



Quantitative Assessment of Soil Quality Under Rangeland Management Systems in Zanjan Province

Hossein Shamkhani¹ | Mohammad Sadegh Askari^{2✉} | Ali Reza Vaezi³ | Parisa Alamdari⁴

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: hossein.sh@znu.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: askari@znu.ac.ir

3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: vaezi.alireza@znu.ac.ir

4. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: p_alamdari@znu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 5, 2025

Revised: Nov. 13, 2025

Accepted: Nov. 18, 2025

Published online: Jan. 2026

Keywords:

**Multivariate analysis,
Discriminant analysis,
Soil quality indicators,
Minimum dataset.**

ABSTRACT

A quantitative assessment of soil quality is essential for evaluating soil functionality and determining appropriate soil management strategies. This study aimed to quantitatively assess soil quality in semi-arid rangelands of Zanjan Province under three management systems: natural rangeland (unmanaged), grazing enclosure with reseeding, and seedling planting (afforestation). Physical, chemical, and biological soil properties were measured at 0–30 cm depth, and a minimum data set (MDS) was identified using principal component analysis (PCA). Soil quality indices (SQIs) were determined using both linear and nonlinear scoring functions, which were subsequently integrated using additive and weighted methods. The efficacy of the models was evaluated using discriminant analysis. PCA identified five critical indicators for MDS, including geometric mean diameter of aggregates (GMD), plant-available water (AW), electrical conductivity (EC), available potassium (K), and bulk density (BD). The findings indicate that the implementation of restorative systems led to a significant enhancement in soil quality compared to natural rangelands. Specifically, the seedling-planting system demonstrated reduced BD and increased GMD, AW, and K, although there was a slight increase in EC in this system. Discriminant analysis indicated that the simple, unweighted linear SQI provided the greatest power to discriminate among management systems and is recommended as a superior index for field monitoring. The simultaneous application of enclosure and seedling planting in semi-arid rangelands has been demonstrated to improve soil structural properties, moisture levels and fertility. This approach significantly improves soil quality and offers an effective strategy for restoring rangeland ecosystem functions and promoting sustainable natural resource management in the Zanjan Province and similar regions.

Cite this article: Shamkhani, H., Askari, M. S., Vaezi, A. R., & Alamdari, P. (2026). Quantitative Assessment of Soil Quality Under Rangeland Management Systems in Zanjan Province., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (11), 3061-3086. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403694.670018>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403694.670018>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Rangelands constitute 54% of the Earth's terrestrial surface and account for 52% of the land area of Iran. A significant portion of these Iranian rangelands is experiencing degradation owing to excessive utilization. Although vegetation recovery is evident in some regions, the responses of soils, including their structure, organic matter, nutrients, and microbial communities, remain poorly understood. Overgrazing results in decreased soil organic carbon, nitrogen, and biological activity, while simultaneously increasing soil bulk density and risk of erosion.

Objective

The objectives were to (a) identify a minimum dataset of soil quality indicators for semi-arid rangelands, (b) compare scoring methods for indexing soil quality, and (c) evaluate the effectiveness of restoration interventions in enhancing soil physical, chemical, and biological properties.

Method

This study was conducted in the Qezeltepe region, which is characterized as a semiarid climate and receives an annual precipitation of 359.8 mm. This study assessed soil quality across three management systems in Zanjan Province, northwestern Iran: (i) natural rangeland without management, (ii) grazing exclusion with native reseeding, and (iii) seedling planting (afforestation). In the spring of 2023, 60 composite topsoil samples (0–30 cm; $n = 20$ per management) were collected using a random method within 40×40 m plots. Intact soil cores were collected for analysis, and 26 properties were quantified using established laboratory techniques. The data were assessed for normality and homoscedasticity, followed by ANOVA and LSD post-hoc tests to compare the management practices. Principal component analysis (PCA) with varimax rotation was employed to identify the minimum dataset (MDS). The MDS variables were scored using both linear and sigmoidal nonlinear functions. These scores were then aggregated in two ways: simple additive and PCA-weighted additive, yielding four soil quality indices (SQIs): linear additive, nonlinear additive, linear weighted, and nonlinear weighted. Discriminant analysis was used to determine which SQI best distinguished the management operations.

Results

Among the 26 properties analyzed, 19 showed significant variations in response to the management practices. Compared with natural rangelands, both grazing exclusion and afforestation decreased bulk density (BD) and soil compaction while simultaneously increasing the geometric mean diameter (GMD) and soil structure index. These management practices also enhanced the saturated hydraulic conductivity, total porosity, macroporosity, and aeration capacity, indicating improved infiltration. Furthermore, soil water retention was enhanced, as evidenced by increases in field capacity and available water (AW), with the latter rising from 6.5% in natural rangelands to over 8% in afforested areas. From a chemical perspective, the levels of soil organic carbon and total nitrogen were elevated under exclusion and afforestation conditions. In contrast, available potassium (K) increased specifically with afforestation, whereas available phosphorus was more prevalent in restored systems. In biological terms, both microbial biomass carbon and soil respiration increased in the restoration treatments. Notably, microbial biomass carbon exceeded 500 mg kg^{-1} in afforestation, indicating enhanced moisture conditions. The highest levels of electrical conductivity (EC) were recorded under afforestation conditions while remaining within non-saline thresholds. However, this indicates a potential accumulation of salts. PCA explained 76% of the total variance across three components and identified a five-indicator minimum dataset: GMD, AW, EC, K, and BD. All SQIs consistently ranked the systems, indicating that restoration was superior to the natural rangeland. Discriminant analysis (Wilks' $\lambda \approx 0.53$; χ^2 significant at $p < 0.001$) indicated that the linear, unweighted SQI demonstrated the highest-class separation coefficient. This finding suggests that a simple additive index derived from the MDS effectively captures the management effects.

Conclusion

In the semi-arid rangelands of Zanjan, five indicators (GMD, AW, EC, K, and BD) constitute a MDS that is responsive to management practices. The exclusion of grazing, combined with reseeding and afforestation, significantly improved the soil structure, water retention, fertility, and microbial activity within the upper 30 cm of the soil profile. The linear SQI derived from this MDS effectively differentiates management outcomes, making it highly suitable for monitoring by land managers. Although afforestation presents numerous benefits, the observed rise in EC necessitates the implementation of adaptive salinity management strategies. The MDS-based SQI is a practical tool for prioritizing sites, monitoring ecological recovery, and guiding policy decisions.

aimed at reversing rangeland degradation and enhancing ecosystem services, such as carbon storage, water regulation, and forage provision across semi-arid landscapes.

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

The data will be made available upon request.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and other forms of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

ارزیابی کمی کیفیت خاک تحت سامانه‌های مدیریتی مرتع در استان زنجان

حسین شمخانی^۱ | محمد صادق عسکری^۲ | علی رضا واعظی^۳ | پریسا علمداری^۴^۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: hossein.sh@znu.ac.ir^۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: askari@znu.ac.ir^۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: vaezi.alireza@znu.ac.ir^۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: p_alamdari@znu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	ارزیابی کمی کیفیت خاک جهت بررسی عملکرد خاک و شناسایی روش‌های مدیریتی مناسب خاک امری ضروری است. این پژوهش با هدف ارزیابی کمی کیفیت خاک در مراتع نیمه‌خشک استان زنجان تحت سه سامانه مدیریتی شامل مرتع طبیعی (بدون مدیریت)، قرق همراه با بذریاشی و نهال کاری، انجام شد. ابتدا ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری و با تحلیل مؤلفه‌های اصلی حداقل مجموعه داده تعیین گردید. شاخص‌های کیفیت خاک با توابع نمره‌دهی خطی و غیرخطی و ادغام افزایشی و وزنی محاسبه گردید و برای مقایسه کارایی شاخص‌ها از تحلیل تشخیص استفاده شد. بر اساس تحلیل مؤلفه‌های اصلی پنج شناسه کلیدی شامل میانگین هندسی قطر خاک‌دانه (GMD)، رطوبت قابل دسترس گیاه (AW)، هدایت الکتریکی (EC)، پتاسیم قابل جذب (K) و جرم مخصوص ظاهری (BD) انتخاب شد. نتایج نشان داد سامانه‌های احیایی نسبت به مرتع طبیعی به‌طور معنی‌داری کیفیت خاک را بهبود داده‌اند؛ به‌ویژه در نهال کاری، کاهش BD و افزایش GMD، AW و K مشاهده شد، هرچند در این سامانه EC اندکی بالاتر بود. تحلیل تشخیص نشان داد شاخص ساده خطی غیروزی بیشترین توان تفکیک سامانه‌های مدیریتی را داشته و به‌عنوان شاخص برتر برای پایش میدانی پیشنهاد می‌شود. به‌طور کلی، اعمال قرق و نهال کاری در مراتع نیمه‌خشک با بهبود هم‌زمان ویژگی‌های ساختمانی، وضعیت رطوبتی و حاصلخیزی، موجب ارتقای معنی‌دار کیفیت خاک شده و می‌تواند راهبردی مؤثر برای احیای کارکردهای اکوسیستم مرتعی و مدیریت پایدار منابع طبیعی در استان زنجان و مناطق مشابه باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۱۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۸/۲۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۲۷	
تاریخ انتشار: بهمن ۱۴۰۴	
واژه‌های کلیدی: تحلیل چند متغیره، تحلیل تشخیص، شناسه‌های کیفیت خاک، مجموعه حداقل داده.	

استناد: شمخانی، حسین؛ عسکری، محمدصادق؛ واعظی، علی‌رضا و علمداری، پریسا (۱۴۰۴). ارزیابی کمی کیفیت خاک تحت سامانه‌های مدیریتی مراتع استان زنجان،

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱۱)، <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403694.670018>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403694.670018>

مقدمه

مراعات از مهم‌ترین اکوسیستم‌های جهانی به شمار می‌روند که حدود ۵۰ تا ۵۴ درصد از سطح خشکی‌های زمین را پوشش داده و معیشت میلیاردها نفر را پشتیبانی می‌کنند (Herrera Calvo, 2024). با این حال، این اراضی وسیع شامل چمن‌زارها، درمنه‌زارها و ساواناها به شدت تحت فشار فرایندهای تخریب اراضی و خاک قرار گرفته‌اند. ارزیابی‌های اخیر هشدار می‌دهند که تا نیمی از مراعات جهان دچار تخریب شده‌اند که به شکل کاهش حاصلخیزی خاک و تخلیه عناصر غذایی، شوری، تراکم و فرسایش شدید آشکار می‌شود (Herrera Calvo, 2024). این تخریب گسترده که اغلب ناشی از بهره‌برداری ناپایدار (مانند چرای مفرط و تغییر کاربری اراضی) و تشدیدشده توسط تغییرات اقلیمی است، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و رفاه میلیاردها نفر محسوب می‌شود. مراعات نیمه‌خشک به دلیل خاک‌های شکننده و تغییرپذیری اقلیمی، به‌ویژه مستعد بیابان‌زایی هستند (Sheidai Karkaj et al., 2019). بیابان‌زایی که به معنای تبدیل اراضی خشک مولد به شرایط شبه‌بیابانی است، هم‌اکنون حدود ۱/۹ میلیارد هکتار از اراضی جهان را تحت تأثیر قرار داده و خدمات اکوسیستم را کاهش داده است و این نگرانی‌ها حفاظت و احیای مراعات را به یک اولویت جهانی فوری تبدیل کرده است (Sharafmandrad & Shahraki, 2025). در ایران، مراعات حدود ۵۲ درصد از سطح کشور را دربرمی‌گیرند و نقش اساسی در حمایت از کشاورزی و دامداری ایفا می‌کنند (Savari, 2023). با این حال، طی دهه‌های اخیر مراعات ایران به علت بهره‌برداری مفرط به شدت تخریب شده‌اند. جمعیت دامی کشور بیش از دو برابر ظرفیت چرای پایدار این مراعات است که منجر به کاهش پوشش گیاهی، تراکم خاک و فرسایش در مقیاس وسیع شده است. برآورد می‌شود بیش از ۲۰ درصد مراعات ایران طی سه دهه گذشته به‌طور کمی و کیفی به شدت تخریب شده باشند. این افت نه تنها تولید علوفه و معیشت جوامع روستایی را کاهش داده بلکه موجب فرسایش خاک و طوفان‌های گرد و غبار نیز شده است که بیان‌گر کاهش شدید کیفیت خاک است (Savari, 2023). در پاسخ، مدیریت مراعات در ایران و سایر مناطق نیمه‌خشک به‌طور فزاینده‌ای بر مداخلات احیایی با هدف توقف و معکوس‌سازی روند تخریب متمرکز شده است. دو راهبرد رایج در این زمینه عبارتند از: ۱- ممانعت از چرا همراه با بذركاری گونه‌های بومی (اغلب با حصارکشی و کشت مجدد) و ۲- نهال‌کاری در مراعات تخریب‌شده به‌منظور تثبیت خاک و بهبود ریزاقلیم. این اقدامات برای مقابله با بیابان‌زایی به‌طور گسترده ترویج می‌شوند، اما اثربخشی آن‌ها در بهبود کیفیت خاک هنوز به‌طور کافی کمی‌سازی نشده است. در حالی که بهبود پوشش گیاهی مشهود است، تغییرات شرایط خاک (ساختمان، ماده آلی، عناصر غذایی و زیست‌توده میکروبی) کمتر شناخته شده‌اند. بنابراین، ارزیابی کمی کیفیت خاک تحت سامانه‌های مدیریتی مختلف برای سنجش موفقیت اقدامات احیای مراعات ضروری است (Williams, 2024).

کیفیت خاک عموماً به توانایی خاک برای انجام کارکردهای اساسی و پشتیبانی از گیاهان، جانوران و انسان‌ها در طول زمان تعریف می‌شود (Bünemann et al., 2018). این مفهوم طیف وسیعی از ویژگی‌های خاک (فیزیکی، شیمیایی و زیستی) را در بر می‌گیرد که در کنار هم کارکردهای کلیدی اکوسیستم نظیر تولید، تنظیم آب، چرخه عناصر غذایی و ذخیره کربن را تعیین می‌کنند. با این حال، ارزیابی کاربردی کیفیت خاک پیچیده است زیرا نیازمند ترکیب اطلاعات پراکنده از ویژگی‌های مختلف خاک در یک چارچوب ارزیابی واحد است. در سال‌های اخیر، ارزیابی کیفیت خاک با توسعه شاخص‌های کیفیت خاک (SQI) پیشرفت کرده است و رویکرد رایج در این زمینه انتخاب مجموعه داده حداقل (MDS) از کل ویژگی‌های اندازه‌گیری شده است (Bünemann et al., 2018). این انتخاب اغلب با روش‌های آماری چندمتغیره نظیر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) انجام می‌شود که مجموعه کوچکی از متغیرهای خاکی را که بیشترین واریانس را توضیح می‌دهند شناسایی می‌کند (Wang et al., 2023). پس از انتخاب ویژگی‌های کلیدی به عنوان مجموعه داده حداقل، هرکدام معمولاً نمره‌دهی شده تا ویژگی‌ها هم واحد و هم مقیاس شوند. توابع امتیازدهی می‌توانند خطی باشند یا غیرخطی باشند که روابط غیرخطی میان ویژگی خاک و عملکرد را منعکس می‌کنند (Askari et al., 2020). انتخاب روش خطی و غیرخطی ساده نیست زیرا هرکدام وزن متفاوتی به تغییرات در سطوح پایین یا بالا می‌دهند (Askari & Holden, 2014; Hamidi Nehrani et al., 2020).

