



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources



Soil Science Society of Iran

(OPEN ACCESS)

Evaluating the Impact of Converting Rangeland to Cropland on Soil Physical Quality in a Semi-Arid Region

Amirhosein Masoumi Tabar Zanjani¹, Mohammad Sadegh Askari^{*2},
Setareh Amanifar³, Akbar Hassani⁴

1. M.Sc. Graduate of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: masoumi.tabar@znu.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: askari@znu.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: amanifar@znu.ac.ir
4. Associate Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: akbar.hassani@znu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: The conversion of rangeland to agricultural land is a significant challenge in sustainable natural resource management, affecting soil productivity and physical quality. Many soil functions are closely related to soil physical quality, so accurately assessing and improving soil physical conditions is crucial for maintaining ecosystem functions in both rangeland and agricultural areas. This study aimed to evaluate the impact of rangeland conversion to agriculture on soil physical quality and identify the most influential physical soil properties affected by this land-use change in semi-arid areas of Zanjan province.
Article history: Received: 06.04.2024 Revised: 08.16.2024 Accepted: 09.15.2024	
Keywords: Discriminant analysis, Multivariate analysis, Soil structure, Soil quality, Sustainable soil management	Materials and Methods: This research was conducted in three adjacent areas with different land-use histories, including rangeland areas, areas converted from rangeland to dryland farming less than 10 years ago, and areas converted over 30 years ago. Soil sampling was done from fifteen sites at two depths: 0-15 and 15-30 cm. Disturbed and undisturbed soil samples were collected from each depth, and various soil properties were measured using standard laboratory methods. Discriminant analysis was employed to identify the most important soil properties affected by land-use change.
	Results: Land-use change significantly impacted total soil porosity, macroporosity, soil aeration capacity, soil hydraulic conductivity, structural stability index, soil compaction degree, organic carbon content, electrical conductivity, soil sodium content, and acid and hot water-extractable carbohydrates. A high correlation ($r>0.6$) was observed between total soil porosity, macroporosity, soil aeration capacity, soil structural index, and soil organic matter content. Acid and hot water-extractable carbohydrates significantly correlated with soil structural quality indicators, including structural stability index, soil porosity characteristics, and soil aggregation. Discriminant analysis results indicated that land-use change had the greatest impact on acid and hot water-extractable carbohydrates, soil aeration capacity, total porosity, and structural stability index. These properties were identified as the most important indicators for assessing the impact of land-use change on soil

physical quality in the study area. Conversion from rangeland to agriculture reduced organic carbon content, degraded soil structure, decreased total and macroporosity, soil aeration capacity, and moisture retention and aggregate size.

Conclusion: The findings of this study indicated that the conversion of rangeland to agriculture adversely affected soil structural properties and reduced soil physical quality in the study area. Soil physical condition degradation due to land-use change was more severe in the short term (less than 10 years of cultivation), while long-term cultivation (more than 30 years) led to relative soil quality improvement in semi-arid areas. Implementing appropriate management practices in agricultural ecosystems can reduce soil degradation intensity due to land-use change in the long term. Additionally, assessing soil physical quality can provide a suitable tool for rapidly evaluating the impact of management practices on soil conditions in semi-arid areas.

Cite this article: Masoumi Tabar Zanjani, Amirhosein, Askari, Mohammad Sadegh, Amanifar, Setareh, Hassani, Akbar. 2025. Evaluating the Impact of Converting Rangeland to Cropland on Soil Physical Quality in a Semi-Arid Region. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 15 (1), 1-27.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2025.22503.2155

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



انجمن علوم خاک ایران

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار

شاپا چاپی: ۱۳۶۷-۲۳۲۲

شاپا آنالین: ۱۳۷۵-۲۳۲۲



دانشگاه گلستان و منابع طبیعی گلستان

ارزیابی تأثیر تغییر کاربری اراضی مرتعی به کشاورزی بر کیفیت فیزیکی خاک در یک منطقه نیمه خشک

امیرحسین معصومی تبار^۱، محمدصادق عسکری^{۲*}، ستاره امانی فر^۳، اکبر حسینی^۴

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: masoumi.tabar@znu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: askari@znu.ac.ir

۳. دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: amanifar@znu.ac.ir

۴. دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: akbar.hassani@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۵ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵	سابقه و هدف: تغییر کاربری مرتع به اراضی کشاورزی از چالش‌های مهم در مدیریت پایدار منابع طبیعی است که می‌تواند تأثیر زیادی بر توانایی تولید خاک و کیفیت فیزیکی آن داشته باشد. بسیاری از نقش‌ها و عملکردهای خاک در ارتباط نزدیک با کیفیت فیزیکی خاک بوده و ارزیابی دقیق و ارتقاء شرایط فیزیکی خاک اهمیت بسیاری در حفظ عملکرد آن در زیست‌بوم‌های مرتعی و کشاورزی دارد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تغییر کاربری مرتع به کشاورزی بر کیفیت فیزیکی خاک و شناسایی مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک متأثر از این تغییر کاربری، در بخش از اراضی نیمه‌خشک استان زنجان انجام شد.
واژه‌های کلیدی: تجزیه تشخیص، تحلیل چندمتغیره، ساختمان خاک، کیفیت خاک، مدیریت پایدار خاک	مواد و روش‌ها: این پژوهش در سه منطقه مجاور با تاریخچه کاربری متفاوت شامل اراضی با کاربری مرتع، اراضی که در کم‌تر از ۱۰ سال گذشته از مرتع به کشاورزی دیم تغییر کاربری یافته‌اند و اراضی که بیش از ۳۰ سال از مرتع به کشاورزی دیم تغییر کاربری یافته‌اند، انجام شد. نمونه‌برداری خاک از پانزده سایت از دو عمق ۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتی‌متر انجام شد. از هر عمق نمونه‌های خاک دست‌خورده و دست‌نخورده جمع‌آوری و برخی ویژگی‌های خاک با استفاده از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. از آنالیز تشخیص به منظور تعیین مهم‌ترین ویژگی‌های خاک متأثر از تغییر کاربری اراضی استفاده شد.
یافته‌ها: تغییر کاربری تأثیر قابل‌توجهی بر تخلخل کل خاک و تخلخل درشت و ظرفیت تهویه‌ای خاک، هدایت هیدرولیکی خاک، شاخص پایداری ساختمان، درجه تراکم خاک، مقدار کربن آلی، هدایت الکتریکی، مقدار سدیم خاک و کربوهیدرات قابل استخراج با اسید و آب داغ	

داشت. همبستگی بالایی ($r^2 > 0.6$) بین تخلخل کل خاک، تخلخل درشت و ظرفیت تهویه‌ای خاک، شاخص ساختمان خاک و مقدار ماده آلی خاک مشاهده شد. کربوهیدرات‌های قابل‌استخراج با اسید و آب داغ همبستگی بالایی با شناسه‌های مرتبط با کیفیت ساختمانی خاک از جمله شاخص پایداری ساختمان خاک، ویژگی‌های مرتبط با تخلخل خاک و خاکدانه‌سازی داشتند. نتایج تجزیه تشخیص نشان داد که تغییر کاربری اراضی بیش‌ترین تأثیر را بر ویژگی‌های کربوهیدرات قابل‌استخراج با اسید و آب داغ، ظرفیت تهویه‌ای خاک، تخلخل کل و شاخص پایداری ساختمان خاک داشته و این ویژگی‌ها به عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر برای ارزیابی تأثیر تغییر کاربری بر کیفیت فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه شناسایی شدند. با تغییر کاربری اراضی از مرتع به کشاورزی، مقدار کربن آلی کاهش، ساختمان خاک تضعیف و مقدار تخلخل کل و درشت خاک، ظرفیت تهویه‌ای و شرایط ذخیره رطوبتی خاک و اندازه خاکدانه‌ها کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که تغییر کاربری مرتع به کشاورزی تأثیر نامطلوبی بر روی ویژگی‌های ساختمانی خاک داشته و باعث کاهش کیفیت فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه شده است. تخریب شرایط فیزیکی خاک در اثر تغییر کاربری در مدت زمان کوتاهی از تغییر کاربری (کشت کم‌تر از ۱۰ سال) شدیدتر بود و ادامه عملیات کشاورزی (کشت بیش از ۳۰ سال) در بلندمدت باعث بهبود نسبی کیفیت خاک در مناطق نیمه خشک می‌شود. استفاده از روش‌های مدیریتی مناسب در زیست‌بوم‌های کشاورزی می‌تواند در بلندمدت شدت تخریب خاک در اثر تغییر کاربری به کشاورزی را کاهش دهد. هم‌چنین ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک می‌تواند ابزار مناسبی جهت بررسی سریع تأثیر تغییر عملیات مدیریتی بر شرایط خاک مناطق نیمه‌خشک فراهم کند.

استناد: معصومی‌تبار زنجان، امیرحسین، عسکری، محمدصادق، امانی‌فر، ستاره، حسنی، اکبر (۱۴۰۴). ارزیابی تأثیر تغییر کاربری اراضی مرتعی به کشاورزی بر کیفیت فیزیکی خاک در یک منطقه نیمه‌خشک. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۵ (۱)، ۲۷-۱.

DOI: 10.22069/ejsms.2025.22503.2155



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

خاک یک منبع طبیعی مهم برای عملکردهای زیست‌بوم، حفظ تنوع زیستی و حمایت از سلامت گیاهان و حیوانات است (۱). حفظ و ارتقاء کیفیت خاک برای اطمینان از پایداری زیست‌بوم اهمیت بسیار زیادی داشته و کیفیت خاک به عنوان یک شاخص برای ارزیابی کیفیت محیط زیست استفاده می‌شود (۲). کیفیت خاک بازتاب جامعی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک است و می‌تواند در اثر فعالیت‌های مدیریتی در کاربری‌های مختلف تغییر کند (۳، ۴). ارتباط نزدیکی بین کیفیت فیزیکی خاک و بسیاری از نقش‌ها و عملکردهای خاک در زیست‌بوم‌های مرتعی و کشاورزی از جمله حمایت فیزیکی (مقاومت مکانیکی) و نگهداری از گیاه، تامین آب، بازچرخانی عناصر غذایی، تنوع زیستی و جلوگیری از تخریب خاک گزارش شده است (۲). تعیین کیفیت فیزیکی خاک به عنوان یک فرآیند پیچیده به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست و معمولاً ارزیابی آن با استفاده از مجموعه‌ای از ویژگی‌های که نشان‌دهنده شرایط فیزیکی خاک هستند (مثل توزیع اندازه خاکدانه‌ها، پایداری خاکدانه‌ها، توزیع منافذ خاک) و ویژگی‌های مؤثر بر شرایط فیزیکی خاک (مانند کربن خاک و درصد سدیم تبادلی خاک) انجام می‌شود (۵).

