

Assessment of Soil Physical Quality in Different Management Systems of Rangelands in Zanjan Province

Abstract

The objective of this study is to analyze the influence of widely implemented management systems on soil physical quality indicators within the semi-arid rangelands of Zanjan Province. The study aims to contribute to the preservation and enhancement of soil productivity, as well as to prevent soil degradation. Sampling sites were selected across three distinct management systems including natural rangelands, livestock-prevented and reseeded rangelands, and afforested rangelands. 60 soil samples were randomly collected and properties related to soil physical quality were measured. Principal Component Analysis (PCA) and Discriminant Analysis (DA) were used to identify the most important soil indicators affected by management practices. The correlation analysis identified significant associations among soil physical properties, which have implications for soil structure, water dynamics, and the overall quality of soil physical characteristics. Soil macropores and bulk density were identified as the most critical indicators using PCA. Macropores, bulk density, geometric mean diameter of aggregates, and soil structure stability index were also identified as key properties affecting soil conditions using DA. Both multivariate methods yielded complementary insights into the assessment of soil physical quality. The findings suggest that conservation practices enhanced soil physical quality, with afforested rangelands exhibiting the highest quality. This was characterized by increased porosity, improved aggregation, and reduced soil compaction. This study contributes to a more comprehensive understanding of the interactions between management practices and the physical quality of soil in the semi-arid rangelands of Zanjan province.

Keywords: *Discriminant analysis, Multivariate analysis, Principal Component Analysis, Soil structure, Soil management.*

EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

Rangelands, as vital components of terrestrial ecosystems, play a critical role in biodiversity conservation, forage production, soil erosion control, and water resource preservation. In semi-arid environments like northwestern Iran, sustainable rangeland management is of paramount importance due to the region's limited water resources, susceptibility to soil degradation, and challenging climatic conditions. One of the most significant factors influencing rangeland health and sustainability is soil physical quality. Soil characteristics such as compaction, permeability, water-holding capacity, and soil structural stability directly affect rangeland ecosystem functions. Consequently, accurately assessing soil physical quality under different rangeland management practices is essential. The objectives of the present study were to investigate the impact of management systems on soil physical quality characteristics in semi-arid rangelands of Zanjan Province, Iran, to preserve and enhance soil productivity while preventing degradation, and identifying the most significant physical soil characteristics that influenced by management systems in the study area using multivariate analyses.

Materials and Methods:

The management systems Studied in This Research include: Rangelands under natural conditions with no conservation practices, Enclosure and seeding of rangelands and Afforestation in rangelands. In each management system studied, 20 composite soil samples were collected from a depth of 0-30 cm. In total, 60 soil samples were randomly collected from the three management systems (natural rangelands, enclosure and seeding of rangelands, and afforestation). The soil samples were transported to the laboratory, air-dried, and passed through a 2 mm sieve for physicochemical analyses. To identify the most significant soil

characteristics affected by the management systems in the study area, principal component analysis (PCA) and discriminant analysis (DA), were used. The normal distribution and homogeneity of variance of the data were checked using the Kolmogorov-Smirnov test and Levene's test. For comparing means, the least significant difference test was used at a probability level of 5% to assess soil quality across different management systems. The correlation between measured characteristics was analyzed using Pearson's correlation coefficient.

Results:

The results showed that rangeland management systems affect the evaluation of soil physical quality. The study revealed significant relationships between soil physical properties that can influence soil structure, water dynamics, and overall physical quality. Bulk density showed a negative correlation with total porosity ($r = -0.53$), macroporosity ($r = -0.56$), aeration capacity ($r = -0.58$), and field capacity ($r = -0.40$). The findings indicate that increased bulk density leads to reduced soil porosity, negatively impacting soil aeration, water retention, and root penetration. Among the analyzed soil properties, macroporosity and bulk density were identified as key indicators using principal component analysis, highlighting their central role in assessing soil physical quality in this ecosystem. The discriminant analysis results showed that macroporosity, bulk density, geometric mean diameter of soil aggregates, and soil aggregate stability index are the most important indicators affecting soil conditions for evaluating physical quality under the studied management systems. Implementing adaptive management approaches, including controlled grazing, seeding, and planting suitable species, can help maintain soil structure, prevent degradation, and increase the resilience of rangeland ecosystems in semi-arid environments. The principal component analysis and the inverse relationship between bulk density and porosity make bulk density a crucial variable influencing changes in soil physical quality. The discriminant analysis further supports this finding, showing that bulk density effectively distinguishes between rangeland management groups, as high values are often associated with soil degradation due to overgrazing or mechanical disturbances. The principal component analysis and discriminant analysis provide complementary perspectives for evaluating soil physical quality.

Conclusion:

This study highlights the significant impact of rangeland management methods on soil physical quality, emphasizing the role of key soil properties such as macroporosity, bulk density, particle size distribution, and soil aggregate stability index. Afforestation demonstrated the highest soil physical quality, characterized by increased porosity, improved soil aggregation, and reduced soil compaction. These research findings reinforce the importance of sustainable rangeland management approaches in maintaining soil structure and function, providing valuable guidance for land managers to balance fertility and ecological sustainability. Such studies can provide a scientific basis for managerial decision-making and sustainable policy-making aimed at preserving rangeland ecosystems and improving overall soil quality.

Author Contributions

Conceptualization, Shamkhani and Askari; methodology, Shamkhani; software analysis, Shamkhani and Askari; writing—original draft preparation, Shamkhani; review and editing, Askari and Alamdari; supervision, Askari and Vaezi.

Data Availability Statement

Data will be made available on request.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک در سامانه‌های مدیریتی مراتع استان زنجان

چکیده

هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر سامانه‌های مدیریتی متداول بر مشخصه‌های مرتبط با کیفیت فیزیکی خاک مراتع نیمه خشک استان زنجان با هدف حفظ و ارتقای توانایی تولید خاک و جلوگیری از تخریب آن می‌باشد. سایت‌های نمونه‌برداری در سه سامانه مدیریتی شامل مراتع با شرایط طبیعی، مراتع قرق و بذپاشی شده و مراتع نهال‌کاری شده انتخاب شد. ۶۰ نمونه خاک به صورت تصادفی تهیه و ویژگی‌های مرتبط با کیفیت فیزیکی خاک اندازه‌گیری شد. دو روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تحلیل تشخیص جهت شناسایی مهمترین ویژگی‌های خاک متأثر از سامانه‌های مدیریتی استفاده شد. بررسی ضرایب همبستگی نشان‌دهنده روابط معنی‌داری بین ویژگی‌های فیزیکی خاک است که می‌توانند بر ساختمان خاک، پویایی آب و کیفیت کلی فیزیکی خاک تأثیرگذار باشند. تخلخل درشت و جرم مخصوص ظاهری خاک به عنوان مهم‌ترین شناسه‌ها با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی شناسایی شدند. تخلخل درشت، جرم مخصوص ظاهری، میانگین هندسی قطر خاکدانه و شاخص پایداری ساختمان خاک نیز به عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر شرایط خاک با استفاده از تحلیل تشخیص شناسایی شدند. این دو تحلیل چند متغیره دیدگاه‌های مکملی را برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک ارائه داد. نتایج پژوهش نشان دارد اجرای روش‌های حفاظتی باعث افزایش کیفیت فیزیکی خاک در مراتع با اقلیم نیمه خشک شده است مراتع نهال‌کاری شده بالاترین کیفیت فیزیکی خاک را داشتند که با افزایش تخلخل، بهبود خاکدانه‌سازی و کاهش فشردگی خاک مشخص شد. این پژوهش می‌تواند به درک بهتر تأثیرات متقابل بین فعالیت‌های مدیریتی و کیفیت فیزیکی خاک در مراتع مناطق نیمه خشک استان زنجان کمک کند.

واژگان کلیدی: تحلیل تشخیص، تحلیل چند متغیره، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، ساختمان خاک، مدیریت خاک

مقدمه

مراتع به عنوان یکی از منابع حیاتی در اکوسیستم‌های خشکی نقش مهمی در حفظ تنوع زیستی، تولید علوفه، کنترل فرسایش خاک و حفظ منابع آب دارند (Guo & Chen, 2024)، در زیست‌محیط‌های نیمه خشک به مانند شمال غرب ایران، مدیریت پایدار مراتع، به دلیل محدودیت منابع آبی منطقه، حساسیت به تخریب خاک و شرایط اقلیمی دشوار، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (Nehrani et al., 2020). در بسیاری از مناطق نیمه‌خشک، به ویژه استان زنجان در ایران، مراتع با چالش‌های متعددی از جمله کاهش پوشش گیاهی، فرسایش خاک و کاهش کیفیت خاک مواجه هستند. این مشکلات، عمدتاً ناشی از مدیریت نادرست مراتع و بهره‌برداری بی‌رویه از آن‌ها است. مدیریت پایدار مراتع می‌تواند سبب بهبود کیفیت خاک، افزایش بهره‌وری و عملکرد بوم‌سامانه‌های مرتعی گردد و امنیت منابع طبیعی را تضمین کند، یکی از مهمترین عواملی که بر سلامت و پایداری مراتع تأثیر می‌گذارد، کیفیت فیزیکی خاک است. ویژگی‌های فیزیکی خاک، نظیر تراکم، نفوذپذیری، ظرفیت نگهداری آب و پایداری ساختمان خاک، به طور مستقیم بر عملکرد اکوسیستم مراتع اثرگذار است. از این رو، ارزیابی دقیق کیفیت فیزیکی خاک تحت تأثیر روش‌های مدیریتی مختلف مراتع امری ضروری به شمار می‌رود (Nehrani et al., 2020). ویژگی‌های فیزیکی خاک در مراتع تحت تأثیر عوامل مختلف طبیعی و انسانی قرار می‌گیرد که می‌تواند باعث تخریب یا ارتقاء سلامت خاک شود. سلامت خاک برای پایداری

بوم‌سامانه، رشد گیاهان و تنظیم چرخه‌ی آبی مراتع، به ویژه در زیست‌محیط‌های حساس و شکننده مانند مناطق نیمه خشک، حیاتی است (Williams, 2024). خاک‌های مراتع علاوه بر نقش آن‌ها به عنوان ذخایر کربن، فعالانه در تأمین بسیاری از خدمات سامانه‌های زیستی، مشارکت دارند (Solascasas et al., 2024). در حال حاضر نقش پراهمیت مراتع در ترسیب کربن تحت تهدیدهای ناشی از تخریب گسترده و شایع این زیست‌بوم‌ها قرار دارد (Bardgett et al., 2021). چرای بی‌رویه دام یکی از عوامل مهم و اساسی تخریب خاک در مراتع است. که باعث فشردگی خاک، کاهش تخلخل خاک می‌شود همچنین باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک شده که در نتیجه باعث کاهش نفوذ آب و ریشه در خاک می‌شود. چرای بی‌رویه دام باعث حذف پوشش گیاهی سطحی خاک شده و خاک را در معرض فرسایش آبی و بادی قرار می‌دهد (Donovan & Monaghan, 2021). تخریب ناشی از چرای بیش از حد دام در مراتع خشک جهان، نگرانی قابل توجهی را برای این زیست‌بوم و انسان‌هایی که به استفاده پایدار از آن متکی هستند به وجود آورده است (Retallack et al., 2024). در پژوهشی که در سال ۲۰۲۴ بر روی اثرات چرای (سبک، متوسط و شدید) در میزان سرعت تنفس بوم‌سامانه مراتع و علف‌زارهای مناطق کوهستانی فلات تبت انجام شد مشخص شد که چرای متوسط نسبت به دو حالت دیگر چراء، در میزان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن و گرمایش جهانی مؤثرتر می‌باشد (Mao et al., 2025). مطالعات بسیار زیادی گواه بر این ادعا است که چرای بیش از حد دام منجر به تخریب شدید مراتع، هدررفت کنترل نشده زیستگاه‌ها و تنوع زیستی، افزایش فرسایش خاک و تهدیدات جدی که عدم تعادل بوم‌سامانه گیاه-خاک-دام و تولیدات علف‌زارها را در پی دارد گردیده است (Chai et al., 2022; Filazzola et al., 2020). فرسایش خاک سطحی توسط آب و باد به واسطه عملیات مدیریتی ضعیف به مانند چرای بیش از حد یا استفاده نامناسب از زمین تسریع می‌شود (Jiahui et al., 2024). تغییر در الگوهای دمایی و بارش می‌تواند باعث افزایش تخریب خاک مراتع، به ویژه در مناطق نیمه خشک شود. خشک‌سالی‌های مکرر و رخداد‌های شدید بارندگی می‌تواند منجر به فرسایش خاک سطحی و هدررفت رطوبت خاک شود (Jiahui et al., 2024). چرای متناوب و چرخشی، کاهش سرعت چراء و دوره‌های چرای کنترل شده، به خاک و پوشش گیاهی این اجازه را می‌دهد تا احیاء شده و از فشردگی خاک جلوگیری کند. کاشت علف‌های بومی، درختچه‌ها و سایر گیاهان به تثبیت خاک، کاهش فرسایش و افزایش مواد آلی خاک کمک می‌کند. پوشش گیاهی به عنوان سپر محافظی عمل کرده، فرسایش بادی و آبی را کاهش می‌دهد، و باعث پایداری ساختمان خاک می‌شود و همچنین باعث تجمع مواد آلی در خاک می‌گردد (Gu et al., 2022). استقرار درختان در مراتع می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی خاک را با افزایش نفوذ ریشه، کاهش فرسایش و افزایش مواد آلی بهبود بخشد. درختان همچنین می‌توانند به ترسیب کربن و نگه‌داشت رطوبت در خاک کمک کنند. روش‌هایی به مانند ساخت سدهای کوچک، مالچ پاشی و استفاده از آبیاری قطره‌ای به مدیریت قابلیت دسترسی آب و کاهش تبخیر در مراتع کمک می‌کند. بهبود رطوبت خاک، کارایی بهتر مصرف آب و کاهش فرسایش خاک، به ویژه در آب و هوای نیمه خشک که پای بحران کمبود آب در میان است امری حیاتی و ضروری به نظر می‌رسد (Gu et al., 2022; Guo & Chen, 2024).