برخی مطالعات نشان داده‌اند امتیازدهی غیرخطی (مانند منحنی سیگموئیدی یا سهمی) حساسیت شاخص کیفیت خاک را نسبت به تغییرات مدیریتی افزایش می‌دهد. در یک ارزیابی خاک کشاورزی، امتیازدهی غیرخطی توانایی بالاتری در تفکیک سطوح کیفیت خاک نسبت به امتیازدهی خطی داشت (Alaboz et al., 2023). در مقابل، پژوهشی اخیر در یک چشم‌انداز نیمه‌خشک جنگلی نشان داد که روش‌های خطی و غیرخطی رتبه‌بندی‌های مشابه‌ای از کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف ارائه می‌دهند (Wang et al., 2023). بنابراین، اثر انتخاب تابع امتیازدهی بر نتایج SQI به شرایط خاک و اقلیم بستگی دارد. نکته مهم دیگر، نحوه تجمیع امتیاز ویژگی‌ها در قالب شاخص

نهایی است. ساده‌ترین رویکرد، برابر دانستن وزن همه ویژگی‌ها و جمع (یا میانگین‌گیری) امتیازهاست که شاخص افزایشی نامیده می‌شود. در مقابل، شاخص‌های وزن‌دار اهمیت نسبی متفاوتی به شاخص‌ها می‌دهند که اغلب با استفاده از وزن‌های حاصل از PCA یا قضاوت کارشناسی تعیین می‌شود (Parvizi & Fatehi, 2024; Sadiq et al., 2021). انتخاب میان شاخص ساده و وزن‌دار می‌تواند بر نتایج نهایی SQI اثرگذار باشد. یک مطالعه در مراتع ایران نشان داد که استفاده از وزن‌های مشتق‌شده از PCA مقادیر شاخص را نسبت به روش بدون وزن تغییر داده و شاخص بهینه با حساسیت و کارایی بالاتر از طریق ترکیب خاصی از روش‌های امتیازدهی و وزن‌دهی به دست آمد (Sheidai Karkaj et al., 2019). در آن مطالعه، شاخص مبتنی بر MDS و میانگین هندسی وزن‌دار بهترین عملکرد را داشت و اثرات مدیریتی را با حساسیت بیشتری نسبت به شاخص افزایشی ساده آشکار کرد. با این حال، مشخص نیست که آیا این نتیجه در سایر داده‌های مراتع یا با روش امتیازدهی غیرخطی نیز صادق باشد یا خیر. مطالعه حاضر با مقایسه هر دو رویکرد افزایشی و وزن‌دار و خطی و غیرخطی به دنبال تعیین رویکرد بهینه برای مراتع نیمه‌خشک است.

مطالعات گذشته در مناطق نیمه‌خشک نشان داده‌اند که چرای مفرط منجر به کاهش کربن آلی، نیتروژن کل و فعالیت زیستی خاک و در مقابل افزایش جرم مخصوص ظاهری و خطر فرسایش می‌شود (Eldridge et al., 2017). در مقابل، اقدامات احیایی مراتع می‌تواند در طول زمان به بهبود ویژگی‌های خاک منجر شود. ممانعت طولانی‌مدت از چرا می‌تواند موجب بهبود قابل توجهی در کربن آلی و نیتروژن کل خاک نسبت به مراتع تحت چرای مداوم شود (Yu et al., 2019). نهال‌کاری (جنگل‌کاری) نیز از طریق افزایش ورودی لاشبرگ و ماده آلی، بهبود نفوذپذیری، پایداری خاکدانه‌ها و زیست‌توده میکروبی را تسهیل می‌کند (Wang et al., 2023). هرچند موفقیت این مداخلات به شرایط محلی بستگی دارد و در برخی مناطق خشک شدید حتی ممکن است اثرات منفی مشاهده شود (Baumgartner et al., 2024). این موارد نشان‌دهنده ضرورت ارزیابی‌های جامع و کمی کیفیت خاک مراتع تحت رژیم‌های مدیریتی متفاوت است.

با وجود توجه روزافزون به سلامت و کیفیت خاک، اکوسیستم‌های مرتعی نیمه‌خشک هنوز در پژوهش‌های انجام‌شده مرتبط با کیفیت خاک به‌طور کافی مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند (Erfanzadeh et al., 2025). چارچوب‌ها و شاخص‌های توسعه‌یافته برای ارزیابی کیفیت و سلامت خاک، بیشتر برای اراضی زراعی یا چراگاه‌های معتدل طراحی شده‌اند و میزان کاربرد آن‌ها در مراتع نیمه‌خشک به‌طور کامل آزمون نشده است (Williams, 2024). مهم‌ترین شکاف‌ها عبارتند از: (الف) نبود همگرایی در نتایج پژوهش‌ها درباره ویژگی‌های کلیدی برای ارزیابی کیفیت خاک در مناطق نیمه‌خشک (یعنی شناسایی ویژگی‌های خاکی که بیشترین حساسیت را به تخریب و بهبود نشان می‌دهند)، (ب) کمبود مطالعاتی که روش‌های مختلف محاسبه شاخص کیفیت خاک را در مراتع نیمه‌خشک با یکدیگر مقایسه کرده باشند، و (ج) فقدان داده‌های تجربی کافی برای سنجش اثربخشی اقدامات مدیریتی در مقیاس منطقه‌ای مانند ممانعت از چرا یا نهال‌کاری بر میزان واقعی بهبود کیفیت خاک، به‌ویژه در مراتع ایران (Williams, 2024).

بسیاری مطالعات انجام شده در ارتباط با کیفیت خاک‌های ایران یا بر یک زیرمجموعه از ویژگی‌های خاک (فقط ویژگی‌های فیزیکی یا فقط ویژگی‌های شیمیایی) تمرکز داشته‌اند (Maleki et al., 2022). با شاخص‌های کیفیت خاک را در سامانه‌هایی بررسی کرده‌اند که از نظر اقلیمی و مدیریتی با مراتع نیمه‌خشک استان زنجان تفاوت دارند (Sheidai Karkaj et al., 2019). در منطقه مورد مطالعه نیز پژوهش قبلی انجام شده به ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک محدود بوده (Shamkhani et al., 2025) اما تصویری جامع از کیفیت کلی خاک شامل ابعاد فیزیکی، شیمیایی و زیستی بر سامانه‌های مدیریتی مرتع را نشان نداده است. این پژوهش به ارزیابی جامع کیفیت خاک تحت سه سامانه مدیریتی مراتع در استان زنجان (شمال غرب ایران) شامل مرتع طبیعی (بدون مدیریت)، ممانعت از چرا همراه با بذركاری گونه‌های بومی و نهال‌کاری مراتع پرداخته است. اهداف این پژوهش عبارتند از: ۱) شناسایی مجموعه داده حداقل (MDS) برای ارزیابی کیفیت خاک مراتع نیمه‌خشک استان زنجان، با بررسی شناسه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر، ۲) توسعه و مقایسه رویکردهای مختلف محاسبه شاخص کیفیت خاک شامل نمره‌دهی خطی و غیرخطی و روش‌های تجمیع امتیاز ساده یا وزنی به‌منظور شناسایی کارآمدترین روش برای ارزیابی سامانه‌های مدیریتی مرتع، ۳) **ارزیابی تأثیر سامانه‌های متداول احیای مرتع** (قرق همراه با بذركاری، و نهال‌کاری) بر مجموعه‌ای از شناسه‌های کیفیت خاک و تبیین پیامدهای آن برای احیای کارکردهای زیست‌بومی خاک مراتع در مناطق نیمه‌خشک. برخلاف پژوهش پیشین در منطقه مورد مطالعه که بر ویژگی‌های فیزیکی تمرکز داشت (Shamkhani et al., 2025)، در این تحقیق مجموعه‌ای گسترده از شناسه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی به‌صورت هم‌زمان اندازه‌گیری و در قالب یک چارچوب یکپارچه برای کیفیت خاک تحلیل شده و یک مجموعه داده حداقل ویژه مراتع نیمه‌خشک زنجان شناسایی می‌شود که می‌تواند مبنای پایش ساده و کم‌هزینه کیفیت خاک در این مناطق باشد. این مطالعه ضمن توسعه روش‌شناسی تهیه شاخص کیفیت خاک برای مراتع نیمه‌خشک، شکاف

دانشی موجود در خصوص تأثیر اقدامات احیایی نظیر ممانعت از چرا و نهال‌کاری بر کیفیت خاک را پر کرده و یافته‌های آن می‌تواند راهنمایی علمی برای مدیران و سیاست‌گذاران منابع طبیعی در ایران و مناطق نیمه خشک مشابه باشد.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر در منطقه قزل‌تپه، واقع در جنوب غرب شهرستان زنجان و در مختصات جغرافیایی $36^{\circ}38'48''$ تا $38^{\circ}47'36''$ عرض شمالی انجام شد. این منطقه با مساحتی معادل ۹۱۵۶ هکتار، یکی از زیرحوزه‌های مهم قزل‌اوزن محسوب شده و از نظر ارتفاع بین ۱۴۳۹ تا ۲۷۵۵ متر از سطح دریا متغیر است (شکل ۱). اقلیم منطقه براساس طبقه‌بندی دومارتن نیمه‌خشک بوده، میانگین بارندگی سالانه ۳۵۹/۸ میلی‌متر، دمای میانگین سالانه ۸/۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین تبخیر و تعرق سالانه نیز ۱۱۷۴/۷ میلی‌متر برآورد شده است. بخش عمده سطح آن توسط نهشته‌ها و واحدهای چینه‌شناسی پرکامبرین-پالئوزوئیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک پوشش یافته است. کاربری فعلی اراضی حوزه آبخیز مورد مطالعه شامل اراضی بایر، مرتع، کشاورزی آبی و باغات در دامنه‌های مشرف به دره‌ها در کوهستان‌ها و تپه‌ماهورها و همچنین کشاورزی دیم می‌باشد. گونه‌های چیره مرتعی در منطقه مورد مطالعه شامل گونه‌های گل مریم، کلاغک، کاکوتی، آویشن، گوساله، گون، یونجه، شیرین بیان، تلخه بیان، خارشتر، علف پشمکی، علف گندمی، علف باغ و نی می‌باشد. به منظور بهبود ترکیب تنوع گیاهی حوزه قزل‌تپه، عملیات بیولوژیک اصلاح مراتع که در منطقه اجرا گردیده است، که شامل بذریاشی و قرق در ۲۶۷۸ هکتار از مراتع و نهال‌کاری (با استفاده از نهال‌های بادام، زیتون و صنوبر) در ۱۲۴۹ هکتار از مراتع می‌باشد. عملیات قرق با احداث موانع در اطراف اراضی به مدت ۵ سال اجرا شد و نهال‌کاری منطقه در سال ۱۳۹۱ انجام شده است و نهال‌ها در سه سال اول کشت تحت مراقبت و آبیاری قرار داشته‌اند. گونه‌های گیاهی مناسب که جهت اجرای عملیات بیولوژیک، بذریاشی و بذریاشی مورد استفاده قرار گرفته‌اند شامل یونجه، گونه علف پشمکی، علف گندمی کرک‌دار، گونه آگروپایرون، چاودار کوهی، گونه پوتریوم و گونه اسپرس می‌باشند. مکان‌های نمونه‌برداری با بررسی داده‌ها و اطلاعات مرتبط با نوع خاک، زمین‌شناسی، توپوگرافی، پوشش گیاهی و روش‌های مدیریتی رایج در مراتع بخش قزل‌تپه استان زنجان انتخاب و عملیات نمونه‌برداری انجام پذیرفت. سامانه‌های مدیریتی مورد بررسی در این پژوهش شامل ۱. مراتع با شرایط طبیعی و عدم اجرای عملیات حفاظتی، ۲. قرق و بذریاشی مراتع و ۳. نهال‌کاری در مراتع می‌باشد. داده‌های مورد نیاز برای انتخاب سایت‌های مطالعاتی، با توجه به مطالعات میدانی و صحرایی، مصاحبه با دامداران، کشاورزان، بهره‌برداران و مدیران اراضی و همچنین با استفاده از اطلاعات و نقشه‌های موجود در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان زنجان جمع‌آوری و مورد تحلیل قرار گرفت. پایگاه‌های نمونه‌برداری 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، تا حد امکان همگن و قابل مقایسه بودند.

1 *Salvia sp*

2 *Muscaria sp*

3 *Zizphora cilnopardiodes*

4 *Thymus serpylla*

5 *Olivierii Phlomis*

6 *Parrawianus Astragalus*

7 *Medicago sativa*

8 *Glycyrrhiza(sp)*

9 *Gobelia sp*

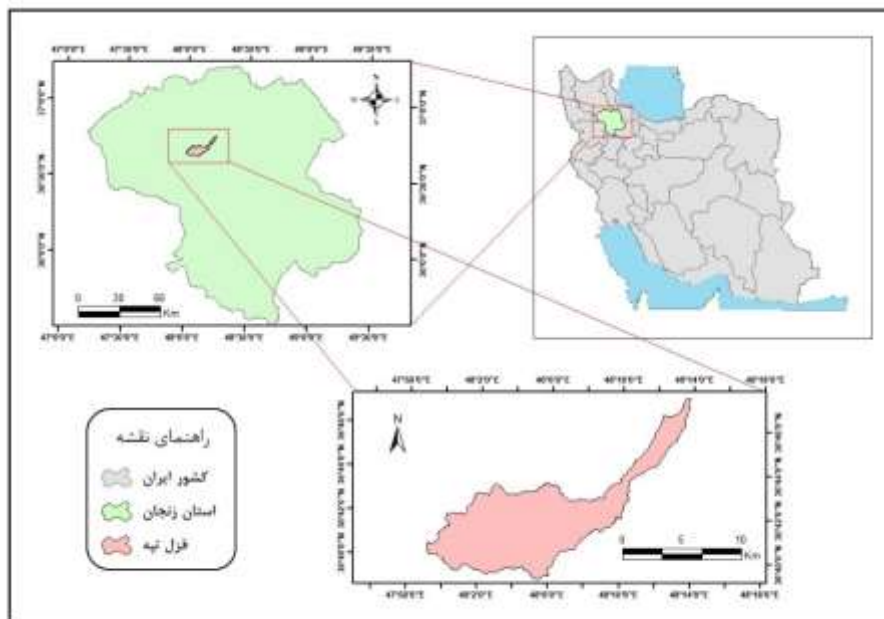
10 *Alhagi camelorum*

11 *Bromus tomentellus*

12 *Agropyron (sp)*

13 *Glomerata Dactylis*

14 *Phragmites australis*



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

نمونه برداری خاک و آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور اجرای این تحقیق، در فصل بهار سال ۱۴۰۲ عملیات نمونه‌برداری از خاک منطقه به روش کاملاً تصادفی صورت پذیرفت. در هر یک از سامانه‌های مدیریتی مورد مطالعه، تعداد ۲۰ نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری به صورت نمونه مرکب تهیه گردید و در مجموع از سه سامانه مدیریتی (مراعات با شرایط طبیعی و عدم اجرای عملیات حفاظتی، قرق و بذپاشی مراعات و نهال‌کاری)، ۶۰ نمونه خاک به صورت تصادفی جمع‌آوری شد. در هر نقطه، یک مربع ۴۰×۴۰ متر که از نظر پوشش گیاهی و خاک یکنواخت بود، مشخص گردید. در هر مربع، نمونه‌ها از عمق‌های ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر جمع‌آوری شدند و دو مجموعه نمونه شامل نمونه‌های خاک دست‌خورده و دست‌نخورده تهیه شد. نمونه مرکب ترکیبی از پنج زیرنمونه بود که از پنج نقطه با فاصله ۱۰ متر از هم، با پیمایش به شکل «W» در طول قطر مربع انتخاب شده بودند. همچنین سه نمونه خاک دست‌نخورده از مرکز هر مربع تهیه شد که نتایج اندازه‌گیری به صورت میانگین گزارش گردید. برای آنالیزهای زیستی، زیرنمونه‌ها در رطوبت مزرعه‌ای و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. برای تعیین جرم مخصوص ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع و ویژگی‌های مرتبط با منحنی رطوبتی خاک و منافذ خاک، نمونه‌های خاک دست‌نخورده نیز با بهره‌گیری از سیلندر استخراج شدند. به منظور اندازه‌گیری پایداری خاک‌دانه‌ها، نمونه‌های خاک‌دانه در ظروف پلاستیکی گردآوری شد. نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل شده و در شرایط هوای آزاد خشک و از الک ۲ میلی‌متری به منظور انجام اندازه‌گیری فیزیکی و شیمیایی خاک عبور داده شدند.