در چند دهه گذشته تبدیل مراتع به اراضی کشاورزی یکی از چالش‌های مهم مدیریت پایدار منابع خاک بوده که توجه زیادی را به خود جلب کرده است (۶). تاب‌آوری^۱ و مقاومت^۲ به عنوان مکانیسم‌های پایداری خاک در هر زیست‌بوم بوده و باعث می‌شوند شرایط خاک بعد از تنش حاصل از تغییر کاربری طی یک دوره مشخص (زمان بازبایی) به یک حالت پایدار بهبود یابد (۷). این که یک سامانه زیستی در چه

وضعیت تعادلی قرار گیرد و در این حالت ویژگی‌های خاک به چه صورت است به نوع و شدت آشفتگی و زمان بازبایی سامانه بستگی دارد (۸، ۹). انتظار می‌رود تغییر در کاربری اراضی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را تغییر دهد. کاهش ذخیره کربن خاک، تخریب ساختمان خاک، فرسایش خاک و کاهش فعالیت‌های زیستی خاک از مهم‌ترین چالش‌های تغییر کاربری مرتع به دیم عنوان شده است (۱۰). تغییر گونه‌های گیاهی می‌تواند با تغییر در ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند پایداری خاکدانه و اندازه منافذ درشت خاک موجب تغییر در میزان تخلخل و نفوذ آب شود (۱۱). تغییر خواص شیمیایی و فیزیکی خاک از جمله مقدار ماده آلی خاک و تخلخل می‌تواند سبب تغییر در فعالیت جامعه میکروبی خاک و حذف برخی از میکروارگانیسم‌ها شود (۱۲). مطالعات نشان داده‌اند که گسترش کشاورزی می‌تواند باعث افزایش فرسایش خاک (۱۳)، و کاهش محتوای آب خاک شده، که این امر باعث تأثیرگذاری بر دینامیک آب خاک (۱۴) و کاهش محتوای کربن (۱۵) می‌شود. تخریب فیزیکی خاک می‌تواند بر دسترسی به آب و عناصر غذایی، پویایی مواد آلی خاک، تبادل گازها (به عنوان مثال، O_2 ، CO_2 و N_2O) و فعالیت میکروبی تأثیرگذار باشد (۱۶). لی و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که پایداری خاکدانه در عمق ۳۰-۵۰ سانتی‌متر به طور قابل توجهی (۵۴-۲۷ درصد) پس از تغییر کاربری مرتع به کشاورزی کاهش یافته است. آن‌ها گزارش کردند که تبدیل اراضی بکر به زمین کشاورزی نرخ نفوذ آب به خاک را کاهش و ویژگی‌های فیزیکی خاک را تحت تأثیر قرار داده که باعث افزایش فرسایش می‌شود (۱۷). این تغییرات با کاهش کربن آلی، تخریب خاک (۱۸) و کاهش پایداری خاکدانه همراه است (۱۹). همین‌طور کاهش ماده آلی منجر به افزایش چگالی ظاهری خاک و کاهش تخلخل کل

1- Resilience

2- Resistance

خاک مشخص نیست. بنابراین در این مطالعه به منظور بررسی و ارتقا کیفیت منابع خاک استان زنجان، تأثیر تغییر کاربری از مرتع به کشت دیم بر کیفیت فیزیکی خاک در بخشی از اراضی استان مورد ارزیابی قرار گرفت و اهمیت تاریخچه تغییر کاربری بر شرایط خاک بررسی شد. اهداف این پژوهش عبارتند از:

- ۱- بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی مرتع به دیم‌زار بر مشخصه‌های مرتبط با کیفیت فیزیکی خاک،
- ۲- بررسی تأثیر تاریخچه تغییر کاربری مرتع به کشاورزی (کم‌تر از ۱۰ سال و بیش از ۳۰ سال) بر ویژگی‌های فیزیکی خاک (جرم مخصوص ظاهری، میانگین هندسی قطر خاکدانه، هدایت هیدرولیکی، تخلخل کل و درشت خاک، رطوبت ظرفیت زراعی، شاخص پایداری ساختمان و درجه فشردگی خاک) و برخی ویژگی‌های مرتبط با کیفیت فیزیکی خاک (کربن خاک، درصد سدیم تبادل، هدایت الکتریکی، واکنش خاک و کربوهیدرات‌های خاک) ۳- شناسایی مهم‌ترین ویژگی‌های خاک متأثر از تغییر کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: به منظور ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک در اثر تغییر کاربری اراضی مرتعی به کشاورزی (دیم)، منطقه سهرین واقع در شهرستان زنجان، استان زنجان انتخاب شد. منطقه موردنظر در حد فاصل طول جغرافیایی $48^{\circ} 25' 7''$ تا $48^{\circ} 24' 27''$ شرقی و عرض جغرافیایی $36^{\circ} 51' 55''$ تا $36^{\circ} 52' 46''$ شمالی قرار دارد (شکل ۱). این منطقه در شمال شهر زنجان و در حدود ۱۴ کیلومتری آن واقع گردیده است. براساس داده‌های ایستگاه هواشناسی فرودگاه زنجان منطقه مورد مطالعه دارای متوسط بارندگی ۲۸۲ میلی‌متر در سال و متوسط درجه حرارت سالانه ۱۱ درجه سلسیوس بوده و دارای اقلیم نیمه‌خشک به روش دومارتن است. خاک‌های منطقه مورد مطالعه

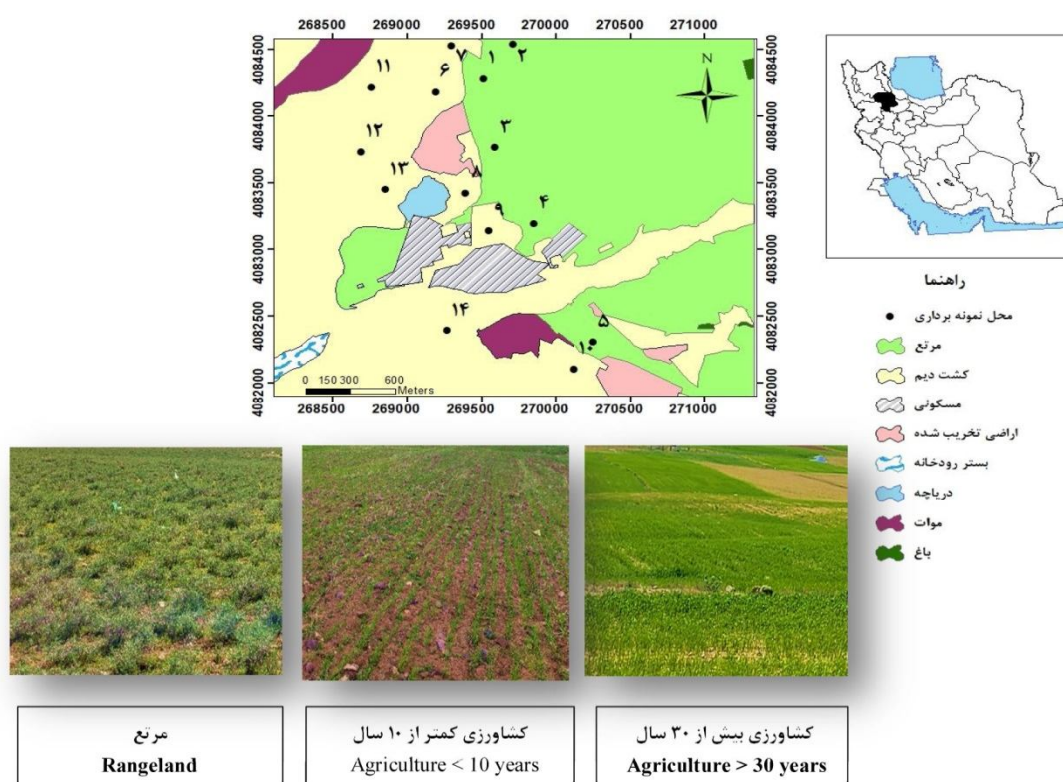
می‌شود، بنابراین نفوذ آب به خاک را کاهش می‌دهد (۲۰). برخی مطالعات نشان داده‌اند که مراتع نرخ نفوذ و هدایت هیدرولیکی بالاتری نسبت به زمین‌های کشاورزی دارند (۲۱)، حال آن‌که در برخی پژوهش‌های دیگر گزارش شده است چرای دام در مراتع باعث تراکم خاک و کاهش هدایت هیدرولیکی و نفوذ آب در خاک نسبت به اراضی کشاورزی شده است (۲۲). تغییر پوشش مرتعی به اراضی زراعی و اعمال خاک‌ورزی فشرده باعث کاهش پوشش سطحی شده که منجر به از دست دادن مواد آلی خاک و تغییر شرایط رطوبتی خاک می‌شود (۲۳). از تحلیل‌های چندمتغیره متعددی جهت بررسی تأثیر روش‌های مدیریتی بر کیفیت خاک استفاده شده است (۲۴، ۲۵). از بین روش‌های استفاده شده، تجزیه تشخیص (DA)^۱ روشی پرکاربرد در ارزیابی کیفیت خاک است که قابلیت خوبی برای تعیین تأثیر عملیات مدیریتی بر شناسه‌های کیفیت خاک نشان داده است (۲۶). زنجان یکی از استان‌های با رونق تولیدات کشاورزی در شمال غرب کشور است و با داشتن اراضی وسیع تحت کشت دیم و آبی همواره با مشکلات تغییر کاربری اراضی مواجه بوده است که می‌تواند بر کیفیت خاک این استان، فرسایش آبی و بادی و توانایی تولید اراضی استان تأثیرگذار باشد (۲۷). نیاز به ارزیابی دقیق تأثیر تغییر کاربری مرتع به کشاورزی به عنوان یکی از چالش‌های مهم مدیریت اراضی در ایران بر کیفیت فیزیکی خاک مناطق نیمه خشک استان زنجان توسط خاصی و همکاران نشان داده شده است (۲۸). با وجود مطالعات که در ارتباط با تأثیر تغییر کاربری بر شرایط خاک در مناطق مختلف ایران انجام شده است، تأثیر تغییر کاربری مرتع به دیم بر شرایط فیزیکی خاک شناخته شده نیست و اهمیت تاریخچه تغییر کاربری بر تعدیل اثر تنش وارد شده در اثر عملیات کشاورزی بر شرایط

1- Discriminant analysis

تا ۱۹۰۰ متر از سطح دریا) و مواد مادری انتخاب شد. خاک‌های مورد مطالعه براساس کلید تاکسونومی خاک در رده اینسپتی سول قرار می‌گیرند. برای انجام این پژوهش سه منطقه مجاور با تاریخچه کاربری متفاوت استفاده شد که شامل اراضی با کاربری مرتع، اراضی که در کمتر از ۱۰ سال گذشته از مرتع به کشاورزی دیم تغییر کاربری یافته‌اند (کشت کمتر از ۱۰ سال) و اراضی که بیش از ۳۰ سال از مرتع به کشاورزی دیم تغییر کاربری یافته‌اند (کشت بیش از ۳۰ سال) می‌باشند. اطلاعات مورد نیاز جهت انتخاب سایت‌های طی مطالعاتی میدانی، مصاحبه با کشاورزان، بهره‌برداران و مدیران اراضی و داده‌های موجود اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان زنجان گردآوری و بررسی شد.

دارای رژیم رطوبتی زیریک (Xeric) و رژیم حرارتی مزیک (Mesic) بوده و گونه‌های گیاهی غالب در مراتع منطقه شامل *Astragalus gossypinus*، *Bromus tomentellus* و *Elymus hispidus* می‌باشد. همچنین کشت رایج در منطقه مورد مطالعه گندم است و عملیات خاکورزی از نوع خاکورزی مرسوم (Conventional tillage) و با استفاده از گاوآهن برگردان‌دار و دیسک زدن اراضی بعد از شخم خاک می‌باشد.

نقاط نمونه‌برداری با ارزیابی اطلاعات مربوط به کاربری اراضی، زمین‌شناسی، پستی و بلندی، پوشش گیاهی، نوع خاک و کلاس‌های بافت خاک تعیین و مناطق مشابه از نظر شرایط آب و هوایی، موقعیت پستی و بلندی (شیب دو تا پنج درصد و ارتفاع ۱۸۵۰



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری.

Figure 1. Location of the study area and sampling points.

نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها: نمونه‌های خاک اوایل خرداد سال ۱۴۰۲ از پنج نقطه در هر کاربری جمع‌آوری گردید و در مجموع در سه کاربری (مرتج، کشت کم‌تر از ۱۰ سال و کشت بیش از ۳۰ سال) پانزده محل نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی انتخاب شد. در هر نقطه یک پلات نمونه‌برداری با ابعاد ۱۰ در ۱۰ متر در بخشی که از نظر پوشش سطح زمین و خاک یکنواخت و نشان‌دهنده شرایط طبیعی هر کاربری بود در نظر گرفته شد و نمونه‌برداری از دو عمق ۱۵-۱۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متر انجام شد. از هر عمق نمونه‌های خاک دست‌خورده و دست‌نخورده جمع‌آوری شد. نمونه‌های دست‌خورده به‌صورت مرکب از ترکیب ۵ نمونه در هر پلات جمع‌آوری و از هر عمق در هر پلات سه نمونه دست‌نخورده با استفاده از استوانه‌های فلزی تهیه و نتایج اندازه‌گیری به‌صورت میانگین برای هر عمق ارائه شد. نمونه‌های دست‌خورده پس از انتقال به آزمایشگاه در هوا خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند.