مدیریت پایدار مرتع برای حفظ سلامت خاک، که پایه و اساس بوم‌سامانه‌های مولد در محیط‌های نیمه‌خشک هستند، ضروری است. سامانه‌های مختلف مدیریتی مرتع، تأثیرات عمیقی بر کیفیت فیزیکی خاک می‌گذارند و عواملی مانند ساختمان خاک، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل و ظرفیت نفوذ آب در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Guo & Chen, 2024; Williams, 2024). وسعت مراتع ایران، ۹۰ میلیون هکتار گزارش شده است که شامل مراتع علفی خوب ۱۴ میلیون هکتار، مراتع متوسط ۶۰ میلیون هکتار و مراتع بوته‌زار و فقیر ۱۶ میلیون هکتار برآورد شده است، اما در سال‌های اخیر از کیفیت مراتع به شدت کاسته شده و آمارها نشان می‌دهند که ۵۰ درصد از مراتع به دلایل مختلف اعم از فرسایش خاک، چرای بی‌رویه دام، آتش‌سوزی و تغییر کاربری زمین، کیفیت زیست‌محیطی خود را از دست داده‌اند (Masoumi Tabar Zanjani et al., 2024; Moameri et al., 2024; Nael et al., 2024). از روش‌های مهم مدیریتی و عملیات اصلاحی مؤثر در اصلاح و احیاء مراتع می‌توان به چرای مدیریت شده، انجام عملیات اصلاحی و قرق اراضی مرتعی، پروژه‌های بذرکاری، بوته‌کاری، کپه‌کاری، احداث بانکت و کودپاشی اشاره کرد (Al-Jashaami et al., 2024).

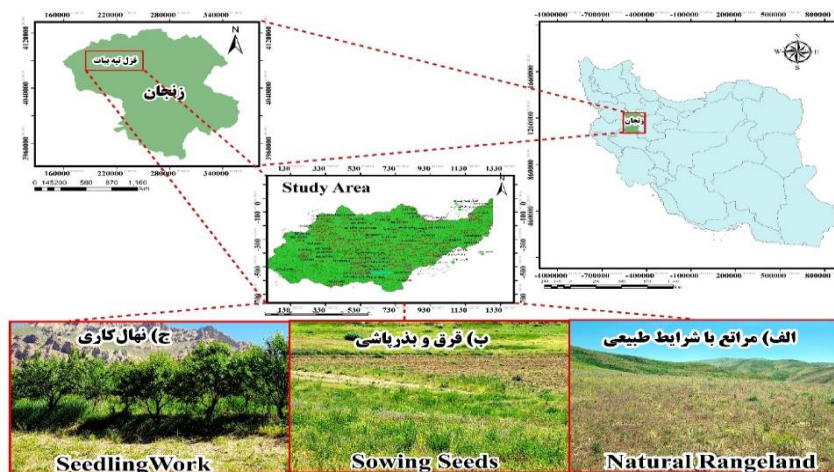
al., 2024). در حال حاضر روش‌های مدیریتی متفاوتی به منظور ارتقاء کیفیت و جلوگیری از تخریب خاک مراتع در مناطق نیمه‌خشک ایران توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری و مدیران اراضی استفاده می‌شود از جمله بذرکاری، نهال‌کاری و قرق مراتع. هر یک از این سامانه‌ها به روش‌های متمایزی بر شرایط خاک تاثیر گذاشته و ویژگی‌های فیزیکی آن را تغییر می‌دهند، که به نوبه خود بر باروری بلندمدت زمین و پایداری بوم‌شناختی آن تأثیر می‌گذارند. با این حال، اثرات ویژه این روش‌های مدیریتی بر کیفیت خاک در مراتع مناطق نیمه‌خشک به طور کافی بررسی نشده است (Askari & Holden, 2014; Williams, 2024). تاکنون پژوهش‌های جامعی در ارتباط با میزان اثربخشی روش‌های پیشنهادشده بر میزان ارتقاء کیفیت فیزیکی خاک مراتع در استان زنجان انجام نشده است. درک چگونگی واکنش این عوامل به شیوه‌های مدیریتی مختلف برای ارتقاء مدیریت پایدار اراضی و جلوگیری از تخریب خاک در مناطق نیمه خشک حیاتی است. با این حال، شکاف علمی در درک جامع از چگونگی تأثیر این عملیات مدیریتی، به ویژه نهال‌کاری و ممانعت از چراء، بر ویژگی‌های فیزیکی خاک در مراتع نیمه خشک وجود دارد. این پژوهش با ارزیابی سامانه‌های مدیریتی در اقلیم نیمه‌خشک شمال غرب ایران، به دنبال ارائه راه‌بردهای مناسب در مورد نقش مدیریت مرتع در حفظ کیفیت خاک و تضمین پایداری بلندمدت این اکوسیستم‌های حساس است. اهداف این پژوهش عبارتند از: ۱- بررسی تأثیر سامانه‌های مدیریتی بر مشخصه‌های مرتبط با کیفیت فیزیکی خاک مراتع نیمه خشک استان زنجان با هدف حفظ و ارتقای توانایی تولید خاک و جلوگیری از تخریب آن، ۲- شناسایی مهمترین ویژگی‌های فیزیکی خاک متأثر از سامانه‌های مدیریتی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از تحلیل‌های چند متغیره.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه‌ی مورد مطالعه

این پژوهش در سطح بخشی از اراضی مرتعی حوزه آبخیز قزل‌تپه واقع در غرب شهرستان زنجان که در موقعیت جغرافیایی $48^{\circ} 5' 9''$ تا $48^{\circ} 7' 59''$ طول شرقی و $36^{\circ} 41' 7''$ تا $36^{\circ} 42' 36''$ عرض شمالی انجام شد (شکل ۱). حوزه قزل تپه یکی از زیرحوزه‌های حوزه آبخیز قزل اوزن (سفید رود) بوده و مساحت آن ۹۱۵۶ هکتار است. این منطقه در فاصله ۲۰ کیلومتری جنوب غربی شهر زنجان واقع شده است و ارتفاع آن به طور متوسط بین ۱۴۳۹ تا ۲۷۵۵ متر از سطح دریا متغیر است، عمده سطح آن را نهشته‌ها و واحدهای چینه شناسی پرکامبرین - پالئوزوئیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک پوشانیده است. اقلیم محدوده مطالعاتی بر اساس روش دومارتن نیمه خشک تعیین شده است. متوسط بارندگی سالیانه آن ۳۵۹/۸ میلی‌متر، میانگین دمای سالیانه ۸/۵ سانتی‌گراد، دمای متوسط حداکثر و دمای متوسط حداقل آن نیز به ترتیب ۱۵ و ۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. کاربری کنونی اراضی حوزه آبخیز مورد مطالعه شامل اراضی بایر، مرتع، زراعت آبی و باغات در دامنه مشرف به دره‌ها و تپه ماهورها و زراعت دیم می‌باشد. جهت بهبود ترکیب تنوع گیاهی حوزه قزل تپه، عملیات بیولوژیک اصلاح و احیاء مراتع که در منطقه صورت گرفته است، شامل بذرپاشی و قرق در ۲۶۷۸ هکتار از مراتع و نهال‌کاری (با استفاده از نهال‌های بادام، زیتون و صنوبر) در ۱۲۴۹ هکتار از مراتع می‌باشد. به‌منظور کاهش تأثیر عوامل فیزیوگرافی نوع پوشش گیاهی و افزایش همگنی بین سایت‌های مورد مطالعه، داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز برای انتخاب پایگاه‌های نمونه‌برداری با استفاده از روش‌های ترکیبی گردآوری شد. این اطلاعات شامل مشاهدات میدانی، مصاحبه با دامداران، کشاورزان، بهره‌برداران و مدیران محلی و همچنین بررسی نقشه‌ها و داده‌های موجود در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان زنجان بوده است. پایگاه‌های نمونه‌برداری در مراتع قزل تپه استان زنجان و بر اساس شباهت در ویژگی‌های خاک‌شناسی (نوع خاک: اینسپتی‌سول، کلاس بافت خاک: لوم شنی)، زمین‌شناسی، توپوگرافی (شیب ۱۲ تا ۲۰ درصد)، و پوشش گیاهی اولیه انتخاب شدند. نمونه‌برداری در واحدهای هم‌مرز صورت گرفت که پیش از اعمال مدیریت، از نظر شرایط فیزیوگرافی، ویژگی‌های ذاتی خاک و ترکیب پوشش گیاهی، کاملاً همگن و قابل مقایسه بودند. به‌منظور کاهش ناهمگنی فضایی و حذف اثر عواملی که باعث اختلال در تحلیل داده‌ها و تفسیر نتایج می‌شود، منطقه مطالعه با دقت انتخاب شده است، به‌گونه‌ای که تا حد امکان تفاوت بین سایت‌ها به نوع مدیریت اعمال‌شده محدود می‌شود و نمونه‌برداری در

هر سامانه مدیریتی به صورت تصادفی و با پوشش کافی از سطح منطقه انجام شد تا نماینده مناسبی از شرایط درون سایت‌های نمونه برداری به دست آید. سامانه‌های مدیریتی مورد مطالعه در این پژوهش شامل ۱. مراتع با شرایط طبیعی و عدم انجام عملیات حفاظتی، ۲. قرق و بذریاشی مراتع، ۳. نهال کاری در مراتع می‌باشد. عملیات قرق با احداث موانع در اطراف اراضی به مدت ۵ سال اجرا شد و نهال کاری منطقه در سال ۱۳۹۱ انجام شده است و نهال‌ها در سه سال اول کشت تحت مراقبت و آبیاری قرار داشته‌اند.



شکل ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه.

نمونه برداری خاک و آماده سازی نمونه ها

برای اجرای این پژوهش، در فصل بهار سال ۱۴۰۲ نمونه برداری از خاک منطقه به روش کاملاً تصادفی انجام شد. در هر سامانه مدیریتی مورد مطالعه، تعداد ۲۰ نمونه خاک از عمق ۰-۲۰ سانتیمتری به صورت نمونه مرکب و در مجموع از سه سامانه مدیریتی (مراتع با شرایط طبیعی و عدم انجام عملیات حفاظتی، قرق و بذریاشی مراتع و نهال کاری)، ۶۰ نمونه خاک به صورت تصادفی برداشت گردید. برای تعیین جرم مخصوص ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع و ویژگی‌های مرتبط با منحنی رطوبتی خاک و منافذ خاک، نمونه‌های خاک دست نخورده نیز با استفاده از سیلندر برداشت شد. برای اندازه گیری پایداری خاک دانه، نمونه‌های خاک دانه در ظروف پلاستیکی جمع آوری گردید. نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل شدند و در هوای آزاد خشک و از الک ۲ میلی متری جهت انجام آزمایشات فیزیکوشیمیایی خاک عبور داده شدند.

