12/Iranian J. Soil Research (Soil and Water Sci.) Vol. 39, No 2 , 2025
DOI: 10.22092/IJSR.2025.370015.780

Assessing the effects of land use change on soil quality using composite indicators and total and minimum dataset analyses

Samira Hemmati[1*] , Kamran Moravej[2] , Mir Naser Navidi[3], Ahmad Golchin[4], and Mohammad Sadegh Askari[5]

1-PhD student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: s.hemmati@znu.ac.ir
2-Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: kmoravej@znu.ac.ir
3-Associate Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, Email: n.navidi@areeo.ac.ir
4-Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: agolchin2011@yahoo.com
5-Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: askari@znu.ac.ir

«Research Article»

Received: July 12, 2025, and Accepted: September 20, 2025

Abstract

Land-use change is one of the major factors influencing the physical, chemical, and biological properties of soils, ultimately affecting their overall quality. This study aimed to evaluate the impact of converting barren lands with semi-arid natural vegetation into olive orchards on soil quality in the Loshan region, Guilan Province, Iran. A total of 76 soil samples were collected from the 0–30 cm depth under two land uses (barren land and olive orchard), and 24 physical, chemical, and biological properties were measured. Soil quality index (SQI) was calculated using two approaches, the simple additive index (SQI_A) and the weighted additive index (SQI_W), based on both the total dataset (TDS) and the minimum dataset (MDS). Principal component analysis (PCA) was applied to identify the most influential soil indicators. In barren lands, the selected MDS indicators included bulk density, soil organic carbon, electrical conductivity, magnesium, cation exchange capacity, sodium adsorption ratio, mean weight diameter of aggregates, and calcium carbonate. In olive orchards, key indicators consisted of clay content, organic carbon, microbial respiration, available phosphorus, sodium, sodium adsorption ratio, and calcium carbonate. The results indicated that soil quality was significantly higher in olive orchards compared to barren lands. SQI values in olive orchards ranged from 0.75 to 0.79, while in barren lands they varied between 0.41 and 0.48. Furthermore, the MDS approach provided reliable performance with fewer variables compared to TDS, and the weighted indices offered more accurate evaluations by accounting for the relative importance of indicators. Overall, the findings demonstrate that the conversion of barren lands into olive orchards under semi-arid conditions can substantially improve soil quality. The use of MDS-based quantitative indices combined with weighted models provides an effective approach for regional soil quality assessment and sustainable land.

Keywords: Land-use change, Principal component analysis, Soil health, Soil quality index

* - **Corresponding author's email:** s.hemmati@znu.ac.ir

Cite this article: Hemmati, S., Moravej, K., Navidi, M.N., Golchin, A., and Askari, M.S., 2025. Assessing the effects of land use change on soil quality using composite indicators and total and minimum dataset analyses.Journal of Soil Research, 39(2) ,pp.225-246.

نشریه پژوهش‌های خاک / الف / جلد ۳۹/ شماره ۲ / ۱۴۰۴/۲۴۶-۲۲۵
DOI: 10.22092/IJSR.2025.370015.780

بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر کیفیت خاک با استفاده از شاخص‌های ترکیبی و تحلیل داده‌های جامع و حداقلی

سمیرا همتی*[۱]، کامران مروج[۲]، میرناصر نویدی[۳]، احمد گلچین[۴] و محمدصادق عسکری[۵]

۱-نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.s.hemmati@znu.ac.ir

۲- دانشیار، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.kmoravej@znu.ac.ir

۳- دانشیار، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.nnavidi@swri.ir

۴- استاد، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.agolchin2011@yahoo.com

۵- دانشیار، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. askari@znu.ac.ir

« مقاله پژوهشی»

دریافت:۱۴۰۴/۴/۲۱ و پذیرش:۱۴۰۴/۶/۳۱

چکیده

تغییر کاربری اراضی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و در نهایت کیفیت کلی آن به شمار می‌رود. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر تبدیل اراضی بایر با پوشش طبیعی نیمه‌بیابانی به باغ‌های زیتون بر کیفیت خاک در منطقه لوشان استان گیلان انجام گرفت. بدین منظور، ۷۶ نمونه خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر در دو کاربری (بایر و باغ زیتون) برداشت و ۲۴ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی اندازه‌گیری شد. شاخص کیفیت خاک (SQI) بر اساس دو مدل محاسباتی شامل شاخص تجمعی ساده (SQI_A) و شاخص تجمعی وزنی (SQI_W) و با استفاده از دو مجموعه داده، یعنی مجموعه کامل ویژگی‌ها (TDS) و مجموعه حداقلی(MDS) ، محاسبه گردید. برای انتخاب ویژگی‌های کلیدی، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)بهره‌گیری شد. در اراضی بایر، ویژگی‌هایی مانند جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی، هدایت الکتریکی، منیزیم، ظرفیت تبادل کاتیونی، نسبت جذب سدیم، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و کربنات کلسیم در مجموعه MDS قرار گرفتند؛ درحالی‌که در باغ‌های زیتون درصد رس، کربن آلی، تنفس میکروبی، فسفر قابل‌جذب، سدیم، نسبت جذب سدیم و کربنات کلسیم به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌ها شناسایی شدند. نتایج نشان داد کیفیت خاک در باغ‌های زیتون به‌طور معناداری بالاتر از اراضی بایر است؛ به‌طوری‌که مقادیر SQI در باغ زیتون بین ۰/۷۵ تا ۰/۷۹ و در اراضی بایر بین ۰/۴۱ تا ۰/۴۸ متغیر بود. افزون بر این، مجموعه داده‌های MDS با کاهش متغیرها و حفظ دقت، کارایی مناسبی نسبت به TDS داشت. همچنین، شاخص‌های وزنی به دلیل لحاظ کردن اهمیت نسبی متغیرها، ابزار دقیق‌تری برای تحلیل کیفیت خاک فراهم کردند. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که تغییر کاربری اراضی بایر به باغ‌های زیتون در شرایط نیمه‌خشک می‌تواند به بهبود چشمگیر کیفیت خاک منجر شود. کاربرد شاخص‌های کمّی مبتنی بر MDS و مدل وزنی نیز رویکردی کارآمد برای پایش و مدیریت پایدار خاک در مقیاس منطقه‌ای پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تغییر کاربری اراضی، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، سلامت خاک، شاخص کیفیت خاک

---

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول:A.majidi@areeo.ac.ir

استناد: همتی،س.، مروج، ک.، نویدی، م.ن.، گلچین، ا.، و عسکری.، م.ص.، ۱۴۰۴. بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر کیفیت خاک با استفاده از شاخص‌های ترکیبی و تحلیل داده‌های جامع و حداقلی. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش های خاک، (۲) ۳۹، ص ۲۴۶-۲۲۵.

