ASPI | Afarand Scholarly Publishing Institute; Turkey
ISSN: 2538-4384; Geographical Research. 2026;41(2):69-78. 10.58209/geores.41.2.69

Comparison of Soil Quality in Agricultural and Horticultural Uses in the Chaharborj Region of West Azerbaijan Province

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Ahmadi O.[1] *MSc*
Alamdari P.[1]* *PhD*
Askari M.S.[1] *PhD*
Servati M.[2] *PhD*

How to cite this article
Ahmadi O, Alamdari P, Askari MS, Servati M. Comparison of Soil Quality in Agricultural and Horticultural Uses in the Chaharborj Region of West Azerbaijan Province. Geographical Research. 2026;41(2):69-78.

[1]Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
[2]Department of Soil Sciences, Shahid Bakeri High Education Center of Miandoab, Urmia University, Urmia, Iran

***Correspondence**
Address: Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, University Boulevard, Zanjan, Iran. Postal Code: 4537138791
Phone: +98 (24) 33052717
p_alamdari@znu.ac.ir

Article History
Received: March 8, 2026
Accepted: April 19, 2026
ePublished: April 27, 2026

ABSTRACT

Aims Today, one of the most effective tools for assessing sustainable soil management is soil quality assessment. Therefore, soil quality assessment and monitoring can provide a relatively comprehensive understanding of the complex environmental conditions of soil. This study aimed to quantitatively evaluate soil quality in the Chaharborj region of West Azerbaijan in two agricultural and horticultural uses.

Methodology This experimental research was conducted in the Chaharborj region in 2024. Composite sampling was carried out at depths of 0-30 and 30-60 cm at 18 stations, and the physical, chemical, and biological properties of the soil were measured. Using principal component analysis, the minimum data set including electrical conductivity, soil microbial respiration, total nitrogen, bulk density, and absorbable potassium was identified. The soil quality index was calculated using two linear and nonlinear scoring methods.

Findings Agricultural soils had significantly higher salinity, sodium content, and density than garden soils. On the contrary, biological activity (microbial respiration and microbial biomass carbon) and total nitrogen were significantly higher in garden use. The average soil quality index in garden use was 0.46 for the linear method and 0.58 for the non-linear method, and 0.32 and 0.38 in the agricultural use, respectively, and there was a significant difference in both methods ($p<0.001$). The nonlinear method had a higher resolution.

Conclusion Unsustainable management is the primary factor reducing soil quality in agricultural use, and switching to horticultural systems can be an effective means of restoring soil quality.

Keywords Lake Urmia; Land Use; Minimum Data Set; Salt-Affected Soils; Soil Quality Index

CITATION LINKS

[Alef, 1995] Enrichment, isolation and ...; [Alloway, 2008] Zinc in ...; [Andrews *et al.*, 2002] A comparison of soil quality ...; [Askari & Holden, 2014] Indices for quantitative evaluation ...; [Askari & Holden, 2015] Quantitative ...; [Bashour & Sayegh, 2007] Methods of analysis for ...; [Bower *et al.*, 1952] Exchangeable cation analysis ...; [Bremner, 1996] Nitrogen-total ...; [Cabrera-Rodríguez *et al.*, 2020] Effect of organic and conventional systems used to grow pecan trees ...; [Fan *et al.*, 2024] Effects of cropland-to-orchard conversion on soil multifunctionality, particularly nitrogen ...; [Faryadi, 2023] Soil security under salt attack: Protection of the soil against the ...; [Feizizadeh *et al.*, 2022a] Scenario-based analysis of the impacts of lake drying on food production ...; [Feizizadeh *et al.*, 2022b] Impacts of the Urmia Lake drought on soil salinity and degradation risk: An integrated geoinformatics ...; [Gee & Bauder, 1986] Particle-size ...; [Gorji *et al.*, 2018] Quantitative soil quality assessment in different land uses at some parts ...; [Grossman & Reinsch, 2002] 2.1 Bulk density and ...; [Guo *et al.*, 2025] The effects of biochar on soil quality and potato yield ...; [Hamidi Nehrani *et al.*, 2023] Quantification of soil quality under ...; [Hass *et al.*, 2012] Chicken manure biochar as liming and ...; [Havlin *et al.*, 2016] Soil fertility and ...; [Idowu *et al.*, 2017] Short-term impacts of pecan waste by-products on soil ...; [Kemper & Rosenau, 1986] Aggregate stability and size ...; [Kibblewhite *et al.* 2008] Soil health in agricultural ...; [Lavkulich, 1981] Methods manual: Pedology ...; [Macedo *et al.* 2024] Assessment of soil quality of smallholder ...; [Masoumi Tabar Zanjani *et al.*, 2024] The effect of land use change on some ...; [McLean, 1982] Soil pH and ...; [Mirzaee *et al.* 2024] Monitoring and assessment ...; [Núñez-Vázquez *et al.*, 2016] Spirostanic analogues ...; [Olsen, 1954] Estimation of ...; [Pouladi *et al.*, 2020] Assessing the soil quality ...; [Rahimi & Breuste, 2021] Why is Lake Urmia ...; [Rasouli-Sadaghiani & Sheikhloo, 2016] Effects of agronomic ...; [Rhoades, 1996] Salinity ...; [Sadeghi *et al.*, 2022] Effects of land-use ...; [Samaniego *et al.*, 2025] Assessment of soil ...; [Shrivastava & Kumar, 2015] Soil salinity ...; [Singh, 2015] Soil salinization ...; [Slade & Wells, 2022] Soil quality enhancement ...; [Stavi *et al.*, 2021] Soil salinity ...; [Uthappa *et al.*, 2024] Comparative analysis ...; [Vance *et al.*, 1987] An extraction ...; [Walker & Bernal, 2008] The effects of ...; [Walkley & Black, 1934] An examination ...; [Wang *et al.*, 2022] Pecan agroforestry ...; [Worku & Bedadi, 2016] Studies on soil ...; [Yao *et al.*, 2013] Determining minimum data ...; [Yoder *et al.*, 1936] A direct method of ...;

Copyright© 2026, the Authors | Publishing Rights, ASPI. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مقایسه کیفیت خاک در کاربری‌های زراعی و باغی منطقه چهاربرج استان آذربایجان غربی

امید احمدی MSc
گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
پریسا علمداری* PhD
گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
محمدصادق عسکری PhD
گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
مسلم ثروتی PhD
گروه علوم خاک، مرکز آموزش عالی شهید باکری میاندوآب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

اهداف: امروزه یکی از موثرترین ابزارها برای ارزیابی مدیریت پایدار خاک، ارزیابی کیفیت خاک است. بنابراین، ارزیابی و پایش کیفیت خاک می‌تواند درک نسبتاً جامعی از شرایط پیچیده محیطی خاک ارایه دهد. این مطالعه با هدف ارزیابی کمی کیفیت خاک در منطقه چهاربرج آذربایجان غربی در دو کاربری کشاورزی و باغبانی انجام شد.

روش‌شناسی: این پژوهش تجربی در سال ۱۴۰۳ در منطقه چهاربرج انجام شد. نمونه‌برداری مرکب در عمق ۳۰-۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متر در ۱۸ ایستگاه انجام و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک اندازه‌گیری شد. با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی، حداقل مجموعه داده‌ها شامل هدایت الکتریکی، تنفس میکروبی خاک، نیتروژن کل، جرم مخصوص ظاهری و پتاسیم قابل جذب شناسایی شد. شاخص کیفیت خاک با استفاده از دو روش امتیازدهی خطی و غیرخطی محاسبه شد.

