیشترین مقدار پتاسیم خاک مربوط به گیاه گندم در عمق ۳۰-۴۰ سانتی متری خاک (۵۱/۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم) و کمترین مقدار آن مربوط به گیاه یونجه در عمق ۳۰-۴۰ سانتی متری خاک (۱۵/۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم) می باشد (شکل ۶). بیشترین مقدار فسفر و پتاسیم قابل دسترس خاک در عمق ۳۰ تا ۴۰ سانتی متری زیر کشت گندم، مشاهده شد. ممکن است

شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک در این عمق شامل سطوح pH مناسب، دسترسی به منابع غذایی غنی از فسفر و پتاسیم و نفوذپذیری (که حرکت این عناصر را تسهیل می کند)، در افزایش غلظت آن ها در خاک زیر کشت گندم نقش داشته باشد (۴۲). استفاده از کود شیمیایی و کود دامی و همچنین برهم کنش بین این دو در طی زمان در خاک در افزایش مقدار فسفر در خاک زیر کشت گیاهان مؤثر بوده است. کمترین مقدار برداشت فسفر از خاک نیز توسط گیاهان کم است، به عنوان مثال برنج با عملکرد ۸ تن دانه و کاه در هکتار، ۲۲ کیلوگرم فسفر در هکتار از خاک برداشت می کند (۴۳). علاوه بر این ممکن است بخشی از فسفر نیز از طریق معدنی شدن بقایای گیاهی به خاک اضافه شده باشد. همچنین ترشحات ریشه گیاهان به افزایش فرم قابل دسترس آن در خاک کمک کرده است. مقدار فسفر و پتاسیم قابل دسترس خاک در تمام عمق های خاک در گیاه یونجه به طور معنی داری کمتر از سایر گیاهان مورد مطالعه بود (شکل های ۵ و ۶). یونجه گیاهی علوفه ای و چندساله است که در زمان هر چین (برداشت برگ های تازه) مقادیر زیادی نیتروژن، فسفر و پتاسیم از دست می دهد که به دلیل جذب این عناصر از خاک، مقدار آن ها در پایان فصل رشد کاهش یافته است (۴۴، ۴۵). از آنجایی که یونجه و نخود ریشه های عمیقی دارند توانسته اند عناصر فسفر و پتاسیم را از لایه های عمیق جذب کنند و باعث کاهش این عناصر در لایه های زیرین خاک شوند. از طرفی زیاد بودن این عناصر در لایه های سطحی خاک می تواند ناشی از بیش تر بودن مواد آلی نیز باشد.



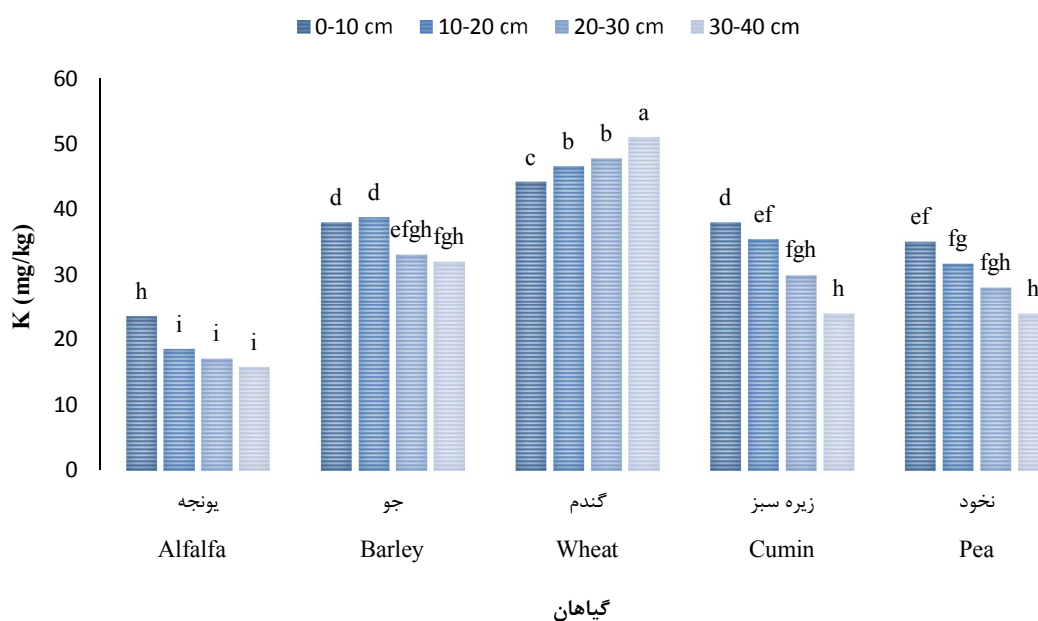
شکل ۴- برهمکنش عمق خاک و نوع گیاه بر نیتروژن کل خاک.