مقدمه

در دهـه‌هـای اخیـر، توسـعه مناطق کشاورزی و شهری و بهره‌برداری بیشتر از منابع طبیعی جهت برآوردن رشد روزافزون نیاز انسـان‌هـا باعـث تغییـرات چشمگیری در استفاده از اراضی شده و تغییـر کاربری اراضی را به‌عنوان یکی از چـالش‌هـای عمـده در قـرن بیست‌ویک تبدیل کرده است (Fu et al., 2025). تغییر کاربری زمین یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک به شمار می‌رود که به‌طور قابل‌توجهی بر جهت و میزان تغییرات در کیفیت خاک اثر می‌گذارد (Yeneneh et al., 2024; Shuite et al., 2025). تأثیر کاربری اراضی بر کیفیت خاک را می‌توان از طریق کمی‌سازی شاخص کیفیت خاک[1] (SQI) در کاربری های مختلف زمین و شرایط مدیریتی که تحت محیط‌های مکانی یا بیوفیزیکی مشابه عمل می‌کنند، ارزیابی نمود (Lemenih, 2004; Okolo et al., 2019)؛ بنابراین، کمی کردن کیفیت خاک و بررسی آثار ناشی از تغییر کاربری اراضی روش کلیدی برای بهره‌برداری پایدار از مدیریت کاربری زمین است (Nabiollahi et al., 2018). روش‌های مختلفی برای جمع‌آوری داده‌ها و اندازه‌گیری و ارزیابی کیفیت خاک از روش‌های عمدتاً کیفی تا کاملاً کمی، از جمله کارت‌های امتیاز، ارزیابی‌های بصری خاک، کیت‌های میدانی، روش‌های زمین‌آماری و تجزیه‌وتحلیل آزمایشگاهی استفاده‌شده است (Andrews et al., 2004). پارامترهای مؤثر بر شاخص‌های کیفیت خاک در قالب فرآیندها و ویژگی‌های خاک، به‌عنوان شاخص‌هایی تعریف می‌شوند که نسبت به تغییرات مدیریتی حساس‌اند. این ویژگی‌ها می‌توانند مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی یا ترکیبی از این ویژگی‌ها باشند (Zeraatpisheh et al., 2020; Yeneneh et al., 2024; Shuite et al., 2025). انتخاب مجموعه داده مناسب برای محاسبه شاخص کیفیت خاک می‌تواند به دو روش انجام شود: کل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک[2] (TDS) که شامل تمامی ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده است و حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک[3] (MDS) که با استفاده از تکنیک‌های آماری چند متغیره، مانند تحلیل عاملی[4] (FA)، آنالیز مؤلفه‌های اصلی[5] (PCA) و رگرسیون حداقل مربعات جزئی[6] (PLSR)، مهم‌ترین و تأثیرگذارترین ویژگی‌ها را انتخاب می‌کند (Raiesi, 2017; Maleki et al., 2022). ایجاد یک مجموعه داده حداقل از پارامترهای کلیدی کیفیت خاک از بین کلیه ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده، یک گام اساسی در ارزیابی کمی کیفیت خاک است. این رویکرد کل مجموعه داده‌ها را به حداقل می‌رساند، اطلاعات معتبر را به حداکثر می‌رساند و افزونگی داده‌ها را کاهش می‌دهد (Andrews et al., 2004; Raiesi, 2017). مطالعات متعددی نشان داده است که استفاده از MDS می‌تواند با کاهش تعداد شاخص‌ها، کارایی ارزیابی کیفیت خاک را افزایش دهد (Hemmati et al., 2023; Shuite et al., 2025). با این حال، این تکنیک‌ها گاهی اوقات در انتخاب معیارهایی که منعکس‌کننده تفاوت در کیفیت خاک در بین انواع مختلف بهره‌برداری هستند، بی اثر هستند؛ بنابراین نحوه انتخاب شاخص‌های کلیدی در MDS به‌طور عینی برای تولید مدل‌های کیفیت خاک قابل‌اعتماد و دقیق، هم یک چالش اصلی و هم یک عامل حیاتی برای انجام یک ارزیابی مؤثر و کامل از کیفیت خاک در مقیاس منطقه‌ای است (Martín-Sanz et al., 2022). از آنجا که تفسیر متغیرهای زیاد و نتیجه‌گیری از آن‌ها پیچیده است، توصیه

[1] Soil quality index
[2] Total data set
[3] Minimum data set
[4] Factor analysis
[5] Principle component analysis
[6] Partial Least Squares Regression

می‌شود که مجموعه متغیرها در یک شاخص ترکیب شوند. این کار با ترکیب داده‌ها و اعمال وزن مناسب به هر متغیر انجام می‌شود. در حال حاضر، شاخص‌های کمی زیادی مانند شاخص کیفیت تجمعی ساده[1] (SQI_A)، شاخص کیفیت تجمعی وزنی[2] (SQI_W) و شاخص کیفیت نمورو[3] (NQI) برای ارزیابی کیفیت خاک توسعه یافته‌اند (Zeraatpisheh et al., 2020; Rangzan et al., 2025). Nabialahi et al. (2018) با کمی‌سازی ویژگی‌های خاک، شاخص‌های کیفیت را به‌منظور بررسی تأثیر شیب و تغییر کاربری در اراضی کشاورزی استان کردستان ارزیابی کردند. آن‌ها از ده ویژگی مؤثر بر کیفیت خاک شامل pH، هدایت الکتریکی، کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، در صد کربنات کلسیم، فرسایش‌پذیری خاک، تخلخل، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، جرم مخصوص ظاهری و نرخ هدر رفت خاک استفاده نموده و سه شاخص کیفیت خاک شامل تجمعی ساده، وزنی و نمورو را محاسبه کردند. هریک از شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از دو روش امتیازدهی خطی و غیرخطی و دو رویکرد انتخاب شاخص خاک، مجموعه TDS و مجموعه MDS محاسبه شدند. نتایج نشان داد کیفیت خاک با استفاده از SQI_W (R^2 =0.78) در مقایسه با SQI_A و NQI بهتر برآورد شد. میرخانی و همکاران (۱۴۰۲) نیز در مطالعه‌ای به‌منظور ارزیابی کیفیت خاک از سه مدل شاخص کیفیت خاک (شاخص‌های کیفیت تجمعی ساده، تجمعی وزنی و نمورو) و دو رویکرد انتخاب شاخص (مجموعه داده‌های کل و مجموعه داده‌های حداقل) استفاده نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد، همه شاخص‌های مورداستفاده دارای توانایی قابل قبولی برای تعیین کیفیت خاک هستند.

تغییر کاربری اراضی می‌تواند اثرات متفاوتی بر کیفیت خاک داشته باشد. برای مثال تبدیل جنگل‌ها و مراتع بومی به زمین‌های زراعی می‌تواند منجر به تخریب شدید خاک شود. از طرف دیگر تغییر کاربری اراضی از بایر به اراضی کشاورزی و باغ‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌عنوان راهکاری برای بهبود بهره‌وری زمین و افزایش پایداری اکوسیستم‌ها موردبررسی قرارگرفته است (Shuite et al., 2025). مطالعات متعددی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر کیفیت خاک را بررسی کرده‌اند. برای مثال، در مطالعه‌ای در جنوب شرقی ایالات متحده، مشاهده شد که باغ‌های میوه با افزایش سن، بهبودهایی در ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک مانند ماده آلی، کربن فعال و عناصر مغذی خاک را نشان می‌دهند. این نتایج نشان می‌دهد که تغییر کاربری اراضی به باغ‌های درختی می‌تواند به مرور زمان کیفیت خاک را بهبود بخشد (Slade and Wells, 2022). در پژوهش دیگری، زاهدی‌فر (۲۰۲۳) شاخص کیفیت خاک و مقدار تخریب آن را در کاربری‌های جنگل، زمین‌های زراعی و مرتع ارزیابی نمود. نتایج نشان داد مقدار SQI در زمین‌های زراعی کمترین مقدار را داشته و مقادیر مواد آلی، غلظت عناصر روی و منگنز در مقایسه با سایر ویژگی‌ها نسبت به تغییر کاربری حساس‌تر هستند. تقی پور و همکاران (۱۴۰۲)، در پژوهشی اثر تغییر کاربری بر کیفیت خاک را در منطقه توتکابن استان گیلان مورد ارزیابی قراردادند. نتایج نشان داد در کاربری‌های جنگل و زراعی، کیفیت خاک به‌طور معنی‌داری بیشتر از مراتع بود. مولایی آرپناهی و همکاران (۱۳۹۹)، اثر تغییر کاربری اراضی در کاربری‌های جنگل، باغ گردو، زمین کشاورزی و جنگل تخریب‌شده را بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه بازفت استان چهارمحال بختیاری موردبررسی قراردادند. نتایج این تحقیق نشان داد که تخریب جنگل موجب کاهش شدید کیفیت خاک می‌شود. با این وجود تغییر کاربری از کشاورزی به باغ گردو منجر به بهبود کیفیت خاک شده است.