یافته‌ها: خاک‌های زراعی به طور قابل توجهی شوری، سدیمی‌بودن و چگالی بالاتری نسبت به خاک‌های باغ داشتند. در مقابل، فعالیت بیولوژیکی (تنفس میکروبی و کربن زیست‌توده میکروبی) و نیتروژن کل در کاربری باغ به طور قابل توجهی بالاتر بود. میانگین شاخص کیفیت خاک در کاربری باغ برای روش خطی ۰/۴۶ و برای روش غیرخطی ۰/۵۸ و در کاربری کشاورزی به‌ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۳۸ بود که در هر دو روش تفاوت معنی‌داری وجود داشت ($p<0/001$). روش غیرخطی وضوح بالاتری داشت.

نتیجه‌گیری: مدیریت ناپایدار اراضی در بخش زراعی مهم‌ترین عامل کاهش کیفیت خاک در کاربری زراعی است و تغییر به سیستم‌های باغی می‌تواند یک راه حل موثر برای احیای خاک باشد.

کلیدواژگان: خاک‌های متاثر از نمک، دریاچه ارومیه، شاخص کیفیت خاک، کاربری اراضی، مجموعه حداقل داده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰
*نویسنده مسئول: p_alamdari@znu.ac.ir

مقدمه

کیفیت خاک مفهومی کلیدی در پیوند میان پایداری تولید، امنیت غذایی، خدمات اکوسیستمی و تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی است. در سامانه‌های خشک و نیمه‌خشک، که محدودیت رطوبت، نوسان دما و تنش‌های شوری و سدیمی ویژگی‌های غالب‌اند، ارزیابی کیفیت خاک برای هدایت مداخلات مدیریتی و سیاستی ضرورتی مضاعف دارد [Guo *et al.*, 2025]. چارچوب‌های متداول ارزیابی، کیفیت خاک را به مثابه ابزاری یکپارچه برای ترکیب ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی و تفسیر کارکرد خاک در مقیاس‌های مزرعه تا چشم‌انداز پیشنهاد می‌کنند [Hamidi Nehrani *et al.*, 2020]. در این رویکرد، انتخاب منطقی مجموعه‌ای حداقل از ویژگی‌های خاک (MDS) نرمال‌سازی و امتیازدهی (خطی یا غیرخطی) و وزن‌دهی مبتنی بر آمار یا تخصص، نقش تعیین‌کننده در اعتبار نتیجه دارد [Askari & Holden, 2015].

در سال‌های اخیر، ادبیات علمی ضمن تفکیک مفهومی «کیفیت خاک» (توان بالقوه برای انجام کارکردها) از «سلامت خاک» (وضعیت پویا و زیستی خاک)، بر شواهد مبتنی بر داده برای تصمیم‌سازی تاکید کرده است [Askari & Holden, 2014; Pouladi *et al.*, 2020]. حوضه جنوبی دریاچه ارومیه (از جمله شهرستان چهاربرج در آذربایجان غربی) در یک دهه اخیر با پیامدهای خشک‌شدن دریاچه و گسترش کانون‌های نمکی مواجه بوده است؛ پیامدهایی که با تشدید فرآیندهای شور و سدیمی شدن، فرسایش بادی و گرد و غبار نمکی، تغییر رژیم رطوبتی و کاهش کیفیت خاک‌های پیرامونی همراه است [Faryadi, 2023; Feizizadeh *et al.*, 2022a]. مطالعات سنجش از دور و تحلیل‌های چندمقیاسه نشان داده‌اند که سهم اراضی شور در حاشیه دریاچه به طور معنی‌داری افزایش یافته و این روند با اُفت حاصلخیزی و کاهش تولید کشاورزی همبسته است [Feizizadeh *et al.*, 2022b; Rahimi & Breuste, 2021]. این یافته‌ها، ضرورت ارزیابی نظام‌مند کیفیت خاک و طراحی راهبردهای سازگاری برجسته می‌سازد. در سامانه‌های باغی و زراعی نیمه‌خشک، ارزیابی کیفیت خاک با چالش‌هایی مانند ناهمگنی مکانی شدید، همبستگی درونی متغیرها، حساسیت نتایج به گزینش MDS، و پاسخ‌های غیرخطی شاخص‌ها به تنش‌های شوری و سدیمی روبه‌روست. بدین سبب، بهره‌گیری از روش‌های آماری کاهشی نظیر تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) برای استخراج MDS و سپس محاسبه شاخص کیفیت خاک با توابع نمره‌دهی خطی و غیرخطی و وزن‌دهی روشن، به صورت فزاینده‌ای توصیه شده است [Uthappa *et al.*, 2024; Samaniego *et al.*, 2025].

مطالعات مروری و مقایسه‌ای اخیر نشان می‌دهند که انتخاب نوع تابع نمره‌دهی به‌ویژه در حضور آستانه‌های کیفی می‌تواند رتبه‌بندی نهایی کاربری‌ها یا تیمارها را تغییر دهد؛ از این رو گزارش همزمان هر دو منطق نمره‌دهی و تحلیل حساسیت نسبت به گزینش MDS برای استنباط‌های مدیریتی ضروری است [Macedo *et al.*, 2024].

با آنکه پژوهش‌های متعددی در زمینه کیفیت خاک در مناطق نیمه‌خشک منتشر شده‌اند، خلاهای مهمی باقی است. نخست، اغلب مطالعات به یک کاربری واحد یا به مقیاس مزرعه محدود

می‌شوند و کمتر به فاصله از منبع شوری و تفاوت کاربری پرداخته‌اند؛ در شرایط حاشیه دریاچه ارومیه، این دو عامل می توانند برهمکنش‌های پیچیده‌ای بر شناسه‌های کیفی از قبیل شوری، ظرفیت تبادل کاتیونی، نسبت جذب سدیم، کربن آلی خاک، بافت و پایداری خاک‌دانه داشته باشند.

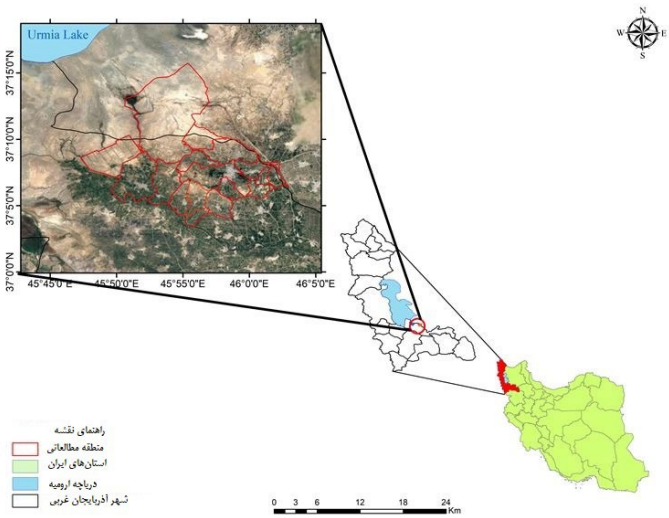
با توجه به شواهد شورشدن خاک پیرامون دریاچه ارومیه و پیامدهای آن بر کارکرد خاک، مجموعه ویژگی‌های موثر بر ارزیابی کیفیت خاک این منطقه می‌تواند شامل هدایت الکتریکی (EC) به عنوان نماینده شوری خاک، نسبت جذب سدیم و درصد سدیم تبادلی (SAR/ESP) برای بررسی ریسک سدیمی و ناپایداری خاک‌دانه، pH و کربنات کلسیم معادل ($CaCO_3$) برای زمینه شیمیایی، کربن آلی خاک (SOC) و عناصر غذایی از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم برای کیفیت آلی و چرخه مواد غذایی، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) برای توان نگهداشت عناصر غذایی، بافت (به‌ویژه درصد رس) و چگالی ظاهری (BD) برای بررسی شرایط فیزیکی، میانگین قطر خاک‌دانه‌ها جهت پایداری ساختمان خاک، باشند. بسته به دسترس‌پذیری، افزودن نشانگرهای زیستی (تنفس میکروبی و کربن زیست‌توده میکروبی) می‌تواند حساسیت شاخص کیفیت خاک به تنش‌ها را بهبود دهد. چنین ترکیبی به صورت مکرر در مطالعات کیفیت خاک برای مناطق نیمه‌خشک آزموده و توصیه شده است [Hamidi Nehrani *et al.*, 2020]. افزون بر این، بررسی منطقه‌ای نشان می‌دهد که خشک‌شدن دریاچه ارومیه نه‌تنها الگوهای شوری سطحی را دگرگون کرده، بلکه از طریق طوفان‌های نمکی و بازتوزیع املاح، پایداری خاک‌دانه را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد [Faryadi, 2023]. پیامدهایی که می‌توانند با تغییرات SOC، CEC و فعالیت‌های میکروبی همراستا باشند و در نهایت به افول کیفیت خاک منتهی شوند [Mirzaee *et al.*, 2024]. نتایج سناریومحور نیز کاهش بالقوه بیشتر تولید کشاورزی در افق سه دهه آینده را هشدار داده‌اند [Feizizadeh *et al.*, 2022b]؛ بنابراین، ارزیابی حاضر با هدف خلق شواهد محلی تفسیرپذیر برای برنامه‌ریزی سازگاری، اهمیت راهبردی دارد.