تعیین ویژگی‌های خاک

ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک با استفاده از روش‌های استاندارد و جامع اندازه‌گیری شدند (Jones, 2018). بافت خاک و درصد نسبی ذرات سیلت، شن و رس به استفاده از هیدرومتر استاندارد (ASTM no.152 H) تعیین گردید (Nelson & Sommers, 1982). جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه‌های فلزی (Hesse & Hesse, 1971; Grossman & Reinsch, 2002) و با استفاده از استوانه‌ای با ابعاد ۵ در ۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد، پایداری خاک‌دانه به روش الک تر در سری الک‌های استاندارد ۶/۳۵، ۴/۷۵، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۰۶ میلی‌متر اندازه‌گیری شد و میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌های پایدار در آب (GMD) با استفاده از رابطه زیر (۱) محاسبه گردید (Hamidi Nehrani et al., 2020; Kemper & Rosenau, 1986; Nath & Rattan, 2017; Sun et al., 2023; Pan et al., 2024).

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

که در آن GMD میانگین هندسی قطر خاک‌دانه، w_i وزن خاک‌دانه‌های روی هر الک، x_i میانگین قطر خاک‌دانه‌های باقی‌مانده روی هر الک و n تعداد الک می‌باشد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از روش بار ثابت در نمونه‌های خاک دست‌نخورده تعیین و درصد رطوبت اشباع نمونه‌های خاک به صورت وزنی تعیین شد (Gardner, 1986). ظرفیت‌های رطوبتی خاک به کمک دستگاه ستون آب آویزان و دستگاه صفحه فشاری اندازه‌گیری شد و رطوبت خاک در شرایط اشباع و در پتانسیل ۶- و ۳۳- کیلوپاسکال تعیین شد (Veihmeyer & Hendrickson, 1931). 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. 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 شد. ظرفیت تهویه‌ای خاک (AC) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد (Dexter et al., 2008; Masoumi Tabar Zanjani et al., 2025; Reynolds et al., 2002; Reynolds et al., 2008).

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

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 (درصد)، BD جرم مخصوص ظاهری مزرعه BD_{LLWR}^* ، 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 آب خاک (Sorptivity) با استفاده از روش فیلیپ 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 در ابتدای فرایند نفوذ از نسبت ارتفاع آب نفوذیافته به ریشه‌ی دوم زمان محاسبه شد. کربن زیست‌توده میکروبی با استفاده از روش تدخین با کلروفرم (تدخین-استخراج) اندازه‌گیری شد. برای این منظور ۱۰۰ گرم از هر نمونه خاک با کلروفرم به مدت ۲۴ ساعت تدخین (گازدهی) شده و با استفاده از محلول سولفات پتاسیم، استخراج شد. کربن زیست‌توده میکروبی، از اختلاف مقادیر محاسبه شده نمونه‌های تدخین شده و تدخین نشده به دست آمد (Joner & Leyval, 1997; Sylvia & Williams, 1992). تنفس میکروبی خاک بر پایه CO_2 تولید شده توسط ۵۰ گرم خاک تازه نگهداری شده در یک سیستم بسته در دمای حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد و به دام انداختن CO_2 در محلول NaOH که پس از آن با HCl تیتیر می‌شود اندازه‌گیری شد (Alef & Nannipieri, 1995).

شناسه‌های شیمیایی خاک شامل اسیدیته خاک (pH) در عصاره گل اشباع به کمک دستگاه pH متر (Jenway-2518) و هدایت الکتریکی خاک به کمک دستگاه EC متر (Jenway-3505 pH Meter) اندازه‌گیری شدند (Carter & Gregorich, 2007; Rhoades, 1982). کربن آلی خاک، به روش والکی-بلاک (Walkley & Black, 1934)، نیتروژن کل به

1 Geometric mean diameter

2 Air capacity

3 Soil structural index

4 Bulk density of least limiting water range



روش کج‌دال (VWLP Scientifica UDK 12) (Bremner, 1960) و فسفر قابل دسترس به روش عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم (Pierzynski, 2000) و اندازه‌گیری با اسپکتروفتومتر (Spectrum SP-UV 300SRB) تعیین شد. پتاسیم قابل دسترس به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم و قرائت با فلیم‌فوتومتر (Jenway- PFP 7) اندازه‌گیری شد (Nelson & Sommers, 1982). کربوهیدرات‌های خاک به کمک عصاره‌گیرهای آب داغ و اسید ۰/۵ مولار استخراج شد و به روش اسپکتروفتومتری (Spectrum SP-UV 300SRB) و با استفاده از استانداردهای گلوکز مورد سنجش قرار گرفت (DuBois et al., 1956).

شناسایی مجموعه داده حداقل

برای شناسایی ویژگی‌های مناسب جهت توسعه شاخص کیفیت خاک، ویژگی‌های اندازه‌گیری شده بین سامانه‌های مدیریتی مقایسه شدند و مشخصه‌های که تفاوت معنی‌داری بین سامانه‌های مدیریتی داشتند برای بررسی‌های بیشتر در نظر گرفته شدند. جهت شناسایی مجموعه داده حداقل از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر روی مقادیر استاندارد شده ویژگی‌ها اجرا شد (Askari & Holden, 2015). مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک برای انتخاب مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر در نظر گرفته شد (Askari & Holden, 2015; Brejda et al., 2000; Hamidi Nehrani et al., 2020) و جهت افزایش قابلیت تفسیر داده‌ها، چرخش واریماکس بر روی مؤلفه‌های انتخاب شده انجام شد. 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 ($r > 0.7$) و وزن پایین تر 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 هر مؤلفه به عنوان مهم‌ترین مشخصه‌ها تعیین می‌شوند (Vasu et al., 2016).

توسعه شاخص‌های کیفیت خاک

برای تولید شاخص‌های کیفیت خاک از مجموعه داده حداقل استفاده شد. مقادیر شاخص‌ها با استفاده از روش‌های خطی و غیرخطی به نمرات بدون واحد تبدیل شدند (Andrews et al., 2004; Raiesi, 2017). به‌طور کلی برای نمره‌دهی ویژگی‌های خاک از سه تابع بیشتر بهتر است (More is Better)، کمتر بهتر است (Less is Better) و حد بهینه (Midpoint Optimum) استفاده می‌شود (Andrews et al., 2004; Raiesi, 2017). در این مطالعه، با تکیه بر مجموعه داده حداقل و بر پایه تفسیر اثر هر متغیر بر شرایط خاک در سامانه‌های مدیریتی مرتع، تابع مناسب برای هر شاخص انتخاب شد. در نمره‌دهی خطی، از دو رابطه ۶ (بیشتر بهتر است) و ۷ (کمتر بهتر است) استفاده گردید.

$$SL = (x - m)/(n - m) \quad \text{رابطه ۶}$$

$$SL = 1 - ((x - m)/(n - m)) \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن، SL نمره خطی بین ۰ و ۱ است، x مقدار متغیر، m حداقل مقدار و n حداکثر مقدار هر شاخص می‌باشد (Askari & Holden, 2014; Mastro et al., 2008). برای نمره‌دهی غیرخطی متغیرها، از منحنی نوع سیگموئیدی رابطه ۸ استفاده شد (Bastida et al., 2006; Mastro et al., 2008).

$$SNL = 1 / (1 + \left(\frac{X}{X_0}\right)^b) \quad \text{رابطه ۸}$$

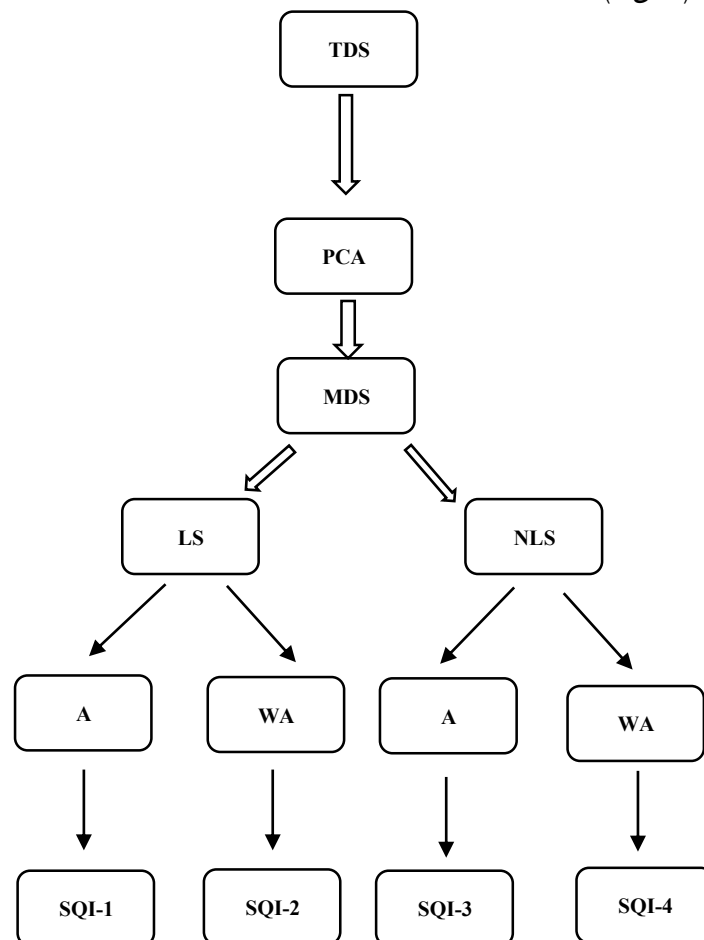
که در آن، SNL نمره‌دهی غیرخطی هر ویژگی خاک (از ۰ تا ۱)، x مقدار شناسه انتخاب شده، X_0 مقدار میانگین هر شناسه و b شیب معادله است که مقدار آن برای "بیشتر بهتر است" برابر ۲/۵- و برای "کمتر بهتر است" برابر ۲/۵+ می‌باشد (Askari & Holden, 2015; Sinha et al., 2009). برای ادغام نمرات ویژگی‌های مجموعه داده حداقل در شاخص‌های کلی، از روش جمع ساده رابطه ۹ و جمع وزنی رابطه ۱۰ استفاده شد.

$$SQI_w = \sum_{i=1}^n S_i / n \quad \text{رابطه ۹}$$

رابطه (۱۰)

$$SQI_w = \sum_{i=1}^n W_i S_i$$

که در آن S_i نمرات خطی یا غیرخطی شناسه‌ها، n تعداد متغیرها و W_i وزن متغیرها است (Masto et al., 2008). در نهایت، چهار شاخص کیفیت خاک محاسبه شد (شکل ۲).



شکل ۲- نمودار توسعه شاخص‌های کیفیت خاک

TDS, total data set; PCA, principal component analysis; MDS, minimum data set; LS, linear scoring; NLS, non-linear scoring; A, additive; WA, weighted additive; SQI, soil quality index.

مقایسه کارایی شاخص‌های کیفیت خاک

برای مقایسه کارایی شاخص‌های کیفیت خاک در تفکیک سامانه‌های مدیریتی مرتعی و انتخاب بهترین روش تهیه شاخص از تجزیه تشخیص استفاده 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 (شاخص‌های کیفیت خاک) که بیشترین تمایز را بین کلاس‌ها (سامانه‌های مدیریتی) دارند استفاده کرد (Karray & Bouricha, 2025; Xu et al., 2025).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

هم‌سان‌بودن واریانس و نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون لوین؛ بررسی بصری هیستوگرام‌ها و آزمون کولموگروف-اسمیرنوف مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای غیرنرمال با تبدیل لگاریتمی نرمال شدند. ویژگی‌های هدایت هیدرولیکی خاک، کربن آلی، شاخص پایداری

1 Levene's test

2 Kolmogorov-Smirnov test



ساختمان خاک دارای توزیع نرمال نبودند. برای مقایسه ویژگی‌ها و شاخص‌های کیفیت خاک بین سه سامانه مدیریتی در کاربری مرتع از تحلیل واریانس (ANOVA) استفاده شد. مقایسه میانگین با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. بررسی همبستگی بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون انجام شد. تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ صورت گرفت. نمره‌دهی متغیرها، شاخص‌سازی کیفیت خاک و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار میکروسافت اکسل (Microsoft Excel) انجام شد.