[1]Simple additive integrated quality index

[2]Weighted additive integrated quality index

[3] Nemero quality index

اثرات دقیق تغییر کاربری بر کیفیت خاک می‌تواند بسته به شرایط محلی، مدیریت باغ و ویژگی‌های خاک متفاوت باشد. ازاین‌رو، ارزیابی جامع کیفیت خاک با بهره‌گیری از شاخص‌های کمی و روش‌های علمی معتبر، برای تحلیل دقیق این اثرات و تدوین راهبردهای مدیریتی ضروری است. منطقه لوشان در استان گیلان دارای کاربری-های مختلف ازجمله شالیزارهای برنج، باغ‌های زیتون و زمین‌های بایر با پوشش طبیعی نیمه بیابانی است. اقلیم مناسب، همراه با حمایت‌های دولتی و نهادی، زمینه گسترش باغ‌های زیتون را در منطقه فراهم کرده است. درنتیجه، این منطقه تغییرات قابل‌توجهی را در کاربری زمین تجربه کرده است به‌طوری‌که بسیاری از زمین‌های بایر به باغ‌های زیتون تبدیل‌شده‌اند. باوجود اهمیت این منطقه به‌عنوان یکی از قطب‌های کشت زیتون کشور، تاکنون پژوهش جامعی در زمینه تأثیر تغییر کاربری اراضی بر کیفیت خاک آن انجام‌نشده است. درنتیجه، اطلاعات موجود در مورد اثرات کشت زیتون بر کیفیت خاک منطقه بسیار محدود است؛ بنابراین هدف اصلی این پژوهش ارزیابی کیفیت خاک پس از تبدیل خاک‌های بکر با پوشش طبیعی نیمه بیابانی به باغ‌های زیتون است. در این پژوهش فرض بر این است که تغییر کاربری اراضی بایر به باغ‌های زیتون می‌تواند بهبود کیفیت خاک را در پی داشته باشد. نتایج این مطالعه می‌تواند به درک بهتر تأثیرات تغییر کاربری اراضی بر کیفیت خاک کمک کند و راهکارهای مدیریتی مناسبی برای بهبود پایداری کشاورزی و حفظ اکوسیستم ارائه دهد.

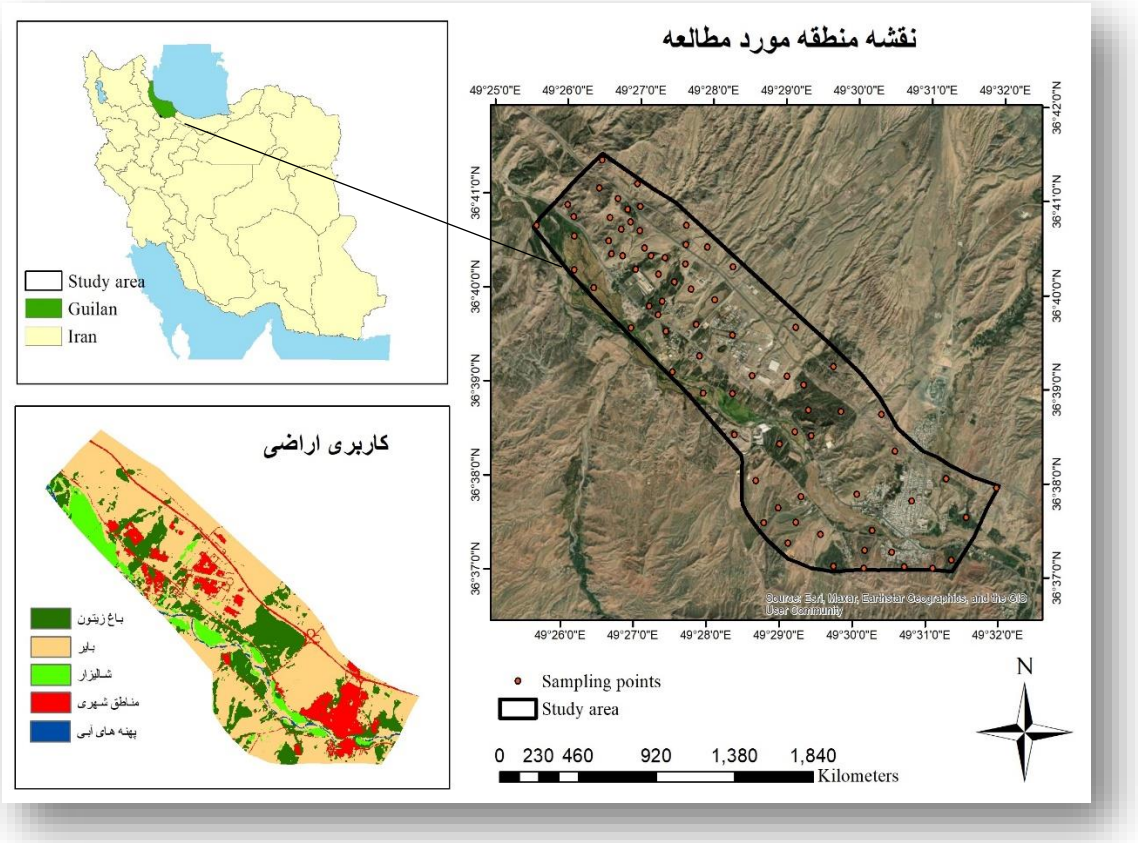
مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه موردمطالعه

منطقه موردمطالعه با وسعتی حدود ۳۰۰۰ هکتار، در محدوده لوشان از توابع شهرستان رودبار در استان گیلان واقع در شمال ایران قرار دارد. این منطقه در سامانه مختصاتی UTM، در زون ۳۹ بین نقاط ۳۶ درجه و ۳۶ دقیقه و ۳۶ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی و ۴۹ درجه و ۲۵ دقیقه و ۴۹ درجه و ۳۲ دقیقه شرقی قرار دارد (شکل ۱). براساس داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، میانگین بارندگی سالانه این منطقه ۲۷۳ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه حدود ۱۷ درجه سلیسیوس و میانگین رطوبت نسبی ۶۰ درصد است. ارتفاع منطقه بین ۲۷۰ تا ۵۸۰ متر از سطح دریا متغیر است. خاک منطقه در دو رده اریدی سول[1] و انتی سول[2] قرار دارد (USDA). اقلیم منطقه لوشان از نوع نیمه‌خشک است که مهم‌ترین ویژگی غالب آن بارش کم و خشکی هوا است. این منطقه دارای انواع مختلف کاربری اراضی ازجمله شالیزار، باغ‌های زیتون، بدنه‌های آبی، مناطق شهری و زمین‌های بایر است. آب‌وهوای مناسب این منطقه برای کشت زیتون بسیارمطلوب است. به همین دلیل این منطقه در سال‌های اخیر تغییرات قابل‌توجهی در کاربری زمین داشته است و بسیاری از زمین‌های بایر به باغ‌های زیتون تبدیل‌شده‌اند (عاکف و رحیمی، ۱۳۸۶).

[1] Aridisols

[2] Entisols



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه، نقاط نمونه‌برداری و کاربری اراضی منطقه

ارزیابی کیفیت خاک

به‌منظور بررسی تغییرات کیفیت در کاربری‌های مختلف، ابتدا از هر کاربری (باغ زیتون و اراضی بایر) تعداد ۳۸ نمونه خاک (n_{total}=76) به روش تصادفی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت‌شده و در آزمایشگاه در شرایط دمای محیط خشک شدند. برای مطالعات زیستی، نمونه‌ها مطابق با روش‌های استاندارد و با استفاده از تجهیزات استریل برداشت شده، تحت شرایط زنجیره[1] سرد به محیط‌های مناسب انتقال داده شدند و تا زمان انجام آزمایش‌ها در دمای ۴ درجه سلسیوس در یخچال نگهداری شدند (حیدری و همکاران، ۱۴۰۱).

برای تحلیل کیفیت خاک، مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی به‌عنوان شاخص‌های مؤثر در نظر گرفته شد (Reynolds et al., 2009). آزمایش‌های فیزیکی شامل تعیین بافت خاک (درصد رس، سیلت و شن) با استفاده از روش هیدرومتری با قرائت کامل (Gee et al., 1986)، تعیین چگالی ظاهری با روش کلوخه و پارافین (Blake and Hartge, 1986)، اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها[2] (MWD) از طریق روش الک تر (Kemper et al., 1986) و تعیین مقدار رس قابل‌انتشار در آب[3] (DC) با استفاده از روش هیدرومتری بود (Gee et al., 1986). اندازه‌گیری اسدیته خاک در نسبت ۱:۱ خاک به آب با استفاده از pH متر انجام شد

[1] Cold chain
[2] Mean weigh diameter
[3] Water-dispersible clay

(Knudsen et al., 1982). قابلیت هدایت الکتریکی[1] (EC)از طریق عصاره اشباع اندازه‌گیری شد (Rhoades, 1982). مقدار کربن آلی باروش واکلی و بلک (Walkley and Black, 1934)، نیتروژن کل با روش کجلدال (Bremner and Mulvaney, 1982) و فسفر قابل‌استفاده با روش اولسن اندازه‌گیری شدند (Olsen et al., 1954). غلظت سدیم[2] (Na) و پتاسیم قابل‌استفاده[3](K) در عصاره اشباع با استفاده از فلیم‌فتومتر (Knudsen et al., 1982) و مقادیر کلسیم[4](Ca) و منیزیم[5] (Mg) محلول در عصاره اشباع با استفاده از روش کمپلکسومتری (Page et al., 1989)، تعیین شد. ظرفیت تبادل کاتیونی[6](CEC) با روش استخراج با استات سدیم یک مولار در پ هاش ۸/۲ اندازه‌گیری شد (Bower et al., 1952).