Figure 4. Interaction effect of the soil depth and plant type on total soil N.



شکل ۵- برهمکنش عمق خاک و نوع گیاه بر فسفر قابل دسترس خاک.

Figure 5. Interaction effect of the soil depth and plant type on available soil P.



شکل ۶- برهمکنش عمق خاک و نوع گیاه بر پتاسیم قابل دسترس خاک.

Figure 6. Interaction effect of the soil depth and plant type on available soil K.

شاخص‌های فیزیکی خاک: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که نوع گیاه و عمق خاک تأثیر معنی‌داری بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در دو حالت خشک و مرطوب نداشته است (جدول ۷)، که نشان می‌دهد پایداری خاکدانه‌ها تحت تأثیر عمق و نوع گیاه در مدت زمان کاشت تا برداشت گیاهان نبوده است. از آنجایی که عمق خاک و نوع گیاه تأثیر معنی‌داری بر MWD نداشتند، می‌توان استنباط کرد که این عوامل به تنهایی قادر به تغییر قطر خاکدانه‌ها نیستند و باید عوامل دیگر را نیز در نظر گرفت.

نتایج جدول ۷ بیانگر تأثیر معنی‌دار اثرات اصلی و متقابل عمق خاک و نوع گیاه بر هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) و شاخص پایداری ساختمان خاک (SI) است. بیش‌ترین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع ($2/44 \text{ cm.min}^{-1}$) در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری خاک گیاه یونجه و کم‌ترین آن در خاک زیرکشت گیاه گندم در عمق ۴۰-۳۰ سانتی‌متر ($0/49 \text{ cm.min}^{-1}$) مشاهده شد (شکل ۷).