تعیین ویژگی های خاک

بافت خاک و درصد نسبی ذرات سیلت، شن و رس به روش هیدرومتری تعیین گردید (Nelson & Sommers, 1982). جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه های فلزی (Grossman & Reinsch, 2002; Hesse & Hesse, 1971)، پایداری خاک دانه به روش الک تر در سری الک های استاندارد ۶/۳۵، ۴/۷۵، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۰۶ میلی متر اندازه گیری شد و میانگین هندسی قطر خاک دانه های پایدار در آب با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید (Kemper & Rosenau, 1986; Nath & Rattan, 2017).

$$\text{GMD} = \text{EXP} \left(\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \times \ln x_i)}{\sum w_i} \right) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن GMD میانگین هندسی قطر خاک دانه، w_i وزن خاک دانه های روی هر الک، x_i میانگین قطر خاک دانه های باقی مانده روی هر الک و n ، تعداد الک می باشد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از روش بار ثابت در نمونه های خاک دست نخورده

¹ Geometric mean diameter

تعیین و درصد رطوبت اشباع نمونه‌های خاک به صورت وزنی تعیین شد (Gardner, 1986). تخلخل کل نمونه‌های خاک با استفاده از مقدار رطوبت خاک در شرایط اشباع (رطوبت در مکش صفر) محاسبه شد (Klute & Dirksen, 1986). ظرفیت‌های رطوبتی خاک به کمک دستگاه صفحه فشاری اندازه‌گیری شد و رطوبت خاک در شرایط اشباع و در پتانسیل ۶- و ۳۳- کیلوپاسکال تعیین شد (Veihmeyer & Hendrickson, 1931). رطوبت باقی مانده در پتانسیل ۶- کیلوپاسکال نشان دهنده 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. تخلخل کل خاک با توجه به مقدار رطوبت خاک در شرایط اشباع محاسبه شد (Wienhold et al., 2009). تخلخل درشت (منافذ بزرگ‌تر از ۵۰ میکرون) بر اساس اختلاف میزان رطوبت در حالت اشباع و رطوبت در پتانسیل ۶- کیلوپاسکال محاسبه شده است. (AC) تخلخل تهویه‌ای خاک با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد (Dexter et al., 2008; Reynolds et al., 2002).

$$AC = \theta_s(\psi=0) - \theta_{Fc}(\psi=-33Kpa) \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن $\theta_s(\frac{m^3}{m^3})$ مقدار رطوبت اشباع خاک که با اشباع کردن خاک و در مکش صفر اندازه‌گیری شد، $\theta_{Fc}(\frac{m^3}{m^3})$ مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه می‌باشد.

شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد (Pieri, 2012; Reynolds et al., 2009):

$$SSI = \frac{1.724 \text{ oc}}{(\text{silt} + \text{clay})} \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه SSI، شاخص پایداری ساختمان خاک، OC، میزان کربن آلی خاک و Silt+ Clay، مجموع مقدار ذرات رس و سیلت خاک است (El Bourhrami et al., 2022).

درجه فشردگی خاک با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد (Reichert et al., 2009; Van Genuchten, 1980).

$$DC = \frac{BD}{BD_{LLWR}} \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

که در این رابطه: DC درجه فشردگی خاک (%)، BD جرم مخصوص ظاهری مزرعه $BD_{LLWR} \text{ Mg/m}^3$ جرم مخصوص ظاهری مرجع است که با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد (Reichert et al., 2009).

$$BD_{LLWR} = 0.00078 \text{ clay} + 1.83803 \quad \text{رابطه ۵}$$

که در این رابطه clay برابر است با مقدار رس خاک (g/kg). ضریب جذب‌پذیری خاک (Sorptivity) با استفاده از روش فیلپ در مزرعه اندازه‌گیری شد (Philip, 1957). برای این منظور حجم مشخصی آب در داخل استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتیمتر و ارتفاع ۲۵ سانتیمتر ریخته شد و زمان لازم برای نفوذ آب ثبت شد. ضریب جذب‌پذیری از نسبت ارتفاع آب نفوذ یافته به ریشه‌ی دوم زمان محاسبه شد. مقدار کربن خاک به روش اکسیداسیون کربن آلی اندازه‌گیری شد (Walkley & Black, 1934).

² Air capacity

³ Soil structural index

⁴ Bulk density of least limiting water range

شناسایی مهمترین ویژگی‌های مؤثر در ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک

جهت شناسایی مهمترین ویژگی‌های خاک متأثر از سامانه‌های مدیریتی در منطقه مورد مطالعه از روش‌های تجزیه به مؤلفه‌های اصلی^۵ و تجزیه تشخیص^۶ استفاده شد. روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) بر روی مقادیر استاندارد شده ویژگی‌ها انجام شد. مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه^۷ بزرگ‌تر از یک برای انتخاب مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر در نظر گرفته شد (Askari & Holden, 2015; Brejda et al., 2000; Hamidi Nehrani et al., 2020). در هر مؤلفه‌ی اصلی، ویژگی‌هایی با بار عاملی بالا (۱۰ درصد بالاترین وزن) به عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر انتخاب شدند (Askari & Holden, 2015). در صورت انتخاب بیش از یک ویژگی برای هر مؤلفه، ویژگی‌هایی با ضرایب همبستگی بالا ($r > 0.6$) و وزن پایین‌تر حذف شده و در نهایت مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک تعیین گردید (Nabiollahi et al., 2018). شایان ذکر است که در صورت وجود همبستگی ضعیف بین متغیرها، همگی آن‌ها در زیر هر مؤلفه به عنوان مهم‌ترین مشخصه‌ها تعیین می‌شوند (Vasu et al., 2016). علاوه بر این شناسایی مهمترین ویژگی‌های فیزیکی خاک متأثر از نوع سامانه‌های مدیریتی با استفاده از تجزیه تشخیص نیز انجام شد. تجزیه تشخیص یک تحلیل چند متغیره است که به منظور کاهش ابعاد داده‌ها و طبقه‌بندی نظارت شده آنها توسعه یافته است. در این روش توابع تشخیص محاسبه می‌شوند که این توابع ترکیب خطی از متغیرهای اولیه هستند. از توابع تشخیص می‌توان به منظور شناسایی متغیرها (ویژگی‌های) که بیشترین تمایز را بین کلاس‌ها (کاربری‌ها) دارند استفاده کرد (Karray and Bouricha, 2024; Hou et al., 2021).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

توزیع نرمال و یکنواختی واریانس داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف^۸ و آزمون لونزمورد بررسی قرار گرفت. ویژگی‌های هدایت هیدرولیکی خاک، کرین آلی، شاخص پایداری ساختمان خاک دارای توزیع نرمال نبودند که با عملیات لگاریتم نرمال شدند. به منظور بررسی تأثیر سامانه‌های مدیریتی (مراعات با شرایط طبیعی و عدم انجام عملیات حفاظتی، قرق و بذپاشی مراعات و نهال کاری) از تجزیه واریانس استفاده شد. برای مقایسه میانگین از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد جهت بررسی کیفیت خاک در سامانه‌های مدیریتی متفاوت استفاده شد. بررسی همبستگی بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۶ انجام شد.

یافته‌های پژوهش و بحث

توصیف آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک در کاربری مراعات در سامانه‌های مدیریتی مختلف (مراعات با شرایط طبیعی، قرق و بذپاشی مراعات و نهال کاری) در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر در جدول ۱ خلاصه شده است. به جز مقدار (درصد سیلت، شن، رس) و ضریب جذب‌پذیری خاک سایر ویژگی‌های خاک به طور معنی‌داری ($p < 0.01$) بین سامانه‌های مدیریتی متفاوت بودند. نتایج نشان داد میانگین جرم مخصوص ظاهری خاک‌های مورد مطالعه در محدوده ۱/۱۱-۱/۳۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب قرار دارد. میانگین هندسی قطر خاک‌دانه در محدوده ۱/۷۹-۲/۲۰ میلی‌متر، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در محدوده ۴/۲۳-۸/۷۳ سانتی‌متر بر ساعت، ضریب جذب‌پذیری خاک در محدوده ۰/۴۷-۰/۵۲ درصد، تخلخل کل خاک در محدوده ۴۳-۵۱ درصد، تخلخل درشت

⁵ Principal Component Analysis

⁶ Discriminant analysis

⁷ Eigenvalue

⁸ Kolmogorov-Smirnov test

⁹ Leven's test

در محدوده ۲۱-۲۶ درصد، گنجایش تهویه‌ای در محدوده ۲۶-۳۴ درصد، رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در محدوده ۱۳-۱۵ درصد، شاخص پایداری ساختمان خاک در محدوده ۴/۹۸-۷/۱۵ درصد، درجه تراکم و فشردگی خاک در محدوده ۶۱/۱۱-۷۲/۷۵ درصد قرار دارد. با توجه به ویژگی‌های خاک منطقه مورد مطالعه سامانه‌های مدیریتی از کلاس بافت خاک یکسانی برخوردار بودند (لوم شنی)^۱. نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی خاک بین مدیریتی‌های مختلف در شکل ۲ ارائه شده است. جرم مخصوص ظاهری تفاوت معنی‌داری بین هر سه سامانه مدیریتی داشت، در سامانه نهال کاری کمترین مقدار را دارد ($1/2 \text{ gr cm}^{-3}$) و در سامانه مرتع با شرایط طبیعی بیشترین مقدار مشاهده شد ($1/33 \text{ gr cm}^{-3}$). به نظر می‌رسد که کاهش پوشش گیاهی و کم شدن ماده آلی خاک و همچنین خرد و شکسته شدن خاکدانه‌ها در ارتباط با چرای بیش از حد دام در مراتع از دلایل اصلی آن باشد. مقدار ماده آلی خاک به عنوان مهمترین عامل در مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک‌های مرتعی گزارش شده است و افزایش جرم مخصوص ظاهری در مرتع به چرای بی‌رویه دام نسبت داده شده است (Wubie & Assen, 2020). فعالیت‌های طبیعی و انسانی به مانند چرای بیش از حد دام‌ها می‌تواند باعث تخریب و کاهش پوشش گیاهی و در نتیجه افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک شود (Askari & Holden, 2014; Centeri, 2022; Degen, 2025). با از بین رفتن لایه‌های سطحی خاک در اثر فرسایش، ساختمان آن تغییر کرده و جرم مخصوص ظاهری آن نیز افزایش می‌یابد (Beutler et al., 2017).

میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها در مرتع با شرایط طبیعی تفاوت معنی‌داری با مراتع قرق و بذپاشی و نهال کاری شده داشت، درحالی که مرتع قرق و بذپاشی شده با نهال کاری شده تفاوت معنی‌داری در میانگین هندسی قطر خاکدانه نداشت (شکل ۲). بیشترین میزان میانگین هندسی قطر خاکدانه در خاک‌های سامانه نهال کاری ($7/74$ میلی‌متر) بود و در سایر سامانه‌ها کاهش یافته به طوری که در خاک‌های مرتعی با شرایط طبیعی و دست نخورده به $1/79$ میلی‌متر رسیده است در تایید این نتایج خرمالی و همکاران گزارش کرده اند تخریب مراتع باعث کاهش میزان میانگین اندازه خاکدانه‌ها می‌شود (Khormali et al., 2009). یکی از دلایل پایداری بیشتر خاکدانه‌ها در مراتع حفاظت شده می‌تواند به دلیل ماده آلی بیشتر در این سامانه‌های مدیریتی باشد (Even & Cotrufo, 2024). با توجه به اینکه میانگین هندسی قطر خاکدانه در مراتع طبیعی نسبت به دو سامانه‌ی مدیریتی دیگر کمتر است، فرسایش آبی و بادی در مراتع نیز می‌تواند به تدریج اندازه خاکدانه‌ها را کاهش دهد و این فرآیند باعث از بین رفتن ذرات بزرگ‌تر و باقی ماندن ذرات ریزتر می‌شود (Dowdeswell-Downey et al., 2023). علاوه بر آن چرای بیش از حد دام‌ها در مراتع

جدول ۱- توصیف آماری ویژگی های اندازه گیری شده خاک در سامانه های مدیریتی مختلف در کاربری مرتع

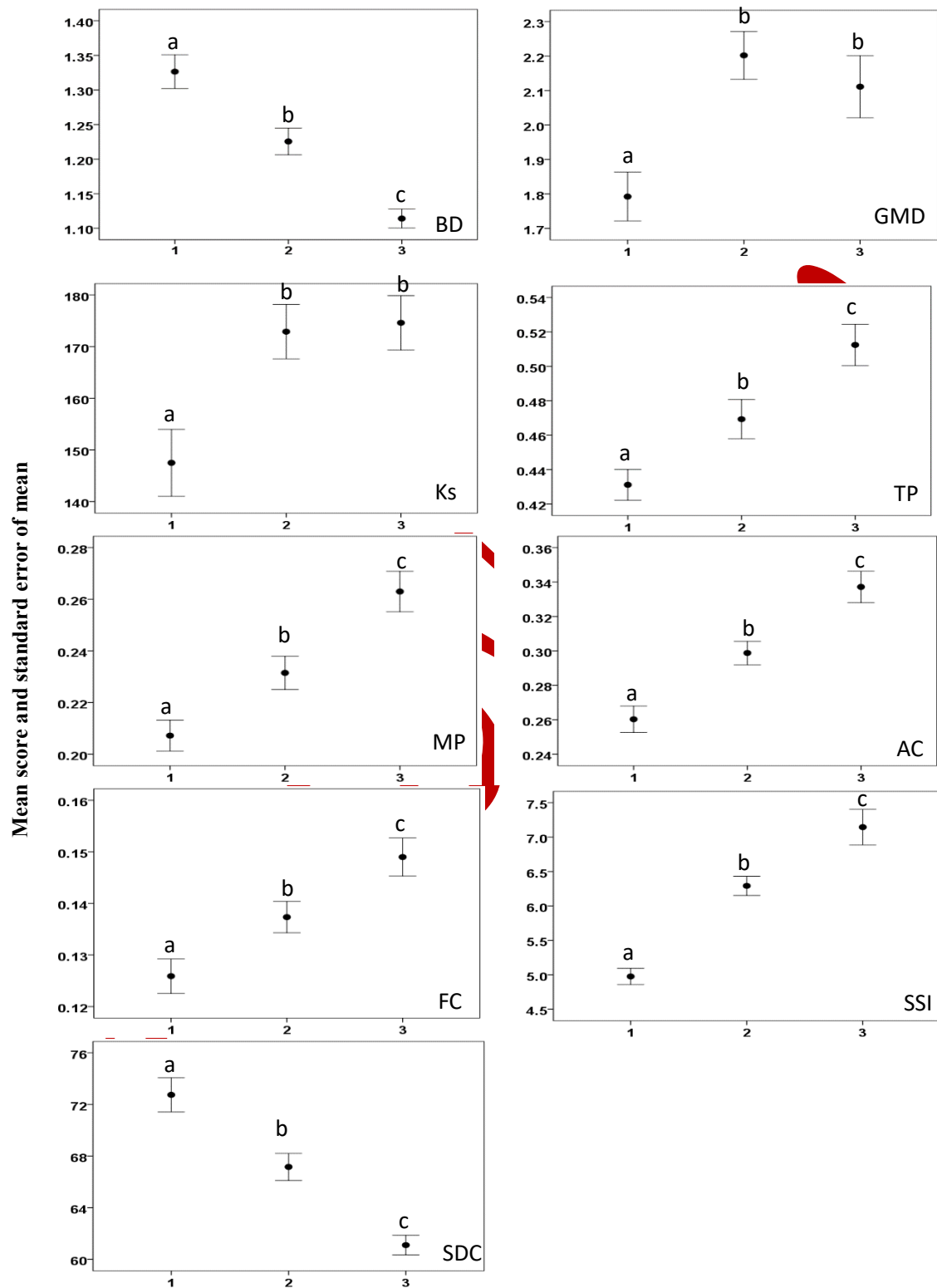
ویژگی های خاک soil properties	واحد Unit	مرتع			قرق و بذریاشی			نهال کاری			F	سطح معنی داری P-value
		حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین		
		min	max	Mean	min	max	Mean	min	max	Mean		
جرم مخصوص ظاهری BD	($\frac{g}{cm^3}$)	۱/۱۵	۱/۴۷	۱/۳۳	۱/۰۹	۱/۳۵	۱/۲۳	۱/۰۰	۱/۲۰	۱/۱۱	۲۹/۵۱	۰/۰۰۰۰
میانگین هندسی قطر خاک دانه GMD	(mm)	۱/۳۲	۲/۴۵	۱/۷۹	۱/۴۸	۲/۶۱	۲/۲۰	۱/۶۱	۲/۹۱	۲/۱۱	۷/۷۴	۰/۰۰۰۰
هدایت هیدرولیکی اشباع Ks	($\frac{cm}{h}$)	۴/۲۳	۸/۲۳	۶/۱۵	۵/۰۷	۸/۵۰	۷/۲۰	۵/۹۱	۸/۷۳	۷/۲۸	۷/۰۸	۰/۰۰۰۰
ضریب جذب پذیری Sorptivity	%	۰/۰۹	۰/۸۵	۰/۴۹	۰/۰۹	۰/۸۹	۰/۴۷	۰/۰۹	۰/۸۴	۰/۵۲	۰/۲۰	۰/۸۲ ^{ns}
تخلخل کل TP	%	۰/۳۶	۰/۵۰	۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۵۵	۰/۴۷	۰/۴۳	۰/۵۹	۰/۵۱	۱۴/۰۱	۰/۰۰۰۰
تخلخل درشت MP	%	۰/۱۶	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۲۸	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۳۲	۰/۲۶	۱۶/۹۱	۰/۰۰۰۰
ظرفیت تهویه ای AC	%	۰/۲۱	۰/۳۲	۰/۲۶	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۳۰	۰/۲۸	۰/۴۱	۰/۳۴	۲۳/۵۵	۰/۰۰۰۰
رطوبت ظرفیت FC	%	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۱۵	۱۱/۷۴	۰/۰۰۰۰
شاخص پایداری ساختمان خاک SSI	%	۴/۱۵	۵/۷۹	۴/۹۸	۵/۲۰	۷/۳۱	۶/۲۹	۵/۶۸	۹/۶۵	۷/۱۵	۳۵/۹۹	۰/۰۰۰۰
درجه فشردگی خاک SDC	%	۶۳/۰۸	۸۰/۶۲	۷۲/۷۵	۵۹/۹۲	۷۳/۷۵	۶۷/۱۶	۵۴/۸۶	۶۵/۵۵	۶۱/۱۱	۲۹/۷۳	۰/۰۰۰۰
Sand شن	%	۵۳/۰۰	۶۰/۰۰	۵۶/۷۰	۵۳/۰۰	۶۰/۰۰	۵۶/۲۵	۵۳/۰۰	۵۸/۰۰	۵۵/۴۵	۲/۱۵	۰/۱۳ ^{ns}
Silt سیلت	%	۲۳/۰۰	۳۱/۰۰	۲۷/۲۵	۲۳/۰۰	۳۱/۰۰	۲۶/۹۵	۲۳/۰۰	۳۱/۰۰	۲۷/۰۰	۰/۰۹	۰/۹۲ ^{ns}
Clay رس	%	۱۱/۰۰	۲۰/۰۰	۱۶/۰۵	۱۲/۰۰	۲۱/۰۰	۱۶/۶۵	۱۲/۰۰	۲۱/۰۰	۱۷/۵۵	۱/۶۲	۰/۲۱ ^{ns}
کربن آلی خاک SOC	%	۱/۰۷	۱/۴۴	۱/۲۵	۱/۲۷	۱/۷۸	۱/۵۹	۱/۴۴	۲/۳۵	۱/۸۴	۴۶/۷۰	۰/۰۰۰۰

***، * و ns به ترتیب تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۹۹٪، تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۹۵٪ و عدم وجود اختلاف معنی دار را نشان می دهد.

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; SOC, Soil organic carbon.

می تواند منجر به تخریب ساختمان خاک و کاهش اندازه خاک دانه ها شود (Mollaei et al., 2012). بنابراین تخریب خاک دانه ها بر اثر چرای بیش از حد دام و کمبود کربن آلی در خاک می تواند باعث کاهش اندازه خاک دانه ها شود (Iheshiulo et al., 2024). هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مرتع با شرایط طبیعی تفاوت معنی داری با مراتع قرق و بذریاشی و نهال کاری شده داشت، درحالی که مرتع قرق و بذریاشی شده با نهال کاری شده تفاوت معنی داری در هدایت هیدرولیکی اشباع نداشتند (شکل ۲). وجود تخلخل و ساختمان مناسب در خاک می تواند به افزایش هدایت هیدرولیکی کمک کند. هدایت هیدرولیکی اشباع وابستگی زیادی به توزیع اندازه منافذ به ویژه شکل و پیوستگی منافذ بزرگ دارد (Godoy et al., 2019). در پژوهشی محققان نشان دادند که میزان کربن آلی خاک اثرات مثبتی بر روی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک دارند، در حالی که چرای بیش از حد دام اثرات منفی بر روی آن می گذارند (Bargués-Tobella et al., 2024). افزایش میزان ماده آلی خاک، محدودیت تعداد دام در مراتع، کاشت درختان و