برای ارزیابی ویژگی‌های زیستی خاک، نمونه‌ها در مهر ماه سال ۱۴۰۳ برداشت‌شده و سپس تنفس میکروبی خاک[7] (BR) از طریق تیتراسیون (Anderson,1982)، کربن زیست‌توده میکروبی[8] (MBC) با روش تدخین-استخراج (Beck, et al., 1997) تعیین گردیدند. همچنین نسبت میکروبی[9] (MQ) به‌صورت نسبت کربن زیست‌توده میکروبی به کربن آلی خاک و ضریب متابولیک میکروبی[10] (qCO_2)نیز به‌عنوان میزان دی‌اکسید کربن تولیدشده ناشی از تنفس هر واحد زیست‌توده میکروبی در واحد زمان محاسبه گردید و با واحد $mgCO_2\text{-}C\ g^{-1}C_{mic}\ h^{-1}$ گزارش شد (Anderson et al., 2010).

ذخیره کربن آلی کل[11] (CS) در کاربری‌های باغ زیتون و بایر با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (Poplau and Don, 2013):

رابطه (۱) $C_S=SOC\times BD\times D\times 10^4$

که در این رابطه، (C_S) ذخیره کربن آلی خاک بر حسب کیلوگرم بر هکتار، (SOC) کربن آلی خاک بر حسب درصد، (BD) جرم مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتیمترمکعب و (D) عمق خاک برحسب متر می‌باشد.

به‌منظور ارزیابی جامع کیفیت خاک، شاخص کیفیت خاک با استفاده از روش‌های کمّی استاندارد تعیین گردید. ابتدا حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک از میان کل ویژگی‌ها با استفاده از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی استخراج شد. سپس به‌منظور ساده‌سازی ساختار مؤلفه‌ها و افزایش تبیین‌پذیری، چرخش عاملی از نوع واریماکس[12] اعمال شد. ویژگی‌هایی که دارای بار عاملی بالا در مؤلفه‌های منتخب بودند، به‌عنوان متغیرهای کلیدی تعیین و به‌عنوانMDS در محاسبه شاخص کیفیت خاک استفاده شدند (Andrews et al., 2004).

با توجه به این‌که ویژگی‌های موردبررسی دارای واحدهای گوناگونی می‌باشند، برای این‌که بتوان آن‌ها را در قالب یک شاخص کلی درآورد، باید ویژگی‌های موردمطالعه را بی‌واحد کرد. بدین منظور، از توابع عضویت فازی غیرخطی استفاده شد. این توابع، مقادیر هر ویژگی را در بازه‌ای بین صفر (کمترین مطلوبیت) تا یک (بیشترین مطلوبیت) نرمال‌سازی می‌کنند. به این ترتیب تابعی به دست می‌آید که با استفاده از آن مقادیر ویژگی موردنظر بین صفر (کمترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) و ۱ (بیشترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) نمره‌دهی می‌شود (Yanbing et al., 2009; Bandyopadhyay and Maiti, 2021).

با استفاده از روابط ۲ ویژگی‌های موردبررسی برای هر نمونه خاک نمره‌دهی می‌شوند:

رابطه (۲)

[1] Electrical conductivity
[2] Sodium
[3] Potassium
[4] Calcium
[5] Magnesium
[6] Cation exchange capacity
[7] Basal respiration
[8] Microbial Biomass Carbon
[9] Microbial ratio
[10] Microbial metabolic rate
[11] Carbon Storage
[12] Varimax

$MF_X=\frac{1}{[1+\left(\frac{X-b_1}{d}\right)^2]}$ $x<b_1$

$MF_X= 1$ $b_1<x<b_2$

رابطه (۲)

$MF_X=\frac{1}{[1+\left(\frac{X-b_2}{d}\right)^2]}$ $x>b_2$

در این رابطه؛

MF(x): تابع عضویت متغیر X

b_2 و b_1: به ترتیب حدود آستانه پایینی[۱] و حدود آستانه بالایی[۲]

d: عرض منطقه انتقالی تابع عضویت را مشخص می‌سازند.

در مرحله بعد، وزن‌دهی ویژگی‌ها برای هر یک از مجموعه‌های MDS و TDS انجام شد. در مورد ویژگی‌هایی که در یک مؤلفه همبستگی نداشتند ($r < 0.6$)، وزن هر ویژگی بر اساس نسبت واریانس توضیح داده‌شده به مجموع واریانس تجمعی محاسبه شد. برای ویژگی‌های همبسته ($r > 0.6$)، وزن‌دهی بر اساس میانگین وزنی آن‌ها انجام گرفت (Masto et al., 2008). در مورد مجموعه TDS نیز، وزن ویژگی‌ها با روش تجزیه به عامل‌ها برآورد شد (Shukla and Lal, 2006).

بعد از اینکه وزن ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک تعیین شدند، باید تبدیل به یک شاخص کلی شوند. شاخص‌های کیفیت خاک برای هر نمونه خاک، با استفاده از شاخص تجمعی ساده (SQI_A) (رابطه ۳) و شاخص تجمعی وزن‌دار (SQI_W) (رابطه ۴)، محاسبه شدند (Doran and Parkin, 1994).

رابطه (۳)

$$SQI_A=\sum_{i=1}^{n}\frac{N_i}{n}$$

در این رابطه N_i نمره تعلق‌گرفته به هر ویژگی و n تعداد ویژگی‌های موردنظر است.

رابطه (۴)

$$SQI_W=\sum_{i=1}^{n} WiNi$$

در این رابطه W_i وزن تعلق یافته به هر ویژگی خاک، N_i مقدار تعلق یافته به هر ویژگی و n تعداد ویژگی‌های موردنظر است.

هریک از شاخص‌ها برای هرکدام از نمونه‌های خاک با استفاده از دو مجموعه TDS و MDS تعیین شدند. درنتیجه برای هر نمونه خاک چهار شاخص کلی کیفیت خاک شامل $SQI_{A\text{-}MDS}$، $SQI_{A\text{-}TDS}$، $SQI_{W\text{-}MDS}$، $SQI_{W\text{-}TDS}$ به دست آمد.

تحلیل آماری داده‌ها

برای انجام تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۶) استفاده شد. برای مقایسه میانگین ویژگی‌های خاک در کاربری‌های مختلف از تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA)استفاده شد و تفاوت میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون Duncan ارزیابی گردید. همچنین از Microsoft Excel جهت انجام محاسبات مقدماتی و ترسیم نمودارها و از ArcGIS برای پهنه‌بندی و نمایش مکانی شاخص کیفیت خاک استفاده گردید.

نتایج و بحث

تجزیه‌وتحلیل آماری ویژگی‌های خاک

خلاصه برخی آماره‌های توصیفی برای خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک کاربری‌های باغ زیتون و بایر در جدول ۱ ارائه‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین همه ویژگی‌های خاک به‌جز نسبت میکروبی در دو کاربری بایر و باغ زیتون اختلاف معنی‌داری وجود دارد ($p \leq 0.05$). بررسی مقایسه‌ای ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در دو نوع کاربری بایر و باغ زیتون نشان داد که تغییر کاربری به باغ زیتون تأثیرات مثبت و معناداری بر بهبود کیفیت خاک داشته است. در باغ زیتون، درصد رس، سیلت و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نسبت به اراضی بایر افزایش یافت، درحالی‌که درصد شن،