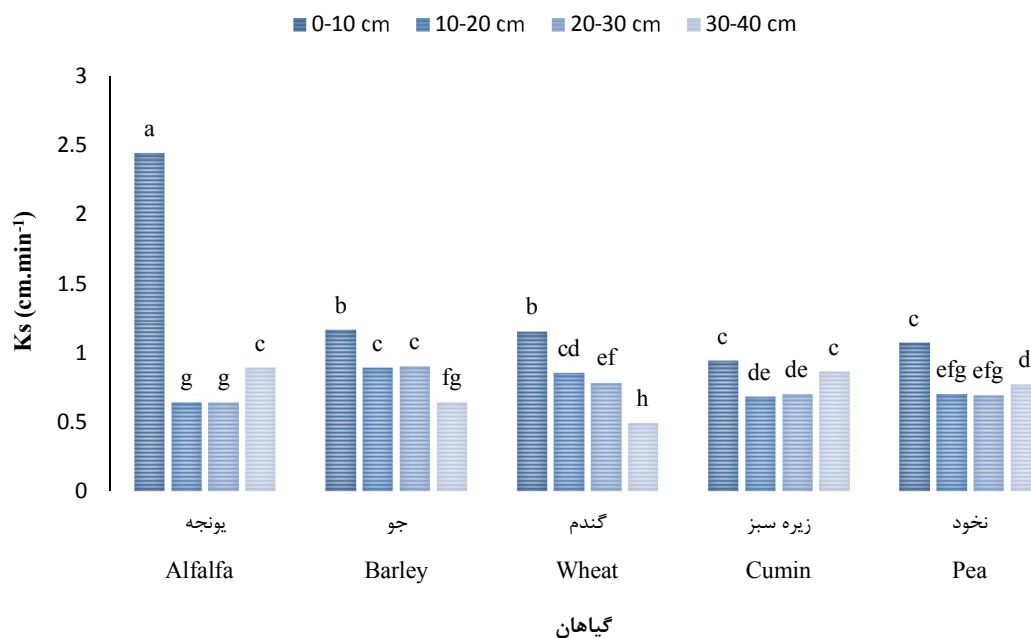
نتایج این مطالعه نشان داد که عمق خاک و نوع گیاه کشت شده می‌توانند تأثیر مستقیمی بر توزیع و غلظت عناصر مختلف در خاک و گیاهان داشته باشند. شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک در هر عمق، در دسترس بودن عناصر مورد نیاز گیاهان، دسترسی ریشه‌ها به این عناصر و مکانیسم‌های جذب آنها نقش مؤثری دارند و می‌توانند منجر به تغییرات قابل‌توجهی در غلظت این عناصر شوند (۴۶). سلیمانی و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه خود نشان دادند در جنگل دارابکلا-ساری بین عمق‌ها و پوشش‌های مختلف به لحاظ فسفر و پتاسیم قابل‌جذب اختلاف معنی‌داری وجود داشت و با افزایش عمق مقدار این دو عنصر کاهش یافت (۴۷). جهان‌تیغ (۲۰۲۱) بیان کرد که با افزایش عمق از میزان نیتروژن و فسفر خاک کاسته شد که علت آن را با مواد آلی سطح خاک مرتبط دانست (۳۵). ابوبکر (۱۹۹۷) گزارش داد که عناصر غذایی متعدد مانند نیتروژن، فسفر، کلسیم، منیزیم و پتاسیم با افزایش عمق ۳-۳۴ درصد کاهش می‌یابند (۴۸).

جدول ۷- تجزیه واریانس خصوصیات فیزیکی خاک در گیاهان و عمق‌های متفاوت.

Table 7. Analysis of variance for soil physical properties in plant types and different soil depths.

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Df	میانگین وزنی قطر خاکدانه (مرطوب) MWD (wet)	میانگین وزنی قطر خاکدانه (خشک) MWD (dry)	هدایت هیدرولیکی اشباع Ks	شاخص پایداری ساختمان خاک SI
تکرار R	2	0.012 ^{ns}	0.012 ^{ns}	0.00061 ^{ns}	0.002 ^{ns}
عمق خاک Soil Depth	3	0.12 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.32 ^{**}	0.15 ^{**}
نوع گیاه Plant Types	4	0.0049 ^{ns}	0.0049 ^{ns}	0.07 ^{**}	1.58 ^{**}
عمق خاک × نوع گیاه Soil Depth × Plant Types	12	0.0078 ^{ns}	0.0078 ^{ns}	0.70 ^{**}	0.09 ^{**}
خطا Error	23	0.023	0.023	0.0026	0.004
ضریب تغییرات CV (%)	-	6.35	6.35	6.58	5.02