درختچه‌ها و دیگر پوشش گیاهی و جلوگیری از فرسایش خاک می‌تواند باعث افزایش هدایت هیدرولیکی و همچنین بهبود امنیت آب شود (Robinson et al., 2022). درصد تخلخل کل خاک تفاوت معنی‌داری در هر سه سامانه مدیریتی داشت و بیشترین مقدار آن در سامانه مرتع نهال کاری شده بود (شکل ۲). درصد تخلخل بالاتر می‌تواند ناشی از فعالیت‌های زیستی بیشتر، ماده آلی بیشتر و تجمع ریشه‌ها در خاک سطحی باشد (Sakin et al., 2024). انجام عملیات اصلاحی در مراتع به طور مستقیم و غیر مستقیم بر ویژگی‌های خاک مؤثر است، تأثیر مستقیم آن، شامل هوادهی بهتر خاک، جلوگیری از لگدکوبی بوده و تأثیر غیرمستقیم آن در دراز مدت افزایش پوشش گیاهی است که ضمن جلوگیری از برخورد قطرات باران و شکستن ذرات خاک، باعث افزایش ورود هوا و آب و افزایش میزان تخلخل خاک و بهبود ساختمان خاک می‌گردد (Sakin et al., 2024; She et al., 2024). چرای دام به‌ویژه بیش از ظرفیت و در زمان نامناسب، با لگدکوبی خاک موجب خرد شدن ذرات خاک شده که این عامل خرد شدگی ذرات، باعث کاهش میزان تخلخل خاک می‌شود (Kamali et al., 2022). این تخریب خاک کاهش نفوذ آب و هوا و افزایش روان‌آب و فرسایش را در مناطق تخریب شده به دنبال دارد، محققان مختلفی در تحقیقات خود بر روی تأثیر چراء بر خصوصیات خاک، تخریب ساختمان خاک را گزارش کرده‌اند (Bastani et al., 2023; Hashemi et al., 2019; Kamali et al., 2022; Kamali et al., 2020). درصد تخلخل درشت تفاوت معنی‌داری بین هر سه سامانه مدیریتی داشت، کمترین مقدار آن به ترتیب در خاک‌های سامانه‌ی مرتع با شرایط طبیعی و بیشترین مقدار آن در خاک‌های سامانه مرتع نهال کاری شده بود (شکل ۲). اگرچه می‌توان وجود فضاهای درشت‌تر در خاک‌های مراتع را می‌توان به وجود خاک‌دانه‌های درشت‌تر (با توجه به میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها) و میزان بیشتر ماده آلی خاک نسبت دام عدم فشردگی خاک می‌تواند باعث افزایش تخلخل خاک شده و به نوبه‌ی خود منجر به بهبود نفوذپذیری آب شود (Bastani et al., 2023). ساختمان خاک و فعالیت‌های زیستی در خاک از عوامل مهم و تأثیرگذار بر تخلخل درشت می‌باشد (Sadeghipour et al., 2014). همچنین نهال کاری باعث افزایش میزان ماده آلی در خاک شده که به نوبه‌ی خود بر افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها و میزان تخلخل درشت خاک تأثیرگذار می‌باشد (Kamali et al., 2020). به طور کلی، افزایش تخلخل درشت در نهال کاری نتیجه تعامل پیچیده‌ای از عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی است (Fulazzaky et al., 2022). انجام عملیات اصلاحی در مراتع می‌تواند باعث افزایش پوشش گیاهی در مراتع شود که ضمن جلوگیری از برخورد قطرات باران و شکسته شدن ذرات خاک، باعث افزایش میزان تخلخل خاک و بهبود ساختمان خاک و تشکیل خاک‌دانه می‌گردد (Kamali et al., 2020). ظرفیت تهویه‌ای خاک تفاوت معنی‌داری بین هر سه سامانه مدیریتی داشت، کمترین مقدار آن به ترتیب در خاک‌های سامانه‌ی مرتع با شرایط طبیعی و بیشترین مقدار آن در خاک‌های سامانه مرتع نهال کاری شده بود (شکل ۲). درصد شاخص پایداری ساختمان خاک نیز تفاوت معنی‌داری بین هر سه سامانه مدیریتی داشت، کمترین مقدار آن به ترتیب در خاک‌های سامانه‌ی مرتع با شرایط طبیعی و بیشترین مقدار آن در خاک‌های سامانه مرتع نهال کاری شده بود (شکل ۲). افزایش پوشش گیاهی طبیعی در مراتع، باعث کاهش میزان تأثیر ضربات ناشی از لگدکوب کردن خاک توسط دام بر خاکدانه‌ها شده و از اثرات مخربی که آن‌ها بر ساختمان خاک می‌گذارند، جلوگیری می‌کند (Prosdociami et al., 2016). درصد تراکم خاک تفاوت معنی‌داری بین هر سه سامانه مدیریتی داشت، بیشترین مقدار آن به ترتیب در خاک‌های سامانه‌ی مرتع با شرایط طبیعی و کمترین مقدار آن در خاک‌های سامانه مرتع نهال کاری شده بود (شکل ۲). تراکم خاک فرایندی است که به وسیله‌ی فشردگی، کاهش حجم در یک توده خاک صورت می‌گیرد که باعث تغییر در ساختمان خاک می‌شود (Blanco-Sepúlveda et al., 2024). تراکم خاک باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری شده در حالی که باعث کاهش تخلخل، شاخص پایداری ساختمان خاک، هدایت هیدرولیکی خاک می‌گردد که به نوبه‌ی خود کیفیت فیزیکی خاک را کاهش می‌دهد (Shah et al., 2017). میزان تخریب خاک ناشی از تراکم و فشردگی به شدت به مقدار فشار وارده و میزان رطوبت خاک بستگی دارد. اس و همکاران نشان دادند که تراکم خاک همبستگی شدیدی به مقدار بقایای پوشش گیاهی روی سطح خاک دارد (Ess et al., 1998). بلانکو و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند تراکم و فشردگی خاک وابسته به پوشش گیاهی و جهت شیب می‌باشد در نتیجه اثرات چراء بر روی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک تنها به شدت چراء وابسته نیست بلکه به عوامل زیست محیطی مشخص وابسته است (Blanco-Sepúlveda et al., 2024).



شکل ۲ - مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی خاک بین مدیریت‌های مختلف ۱- مرتع با شرایط طبیعی، ۲- مرتع با عملیات قرق و بذرپاشی ۳- مرتع نهال‌کاری شده. حروف انگلیسی متفاوت در هر نمودار نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ می‌باشد.

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.

ضرایب همبستگی بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان‌دهنده روابط معنی‌داری بین ویژگی‌های فیزیکی خاک است که می‌تواند بر ساختمان خاک، پویایی آب و کیفیت فیزیکی خاک تأثیر گذار باشند. جرم مخصوص ظاهری همبستگی منفی معنی‌داری با تخلخل کل ($r=0/53$)، تخلخل درشت ($r=0/56$)، ظرفیت تهویه‌ای ($r=-0/58$) و ظرفیت مزرعه‌ای ($r=-0/40$) نشان داد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک، منجر به کاهش خلل و فرج خاک می‌شود که تأثیر منفی بر تهویه خاک، نگهداری آب خاک و نفوذ ریشه دارد. همچنین مقادیر بالاتر جرم مخصوص ظاهری همبستگی قوی با درجه تراکم خاک ($r=0/99$) نشان داد، که تأیید می‌کند با افزایش جرم مخصوص ظاهری، خاک متراکم‌تر می‌شود که می‌تواند مانع رشد ریشه و فعالیت میکروبی در خاک شود. علاوه بر این، جرم مخصوص ظاهری همبستگی منفی قوی با شاخص پایداری ساختمان خاک ($r=-0/65$) نشان داد که بر اهمیت خاک‌دانه‌سازی در حفظ کیفیت خاک تأکید می‌کند. کاهش شاخص پایداری ساختمان خاک و افزایش جرم مخصوص ظاهری نشان می‌دهد که تراکم تأثیر منفی بر ساختمان خاک دارد و منجر به نفوذ کم آب و محدودیت تبادلات گازی در خاک می‌شود (Sang et al., 2023; Das et al., 2023). میانگین هندسی قطر خاک‌دانه همبستگی مثبت معنی‌داری با تخلخل کل ($r=0/69$)، تخلخل درشت ($r=0/73$) و ظرفیت تهویه‌ای ($r=0/74$) دارد. نتایج و یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که خاک‌دانه‌های بزرگ‌تر تمایل به بهبود تخلخل خاک دارند که باعث افزایش حرکت آب، تهویه و فعالیت زیستی می‌شود. همبستگی قوی بین میانگین هندسی قطر خاک‌دانه و شاخص پایداری ساختمان خاک ($r=0/71$)، نقش خاک با دانه‌بندی مناسب را در حفظ ساختمان خاک مطلوب تأیید می‌کند. خاک با دانه‌بندی مناسب و خاک‌دانه‌های بزرگ‌تر، باعث مقاومت در برابر تراکم می‌شود (Wilczewski et al., 2024).

هدایت هیدرولیکی اشباع همبستگی مثبت و معنی‌داری با تخلخل کل ($r=0/62$)، تخلخل درشت ($r=0/40$)، ظرفیت تهویه‌ای ($r=0/49$) و رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای ($r=0/41$) داشت، که نشان می‌دهد تخلخل بیشتر تسهیل حرکت آب در نیمرخ خاک را فراهم می‌کند. همبستگی بین هدایت هیدرولیکی اشباع و شاخص پایداری ساختمان خاک ($r=0/48$) نشان می‌دهد که خاک‌هایی با ساختمان مناسب، نفوذپذیری آب را بهبود می‌بخشند، روان‌اب سطحی را کاهش می‌دهند و دسترسی رطوبت برای رشد گیاهان را افزایش می‌دهند. جالب است که K_s همبستگی معنی‌داری با جرم مخصوص ظاهری ($r=-0/22$) نشان نداد، که ممکن است نشان دهد عوامل دیگری مانند پایداری خاک‌دانه‌ها و پیوستگی منافذ نقش مهم‌تری در تأثیر بر جریان آب در خاک نسبت به عامل جرم مخصوص ظاهری دارند. درجه تراکم و فشردگی خاک همبستگی منفی با اکثر شناسه‌های تخلخل شامل تخلخل درشت ($r=-0/53$)، تخلخل کل ($r=-0/56$)، ظرفیت تهویه‌ای ($r=-0/58$) و شاخص پایداری ساختمان خاک ($r=-0/65$) داشت. نتایج این پژوهش تأیید می‌کند که افزایش تراکم و فشردگی خاک منجر به کاهش فضای منافذ خاک می‌شود که حرکت آب و هوا را محدود کرده و به طور منفی بر گسترش ریشه و عملکرد زیستی خاک تأثیر می‌گذارد. همبستگی‌های مثبت مشاهده شده بین شناسه‌های کیفیت خاک، بینش ارزشمندی در مورد راهبردهای مدیریت خاک برای بهبود کیفیت و باروری خاک در مراتع نیمه‌خشک فراهم می‌کنند. از آنجایی که جرم مخصوص ظاهری خاک و درجه تراکم و فشردگی خاک به طور منفی بر تخلخل خاک و حرکت آب در خاک تأثیر می‌گذارند، کاهش فشردگی خاک از طریق سامانه‌های مدیریت حفاظتی، به ویژه نهال‌کاری، می‌تواند ساختمان خاک را بهبود بخشد و نفوذپذیری را افزایش دهد (Dastgheyb Shirazi et al., 2021). تقویت پایداری خاک‌دانه‌ها از طریق افزایش ورود مواد آلی می‌تواند ساختمان خاک را تقویت کرده و خطر فرسایش خاک در این مناطق را کاهش دهد (Dastgheyb Shirazi et al., 2021; Li et al., 2025; Peixoto et al., 2020). بهبود هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از طریق تقویت خاک‌دانه‌سازی و کاهش فرایند فشردگی می‌تواند باعث بهینه‌سازی نفوذ آب در خاک شده و خطر آب‌ماندگی را کاهش دهد (Das et al., 2023; Sang et al., 2023; Segura et al., 2020; Shaheb et al., 2021).

جدول ۲- ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های خاک

ویژگی خاک Soil property	جرم مخصوص ظاهر BD	میانگین هندسی قطر خاکدانه GMD	هدایت هیدرولیکی اشباع Ks	ضریب جذب پذیر Soptivity	تخلخل کل TP	تخلخل درشت MP	ظرفیت تهویه‌ای AC	رطوبت ظرفیت مزرعه FC	شاخص پایداری ساختمان خاک SSI	درجه فشردگی خاک SDC	شن Sand	سیلت Silt	رس clay
BD	۱												
GMD	-۰/۳۲*	۱											
Ks	-۰/۲۱	۰/۴۹**	۱										
Soptivity	۰/۱۰	-۰/۱۵	۰/۰۱	۱									
TP	-۰/۵۲**	۰/۶۹**	۰/۴۲**	-۰/۱۸	۱								
MP	-۰/۵۵**	۰/۷۲**	۰/۳۹**	-۰/۰۶	۰/۸۵**	۱							
AC	-۰/۵۷**	۰/۷۴**	۰/۴۹**	-۰/۰۹	۰/۸۵**	۰/۹۰**	۱						
FC	-۰/۴۰**	۰/۴۲**	۰/۴۰**	۰/۰۹	۰/۵۶**	۰/۵۵**	۰/۵۵**	۱					
SSI	-۰/۶۵**	۰/۷۰**	۰/۴۷**	-۰/۰۳	۰/۷۷**	۰/۸۶**	۰/۹۱**	۰/۵۷**	۱				
SDC	۰/۹۹**	-۰/۳۳**	-۰/۲۲	۰/۱۰	-۰/۵۲**	-۰/۵۵**	-۰/۵۸**	-۰/۴۰**	-۰/۶۵**	۱			
Sand	۰/۲۴	-۰/۰۶	-۰/۰۹	۰/۰۲	-۰/۲۲	-۰/۲۱	-۰/۲۱	-۰/۲۱	-۰/۰۴	۰/۲۴	۱		
Silt	-۰/۰۶	-۰/۰۷	-۰/۱۴	۰/۱۴	-۰/۱۸	-۰/۱۰	-۰/۰۸	-۰/۱۵	-۰/۱۱	-۰/۰۸	-۰/۱۹	۱	
Clay	-۰/۰۸	-۰/۰۶	۰/۱۶	-۰/۱۲	۰/۲۶*	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۲۵*	۰/۱۰	-۰/۰۷	-۰/۵۰**	-۰/۷۲**	۱

** و * به ترتیب همبستگی معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ نشان می‌دهد. توصیف علائم و نمادها همانند جدول ۱ است.