با توجه به موارد مطرح‌شده، مطالعه حاضر دو هدف به‌هم‌پیوسته را دنبال می‌کند: ۱) شناسایی ویژگی‌های کلیدی برای ارزیابی کیفیت خاک به عنوان مجموعه حداقل داده‌ها و ۲) مقایسه و تعیین روش مناسب برای محاسبه شاخص کیفیت خاک با دو منطق امتیازدهی خطی و غیرخطی. انتظار می‌رود این طراحی، امکان تفکیک نسبی اثرات کاربری را فراهم کند و ضمن آزمودن پایداری رتبه‌بندی‌ها در برابر انتخاب تابع امتیازدهی، مبنایی برای توصیه‌های مدیریتی مکان‌محور ارایه دهد. بدین ترتیب، نتایج می توانند علاوه بر ارزش علمی، برای سیاست‌گذاری‌های احیای سرزمین و برنامه‌های سازگاری کشاورزی در جنوب دریاچه ارومیه سودمند باشند.

روش‌شناسی

موقعیت جغرافیایی و مشخصات منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شهرستان چهاربرج استان آذربایجان غربی به وسعت ۳۰۰۰ هکتار و در جنوب دریاچه ارومیه قرار داشت. مختصات جغرافیایی منطقه بین ۴۱۰۳۰۹۵ تا ۴۱۱۲۳۹ عرض شمالی و ۵۸۴۳۶۳ تا ۵۸۷۴۸۳ طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). متوسط بارندگی سالانه منطقه مطالعاتی براساس آمار بلندمدت ایستگاه سینوپتیک میاندوآب ۳۰۶ میلی‌متر، متوسط دمای سالانه ۱۴/۵°C و اقلیم آن بر طبق روش دومارتن، نیمه‌خشک بود. منطقه شامل انواع دشت‌های آبرفتی (دریاچه ارومیه و زرینه‌رود)، دامنه‌ای و سیلابی دوره‌های سوم زمین‌شناسی بود. از کشت‌های رایج منطقه می‌توان به گندم، جو، چغندر قند، یونجه، پیاز، گوجه‌فرنگی، آفتابگردان، نخود، سیب‌زمینی و باغ‌های انگور، سیب، هلو، شلیل و زردآلو اشاره نمود. آب اراضی کشاورزی در سه ماه فصل آبیاری از محل رودخانه زرینه‌رود با احداث ایستگاه پمپاژ و بندهای کوچک تامین می‌شد.



شکل ۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان آذربایجان غربی

تجزیه‌های فیزیکی، زیستی و شیمیایی خاکرخ‌ها

این پژوهش تجربی در سال ۱۴۰۳ در دو کاربری زراعی و باغ انجام و در هر کاربری ۹ پایگاه به‌منظور نمونه‌برداری از عمق‌های صفر تا ۳۰ و صفر تا ۶۰ سانتی‌متری خاک برداشت شد. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی، زیستی و فیزیکی خاک پس از ارزیابی نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی و همچنین بازدیدهای صحرایی و میدانی نمونه‌های خاک از هر پایگاه به صورت نمونه مرکب تهیه شد. برای تهیه هر نمونه خاک مرکب، حداقل سه زیرنمونه (زیرنمونه‌های مستقل) از نقاط مختلف محل نمونه‌برداری برداشت شد. این زیرنمونه‌ها سپس با یکدیگر به طور کامل و یکنواخت مخلوط گردیدند تا یک نمونه مرکب نماینده و همگن از آن محل به دست آید. این روش استاندارد، تنوع مکانی خاک را کاهش داده و دقت نتایج آزمایشگاهی را افزایش می‌دهد. نظر به تاثیر کلی عوامل خاکی و چشم‌انداز اراضی جهت کاهش تاثیر و افزایش همگنی بین پایگاه‌های مورد مطالعه، محل نمونه‌برداری در هر پایگاه از نظر فیزیوگرافی با ارتفاع، جهت و موقعیت شیب و مواد مادری یکسان گزینش شدند.

در ادامه تجزیه آزمایشگاهی نمونه‌های مرکب خاک اعم از آزمایشات اولیه و آزمایشات کامل براساس روش‌های متداول و استاندارد مورد تایید و کاربرد موسسه تحقیقات خاک و آب، اندازه‌گیری شد. بر این اساس بافت خاک و درصد نسبی ذرات شن، سیلت و رس در بخش معدنی به روش هیدرومتری [Gee & Bauder, 1986] تعیین شد. پایداری خاک‌دانه به روش الک‌تر در سری الک‌های استاندارد [Yoder, 1936] اندازه‌گیری شد. میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌های پایدار به روش الک‌تر [Kemper & Rosenau, 1986]، واکنش خاک در گل اشباع [McLean, 1982]، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع [Rhoades, 1996] با استفاده از دستگاه ECمتر، کربن آلی به روش والکلی-بلاک [Walkley & Black, 1934]، نیتروژن کل به روش کجلدال [Bremner, 1996]، فسفر قابل دسترس به روش عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم [Olsen, 1954]، پتاسیم قابل دسترس به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم [Lavkulich, 1981]، ظرفیت تبادل کاتیونی از طریق جانشین کردن کاتیون‌های قابل تبادل با یون سدیم [Bower *et al.*, 1952]، بی‌کربنات محلول با استفاده از روش تیتراسیون [Bashour & Sayegh, 2007] و نسبت جذب سدیم در عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری شدند [Walker & Bernal, 2008]. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های زیستی نمونه‌های جداگانه از خاک مرطوب مزرعه برداشته شد و تا زمان اندازه‌گیری در دمای ۴°C نگهداری شد. تنفس میکروبی خاک با استفاده از دی‌اکسید کربن آزادشده از ۲۵ گرم خاک مرطوب مزرعه در دمای ۲۵°C اندازه‌گیری شد [Alef, 1995]. کربن زیست‌توده میکروبی نیز با استفاده از روش تدخین استخراج و از اختلاف مقدار کربن آلی در خاک تدخین‌شده و -نشده محاسبه شد [Vance *et al.*, 1987]. خاک‌های دست‌نخورده با استفاده از سیلندر انجام شد [Grossman & Reinsch, 2002].

تعیین مجموعه حداقل داده

با استفاده از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی، از میان کل ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و زیستی اندازه‌گیری‌شده، یک مجموعه کوچک‌تر و بهینه (حداقل ویژگی‌های موثر) انتخاب شد [Hamidi Nehrani *et al.*, 2020]. سپس روش تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA) بر روی مقادیر استانداردشده ویژگی‌ها انجام شد. عمده‌ترین هدف استفاده از این روش کاهش حجم داده‌ها و تعیین مهم‌ترین متغیرهای موثر است. مولفه‌های اصلی با ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک برای انتخاب حداقل ویژگی‌های موثر در نظر گرفته شدند [Yao *et al.*, 2013]. سپس در هر مولفه اصلی با ایجاد چرخش واریمکس، ویژگی‌های با بالاترین وزن (۱۰% بالاترین وزن) به عنوان حداقل ویژگی‌های موثر انتخاب شدند. در صورت انتخاب بیش از یک ویژگی برای هر مولفه، ویژگی‌های با ضرایب همبستگی بالا (r>۰/۶) و وزن پایین‌تر حذف و حداقل ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک در نظر گرفته شد [Gorji *et al.*, 2018].