نتایج

توصیف آماری از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را در سه نوع سامانه مدیریتی مختلف (مرتع طبیعی، قرق و بذرپاشی، نهال‌کاری) در کاربری مرتع در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در جدول ۱ ارائه شده است. دامنه تغییرات برای ویژگی‌های فیزیکی شامل جرم مخصوص ظاهری (۱/۱ تا ۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، میانگین هندسی قطر خاکدانه (۱/۳ تا ۲/۹ میلی‌متر)، هدایت هیدرولیکی اشباع (۱/۰۱ تا ۲/۰۹ متر در روز)، تخلخل کل (۳۶/۳ تا ۵۸/۹ درصد)، تخلخل درشت (۱۵/۷ تا ۳۲/۴ درصد)، ظرفیت تهویه‌ای (۲۰/۷ تا ۴۰/۷ درصد)، رطوبت ظرفیت زراعی (۱۰/۶ تا ۱۷/۹ درصد)، رطوبت نقطه پژمردگی دائم (۴/۴ تا ۸/۹ درصد)، رطوبت قابل دسترس گیاه (۴/۶ تا ۱۰/۱ درصد)، شاخص پایداری ساختمان خاک (۴/۲ تا ۹/۷ درصد) و درجه تراکم خاک (۵۴/۹ تا ۸۰/۶ درصد) در منطقه مورد مطالعه بوده است. در بخش ویژگی‌های شیمیایی، کربن آلی خاک (۱/۱ تا ۲/۳ درصد)، ازت کل (۰/۰۲ تا ۰/۱۳ درصد)، فسفر قابل جذب (۷/۱ تا ۱۰/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، پتاسیم قابل جذب (۴۰/۸ تا ۲۸۴/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، هدایت الکتریکی (۴۰/۵ تا ۸۹۲/۹ میکروزیمنس بر سانتی‌متر)، pH (۷/۲ تا ۷/۹) و درصد سدیم تبادل (۳ تا ۹/۹ درصد) اندازه‌گیری شد. همچنین، کربوهیدرات‌های استخراج‌شده با آب داغ (۳/۲ تا ۹/۸۹ میلی‌گرم بر گرم خاک) و اسید ۰/۵ مولار (۲۴ تا ۴۸ میلی‌گرم بر گرم خاک) گزارش گردید. در بخش ویژگی‌های زیستی، دامنه تغییرات تنفس میکروبی خاک (۴ تا ۱۱/۸ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک در روز)، و کربن زیست‌توده میکروبی (۲۱۳/۳ تا ۶۹۲/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)، بود. نتایج تحلیل واریانس نشان داد از ۲۶ ویژگی اندازه‌گیری شده نوزده ویژگی تفاوت‌های معنی‌داری بین سامانه‌های مدیریتی داشتند (جدول ۱). در سامانه مرتع طبیعی، جرم مخصوص ظاهری در بالاترین سطح قرار داشت، در حالی که در قرق و نهال‌کاری کاهش محسوسی یافت ($P < 0/001$). هم‌زمان، میانگین هندسی قطر خاکدانه و شاخص پایداری ساختمان خاک در سامانه‌های احیایی به‌ویژه نهال‌کاری افزایش یافت که بیانگر بهبود وضعیت ساختمانی خاک و کاهش فشردگی است. همچنین، افزایش قابل توجه هدایت هیدرولیکی اشباع و تخلخل کل و منافذ درشت در این سامانه‌ها، بیانگر بهبود نفوذپذیری و تهویه خاک بود. در بخش ذخیره آب خاک نیز تغییرات چشم‌گیری مشاهده شد. رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت قابل دسترس گیاه و رطوبت خاک در نهال‌کاری بالاتر از مرتع طبیعی بود. به‌ویژه، مقدار رطوبت قابل دسترس گیاه از ۵/۶ درصد در مرتع طبیعی به بیش از ۸ درصد در نهال‌کاری رسید. این یافته‌ها اهمیت اقدامات احیایی در ارتقای توان خاک برای نگهداری آب و پشتیبانی از پوشش گیاهی را تأیید می‌کند. ویژگی‌های شیمیایی نیز الگوی مشابهی را نشان دادند. مقادیر کربن آلی و نیتروژن کل در سامانه‌های قرق و نهال‌کاری افزایش معنی‌داری نسبت به مرتع طبیعی داشتند ($P < 0/001$)، که دلالت بر افزایش ورودی مواد آلی و بهبود چرخه عناصر غذایی دارد. فسفر و پتاسیم کل نیز در این سامانه‌ها بیشتر بود. در مقابل، هدایت الکتریکی خاک در نهال‌کاری بالاتر از سایر سامانه‌ها بود، اگرچه pH و سدیم قابل جذب تغییر معنی‌داری نداشتند. از نظر زیستی، فعالیت میکروبی در سامانه‌های مدیریتی احیایی ارتقا یافت. میزان کربن زیست‌توده میکروبی و تنفس خاک در قرق و نهال‌کاری به‌طور معنی‌داری افزایش نشان دادند، به‌ویژه در نهال‌کاری که مقدار زیست‌توده میکروبی بیش از 500 mg kg^{-1} ثبت شد. افزایش کربوهیدرات‌های محلول نیز نشانه‌ای از بهبود کیفیت منابع کربنی برای میکروارگانیسم‌ها بود. در نهایت، بافت خاک (شن، سیلت و رس) بین سامانه‌های مدیریتی تفاوت معنی‌داری نداشت. این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات مشاهده‌شده در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی عمدتاً نتیجه اقدامات مدیریتی بوده و نه تفاوت‌های ذاتی بافت خاک. نتایج به‌روشنی نشان دادند که عملیات احیایی، به‌ویژه نهال‌کاری سبب بهبود کیفیت

فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک شدند. این تغییرات نشان‌دهنده نقش کلیدی عملیات احیایی در جلوگیری از تخریب خاک و ارتقای پایداری اکوسیستم‌های مرتعی نیمه‌خشک زنجان است.

جدول ۱. توصیف آماری ویژگی‌های اندازه گیری شده خاک در سامانه‌های مدیریتی مختلف در کاربری مرتع

ویژگی‌های خاک soil properties	واحد Unit	مرتع		قرق و بذریاشی		نهال کاری		F	معنی داری P-value	سطح
		میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار			
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD			
جرم مخصوص ظاهری	$\frac{g}{cm^3}$	۱/۳۲	۰/۱۰۷	۱/۲۲	۰/۰۸۵	۱/۱۱	۰/۰۶۱	۳۰/۰۶	۰/۰۰	
میانگین هندسی قطر خاک‌دانه	(mm)	۱/۷۹	۰/۳۱۶	۲/۲۰	۰/۳۱۰	۲/۱۱	۰/۴۰۳	۷/۷۳	۰/۰۰	
هدایت هیدرولیکی اشباع	$\frac{cm}{day}$	۱۴۷/۵۱	۲۹/۰۵	۱۷۲/۹۰	۲۳/۵۹	۱۷۴/۶۲	۲۳/۵	۷/۰۸	۰/۰۰	
ضریب جذب پذیری	$\frac{cm}{\sqrt{s}}$	۰/۴۹	۰/۲۴	۰/۴۷	۰/۲۵	۰/۵۲	۰/۲۶	۰/۱۹	۰/۸۲۲	
تخلخل کل	%	۴۳/۱۰	۳/۹۶	۴۶/۹۳	۵/۱۳	۵۱/۲۴	۵/۳۷	۱۴/۰۴	۰/۰۰	
تخلخل درشت	%	۲۰/۷۱	۲/۶۶	۲۳/۱۴	۲/۸۸	۲۶/۳۰	۳/۵۰	۱۶/۹۸	۰/۰۰	
ظرفیت تهویه‌ای	%	۲۶/۰۱	۳/۴۳	۲۹/۸۸	۳/۰۵	۳۳/۷۲	۴/۰۸	۲۳/۵۰	۰/۰۰	
رطوبت ظرفیت زراعی	%	۱۲/۵۹	۱/۴۹	۱۳/۷۴	۱/۳۵	۱۴/۹۰	۱/۶۵	۱۱/۷۱	۰/۰۰	
رطوبت نقطه پژمردگی	%	۷/۰۴	۰/۷۷	۶/۸۴	۰/۷۲	۶/۵۶	۰/۸۵	۱/۸۸	۰/۱۶۱	
آب قابل دسترس گیاه	%	۵/۵۶	۰/۸۰۱	۶/۹۰	۰/۷۲۸	۸/۳۴	۰/۸۹۸	۵۸/۵۲	۰/۰۰	
شاخص پایداری ساختمان خاک	%	۴/۹۷	۰/۵۲۵	۶/۲۹	۰/۶۲۲	۷/۱۴	۱/۱۵	۳۶/۰۴	۰/۰۰	
درجه فشردگی خاک	%	۷۲/۷۴	۵/۹۳	۶۷/۱۶	۴/۶۶	۶۱/۱۰	۳/۳۷	۲۹/۷۳	۰/۰۰	
هدایت الکتریکی خاک	$\mu s\ cm^{-1}$	۵۴۱/۴۸	۸۹/۷۷	۵۳۱/۱۲	۹۵/۸۵	۷۵۸/۴۵	۸۸/۶۶	۳۹/۳۷	۰/۰۰	
pH	-	۷/۵۳	۰/۲۵	۷/۶۲	۰/۲۱	۷/۶۱	۰/۲۴	۰/۸۳	۰/۴۴۰	
درصد سدیم قابل جذب	%	۶/۶۱	۱/۹۳	۵/۸۳	۲/۲۳	۶/۷۶	۲/۰۱	۱/۱۷	۰/۳۱۹	
نیتروژن کل	%	۰/۳۲	۰/۰۱۲	۰/۶۵	۰/۰۱۷	۰/۸۷	۰/۰۲۶	۴۰/۷۴	۰/۰۰	
فسفر کل	ppm	۷/۷۷	۰/۵۱۵	۸/۶۴	۰/۸۸۹	۸/۸۸	۰/۸۸۲	۱۱/۲۸	۰/۰۰	
پتاسیم کل	ppm	۱۱/۵۷	۵۱/۷۵	۱۶۳/۳۳	۴۹/۰۲	۱۷۸/۱۰	۷۵/۶۷	۵/۱۳	۰/۰۰۹	
کربن آلی خاک	%	۱/۲۴	۰/۱۱۹	۱/۵۸	۰/۱۳۹	۱/۸۴	۰/۲۸۵	۴۶/۶۹	۰/۰۰	
کربن زیتوده میکروبی	$mg\ kg^{-1}$	۳۱۳/۹۵	۷۵/۲۰	۴۴۳/۷۴	۸۴/۰۹	۵۲۶/۱۸	۹۶/۲۸	۳۱/۲۲	۰/۰۰	
تففس خاک	$mg\ c\ kg^{-1}$	۵/۸۰	۱/۳۸	۷/۲۳	۱/۲۱	۸/۹۶	۱/۶۷	۲۴/۱۵	۰/۰۰	
کربوهیدرات با عصاره گیر اسید	$mg\ g^{-1}\ soil$	۴۹/۳۱	۳/۹۸	۳۶/۹۷	۴/۸۲	۳۹/۹۸	۴/۴۷	۱۸/۷۸	۰/۰۰	
کربوهیدرات با عصاره گیر آب	$mg\ g^{-1}\ soil$	۵/۰۵	۱/۱۲	۶/۶۹	۱/۴۹	۷/۱۰	۱/۴۳	۱۲/۷۴	۰/۰۰	
شن	%	۵۷	۲/۱۳	۵۶	۱/۹۴	۵۵	۱/۷۰	۲/۱۵	۰/۱۲۶	
سیلت	%	۲۷	۲/۴۵	۲۷	۲/۵۲	۲۷	۲/۲۷	۰/۰۹	۰/۹۱۸	
رس	%	۱۶	۲/۷۲	۱۷	۲/۷۸	۱۸	۲/۴۴	۱/۶۲	۰/۲۰۶	

تعیین و بررسی حداقل مجموعه داده

نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) ویژگی‌های خاک در جدول ۲ ارائه شده است. ضریب KMO^1 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). نتایج نشان داد که سه مؤلفه استخراج شده در مجموع توانستند ۷۶/۳ درصد از تغییرات کل داده‌ها را تبیین کنند. مؤلفه اول (PC1) با مقدار ویژه ۱۱/۵۳ و سهم ۴۱/۸ درصدی، بیش‌ترین نقش را در توضیح تغییرات داشتند. این مؤلفه به‌طور عمده با ویژگی‌های فیزیکی و زیستی خاک مرتبط بود؛ به‌طوری که میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها، تخلخل تهویه‌ای، تخلخل درشت، شاخص پایداری ساختمان، کربن آلی و نیتروژن کل بیشترین بار عاملی را نشان دادند. این الگو بیان گر آن است که کیفیت فیزیکی خاک و وضعیت مواد آلی مهم‌ترین عوامل تمایز بین سامانه‌های مدیریتی به‌شمار می‌روند. مؤلفه دوم (PC2) با مقدار ویژه ۱/۸۲ و سهم ۱۷/۸ درصدی از واریانس، بیشتر با شاخص‌های مرتبط با ذخیره و دسترسی آب و همچنین شرایط شیمیایی خاک همبستگی دارد. بار عاملی بالای رطوبت قابل دسترس گیاه (۰/۷۷۴)، هدایت الکتریکی (۰/۷۴۲) و رطوبت ظرفیت زراعی (۰/۷۱۵) نشان داد که این مؤلفه توانایی خاک در ذخیره و هدایت آب و نیز

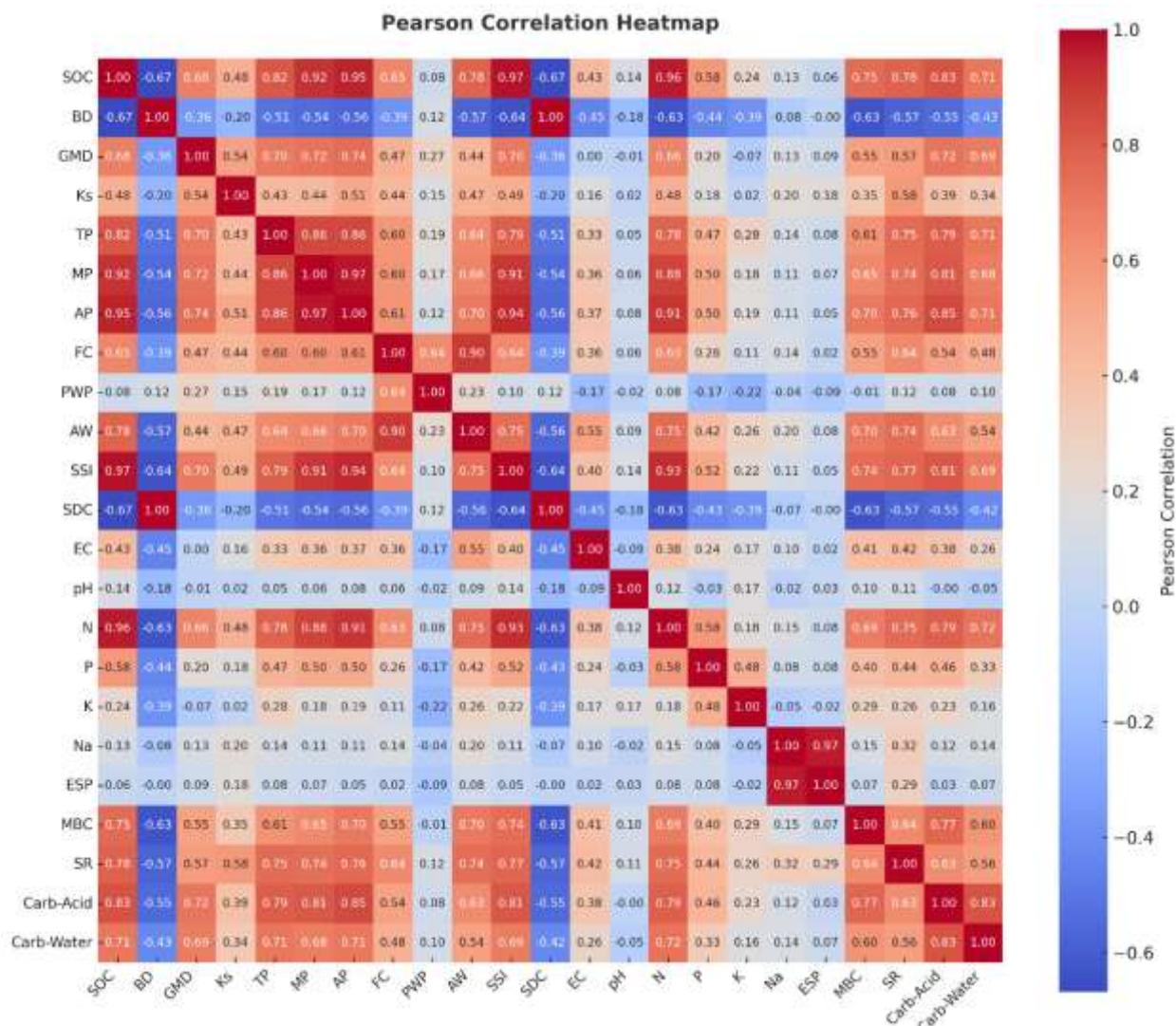


کنترل شوری را به خوبی بازتاب می‌دهد. بنابراین، (PC2) نمایان‌گر محور عملکردی مرتبط با ظرفیت آبی و هدایت الکتریکی خاک است. مؤلفه سوم (PC3) با مقدار ویژه ۱/۱۵ و سهم ۱۶/۶ درصدی واریانس، عمدتاً ویژگی‌های تغذیه‌ای و تراکم خاک را نمایندگی می‌کند. پتاسیم (۰/۷۶۴) بار عاملی مثبت بالا داشتند، در حالی که ویژگی‌های مرتبط با فشردگی خاک (۰/۷۰۹-) بار منفی قابل توجهی نشان دادند. این الگو نشان می‌دهد که حاصلخیزی شیمیایی و تراکم خاک در یک طیف متقابل قرار گرفته‌اند؛ به عبارت دیگر، افزایش تراکم خاک با کاهش دسترسی عناصر غذایی خاک همراه است. در نهایت، بر اساس بارهای عاملی و بررسی همبستگی بین ویژگی‌های بار عاملی بالا در هر مؤلفه (شکل ۳)، پنج ویژگی کلیدی به عنوان حداقل مجموعه داده (MDS) برای ارزیابی کیفیت خاک انتخاب شدند. این ویژگی‌ها شامل میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها از PC1، رطوبت قابل دسترس گیاه و هدایت الکتریکی از PC2 و پتاسیم و جرم مخصوص ظاهری از PC3 بودند. نتایج شکل ۳ نشان داد که بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک همبستگی‌های قوی و معنی‌داری با یکدیگر دارند. جرم مخصوص ظاهری (BD) با درجه فشردگی (SDC) همبستگی مثبت بالا و در مقابل با تخلخل کل (TP)، تخلخل درشت (MP) و ظرفیت تهویه‌ای (AP) همبستگی منفی نشان داد. میانگین هندسی قطر خاکدانه (GMD) و شاخص پایداری ساختمان (SSI) ارتباط مثبت و معنی‌داری با هدایت هیدرولیکی اشباع (KS) داشتند، که بیانگر نقش بهبود ساختمان خاک در افزایش نفوذپذیری است. در بعد شیمیایی، کربن آلی خاک (SOC) و نیتروژن کل (N) به طور مثبت با شناسه‌های زیستی مانند کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) و تنفس میکروبی خاک (SR) مرتبط بودند، در حالی که هدایت الکتریکی (EC) و سدیم تبادل (ESP) با یکدیگر همبستگی مثبت، اما با شناسه‌های زیستی رابطه منفی داشتند. کربن زیست‌توده میکروبی و تنفس میکروبی خاک همبستگی مثبت قوی با کربوهیدرات‌های محلول نشان دادند که اهمیت منابع کربنی را در پشتیبانی از فعالیت میکروبی تأیید می‌کند. این الگوها حاکی از آن است که ویژگی‌های ساختمانی و حاصلخیزی (مانند SOC، GMD و N) نقش کلیدی در پایداری فرآیندهای خاک دارند، در حالی که شوری و تراکم اثرات محدودکننده ایجاد می‌کنند. بنابراین، در این مرحله ویژگی‌های با همبستگی بالا و اطلاعات تکراری حذف و تنها متغیرهای مستقل‌تر برای تشکیل حداقل مجموعه داده (MDS) انتخاب شدند تا مبنای محاسبه شاخص کیفیت خاک (SQI) قرار گیرند.