[8]. Lower Threshold

[9]. Upper Threshold

جرم مخصوص ظاهری و رس قابل‌انتشار در آب کاهش نشان دادند. با توجه به این‌که ویژگی‌های فیزیکی اصلی خاک نظیر بافت در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت نسبتاً پایدارند، این تغییرات را نمی‌توان به‌عنوان دگرگونی بنیادی در ترکیب بافت تفسیر کرد؛ بلکه می‌توان آن‌ها را نتیجه‌ی اثر غیرمستقیم تغییر کاربری دانست. ورود بقایای آلی، افزایش فعالیت زیستی و اقدامات مدیریتی در باغ‌های زیتون (مانند آبیاری و شخم) موجب تجمع ذرات ریز، بهبود تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها و کاهش جرم مخصوص ظاهری در لایه سطحی شده است (Joshi and Garkoti, 2023)؛ بنابراین تغییرات مشاهده‌شده بیانگر بهبود نسبی ساختار خاک و پایداری خاکدانه‌ها در اثر مدیریت و کاربری جدید است، هرچند برای بررسی پایداری بلندمدت این تغییرات و تأثیر آن‌ها بر لایه‌های عمیق‌تر خاک، مطالعات تکمیلی ضروری است. همچنین، افزایش قابل‌توجه کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل‌جذب در خاک باغ زیتون بیانگر ارتقاء حاصلخیزی و پتانسیل تغذیه‌ای خاک در این نوع کاربری می‌باشد. این امر را می‌توان به ورود مداوم بقایای گیاهی (برگ، شاخه‌های هرس‌شده و ریزش میوه)، افزایش فعالیت میکروبی و معدنی‌شدن تدریجی مواد آلی در خاک باغ زیتون نسبت داد که سبب افزایش ذخایر عناصر غذایی می‌شود (Manas and Heras, 2024). افزون بر این، مصرف کودهای آلی و شیمیایی در باغ‌های زیتون یکی از مهم‌ترین عوامل ارتقاء محتوای نیتروژن و عناصر پرمصرف به شمار می‌رود. مقادیر بیشتر عناصر کاتیونی نظیر کلسیم، منیزیم و سدیم نیز می‌تواند ناشی از افزایش ورودی‌های خارجی از طریق آبیاری و کوددهی و همچنین تجمع تدریجی این کاتیون‌ها در لایه سطحی خاک باشد. افزایش قابلیت هدایت الکتریکی در خاک باغ‌های زیتون را می‌توان عمدتاً به مدیریت زراعی نسبت داد. ورود کودهای شیمیایی و آلی سبب افزایش غلظت یون‌های محلول مانند نیترات، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در خاک می‌شود. همچنین، آبیاری در شرایط اقلیم نیمه‌خشک منطقه می‌تواند موجب تجمع تدریجی نمک‌ها در لایه سطحی گردد. علاوه بر این، تجزیه بقایای گیاهی زیتون و آزادسازی یون‌های محلول به محیط خاک نسبت به اراضی بایر ورودی عناصر غذایی بیشتری فراهم می‌کند (Zipori et al., 2020)؛ بنابراین، افزایش EC در این پژوهش بیش از آنکه نشان‌دهنده شوری مضر خاک باشد، بیانگر تأثیر فعالیت‌های مدیریتی و ورودی‌های خارجی بر افزایش غلظت یون‌های غذایی است که در کنار افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، می‌تواند قابلیت نگهداشت و دسترسی عناصر غذایی را در باغ‌های زیتون تقویت نماید.

در بخش زیستی، کربن زیست‌توده میکروبی و تنفس میکروبی خاک در باغ زیتون نسبت به اراضی بایر به طور معناداری افزایش داشت که نشان‌دهنده فعالیت میکروبی بالاتر و کیفیت زیستی بهتر خاک است. همچنین، کاهش ضریب متابولیک در باغ زیتون بیانگر بهره‌وری بیشتر میکروارگانیسم‌ها از منابع کربنی و کارایی بالاتر آن‌ها در استفاده از انرژی می‌باشد (Ding, 2023). تنها بین مقادیر نسبت میکروبی در دو کاربری اختلاف معنی‌دار مشاهده نمی‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده پایداری نسبی جامعه میکروبی باشد. (Yan et al., 2022). در مجموع، نتایج بیانگر آن است که کاربری باغ زیتون نسبت به اراضی بایر سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک شده و می‌تواند در راستای مدیریت پایدار منابع خاک و ارتقاء بهره‌وری اکوسیستم‌های کشاورزی مؤثر واقع شود.

جدول ۱- توصیف آماری ویژگی‌های خاک در دو کاربری بایر و باغ زیتون

ویژگی	واحد	کاربری بایر		کاربری باغ زیتون	
		میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
رس	g/100g	۳۶/۵۰ b	۹/۸۴	۳۷/۶۰ a	۱۱/۰۹
سیلت	g/100g	۳۳/۴۳ b	۷/۵۰	۳۵/۳۳ a	۷/۶۸
شن	g/100g	۳۰/۰۶ a	۱۴/۰۵	۲۷/۰۶ b	۱۴/۰۴
رس قابل‌انتشار در آب	g/100g	۳۰/۵۶ a	۵/۱۶	۲۲/۸۷ b	۴/۳۶
جرم مخصوص ظاهری	g/cm^3	۱/۳۵ a	۰/۰۶	۱/۲۸ b	۰/۰۸
میانگین ورنی قطر خاکدانه	mm	۰/۸۸ b	۱/۰۵	۳/۲۸ a	۱/۹۷
کربن آلی	g/100g	۰/۴۶ b	۰/۱۸	۱/۳۰ a	۰/۲۱
ذخیره کربن	kg/ha	۱۲۵۴۳/۳۳ b	۴۷۴۱/۹۶	۳۳۴۵۲ a	۶۲۲۷/۸۶
نیتروژن کل	g/100g	۰/۰۷ b	۰/۰۳	۰/۲۰ a	۰/۰۴
فسفر قابل‌جذب	mg/kg	۱۱/۳۱ b	۶/۱۳	۱۳/۳۹ a	۴/۳۵
پتاسیم قابل‌جذب	mg/kg	۱۳/۶۱ b	۳۲/۸۹	۱۰۵/۲۶ a	۷۱/۶۴
سدیم	mg/kg	۲۹/۴۷ b	۹/۹۱	۳۵/۶۴ a	۱۱/۱۰
کلسیم	mg/kg	۹/۲۱ b	۴/۴۴	۲۶/۸۱ a	۱۹/۱۶
منیزیم	mg/kg	۳/۴۳ b	۵/۴۹	۱۳/۴۰ a	۸/۵۶
نسبت جذب سدیم	mg/kg	۳/۷۷ b	۵/۵۹	۶/۴۷ a	۲/۱۰
کربنات کلسیم معادل	g/100g	۲۲/۰۸ b	۶/۸۰	۲۸/۶۲ a	۶/۷۱
اسیدیته	--	۸/۴۲ a	۰/۰۸	۸/۳۰ b	۰/۱۰
قابلیت هدایت الکتریکی	dS/m	۳/۴۲ b	۱/۰۴	۴/۰۹ a	۰/۷۳
ظرفیت تبادل کاتیونی	cm/kg	۲۸/۲۲ b	۴/۶۷	۳۰/۳۳ a	۱۰/۰۳
کربن زیست‌توده میکروبی	mg/100g	۸۹/۷۱ b	۴۵/۷۵	۲۵۳/۶۳ a	۱۶/۷۵
تنفس میکروبی	$mgCO_2.g^{-1}dm.24h^{-1}$	۰/۲۸ b	۰/۱۴	۰/۵۴ a	۰/۱۵
نسبت میکروبی	g/100g	۱/۹۵ a	۱۷/۴	۱/۹۳ a	۴/۳۰
ضریب متابولیک	$mgCO_2 \cdot mgMBC^{-1}24h^{-1}$	۰/۳۲ a	۰/۱۳	۰/۲۱ b	۰/۰۵

با استفاده از PCA، در کاربری بایر، شش مؤلفه اول با مقدار ویژه بیشتر از یک محاسبه شد که ۸۹/۵۲٪ از تغییرات داده‌های اصلی را توضیح دادند و می‌توانند برای تعیین MDS استفاده شوند (جدول ۲). هریک از این شش مؤلفه به ترتیب