*, **, and ^{ns} significant at P≤0.01, P≤0.05 and non-significant, respectively



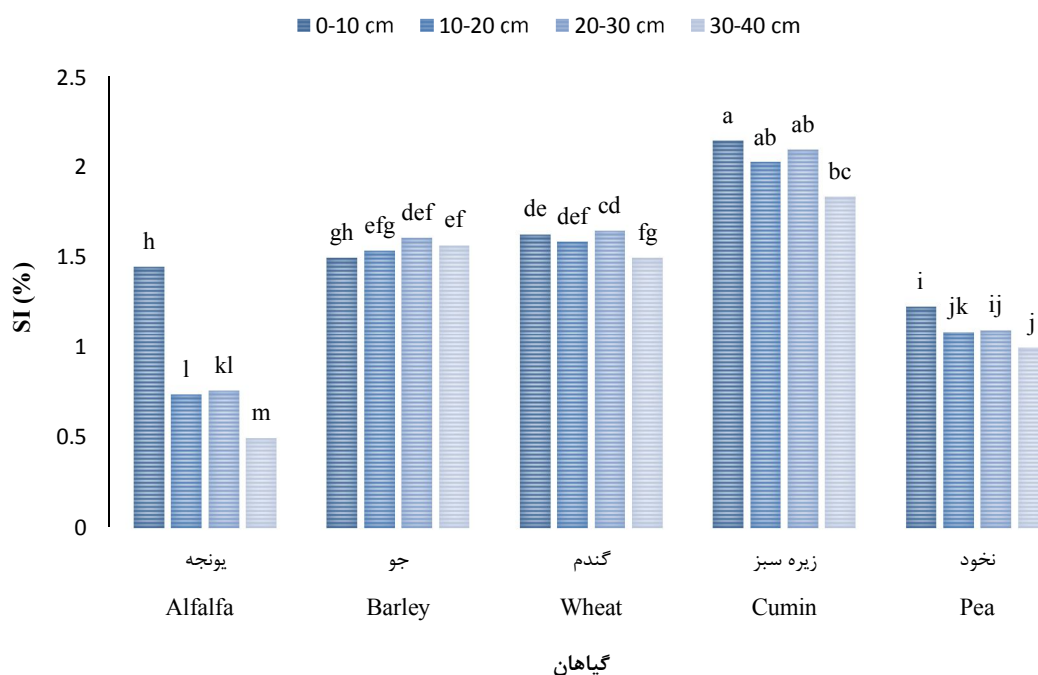
شکل ۷- برهمکنش عمق خاک و نوع گیاه بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک.

Figure 7. Interaction effect of the soil depth and plant type on soil saturated hydraulic conductivity (Ks).

بیش‌تر ریشه و در نتیجه ایجاد منافذ درشت در لایه‌های زیرین خاک نسبت داد. چنین تأثیری توسط صفادوست و همکاران (۲۰۰۷) گزارش شده است (۵۰).

میانگین شاخص پایداری خاک در تمام گیاهان مورد مطالعه کمتر از ۵ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده تخریب ساختمان خاک ناشی از مقدار ناکافی کربن آلی در خاک است. به‌طوری‌که مقدار کربن آلی خاک در تمام تیمارها، کمتر از یک درصد بود (شکل ۲). بیش‌ترین مقدار شاخص پایداری ساختمان خاک (۲/۱۵٪) در عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری و در خاک زیرکشت گیاه زیره سبز و کم‌ترین مقدار آن (۰/۴۸٪) در عمق ۳۰-۴۰ سانتی‌متری خاک زیرکشت یونجه به دست آمد (شکل ۸).

نتایج نشان داد که در تمام گیاهان مورد مطالعه، مقدار هدایت هیدرولیکی خاک در سطح خاک (عمق ۰-۱۰ سانتی‌متر) به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سایر عمق‌ها بود و روند کاهش هدایت هیدرولیکی خاک در عمق سطحی زیر کشت یونجه < گندم و جو (ریشه افشان) < نخود و زیره سبز (ریشه راست) مشاهده شد. قسمت اعظم زیست‌توده ریشه گیاه در عمق سطحی خاک است که با افزودن ماده آلی و بهبود ساختمان خاک بر هدایت هیدرولیکی تأثیرگذار است (۴۹). سیستم ریشه و قطر بیش‌تر ریشه گیاه یونجه در ایجاد منافذ درشت و افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع تأثیرگذار است. افزایش هدایت هیدرولیکی در خاک زیرکشت یونجه نسبت به سایر گیاهان را می‌توان به به‌هم‌خوردگی کم‌تر خاک و عمق



شکل ۸- برهمکنش تأثیر عمق خاک و نوع گیاه بر شاخص پایداری ساختمان خاک.