تعیین شاخص‌های کیفیت خاک

به منظور تهیه شاخص‌های کیفیت خاک از مجموعه حداقل داده‌های منتخب استفاده شد و مقادیر شاخص‌ها با به‌کارگیری روش‌های خطی و غیرخطی نمره‌دهی شده و بدون بُعد شدند [Hamidi Nehrani *et al.*, 2020]. براساس تاثیر هر کدام از شناسه‌های خاک بر کیفیت خاک، به سه دسته اصلی تقسیم شدند: - ویژگی‌هایی که افزایش مقدار آنها (ماده آلی، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، پایداری خاک‌دانه، ظرفیت نگهداری آب) کیفیت خاک را بهبود می‌بخشد (بیشتر بهتر است)؛

- ویژگی‌هایی که افزایش مقدار آنها (چگالی ظاهری، هدایت الکتریکی بالا، مقاومت نفوذ، شوری) کیفیت خاک را کاهش می دهد (کمتر بهتر است)؛ و

- ویژگی‌هایی که مقدار بهینه‌ای دارند (Ph خاک که معمولاً محدوده ۷/۵-۶/۵ بهینه است) و در مقادیر کمتر یا بیشتر از آن، کیفیت کاهش می‌یابد. در این روش، امتیاز تا نقطه بهینه افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد.

همه ویژگی‌های انتخاب‌شده در حداقل مجموعه داده‌های این پژوهش از نوع "بیشتر بهتر" یا "کمتر بهتر" بودند و حالت بهینه وجود نداشت. این انتخاب بر پایه طبیعت ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی مورد مطالعه (که عمدتاً مثبت یا منفی مستقیم با کیفیت خاک ارتباط داشتند) صورت گرفت و در نمره‌دهی خطی از رابطه ۱ (بیشتر بهتر) یا رابطه ۲ (کمتر بهتر) استفاده شد که در آن، SL نمره خطی بین ۰ و ۱، x مقدار ویژگی، m حداقل مقدار و n حداکثر مقدار هر شاخص بود.

$$SL = (x - m) / (n - m)$$ رابطه ۱

$$SL = 1 - ((x - m) / (n - m))$$ رابطه ۲

برای نمره‌دهی غیرخطی ویژگی‌ها، از منحنی نوع سیگموئیدی رابطه ۳ استفاده شد که در آن، SNL نمره‌دهی غیرخطی هر ویژگی خاک (از ۰ تا ۱)، x مقدار شناسه انتخاب‌شده، x_0 مقدار میانگین هر شناسه و b شیب معادله (مقدار آن برای "بیشتر بهتر" برابر ۲/۵- و برای "کمتر بهتر" برابر ۲/۵+) بود.

رابطه ۳)

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

برای ادغام نمرات شناسه‌های مجموعه حداقل داده‌ها در شاخص‌های کلی از روش میانگین‌گیری (رابطه ۴) استفاده شد که SQI_w شاخص کیفیت تجمعی، S_i امتیاز ویژگی‌ها با روش‌های خطی و غیرخطی و n تعداد ویژگی‌ها بود. نهایتاً دو شاخص SQI-1 با نمره‌دهی خطی و SQI-2 با نمره‌دهی غیرخطی تهیه شد.

رابطه ۴)

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

تجزیه و تحلیل‌های آماری داده‌ها

برای ارزیابی نرمال‌بودن داده‌ها، از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده و نتایج با معیارهای استاندارد تفسیر شدند. داده‌های به‌دست‌آمده در قالب نرم‌افزار SPSS 21 با استفاده از تحلیل واریانس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و در ادامه توصیف آماری خصوصیات خاک تعیین شد. برای مقایسه میانگین‌های تاثیر کاربری‌های باغی و زراعی در منطقه مطالعاتی از آزمون t مستقل استفاده شد. بررسی همبستگی بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون انجام شد.

یافته‌ها

خاک‌های منطقه مطالعه در بازه‌ای قلیایی بودند (میانگین ۷/۹) که با حضور قابل توجه کربنات کلسیم معادل (میانگین ۱۲/۹۵%، دامنه ۱۹/۳-۸/۳%) همخوان بود. دامنه بافت از شن لومی تا رسی لومی متغیر بود و چگالی ظاهری با میانگین ۱/۱۵ g/cm^3 در محدوده متعارف خاک‌های نیمه‌خشک قرار داشت. درصد اشباع ۶۸-۲۵ (میانگین ۴۵/۵۳%) و قطر میانگین وزنی خاک‌دانه‌ها ۲/۵۵-۰/۱۱ mm (میانگین ۱/۴۳) گزارش شد. ظرفیت تبادل کاتیونی نیز دامنه وسیعی از ۴/۶ تا ۴۰/۵۷ cmol(+)/kg با میانگین ۲۳/۲۴ نشان داد. کربن آلی خاک در بسیاری از نقاط پایین بود (میانگین ۰/۸۹%) و با نیتروژن کل (میانگین ۱/۶۵%) تصویر کمبود بالقوه مواد غذایی بنیادین را ترسیم کرد. با وجود این، فسفر قابل جذب از ۱/۵ تا ۱۴۹/۷ ppm (میانگین ۱۹/۶۷ ppm) و به‌ویژه پتاسیم قابل جذب از ۱۰۷ تا ۱۵۸۵/۶۷ ppm (میانگین ۴۱۳/۵۶ ppm) دامنه تغییر چشمگیری داشتند (جدول ۱).

جدول ۱) توصیف آماری ویژگی‌های خاک در منطقه مطالعاتی و مقایسه میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده در دو کاربری زراعی و باغی