ویژگی‌های خاک: بافت خاک به روش هیدرومتر (۲۸) و جرم مخصوص ظاهری به روش نمونه دست‌نخورده (۲۹) هدایت هیدرولیکی به روش بار ثابت (۳۰) میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD)^۱ به روش الک تر انجام (۳۱) و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n \log \bar{x}_i}{\sum w_i}\right) \quad (1)$$

که در آن، GMD میانگین وزنی قطر خاکدانه، w_i نسبت وزن خاکدانه‌های روی هر الک، $\bar{x}_i$ میانگین قطر خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک و n تعداد الک می‌باشد. ظرفیت‌های رطوبتی به کمک دستگاه صفحه فشاری اندازه‌گیری شد و رطوبت

خاک در شرایط اشباع و در پتانسیل ۶- و ۳۳- کیلوپاسکال تعیین شد (۳۲). رطوبت باقی‌مانده در پتانسیل ۶- کیلوپاسکال نشان‌دهنده مقدار رطوبت موجود در منافذ کوچک‌تر از ۵۰ میکرون است که این حد رطوبتی برای محاسبه تخلخل درشت خاک (منافذ بزرگ‌تر از ۵۰ میکرون) استفاده شد (۳۳). تخلخل کل خاک با توجه به مقدار رطوبت خاک در شرایط اشباع محاسبه شد. تخلخل درشت (منافذ بزرگ‌تر از ۵۰ میکرون) براساس اختلاف میزان رطوبت در حالت اشباع و رطوبت در پتانسیل ۶- کیلوپاسکال محاسبه شده است (۳۴، ۳۵).

ظرفیت تهویه‌ای خاک (AC)^۲ با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد:

$$AC = \theta_s (\psi = 0) - \theta_{Fc} (\psi = -33kpa) \quad (2)$$

که در آن، θ_s (m^3/m^3) مقدار رطوبت اشباع خاک که با اشباع کردن خاک و در مکش صفر اندازه‌گیری شد، θ_{Fc} (m^3/m^3) مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه (۳۶) می‌باشد. شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI)^۳ با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد (۳۷):

$$SSI = \frac{1.724 OC}{(silt+clay)} \times 100 \quad (3)$$

در این رابطه، SSI شاخص پایداری ساختمان خاک، OC^۴ میزان کربن آلی خاک و silt+clay مجموع مقدار ذرات رس و سیلت خاک است. سطوح $SSI > 9\%$ به‌عنوان ساختمان پایدار، $7\% < SSI < 9\%$ به‌عنوان تخریب ساختمان خاک با ریسک کم، $5\% < SSI < 7\%$ به‌عنوان تخریب ساختمان خاک با ریسک بالا و $SSI < 5\%$ به‌عنوان ساختمان کاملاً تخریب شده خاک شناخته شده است. درجه فشردگی خاک با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد (۳۸).

2- Air capacity
3- Soil structural index
4- Organic carbon

1- Geometric mean diameter

برهمکنش آن‌ها بر ویژگی‌های خاک، تحلیل واریانس دو عاملی^۵ استفاده شد. برای مقایسه میانگین از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD)^۶ در سطح احتمال پنج درصد جهت بررسی تأثیر تغییر کاربری بر کیفیت فیزیکی خاک استفاده شد. بررسی همبستگی بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون^۷ انجام شد. شناسایی مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک متأثر از تغییر کاربری اراضی با استفاده از تجزیه تشخیص انجام شد. تجزیه تشخیص یک تحلیل چندمتغیره است که به‌منظور کاهش ابعاد داده‌ها و طبقه‌بندی نظارت شده آن‌ها توسعه یافته است (۴۳). در این روش توابع تشخیص محاسبه می‌شوند که این توابع ترکیب خطی از متغیرهای اولیه هستند. از توابع تشخیص می‌توان به‌منظور شناسایی متغیرها (ویژگی‌های) که بیش‌ترین تمایز را بین کلاس‌ها (کاربری‌ها) دارند استفاده کرد (۴۴). تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۱ انجام شد.

نتایج و بحث

توصیف آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک در کاربری‌های مختلف (مرتع، کشاورزی کم‌تر از ۱۰ سال، کشاورزی بیش از ۳۰ سال) در اعماق ۰-۱۵ سانتی‌متر و ۱۵-۳۰ سانتی‌متر در جدول ۱ خلاصه شده است. نتایج نشان داد چگالی ظاهری خاک‌های مطالعه‌شده در محدوده ۱/۲۴-۱/۰۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار دارد. میانگین هندسی اندازه خاکدانه‌ها در محدوده ۲/۱-۱/۰۸ میلی‌متر، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در محدوده ۳/۰۳-۱/۷۸ متر بر روز، تخلخل کل خاک در محدوده ۵۴-۳۷/۴۰ درصد، ظرفیت تهویه‌ای خاک در محدوده ۳۹/۳-۲۱/۵۰ درصد،

$$DC = \frac{BD}{BD_{LLWR}} \times 100 \quad (۴)$$

که در این رابطه، $DC^۱$ درجه فشردگی خاک (%)، BD چگالی ظاهری مزرعه (Mg/m^3)، $BD_{LLWR}^۲$ چگالی ظاهری مرجع است که با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد (۳۸).

$$BD_{LLWR} = 0.00078clay + 1.83803 \quad (۵)$$

که، $clay$ برابر است با مقدار رس خاک (g/kg). در نمونه خاک تهیه شده کربن آلی به روش والکلی بلک (۳۹) pH در عصاره گل اشباع با استفاده از دستگاه pH متر و هدایت الکتریکی در عصاره اشباع به کمک دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد (۴۰)، سدیم با دستگاه فلیم فتومتر (۴۱) و کربوهیدرات‌های خاک به کمک عصاره‌گیرهای آب داغ و اسید ۰/۵ مولار استخراج شد و به روش اسپکتروفتومتری و با استفاده از استانداردهای گلوکز مورد سنجش قرار گرفت (۴۲).

روش‌های آماری تجزیه و تحلیل اطلاعات: نتایج این آزمایش به روش فاکتوریل در غالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تکرار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. توزیع نرمال و یکنواختی واریانس داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگوروف اسمیرنوف^۳ و آزمون لونز^۴ بررسی شد. ویژگی‌های هدایت هیدرولیکی خاک، کربن آلی، شاخص پایداری ساختمان خاک و کربوهیدرات‌ها استخراج شده دارای توزیع نرمال نبودند که با عملیات لگاریتم نرمال شدند. به‌منظور بررسی تأثیر کاربری اراضی (مرتع، کشت کم‌تر از ۱۰ سال و کشت بیش از ۳۰ سال) و عمق خاک (۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتی‌متر) به‌عنوان فاکتورهای اصلی و

5- A two way ANOVA
6- Least Significant Different
7- Pearson

1- Degree of compactness
2- Bulk density of least limiting water range
3- Kolmogorov-Smirnov test
4- Leven's test

مشاهده شد. طریق سلطانی و همکاران (۲۰۱۴) نیز بیان کردند که با تغییر کاربری اراضی از مرتع به کشاورزی پایداری خاکدانه به طور معنی داری کاهش می یابد (۴۵). مقایسه شاخص پایداری ساختمان خاک بین کاربری ها نشان داد این شاخص بیشترین مقدار را در کاربری مرتع در عمق اول داشته و تفاوت معنی داری بین دو عمق خاک در این کاربری مشاهده شد (جدول ۳). هر چند تفاوت معنی داری برای شاخص پایداری ساختمان خاک بین کاربری دیم و مرتع مشاهده شد اما این شاخص بین کشت کم تر از ۱۰ سال و کشت بیش از ۳۰ سال تفاوت معنی داری نداشت (جدول ۴). مطالعات قبلی نیز کاهش شاخص پایداری ساختمان خاک در تغییر کاربری به کشاورزی را گزارش کرده اند (۴۶). بیشترین مقدار کربن آلی خاک در کاربری مرتع در عمق اول (۲/۱ درصد) مشاهده شد و مقدار آن تفاوت معنی داری با عمق دوم در این کاربری داشت (۱/۱ درصد). کشت کم تر از ۱۰ سال به طور معنی داری کم ترین مقدار کربن آلی را نسبت به کشت بیش از ۳۰ سال و کاربری مرتع داشت (جدول ۳). عملیات خاکورزی با افزایش نرخ معدنی شدن مواد آلی خاک باعث افزایش تجزیه ماده آلی و از دست دادن کربن به صورت CO_2 می شود (۴۷). استفاده از کودهای دامی در کشت بیش از ۳۰ سال می توان عامل افزایش کربن آلی خاک در این کاربری نسبت به کشت کم تر از ۱۰ سال باشد. کربوهیدرات های قابل استخراج با اسید و آب داغ در کاربری مرتع به طور معنی داری بیش تر از کشت دیم بود و میزان کربوهیدرات ها در کاربری مرتع در عمق اول با عمق دوم تفاوت معنی داری داشت که می تواند تحت تأثیر تفاوت مقدار کربن آلی بین دو عمق این کاربری باشد (جدول ۴). لی شیانوچنگ و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که با تغییر کاربری اراضی از مرتع به کشاورزی میزان کربوهیدرات استخراج شده

رطوبت ظرفیت زراعی در محدوده ۱۶/۰۲-۱۱/۵۰ درصد، شاخص پایداری ساختمان خاک در محدوده ۹/۲۱-۲/۴۱ درصد، درجه فشردگی خاک در محدوده ۶۰/۰۵-۷۳/۰۴ درصد قرار دارد. همچنین محدوده تغییرات مقدار کربن آلی خاک بین ۲/۴۵-۰/۶ درصد، سدیم تبادلی خاک بین ۲۱/۹۴-۷/۶۵ پی پی ام، pH خاک بین ۸/۵۱-۷/۳۵ و شوری خاک بین ۶۱۱-۱۱۲ میکروزیمنس بر سانتی متر، قرار داشت. کربوهیدرات های قابل استخراج با اسید و آب داغ در بیشترین مقدار به ترتیب برابر ۷/۶۰ و ۷/۳۲ و در کم ترین مقدار به ترتیب برابر ۱/۶۱ میلی گرم بر گرم خاک بود. مناطق مطالعه شده دارای کلاس بافت خاک یکسانی بودند (لوم شنی). نتایج تجزیه واریانس اثر عامل های اصلی (کاربری اراضی و عمق نمونه برداری) و برهمکنش آنها بر ویژگی های اندازه گیری شده در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که اثر متقابل کاربری و عمق بر ویژگی های میانگین هندسی قطر خاکدانه در سطح احتمال پنج درصد و رطوبت ظرفیت زراعی، تخلخل کل، تخلخل درشت، ظرفیت تهویه ای خاک، شاخص پایداری ساختمان خاک، کربن آلی خاک، هدایت الکتریکی، درصد شن، سیلت و کربوهیدرات های قابل استخراج با اسید و آب داغ در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. همچنین نتایج تجزیه واریانس معنی دار بودن اثر تغییر کاربری اراضی بر مقدار هدایت هیدرولیکی و درصد سدیم تبادلی و معنی دار بودن اثر عمق بر جرم مخصوص ظاهری خاک، هدایت هیدرولیکی و درجه فشردگی خاک را نشان داد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین ویژگی های که اثر متقابل تغییر کاربری و عمق بر آنها معنی دار بود در جدول ۳ نشان داده شده است. بیشترین میانگین هندسی اندازه خاکدانه در کاربری مرتع بود که تفاوت معنی داری بین عمق های این کاربری داشت و کم ترین اندازه خاکدانه ها در کشت دیم کم تر از ۱۰ سال