جدول ۲. نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های خاک

پارامترهای مربوط به مؤلفه‌ها	PC1 مؤلفه اول	PC2 مؤلفه دوم	PC3 مؤلفه سوم
مقدار ویژه (Eigenvalue)	۱۱/۵۳	۱/۸۲	۱/۱۵
درصد واریانس	۴۱/۸۴۱	۱۷/۸۳۳	۱۶/۶۰۸
درصد واریانس تجمعی	۴۱/۸۴۱	۵۹/۶۷۴	۷۶/۲۸۲
ویژگی‌های خاک	بارهای عاملی		
میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها	۰/۹۰۶	۰/۴۹	-۰/۰۶۸
تخلخل تهویه‌ای	۰/۸۷۱	۰/۳۱۳	-۰/۲۶۳
تخلخل درشت	۰/۸۵۱	۰/۲۸۰	-۰/۲۶۸
کربوهیدرات با عصاره‌گیر اسید	۰/۸	۰/۲۲۶	-۰/۳۲۲
شاخص پایداری ساختمان خاک	۰/۸۰۵	۰/۳۸۵	-۰/۳۳۳
تخلخل کل	۰/۸۰۴	۰/۲۵۳	-۰/۲۸۱
کربن آلی خاک	۰/۸۰۰	۰/۴۰۲	-۰/۳۷۳
نیتروژن کل	۰/۷۹۶	۰/۳۶۶	-۰/۳۳۶
کربوهیدرات با عصاره‌گیر آب	۰/۷۸۹	۰/۱۲۵	-۰/۱۹۶
تنفس خاک	۰/۶۲۴	۰/۵۴۰	-۰/۲۴۱
کربن زیست‌توده میکروبی	۰/۵۷۳	۰/۴۱۹	-۰/۳۹۷
هدایت هیدرولیکی اشباع	۰/۵۳۵	۰/۴۰۰	-۰/۲۱۵
رطوبت قابل دسترس گیاه	۰/۴۸۱	۰/۷۷۴	-۰/۲۲۵
هدایت الکتریکی خاک	۰/۰۱۲	۰/۷۴۲	-۰/۳۰۶
رطوبت ظرفیت زراعی	۰/۴۸۵	۰/۷۱۵	-۰/۰۱۰
پتاسیم	-۰/۰۱۱	۰/۰۲۵	۰/۷۶۴
جرم مخصوص ظاهری	-۰/۳۱۰	-۰/۴۱۶	-۰/۷۰۹
درجه فشردگی خاک	-۰/۳۰۸	-۰/۴۱۵	-۰/۷۰۹
فسفر کل	۰/۳۶۳	۰/۰۴۳	۰/۶۵۶

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



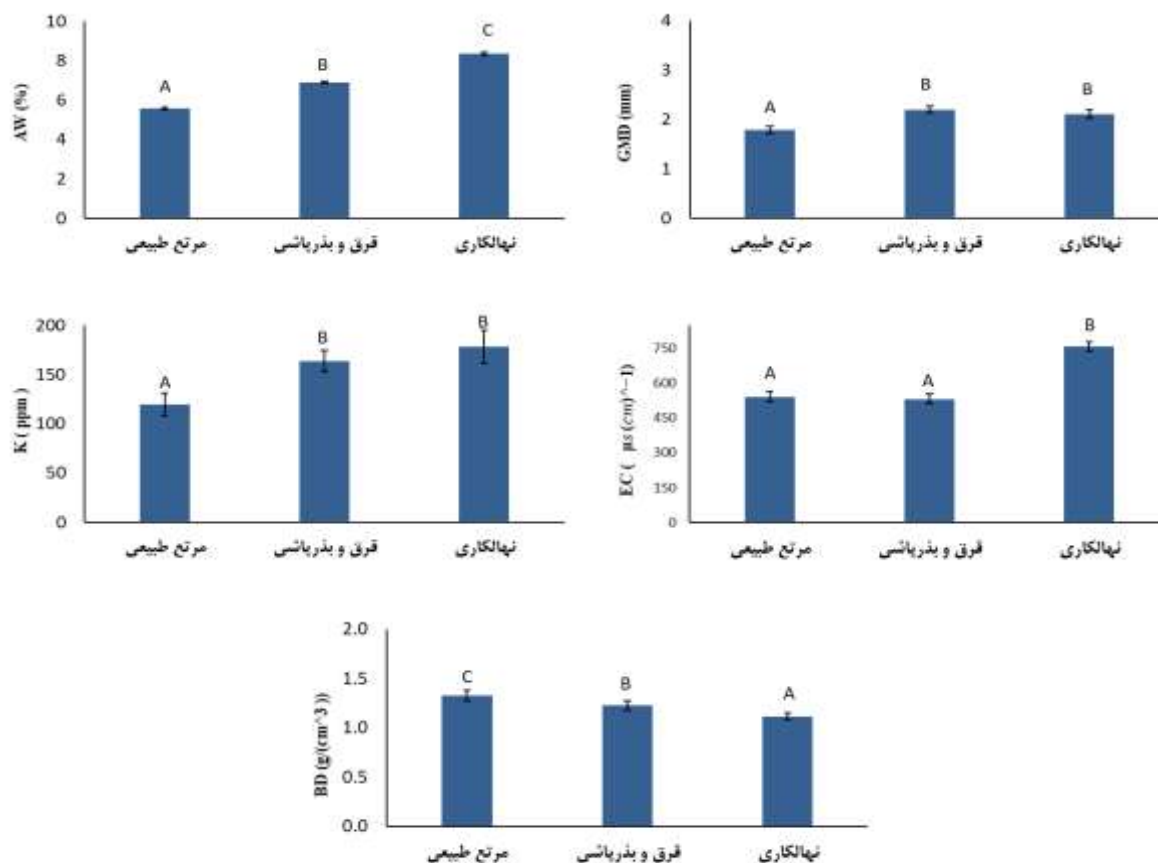
شکل ۳ - نقشه حرارتی ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های خاک

BD: Bulk density; GMD: Geometric mean diameter; Ks: Saturate hydraulic conductivity; TP: Total porosity; SOC: Soil organic carbon; MP: Macro porosity; AP: Aeration porosity; FC: Field capacity; PWP: Permanent Wilting Point; AW: Available water; SSI: Soil structural index; SDC: Soil degree of compactness; N: Total nitrogen P: Available phosphorous; K: Available potassium; EC: Electric conductivity; Carb-Acid: ESP: Exchangeable sodium percentage; SR: Soil basal respiration; MBC: Microbial biomass carbon; Na: Sodium; Carbohydrate extracted by acid; Carb-Water: Carbohydrate extracted by hot water.

شکل ۴ مقایسه میانگین پنج ویژگی کلیدی انتخاب شده به عنوان حداقل مجموعه داده (MDS) شامل میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD)، رطوبت قابل دسترس گیاه (AW)، هدایت الکتریکی (EC)، پتاسیم قابل جذب (K) و جرم مخصوص ظاهری (BD) را در سه سامانه مدیریتی مختلف نشان می‌دهد. میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) در سامانه‌های مدیریتی قرق و نهال کاری به طور معنی داری بیشتر از مرتع طبیعی بود. بالاترین مقدار در نهال کاری مشاهده شد که بیانگر بهبود پایداری ساختمانی و تشکیل خاک دانه‌های پایدارتر در اثر عملیات احیایی است. در مقابل، جرم مخصوص ظاهری (BD) در مرتع طبیعی بیشترین مقدار را داشت و در سامانه نهال کاری به طور معنی داری کاهش یافت، که کاهش فشردگی و افزایش تخلخل را نشان می‌دهد. این الگو تأیید می‌کند که مدیریت‌های احیایی موجب بهبود کیفیت فیزیکی خاک و بازسازی ساختمان آن شده‌اند. مقدار رطوبت قابل دسترس گیاه (AW) در نهال کاری به بالاترین سطح رسید که نشان دهنده ارتقای ظرفیت نگهداری آب و بهبود شرایط رطوبتی برای رشد گیاهان است. این موضوع بیانگر ارتقای ظرفیت نگهداری آب در خاک و افزایش کارایی رطوبتی در نتیجه اصلاح مدیریت است. هدایت الکتریکی (EC) نیز در سامانه نهال کاری به طور معنی داری بالاتر از سایر سامانه‌ها بود، که می‌تواند به تجمع املاح محلول در خاک تحت این مدیریت مرتبط باشد. هرچند این افزایش ممکن است مزایای فیزیکی و زیستی خاک را تحت تاثیر قرار دهد، اما در این مطالعه به عنوان یک پیامد جانبی احیا مشاهده شد. پتاسیم قابل جذب (K) در سامانه نهال کاری بیشترین مقدار را داشت و نسبت به مرتع طبیعی افزایش معنی داری نشان داد که بیانگر بهبود چرخه عناصر



غذایی و حاصلخیزی خاک است. نتایج شکل ۴ نشان داد که عملیات مدیریتی به‌ویژه نهال‌کاری، با کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش پایداری خاک‌دانه، ظرفیت نگهداشت آب در خاک و محتوای پتاسیم، موجب بهبود چشم‌گیر کیفیت خاک شدند. هرچند افزایش هدایت الکتریکی در این سامانه نیازمند مدیریت دقیق‌تر است، اما در مجموع، شناسه‌های کلیدی کیفیت خاک نشان دادند که اقدامات ترمیمی تأثیر مثبتی بر پایداری و حاصلخیزی خاک در مراتع نیمه‌خشک زنجان داشته‌اند.



شکل ۴-مقایسه میانگین ویژگی‌های خاک انتخاب شده به عنوان حداقل داده بین مدیریت‌های مختلف. حروف انگلیسی متفاوت در هر نمودار نشان دهنده تفاوت معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ می‌باشد.

Geometric mean diameter; AW, Available water; EC, Electric conductivity; K: Available potassium, BD: Bulk density. GMD,

مقایسه شاخص کیفیت خاک بین سامانه‌های مدیریتی

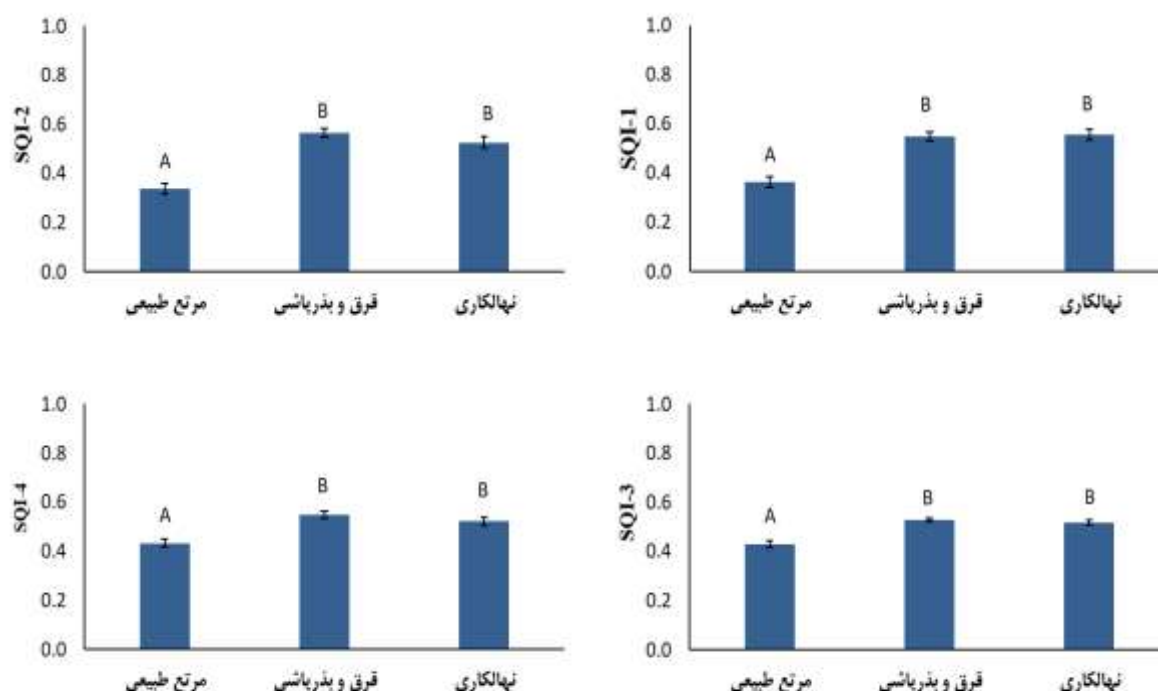
به‌منظور محاسبه شاخص‌های کیفیت خاک، پنج ویژگی کلیدی که به‌عنوان حداقل مجموعه داده در مرحله قبل انتخاب شده بود، استفاده شد. برای نمره‌دهی میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها، رطوبت قابل دسترس گیاه و پتاسیم قابل جذب از تابع "بیشتر بهتر است" استفاده شد؛ درحالی‌که برای هدایت الکتریکی و جرم مخصوص ظاهری تابع "کمتر بهتر است" به کار رفت (Askari & Holden, 2014; Hamidi, 2020). در نهایت چهار شاخص کیفیت خاک (SQI-1 تا SQI-4) طبق شکل ۲ محاسبه شد. نتایج جدول ۴ و شکل ۵ نشان داد که شاخص‌های کیفیت خاک بین سه سامانه مدیریتی تفاوت معنی‌داری داشت ($P < 0.001$). در تمامی روش‌های محاسبه شاخص کیفیت خاک (شامل SQI-1 تا SQI-4)، بالاترین مقادیر مربوط به سامانه‌های احیایی (قرق و بذرپاشی و نهال‌کاری) بود، در حالی که سامانه مرتع طبیعی پایین‌ترین مقادیر را نشان داد. به‌عنوان مثال، میانگین SQI-1 در مرتع طبیعی ۰/۳۶ بود، در حالی که این مقدار در قرق و بذرپاشی ۰/۵۵ و در نهال‌کاری ۰/۶۱ به دست آمد. این روند در سایر شاخص‌ها نیز مشاهده شد؛ به‌طوری‌که SQI-2 و SQI-3 در مرتع طبیعی به ترتیب حدود ۰/۳۴ و ۰/۴۳ بودند و در سامانه‌های مدیریتی ترمیمی بیش از ۰/۵۳ بودند. با وجود تفاوت در نوع روش محاسبه (خطی در مقابل غیرخطی، و وزنی در مقابل غیر وزنی)، نتایج نشان دادند که الگوی کلی یکسان است. نهال‌کاری و قرق منجر به ارتقای قابل توجه کیفیت خاک نسبت به مرتع طبیعی شدند. تفاوت معنی‌دار آماری بین سامانه‌ها (براساس آزمون LSD، $P < 0.05$) مؤید