ویژگی خاکی (واحد)	حداقل	حداکثر	میانگین کلی	میانگین باغی	میانگین زراعی	سطح معنی‌داری
شن (%)	۱	۵۰	۱۱/۹۶±۲۰/۵۵	۱۴/۷۴±۲۴/۲۴	۹/۶۸±۱۸/۵۱	۰/۰۸۳
سیلت (%)	۲۴	۶۳	۸/۰۱±۴۸/۲۶	۹/۵۱±۴۹/۵۰	۷/۰۶±۴۷/۵۸	۰/۳۷۳
رس (%)	۵	۵۵/۶۷	۱۱/۲۲±۳۱/۱۵	۱۴/۷۵±۲۶/۴۹	۱۰/۱۴±۳۳/۷۴	۰/۰۸۵
وزن مخصوص ظاهری (g/cm^3)	۱/۰۹	۵/۲۱	۰/۷۲±۱/۵۱	۰/۱۰±۱/۲۸	۰/۸۷±۱/۶۳	۰/۰۰۸
واکنش خاک	۷/۲۵	۸/۶۵	۰/۲۴±۷/۸۷	۰/۲۸±۷/۹۶	۰/۲۰±۷/۸۲	۰/۰۱۱
هدایت الکتریکی (dS/m)	۰/۲۹	۴۲/۸۸	۶/۵۴±۵/۳۰	۲/۰۷±۲/۳۴	۷/۵۴±۶/۹۴	۰/۰۰۰۱
نسبت جذب سدیم (%)	۱/۵	۶۲/۱۷	۱۱/۳۴±۱۱/۲۴	۱/۸۹±۳/۷۷	۱۲/۲۷±۱۵/۷۳	۰/۰۰۰۱
نیتروژن کل (%)	۰	۱۵	۳/۲۶±۱/۶۵	۴/۲۰±۴/۴۹	۰/۰۴±۰/۰۸	۰/۰۰۰۱
فسفر (ppm)	۱/۵	۱۴۹/۷	۲۳/۷۶±۱۹/۶۷	۱۲/۱۷±۱۳/۷۵	۲۷/۷۹±۲۲/۹۴	۰/۱۱۴
پتاسیم (ppm)	۱۰۷	۱۵۸۵/۶۷	۲۰۸/۳۷±۴۱۳/۵۶	۱۳۸/۶۹±۳۱۵/۵۰	۲۲۱/۵۰±۴۶۷/۸۰	۰/۰۰۲
ماده آلی (%)	۰/۱۷	۴/۶	۰/۵۴±۰/۸۹	۰/۸۶±۰/۹۲	۰/۲۳±۰/۸۸	۰/۷۴۴
درصد اشباع (%)	۲۵	۶۸	۹/۰۷±۴۵/۵۳	۱۰/۴۵±۴۳/۰۰	۷/۹۸±۴۶/۹۳	۰/۱۰۳
کربنات کلسیم معادل (%)	۸/۳	۱۹/۳	۱/۸۹±۱۲/۹۵	۲/۵۴±۱۲/۷۰	۱/۴۲±۱۳/۰۸	۰/۴۹۰
تنفس میکروبی (mg C/kg day)	۰/۷	۰/۷۱	۰/۰۹±۰/۱۷	۰/۱۴±۰/۲۲	۰/۰۳±۰/۱۴	۰/۰۰۰۱
کربن زیست‌توده میکروبی (Mg/g)	۴۹	۲۳۰	۴۹/۲۶±۱۴۷/۸۴	۶۱/۱۶±۱۶۶/۸۵	۳۸/۰۵±۱۳۷/۳۳	۰/۰۱۳
میانگین وزنی قطر خاک‌دانه (mm)	۰/۱۱	۲/۵۵	۰/۴۸±۱/۴۳	۰/۶۴±۱/۵۳	۰/۳۶±۱/۳۷	۰/۲۶۸
ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol/kg)	۶/۴	۴۰/۵۷	۸/۶۳±۲۳/۲۴	۵/۰۳±۱۴/۳۸	۵/۸۱±۲۸/۱۵	۰/۰۰۰۱

تفاوت‌های معنی‌داری میان دو کاربری زراعی و باغی در مجموعه‌ای از ویژگی‌های کلیدی خاک مشاهده شد. خاک‌های زراعی با هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم به طور معنی‌داری بالاتر از باغی بود و همراه با چگالی ظاهری بیشتر، الگوی روشنی از فشار شوری-سدیمی و تراکم فیزیکی در اراضی زراعی ترسیم کردند. در مقابل، واکنش خاک در کاربری باغی به طور معنی‌داری بالاتر بود و می‌تواند بر تحرک عناصر کم‌نیاز و فراهمی فسفر اثر بگذارد. ظرفیت تبادل کاتیونی نیز در کاربری زراعی به طور معنی‌دار بزرگ‌تر گزارش شد. از منظر حاصلخیزی، پتاسیم قابل جذب در کاربری زراعی به طور معنی‌داری بیش از باغی بود در

حالی که فسفر اختلاف معنی‌داری نشان نداد و کربن آلی خاک نیز بین دو کاربری تفاوتی نداشت. در نقطه مقابل، نیتروژن کل در کاربری باغی به طور معنی‌دار بالاتر بود. از منظر ویژگی‌های زیستی، کاربری باغی به طور معنی‌داری مقادیر بالاتری از تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی نشان داد. کربنات کلسیم معادل نیز بین کاربری‌ها تفاوتی نشان نداد (جدول ۱).

ویژگی‌هایی که اختلاف معنی‌داری بین کاربری‌های باغی و زراعی داشتند به منظور انتخاب حداقل داده مورد ارزیابی قرار گرفتند. تحلیل پارامترهای اصلی، سه مولفه (مولفه اول: گرادیان شوری-سدیمی؛ مولفه دوم: محور زیستی-تغذیه‌ای؛ مولفه سوم: تاثیر پتاسیم و ظرفیت تبادل کاتیونی) را آشکار کرد که در مجموع ۶۳/۸% از پراکنش داده‌ها را تبیین کردند (جدول ۲).

شوری و نسبت جذب سدیم همبستگی بسیار قوی و معنی‌داری داشتند و هر دو با واکنش خاک و با نیتروژن کل همبستگی منفی نشان دادند. ظرفیت تبادل کاتیونی با نسبت جذب سدیم و پتاسیم مثبت و با نیتروژن کل و تنفس میکروبی منفی همبسته بود؛ یعنی در حالی که ظرفیت مبادله‌ای بالاتر می‌تواند با انباشت کاتیون‌های قلیایی همراه باشد، با وضعیت نیتروژنی و فعالیت تنفسی میکروبی رابطه معکوس داشت. از سوی دیگر، کربن زیست توده میکروبی با ماده آلی و کربنات کلسیم معادل همبستگی مثبت داشت و تنفس میکروبی نیز با نیتروژن کل همبسته بود (جدول ۳).

جدول ۲) تجزیه به مولفه‌های اصلی (مولفه اول: گرادیان شوری-سدیمی؛ مولفه دوم: محور زیستی-تغذیه‌ای؛ مولفه سوم: تاثیر پتاسیم و ظرفیت تبادل کاتیونی)

شناسه‌های خاکی	مولفه سوم	مولفه دوم	مولفه اول
هدایت الکتریکی	۰/۰۴۷	-۰/۰۹۰	*۰/۹۶۵
نسبت جذب سدیم	۰/۱۱۴	-۰/۱۷۹	۰/۹۴۸
واکنش خاک	-۰/۰۱۷	۰/۴۰۸	-۰/۴۳۱
تنفس میکروبی	-۰/۱۱۴	*۰/۷۳۸	۰/۰۲۴
نیتروژن کل	-۰/۲۰۱	*۰/۷۰۹	-۰/۲۶۵
وزن مخصوص ظاهری	۰/۲۱۱	*-۰/۶۹۸	۰/۳۰۲
کربن زیست‌توده میکروبی	۰/۱۱۴	۰/۴۲۵	-۰/۰۷۱
پتاسیم	*۰/۸۷۸	۰/۱۰۱	۰/۰۷۲
ظرفیت تبادل کاتیونی	۰/۷۳۲	-۰/۴۲۹	۰/۰۷۷

*ویژگی‌های انتخاب‌شده برای حداقل ویژگی‌های موثر

جدول ۳) همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های خاک

ویژگی خاک	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
۱- وزن مخصوص ظاهری	۰/۱۷	-۰/۱۵	-۰/۱۷	۰/۰۳	-۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۰۲	-۰/۱۲	۱
۲- واکنش خاک	-۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۳	-۰/۱۲	۰/۳۹**	۰/۳۴**	-۰/۳۲**	۱	
۳- شوری	۰/۱۸	-۰/۱	-۰/۱۵	۰/۰۸	-۰/۳۱**	۰/۹۶**	۱		
۴- نسبت جذب سدیم	۰/۲۷*	۰/۱۶	-۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۳۷**	۱			
۵- نیتروژن کل	-۰/۵۳**	۰/۱۸	۰/۳۴**	-۰/۰۴	۱				
۶- پتاسیم	۰/۳۹**	-۰/۰۷	-۰/۰۶	۱					
۷- تنفس میکروبی	-۰/۳۲**	۰/۱۵	۱						
۸- کربن زیست‌توده میکروبی	-۰/۰۸	۱							
۹- ظرفیت تبادل کاتیونی	۱								

*معنی‌داری در سطح ۰/۰۵؛ ** معنی‌داری در سطح ۰/۰۱

میانگین شاخص کیفیت خاک در کاربری باغی به طور معنی‌داری از کاربری زراعی بیشتر بود. در امتیازدهی خطی، میانگین کاربری باغی ۰/۱۲±۰/۴۶ و میانگین کاربری زراعی ۰/۰۶±۰/۳۲ بود (p=۰/۰۰۱). در امتیازدهی غیرخطی، میانگین کاربری باغی ۰/۱۷±۰/۵۸ و میانگین کاربری زراعی ۰/۰۸±۰/۳۸ به دست آمد (p=۰/۰۰۱).