با اسید و آب داغ از خاک روندی کاهشی دارد که به علت همبستگی بالای کربوهیدرات خاک با محتوای کربن آلی خاک می باشد و با کاهش ورودی های کربن و افزایش خروج آن در اراضی کشاورزی غلظت کربوهیدرات در حداقل خود قرار دارد (۴۸). کاهش کربوهیدرات خاک در تغییر کاربری به کشاورزی توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است (۴۹). تغییر کاربری در هر دو عمق تأثیر قابل توجهی بر تخلخل کل خاک و تخلخل درشت و ظرفیت تهویه ای خاک داشت به نحوی که این ویژگی ها در مرتع شرایط بهتری نسبت به کشت بیش از ۳۰ سال و کشت کم تر از ۱۰ داشتند (جدول ۳). در تطابق با یافته های این پژوهش، بودینایاک سی و همکاران (۲۰۰۴) بیان نمودند که مراتع دارای حجم منافذ درشت بیشتری نسبت به اراضی کشاورزی هستند (۵۰). ذوالفقاری و حاج عباسی نیز نشان داده اند که تبدیل کاربری مرتع به اراضی کشاورزی باعث کاهش ۹ درصدی تخلخل کل خاک شده است (۵۱). در اراضی تحت کشت، خاکورزی مداوم با تأثیر فزاینده بر تخریب ساختمان خاک سبب کاهش ظرفیت تهویه ای خاک می شود (۵۲). با تغییر کاربری از مرتع به کشاورزی هدایت الکتریکی خاک افزایش معنی داری را نشان داد به طوری که در اراضی کشاورزی با تاریخچه کشت بیش از ۳۰ سال بیشترین میزان هدایت الکتریکی خاک وجود داشت (جدول ۳). این تفاوت می تواند به دلیل استفاده از کودهای شیمیایی در اراضی کشاورزی باشد و در پژوهش های گذشته نیز به افزایش هدایت الکتریکی خاک در اثر تغییر کاربری از مرتع به کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک اشاره شده است (۵۳). میانگین درصد رس تفاوت معنی داری بین کاربری های و اعماق خاک نداشت و

اثر متقابل کاربری و عمق خاک نیز بر مقدار رس خاک معنی دار نبود (جدول ۲). اثر برهم کنش کاربری اراضی و عمق خاک برای میانگین درصد شن و سیلت تفاوت معنی دار داشت (جدول ۲). معنی دار نشدن اثر متقابل کاربری و عمق بر مقدار رس می تواند مربوط به کلاس بافت خاک های مطالعه شده باشد (لوم شنی). در این کلاس بافتی مقدار رس نسبت به ذرات سیلت و شن کم تر است. در کاربری مرتع مقدار شن در عمق دوم کم تر از عمق اول و مقدار درصد سیلت در عمق دوم بیش تر از عمق اول است (جدول ۳). با تغییر کاربری در کشاورزی کم تر از ۱۰ سال مقدار شن در عمق دوم بیش تر از عمق اول و مقدار سیلت در عمق دوم کم تر از عمق اول است. در کشاورزی بیش از ۳۰ سال مقدار شن بین دو عمق اول و دوم تفاوت معنی داری نداشت اما درصد سیلت در عمق دوم بیش تر از عمق اول بود (جدول ۳). به طوری که کم ترین میزان شن (۵۴/۲۰٪) و بیشترین میزان سیلت (۲۸/۳۲٪) در کاربری کشت بیش از ۳۰ سال مشاهده شد. فعالیت های کشاورزی مانند عملیات خاکورزی، کشت و برداشت محصولات و تغییرات در رطوبت خاک می تواند تأثیرات متفاوتی بر مقادیر ذرات خاک داشته باشند و توزیع ذرات خاک را در لایه های مختلف تغییر دهند (۵۴). مدت زمان فعالیت های کشاورزی بر توزیع مجدد ذرات خاک تأثیرگذار است (۵۵) و تفاوت بین کشاورزی کم تر از ۱۰ سال و بیش از ۳۰ سال می تواند ناشی از مدت زمان تغییر کاربری و انجام فعالیت های کشاورزی باشد. عجمی (۲۰۰۷) در پژوهش خود به تغییر درصد ذرات اولیه بخش معدنی خاک در اثر عملیات خاکورزی در طول زمان اشاره کرده است (۵۶).

جدول ۱- توصیف آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک در کاربری‌های مختلف.

Table 1. Statistical description of measured soil properties in different land uses.

کشاورزی بیش از ۳۰ سال Agriculture > 30 years		کشاورزی کم‌تر از ۱۰ سال Agriculture < 10 years		مرتع Rangeland		واحد Unit	ویژگی خاک Soil properties
15-30	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15		
1.16	1.10	1.16	1.12	1.12	1.10	(g/cm ³)	جرم مخصوص ظاهری BD
1.33	1.30	1.33	1.13	1.92	1.67	(mm)	میانگین هندسی قطر خاکدانه GMD
2.57	2.87	1.98	2.49	1.89	2.08	(m/day)	هدایت هیدرولیکی اشباع Ks
49.55	46.60	43.24	39.80	48.57	51.30	(%)	تخلخل کل TP
23.74	20.20	19.05	18.30	25.26	27.60	(%)	تخلخل درشت MP
33.46	30.56	27.20	22.98	35.51	38.68	(%)	ظرفیت تهویه‌ای AC
15.26	15.02	14.12	14.80	13.25	12.32	(%)	رطوبت ظرفیت زراعی FC
3.60	3.70	2.64	2.61	4.16	8.12	(%)	شاخص پایداری ساختمان خاک SSI
67.92	65.19	68.26	65.34	65.76	64.67	(%)	درجه فشردگی خاک SDC
0.96	0.96	0.66	0.69	1.10	2.06	(%)	کربن آلی OC
224.33	542.67	228.67	454.00	393.33	285.00	(μs/cm)	هدایت الکتریکی EC
8.04	8.09	8.08	7.90	7.89	7.78		واکنش خاک pH
5.19	6.80	8.83	8.38	7.59	8.33	(%)	درصد سدیم تبدیلی ESP
9.06	8.10	9.52	10.64	28.28	37.65	(mg/g soil)	کربوهیدرات با عصاره‌گیر اسید Car-A
2.41	3.66	2.10	2.08	3.55	5.89	(mg/g soil)	کربوهیدرات با عصاره‌گیر آب Car-W
54.20	55.26	56.88	54.85	54.41	56.28	(%)	شن Sand
28.20	25.9	25.38	27.82	28.32	26.18	(%)	سیلت Silt
17.60	18.85	17.75	17.33	17.28	17.54	(%)	رس Clay

BD: Bulk density; GMD: Geometric mean diameter; Ks: Saturated hydraulic conductivity; TP: Total porosity; MP: Macro porosity; AC: Air capacity; FC: Field capacity; SSI: Soil structural index; SDC: Soil degree of compactness; ESP: Exchangeable sodium percentage; EC: electric conductivity; Na: Sodium; Car-A: Carbohydrate extracted by acid; Car-W; Carbohydrate extracted by hot water

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (مقادیر F) اثر عامل‌های آزمایشی (کاربری اراضی و عمق نمونه‌برداری) و برهمکنش آن‌ها بر ویژگی‌های خاک.

Table 2. The results of analysis of variance of the effects of experimental factors (land use and sampling depth) and their interaction on soil properties.

منبع تغییرات Source of variation	جرم مخصوص BD	میانگین هندسی قطر GMD	هدایت هیدرولیکی Ks	تخلخل کل TP	تخلخل درشت MP	ظرفیت تهویه خاک AC	رطوبت ظرفیت FC	شاخص پایداری SSI	درجه فشردگی SDC
کاربری	F	122.6**	60.6**	57.9**	107.5**	272.9**	51.9**	231.8**	1.03 ^{ns}
Land use	P-value	0.4 ^{ns}	0.00**	0.00**	0.00**	0.00	0.00**	0.00**	0.4 ^{ns}
عمق	F	26.1**	36.4**	3.3 ^{ns}	2.2 ^{ns}	9.7**	0.7 ^{ns}	96.1**	5.3*
Depth	P-value	0.02*	0.00**	0.08 ^{ns}	0.2 ^{ns}	0.00	0.4 ^{ns}	0.00**	0.03*
کاربری * عمق	F	4.2*	2.83 ^{ns}	8.7**	15.3**	29.2**	5.8*	91.5**	0.4 ^{ns}
Land use * Depth	P-value	0.7 ^{ns}	0.03*	0.00**	0.00**	0.00**	0.01*	0.00**	0.7 ^{ns}
ضریب تغییرات CV (%)		12.57	8.83	7.95	9.31	7.67	7.77	7.07	8.02
منبع تغییرات Source of variation	کربن آلی OC	هدایت الکتریکی EC	واکنش خاک pH	سدیم تبادل ESP	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	کربوهیدرات محلول در اسید Car-A	کربوهیدرات محلول در آب Car-W
کاربری	F	206.6**	1.7 ^{ns}	1.9 ^{ns}	4.9*	2.7 ^{ns}	1.3 ^{ns}	293.2**	70.9**
Land use	P-value	0.00**	0.2 ^{ns}	0.2 ^{ns}	0.02*	0.1 ^{ns}	0.3 ^{ns}	0.00**	0.00**
عمق	F	78**	42.4**	0.7 ^{ns}	0.8 ^{ns}	0.6 ^{ns}	0.7 ^{ns}	11.9**	42.6**
Depth	P-value	0.00**	0.00**	0.4 ^{ns}	0.4 ^{ns}	0.5 ^{ns}	0.4 ^{ns}	0.00**	0.00**
کاربری * عمق	F	71.7**	33.8**	0.5 ^{ns}	0.7 ^{ns}	8.8**	1.2 ^{ns}	11.7**	13.8**
Land use * Depth	P-value	0.00**	0.00**	0.6 ^{ns}	0.5 ^{ns}	0.00**	0.3 ^{ns}	0.00**	0.00**
ضریب تغییرات CV (%)		9.35	17.21	7.37	18.78	6.91	9.81	4.48	7.24

*, **, ^{ns} به ترتیب تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪، تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و عدم وجود اختلاف معنی‌دار را نشان می‌دهد
 **, * and ^{ns} indicate significant difference at 1% probability level, significant difference at 5% probability level and non-significant difference, respectively
 BD: Bulk density; GMD: Geometric mean diameter; Ks: Saturate hydraulic conductivity; TP: Total porosity; MP: Macro porosity; AC: Air capacity; FC: Field capacity; SSI: Soil structural index; SDC: Soil degree of compactness; EC: electric conductivity; Na: Sodium; ESP: Exchangeable sodium percentage; Car-A: Carbohydrate extracted by acid; Car-W; Carbohydrate extracted by hot water

درصد بیش‌تر از کشت کم‌تر از ۱۰ سال و مرتع بود (شکل ۲). چرای دام و عدم عملیات خاکورزی در مراتع می‌تواند باعث فشردگی خاک و در نتیجه کاهش هدایت هیدرولیکی خاک نسبت به کاربری کشاورزی شود (۵۷). تأثیر خاکورزی بر افزایش هدایت هیدرولیکی خاک در اراضی کشاورزی نسبت به کاربری مرتع در پژوهش‌های قبلی نیز اشاره شده

نتایج مقایسه میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع و درصد سدیم تبدلی بین کاربری‌ها در شکل ۲ ارائه شده است. بر همکنش عامل‌های اصلی (کاربری و عمق خاک) بر این ویژگی‌های معنی‌دار نبود (جدول ۲). هدایت هیدرولیکی اشباع تفاوت معنی‌داری بین هر سه کاربری داشت و بیش‌ترین مقدار آن در کشت بیش از ۳۰ سال مشاهده شد که به ترتیب ۲۲ و ۳۶

است (۵۸). استفاده از گاوآهن‌های برگردان‌دار جهت شخم زدن خاک و دیسک زدن اراضی بعد از شخم خاک از عملیات مرسوم خاکورزی در منطقه مورد مطالعه است. این روش خاکورزی متداول می‌تواند باعث شکستن خاکدانه‌های بزرگ و توده‌های فشرده خاک شده که بر افزایش نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی خاک تأثیرگذار است (۵۹). از طرف دیگر استفاده از کودهای دامی جهت حاصلخیز کردن خاک به‌ویژه در کشاورزی بیش از ۳۰ سال می‌تواند از دلایل افزایش تخلخل و هدایت هیدرولیکی خاک باشد (۶۰). درصد سدیم تبدیلی در کشت بیش از ۳۰ سال تفاوت معنی‌داری با کشت کم‌تر از ۱۰ سال و مرتع داشت، در حالی‌که مرتع با کشت کم‌تر از ۱۰ سال تفاوت معنی‌داری در درصد سدیم تبدیلی نداشت (شکل ۲). کاهش مقدار سدیم و درصد سدیم تبدیلی خاک در کشت بیش از ۳۰ سال می‌تواند با افزایش هدایت هیدرولیکی خاک و بهبود شرایط فیزیکی خاک (بهبود تخلخل کل و درشت، میانگین هندسی اندازه خاکدانه‌ها و شاخص پایداری ساختمان خاک) در ارتباط باشد که موجب افزایش نفوذ آب به خاک و آبشویی سدیم خاک در این کاربری شود (۶۱). تأثیر عمق خاک بر جرم مخصوص ظاهری خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع و درجه فشردگی خاک در شکل ۳ ارائه شده است. برهمکنش عامل‌های اصلی (کاربری و عمق خاک) بر این ویژگی‌ها معنی‌دار نبود (جدول ۲). چگالی ظاهری خاک در عمق دوم (۱۵-۳۰ سانتی‌متر) ۵ درصد نسبت به عمق اول (۱۵-۰ سانتی‌متر) افزایش، هدایت هیدرولیکی اشباع در عمق دوم ۱۵ درصد نسبت به عمق اول کاهش و درجه فشردگی خاک در عمق دوم ۳ درصد نسبت به عمق اول افزایش نشان داد (شکل ۳).