۳۲/۷۹، ۲۳/۴۷، ۱۲/۸۰، ۱۰، ۵/۸۲ و ۴/۶۹ درصد از واریانس کل را توجیه می‌کنند، درحالی‌که مؤلفه‌های باقی‌مانده واریانس نسبتاً کوچک‌تری دارند و در توضیح میزان تغییرات مشارکت بسیار کمی دارند. به بیان دیگر، مؤلفه‌های با ارزش ویژه کمتر از ۱، بیانگر توصیف بخش کمتری از واریانس توسط آن مؤلفه نسبت به هریک از متغیرهای موردمطالعه هستند (Torbert et al., 2008). بردارهای ویژه پس از چرخش واریماکس نشان دادند که در مؤلفه اول رس، شن، جرم مخصوص ظاهری و کربنات کلسیم معادل، در مؤلفه دوم کربن آلی، ذخیره کربن، نیتروژن کل و کربن زیست‌توده، در مؤلفه سوم رس، منیزیم، قابلیت هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی، در مؤلفه چهارم نسبت جذب سدیم و کلسیم، در مؤلفه پنجم نسبت میکروبی و در مؤلفه ششم میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به‌عنوان ویژگی‌هایی با بالاترین سهم و اختلاف کمتر از ۱۰ درصد بودند. به‌منظور یافتن متغیرهای همبسته در هر مؤلفه از نتایج همبستگی پیرسون (جدول ۳) استفاده شد. نتایج نشان داد در مؤلفه اول بین مقادیر رس و شن و جرم مخصوص ظاهری همبستگی بالایی وجود دارد ($r>0.6$) بنابراین جرم مخصوص ظاهری با دارا بودن بیشترین وزن به‌عنوان MDS انتخاب گردید. در مؤلفه دوم بین مقادیر کربن آلی، ذخیره کربن، نیتروژن کل و کربن زی‌توده همبستگی معنی‌داری وجود داشت که از میان آن‌ها کربن آلی به‌عنوان MDS انتخاب شد. در مؤلفه سوم بین ظرفیت تبادل کاتیونی و رس همبستگی معنی‌داری وجود داشت که از میان آن‌ها ظرفی تبادل کاتیونی به دلیل داشتن وزن بیشتر انتخاب شد. در مؤلفه چهارم نیز بین نسبت جذب سدیم و کلسیم همبستگی معنی‌داری وجود داشت و از بین آن‌ها نسبت جذب سدیم به‌عنوان MDS در نظر گرفته شد. درنهایت ویژگی‌های جرم مخصوص ظاهری، کربنات کلسیم معادل، کربن آلی، منیزیم، قابلیت هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی، نسبت جذب سدیم و میانگین وزنی خاکدانه‌ها در کاربری بایر به‌عنوان مجموعه MDS در نظر گرفته شدند.

در کاربری باغ زیتون نیز با استفاده آنالیز تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (جدول ۲)، پنج مؤلفه اول با ارزش ویژه بزرگ‌تر از ۱، با درصد واریانس تجمعی ۷۸/۲۹٪ استخراج شد. هریک از این پنج مؤلفه به ترتیب ۳۱/۱۶، ۲۳/۳۵، ۹/۸۵، ۷/۵۲ و ۶/۳۹ درصد از واریانس کل را توجیه می‌کنند. در مؤلفه اول ویژگی‌های رس، شن، رس قابل‌انتشار در آب و ظرفیت تبادل کاتیونی دارای بیشترین وزن بودند که به دلیل همبستگی بالای ویژگی‌ها ($r>0.6$) (جدول ۴)، درصد رس با دارا بودن بیشترین وزن در مجموعه MDS قرار گرفت. در مؤلفه دوم کربن آلی و تنفس میکروبی دارای بالاترین وزن بودند و به دلیل همبستگی بالا ($r>0.6$) تنها کربن آلی در مجموعه حداقل قرار گرفت. در مؤلفه سوم فسفر قابل‌جذب و سدیم شامل ۱۰ درصد بالاترین وزن بودند و با توجه به همبستگی پایین هر دو ویژگی به‌عنوان MDS انتخاب شدند. در مؤلفه‌های چهارم و پنجم نیز به ترتیب ویژگی‌های نسبت جذب سدیم و کربنات کلسیم به‌عنوان MDS انتخاب شدند. در بررسی شاخص کیفیت خاک در منطقه نظرآباد در غرب استان البرز، ویژگی‌های شن، فسفر قابل‌استفاده، چگالی ظاهری، تخلخل، نسبت جذب سدیم و کربنات کلسیم معادل به‌عنوان MDS انتخاب شدند (میرخانی و همکاران، ۱۳۹۹). در ارزیابی شاخص کیفیت خاک دشت نیشابور، پنج ویژگی قابلیت هدایت الکتریکی، ماده آلی، فسفر قابل‌استفاده، پتاسیم قابل‌استفاده و نیتروژن کل به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک معرفی شدند (مقامی مقیم و همکاران، ۱۴۰۱). تقی‌پور و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی با هدف اثر تغییر کاربری بر کیفیت خاک در منطقه توتکابن استان گیلان چهار ویژگی شامل درصد رس، میانگین وزنی قطر خاکدانه، کربن آلی و فسفر قابل‌دسترس را به‌عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب نمودند. یغماییان و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای با هدف شناسایی مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک و مقایسه شاخص‌های کیفیت خاک به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف و ارتباط آن با عملکرد چای، ویژگی‌های پتاسیم قابل‌جذب، کربن آلی، pH، فسفر قابل‌جذب، روی قابل‌جذب و تعداد نماتد را به‌عنوان MDS معرفی نمودند. بنابراین در مناطق با شرایط اقلیمی و مدیریتی گوناگون، حداقل مجموعه داده‌ها می‌تواند متفاوت باشد.

جدول ۲- تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در کاربری‌های بایر و زیتون