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

جدول ۳ نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) را برای مجموعه داده‌ها نشان می‌دهد. ضریب^۱ KMO برای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بزرگتر از ۰/۶ است، که متناسب بودن داده‌ها را برای این تجزیه و تحلیل چند متغیره نشان می‌دهد (Hamidi Nehrani et al., 2020). دو مؤلفه با ارزش ویژه بزرگتر از یک استخراج شد. این نتایج نشان می‌دهد که مؤلفه اول ۶۵ درصد از واریانس کل داده‌ها را در بر می‌گیرد و مؤلفه دوم نیز ۱۵ درصد از واریانس را توضیح می‌دهد، که مجموعاً ۸۰ درصد واریانس کل داده‌ها را این دو مؤلفه در بر می‌گیرند. در مؤلفه اول درصد تخلخل درشت و درصد ظرفیت تهویه‌ای دارای بالاترین بار عاملی بودند. به دلیل همبستگی بالای این دو ویژگی ($r > 0/6$)، تنها درصد تخلخل درشت به عنوان حداقل ویژگی مؤثر انتخاب شد. در مؤلفه دوم، میانگین جرم مخصوص ظاهری خاک و درجه فشردگی خاک دارای بالاترین بار عاملی بودند. به دلیل همبستگی بالای این دو ویژگی ($r > 0/6$) جرم مخصوص ظاهری خاک به عنوان مهم‌ترین ویژگی مؤثر برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک انتخاب شد (جدول ۳). در میان ویژگی‌های خاک تحلیل شده، تخلخل درشت و جرم مخصوص ظاهری خاک به عنوان مهم‌ترین شناسه‌ها با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی شناسایی شدند که نقش محوری آنها را در ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک در این زیست‌بوم نشان می‌دهد. ارزیابی تخلخل درشت خاک در اکوسیستم‌های مرتعی اطلاعات ضروری را برای مدیران اراضی و سیاست‌گذاران جهت بهبود کیفیت خاک و پایداری زیست‌بوم فراهم می‌کند (Kooch et al., 2024). پایش تغییرات تخلخل درشت خاک با گذشت زمان می‌تواند به عنوان شناسه‌ای از تخریب خاک عمل کند و عملیات اصلاحی را برای جلوگیری از تخریب طولانی‌مدت خاک تسهیل کند (da Costa et al., 2025; Kooch et al., 2024). شدت چرا در مراتع باعث کاهش تخلخل خاک می‌شود که می‌تواند منجر به کاهش نفوذپذیری، افزایش روان‌آب سطحی و زیاد شدن مساسیت ذرات خاک به فرسایش شود (Askari & Holden, 2014). جرم مخصوص ظاهری خاک، یکی دیگر از ویژگی‌های کلیدی شناسایی شده از طریق تحلیل مؤلفه‌های اصلی است، که ویژگی شناخته‌شده‌ای برای اندازه‌گیری میزان فشردگی و تخلخل خاک است. این شناسه کیفیت خاک، میزان تخریب ساختمان خاک را منعکس می‌کند و به طور معکوس با تخلخل خاک در ارتباط است. مقادیر بالای جرم مخصوص ظاهری اغلب با فشردگی، کاهش نفوذپذیری ریشه و اختلال در حرکت آب و هوا در خاک مرتبط است (Evangelou & Giourga, 2024; Talat et al., 2025). در مراتع مدیریت‌شده، مقادیر کمتر جرم مخصوص ظاهری خاک می‌تواند با بهبود ساختمان خاک و افزایش تاب‌آوری و برگشت‌پذیری این زیست‌بوم در ارتباط باشد (Talat et al., 2025). انتخاب تخلخل درشت و جرم مخصوص ظاهری خاک، به عنوان شناسه‌های اصلی کیفیت فیزیکی خاک، به همبستگی ذاتی و ماهیت به هم پیوسته ساختمان و تراکم خاک در مراتع نیمه‌خشک استان زنجان اشاره دارد.

تحلیل تشخیص

خلاصه نتایج تحلیل تشخیص (DA) در جدول ۴ ارائه شده است. مقدار ویژه برای تابع اول ۲/۲۲ است. تابع اول ۸۲/۶ درصد از واریانس داده‌های اولیه را در بر می‌گیرد و تابع دوم ۱۷/۴ درصد از واریانس داده‌ها را تبیین می‌کند، تحلیل ضرایب تفکیک نشان می‌دهد که جرم مخصوص ظاهری، در تابع اول ضریب ۶/۱۷ و در تابع دوم ضریب ۱/۸۸ دارد، که نشان می‌دهد این ویژگی در تابع اول تأثیر بیشتری در تفکیک سامانه‌های مدیریتی دارد. ضریب میانگین هندسی قطر خاکدانه در تابع اول ۱/۴ و در تابع دوم ۳/۵۸ است، و در تابع دوم تأثیر بیشتری دارد. ضریب تخلخل درشت در تابع اول ۸/۴۱ و در تابع دوم ۶۱/۳۵- است. ضریب شاخص پایداری ساختمان خاک در تابع اول ۱/۴۶- و در تابع دوم ۱/۲۴ است.

¹ Kaiser-Meyer-Olkin

جدول ۳ - نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای کل ویژگی‌های خاک (عمق ۳۰ - ۰ سانتیمتر)

PCs parameters	مؤلفه	
	اول PC1	مؤلفه دوم PC2
Eigenvalue	۵/۸۷	۱/۳۲
Variance (%)	۶۵/۲۲	۱۴/۶۲
Cumulative (%)	۶۵/۲۲	۷۹/۸۳

Soil Indicator	Eigenvector	Communality
MP	۰/۸۶۲	۰/۴۲۰
AP	۰/۸۳۸	۰/۴۲۱
GMD	۰/۸۳۰	۰/۱۵۸
TP	۰/۸۰۳	۰/۳۸۵
SSI	۰/۷۹۱	۰/۵۱۹
Ks	۰/۷۲۵	۰/۰۷۰
FC	۰/۶۷۳	۰/۲۶۰
BD	۰/۲۱۰	۰/۹۶۱
SDC	۰/۲۱۶	۰/۹۵۹

*مقادیر سیاه نشان‌دهنده ویژگی‌های با وزن بالا و مقادیر سیاه زیرخطدار نشان‌دهنده ویژگی‌های انتخاب شده برای حداقل ویژگی‌های مؤثر هستند.

MP: هدایت , Ks: شاخص پایداری ساختمان خاک: SSI, تخلخل کل: TP, میانگین هندسی قطر خاکدانه: GMD, ظرفیت تهویه‌ای: AC, تخلخل درشت: MP, درجه فشردگی خاک: SDC, جرم مخصوص ظاهری: BD, ظرفیت مزرعه‌ای: FC, هیدرولیکی اشباع خاک

ضرایب تفکیک نشان می‌دهند که تخلخل درشت در هر دو تابع اول و دوم مؤثرترین ویژگی در تشخیص تاثیر سامانه‌های مدیریتی است. نتایج تجزیه تشخیص نشان داد به ترتیب ویژگی تخلخل درشت، جرم مخصوص ظاهری، میانگین هندسی قطر خاکدانه و شاخص پایداری ساختمان خاک مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر شرایط خاک برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک تحت تاثیر سامانه‌های مدیریتی مورد مطالعه هستند (جدول ۴). نتایج این پژوهش با تحقیق بلانکو و همکاران (۲۰۲۴) ارتباط نزدیکی دارد آن‌ها در پژوهش‌های خود در مراتع نشان دادند که جرم مخصوص ظاهری، تخلخل خاک و ظرفیت نفوذ از متغیرهای کلیدی برای آنالیز اثرات چراء بر روی مراتع تحت مطالعه می‌باشند (Blanco-Sepúlveda et al., 2024). استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تحلیل تشخیص، بینش‌های ارزشمندی در ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک تحت راهبردهای مختلف مدیریت مراتع مورد مطالعه ارائه می‌دهد. اگرچه هر دو روش، ویژگی‌های کلیدی خاک را شناسایی می‌کنند، اما از رویکردهای آماری متفاوتی استفاده می‌کنند.

جدول ۴- خلاصه نتایج تحلیل تشخیص

تابع Function	مقدار ویژه Eigenvalue	واریانس Variance%	واریانس تجمعی Cumulative Variance %	Wilks' Lambda	Chi- square	P-Value
۱	۲/۲۱۶a	۸۲/۶	۸۲/۶	۰/۲۱۲	۸۶/۲	۰/۰۰۰**
۲	۰/۴۶۸a	۱۷/۴	۱۰۰/۰	۰/۶۸۱	۲۱/۳	۰/۰۰۰**

ویژگی‌های انتخاب شده خاک Selected Soil Properties	ضرایب تفکیک Discriminant Coefficients	
	تابع ۱ Function 1	تابع ۱ Function 1
	1	1
جرم مخصوص ظاهری BD	۶/۱۷	۱/۸۸
میانگین هندسی قطر خاکدانه GMD	۱/۴۰	۳/۵۸
تخلخل درشت MP	۸/۴۱	-۶۱/۳۵
شاخص پایداری ساختمان خاک SSI	-۱/۴۶	۱/۲۴

*توصیف علائم و نمادها همانند جدول ۲ است.

در هر دو روش (PCA و DA) تخلخل درشت و جرم مخصوص ظاهری خاک به عنوان شناسه‌های کلیدی ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک در نظر گرفته شد. مقدار بار عاملی بالای تخلخل درشت در تحلیل به مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد که این پارامتر نقش اصلی در توجیه تغییرپذیری خاک در سامانه‌های مدیریتی مختلف دارد. به طور مشابه تحلیل تشخیص نیز تأیید می‌کند که تخلخل درشت به دلیل حساسیت به تراکم و فشردگی خاک، ظرفیت نفوذ آب و پتانسیل رشد ریشه، در ایجاد تمایز بین راهبردهای مدیریتی بسیار مؤثر است. همگونی این دو روش، نقش بیادین تخلخل درشت را در حفظ عملکرد خاک در مراتع نیمه‌خشک تأیید می‌کند. جرم مخصوص ظاهری خاک نیز در هر دو روش به عنوان شناسه کلیدی شناسایی شد که اهمیت آن را در ارزیابی تخریب و فشردگی خاک تقویت می‌کند. نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی و رابطه معکوس جرم مخصوص ظاهری خاک با تخلخل، آن را به متغیر مهم تأثیرگذار بر تغییرات کیفیت فیزیکی خاک بدل می‌کند. آلتیز تشخیص با تأیید بیشتر برای یافته نشان می‌دهد، جرم مخصوص ظاهری به خوبی بین گروه‌های مدیریتی مرتع تمایز ایجاد می‌کند، چرا که مقادیر بالای آن معمولاً با تخریب خاک ناشی از چرای بیش از حد دام یا اختلالات و برهم خوردگی‌های مکانیکی مرتبط است. تمایز اصلی بین نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تحلیل تشخیص در تعداد بیشتر ویژگی‌های خاک است که توسط تحلیل تشخیص شناسایی شد. در حالی که تحلیل مؤلفه‌های اصلی تخلخل درشت و جرم مخصوص ظاهری خاک را به عنوان متغیرهای اصلی تأیید می‌کند، تحلیل تشخیص علاوه بر این دو ویژگی، میانگین هندسی قطر خاکدانه و شاخص پایداری ساختمان خاک را نیز به عنوان ویژگی‌های تمایزکننده مهم شناسایی می‌کند. میانگین هندسی قطر خاکدانه به عنوان معیاری مهم برای پایداری خاکدانه‌ها و مقاومت در برابر فرسایش خاک است که نشان دهنده انعطاف پذیری بهتر تحت شیوه‌های مدیریتی پایدار است (Wu et al., 2024; Yang et al., 2024; Yang et al., 2025). قرار گرفتن میانگین هندسی قطر خاکدانه و شاخص ساختمان خاک در ویژگی‌های شناسایی شده در تحلیل تشخیص نشان دهنده اهمیت ساختمان خاک و پایداری خاکدانه‌ها برای تشخیص شرایط فیزیکی مراتع مورد مطالعه و اهمیت ارزیابی یکپارچه ساختمان خاک در ارزیابی اثرات و پیامدهای بلندمدت چراء و عملیات اصلاحی بر کیفیت فیزیکی خاک است. در این مطالعه، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تحلیل تشخیص به صورت مکمل و با اهداف متمایز به کار گرفته شده‌اند. روش PCA به عنوان یک ابزار اکتشافی بدون نظارت، برای شناسایی ساختار درونی داده‌ها و انتخاب ویژگی‌های نماینده به کار رفت، در حالی که DA به عنوان یک روش نظارتی، مستقیماً در آزمون فرضیه اصلی پژوهش مبنی بر تأثیر سامانه مدیریتی بر کیفیت فیزیکی خاک استفاده شد. هم‌پوشانی برخی نتایج این دو روش، نشانه‌ای از اعتبار متقابل یافته‌هاست. نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تحلیل تشخیص، دیدگاه‌های مکملی را برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک ارائه داد و هم‌پوشانی برخی نتایج این دو روش، نشانه‌ای از اعتبار متقابل یافته‌هاست. تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای شناسایی مؤثرترین ویژگی‌های تأثیرگذار بر تغییرپذیری کلی شرایط