این سه ویژگی شرایط فیزیکی بهتر و تراکم کم‌تر خاک در عمق اول (خاک سطحی) نسبت به عمق دوم را نشان دادند. تراکم و چگالی ظاهری پایین‌تر و تخلخل بالا در عمق اول می‌تواند در ارتباط با افزایش

فعالیت‌های زیستی، ماده آلی بیش‌تر و تجمع ریشه‌ها در خاک سطحی باشد (۶۲). با وجود معنی‌دار بودن تفاوت جرم مخصوص ظاهری و درجه تراکم خاک بین دو عمق، اثر متقابل کاربری و عمق و اثر کاربری بر این دو ویژگی معنی‌دار نبود. معنی‌دار نبودن تفاوت در جرم مخصوص ظاهری و درجه تراکم خاک بین کاربری‌ها می‌تواند در ارتباط با مقدار کم رس خاک در منطقه مورد مطالعه باشد. تأثیر مقدار رس خاک بر تراکم‌پذیری و جرم مخصوص ظاهری خاک در مطالعات اشاره شده است (۶۳). خاک‌های که مقدار رس کم‌تری دارند تراکم‌پذیری آن‌ها کم‌تر است (۶۴). علاوه‌بر این خاک‌های با کلاس بافت لوم شنی دارای ساختار پایدار و تهویه مناسبی هستند و ممکن است عدم تأثیر کاربری بر جرم مخصوص ظاهری مربوط به ویژگی خاک‌های لوم شنی باشد (۶۳). برای درک بهتر این تأثیرات، مطالعات بلندمدت و دقیق‌تری موردنیاز است تا تأثیرات کامل تغییر کاربری بر خصوصیات مختلف خاک به‌طور دقیق‌تر بررسی شود. ضرایب همبستگی بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در جدول ۴ ارائه شده است. تخلخل کل خاک، تخلخل درشت و ظرفیت تهویه‌ای خاک با میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها همبستگی بالای داشتند (جدول ۴، $r^2 > 0.6$) که نشان‌دهنده ارتباط ارتقاء شرایط خاکدانه‌سازی با بهبود تهویه‌ای و افزایش تخلخل خاک است. ویژگی‌های مرتبط با کیفیت ساختمانی خاک از جمله تخلخل درشت، تخلخل تهویه‌ای و تخلخل کل خاک، میانگین هندسی قطر خاکدانه و شاخص ساختمان خاک همبستگی بالای با مقدار کربن آلی خاک نشان دادند ($r^2 > 0.6$). ارتباط مثبت بین محتوای کربن آلی و کیفیت ساختمانی خاک به عنوان یک فرآیند شناخته شده است و با کاهش در مقدار کربن آلی، پایداری و مقاومت خاکدانه‌ها به عنوان یک عامل فیزیکی مهم در حفاظت خاک، کاهش می‌یابد (۶۵). ژو و همکاران (۲۰۲۱) نیز همبستگی مثبتی بین میانگین قطر خاکدانه‌ها و مقدار کربن آلی خاک در

خاک برای کربوهیدرات‌های قابل استخراج با اسید بارزتر بود. مقدار کربن آلی خاک نیز همبستگی بالایی با کربوهیدرات‌های قابل استخراج خاک نشان داد ($r > 0.8$). مواد آلی خاک از دو منبع اصلی هیومیک و غیرهیومیک تشکیل شده‌اند که کربوهیدرات جزو مواد درصد ماده آلی را شامل می‌شوند (۶۸). این ترکیبات تأثیر مستقیمی بر شرایط ساختمانی خاک و حفظ و تثبیت خاکدانه‌ها دارند (۶۹). همبستگی مثبت و معنی‌داری که بین میانگین هندسی قطر خاکدانه (GMD) و کربن آلی وجود دارد (جدول ۴) نشان می‌دهد که سطوح کربن آلی در خاک از عوامل تعیین‌کننده در پایداری خاکدانه‌ها به‌شمار می‌رود.

تغییر کاربری مرتع به کشاورزی گزارش کرده و ارتباط بین کاهش میزان ماده آلی با کاهش پایداری خاکدانه‌ها در اثر فعالیت‌های کشاورزی را نشان دادند (۶۶). شرایط فیزیکی بهتر خاک (افزایش پایداری خاکدانه، تخلخل و شاخص ساختمان خاک) در کاربری مرتع و همبستگی بالای این ویژگی‌ها با مقدار کربن آلی خاک (جدول ۴) ارتباط نزدیک افزایش ورودی کربن آلی خاک و کیفیت فیزیکی خاک را نشان می‌دهد (۶۷). کربوهیدرات‌های قابل استخراج همبستگی بالایی با شناسه‌های مرتبط با کیفیت ساختمانی خاک از جمله شاخص ساختمان خاک، ویژگی‌های مرتبط با تخلخل خاک و خاکدانه‌سازی داشتند (جدول ۴). این ارتباط با ویژگی‌های فیزیکی

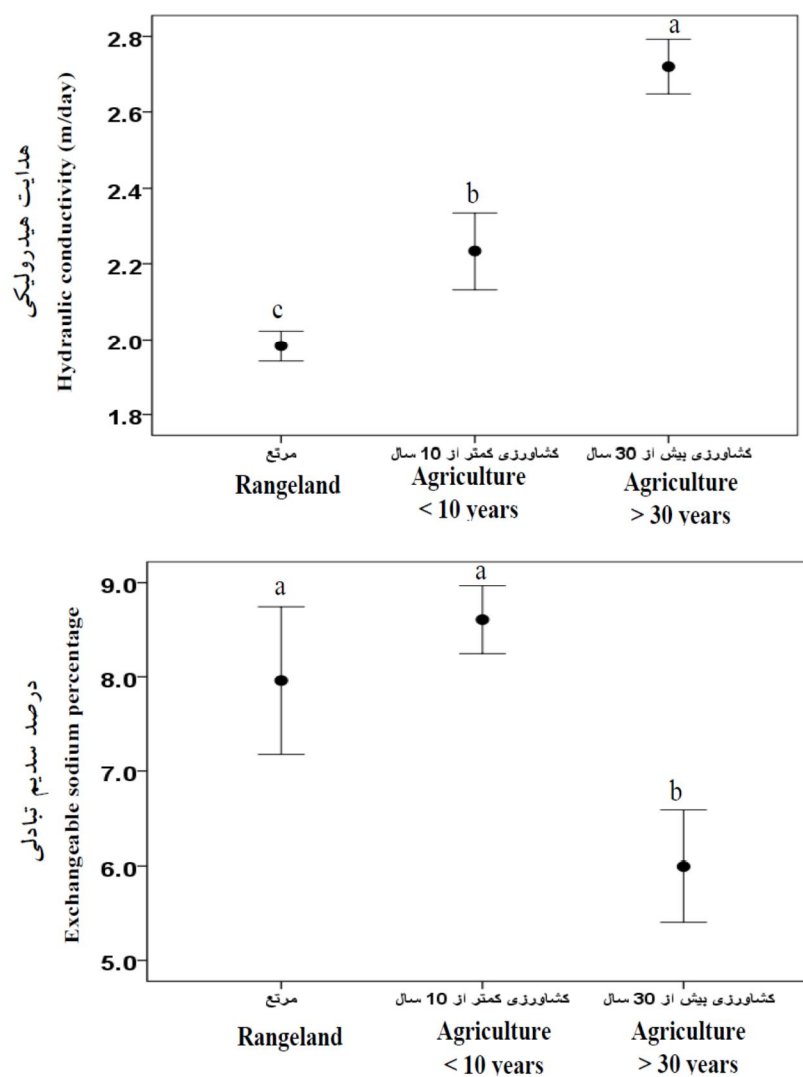
جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های ارزیابی شده در خاک بین کاربری‌ها و عمق‌های مختلف.

Table 3. Results of mean comparisons of assessed soil properties among different land uses and depths of soil.

کاربری اراضی Land use	عمق Depth	میانگین هندسی قطر خاکدانه GMD	تخلخل کل TP	تخلخل درشت MP	ظرفیت تهویه‌ای AC	رطوبت ظرفیت زراعی FC	پایداری ساختمان خاک SSI
واحد Unit	cm	mm	%	%	%	%	%
مرتع Rangeland	0-15	1.67 ^b	51.30 ^a	27.60 ^a	38.68 ^a	12.32 ^d	8.12 ^a
	15-30	1.92 ^a	48.57 ^{bc}	25.26 ^b	35.51 ^b	13.25 ^c	4.16 ^b
کشاورزی کم‌تر از ۱۰ سال Agriculture < 10 years	0-15	1.13 ^d	39.80 ^e	18.30 ^d	22.98 ^f	14.80 ^{ab}	2.61 ^c
	15-30	1.33 ^c	43.24 ^d	19.05 ^{cd}	27.20 ^e	14.12 ^b	2.64 ^c
کشاورزی بیش از ۳۰ سال Agriculture > 30 years	0-15	1.30 ^c	46.60 ^c	20.20 ^c	30.56 ^d	15.02 ^a	3.70 ^c
	15-30	1.33 ^c	49.55 ^{ab}	23.74 ^b	33.46 ^c	15.26 ^a	3.60 ^c
کاربری اراضی Land use	عمق Depth	کربن آلی OC	هدایت الکتریکی EC	شن Sand	سیلت Silt	کربوهیدرات محلول در اسید Car-A	کربوهیدرات محلول در آب Car-W
واحد Unit	cm	%	μs	%	%	mg/1g soil	mg/1g soil
مرتع Rangeland	0-15	2.06 ^a	285.00 ^c	56.28 ^{ab}	26.18 ^{bc}	37.65 ^a	5.89 ^a
	15-30	1.10 ^b	393.33 ^b	54.41 ^c	28.32 ^a	28.28 ^b	3.55 ^b
کشاورزی کم‌تر از ۱۰ سال Agriculture < 10 years	0-15	0.69 ^d	454.00 ^b	54.85 ^{bc}	27.82 ^{ab}	10.64 ^c	2.08 ^c
	15-30	0.66 ^d	228.67 ^c	56.88 ^a	25.38 ^c	9.52 ^c	2.10 ^c
کشاورزی بیش از ۳۰ سال Agriculture > 30 years	0-15	0.96 ^c	542.67 ^a	55.26 ^{bc}	25.90 ^c	8.10 ^c	3.66 ^b
	15-30	0.96 ^c	224.33 ^c	54.20 ^c	28.20 ^a	9.06 ^c	2.41 ^c

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD ($P < 0.05$) می‌باشد

Different letters in each column indicate significant differences according to LSD post hoc test ($P < 0.05$). GMD: Geometric mean diameter; TP: Total porosity; MP: Macro porosity; AP: Air capacity; FC: Field capacity; SSI: Soil structural index; EC: electric conductivity; Car-A: Carbohydrate extracted by acid; Car-W: Carbohydrate extracted by hot water