	بایر						زیتون			
متغیرها	مؤلفه ۱	مؤلفه ۲	مؤلفه ۳	مؤلفه ۴	مؤلفه ۵	مؤلفه ۶	مؤلفه ۱	مؤلفه ۲	مؤلفه ۳	مؤلفه ۴	مؤلفه ۵
ارزش ویژه	۸/۸۳۵	۶/۳۳۶	۳/۴۵۷	۲/۷۰۳	۱/۵۷۲	۱/۲۶۸	۸/۴۱۴	۶/۳۰۷	۲/۶۶۲	۲/۰۳	۱/۷۲۵
درصد واریانس	۳۲/۷۲۲	۲۳/۴۶۷	۱۲/۸۰۲	۱۰/۰۱	۵/۸۲۲	۴/۶۹۷	۳۱/۱۶۳	۲۳/۳۵۸	۹/۸۵۸	۷/۵۲	۶/۳۸۸
درصد واریانس تجمعی	۳۲/۷۲۲	۵۶/۱۸۸	۶۸/۹۹۱	۷۹	۸۴/۸۲	۸۹/۵۱۹	۳۱/۱۶۳	۵۴/۵۲۱	۶۴/۳۷۹	۷۱/۸۹۹	۷۸/۲۸۷
رس	۰/۸۸۱	-۰/۳۷۰	۰/۷۶۳	۰/۲۴۱	-۰/۴۴۰	۰/۲۳۶	-۰/۸۷۷	۰/۲۱۸	۰/۵۷۶	-۰/۱۸۷	-۰/۴۱۸
سیلت	۰/۴۱۹	۰/۳۲۸	-۰/۵۳۹	-۰/۳۵۴	۰/۱۳۰	۰/۴۵۷	-۰/۱۵۰	-۰/۱۳۲	-۰/۳۵۵	-۰/۴۴۸	۰/۱۱۶
شن	-۰/۸۴۱	۰/۳۵۴	-۰/۲۴۱	۰/۳۱۳	-۰/۴۶۳	۰/۲۰۳	۰/۸۱۱	-۰/۳۶۳	-۰/۱۶۹	-۰/۲۰۷	-۰/۴۴۹
رس قابل انتشار در آب	۰/۲۳۰	-۰/۵۶۶	۰/۵۱۲	۰/۳۶۷	-۰/۴۲۳	۰/۱۴۳	-۰/۸۲۸	۰/۴۴۴	۰/۴۴۷	۰/۴۳۲	۰/۲۴۶
جرم مخصوص ظاهری	-۰/۸۹۱	-۰/۵۴۱	۰/۶۶۸	۰/۵۷۸	-۰/۴۵۴	۰/۳۴۹	۰/۷۴۰	۰/۳۶۵	۰/۳۲۲	۰/۲۱۲	-۰/۴۶۰
میانگین ورنی قطر خاکدانه	۰/۴۰۶	۰/۱۴۷	۰/۵۴۹	۰/۱۱۲	۰/۲۳۶	۰/۶۱۸	۰/۵۹۶	۰/۳۹۸	-۰/۱۴۷	-۰/۳۷۷	-۰/۴۷۵
کربن آلی	۰/۵۴۱	۰/۸۸۰	-۰/۴۵۲	-۰/۴۱۲	۰/۲۵۲	-۰/۴۷۸	۰/۵۲۳	۰/۷۹۰	۰/۵۱۷	-۰/۱۱۵	۰/۴۶۲
ذخیره کربن	۰/۴۴۰	۰/۸۲۶	۰/۴۱۵	۰/۴۹۶	۰/۱۳۲	-۰/۴۶۳	۰/۷۱۲	۰/۶۱۴	۰/۱۱۴	-۰/۲۳۶	۰/۲۹۹
نیتروژن کل	۰/۵۵۰	۰/۸۲۱	۰/۵۹۹	-۰/۱۴۱	۰/۱۸۶	-۰/۳۶۲	۰/۶۳۷	۰/۷۴۷	۰/۴۲۴	-۰/۱۱۲	۰/۳۷۸
فسفر قابل جذب	-۰/۶۱۸	-۰/۴۶۳	-۰/۲۵۸	-۰/۲۱۳	۰/۲۴۵	۰/۳۳۵	۰/۴۰۲	۰/۴۱۷	۰/۷۶۲	۰/۳۱۶	۰/۲۶۱
پتاسیم قابل جذب	۰/۳۰۲	۰/۵۱۰	۰/۵۳۰	۰/۲۴۱	-۰/۴۳۹	۰/۳۱۰	۰/۵۳۹	۰/۵۶۸	۰/۵۱۷	۰/۳۸۸	۰/۴۰۳
سدیم	-۰/۲۶۸	۰/۳۷۰	-۰/۲۶۱	-۰/۶۰۰	۰/۴۳۷	۰/۲۲۸	۰/۳۹	۰/۳۲۵	-۰/۷۲۵	۰/۴۲۹	۰/۲۵۱
کلسیم	۰/۲۳۴	۰/۳۲۴	-۰/۱۷۰	۰/۸۰	۰/۱۵۹	۰/۲۳۶	۰/۵۳۱	۰/۴۶۰	۰/۵۶۵	۰/۴۶۶	۰/۵۲۷
منیزیم	۰/۲۵۶	-۰/۲۸۹	۰/۸۱۸	۰/۳۷۲	۰/۱۷۴	-۰/۲۹۳	۰/۴۴۷	۰/۴۴۵	-۰/۶۵۵	۰/۳۵۹	-۰/۴۸۹
نسبت جذب سدیم	۰/۲۲۳	-۰/۴۵۲	-۰/۲۳۷	۰/۸۴۰	۰/۳۵۹	۰/۳۱۵.	۰/۳۵۴	-۰/۲۸۳	-۰/۵۰۸	۰/۶۲۷	۰/۳۶۷
کربنات کلسیم معادل	۰/۸۷۲	-۰/۷۴۷	-۰/۱۰۳	۰/۱۱۴	۰/۱۵۵	-۰/۱۵۲	-۰/۱۴۴	-۰/۳۱۱	۰/۴۳۵	-۰/۴۹۲	۰/۶۸۴
اسیدیته	۰/۲۵۲	-۰/۲۷۶	-۰/۴۲۳	-۰/۴۹۶	-۰/۳۴۷	۰/۳۴۸	-۰/۴۱۵	۰/۳۳۲	۰/۵۶۶	۰/۴۹۸	۰/۳۳۶
قابلیت هدایت الکتریکی	۰/۲۶۳	۰/۴۳۱	۰/۷۹۸	۰/۰۶۳	۰/۳۶۰	۰/۲۶۰	۰/۳۸۷	۰/۶۴۹	-۰/۱۶۸	-۰/۱۱۴	-۰/۳۹۲
ظرفیت تبادل کاتیونی	۰/۲۴۷	-۰/۳۹۷	۰/۸۴۰	۰/۱۸۳	۰/۱۰۲	۰/۲۴۵	-۰/۸۵۶	۰/۳۶۲	۰/۴۵۸	-۰/۱۳۵	-۰/۳۶۹
کربن زیست‌توده میکروبی	۰/۵۰۱	۰/۸۳۰	-۰/۴۷۸	-۰/۲۳۵	۰/۱۰۶	-۰/۳۵۶	۰/۶۰۵	۰/۴۹۱	-۰/۳۲۲	۰/۵۹۸	۰/۲۳۶
تنفس میکروبی	۰/۶۲۹	۰/۷۶۵	-۰/۳۱۲	-۰/۱۳۵	۰/۱۶۳	۰/۳۲۶	۰/۳۱۲	۰/۸۶۱	-۰/۲۴۳	۰/۴۷۸	-۰/۴۱۷
نسبت میکروبی	۰/۲۷۸	۰/۳۷۳	۰/۴۶۰	-۰/۱۸۰	۰/۶۷۶	-۰/۴۱۲	-۰/۶۳۷	-۰/۶۰۳	-۰/۱۴۵	۰/۴۵۶	۰/۳۵۹
ضریب متابولیک	۰/۷۶۱	۰/۳۰۶	-۰/۴۳۶	۰/۶۷۰	-۰/۳۹۲	۰/۱۱۲	۰/۵۶۴	۰/۶۴۲	۰/۵۳۶	۰/۱۳۶	-۰/۲۵۴

اعداد برجسته به عنوان بیشترین وزن در نظر گرفته شدند و اعدادی که زیر آن‌ها خط کشیده شده است به‌عنوان MDS انتخاب‌شده‌اند. اعداد برجسته و ایتالیک مؤلفه‌های انتخاب‌شده را نشان می‌دهند.

جدول ۳- ضرایب همبستگی برای مؤلفه‌هایی با بیشترین وزن در کاربری بایر

Properties	Clay رس	Sand ماسه	BD چگالی ظاهری	OC کربن آلی	N نیتروژن	$Caco_3$ کربنات کلسیم	EC هدایت الکتریکی	Ca کلسیم	Mg منیزیم	SAR نسبت سدیم قابل تعویض	CEC ظرفیت تبادل کاتیونی	CS اشباع
Clay	۱											
Sand	-۰/۸۶*	۱										
BD	-۰/۸۵*	۰/۹۰*	۱									
OC	۰/۱۵	-۰/۱۷	-۰/۲۴	۱								
N	۰/۱۷	-۰/۲۰	-۰/۲۵	۰/۹۹*	۱							
$Caco_3$	-۰/۰۴	۰/۱۰	-۰/۰۶	-۰/۷۶*	-۰/۷۷*	۱						
EC	۰/۲۸	-۰/۰۲	-۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۲	-۰/۰۱	۱					
Ca	۰/۰۶	۰/۰۴	-۰/۱۴	۰/۳۹	۰/۳۸	-۰/۰۵	۰/۱۱	۱				
Mg	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۲۳	-۰/۲۹	-۰/۲۷	۰/۰۵	۰/۴۶	-۰/۳۵	۱			
SAR	-۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۰۳	۰/۱۱	-۰/۱۵	۰/۳۸	-۰/۱۰	۰/۵۸	-۰/۴۸	۱		
CEC	۰/۲۶	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۳۲	-۰/۳۱	۰/۱۱	۰/۴۹	-۰/۲۹	۰/۹۹*	-۰/۳۶	۱	
CS	۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۱۱	۰/۹۹*	۰/۹۸*	-۰/۷۹*	۰/۱۲	۰/۳۸	-۰/۲۵	-۰/۱۱	-۰/۲۹	۱

* نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ است.

جدول ۴- ضرایب همبستگی برای مؤلفه‌هایی با بیشترین وزن در کاربری باغ زیتون

Properties	Clay رس	Sand ماسه	OC کربن آلی	P فسفر	Na سدیم	CEC ظرفیت تبادل کاتیونی	WDC محتوای آب قابل‌استفاده	BR مقاومت خاک
Clay	۱							
Sand	-۰/۸۳*	۱						
OC	-۰/۱۸	۰/۱۱	۱					
P	-۰/۳۳	۰/۵۱	۰/۲۷	۱				
Na	-۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۱۶	-۰/۲۴	۱			
CEC	۰/۹۹*	۰/۸۴*	-۰/۱۱	-۰/۳۵	-۰/۱۴	۱		
WDC	۰/۸۸*	-۰/۸۳*	-۰/۰۱	-۰/۲۴	-۰/۳۳	۰/۸۹*	۱	
BR	۰/۰۱	-۰/۰۸	۰/۸۶*	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۱۳	۱

* نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ است.

در مرحله بعد تمامی ویژگی‌های خاک برای هر دو کاربری با استفاده از توابع عضویت فازی بین مقادیر صفر تا یک امتیازدهی شدند و وزن مجموعه‌های TDS و MDS به دست آمد (جدول ۵). به‌این‌ترتیب شاخص‌های تجمعی ساده و وزن‌دار کیفیت خاک برای مؤثر TDS و مؤثر MDS محاسبه شدند.