بحث

خاک‌های منطقه مورد پژوهش ماهیتاً قلیایی و حاوی کربنات کلسیم قابل توجهی هستند. این وضعیت خاک‌های آهکی می‌تواند فراهمی برخی ریزمغذی‌ها (مانند آهن و روی) را کاهش داده و به علت رسوب فسفات کلسیم، دسترسی فسفر را محدود کند [Shrivastava & Kumar, 2015].

در مقابل، شوری و سدیمی خاک‌های منطقه پراکنش زیادی نشان می‌دهد. وجود چنین سطوح بالای نمک و سدیم در بخشی از نمونه‌ها بیانگر پهنه‌های بحرانی از نظر پایداری ساختمان خاک و نفوذپذیری است، زیرا تجمع نمک‌ها (خصوصاً سدیم تبادلی) می‌تواند باعث پراکنده‌شدن ذرات رس و فروپاشی خاک‌دانه‌ها شود [Stavi *et al.*, 2021]. وجود سدیم در خاک با پراکنده‌کردن رس، خلل و فرج خاک را مسدود می‌کنند و نفوذ آب و تهویه را به‌شدت مختل می‌سازند؛ این وضعیت در اراضی آبیاری‌شده مناطق خشک پدیده‌ای شناخته‌شده است که بهره‌وری خاک را کاهش می‌دهد [Singh, 2015; Stavi *et al.*, 2021]. بررسی ویژگی‌های فیزیکی نشان داد بافت خاک در منطقه بین شن لومی تا رسی لومی متغیر است و میانگین چگالی ظاهری حدود ۱/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است که برای خاک‌های نیمه‌خشک متداول است [Worku & Bedadi, 2016].

مقادیر درصد اشباع خاک و قطر میانگین وزنی خاک‌دانه‌ها نشان‌دهنده پایداری ساختمانی متوسط خاک بود که انتظار می‌رود در نقاط با شوری و سدیمی بالا کاهش یابد. ظرفیت تبادل

کاتیونی خاک‌های منطقه نیز دامنه وسیعی را دربر می‌گیرد. این امر حاکی از تنوع در بافت (محتوای رس) و ماده آلی خاک و نیز غلظت یون‌های کلسیم و سدیم تبادلی بود. از منظر حاصلخیزی شیمیایی، اکثر نقاط دچار فقر ماده آلی و نیتروژن کل بودند. هرچند فسفر و پتاسیم قابل جذب تغییرات شدیدی داشت که احتمالاً بازتاب تفاوت‌های مدیریتی (مصرف کودهای معدنی یا آلی)، ماهیت ماده مادری و برهمکنش این عناصر با کربنات کلسیم و شوری بود [Masoumi Tabar Zanjani *et al.*, 2024; Sadeghi *et al.*, 2022]. این یافته تاکید کرد که برای تبیین حاصلخیزی خاک در این منطقه نیمه‌خشک، پایش همزمان کربن آلی، عناصر غذایی پرنیاز و ویژگی‌های شوری و سدیمی ضروری است. از منظر ویژگی‌های زیستی، شاخص‌های میکروبی خاک حساسیت بیشتری به شرایط مدیریتی و تنش‌ها نشان دادند. ناهمگنی زیاد در ویژگی‌های زیستی حاکی از آن است که شناسه‌های زیستی می‌توانند برای تفکیک وضعیت‌های مدیریتی (مثلاً تفاوت بین کاربری‌ها) و تشخیص تغییرات کوتاه‌مدت در کیفیت خاک بسیار کارآمدتر از برخی شاخص‌های شیمیایی کندتغییر باشند [Kibblewhite *et al.*, 2008; Pouladi *et al.*, 2020]. به بیان دیگر، موجودیت کم کربن آلی در این خاک‌ها سبب می‌شود کوچک‌ترین تغییر در مدیریت (افزایش یا کاهش بقایا، شخم، آبیاری، کوددهی) مستقیماً بر جمعیت و فعالیت میکروبی اثر گذاشته و این اثر سریع‌تر قابل سنجش باشد [Idowu *et al.*, 2017].

خاک‌های زراعی به طور میانگین شوری و سدیمی بسیار بالاتری نسبت به خاک باغی داشتند. چنین الگویی می‌تواند نتیجه مدیریت آبیاری سنگین بدون زهکشی کافی و تردد مکرر ماشین‌آلات در اراضی زراعی باشد که باعث تجمع نمک در ناحیه ریشه و کوبیدگی خاک شده است [Slade & Wells, 2022; Stavi *et al.*, 2021]. برعکس، خاک‌های باغی واکنش خاک بالاتری را نشان دادند [Hass *et al.*, 2012]. واکنش خاک بالاتر می‌تواند تحرک ریزمغذی‌هایی چون آهن و روی را کاهش و همچنین حلالیت فسفات را محدود کند؛ بنابراین مدیریت تغذیه در باغ‌ها باید به این نکته توجه داشته باشد که علی‌رغم کیفیت کلی بهتر خاک باغی، ممکن است کمبود برخی عناصر کم‌مصرف تحت pH قلیایی رخ دهد [Alloway, 2008].

ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های زراعی به طور معنی‌داری بیشتر از باغی بود این موضوع با بافت ریزدانه‌تر خاک‌های زراعی همسو است. از دیدگاه حاصلخیزی، غلظت پتاسیم قابل جذب در خاک زراعی حدود ۱/۵ برابر باغ بود؛ این احتمالاً ناشی از مصرف کودهای پتاسه در زمین‌های زراعی و همچنین توان نگهداشت بیشتر پتاسیم در خاک‌های زراعی است. در مقابل، فسفر قابل جذب تفاوت معنی‌داری بین دو کاربری نداشت؛ ظاهراً هر دو نوع کاربری به یک میزان از کودهای فسفاته بهره برده یا دچار تثبیت فسفر توسط آهک شده‌اند [Havlin *et al.*, 2016]. کربن آلی خاک نیز در باغ و زراعت تقریباً یکسان بود و اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. این نتیجه غیرمنتظره است زیرا معمولاً انتظار می‌رود باغ‌های دایمی به دلیل بازگشت بقایا و حداقل شخم، ماده آلی بیشتری انباشته کنند [Slade & Wells, 2022]. با وجود هم‌سطحی کربن آلی، نیتروژن کل خاک در کاربری باغی به طور معنی‌داری بیشتر از زراعی بود. میانگین نیتروژن کل در باغ حدود دو برابر زراعت اندازه‌گیری شد که نشان می‌دهد باغ‌ها از نظر وضعیت نیتروژنی غنی‌ترند. در پژوهشی *رسولی‌صدقیانی* و *شیخلو* (۲۰۱۶) گزارش کردند مقدار نیتروژن در کاربری باغی بیشتر از زراعی بود و همبستگی بسیار بالایی بین مقدار نیتروژن و کربن آلی خاک‌ها مشاهده شد که با نتایج به‌دست‌آمده مطابقت دارد. احتمالاً وجود پوشش‌های کف باغ و عدم برداشت سالانه کل بیوماس باعث می‌شود بخش بیشتری از نیتروژن در سیستم باغ باقی بماند و معدنی‌شدن و تثبیت طبیعی نیتروژن تقویت گردد [Fan *et al.*, 2024].