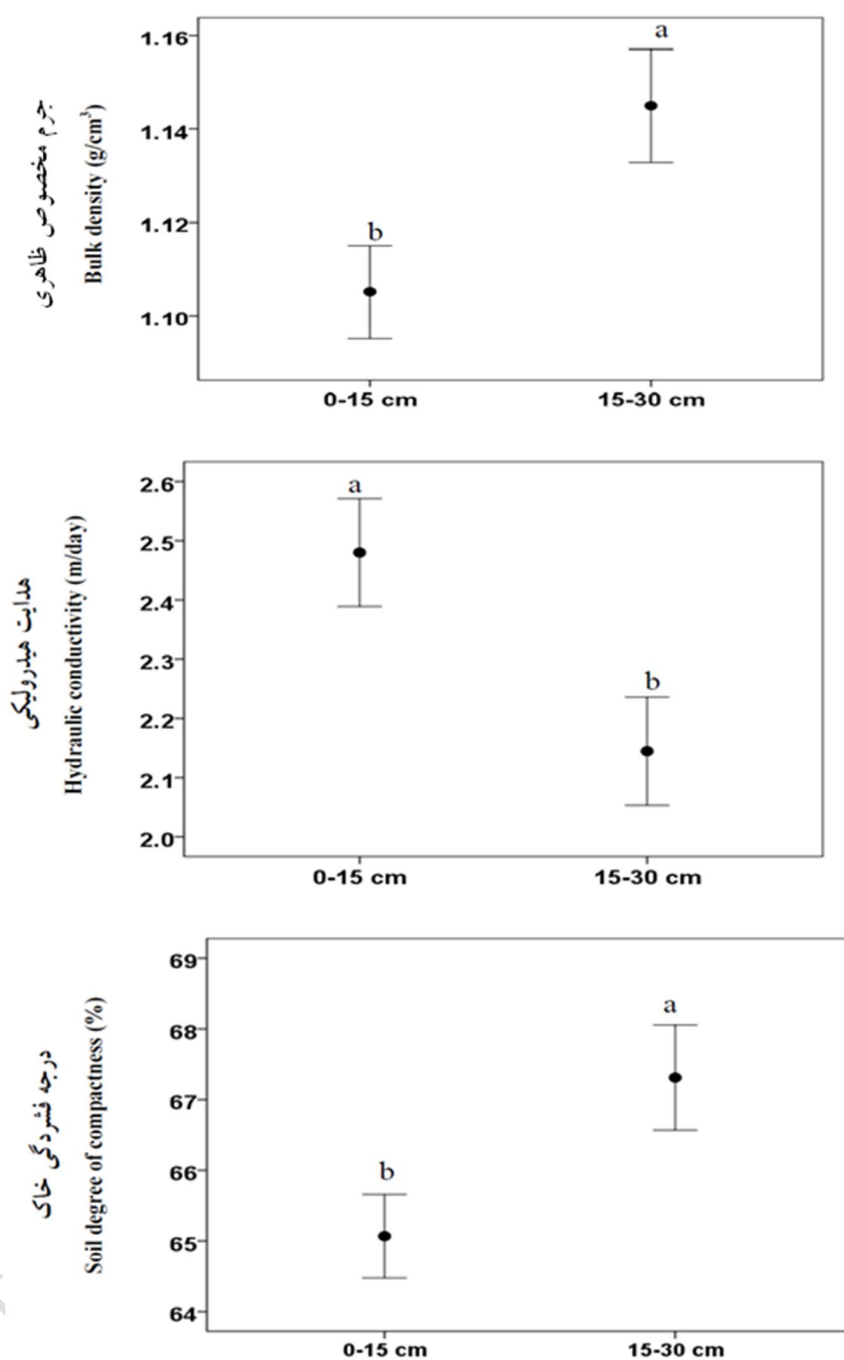


شکل ۲- اثر کاربری‌های مختلف بر هدایت هیدرولیکی اشباع و درصد سدیم تبادلی.

حروف انگلیسی متفاوت در هر نمودار نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ می‌باشد.

Figure 2. The effect of land uses on the saturated hydraulic conductivity and the percentage of exchangeable sodium.

Different letters indicate significant differences according to the LSD test ($P < 0.05$).



شکل ۳- اثر عمق خاک بر چگالی ظاهری، هدایت هیدرولیکی اشباع و درجه فشردگی خاک.

حروف انگلیسی متفاوت در هر نمودار نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ می‌باشد.

Figure 3. The effect of soil depths on the bulk density, saturated hydraulic conductivity, and soil compaction degree.

Different letters indicate significant differences according to the LSD test ($P < 0.05$).

بنابراین تغییراتی که در کاربری اراضی، در جهت کاهش ورود کربن و افزایش آشفستگی خاک صورت می‌گیرد، تشکیل، استحکام و پایداری خاکدانه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج نشان داد که با تغییر کاربری اراضی از مرتع به کشاورزی مقدار کربن آلی کاهش، ساختمان خاک تخریب و مقدار تخلخل کل و درشت خاک، ظرفیت تهویه‌ای و شرایط ذخیره رطوبتی خاک کاهش یافته است (جدول ۳ و شکل ۲). این تخریب شرایط فیزیکی در مدت زمان کوتاهی از تغییر کاربری (کشت کم‌تر از ۱۰ سال) بارزتر است. هر چند تغییر کاربری به کشاورزی باعث تخریب کیفیت فیزیکی خاک نسبت به کاربری مرتع شده است اما انجام عملیات کشاورزی در بلندمدت (کشت بیش از ۳۰ سال) باعث بهبود نسبی شرایط خاک در مقایسه با تغییر کاربری کم‌تر از ۱۰ سال شده است. در تأیید این یافته‌ها نتایج پژوهش انجام شده توسط چیلیک و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که درصد تخلخل کل خاک و چگالی ظاهری خاک پس از تغییر کاربری اراضی در کوتاه‌مدت کاهش یافته اما با افزایش مدت زمان کشت پس از تغییر کاربری تخریب خاک روندی معکوس نسبت کشت‌های با سن کم داشته و باعث ارتقاء شرایط ساختمانی خاک شده است (۷۰). مطالعات انجام شده نشان داده است که شرایط خاک بعد از هر آشفستگی در سامانه‌های زیستی طی یک دوره مشخص (زمان بازیابی) تا یک شرایط پایدار ارتقا می‌یابد (۷). ویژگی‌ها و شرایط خاک در حالت پایدار به تاب‌آوری خاک بستگی دارد. تاب‌آوری از سازوکارهای پایداری در خاک است و ظرفیت خاک برای بهبود عملکرد آن بعد از آشفستگی در سامانه زیستی را نشان می‌دهد (۷۱). عوامل متعددی بر تاب‌آوری خاک در هر سامانه زیستی تأثیرگذار است از جمله پستی و بلندی سامانه، پوشش

گیاهی، مدیریت و کاربری اراضی، مواد مادری و اقلیم (۷۲). بنابراین بهبود نسبی شرایط خاک در تغییر کاربری بیش از ۳۰ سال می‌تواند در ارتباط با زمان بازیابی و تاب‌آوری خاک‌های منطقه مورد مطالعه باشد. تعیین زمان دقیق بازیابی شرایط خاک بعد از آشفستگی نیاز به مطالعات تکمیلی و طرح آزمایش‌های پیچیده‌تری در منطقه مورد مطالعه دارد. علاوه بر آن بهبود نسبی شرایط خاک در کشت بیش از ۳۰ سال در مقایسه با کشت کم‌تر از ۱۰ سال می‌تواند مرتبط با افزایش ورودی‌های کربن و افزایش توسعه ریشه گیاهان زراعی در اراضی کشاورزی باشد (۷۳) این افزایش نسبی کربن آلی خاک می‌تواند در ارتباط به روش‌های مدیریت اراضی کشاورزی از جمله روش خاکورزی، نوع کود و میزان کوددهی، آیش‌گذاری و تناوب کشت نیز مرتبط باشد (۷۴). مقدار ماده آلی خاک پس از تغییر کاربری به مقادیر نسبی ورودی و خروجی کربن در سامانه بستگی دارد. شرایط مناسب رشد گیاه در سامانه‌های کشاورزی باعث افزایش جذب فتوسنتزی کربن توسط گیاهان شده و در نتیجه بر مقدار ورود بقایای گیاهی به خاک تأثیر مثبت داشته (۷۵) و در نهایت می‌تواند باعث افزایش ذخیره کربن در خاک شود (۷۴). مطالعات قبلی نیز نشان داده‌اند طی دوره بازیابی سامانه زیستی معمولاً مقدار کربن خاک افزایش می‌یابد تا مقدار هدرروی کربن خاک در اثر آشفستگی ناشی از تغییر کاربری بهبود یافته و فعالیت‌های زیستی و چرخه عناصر غذایی ارتقا می‌یابد که می‌توان بر بهبود کیفیت فیزیکی خاک و ساختمان‌سازی خاک تأثیرگذار باشد (۷۲). به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییر کاربری مرتع به کشاورزی باعث کاهش کیفیت خاک در منطقه مورد مطالعه باشد. تعیین زمان دقیق بازیابی شرایط خاک بعد از آشفستگی نیاز به مطالعات تکمیلی و طرح

بهبود کیفیت فیزیکی خاک به منظور استفاده پایدار از منابع خاک تاکید می‌کند.

مؤثرترین شناسه‌های کیفیت فیزیکی خاک: خلاصه نتایج تحلیل تشخیص در جدول ۵ ارائه شده است. این نتایج نشان داد که تغییر کاربری بیش‌ترین تأثیر را بر ویژگی‌های میانگین هندسی قطر خاکدانه، تخلخل کل، ظرفیت تهویه‌ای خاک، شاخص پایداری ساختمان خاک، هدایت الکتریکی، کربوهیدرات‌های قابل استخراج با اسید و آب داشت. در تابع اول با ۶۲ درصد از واریانس کل داده‌ها، شاخص پایداری خاکدانه و کربوهیدرات محلول در آب بالاترین ضرایب تشخیص را در این تابع داشتند. در تابع دوم با ۲۱ درصد از واریانس کل داده‌ها، ویژگی‌های ظرفیت تهویه‌ای خاک، تخلخل کل و شاخص پایداری ساختمان بیش‌ترین ضرایب تشخیص را در این تابع داشتند و در تابع سوم با ۱۳ درصد از واریانس کل داده‌ها، کربوهیدرات قابل استخراج با اسید بیش‌ترین ضرایب تشخیص را در این تابع داشت. نتایج تجزیه تشخیص به‌ترتیب ویژگی‌های شاخص پایداری ساختمان خاک، ظرفیت تهویه‌ای خاک و تخلخل کل خاک مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی و کربوهیدرات قابل‌استخراج با آب داغ و اسید را مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر شرایط خاک برای ارزیابی تأثیر تغییر کاربری بر کیفیت فیزیکی خاک تشخیص داده است (جدول ۵).

آزمایش‌های پیچیده‌تری در منطقه مورد مطالعه دارد. علاوه‌بر آن بهبود نسبی شرایط خاک در کشت بیش از ۳۰ سال در مقایسه با کشت کم‌تر از ۱۰ سال می‌تواند مرتبط با افزایش ورودی‌های کربن و افزایش توسعه ریشه گیاهان زراعی در اراضی کشاورزی باشد (۷۳). این افزایش نسبی کربن آلی خاک می‌تواند در ارتباط به روش‌های مدیریت اراضی کشاورزی از جمله روش خاکورزی، نوع کود و میزان کوددهی، آیش‌گذاری و تناوب کشت نیز مرتبط باشد (۷۴). مقدار ماده آلی خاک پس از تغییر کاربری به مقادیر نسبی ورودی و خروجی کربن در سامانه بستگی دارد. شرایط مناسب رشد گیاه در سامانه‌های کشاورزی باعث افزایش جذب فتوسنتزی کربن توسط گیاهان شده و در نتیجه بر مقدار ورود بقایای گیاهی به خاک تأثیر مثبت داشته (۷۵) و در نهایت می‌تواند باعث افزایش ذخیره کربن در خاک شود (۷۴). مطالعات قبلی نیز نشان داده‌اند طی دوره بازبانی سامانه زیستی معمولاً مقدار کربن خاک افزایش می‌یابد تا مقدار هدرروی کربن خاک در اثر آشفته‌گی ناشی از تغییر کاربری بهبود یافته و فعالیت‌های زیستی و چرخه عناصر غذایی ارتقا می‌یابد که می‌توان بر بهبود کیفیت فیزیکی خاک و ساختمان سازی خاک تأثیرگذار باشد (۷۲). به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییر کاربری مرتع به کشاورزی باعث کاهش کیفیت خاک در منطقه مورد مطالعه شده است و بر حفظ

جدول ۴- ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی های خاک.