خاک مفید است و ابزاری ارزشمند برای پایش در مقیاس گسترده و تشخیص روندهای تخریب خاک محسوب می‌شود (RongJiang et al., 2013). درمقابل آن تحلیل تشخیص از طریق تمرکز بر متغیرهایی که بیشترین تمایز را بین سامانه‌های مدیریتی ایجاد می‌کنند، رویکردی هدفمند برای ارزیابی روش‌های مدیریتی ارائه می‌دهد (Karray and Bouricha, 2025). استفاده از این تحلیل‌های چند متغیره، بینش پایه علمی برای توسعه رهیافت‌های مدیریت پایدار مرتع با هدف بهبود ساختمان خاک، افزایش نگهداشت رطوبت آب در خاک و کاهش تخریب در زیست‌بوم‌های نیمه خشک فراهم می‌کند. استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره مانند PCA و DA در مطالعات مختلف ارزیابی کیفیت خاک گزارش شده است (Hamidi Nehrani et al., 2020). این مطالعات نشان می‌دهند که هر دو روش می‌توانند به شکل مکمل در انتخاب ویژگی‌های نماینده و تحلیل تفاوت‌های ناشی از مدیریت‌های مختلف به کار روند. یافته‌ها نشان می‌دهند که راهبردهای مدیریتی مناسب مراتع، نقشی حیاتی در حفظ یا بهبود کیفیت فیزیکی خاک ایفا می‌کنند. ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند تخلخل درشت خاک، جرم مخصوص ظاهری، توزیع اندازه ذرات و شاخص پایداری ساختمان خاک به عنوان شناسه‌های کلیدی جهت ارزیابی ظرفیت خاک برای حمایت از رشد پوشش گیاهی، تنظیم پویایی آب و مقاومت در برابر تخریب عمل می‌کنند. مراتع با شرایط طبیعی، زمانی که به طور پایدار مدیریت می‌شوند امکان نفوذ آب به مقدار کافی و نفوذ ریشه را فراهم می‌کنند (Mathewos et al., 2023). چرای بیش از حد دام اغلب منجر به تراکم و فشردگی خاک می‌شود و در نتیجه تخلخل درشت کاهش و وزن مخصوص ظاهری خاک افزایش می‌یابد که به نوبه خود حرکت آب و توسعه ریشه را محدود می‌کند (Dastgheyb Shirazi et al., 2021). در مقابل، نهال کاری در مراتع می‌تواند به بهبود خاک‌دانه‌سازی و ساختمان خاک در طول زمان به دلیل افزایش ورود ماده آلی به خاک از بستر درختان و ریشه‌های گیاهان کمک کند (Barrena-González et al., 2025; Dastgheyb Shirazi et al., 2021; Mathewos et al., 2023; Zhang et al., 2025). با این حال، تأثیر آن بسته به انتخاب گونه، تراکم و مدت زمان نهال کاری متفاوت است، زیرا مراحل اولیه استقرار ممکن است به دلیل فعالیت‌های کاشت نهال، به طور موقت باعث افزایش تراکم و فشردگی خاک شود (Vopravil et al., 2014). قرق مراتع، عموماً بهبودهایی را در ساختمان خاک در طول زمان با افزایش تخلخل درشت، کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک و بیشتر شدن پایداری خاک‌دانه نشان می‌دهند (Guo et al., 2021). فقدان وجود اختلالات مکانیکی ناشی از چرای دام امکان تجمع تدریجی مواد آلی، افزایش فعالیت زیستی و خاک‌دانه سازی را فراهم می‌کند (Dastgheyb Shirazi et al., 2021; Guo et al., 2021). اجرای رویکردهای مدیریت تطبیقی که شامل چرای کنترل شده، بذر پاشی و نهال کاری گونه‌های مناسب است، می‌تواند به حفظ ساختمان خاک، جلوگیری از تخریب و افزایش مقاومت زیست‌بوم‌های مرتعی در محیط‌های نیمه‌خشک کمک کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این مطالعه تأثیر قابل توجه روش‌های مدیریت مرتع را بر کیفیت فیزیکی خاک نشان می‌دهد و نقش ویژگی‌های کلیدی خاک مانند تخلخل درشت، جرم مخصوص ظاهری، توزیع اندازه خاک‌دانه و شاخص پایداری ساختمان خاک را مورد تأکید قرار می‌دهد. به کارگیری تجزیه و تحلیل‌های چندمتغیره شامل تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تحلیل تشخیص، امکان شناسایی مؤثر ویژگی‌های فیزیکی کلیدی جهت ارزیابی سامانه‌های مدیریتی را فراهم کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که کیفیت فیزیکی خاک در سامانه مدیریتی مرتع نهال کاری شده بالاتر از دو سامانه مدیریتی دیگر (مرتع با شرایط طبیعی و مرتع بذرکاری شده) بود. این یافته‌های پژوهشی اهمیت رهیافت‌های مدیریت پایدار مراتع را در جهت حفظ ساختمان و عملکرد خاک تقویت کرده و راهنمایی‌های ارزشمندی را برای مدیران ارضی با هدف ایجاد تعادل بین باروری و پایداری اکولوژیکی فراهم می‌کنند. در استان زنجان استفاده از روش‌های حفاظتی از جمله چرای کنترل شده دام و استفاده از بذور بومی و نهال کاری می‌تواند منجر به افزایش کیفیت فیزیکی خاک و عملکرد مراتع شود. این مطالعات می‌توانند به درک بهتر تأثیرات متقابل بین فعالیت‌های مدیریتی و کیفیت فیزیکی خاک

در مراتع مناطق نیمه خشک استان زنجان و مناطقی با خاک‌های مشابه کمک کند و راهکارهای مؤثرتری برای مقابله با چالش‌هایی مانند فرسایش خاک و تخریب مراتع ارائه دهند.

منابع

- Al-Jashaami, S. H., Almudhafar, S. M., & Almayahi, B. A. (2024). Environmental assessment of natural rangelands and their management potential in Iraq. *Library Progress International*, 44(3), 15357-15366.
- Askari, M. S., & Holden, N. M. (2014). Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Geoderma*, 230, 131-142.
- Askari, M. S., & Holden, N. M. (2015). Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research*, 150, 57-67.
- Bardgett, R. D., Bullock, J. M., Lavorel, S., Manning, P., Schaffner, U., Ostle, N., Chomel, M., Durigan, G., L. Fry, E., & Johnson, D. (2021). Combatting global grassland degradation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(10), 720-735.
- Bargués-Tobella, A., Winowiecki, L. A., Sheil, D., & Vågen, T.-G. (2024). Determinants of Field-Saturated Soil Hydraulic Conductivity Across Sub-Saharan Africa: Texture and Beyond. *Water Resources Research*, 60(1), e2023WR035510. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2023WR035510>
- Barrena-González, J., Fernández, M. P., & Gabourel-Landaverde, A. (2025). Chapter 3 - Toward unsustainable grazing? The influence of topography on soil compaction at the farm scale in Iberian dehesas/montados. In L. Salvati (Ed.), *Environmental Sustainability and Global Change* (pp. 33-42). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-443-39-1,0003-1>
- Bastani, M., Sadeghipour, A., Kamali, N., Zarafshar, M., & Bazot, S. (2023). How does livestock graze management affect woodland soil health? *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1028149.
- Blanco-Sepúlveda, R., Gómez-Moreno, M. L. & Lima, F. (2024). An Approach to the Key Soil Physical Properties for Assessing Soil Compaction Due to Livestock Grazing in Mediterranean Mountain Areas. *Sustainability*, 16(10), 4279.
- Brejda, J. J., Karlen, D. L., Smith, J. L., & Allan, D. L. (۲۰۰۰). Identification of regional soil quality factors and indicators II. Northern Mississippi Loess Hills and Palouse Prairie. *Soil Science Society of America Journal*, 64(6), 2125-2135.
- Centeri, C. (2022). Effects of grazing on water erosion, compaction and infiltration on grasslands. *Hydrology*, 9(2), 34.
- Chai, H., Li, J., Ochoa-Hueso, R., Yang, X., Li, J., Meng, B., Song, W., Zhong, X., Ma, J., & Sun, W. (2022). Different drivers of soil C accumulation in aggregates in response to altered precipitation in a semiarid grassland. *Science of The Total Environment*, 830, 154760.
- da Costa, A. M., Fernandes, L. F. S., Pacheco, F. A. L., & Valera, C. A. (۲۰۲۵). Quality Indicators to Subsidize Soil Conservation Under Pasture in Brazil. *Land degradation & development*.
- Das, T. K., Kabir, A., Zhao, W., Stenstrom, M. K., Dittrich, T. M., & Mohanty, S. K. (2023, Feb 1). A review of compaction effect on subsurface processes in soil: Implications on stormwater treatment in roadside compacted soil. *Sci Total Environ*, 858(Pt 3), 160121. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160121>
- Dastgheyb Shirazi, S. S., Ahmadi, A., Abdi, N., Toranj Zar, H., & Khaleghi, M. R. (2021, Aug 3). Moderate grazing is the best measure to achieve the optimal conservation and soil resource utilization (case study: Bozdağhin rangelands, North Khorasan, Iran). *Environ Monit Assess*, 193(9), 549. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-093۱-۳>
- Degen, A. A. (2025). The impact of management and livestock grazing on the grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau. In *Grassland Degradation, Restoration and Sustainable Management of Global Alpine Area* (pp. 379-402). Elsevier.
- 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.
- Donovan, M., & Monaghan, R. (2021, Jun 1). Impacts of grazing on ground cover, soil physical properties and soil loss via surface erosion: A novel geospatial modelling approach. *J Environ Manage*, 287, 112206. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112206>
- El Bourhrami, B., Ibno Namr, K., Et-Tayeb, H., & Duraisamy, V. (2022). Application of Soil Quality Index to Assess the Status of Soils Submitted to Intensive Agriculture in the Irrigated Plain of Doukkala, Moroccan Semiarid Region. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23.
- Evangelou, E., & Giourga, C. (2024). Identification of Soil Quality Factors and Indicators in Mediterranean Agro-Ecosystems. *Sustainability*, 16(23), 10717. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/23/10717>

Even, R. J., & Cotrufo, M. F. (2024). The ability of soils to aggregate, more than the state of aggregation, promotes protected soil organic matter formation. *Geoderma*, 442, 116760 .<http://jcnp.iut.ac.ir/article-1-759-fa.pdf>