آن است که این اثر مستقل از روش نمره‌دهی و ترکیب شاخص‌ها بوده است. بهبود SQI در سامانه‌های ترمیمی را می‌توان به ارتقای ویژگی‌های فیزیکی (کاهش جرم مخصوص و افزایش پایداری خاک‌دانه)، شیمیایی (افزایش کربن آلی و پتاسیم) و زیستی (افزایش فعالیت میکروبی و تنفس خاک) نسبت داد که در بخش‌های قبلی گزارش شد. در مقابل، پایین بودن SQI در مرتع طبیعی بازتابی از تراکم بالاتر خاک، محتوای کمتر رطوبت قابل دسترس و سطح پایین‌تر عناصر غذایی است. به‌طور کلی، نتایج جدول ۴ و شکل ۵ نشان دادند که مدیریت‌های احیایی، به‌ویژه نهال‌کاری، به‌طور معنی‌داری شاخص کیفیت خاک را بهبود بخشیده‌اند. این اثر هم در روش‌های خطی و هم غیرخطی، و هم در شاخص‌های وزنی و غیر وزنی مشاهده شد که اعتبار و پایداری نتایج را تقویت می‌کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اجرای این اقدامات نه تنها از روند تخریب خاک جلوگیری کرده بلکه بستر مناسبی برای ارتقای پایداری اکوسیستم‌های مرتعی نیمه‌خشک فراهم کرده است.

جدول ۴. خلاصه نتایج واریانس شاخص‌های کیفیت خاک بین مدیریت‌های مرتعی

شاخص	مرتع طبیعی		قرق و بذریاشی		نهال‌کاری		F value	P-value
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار		
SQI-1	۰/۳۶	۰/۱۰	۰/۵۵	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۵۶	۲۵/۴۸	۰/۰۰۰
SQI-2	۰/۳۴	۰/۱۴	۰/۵۷	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۵۳	۱۲/۵۱	۰/۰۰۰
SQI-3	۰/۴۳	۰/۰۶	۰/۵۳	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۵۲	۲۰/۰۲	۰/۰۰۰
SQI-4	۰/۴۳	۰/۰۸	۰/۵۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۵۲	۱۴/۱۸	۰/۰۰۰

SQI, Soil quality index.



شکل ۵. اثر مدیریت‌های مختلف بر شاخص‌های کیفیت خاک. حروف انگلیسی متفاوت در هر نمودار نشان دهنده تفاوت معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ می‌باشد.
SQI, Soil quality index.

نتایج تحلیل تشخیص

جدول ۵ نتایج تجزیه تشخیص را برای مقایسه کارایی شاخص‌های کیفیت خاک در تفکیک سامانه‌های مدیریتی مرتعی نشان می‌دهد. آزمون لامبدای ویلکز ($\text{Chi-square} = 36/402$) در سطح احتمال ۰/۰۰۱ معنی‌دار بودند که نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در تمایز بین سامانه‌ها است. مقدار ویژه (Eigenvalue) برابر ۰/۸۹۴ بود که صد درصد واریانس تابع تشخیصی را تبیین کرد. ضرایب تفکیک نشان دادند که شاخص SQI-1 (محاسبه‌شده بر اساس نمره‌دهی خطی و روش غیر وزنی یا تجمعی ساده) بالاترین ضریب (۱۰/۳۳۲) را داشت. این موضوع بیانگر آن است که SQI-1 نسبت به سایر شاخص‌ها قدرت بیشتری در تمایز بین سامانه‌های مرتعی مختلف دارد. به عبارت



دیگر، این شاخص به‌طور مؤثری توانسته تغییرات ناشی از مدیریت‌های متفاوت (مرتج طبیعی، قرق و بذرپاشی، و نهال‌کاری) را در کیفیت خاک بازتاب دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از روش خطی و غیر وزنی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک نه تنها ساده‌تر است، بلکه توانایی بالایی در جداسازی اثرات مدیریتی دارد. از آنجا که SQI-1 توانست با دقت بالایی سامانه‌های مدیریتی را تفکیک کند، می‌تواند به‌عنوان شاخص برتر برای پایش کیفیت خاک و ارزیابی اثر مدیریت‌های ترمیمی در مراتع نیمه‌خشک استان زنجان و مناطق با خاک مشابه پیشنهاد شود.

جدول ۵. نتایج تحلیل تشخیص

تابع	مقدار ویژه	واریانس	Wilks' Lambda	Chi-square	P Value
Function	Eigenvalue	Variance%			
۱	۰/۸۹۴	۱۰۰	۰/۵۲۸	۳۶/۴۰۲	۰/۰۰۰
شاخص انتخاب شده					
ضریب تفکیک					
Discriminant Coefficient					
۱۰/۳۳۲					
SQI-1					

SQI, Soil quality index.

بحث

نتایج این پژوهش به‌روشنی نشان داد که اقدامات مدیریتی احیایی در مراتع نیمه‌خشک استان زنجان، به‌ویژه سامانه‌های قرق و بذرپاشی و نهال‌کاری، موجب بهبود معنی‌دار در کیفیت خاک شده‌اند. در مقایسه با سامانه مرتج طبیعی، سامانه‌های احیایی منجر به بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک شدند که به نوبه خود نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری عملکرد اکوسیستم‌های مرتعی ایفا می‌کنند. این یافته‌ها هم‌راستا با رویکردهای جهانی در راستای احیای اکوسیستم‌های تخریب‌شده بوده و می‌توانند مبنای طراحی راه‌کارهای بومی برای مقابله با بیابان‌زایی در مناطق نیمه‌خشک باشند (Bronick & Lal, 2005; Islam et al., 2025).

ارزیابی شناسه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی کیفیت خاک

نتایج نشان داد که اقدامات احیایی مرتج (قرق و بذرپاشی و نهال‌کاری) بهبود قابل‌توجهی در ویژگی‌های فیزیکی خاک نسبت به مرتج طبیعی ایجاد کرده‌اند. به‌طور مشخص، جرم مخصوص ظاهری خاک که در مرتج طبیعی بیشترین مقدار را داشت، در سامانه‌های قرق و به‌ویژه نهال‌کاری کاهش معنی‌داری یافت (جدول ۱). این کاهش ناشی از رفع تراکم خاک بر اثر عدم چرای دام و نفوذ ریشه‌های گیاهی است که ساختمان خاک را مجدداً متخلخل می‌کند (Gu et al., 2025). پدیده‌ی فشردگی خاک در مراتع چرای آزاد به‌خوبی مستند شده است؛ پایداری دام‌ها با اعمال فشار بر خاک موجب افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش نفوذپذیری می‌شود (Morris et al., 2025). در مقابل، حذف چرا به خاک فرصت ترمیم ساختمان را می‌دهد، چنان‌که در یک مطالعه، قرق بلندمدت باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک تا ۵۷ درصد در بخش‌های متراکم سطحی شده است (Sáez et al., 2025). در تحقیق حاضر نیز کاهش جرم مخصوص ظاهری همراه با افزایش ویژگی‌های ساختمانی خاک مشاهده شد. میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها (GMD) و شاخص پایداری ساختمان خاک در سامانه‌های احیایی بیشتر از مرتج طبیعی بود که بیانگر ایجاد خاک‌دانه‌های بزرگ‌تر و پایدارتر است (جدول ۱ و شکل ۴). این امر حاصل افزایش مواد آلی و فعالیت زیستی است که مانند مواد چسبنده طبیعی ذرات خاک را به‌هم متصل می‌کند و ساختمان دانه‌ای ایجاد می‌کند (Gu et al., 2025). مطالعات جهانی نیز تأیید می‌کنند که افزودن پوشش گیاهی (مثلاً از طریق جنگل‌کاری) موجب افزایش خاکدانه‌سازی و کاهش فشردگی می‌شود. در نهال‌کاری اراضی زراعی در شمال چین مشاهده شد که محتوای خاک‌دانه‌های درشت و تخلخل افزایش یافته و در نتیجه ظرفیت نفوذ و نگه‌داشت آب در خاک بهبود یافته است (Gu et al., 2025). همسو با آن، در تحقیق Mongil-Manso et al. (2022) در اسپانیا، نفوذپذیری آب در اراضی تحت جنگل‌کاری کاج به‌مراتب بیشتر از مراتع مجاور بود که مؤید تأثیر عمیق درختان در بهبود شبکه منافذ خاک و هدایت هیدرولیکی است. بنابراین، کاهش معنی‌دار تراکم و افزایش تخلخل کل و منافذ درشت در سامانه‌های قرق و نهال‌کاری این پژوهش، نتیجه‌ای مورد انتظار است (جدول ۱ و شکل ۴). پیامد این تغییرات، افزایش ظرفیت نگه‌داشت آب در خاک‌های احیاشده بود که در نتایج به‌صورت افزایش رطوبت ظرفیت زراعی و رطوبت قابل دسترس گیاه در نهال‌کاری منعکس شد. مقدار رطوبت قابل دسترس گیاه از حدود ۵/۶ درصد در مرتج طبیعی به بیش از ۸ درصد در نهال‌کاری رسید (جدول ۱ و شکل

۴)، که نشان می‌دهد، خاک تحت مدیریت نهال کاری توان تأمین رطوبت برای گیاهان را به‌طور چشم‌گیری بهبود داده است. تحقیقات دیگر در مناطق نیمه خشک نیز روند مشابهی را گزارش کرده‌اند؛ برای مثال جنگل کاری در اراضی نیمه‌خشک باعث افزایش ظرفیت نگهداشت آب در خاک و پیوستگی هیدرولیکی خاک شده است و اثر نهایی بر رطوبت قابل‌دسترس گیاه به تغییر توزیع اندازه منافذ بستگی دارد (Gu et al., 2025).

چنین خاکی در برابر خشک‌سالی مقاوم‌تر بوده و می‌تواند عملکرد پوشش گیاهی را در اقلیم نیمه‌خشک ارتقا دهد. این یافته‌ها دارای اهمیت بوم‌شناختی است زیرا در مناطق خشک، آب مهم‌ترین عامل محدودکننده تولید زیست‌توده محسوب می‌شود. از نظر ویژگی‌های شیمیایی، افزایش محسوس کربن آلی و عناصر غذایی در سامانه‌های مدیریتی احیایی مشاهده گردید (جدول ۱). محتوی کربن آلی و نیتروژن کل خاک در قرق و نهال کاری به ترتیب حدود ۳۰ تا ۱۱۰ درصد بالاتر از مرتع طبیعی بود، که به‌روشنی نشان‌دهنده افزایش ورود بقایای آلی و بهبود چرخه عناصر غذایی است. بسیاری از مطالعات افزایش کربن و نیتروژن خاک را پس از حذف چرای دام تأیید کرده‌اند (Liu et al., 2020). یک پژوهش در مراتع کوهستانی فلات تبت نشان داد که به‌طور متوسط قرق مراتع باعث افزایش ۱۶/۵ درصدی در ذخیره کربن آلی و ۱۱/۲ درصدی در نیتروژن کل خاک شده است (Liu et al., 2020). مکانیزم این امر به تجمع بقایای گیاهی بر سطح خاک، افزایش فعالیت ریشه‌ای و کاهش فرسایش خاک نسبت داده می‌شود (Macheroum et al., 2025). در تحقیق حاضر نیز پوشش گیاهی متراکم‌تر و تولید بیشتر لاشبرگ در مناطق قرق‌شده و نهال کاری‌شده موجب بالارفتن ماده آلی خاک و از این رو حاصلخیزی آن شده است. بهبود حاصلخیزی علاوه بر کربن و نیتروژن، در افزایش معنی‌دار فسفر و پتاسیم قابل‌دسترس گیاه نیز مشهود بود. نهال کاری حدود سه برابر پتاسیم بیشتری نسبت به مرتع طبیعی در خاک فراهم ساخت که دلالت بر غنای بیشتر خاک از نظر عناصر غذایی پرمصرف دارد (Mao et al., 2024). چنین افزایشی می‌تواند نتیجه بازگشت بقایای غنی از عناصر غذایی (برگ‌ها، شاخه‌ها) به خاک و همچنین توسعه سامانه ریشه‌ای درختان باشد که با کاوش حجمی بیشتر در خاک، جذب عناصر را افزایش و پس از مرگ ریشه‌ها، این عناصر را در لایه سطحی آزاد می‌کند (Yuan et al., 2025). افزون بر این، فعالیت‌های زیستی خاک نیز تحت تأثیر مثبت مدیریت‌های احیایی قرار گرفت. مقدار کربن زیست‌توده میکروبی و تنفس پایه میکروبی در سامانه‌های قرق و نهال کاری به‌طور چشمگیری بیشتر از مرتع طبیعی (چرای آزاد) بود (جدول ۱)، کربن زیست‌توده میکروبی در نهال کاری از ۲۱۳ به بیش از ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافت). علت این امر فراهمی بستر غذایی بهتر (ماده آلی و ریشه‌های مرده) و رطوبت مناسب‌تر برای میکروب‌ها است. تحقیقات پیشین نیز نشان داده‌اند که حذف چرای دام تنوع و فعالیت میکروبی خاک را تقویت می‌کند، زیرا با افزایش پوشش گیاهی، ورود مواد آلی محلول و قابل‌مصرف برای ریزجانداران خاک‌زی بیشتر می‌شود (Yuan et al., 2025). گزارش شده است که قرق مراتع در عرض تنها یک سال می‌تواند تنفس میکروبی و جمعیت ریزجانداران را به‌طور معنی‌داری افزایش دهد و دوره‌های طولانی‌تر قرق یا جنگل کاری، حتی تغییرات ترکیب جامعه میکروبی (افزایش باکتری‌های هوازی مفید خاک) را موجب می‌گردد (Yao et al., 2023). هدایت الکتریکی خاک (شوری خاک) در سامانه نهال کاری نسبت به سایر تیمارها افزایش نشان داد. هرچند این مقدار هنوز در محدوده غیرشور قرار داشت، اما بیانگر احتمال انباشت املاح در اثر تغییر کاربری است. هرچند سایه تاج‌پوش درختان می‌تواند تبخیر سطحی خاک را کاهش دهد، اما درختان معمولاً تبخیر تعرق کل را از طریق افزایش تعرق و باران ربایی (بالا می‌برد که حاصل آن کاهش رطوبت در دسترس برای آبشویی عمقی و در نتیجه مستعد شدن تجمع نمک در افق‌های سطحی است. شواهد متعددی در نواحی خشک و نیمه‌خشک نشان می‌دهد که باران ربایی و تعرق بیشتر توده‌های درختی بخشی از بارش مؤثر را از چرخه نفوذ و آبشویی خارج می‌کند (Skhosana et al., 2023). در اقلیم‌های کم‌بارش، برداشت آب توسط ریشه‌ها و افزایش تبخیر و تعرق معمولاً به کاهش جریان عمقی و آبشویی می‌انجامد و در نبود ورودی آب کافی، پتانسیل تجمع املاح را بالا می‌برد. مطالعات فرایندی در زیست‌بوم‌ها خشک این سازوکار را گزارش کرده‌اند (Dagar et al., 2023). در اراضی تحت چرای هرچند ورود املاح از طریق فضولات دامی می‌تواند به باعث افزایش EC موضعی شود، اثر خالص آن به شدت و مدیریت چرای دام وابسته است و در بسیاری از مطالعات، تغییرات EC ناچیز یا محدود گزارش شده است (Bastani et al., 2023).