Figure 8. Interaction effect of the soil depth and plant type on Soil Structure Index (SI).

تغییرات شاخص پایداری خاک در محصولات مختلف مورد مطالعه (شکل ۸) تا حد زیادی مشابه تغییرات محتوای کربن آلی خاک (شکل ۲) به دست آمد. با افزایش عمق خاک مقدار شاخص پایداری ساختمان خاک کاهش یافت که با مقدار کربن آلی خاک ارتباط مستقیم داشت به طوری که بیشترین مقدار کربن آلی در سطح خاک (۱۰-۰ سانتی‌متری) مشاهده شد و با افزایش عمق، مقدار آن کاهش یافت. همچنین شاخص پایداری خاک در تمام عمق‌های خاک در تیمار زیر کشت زیره سبز با سیستم ریشه‌ای راست نسبت به سایر گیاهان مورد مطالعه به طور معنی‌داری بیشتر بود. نتایج انتظامی و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که ریشه و بافت خاک اثر معنی‌داری بر پایداری ساختمان خاک داشته و تأثیر سیستم ریشه‌ای راست بر پایداری ساختمان خاک بیش‌تر از سیستم ریشه‌ای افشان بود (۸).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که کاشت گیاهان، جدا از نوع سیستم ریشه آن‌ها موجب کاهش pH خاک شده و این کاهش در گیاهانی با ریشه افشان (جو و گندم) نسبت به گیاهان با ریشه راست (زیره سبز و نخود)، محسوس‌تر بود. نتایج آنالیز کربن آلی خاک زیرکشت گیاهان مختلف نشان داد که بیش‌ترین مقدار کربن آلی در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری و زیر

کشت زیره سبز مشاهده شد. تغییرات مقادیر نیتروژن، فسفر و پتاسیم برای هر گیاه و در اعماق متفاوت خاک بیانگر سازگاری گیاهان با شرایط متفاوت خاک بود. نتایج ویژگی‌های فیزیکی خاک نشان داد که در تمام گیاهان با افزایش عمق، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع کاهش یافت. یونجه (ریشه مرکب)، گندم و جو (ریشه افشان) و نخود و زیره سبز (ریشه راست) به ترتیب بیش‌ترین هدایت هیدرولیکی اشباع را در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری خاک داشتند. بیش‌ترین مقدار شاخص پایداری ساختمان خاک در خاک زیرکشت گیاه زیره سبز و کم‌ترین آن در خاک زیرکشت یونجه به دست آمد. با توجه به یکسان بودن بافت خاک، مقدار کربن آلی در خاک زیرکشت زیره سبز بیش‌تر از سایر گیاهان بود. با این وجود، مقدار شاخص پایداری ساختمان خاک برای همه گیاهان کم‌تر از مقدار بهینه آن بود که بیانگر نیاز به مدیریت مناسب برای افزایش کربن آلی خاک است. این یافته‌ها بینش مهمی در روابط پیچیده بین ویژگی‌های خاک و گیاه ارائه کرد که می‌تواند در به کارگیری استراتژی‌های مناسب برای کشاورزی پایدار کمک کند، زیرا درک پاسخ گیاهان به شرایط خاک، دسترسی به عناصر غذایی، الگوهای نفوذ آب به خاک و ... می‌تواند کشاورزی پایدار را تقویت کرده، ضمن افزایش محصول، از منابع طبیعی نیز محافظت کند.

منابع

1. Degu, M., Melese, A., & Tena, W. (2019). Effects of Soil Conservation Practice and Crop Rotation on Selected Physicochemical Properties: The Case of Dembecha District, Northwestern Ethiopia. *Applied and Environment Soil Science*. Article ID, 6910879, 1-14. doi:10.1155/2019/6910879.
2. Gibbs, R. J., & Reid, J. B. (1988). A Conceptual Model of Changes in Soil Structure Under Different Cropping Systems. In: Stewart, B. A. (eds), *Advances in Soil Science*, 8(8), 123-149. doi:10.1007/978-1-4613-8771-8-3.
3. Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil Structure and Management: A Review. *Geoderma*, 124, 3-22. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.03.005.