این یافته‌ها با مشاهدات سایر پژوهش‌ها همخوانی دارد؛ به عنوان نمونه، مطالعه *پولادی* و همکاران در منطقه‌ای نیمه‌خشک در شمال غرب ایران نیز نشان داد که اراضی باغی شاخص کیفیت خاک بالاتری نسبت به زمین‌های زراعی دارند و این تفاوت عمدتاً ناشی از بهبود خصوصیات زیستی و نیتروژن خاک در باغ‌هاست. در پژوهش آنها نیز ماده آلی دو کاربری اختلاف کمی داشت اما فعالیت میکروبی و نیتروژن در باغ بیشتر بود و این مولفه‌ها به عنوان عوامل کلیدی کیفیت خاک شناسایی شدند [Pouladi *et al.*, 2020].

علاوه بر شناسه‌های شیمیایی، تفاوت در ویژگی‌های زیستی خاک نیز در دو کاربری معنادار بود. خاک باغی تنفس میکروبی و کربن زیست‌توده میکروبی بالاتری نسبت به خاک زراعی نشان داد. افزایش معنی‌دار این شاخص‌ها در باغ حتی با وجود سطح مشابه ماده آلی مبین آن است که شرایط خاک‌های باغ برای فعالیت میکروبی مناسب‌تر است [Masoumi Tabar Zanjani *et al.*, 2024]. مدیریت باغی که شامل باقی‌گذاشتن بقایای برگ و گیاه در سطح خاک، کوددهی آلی گاه‌به‌گاه و فقدان شخم سالانه است، موجب می‌شود میکروب‌های خاک زیستگاه بهتری داشته باشند و جمعیت و تنوع میکروبی افزایش یابد [Cabrera-Rodríguez *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2022]. در مقابل، در اراضی زراعی شخم‌خورده و شور، تنش‌های فیزیکی (تراکم، خشک‌شدن دوره‌ای) و اسمزی (شوری) می‌تواند فعالیت زیستی را سرکوب کرده و معدنی‌شدن مواد آلی را کند نماید. این نتیجه با گزارش‌های دیگر نیز مطابقت دارد که نشان می‌دهند افزودن بقایای آلی و کاهش شدت خاک‌ورزی می‌تواند در مدت کوتاهی تنفس و زیست‌توده میکروبی خاک را در سیستم‌های باغی و جنگلی نسبت به زراعی افزایش دهد [Idowu *et al.*, 2017; Slade & Wells, 2022].

برای شناسایی مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت خاک، آن دسته از ویژگی‌هایی که بین دو کاربری اختلاف معنی‌دار داشتند وارد

تحلیل مولفه‌های اصلی شدند که سه مولفه اصلی را آشکار ساخت که مجموعاً حدود ۶۳/۸٪ از تغییرات داده‌ها را تبیین می‌کردند. محور اول بیانگر تضاد بین خاک‌های شور و سدیمی در یک سو و خاک‌های کم‌نمک‌تر با واکنش خاک کمی بالاتر در سوی دیگر است. محور دوم را می‌توان منعکس‌کننده توازن بین فعالیت زیستی و حاصلخیزی نیتروژنی با شاخص‌های فیزیکی خاک دانست؛ خاک‌هایی که تنفس میکروبی و نیتروژن بالاتری دارند معمولاً نرم‌تر و کم‌تراکم‌ترند و برعکس خاک‌های متراکم‌تر فعالیت زیستی کمتری نشان می‌دهند [Hamidi Nehrani *et al.*, 2020]. مولفه سوم عمدتاً تحت تاثیر پتاسیم و تا حدی ظرفیت تبادل کاتیونی قرار داشت. به طور کلی، الگوی تجزیه به مولفه‌های اصلی نشان داد که پویایی کیفیت خاک در این منطقه نیمه‌خشک عمدتاً تحت تاثیر سه عامل است: تنش نمکی-سدیمی (محور اول)، وضعیت فعالیت زیستی-نیتروژنی در برابر تراکم خاک (محور دوم) و ظرفیت تبادل کاتیونی/پتاسیم (محور سوم). این نتایج با مطالعات پیشین در مناطق خشک سازگار است که معمولاً شوری، ماده آلی/نیتروژن، و بافت/ساختار خاک را به عنوان مهم‌ترین پیشران‌های کیفیت خاک معرفی کرده‌اند [Núñez-Vázquez *et al.*, 2016; Pouladi *et al.*, 2020].

از منظر درک فرآیندهای خاکی، مهم‌ترین پیام روشنی که هر دو شاخص (خطی و غیرخطی) در مطالعه حاضر نشان دادند، برتری معنی‌دار کیفیت خاک در کاربری باغی نسبت به زراعی است. این امر تایید می‌کند که ترکیب حداقل مولفه‌های منتخب توانسته است اثرات سودمند مدیریت باغی (نظیر بهبود ساختمان، فعالیت زیستی و حاصلخیزی) را در قالب یک شاخص عددی منعکس کند. همچنین همسوبودن نتیجه هر دو روش محاسباتی به پژوهشگران اطمینان می‌دهد که نتیجه‌گیری در خصوص کیفیت بالاتر خاک‌های باغی مستحکم و مستقل از روش محاسبه است. با این حال، برای هدف کاربردی (مثلاً پایش تغییرات کیفیت خاک در زمان یا مقایسه مناطق مختلف)، انتخاب روش بهینه اهمیت می‌یابد. شواهد این تحقیق دلالت بر آن دارد که روش غیرخطی قدرت تبیین و تفکیک بیشتری در این خاک‌ها داشته و لذا برای مطالعات آتی در مناطق مشابه نیمه‌خشک پیشنهاد می‌شود. در عین حال باید توجه داشت که تهیه توابع غیرخطی مناسب برای هر شاخص نیازمند داده‌های کالیبراسیون و پژوهش‌های تکمیلی است [Andrews *et al.*, 2002] و چنانچه چنین داده‌هایی در دسترس نباشد، روش خطی وزن‌دهی مساوی نیز می‌تواند تصویری کلی از کیفیت نسبی خاک‌ها ارایه دهد.

نتیجه‌گیری

تغییر کاربری از زراعت سنتی به باغداری پایدار (به‌ویژه درختان مقاوم به شوری متوسط مانند پسته، بادام یا انگور) در فواصل نزدیک تا متوسط دریاچه، یکی از موثرترین راهکارهای احیای خاک و افزایش تاب‌آوری معیشتی کشاورزان است. در اراضی زراعی که تغییر کاربری ممکن نیست، اجرای عملیات اصلاحی فوری شامل شست‌وشوی نمک، کاربرد گچ کشاورزی، افزودن ماده آلی بالا و بهبود زهکشی الزامی است. با توجه به گرادیان شدید شوری، هرگونه برنامه احیای خاک باید مکان‌محور و براساس فاصله از دریاچه طراحی شود.

تشکر و قدردانی: از دانشگاه زنجان که زمینه انجام این پژوهش را در قالب رساله دکتری برای اینجانبان فراهم نموده و همچنین متصدیان مجله وزین تحقیقات جغرافیایی به لحاظ فراهم‌نمودن زمینه چاپ این مقاله تشکر و قدردانی می‌نماییم.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: امید احمدی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۴۰%)؛ پریسا علمداری (نویسنده دوم)، نگارنده بحث (۲۰%)؛ محمد صادق عسکری (نویسنده سوم)، روش‌شناس (۲۰%)؛ مسلم ثروتی (نویسنده چهارم)، تحلیلگر آماری/پژوهش کمکی (۲۰%)

منابع مالی: هزینه‌های مربوط به یافته‌های ارایه‌شده در این مقاله، توسط معاونت محترم پژوهشی دانشگاه زنجان پرداخت شده است.