به عبارت دیگر، در کنار مزایای فیزیکی و زیستی متعدد نهال کاری، باید به مدیریت شوری خاک نیز توجه داشت تا اثرات منفی تجمع املاح کنترل شود. با این حال، در مجموع می‌توان گفت اقدامات احیایی در مراتع نیمه‌خشک استان زنجان، از طریق بهبود توأمان خصوصیات فیزیکی (کاهش تراکم و افزایش نفوذپذیری)، شیمیایی (افزایش ماده آلی و عناصر غذایی) و زیستی (افزایش فعالیت میکروبی)،

موجب ارتقای قابل توجه کیفیت خاک شده است. این ارتقا کیفیت خاک پایه و اساس لازم برای بازگشت پوشش گیاهی بومی، افزایش تولید علوفه و تاب‌آوری اکوسیستم در برابر خشک‌سالی و فرسایش را فراهم می‌آورد که از منظر مدیریت پایدار اراضی حائز اهمیت است (Macheroum et al., 2025). به بیان دیگر، نتایج این پژوهش حمایت علمی از برنامه‌های حفاظت خاک و آب در مراتع بوده و نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در احیای مراتع تخریب‌یافته (از طریق قرق یا نهال کاری کنترل‌شده) یک راه‌برد مؤثر برای بهبود خدمات زیست‌بوم (مانند ذخیره آب و کربن خاک) در اقلیم‌های خشک محسوب می‌شود.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی و شناسایی حداقل مجموعه داده

برای شناسایی مهم‌ترین شاخص‌های خاک، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بر روی نوزده متغیر اندازه‌گیری‌شده که تفاوت معنی‌داری بین سامانه‌های مدیریتی نشان دادند (جدول ۱)، انجام شد. سه مؤلفه اول در مجموع حدود ۷۶ درصد واریانس کل داده‌ها را توجیه کردند (جدول ۲). مؤلفه اول (PC1) عمدتاً با ویژگی‌های فیزیکی، کربن و نیتروژن خاک مرتبط بود و بیشترین بار عاملی را به خود اختصاص داد. این نتایج نشان می‌دهند که ساختمان خاک و وضعیت کربن آلی مهم‌ترین محور تمایز سامانه‌های مدیریتی هستند. این الگو با یافته‌های مطالعات مشابه در زیربخش‌های خشک و نیمه‌خشک آسیا، آفریقا و آمریکای جنوبی مطابقت دارد که در آن‌ها نیز ساختمان خاک و ماده آلی به‌عنوان عوامل کلیدی در پویایی اکوسیستم‌های مرتعی شناخته شده‌اند (Girija Veni et al., 2020; Lehmann et al., 2020). مؤلفه دوم (PC2) حدود ۱۸ درصد واریانس را دربر داشت و بیش‌ترین بار را بر روی صفات مرتبط با وضعیت رطوبتی و شوری خاک نشان داد (جدول ۲). به‌طور مشخص، رطوبت قابل‌دسترس گیاه، هدایت الکتریکی و رطوبت ظرفیت زراعی ضرایب بالا و مثبتی در PC2 داشتند. این ترکیب بیانگر آن است که PC2 معرف یک محور تنش رطوبتی شوری است؛ سایت‌هایی که خاک مرطوب‌تر و حاصلخیزتر داشتند (مانند نهال کاری) در مقابل سایت‌های خشک‌تر با شوری کمتر (مثلاً مرتع طبیعی) بر روی این محور تفکیک شدند. مؤلفه سوم (PC3) نیز حدود ۱۷ درصد واریانس را توضیح داد و بیشترین ضرایب را برای پتانسیم قابل‌جذب (مثبت) و جرم مخصوص ظاهری و درجه فشردگی (منفی) نشان داد. بر این اساس، PC3 عمدتاً بیانگر بعد حاصلخیزی معدنی و تراکم خاک بود؛ خاک‌هایی با پتانسیم بالاتر و تراکم کمتر (مراتع احیایی) در مقابل خاک‌هایی با حاصلخیزی کمتر و تراکم‌تر (مرتع طبیعی) در این مؤلفه تمایز یافتند. وجود چنین مؤلفه‌ای اهمیت نسبی پتانسیم را به‌عنوان یک عنصر غذایی کلیدی در منطقه مطالعه و نیز نقش منفی تراکم خاک بر کیفیت کلی را مورد تأکید قرار می‌دهد. استخراج حداقل مجموعه داده (MDS) از پنج ویژگی شامل GMD، AW، EC، K و BD با رویکردی دقیق و هدفمند انجام شد که تکرارپذیری و کارایی محاسبه شاخص کیفیت خاک (SQI) را تضمین می‌کند. به‌کارگیری MDS به جای مجموعه کامل داده‌ها نه تنها هزینه‌های پایش را کاهش می‌دهد بلکه تحلیل‌های کاربردی‌تری برای مدیریت زمین فراهم می‌سازد (Bünemann et al., 2018). این پنج ویژگی منتخب توانستند ابعاد مختلف کیفیت خاک را پوشش دهند. GMD نمایانگر پایداری و ساختمان خاک است، AW وضعیت رطوبتی و ظرفیت نگه‌داشت آب در خاک را بیان می‌کند، EC منعکس‌کننده وضعیت تجمع املاح (تنش شوری) است، K بیانگر حاصلخیزی شیمیایی (موجودی عنصر غذایی کلیدی) و BD شاخص تراکم یا وضعیت فیزیکی خاک است. نتایج مقایسه میانگین این ویژگی‌ها بین سامانه‌های مدیریتی (شکل ۴) نشان داد که هر پنج مشخصه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر مدیریت قرار گرفته‌اند؛ به‌عنوان مثال GMD در نهال کاری حدود ۱۵ درصد بیشتر از مرتع طبیعی بود که نشان‌دهنده بهبود ساختمان خاک در اثر احیا است، در حالی که BD در نهال کاری نسبت به مرتع طبیعی حدود ۱۵ درصد کاهش یافت که مؤید کاهش فشردگی است. افزایش AW و K و نیز بالا رفتن اندک EC در نهال کاری نیز پیش‌تر تفسیر شد و در اینجا در قالب شاخص‌های منتخب تأیید گردید. بنابراین MDS فراهم‌شده تصویری جامع از وضعیت کیفیت خاک ارائه می‌کند که با تغییر مدیریت به‌خوبی تغییر می‌یابد. این مجموعه حداقلی ویژگی‌های خاک می‌تواند مبنایی برای پایش سریع کیفیت خاک مراتع منطقه زنجان و مناطق مشابه قرار گیرد؛ به‌ویژه که اندازه‌گیری آنها نسبتاً آسان بوده و تغییرات آنها در برابر اقدامات مدیریتی حساس است.

ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک

برای سنجش کمی وضعیت کلی خاک، چهار شاخص ترکیبی تحت عنوان شاخص کیفیت خاک (SQI) بر اساس روش‌های امتیازدهی متفاوت محاسبه شد. با وجود تفاوت در روش محاسبه، الگوی نتایج SQI در همه روش‌ها مشابه بود و هر دو سامانه احیایی امتیاز به‌مراتب بالاتری از مرتع طبیعی کسب کردند (جدول ۴ و شکل ۵). به بیان دیگر، کیفیت خاک در نهال کاری و قرق بدون توجه به نوع تابع نمره‌دهی

یا وزن‌دهی، به طور معنی‌داری بهتر از مرتع تحت چرا بود. Sinha et al. (۲۰۱۴) گزارش کردند که شاخص‌های وزنی-غیرخطی در تفکیک شرایط مدیریت در اکوسیستم‌های زراعی حساس‌ترین هستند (حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش حساسیت نسبت به روش خطی). همچنین Lenka et al. (2022) در منطقه‌ای در هند نشان دادند که استفاده از صدک‌های ۹۰ام و ۱۰ام به جای مقادیر حدی مطلق برای استانداردسازی داده‌ها می‌تواند همبستگی SQI با عملکرد محصول را تقویت کند. با این حال، برخی از مطالعات تفاوت فاحشی بین خروجی روش‌های امتیازدهی گزارش نکرده‌اند و الگوی کلی را یکسان یافته‌اند (Martín-Sanz et al., 2022). یافته‌های ما نیز با این دسته از مطالعات همخوانی دارد و گویای آن است که وقتی تفاوت کیفیت خاک بین تیمارها بسیار واضح و معنی‌دار باشد، همه روش‌های متعارف نمره‌دهی کمابیش یک پیام را منتقل خواهند کرد. از منظر مدیریت اراضی و خاک، این نکته امید بخش است زیرا استفاده از روش‌های ساده‌تر (که اجرای آسان‌تر و داده‌های کمتری نیاز دارند) می‌تواند ارزیابی قابل اعتمادتری از تأثیر اقدامات احیایی ارائه دهد. برای ارزیابی دقیق‌تر قدرت تمایز شاخص‌های تلفیقی کیفیت خاک، از تحلیل تشخیص چندمتغیره (Discriminant Analysis) استفاده شد. این تحلیل مشخص کرد که ترکیب شاخص‌های کیفیت خاک قادر است سه گروه مدیریتی (مرتج طبیعی، قرق، نهال کاری) را به خوبی از هم تفکیک نماید. تنها یک تابع تشخیصی معنادار استخراج شد که ۱۰۰ درصد واریانس تفکیک بین گروه‌ها را تبیین نمود (مقدار ویژه تابع = ۰/۸۹۴). بر اساس نتایج جدول ۵، شاخص SQI-1 (محاسبه شده با روش خطی و بدون وزن) دارای بزرگ‌ترین ضریب تفکیک (۱۰/۳۳۲) بود که به مراتب از ضرایب سایر شاخص‌ها بیشتر است. این نتیجه حاکی از آن است که SQI-1 بیشترین نقش را در جداسازی سامانه‌های مدیریتی از هم ایفا کرده و قدرت تشخیص‌پذیری بالاتری نسبت به دیگر شاخص‌ها دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت شاخص خطی غیروزی (SQI-1) بهترین شاخص ترکیبی در بازتاب تفاوت‌های مدیریتی در کیفیت خاک این منطقه است. Askari and Holden (۲۰۱۴) در ارزیابی شاخص‌های سلامت خاک گزارش کردند که افزودن وزن‌های مبتنی بر عملکرد خاک در بهبود همبستگی شاخص با داده‌های مستقل مؤثر نبود و یک شاخص تجمیعی ساده نیز همان الگوی تغییرات مدیریت را نشان داد. هرچند هر مطالعه شرایط خاص خود را دارد، به نظر می‌رسد در بسیاری موارد سادگی شاخص یک مزیت است؛ زیرا شاخص‌های پیچیده ممکن است با داده‌های محدود دچار عدم قطعیت شوند یا برای کاربران غیرمتخصص دشوار تفسیر شوند (Lenka et al., 2022). در مقابل، یک شاخص ساده و شفاف که صحت آن نیز توسط روش‌های آماری تأیید شده باشد، می‌تواند به آسانی در برنامه‌های پایش و مدیریت به کار گرفته شود. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در طرح‌های پایش سلامت خاک مراتع (چه در منطقه مورد مطالعه و چه در مناطقی با اقلیم و خاک مشابه)، از SQI-1 به عنوان شاخص کارآمد استفاده گردد. این شاخص با استفاده از حداقل داده‌ها پنج‌گانه و روش محاسباتی ساده، تصویری یکپارچه از کیفیت خاک ارائه می‌دهد که حساسیت بالایی نسبت به تغییرات مدیریتی دارد. از این رو می‌تواند برای ارزیابی اثر اقدامات احیایی به کار رود. به ویژه در استان زنجان و نواحی نیمه‌خشک کشور، که تخریب خاک مراتع یک معضل جدی است، به کارگیری چنین شاخص کمی می‌تواند در شناسایی مناطق بحرانی و ارزیابی موفقیت پروژه‌های احیاء بسیار مفید واقع شود.

این مطالعه نشان داد که اقدامات احیای مراتع در اقلیم نیمه‌خشک (اعم از قرق همراه با بذریابی و نهال کاری) توانسته است خاک را از منظر ویژگی‌های فیزیکی، حاصلخیزی شیمیایی و فعالیت زیستی متحول سازد و این تغییرات در قالب شاخص‌های کمی، قابل سنجش و اثبات است. ارتقای کیفیت خاک به این ترتیب زیربنای احیای پوشش گیاهی و افزایش تولید در این اکوسیستم‌هاست. در مقیاس بزرگ‌تر، افزایش کربن خاک پیامد مثبت دیگری است که به کاهش تغییرات اقلیمی از طریق ترسیب کربن کمک می‌کند (Cao et al., 2023). همچنین بهبود نفوذپذیری و ظرفیت نگه‌داشت آب در خاک به کاهش روان آب سطحی و سیلاب و تغذیه آب‌های زیرزمینی منجر می‌شود که برای مدیریت منابع آب در مناطق خشک حیاتی است (Mongil-Manso et al., 2022). با این حال، باید توجه داشت که برخی شرایط خاک (مانند افزایش شوری) نیازمند پایش و مدیریت است تا در بلندمدت مشکلی ایجاد نشود.

یافته‌های این پژوهش در امتداد و در عین حال فراتر از مطالعات پیشین در مراتع نیمه‌خشک ایران است (Shamkhani et al., 2025; Sheidai Karkaj et al., 2019). مطالعه قبلی در منطقه مورد مطالعه نشان داد که سامانه‌های قرق و نهال کاری، کیفیت فیزیکی خاک را از طریق کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل و بهبود پایداری خاک‌دانه‌ها ارتقا می‌دهند (Shamkhani et al., 2025)، اما درباره این که این مداخلات مدیریتی چگونه به طور هم‌زمان بر حاصلخیزی شیمیایی، وضعیت رطوبتی و فعالیت زیستی خاک اثر می‌گذارند، اطلاعاتی ارائه نداد. تحقیق حاضر نشان داد، با ادغام داده‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی یک MDS متشکل از K، EC، AW، GMD و BD می‌تواند پاسخ خاک به سامانه‌های مدیریتی را به خوبی منعکس کند و بخش عمده تغییرات را توضیح دهد. این پژوهش با پیوند دادن نتایج شاخص کیفیت خاک به توصیه‌های مدیریتی مشخص، نشان داده شد که ترکیب قرق و نهال کاری علاوه بر بهبود ساختار خاک،



رطوبت قابل دسترس و عناصر غذایی، موجب افزایش فعالیت میکروبی و بهبود عملکرد اکوسیستمی می‌شود؛ در عین حال، افزایش EC در سامانه نهال کاری به عنوان یک هشدار مدیریتی مطرح شد که باید در برنامه ریزی گونه‌های درختی، تراکم کاشت و تراز آب و شوری منطقه مدنظر قرار گیرد. بنابراین، این مطالعه علاوه بر به کارگیری رویکردی روش شناختی برای استخراج MDS و مقایسه شاخص‌های کیفیت خاک (SQI)، یک چارچوب کاربردی برای پایش و مدیریت احیای مراتع نیمه خشک پیشنهاد می‌کند که می‌تواند در تکمیل مطالعات و گزارش‌های موجود در داخل و خارج کشور مفید باشد.