4. Zhao, F. Z., Han, X. M., Yang, G. H., Feng, Y. Z., & Ren, G. X. (2014). Soil Structure and Carbon Distribution in Subsoil affected by Vegetation restoration. *Plant, soil and Environment*, 60(1), 21-26. <http://www.agriculturejournals.cz/web/pse.htm>.
5. Cai, G., & Ahmed, M. A. (2022). The Role of Root Hairs in Water Uptake: recent advances and future perspectives. *Journal of Experimental Botany*, 73(11), 3330-3338. doi:10.1093/jxb/erac114.
6. Materechera, S. A., Dexter, A. R., & Alston, A. M. (1992). Formation of Aggregates by Plant Roots in Homogenised Soils. *Plant and Soil*, 142, 69-79. doi:10.1007/BF00010176.
7. Mimmo, T., Del Buono, D., Terzano, R., Tomasi, N., Vigani, G., Crecchio, C., Pinton, R., Zocchi, G., & Cesco, S. (2014). Rhizospheric Organic Compounds in the Soil-Microorganism-plant System: Their Role in Iron Availability. *European Journal of Soil Science*, 65(5), 629-642. doi:10.1111/ejss.12158.
8. Entezami, E., Mosadeghi, M. R., Shirvani, M., & Khalili, B. (2021). The Effect of Plant Root System on the Structural Stability of two Soils with Different Textures. *The 17th Iran Congress of Soil Sciences and the 4th National Conference on Water Management in the Farm of Wise Soil Rejuvenation and Wise Water Governance*. [In Persian]
9. Hosseini Ramsheh, B. (2017). Effect of Cultivated and Wild barley genotypes on Structural and Physical Quality Indicators of Rhizosphere soil. Masters' Thesis in Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. [In Persian]
10. Carrizo, M. E., Alesso, C. A., Cosentino, D., & Lmhoff, S. (2015). Aggregation Agents and Structural Stability in Soils with Different Texture and Organic Carbon Contents. *Scientia Agricola*, 72, 75-82.
11. Rogers, E. D., & Benfey, P. N. (2015). Regulation of Plant Root System Architecture: Implications for Crop Advancement. *Current Opinion in Biotechnology*, 32, 93-98. doi: 10.1016/j.copbio.2014.11.015
12. Le Bissonnais, Y., Prieto, I., Roumet, C., Nespoulous, J., Metayer, J., Huon, S., Villatoro, M., & Stokes, A. (2017). Soil Aggregate Stability in Mediterranean and Tropical agro-ecosystems: Effect of Plant Roots and Soil Characteristics. *Plant Soil*, 424, 303-317.
13. Gee, G. W., Bauder, J. W., & Klute, A. (1986). Methods of Soil Analysis, part 1, physical and mineralogical methods. *Soil Science Society of America, American Society of Agronomy*, Ed 2, 1188p.
14. Sims, J. T. (1996). Lime Requirement. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5, 491-515.
15. 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, 29-38.
16. Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. Method of soil analysis, parss: chemical methods. Madison. Wisconsin, USA, 417-436.
17. Olsen, S. R., & Sommers L. E. (1986). Phosphorous. Methods of Soil Analysis. Part 2, *Soil Science Society of American Journal*. Madison, WI. PP. 403-427. In: Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R. (Eds).
18. Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1983). Nitrogen-total. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 595-624. doi:10.2134/agronmonogr9.2. 2ed.c31.
19. Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (Eds.). (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press.
20. Van Bavel, C. H. M. (1949). Mean Weight-Diameter of Soil Aggregates as a Statistical Index of Aggregation.