Table 4. Pearson's correlation coefficients between soil properties.

	BD	GMD	Ks	TP	MP	AP	FC	SSI	SDC	OC	EC	pH	Na	ESP	Car-A	Car-W	Sand	Silt	Clay
BD	1.00																		
GMD	-0.06	1.00																	
Ks	-0.17	-0.61**	1.00																
TP	0.04	0.61**	-0.08	1.00															
MP	-0.09	0.76**	-0.36	0.86**	1.00														
AP	-0.13	0.73**	-0.28	0.88**	0.91**	1.00													
FC	0.26	-0.65**	0.59**	-0.35	-0.54**	-0.57**	1.00												
SSI	-0.21	0.54**	-0.23	0.72**	0.83**	0.79**	-0.67**	1.00											
SDC	0.99**	-0.08	-0.15	0.04	-0.10	-0.13	0.30	-0.21	1.00										
OC	-0.22	0.55**	-0.22	0.74**	0.85**	0.80**	-0.65**	0.99**	-0.22	1.00									
EC	-0.29	-0.09	0.42*	-0.33	-0.31	-0.30	0.19	-0.18	-0.26	-0.18	1.00								
pH	0.18	-0.06	0.19	-0.05	-0.20	-0.20	0.30	-0.29	0.14	-0.30	0.03	1.00							
Na	-0.19	-0.01	-0.32	-0.43*	-0.25	-0.33	-0.17	-0.13	-0.22	-0.15	0.14	0.25	1.00						
ESP	-0.39*	0.09	-0.35	-0.33	-0.13	-0.17	-0.33	0.02	-0.41*	0.00	0.15	0.17	0.93**	1.00					
Car-A	-0.21	0.79**	-0.58**	0.54**	0.80**	0.73**	-0.84**	0.83**	-0.23	0.83**	-0.11	-0.27	0.07	0.22	1.00				
Car-W	-0.29	0.53**	-0.17	0.63**	0.68**	0.74**	-0.70**	0.87**	-0.30	0.87**	0.02	-0.09	-0.05	0.12	0.80**	1.00			
Sand	0.16	-0.04	-0.21	-0.11	-0.12	-0.10	-0.36*	0.17	0.15	0.12	-0.04	0.02	0.27	0.27	0.12	0.18	1.00		
Silt	-0.17	0.14	0.08	0.12	0.17	0.10	0.08	-0.11	-0.24	-0.06	-0.15	0.17	-0.04	-0.06	0.02	-0.09	-0.71**	1.00	
Clay	0.05	-0.16	0.13	-0.04	-0.10	-0.03	0.30	-0.05	0.18	-0.04	0.25	-0.27	-0.24	-0.22	-0.17	-0.09	-0.13	-0.59**	1.00

** و * به ترتیب همبستگی معنی دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ را نشان می دهد.

توصیف علائم و نمادها همانند جدول ۱ است

** and * indicate significant correlations at 1% and 5% probability levels, respectively
The description of signs and symbols is the same as in Table 1

جدول ۵- نتایج تجزیه تشخیص.

Table 5. Discriminant analysis results.

P Value	Chi-square	Wilks' Lambda	واریانس تجمعی Cumulative Variance %	واریانس Variance%	مقدار خاص Eigenvalue	تابع Function
0.000	320.6	0.000	62.1	62.1	115.50	1
0.000	215.9	0.000	83.4	21.3	39.66	2
0.000	134.4	0.002	96.0	12.6	23.39	3
0.000	64.1	0.054	99.1	3.1	5.74	4
0.000	22.2	0.365	100.0	0.9	1.74	5

ضرایب تفکیک Discriminant Coefficients			ویژگی های انتخاب شده خاک Selected soil properties
تابع ۱ Function 1	تابع ۱ Function 1	تابع ۱ Function 1	
-0.27	0.59	0.61	میانگین هندسی قطر خاکدانه GMD
-0.34	1.18	-0.68	تخلخل کل TP
0.09	<u>1.19</u>	0.75	ظرفیت تهویه ای خاک AP
0.75	-1.15	<u>1.19</u>	شاخص پایداری ساختمان خاک SSI
1.09	1.06	0.11	هدایت الکتریکی EC
<u>-1.27</u>	-0.68	-0.61	کربوهیدرات قابل استخراج با اسید Car-A
0.91	0.11	1.18	کربوهیدرات قابل استخراج با آب داغ Car-W

توصیف علائم و نمادها همانند جدول ۲ است

The description of signs and symbols is the same as in Table 2

نتیجه گیری کلی

تغییر کاربری مرتع به دیمزار در منطقه مورد مطالعه بر بسیاری از ویژگی های خاک از جمله میانگین هندسی قطر خاکدانه، رطوبت ظرفیت زراعی، تخلخل کل، تخلخل درشت، ظرفیت تهویه ای خاک، شاخص پایداری ساختمان خاک، کربن آلی خاک، هدایت الکتریکی و کربوهیدرات های قابل استخراج خاک تأثیرگذار بود. کربن آلی خاک و کربوهیدرات های قابل استخراج همبستگی بالایی با بسیاری از

ویژگی های مرتبط با کیفیت فیزیکی خاک از جمله تخلخل کل و درشت خاک، ظرفیت تهویه ای و رطوبتی خاک و شاخص ساختمان خاک داشتند که نشان دهنده ارتباط نزدیک کیفیت فیزیکی خاک با تغییر مقدار ماده آلی خاک در اثر تغییر کاربری است. ویژگی های کربوهیدرات قابل استخراج، ظرفیت تهویه ای خاک، تخلخل کل و شاخص پایداری ساختمان خاک به عنوان مهم ترین ویژگی های خاک جهت ارزیابی تأثیر تغییر کاربری مرتع به کشاورزی بر

جهت ارتقا کیفیت خاک بعد از تغییر کاربری مرتع به دیم اهمیت بسیار زیادی دارد. افزایش ذخیره کربن خاک یکی از مؤثرترین روش ارتقا تاب‌آوری خاک و بهبود شرایط فیزیکی خاک بعد از آشفته‌گی ناشی از تغییر کاربری در اراضی مرتعی مناطق نیمه‌خشک زنجان است. استفاده از خاکورزی حفاظتی، الگوی کشت مناسب و کنترل فرسایش خاک از جمله روش‌های مدیریتی است که می‌تواند باعث ارتقا تاب‌آوری و کاهش زمان بازیابی خاک‌های در منطقه مورد مطالعه شود.

شرایط خاک منطقه مورد مطالعه شناسایی شدند. تغییر کاربری مرتع به کشاورزی باعث تخریب شرایط فیزیکی خاک شده است که این تخریب در مدت زمان کوتاهی از تغییر کاربری (کشت کم‌تر از ۱۰ سال) شدیدتر است و مدیریت کشاورزی در بلندمدت (کشت بیش از ۳۰ سال) از طریق افزایش مقدار ماده آلی خاک می‌تواند باعث بهبود شاخص پایداری ساختمان، اندازه خاکدانه‌ها، تخلخل خاک و کاهش نسبی شدت تخریب خاک شود. این پژوهش نشان داد زمان بهبود شرایط خاک بعد از آشفته‌گی به‌عنوان مؤلفه اصلی تاب‌آوری خاک در تعیین راهبردهای مدیریتی

منابع

1. Karlen, D. L., Mausbach, M., Doran, J. W., Cline, R., Harris, R., & Schuman, G. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100100001x>.
2. Delelegn, Y. T., Purahong, W., Blazevic, A., Yitaferu, B., Wubet, T., Göransson, H., & Godbold, D. L. (2017). Changes in land use alter soil quality and aggregate stability in the highlands of northern Ethiopia. *Scientific Reports*, 7(1), 13602. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14128-y>.
3. Zhang, W., Li, X., Huang, W., Li, J., Ren, W., & Gao, Z. (2010). Comprehensive assessment methodology of soil quality under different land use conditions. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 26(12), 311-318. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002.6819.2010.12.053>.
4. Dong-wei, G., Gui-jin, M., Jia-qiang, L., Fan-jiang, Z., & Hui, W. (2009). Assessment of farmland soil quality under different utilization intensity in arid area. *Yingyong Shengtai Xuebao*, 2(4).
5. Xia, J., Ren, J., Zhang, S., Wang, Y., & Fang, Y. (2019). Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, China. *Geoderma*, 349, 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.032>.
6. Wang, Q., Zhang, L., Li, L., Bai, Y., Cao, J., & Han, X. (2009). Changes in carbon and nitrogen of Chernozem soil along a cultivation chronosequence in a semi-arid grassland. *European Journal of Soil Science*, 60(6), 916-923. <https://doi.org/10.1111/j.13652389.2009.01174.x>.
7. Lal, R., & Stewart, B. A. (2013). *Principles of sustainable soil management in agroecosystems*. CRC Press.
8. Yao, Y., Fu, B., Liu, Y., Li, Y., Wang, S., Zhan, T., Wang, Y., & Gao, D. (2022). Evaluation of ecosystem resilience to drought based on drought intensity and recovery time. *Agricultural and Forest Meteorology*, 314, 108809. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108809>.
9. Fu, Z., Li, D., Hararuk, O., Schwalm, C., Luo, Y., Yan, L., & Niu, S. (2017). Recovery time and state change of terrestrial carbon cycle after disturbance. *Environmental Research Letters*,

- 12(10), 104004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8a5c>.
10. Gao, J., Wang, Y., Zou, C., Xu, D., Lin, N., Wang, L., & Zhang, K. (2020). China's ecological conservation redline: A solution for future nature conservation. *Ambio*, 49, 1519-1529. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01307-6>.
11. Mele, P., Yunusa, I., Kingston, K., & Rab, M. (2003). Response of soil fertility indices to a short phase of Australian woody species, continuous annual crop rotations or a permanent pasture. *Soil and Tillage Research*, 72(1), 21-30. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00063-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00063-1).
12. Pérez-Suárez, M., Castellano, M. J., Kolka, R., Asbjornsen, H., & Helmers, M. (2014). Nitrogen and carbon dynamics in prairie vegetation strips across topographical gradients in mixed Central Iowa agroecosystems. *Agriculture, ecosystems & environment*, 188, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.01.023>.
13. Gomes, L., Simões, S. J., Dalla Nora, E. L., de Sousa-Neto, E. R., Forti, M. C., & Ometto, J. P. H. (2019). Agricultural expansion in the Brazilian Cerrado: Increased soil and nutrient losses and decreased agricultural productivity. *Land*, 8(1), 12. <https://doi.org/10.3390/land8010012>.
14. Dionizio, E. A., & Costa, M. H. (2019). Influence of land use and land cover on hydraulic and physical soil properties at the cerrado agricultural frontier. *Agriculture*, 9(1), 24. <https://doi.org/10.3390/agriculture9010024>.
15. Campos, R., Pires, G. F., & Costa, M. H. (2020). Soil carbon sequestration in rainfed and irrigated production systems in a new Brazilian agricultural frontier. *Agriculture*, 10(5), 156. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050156>.
16. Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>.
17. Li, X. G., Li, F. M., Zed, R., & Zhan, Z. Y. (2007). Soil physical properties and their relations to organic carbon pools as affected by land use in an alpine pastureland. *Geoderma*, 139(1-2), 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.006>.
18. Wu, R., & Tiessen, H. (2002). Effect of land use on soil degradation in alpine grassland soil, China. *Soil Science Society of America Journal*, 66(5) 1655-1648, <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1648>.
19. Wakindiki, I., Mainuri, Z. G., & Gichaba, M. (2006). Soil Use and Management Effects on Aggregate Stability and Hydraulic Conductivity Within River Njoro Watershed in Kenya. 18th World Congress of Soil Science: Philadelphia, PA.
20. Celik, I. (2005). Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil and Tillage Research*, 83(2), 270-277. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.001>.
21. Sonneveld, M., Backx, M., & Bouma, J. (2003). Simulation of soil water regimes including pedotransfer functions and land-use related preferential flow. *Geoderma*, 112(1-2), 97-110. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00298-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00298-7).
22. Yang, Z., Miao, P., Zheng, Y., & Guo, J. (2023). Impacts of Grazing on Vegetation and Soil Physicochemical Properties in Northern Yinshan Mountain Grasslands. *Sustainability*, 15(22), 16028. <https://doi.org/10.3390/su152216028>.
23. Raiesi, F., & Salek-Gilani, S. (2020). Development of a soil quality index for characterizing effects of land-use changes on degradation and ecological restoration of rangeland soils in a semi-arid ecosystem. *Land Degradation & Development*, 31(12), 1533-1544. <https://doi.org/10.1002/ldr.3553>.