F

- ilazzola, A., Brown, C., Dettlaff, M. A., Batbaatar, A., Grenke, J., Bao, T., Peetoom Heida, I., & Cahill Jr, J. F. (2020). The effects of livestock grazing on biodiversity are multi-trophic: a meta-analysis. *Ecology Letters*, 23(8), 1298-1308.
- Fulazzaky, M. A., Lerman, L. J., Bar, L., Sorkhendi, S., Roestamy, M., & Siregar, Y. I. (2022, Sep 13). Evaluation of change in the peat soil properties affected by different fire severities. *Environ Monit Assess*, 194(10), 783. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10430-z>
- Gardner, W. H. (1986). Water content. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 493-544 .
- Godoy, V. A., Zuquette, L. V., & Gómez-Hernández, J. J. (2019). Spatial variability of hydraulic conductivity and solute transport parameters and their spatial correlations to soil properties. *Geoderma*, 179-180, 339 .
- Grossman, R., & Reinsch, T. (2002). 2.1 Bulk density and linear extensibility. *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*, 5, 201-228 .
- Gu, C., JIA, Z., Du Bobo, H., & LI, Q. (2022). Reviews and prospects of ecological restoration measures for degraded grasslands of China. *Ecology and Environment*, 31(7), 1465 .
- Guo, Y., Abdalla, M., Espenberg, M., Hastings, A., Hallett, P., & Smith, P. (2021). A systematic analysis and review of the impacts of afforestation on soil quality indicators as modified by climate zone, forest type and age. *Science of The Total Environment*, 757, 143824 .
- Guo, Y., & Chen, Y. (2024). A review of the impact of grazing on grassland ecosystems: Research progress and prospects. *Advances in Resources Research*, 4 . ۴۷۳-۴۸۰, (۳)
- Hamidi Nehrani, S., Askari, M. S., Saadat, S., Delavar, M. A., & Taheri, M. (2020). Using multivariate analysis to evaluate soil quality in agricultural lands of Zanjan province. *Applied Soil Research*, 8(2), 158-173 . (in persian).
- Hashemi, A., Aghbash, F. G., Zarafshar, M., & Bazot, S. (2019). 80-years livestock transit impact on permanent path soil in Zagros oak forest, Iran. *Applied Soil Ecology*, 138, 189-194 .
- Hesse, P. R., & Hesse, P. (1971). A textbook of soil chemical analysis .
- Hou, F., Jia, Q., Lou, S., Yang, C., Ning, J., Li, L., & Fan, Q. (2021). Grassland agriculture in China—a review. *Front. Agr. Sci. Eng*, 8(1), 35-44 .
- Iheshiulo, E. M.-A., Larney, F. J., Hernandez-Ramirez, G., Luce, M. S., Chau, H. W., & Liu, K. (2024). Soil organic matter and aggregate stability dynamics under major no-till crop rotations on the Canadian prairies. *Geoderma*, 442, 116777 .
- Jiahui, L., Rui, Y., You, W., Xin, L., & Ronghao, C. (2024). Dynamic analysis of grassland leaf area index changes under different grazing strategies based on multispectral UAV. *热带生物学报*, 15(1), 60-72 .
- Kamali, N., Sadeghipour, A., Souiri, M., & Mastinu, A. (2022). Variations in Soil Biological and Biochemical Indicators under Different Grazing Intensities and Seasonal Changes. *Land*, 11(9), 1537 .
- Kamali, N., Soori, M., Eftekhari, A., & Ashoori, P. (2020). Protection levels and distribution of organic carbon in size fractions of soil (case of Salook, North Khorasan) .
- Karray, E., & Bouricha, B. (2025). Discriminant analysis using feature extraction from spectral domain responses to achieve accurate delineation for robust evaluation or classification of soil properties. *International Journal of Remote Sensing*, 46(1), 410-428 .
- Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. *Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 425-442 .
- Khormali, F., Ajami, M., Ayoubi, S., Srinivasarao, C., & Wani, S. (2009). Role of deforestation and hillslope position on soil quality attributes of loess-derived soils in Golestan province, Iran. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 134(3-4), 178-189 .
- Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 687-734 .
- Kooch, Y., Kartalaei, Z. M., Amiri, M., Zarafshar, M., Shabani, S., & Mohammady, M. (2024). Soil health reduction following the conversion of primary vegetation covers in a semi-arid environment. *Sci Total Environ*, 921, 171113. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171113>
- Li, M., Wang, K., Ma, X., Fan, M., Li, B., & Song, Y. (2025). Relationship Between Soil Aggregate Stability and Associated Carbon and Nitrogen Changes Under Different Ecological Construction Measures in the Karst Region of Southwest China. *Agriculture*, 15(2), 207. <https://www.mdpi.com/2077-0472/15/2/207>
- Mao, Y., Du, Y., & Chen, K. (2025). Grazing increased alpine grassland soil respiration rates on the Tibetan Plateau. *Frontiers in Soil Science*, 4, 1429371 .
- Masoumi Tabar Zanjani, A., Amanifar, S., Askari, M. S., & Hassani, A. (2024). The effect of land use change on some biological characteristics of soil in the rangelands of Sohrein region, Zanjan province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, -. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378382.669739>. (In Persian).

- Mathewos, M., Sisay, A., & Berhanu, Y. (2023, Nov). Grazing intensity effects on rangeland condition and tree diversity in Afar, northeastern Ethiopia. *Heliyon*, 9(11), e22133. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22133>.
- Moameri, M., Ghorbani, A., Dadjou, F., Biswas, A., & Varasteh, F. (2024, 2024/07/02). Soil and plant attributes under grazing exclusion in semi-steppic semi-arid rangelands, Iran. *Arid Land Research and Management*, 38(3), 343-361. <https://doi.org/10.1080/15324982.2023.2299017>
- Mollaei, M., Bashari, H., Bassiri, M., & Mosaddeghi, M. (2012). Comparing soil aggregate stability at different grazing intensities (case study: Bardasiab rangeland, Fereidounshahr) [Research]. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 1(1), 52-63. <http://ijae.iut.ac.ir/article-1-30-fa.html>. (In Persian). <http://ijae.iut.ac.ir/article-1-30-fa.pdf>
- Nabiollahi, K., Golmohamadi, F., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., & Davari, M. (۲۰۱۸). Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma*, 318, 16-28.
- Nael, M., Salarinik, K., & Assadian, G. (2024, 2024/07/02). Soil quality and vegetation cover characteristics as influenced by diverse grazing regimes and soil disturbance histories in a semi-arid rangeland (Iran). *Arid Land Research and Management*, 38(3), 318-342. <https://doi.org/10.1080/15324982.2024.2309495>
- Nath, A. J., & Rattan, L. (2017). Effects of tillage practices and land use management on soil aggregates and soil organic carbon in the north Appalachian region, USA. *Pedosphere*, 27(1), 172-176.
- Nehrani, S. H., Askari, M. S., Saadat, S., Delavar, M. A., Taheri, M., & Holden, N. M. (2020). Quantification of soil quality under semi-arid agriculture in the northwest of Iran. *Ecological indicators*, 108, 103770.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 539-579.
- Peixoto, D. S., Silva, L., Melo, L. B. B., Azevedo, R. P., Araújo, B. C. L., Carvalho, T. S., Moreira, S. G., Curi, N., & Silva, B. M. (2020, Nov 25). Occasional tillage in no-tillage systems: A global meta-analysis. *Sci Total Environ*, 745, 140887. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140887>
- Philip, J. R. (1957). The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil science*, 84(3), 257-264.
- Pieri, C. J. (2012). *Fertility of soils: a future for farming in the West African Savannah* (Vol. 10). Springer Science & Business Media.
- Prosdocimi, M., Tarolli, P., & Cerdà, A. (2016, 2016/10/01/). Mulching practices for reducing soil water erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 161, 191-203.
- R. Ess, D., H. Vaughan, D., & V. Perumpral, J. (1998). CROP RESIDUE AND ROOT EFFECTS ON SOIL COMPACTION. *Transactions of the ASAE*, 41(5), 1271-1.۲۷۰ <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.17294>
- 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.
- Retallack, A., Rifai, S., Finlayson, G., Ostendorf, B., & Lewis, M. (2024). Remote sensing for rangeland conservation monitoring: Impacts of livestock removal after 15 years. *Journal of Applied Ecology*.
- Reynolds, W., Bowman, B., Drury, C., Tan, C., & Lu, X. (2002). Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110(1-2), 131-146.
- Reynolds, W., Drury, C., Tan, C., Fox, C., & Yang, X. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3-4), 252-263.
- Reynolds, W., Drury, C., Yang, X., & Tan, C. (2008). Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146(3-4), 466-474.
- Robinson, D. A., Nemes, A., Reinsch, S., Radbourne, A., Bentley, L., & Keith, A. M. (2022, 2022/12/15/). Global meta-analysis of soil hydraulic properties on the same soils with differing land use. *Science of The Total Environment*, 852, 158506. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158506>
- Sakin, E., Yanardag, H. İ., Firat, Z., Çelik, A., Beyyavas, V., & Suat, C. (2024). Some Indicators for the Assessment of Soil Health: A Mini Review. *MAS Journal of Applied Sciences*, 9(2), 297-310.
- Sang, T., Kang, A., Zhang, Y., Li, B., Mao, H., & Kong, H. (2023, Mar 31). Effect of Different Ameliorants on the Infiltration and Decontamination Capacities of Soil. *Materials (Basel)*, 16(7). <https://doi.org/10.۳۳۹۰.ma16072795>
- Segura, C., Navarro, F. B., Jiménez, M. N., & Fernández-Ondoño, E. (2020, Feb 20). Implications of afforestation vs. secondary succession for soil properties under a semiarid climate. *Sci Total Environ*, 704, 135393. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135393>
- Shah, A. N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., Bukhari, M. A., Tung, S. A., Hafeez, A., & Souliyanonh, B. (2017, 2017/04/01). Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(11), 10056-10067. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y>

- Shaheb, M. R., Venkatesh, R., & Shearer, S. A. (2021, 2021/12/01). A Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production. *Journal of Biosystems Engineering*, 46(4), 417-439. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>
- She, Y., Li, X., Zhang, J., & Zhou, H. (2024, 2024/10/01/). Effects of soil characteristics on grassland productivity in long-term artificial grassland establishment. *Global Ecology and Conservation*, 54, e03136. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03136>
- Solascasas, P., Hevia, V., Ochoa-Hueso, R., & Azcárate, F. M. (2024). Land use change of transhumant drove roads leads to soil quality degradation: a case study in Central Spain. *Applied Soil Ecology*, 196, 105308.
- Stavi, I., Siad, S. M., Kyriazopoulos, A. P., & Halbac-Cotoara-Zamfir, R. (2020, Feb 1). Water runoff harvesting systems for restoration of degraded rangelands: A review of challenges and opportunities. *J Environ Manage*. 109823, 200, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109823>
- Talat, A. E., Feng, R., Liu, G., Xie, J., Cai, Z., & Wang, J. (2025). Simulated Experimental Effect of Bulk Density on Infiltration Rate of China's Loess Plateau. *Egyptian Journal of Soil Science*, 65.(1)
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Vasu, D., Singh, S. K., Ray, S. K., Duraisami, V. P., Tiwary, P., Chandran, P., Nimkar, A. M., & Anantwar, S. G. (2016). Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma*, 282, 70-79.
- Veihmeyer, F., & Hendrickson, A. (1931). The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Science*, 32(3), 181-194.
- Vopravil, J., Podrázský, V., Khel, T., Holubík, O., & Vacek, S. (2014). Effect of afforestation of agricultural soils and tree species composition on soil physical characteristics changes. *Ekológia (Bratislava)*, 33(1), 67-80.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
- 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.
- Wilczewski, E., Jug, I., Szpunar-Krok, E., Staniak, M., & Jug, D. (2014). Shaping Soil Properties and Yield of Cereals Using Cover Crops under Conservation Soil Tillage. *Agronomy*, 14(9), 2104. <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/9/2104>
- Williams, S. E. (2024). A Review and Analysis of Rangeland and Wildland Soil Health. *Sustainability*, 16(7), 2867. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/7/2867>
- Wu, X., Zhang, Z., Cai, C., Zhou, J., & Zhang, W. (2024, Mar). Soil type regulates the divergent loss characteristics of sediment associated carbon and nitrogen in different size classes during rainfall erosion on cultivated lands. *J Environ Manage*, 354, 120479. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120479>
- Wubie, M. A., & Assen, M. (2020). Effects of land cover changes and slope gradient on soil quality in the Gumara watershed, Lake Tana basin of North-West Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(1), 85-97.
- Yang, H., Long, H., Li, X., Luo, X., Liao, Y., Wang, C., Cai, H., & Shu, Y. (2024). Vegetation restoration improved aggregation stability and aggregated-associated carbon preservation in the karst areas of Guizhou Province, southwest China. *PeerJ*, 12, e16699. <https://doi.org/10.7717/peerj.16699>
- Yang, Y., Meng, Z., Li, H., Gao, Y., Li, T., & Qin, L. (2025). Soil porosity as a key factor of soil aggregate stability : insights from restricted grazing. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1535193.
- Zhang, Q., Degen, A. A., & Zhou, H. (2025). Grazing and alpine grassland degradation. In *Grassland Degradation, Restoration and Sustainable Management of Global Alpine Area* (pp. 125-153). Elsevier.