نتیجه گیری کلی

این پژوهش نشان داد که کیفیت خاک مراتع نیمه خشک استان زنجان تحت تاثیر سامانه‌های احیایی می‌توانند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را به طور معنی داری ارتقا دهند. تحلیل ۲۶ شناسه حاکی و انتخاب حداقل مجموعه داده شامل پنج شناسه کلیدی GMD، EC، K و BD نشان داد که این پنج متغیر توانایی بالایی در بازتاب تغییرات ناشی از مدیریت دارند و می‌توانند به عنوان پایه‌ای برای پایش کیفیت خاک در مراتع نیمه خشک استان زنجان به کار روند. در سامانه‌های قرق و نهال کاری، کاهش BD و درجه فشردگی، همراه با افزایش GMD، تخلخل کل و تخلخل درشت، هدایت هیدرولیکی و شاخص پایداری ساختمان، حاکی از بازسازی ساختمان خاک و افزایش نفوذپذیری و تهویه بود. به طور هم زمان، افزایش FC، AW و کربن آلی و نیتروژن کل، نشان داد که توان خاک برای ذخیره آب و تأمین عناصر غذایی به طور محسوسی ارتقا یافته است. در بخش زیستی نیز افزایش MBC، SR و کربوهیدرات‌های محلول، بیانگر فعال تر شدن جامعه میکروبی و بهبود کیفیت منابع کربنی بود. مقایسه چهار شاخص کیفیت خاک (SQI-1 تا SQI-4) نشان داد که اگرچه تمامی شاخص‌ها روندی مشابه در رتبه بندی سامانه‌های مدیریتی داشتند (نهال کاری و قرق بالاتر از مرتع طبیعی)، اما شاخص ساده خطی و غیروزی (SQI-1) بالاترین توان تفکیک سامانه‌ها را در تحلیل تشخیص نشان داد. این نتیجه حاکی از آن است که یک شاخص ساده مبتنی بر MDS می‌تواند بدون نیاز به وزن دهی پیچیده، تصویر روشنی از اثر مدیریت بر کیفیت خاک ارائه دهد و برای استفاده توسط کارشناسان و مدیران منابع طبیعی در سطح مزرعه و مرتع مناسب است. در عین حال، افزایش EC در سامانه نهال کاری، اگرچه در محدوده غیرشور قرار دارد، یک هشدار مدیریتی محسوب می‌شود و نشان می‌دهد که تداوم نهال کاری در مناطق نیمه خشک باید همراه با پایش شوری و توجه به انتخاب گونه، تراکم کاشت و تراز آب و املاح خاک باشد. نتایج این تحقیق تأیید می‌کند که ترکیب قرق، بذرپاشی و نهال کاری راهبردی مؤثر برای ارتقای کیفیت خاک و کارکردهای اکوسیستمی مراتع نیمه خشک است و می‌تواند به کاهش فشردگی، افزایش ظرفیت نگهداشت آب، بهبود حاصلخیزی و تقویت فعالیت زیستی خاک منجر شود. شاخص پیشنهادی SQI-1 ابزاری عملی برای پایش روند احیا و ارزیابی موفقیت پروژه‌های مدیریت مرتع در استان زنجان و سایر مناطق با اقلیم و خاک مشابه به شمار می‌رود. استمرار تحقیقات مشابه در زیست بوم‌های گوناگون ایران می‌تواند تصویر جامع تری از تأثیر مدیریت بر کیفیت خاک را نشان دهد و به توسعه شاخص‌های بومی سازی شده برای پایش سلامت خاک کشور منجر شود.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

REFERENCES

- Alaboz, P., Odabas, M. S., & Dengiz, O. (2023). Soil quality assessment based on machine learning approach for cultivated lands in semi-humid environmental condition part of Black Sea region. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(15), 3514–3532.
- Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). Methods in applied soil microbiology and biochemistry.
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The Soil Management Assessment Framework. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1945–1962. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>
- Askari, M. S., & Holden, N. M. (2014). Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Geoderma*, 230-231, 131–142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.019>
- Askari, M. S., & Holden, N. M. (2015). Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research*, 150, 57–67.
- Askari, M. S., Alamdari, P., Chahardoli, S., & Afshari, A. (2020). Quantification of heavy metal pollution for environmental assessment of soil condition. *Environ Monit Assess*, 192(3), 162. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8116-6>
- 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 .
- Bastida, F., Luis Moreno, J., Teresa, H., & García, C. (2006). Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(12), 3463–3473. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.06.001>
- Baumgartner, S. A., Smith, S. W., Bartzke, G. S., Laizar, O., Ploechl, J. F., Michler, L. M., Naro, E. M., & Treydte, A. C. (2024). Love your wet grass! Dry season grazing reserves show highest grass regrowth in communal semi-arid rangelands of Tanzania. *PLoS One*, 19(11), e0313818. <https://doi.org/10/1371/journal.pone.0313818>
- Brejda, J. J., Karlen, D. L., Smith, J. L., & Allan, D. L. (2000). Identification of regional soil quality factors and indicators II. Northern Mississippi Loess Hills and Palouse Prairie. *Soil Science Society of America Journal*, ۶۴(۶), ۲۱۳۵–۲۱۲۵.
- Bremner, J. (1960). Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *The Journal of Agricultural Science*, 55(1), 11–33 .
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1), 3–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press .
- Dagar, J. C., Gupta, S. R., & Gaur, A. (2023). Tree-based farming systems for improving productivity and ecosystem services in saline environments of dry regions: An overview. *Farming System*, 1(1), 100003. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100003>
- 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 .
- DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical chemistry*, 28(3), 350–356 .
- 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 .
- Eldridge, D. J., Delgado-Baquerizo, M., Travers, S. K., Val, J., & Oliver, I. (2011). Do grazing intensity and herbivore type affect soil health? Insights from a semi-arid productivity gradient. *Journal of Applied Ecology*, 54(3), 976–985. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1365-2664.12834>
- Erfanzadeh, R., Sabetpour, T., Amini, T. & Török, P. (2025). Soil seed bank resilience after rangeland conversion: implications for restoring abandoned agricultural lands. *Sci Total Environ*, 997, 180209. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180209>
- Gardner, W. H. (1986). Water content. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 493–544 .
- Girija Veni, V., Srinivasarao, C., Sammi Reddy, K., Sharma, K. L., & Rai, A. (2020). Chapter 26 - Soil health and climate change. In M. N. V. Prasad & M. Pietrzykowski (Eds.), *Climate Change and Soil Interactions* (pp. 751–767). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00026-6>
- Grossman, R., & Reinsch, T. (2002). 2.1 Bulk density and linear extensibility. *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*, 5, 201–228 .
- Gu, F., Zhou, M., Zhu, B., & Wang, H. (2025). Converting Cropland to Forest Improves Soil Water Retention Capacity by Changing Soil Aggregate Stability and Pore-Size Distribution. *Sustainability*, 17(10), 4363 .
- 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 .
- Hamidi Nehrani, S., 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, 105770. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105770>
- Herrera Calvo, P. M. (2024). Global Land Outlook: Thematic Report on Rangelands and Pastoralists .
- Hesse, P. R., & Hesse, P. (1971). A textbook of soil chemical analysis .
- Islam, W., Zeng, F., Siddiqui, J. A., Zhihao, Z., Du, Y., Zhang, Y., Alshaharni, M. O., & Khan, K. A. (2025). Combating desertification: comprehensive strategies, challenges, and future directions for sustainable solutions. *Biological Reviews* .
- Joner, E., & Leyval, C. (1997). Uptake of 109Cd by roots and hyphae of a *Glomus mosseae*/Trifolium



- subterranean mycorrhiza from soil amended with high and low concentrations of cadmium. *The New Phytologist*, 135(2), 353–360 .
- Jones, J. (2018). Soil analysis handbook of reference methods. CRC press .
- 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 .
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 54 .<https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Liu, X., Sheng, H., Wang, Z., Ma, Z., Huang, X., & Li, L. (2020). Does Grazing Exclusion Improve Soil Carbon and Nitrogen Stocks in Alpine Grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau? A Meta-Analysis. *Sustainability*, 12(3), 977 .
- Macheroum, A., Sayada, N., & Chenchouni, H. (2025). Restoration of soil quality and improvement of physicochemical properties through grazing exclusion in arid and semi-arid rangelands. *CATENA*, 249, 108646. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108646>
- Maleki, S., Zeraatpisheh, M., Karimi, A., Sareban, G., & Wang, L. (2022). Assessing Variation of Soil Quality in Agroecosystem in an Arid Environment Using Digital Soil Mapping. *Agronomy*, 12(3), 578. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030578>.
- Mao, L., Miao, Y., Ge, Y., Wei, S., Yang, X., Li, S., Si, L., Gou, Y. P., & Quandahor, P. (2024). Effects of different afforestation years on soil moisture and nutrient content in Maxian Mountain of the Loess Plateau. *Sci Rep*, 14(1), 16194. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66408-z>
- Masoumi Tabar Zanjani, A. H., Askari, M. s., Amanifar, S., & Hassani, A. (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. <https://doi.org/10.22069/ejsms.2025.22503.2155>
- Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Singh, D., & Patra, A. K. (2008). Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1), 419–435 .
- Mongil-Manso, J., Navarro-Hevia, J., & San Martín, R. (2022). Impact of Land Use Change and Afforestation on Soil Properties in a Mediterranean Mountain Area of Central Spain. *Land*, 11(7), 1043 .
- Morris, M. L., Eastburn, D. J., Roche, L. M., Davy, J., Doran, M., Karle, B., Lile, D., Schohr, T., Snell, L., Macon, D., Woodmansee, G., Touceda-Suárez, M., & Barberán, A. (2025). Effects of grazing exclusion and pasture management on soil microbial communities in Californian irrigated pastures. *Applied Soil Ecology*, 215, 106419. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106419>
- Nabiollahi, K., Golmohamadi, F., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., & Davari, M. (2018). 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 .
- 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 .
- 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 .
- Pan, Z., Cai, X., Bo, Y., Guan, C., Cai, L., Haider, F. U., Li, X., & Yu, H. (2024). Response of soil organic carbon and soil aggregate stability to changes in land use patterns on the Loess Plateau. *Scientific Reports*, 14(1), 31775. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82300-2>
- Parvizi, Y., & Fatehi, S. (2024). Modeling and digital mapping of soil quality indicators in different land uses (a case study: Ravansar-Sanjabi Plain, Kermanshah). *Environ Monit Assess*, 196(2), 184. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12349-z>
- 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 .
- Pierzynski, G. M. (2000). Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters. In: North Carolina State University Raleigh, NC.
- Raiesi, F. (2017). A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological*

- Indicators*, 75, 307–320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.049>
- 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 .
- 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 .
- Rhoades, J. (1982). Cation exchange capacity. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 149–157 .
- Sadiq, F. K., Maniyunda, L. M., Adegoke, K. A., & Anumah, A. O. (2021). Evaluating quality of soils formed on basement complex rocks in Kaduna State, northern Guinea savanna of Nigeria. *Environ Monit Assess*, 193(7), 383. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09157-0>
- Sáez, J. I., Dec, D., Dorner, J., Ordoñez, I ., Clunes, J., Radic, S., Jug, D., Jovic, J., & Jug, I. (2025). Soil physical responses to grazing and vegetation heterogeneity in the Patagonian steppe: assessing degradation and resilience at multiple spatial scales. *Authorea Preprints* .
- Savari, M. (2023) .(Explaining the ranchers' behavior of rangeland conservation in western Iran. *Frontiers in Psychology*, 13, 1090723 .
- Shamkhani, H., Askari, M. S., Vaezi, A. R., & Alamdari, P. (2025). Assessment of Soil Physical Quality in Different Management Systems of Rangelands in Zanjan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(7), 1715–1735. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.393617.669924>.
- Sharaftmandrad, M., & Shahraki, M. (2025). Understanding rangeland desertification through pastoralist perspectives using a grounded theory approach. *Scientific Reports*, 15(1), 2279. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86573-z>
- Sheidai Karkaj, E., Sepehry, A., Barani, H., Motamedi, J., & Shahbazi, F. (2019). Establishing a Suitable Soil Quality Index for Semi-arid Rangeland Ecosystems in Northwest of Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(3), 648–658. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00065-4>
- Sheidai Karkaj, E., Sepehry, A., Barani, H., Motamedi, J., & Shahbazi, F. (2019). Establishing a Suitable Soil Quality Index for Semi-arid Rangeland Ecosystems in Northwest of Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(3), 648–658. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00065-4>.
- Sinha, S., Masto, R. E., Ram, L. C., Selvi, V. A., Srivastava, N. K., Tripathi, R. C., & George, J. (2009). Rhizosphere soil microbial index of tree species in a coal mining ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(9), 1824–1832. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.11.022>
- Skhosana, F. V., Thenga, H. F., Mateyisi, M. J., von Maltitz, G., Midgley, G. F., & Stevens, N. (2023). Steal the rain: Interception loses and rainfall partitioning by a broad-leaf and a fine-leaf woody encroaching species in a southern African semi-arid savanna. *Ecology and Evolution*, 13(3), e9868.
- Sun, F., Zhang, Z., Jiang, P., Zhou, S., & Ou, J. (2023). Structure and stability characteristics of zonal soil aggregates in the Three Rivers Source of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Soil Science Society of America Journal*, 87(5), 1042–1055. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/saj2.20581>
- Sylvia, D. M., & Williams, S. E. (1992). Vesicular-arbuscular mycorrhizae and environmental stress. *Mycorrhizae in sustainable agriculture*, 54, 101–124 .
- 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 .
- 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 .
- Wang, L., Guo, J., Liu, X., Li, K., Ma, L., Tian, Y., Wang, J., Zhang, Q., Tian, Y., Li, C., & Lu, M. (2023). Assessment of soil quality in an arid and barren mountainous of Shandong province, China. *Scientific Reports*, 13(1), 19966. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46136-6>
- Wang, L., Guo, J., Liu, X., Li, K., Ma, L., Tian, Y., Wang, J., Zhang, Q., Tian, Y., Li, C., & Lu, M. (2023).



- Assessment of soil quality in an arid and barren mountainous of Shandong province, China. *Sci Rep*, 13(1), 19966. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46136-6>
- 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 .
- Williams, S. E. (2024). A Review and Analysis of Rangeland and Wildland Soil Health. *Sustainability*, 16(7), 2867 .
- Xu, Y., Hou, Q., Xiang, J., Gao, M., Shao, P., Chen ,S., Fu, Z., Long, P., & Huang, C. (2025). Evaluation of soil quality and system sustainability in ratoon rice paddy field under green manure application in central China. *Field Crops Research*, 333, 110087 .
- Yao, W., Nan, F., Li, Y., Li, Y., Liang, P & ,Zhao, C. (2023). Effects of different afforestation years on soil properties and quality. *Forests*, 14(2), 329 .
- Yu, L., Chen, Y., Sun, W., & Huang, Y. (2019). Effects of grazing exclusion on soil carbon dynamics in alpine grasslands of the Tibetan Plateau. *Geoderma*, 353, 133–143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.036>
- Yuan, C., Yue, K., Peng, C., Wu, F., Wu, Q., Zhu, G., Wang, Y., & Peng, Y. (2025). Former ecosystem type and soil organic matter regulate the effects of reforestation on soil bulk density, porosity, electrical conductivity, and texture. *Journal of Forest Research*, 1–10 .