- Proceedings. *Soil Science Society of America Journal*, 14, 20-23. doi:10.2136/sssaj1950.036159950014000c0005x.
21. Pieri, C. J. (1992). Fertility of Soils: A Future for Farming in the West African Savannah. *Springer Science & Business Media*, 10, 273.
22. Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., & Yang, X. M. (2009). Use of Indicators and Pore Volume-function Characteristics to Quantify Soil Physical Quality. *Geoderma*, 152(3-4), 252-263.
23. Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 687-734. doi:10.2136/sssabookser5.1. 2ed.c28.
24. Otto, R., Trivelin, P. C. O., Franco, H. C. J., Faroni, C. E., & Vitti, A. C. (2009). Root System Distribution of Sugar Cane as Related to Nitrogen Fertilization, Evaluated by Two Methods: Monolith and Probes. *R. Bras. Ci. Solo*, 33, 601-611.
25. Ren, B., Li, X., Dong, Sh., Liu, P., Zhao, B., & Zhang, J. (2018). Soil Physical Properties and Maize Root Growth under Different Tillage Systems in the North China Plain. *The Crop Journal*, 6(6), 669-676.
26. Vannoppen, W., De Batets, S., Keeble, J., Dong, Y., & Poesen, J. (2017). How Do Root and Soil Characteristics Affect the Erosion-reducing Potential of Plant Species? *Ecological Engineering*, 109, 186-195. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.08.001.
27. Marschner, P. (2012). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. *Academic Press*.
28. Khadem, A., Golchin, A., Mashhadi Jafarloo, A., Zaree, E., & Naseri, E. (2015). Effect of Highly Acidified Soil on Soil Nutrient Availability and Corn (*Zea mays* L.) Growth. *Agronomy Journal*. 28(107), 1-7. doi:10.22092/AJ.2015.105679. [In Persian]
29. Marchiol, L., Iafisco, M., Fellet, G., & Adamiano, A. (2020). Nanotechnology Support the Next Agricultural Revolution: Perspectives to Enhancement of Nutrient Use Efficiency. *Advances in agronomy*, 161, 27-116. doi: 10.1016/bs.agron.2019.12.001.
30. Najafi, N. A., & Mardomi, S. (2013). Effects of Sunflower Cultivation, Manure and Sewage Sludge on Available of Elements, pH and EC of an Alkaline Soil. *Applied Soil Research*, 1(1), 1-16. [In Persian]
31. Yan, F., Schubert, S., & Mengel, K. (1996). Soil pH Changes During Legume Growth and Application of Plant Material. *Biology and Fertility of Soils*, 23, 236-242. doi:10.1007/BF00335950.
32. Mut, H., & Ayan, I. (2011). Effects of Different Improvement Methods on some Soil Properties in a Secondary Succession Rangeland. *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 5(13), 11-16.
33. Datta, A., Basak, N., Chaudhari, S. K., & Sharma, D. K. (2015). Soil properties and Organic Carbon Distribution under Different Land uses in Reclaimed Sodic Soils of North-West India. *Geoderma Regional*, 4, 134-146. doi: 10.1016/j.geodrs.2015.01.006.
34. Unkovich, M., Baldock, J., & Farquharson, R. (2018). Field Measurement of Bare Soil Evaporation and Crop Transpiration, and Transpiration Efficiency, for Rained Grain Crops in Australia-A review. *Agricultural Water Management*, 205, 7-80. doi: 10.1016/j.agwat.2018.04.016.
35. Jahantigh, M. (2021). Study on Soil Properties at Various Depths of Hamoun Ecosystem to Creative Tourism Environment. *Human and Environment*, 56, 201-211. [In Persian]
36. Poirier, V., Roumet, C., & Munson, A. D. (2018). The Root of the Matter: Linking Root Traits and Soil Organic Matter Stabilization Processes. *Soil*