24. Zornoza, R., Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Arcenegui, V., García-Orenes, F., Mataix-Beneyto, J., & Morugán, A. (2007). Evaluation of soil quality using multiple lineal regression based on physical, chemical and biochemical properties. *Science of the Total Environment*, 378(1-2), 233-237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.052>.
25. Shukla, M., Lal, R., & Ebinger, M. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*, 87(2), 194-204. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.011>.
26. Nosrati, K. (2013). Assessing soil quality indicator under different land use and soil erosion using multivariate statistical techniques. *Environmental monitoring and assessment*, 185, 2895-2907. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2758-y>.
27. Governorate, Z. P. (2014). Report of the Strategic Development Plan of Agricultural and Watershed of Zanjan Province Based on the Meetings of Agricultural and Water Governance Room. Planning and Budget Office, 11p. *Planning and Budget Office*. [In Persian]
28. Khasi, Z., Askari, M. S., Amanifar, S., & Moravej, K. (2024). Assessing soil structural quality as an indicator of productivity under semi-arid climate. *Soil and Tillage Research*, 236, 105945. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105945>.
29. Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 383-411. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>.
30. Klute, A. (1965). Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 9, 210-221. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c13>.
31. Gee, G. W., Bauder, J., & Klute, A. (1986). Methods of soil analysis, part 1, physical and mineralogical methods. *Soil Science Society of America, American Society of Agronomy*, 5. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>.
32. Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 635-662. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>.
33. Reichert, J. M., Brandt, A. A., Rodrigues, M. F., da Veiga, M., & Reinert, D. J. (2017). Is chiseling or inverting tillage required to improve mechanical and hydraulic properties of sandy clay loam soil under long-term no-tillage? *Geoderma*, 301, 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.012>.
34. Wienhold, B., Karlen, D., Andrews, S., & Stott, D. (2009). Protocol for Soil Management Assessment Framework (SMAF) soil indicator scoring curve development. *Renew Agric Food Syst*, 24, 260-266.
35. Dexter, A., Czyż, E., Richard, G., & Reszkowska, A. (2008). A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma*, 143(3-4), 243-253. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.11.010>.
36. White, R. E. (2005). *Principles and practice of soil science: the soil as a natural resource*. John Wiley & Sons.
37. Pieri, C. J. (2012). *Fertility of soils: a future for farming in the West African Savannah* (Vol. 10). Springer Science & Business Media.
38. Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R., & Håkansson, I. (2009). Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 102(2), 242-254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>.

39. Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1983). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 539-579. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>.
40. Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781420005271>.
41. Helmke, P. A., & Sparks, D. L. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods*, 5, 551-574. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c19>.
42. DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. T., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical chemistry*, 28(3), 350-356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>.
43. Sugiyama, M. (2007). Dimensionality reduction of multimodal labeled data by local fisher discriminant analysis. *Journal of machine learning research*, 8(5).
44. Huberty, C. J., & Olejnik, S. (2006). *Applied MANOVA and discriminant analysis*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/DOI:10.1002/047178947X>.
45. Targarsoltani, M. T., Gorji, M., Mohammadi, M. H., & Millan, H. (2014). Evaluation of models for description of wet aggregate size distribution from soils of different land uses. *Soil science and plant nutrition*, 60(2), 123-133. <https://doi.org/10.1080/00380768.2013.878642>.
46. Obalum, S., Watanabe, Y., Igwe, C., Obi, M., & Wakatsuki, T. (2012). Carbon stock in the solum of some coarse-textured soils under secondary forest, grassland fallow, and bare footpath in the derived savanna of south-eastern Nigeria. *Soil Research*, 50(2), 157-166. <https://doi.org/10.1071/SR11096>.
47. Campbell, C., Selles, F., Lafond, G., & Zentner, R. (2001). Adopting zero tillage management: Impact on soil C and N under long-term crop rotations in a thin Black Chernozem. *Canadian Journal of Soil Science*, 81(2), 139-148. <https://doi.org/10.4141/S00-035>.
48. Li, X. G., Wang, Z. F., Ma, Q. F., & Li, F. M. (2007). Crop cultivation and intensive grazing affect organic C pools and aggregate stability in arid grassland soil. *Soil and Tillage Research*, 95(1-2), 172-181. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.12.005>.
49. Branch, K. (2012). Land use Change Effects on Carbohydrate Fractions, Total and Particulate Organic Matter of Forest Soils in Central Zagros Mountains" Jaber Fallahzade and "Mohammad Ali Hajabbasi" Department of Soil Science, College of Agriculture, Islamic Azad University. *Journal of Applied Sciences*, 12(4), 387-392. <https://doi.org/10.3923/jas.2012.387.392>.
50. Bodhinayake, W., & Cheng Si, B. (2004). Near-saturated surface soil hydraulic properties under different land uses in the St Denis National Wildlife Area, Saskatchewan, Canada. *Hydrological processes*, 18(15), 2835-2850. <https://doi.org/10.1002/hyp.1497>.
51. Zolfaghari, A., & Hajabbasi, M. (2008). The effects of land use change on physical properties and water repellency of soils in Lordegan forest and Freidunshar pasture. *Water and Soil*, 22(2). <https://doi.org/10.22067/JSW.V0I22.1021>.
52. Dörner, J., Dec, D., Peng, X., & Horn, R. (2010). Effect of land use change on the dynamic behaviour of structural properties of an Andisol in southern Chile under saturated and unsaturated hydraulic conditions. *Geoderma*, 159(1-2), 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.07.011>.
53. Bolan, N., Hedley, M., & White, R. (1991). Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis

- on legume based pastures. *Plant and soil*, 134, 53-63. <https://doi.org/10.1007/BF00010717>.
54. Kabir, E. B., Bashari, H., Bassiri, M., & Mosaddeghi, M. R. (2020). Effects of land-use/cover change on soil hydraulic properties and pore characteristics in a semi-arid region of central Iran. *Soil and Tillage Research*, 197, 104478. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104478>.
55. Yang, Y., Wu, J., Zhao, S., Mao, Y., Zhang, J., Pan, X., He, F., & van der Ploeg, M. (2021). Impact of long-term sub-soiling tillage on soil porosity and soil physical properties in the soil profile. *Land Degradation & Development*, 32(10), 2892-2905. <https://doi.org/10.1002/ldr.3874>.
56. Ajami, M. (2007). Soil quality attributes micropedology and clay mineralogy as affected by land use change and geomorphic position on some loess-derived soils in eastern Golestan Province, Agh-Su watershed. *Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 191p. [In Persian]
57. Kelishadi, H., Mosaddeghi, M., Hajabbasi, M., & Ayoubi, S. (2014). Near-saturated soil hydraulic properties as influenced by land use management systems in Koohrang region of central Zagros, Iran. *Geoderma*, 213, 426-434. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.008>.
58. Gholami Leila, D. M., Nabi Elahi, K., & Junidi Jafari, H. (2016). The effect of land use change on some physical and chemical characteristics of soil (case study: Baneh) *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 5(3), 13-27. <https://sid.ir/paper/232115/en>. [In Persian]
59. Soares, W. A., Silva, S. R. d., & Lima, J. R. d. S. (2020). Land-use change effect on the hydro-dynamic characteristics of soil in the Brazilian semi-arid region. *Revista Ambiente & Água*, 15(2), e2368. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2368>.
60. Zhang, X., Neal, A. L., Crawford, J. W., Bacq-Labreuil, A., Akkari, E., & Rickard, W. (2021). The effects of long-term fertilizations on soil hydraulic properties vary with scales. *Journal of Hydrology*, 593, 125890. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125890>.
61. Robbins, C. W. (1984). Sodium adsorption ratio-exchangeable sodium percentage relationships in a high potassium saline-sodic soil. *Irrigation Science*, 5, 173-179. <https://doi.org/10.1007/BF00264606>.
62. Mukhopadhyay, S., Masto, R., Yadav, A., George, J., Ram, L., & Shukla, S. (2016). Soil quality index for evaluation of reclaimed coal mine spoil. *Science of the Total Environment*, 542, 540-550. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.035>.
63. Jabro, J. D., Iversen, W. M., Stevens, W. B., Evans, R. G., Mikha, M. M., & Allen, B. L. (2016). Physical and hydraulic properties of a sandy loam soil under zero, shallow and deep tillage practices. *Soil and Tillage Research*, 159, 67-72. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.002>.
64. Shaheb, M. R., Venkatesh, R., & Shearer, S. A. (2021). A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. *Journal of Biosystems Engineering*, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>.
65. Amézketa, E. (1999). Soil aggregate stability: a review. *Journal of sustainable agriculture*, 14(2-3), 83-151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08.
66. Zhu, G. Y., Shangguan, Z. P., & Deng, L. (2021). Variations in soil aggregate stability due to land use changes from agricultural land on the Loess Plateau, China. *Catena*, 200, 105181. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105181>.
67. Sarker, J. R., Singh, B. P., Cowie, A. L., Fang, Y., Collins, D., Badger, W., & Dalal, R. C. (2018). Agricultural management practices impacted carbon

- and nutrient concentrations in soil aggregates, with minimal influence on aggregate stability and total carbon and nutrient stocks in contrasting soils. *Soil and Tillage Research*, 178, 209-223. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.019>.
68. Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. John Wiley & Sons.
69. Zaher, H., Caron, J., & Ouaki, B. (2005). Modeling aggregate internal pressure evolution following immersion to quantify mechanisms of structural stability. *Soil Science Society of America Journal*, 69(1), 1-12. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0001>.
70. Celik, I., Gunal, H., Budak, M., & Akpinar, C. (2010). Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil conditions. *Geoderma*, 160(2), 236-243. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.028>.
71. Grandy, A. S., Fraterrigo, J. M., & Billings, S. A. (2012). Soil ecosystem resilience and recovery. *Soil ecology and ecosystem services*, 357-376.
72. Hirsch, P. R., Jhurrea, D., Williams, J. K., Murray, P. J., Scott, T., Misselbrook, T. H., Goulding, K. W., & Clark, I. M. (2017). Soil resilience and recovery: rapid community responses to management changes. *Plant and soil*, 412, 283-297. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3068-x>.
73. Czyż, E. A. (2004). Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. *Soil and Tillage Research*, 79(2), 153-166. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.004>.
74. Liu, Y., Li, C., Cai, G., Sauheitl, L., Xiao, M., Shibistova, O., Ge, T., & Guggenberger, G. (2023). Meta-analysis on the effects of types and levels of N, P and K fertilization on organic carbon in cropland soils. *Geoderma*, 437, 116580. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116580>.
75. Liu, Q., Xu, H., Mu, X., Zhao, G., Gao, P., & Sun, W. (2020). Effects of different fertilization regimes on crop yield and soil water use efficiency of millet and soybean. *Sustainability*, 12(10), 4125. <https://doi.org/10.3390/su12104125>.
76. Gholami, L., Davari, M., Nabiollahi, K., & Joneidi Jafari, H. (2016). Effect of land use changes on some soil physical and chemical properties (Case study: Baneh). *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 5(3), 13-27. [In Persian]

Uncorrected Proof