منابع

- Alef K (1995). Enrichment, isolation and counting of soil microorganisms. In: Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Cambridge: Academic Press. p. 123-191.
- Alloway BJ (2008). Zinc in soils and crop nutrition. Brussels-Paris: International Zinc Association (IZA)/International Fertilizer Industry Association (IFA).
- Andrews SS, Karlen DL, Mitchell JP (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. Agriculture, Ecosystems & Environment. 90(1):25-45.
- Askari MS, Holden NM (2014). Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. Geoderma. 230-231:131-142.
- Askari MS, Holden NM (2015). Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. Soil and Tillage Research. 150:57-67.
- Bashour II, Sayegh AH (2007). Methods of analysis for soils of arid and semi-arid regions. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bower CA, Reitemeier RF, Fireman M (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. Soil Science. 73(4):251-262.
- Bremner JM (1996). Nitrogen-total. In: Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods, 5.3. Madison: Soil Science Society of America/American Society of Agronomy. p. 1085-1121.
- Cabrera-Rodríguez A, Nava-Reyna E, Trejo-Calzada R, García-De La Peña C, Arreola-Ávila JG, Collavino MM, et al (2020). Effect of organic and conventional systems used to grow pecan trees on diversity of soil microbiota. Diversity. 12(11):436.
- Fan Z, Wang J, Lv D, Li S, Miao Y, Hu M, et al (2024). Effects of cropland-to-orchard conversion on soil multifunctionality, particularly nitrogen cycling in the eastern Loess Plateau. Frontiers in Microbiology. 15:1471329.

Society of Agronomy/Soil Science Society of America. p. 199-224.
- Mirzaee S, Nafchi AM, Ostovari Y, Seifi M, Ghorbani-Dashtaki S, Khodaverdiloo H, et al (2024). Monitoring and assessment of spatiotemporal soil salinization in the Lake Urmia region. Environmental Monitoring and Assessment. 196(10):958.
- Núñez-Vázquez M, Pérez-Domínguez G, Martínez-González L, Reyes-Guerrero Y, Coll-García Y (2016). Spirostanic analogues of brassinosteroids enhance the rice (Oryza sativa L.) cv. INCA LP-7 seedling growth under NaCl stress. Cultivos Tropicales. 37(4):152-159.
- Olsen SR (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Washington DC.: U.S. Department of Agriculture.
- Pouladi N, Jafarzadeh AA, Shahbazi F, Ghorbani MA, Greve MH (2020). Assessing the soil quality index as affected by two land use scenarios in Miandoab region. SN Applied Sciences. 2(11):1875.
- Rahimi A, Breuste J (2021). Why is Lake Urmia drying up? Prognostic modeling with land-use data and artificial neural network. Frontiers in Environmental Science. 9:603916.
- Rasouli-Sadaghiani M, Sheikhloo F (2016). Effects of agronomic, orchard and forest land uses on soil quality index (sqi) in west Azerbaijan Province. Water and Soil Science. 26 (2-1):141-153.
- Rhoades JD (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In: Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods, 5.3. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America. p. 417-435.
- Sadeghi M, Moezi A, Gholami A, Babaei-Nejad T, Panahpur E (2022). Effects of land-use changes on soil physical characteristics and nutrients in northern Khuzestan. Agricultural Engineering. 44(4):381-397. [Persian]
- Samaniego T, Sales B, Solórzano R (2025). Assessment of soil quality in peruvian andean smallholdings: A comparative study of PCA and expert opinion approaches. Sustainability. 17(17):7610.
- Shrivastava P, Kumar R (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. Saudi Journal of Biological Sciences. 22 (2):123-131.
- Singh A (2015). Soil salinization and waterlogging: A threat to environment and agricultural sustainability. Ecological Indicators. 57:128-130.
- Slade H, Wells L (2022). Soil quality enhancement with orchard age in pecan orchards of the southeastern US coastal plain. HortScience. 57(9):1099-1105.
- Stavi I, Thevs N, Priori S (2021). Soil salinity and sodicity in drylands: A review of causes, effects, monitoring, and restoration measures. Frontiers in Environmental Science. 9:712831.
- Uthappa AR, Devakumar AS, Das B, Mahajan GR, Chavan SB, Jinger D, et al (2024). Comparative analysis of soil quality indexing techniques for various tree based land use systems in semi-arid India. Frontiers in Forests and Global Change. 6:1322660.
- Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS, Beaton JD (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology and Biochemistry. 19(6):703-707.
- Walker DJ, Bernal MP (2008). The effects of olive mill waste compost and poultry manure on the availability and plant uptake of nutrients in a highly saline soil. Bioresource Technology. 99(2):396-403.
- Faryadi M (2023). Soil security under salt attack: Protection of the soil against the salinization caused by drying up of Lake Urmia. Soil Security. 13:100113.
- Feizizadeh B, Lakes T, Omarzadeh D, Sharifi A, Blaschke T, Karimzadeh S (2022a). Scenario-based analysis of the impacts of lake drying on food production in the Lake Urmia Basin of Northern Iran. Scientific Reports. 12(1):6237.
- Feizizadeh B, Omarzadeh D, Mohammadzadeh Alajujeh K, Blaschke T, Makki M (2022b). Impacts of the Urmia Lake drought on soil salinity and degradation risk: An integrated geoinformatics analysis and monitoring approach. Remote Sensing. 14(14):3407.
- Gee GW, Bauder JW (1986). Particle-size analysis. In: Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods, 5.1. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America. p. 383-411.
- Gorji M, Kakeh J, AliMohammadi A (2018). Quantitative soil quality assessment in different land uses at some parts of south eastern of Qazvin. Iranian Journal of Soil and Water Research. 48(5):941-950. [Persian]
- Grossman RB, Reinsch TG (2002). 2.1 Bulk density and linear extensibility. In: Methods of soil analysis: Part 4 physical methods, 5.4. Madison: Soil Science Society of America. p. 201-228.
- Guo J, Zhou H, Jia L, Wang Y, Fan M, Qin Y (2025). The effects of biochar on soil quality and potato yield in arid and semi-arid regions of North China. Plant and Soil. 516(2):1803-1824.
- Hamidi Nehrani S, Askari MS, Saadat S, Delavar MA, Taheri M, Holden NM (2020). Quantification of soil quality under semi-arid agriculture in the northwest of Iran. Ecological Indicators. 108:105770.
- Hass A, Gonzalez JM, Lima IM, Godwin HW, Halvorson JJ, Boyer DG (2012). Chicken manure biochar as liming and nutrient source for acid Appalachian soil. Journal of Environmental Quality. 41(4):1096-1106.
- Havlin JL, Tisdale SL, Nelson WL, Beaton JD (2016). Soil fertility and fertilizers. Delhi: Pearson Education India.
- Idowu OJ, Sanogo S, Brewer CE (2017). Short-term impacts of pecan waste by-products on soil quality in texturally different arid soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 48(15):1781-1791.
- Kemper WD, Rosenau RC (1986). Aggregate stability and size distribution. In: Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods, 5.1. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America. p. 425-442.
- Kibblewhite MG, Ritz K, Swift MJ (2008). Soil health in agricultural systems. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 363(1492):685-701.
- Lavkulich LM (1981). Methods manual: Pedology laboratory. Vancouver: University of British Columbia, Department of Soil Science.
- Macedo RS, Lima RP, De Almeida Alves Carneiro K, Moro L, Refati DC, Campos MCC, et al (2024). Assessment of soil quality of smallholder agroecosystems in the semiarid region of Northeastern Brazil. Land. 13(3):304.
- Masoumi Tabar Zanjani A, Amanifar S, Askari MS, 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. 55(11):2125-2143. [Persian]
- McLean EO (1982). Soil pH and lime requirement. In: Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties, 9.2.2. Madison: American

- Walkley A, Black IA (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 Z, Zhou M, Liu H, Huang C, Ma Y, Xin Ge H, et al (2022). Pecan agroforestry systems improve soil quality by stimulating enzyme activity. PeerJ. 10:e12663.
- Worku A, Bedadi B (2016). Studies on soil physical properties of salt affected soil in Amibara area, central rift valley of Ethiopia. International Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources. 3(2):8-17.
- Yao R, Yang J, Gao P, Zhang J, Jin W (2013). Determining minimum data set for soil quality assessment of typical salt-affected farmland in the coastal reclamation area. Soil and Tillage Research. 128:137-148.
- Yoder RE (1936). A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. Agronomy Journal. 28(5):337-351.