- Biology and Biochemistry*, 120, 246-259.
doi: 10.1016/j.soilbio.2018.02.016
37. Crow, E. S., Lajtha, K., Filley, T. R., Swanston, Ch. W., Bowden, R. D., & Caldwell, B. A. (2009). Sources of Plant-derived Carbon and Stability of Organic Matter in Soil: implications for global change. *Global Change Biology*, 15, 2003-2019. **doi:10.1111/j.1365-2486.2009.01850.x**
 38. Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and its Relation to Climate and Vegetation. *Ecological applications*, 10(2), 423-436. **doi:10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOS0]2.0.CO;2**
 39. Khademi, Z., Malakouti, M. J., & Jones, D. L. (2008). Rhizosphere Organic Acids and Nutrient Availability. *Iranian Journal of Soil Research*, 21(2), 171-189. **doi:20.1001.1.22287124.1396.21.2.2.6**. [In Persian]
 40. Khosravi, H. (2015). Evaluation of Some Physiological Characteristics of Rhizobium Leguminosarum BV. Viciae native to Soils of Iran. *Journal of Molecular and Cellular Research (Iranian Journal of Biology)*, 28(4), 513-523. **doi:20.1001.1.23832738.1394.28.4.6.7**. [In Persian]
 41. Kumar, K., & Goh, K. M. (2000). Biological Nitrogen Fixation, Accumulation of Soil Nitrogen and Nitrogen Balance for White Clover (*Trifolium repens* L.) and Field Pea (*Pisum sativum* L.) Grown for Seed. *Field Crops Research*, 68(1), 49-59. **doi:10.1016/S0378-4290(00)00109-x**
 42. Torppa, A., Forkman, J., Maaroufi, N. I., Taylor, A. R., Vahter, T., Vasar, M., Weih, M., Opik, M., & Viketoft, M. (2023). Soil Compaction Effects on Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in Wheat depend on Host Plant Variety. *Plant Soil*, 493, 555-571. **doi:10.1007/s11104-023-06250-w**
 43. Karimi Amirkiasar, M., Kavooosi, M., & Shokri Vahed, H. (2012). Phosphorus Critical Concentration in Paddy Soils of Guilan Province. *Water and Soil Science Journal*, 23(1), 123-134. [In Persian]
 44. Kong, M., Kang, J., Han, Ch., Gu, Y., Siddique, K. H. M., & Li, F. (2020). Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Resorption Responses of Alfalfa to Increasing Soil Water and P Availability in a Semi-Arid Environment. *Agronomy*, 10 (310), 2-16.
 45. Macolino, S., Lauriault M. L., Rimi, F., & Ziliotto, U. (2013). Phosphorus and Potassium Fertilizer Effects on Alfalfa and Soil in a Non-Limited Soil. *Agronomy Journal*, 105(6), 1613-1618.
 46. Vadivelu, A., & Wong, M. T. F. (2017). Soil Depth and Plant Biomass Allocation Determine Nutrient Limitation in a Tropical Forest. *Journal of Ecology and Environment*, 41(1), 91-112.
 47. Soleimani, A., Hosseini, S. M., Massah Bavani, A. R., Jafari, M., & Francaviglia, R. (2019). The Effects of Tree Species on Soil Organic Carbon and Soil Properties in Natural Forest and Plantations of Northern Iran. *Journal of Environment Science Technology*, 21(9), 173-184. [In Persian]
 48. Abubakar, S. M., (1997). Monitoring Land Degradation in the Semiarid Tropics using an Inferential Approach: The Kabomo basin case study, Nigeria. *Land degradation & development*, 8(4), 311-323. **doi:10.1002/(SICI)1099-145X(199712)8:4<311: AID-LDR262>3.0.CO;2-8**
 49. Wang, T., Zlotnik, A., Wedin, D. V., & Wally, K. D. (2008). Spatial Trends in Saturated Hydraulic Conductivity of Vegetated Dunes in the Nebraska Sand Hills: Effects of Depth and Topography. *Journal of Hydrology*, 349, 88-97. **doi: 10.1016/j.hydrol.2007.10.027**
 50. Safadoust, A., Mosadeghi, M. R., Mahboubi, A. A., Norouzi, A., & Asadian, Gh. (2007). Short-term Tillage and Manure Influences on Soil Structural Properties. *Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 11(41), 91-99. [In Persian]