جدول ۵- وزن ویژگی‌های خاک در مجموعه TDS و MDS برای کاربری‌های مختلف

ویژگی	بایر			باغ زیتون		
	COM	TDS weight	MDS weight	COM	TDS weight	MDS weight
رس	۰/۹۷۶	۰/۰۴۰		۰/۹۶۴	۰/۰۴۵	۰/۲۷
سیلت	۰/۸۹۳	۰/۰۳۷		۰/۸۹۱	۰/۰۴۲	
شن	۰/۹۶۸	۰/۰۴۰		۰/۹۶۷	۰/۰۴۵	
رس قابل‌انتشار در آب	۰/۹۶۶	۰/۰۴۰		۰/۹۱۰	۰/۰۴۳	
جرم مخصوص ظاهری	۰/۹۲۸	۰/۰۳۸	۰/۲۶	۰/۸۱۴	۰/۰۳۸	
میانگین ورنی قطر خاکدانه	۰/۶۹۸	۰/۰۲۹	۰/۱۴	۰/۵۰۹	۰/۰۲۴	
کربن آلی	۰/۹۸۲	۰/۰۴۱	۰/۱۱	۰/۹۴۱	۰/۰۴۴	۰/۱۱۵
ذخیره کربن	۰/۹۷۲	۰/۰۴۰		۰/۹۳۴	۰/۰۴۴	
نیتروژن کل	۰/۹۸۵	۰/۰۴۱		۰/۹۶۸	۰/۰۴۵	
فسفر قابل‌جذب	۰/۶۶۸	۰/۰۲۸		۰/۸۴۸	۰/۰۴۰	۰/۰۴
پتاسیم قابل‌جذب	۰/۸۷۱	۰/۰۳۶		۰/۸۱۶	۰/۰۳۸	
سدیم	۰/۷۶۸	۰/۰۳۲		۰/۹۰۸	۰/۰۴۳	۰/۰۴
کلسیم	۰/۸۲۹	۰/۰۳۴		۰/۸۵۵	۰/۰۴۰	
منیزیم	۰/۹۶۹	۰/۰۴۰	۰/۰۵	۰/۷۸۵	۰/۰۳۷	
نسبت جذب سدیم	۰/۹۳۶	۰/۰۳۹	۰/۰۳	۰/۸۵۰	۰/۰۴۰	۰/۰۲
کربنات کلسیم معادل	۰/۸۱۷	۰/۰۳۴		۰/۸۲۵	۰/۰۳۹	۰/۲۲
اسیدیته	۰/۶۳۴	۰/۰۲۶		۰/۰۵۶۶	۰/۰۲۶	
قابلیت هدایت الکتریکی	۰/۸۶۵	۰/۰۳۶	۰/۰۵	۰/۸۲۵	۰/۰۳۹	
ظرفیت تبادل کاتیونی	۰/۹۵۹	۰/۰۴۰	۰/۰۵	۰/۹۷۷	۰/۰۴۶	
کربن زیست‌توده میکروبی	۰/۹۷۰	۰/۰۴۰		۰/۷۷۸	۰/۰۳۶	
تنفس میکروبی	۰/۹۹۶	۰/۰۴۱		۰/۹۲۶	۰/۰۴۳	
نسبت میکروبی	۰/۹۰۹	۰/۰۳۸	۰/۰۱۸	۰/۹۰۱	۰/۰۴۲	
ضریب متابولیک	۰/۸۸۸	۰/۰۳۷		۰/۸۱۱	۰/۰۳۸	

COM: سهم هر ویژگی Weight: وزن هر ویژگی

مقایسه میانگین شاخص‌های کیفیت خاک بین دو نوع کاربری زمین، یعنی اراضی بایر و باغ زیتون (جدول ۶)، نشان می‌دهد که کیفیت خاک در زمین‌های دایر به‌طور معنی‌داری بالاتر است ($p \leq 0.05$). در تمامی حالت‌ها، اعم از نوع داده (MDS یا TDS) و روش محاسبه (ساده یا وزنی)، مقادیر SQI در کاربری باغ زیتون بیشتر از کاربری بایر بوده است، به‌طوری که این افزایش بین ۱/۶ تا ۱/۹ برابر گزارش‌شده است. این تفاوت را می‌توان به تأثیر مدیریت کشاورزی نسبت داد، چراکه در باغ‌های زیتون، فعالیت‌هایی نظیر افزودن مواد آلی، آبیاری، کنترل فرسایش، و حفظ پوشش گیاهی فعال صورت می‌گیرد که به بهبود ساختار خاک، افزایش تنوع زیستی خاک و پایداری شیمیایی آن (مانند ثبا pH ، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و حفظ عناصر غذایی) منجر می‌شود. در مقابل، خاک‌های بدون استفاده یا رهاشده معمولاً دچار فشردگی، کاهش ماده آلی و افت میکروارگانیسم‌های مفید می‌شوند، که این عوامل در مجموع باعث کاهش کیفیت خاک می‌گردند. این نتایج با مطالعات مختلف جهانی، ازجمله پژوهش لی و همکاران

(۲۰۲۱) و اوتاپا و همکاران (۲۰۲۴) در مناطق نیمه‌خشک، هم‌راستا بوده و بر اهمیت کاربرد مدیریت پایدار زمین تأکید دارند. در راستای تأیید این نتایج مشاهده شد تقی‌پور و همکاران (۱۴۰۲) در نتیجه پژوهشی با هدف اثر تغییر کاربری بر کیفیت خاک در منطقه توتکابن استان گیلان به این نتیجه دست یافتند که کیفیت خاک در کاربری گندم دیم به‌طور معنی‌داری بیشتر از کاربری مرتع است. آن‌ها اعلام نمودند شاخص کیفیت خاک بیشتر در کاربری دیم نسبت به مرتع به دلیل حضور مقادیر بیشتر کربن آلی و همچنین استفاده از کودها و وجود بقایای گیاهی در سطح زمین در کاربری دیم در مقایسه با مرتع است. همچنین، مطالعه‌ای توسط چن و همکاران (۲۰۲۳) که اثرات بلندمدت تغییرات کاربری زمین بر ویژگی‌های خاک را در مناطق مختلف جهان بررسی کرده بود، نشان داد که تبدیل زمین بایر به باغ‌های زراعی باعث افزایش قابل‌توجه کربن آلی خاک و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن می‌شود. این تغییرات موجب ارتقاء ظرفیت نگهداری رطوبت خاک و کاهش فرسایش و به‌طورکلی افزایش کیفیت خاک می‌گردد. وانگ و همکاران (۲۰۲۳) نیز در نتیجه تحقیق خود بر روی اثر تغییرات کاربری بر ذخیره کربن و سایر ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک اعلام کردند هر گونه تلاش برای کاهش تلفات SOC از طریق تغییر مدیریت در کاربری‌های مختلف به جذب کربن بیشتر در اکوسیستم‌های زمینی کمک می‌کند. بنابراین تغییر در کاربری در جهت مثبت و احیای پوشش‌های گیاهی می‌تواند باعث افزایش محتوای مواد آلی، افزایش چرخه مواد مغذی، بهبود ساختمان خاک و ارتقای تنوع میکروبی و کمک به سلامت و پایداری خاک شود.

علاوه بر کاربری زمین، نوع روش محاسبه کیفیت خاک نیز در نتایج تفاوت ایجاد کرده است. به‌طورکلی، روش وزنی مقادیر پایین‌تری نسبت به روش ساده ارائه داده است (جدول ۶) هرچند این اختلاف‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبودند. دلیل اصلی این اختلاف در آن است که روش وزنی به هریک از شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده وزن متفاوتی اختصاص می‌دهد که منعکس‌کننده اهمیت نسبی آن شاخص در عملکرد و سلامت خاک است و سبب دقت بالاتر در ارزیابی می‌شود. در حالی‌که در روش ساده، تمامی شاخص‌ها با وزن برابر لحاظ می‌شوند و این موضوع می‌تواند منجر به ساده‌سازی بیش‌ازحد ساختار اکولوژیکی خاک شود (Karlen te al., 2001). در واقع، نتایج پژوهش حاضر و شواهد موجود در مطالعات پیشین نشان می‌دهند که روش وزنی به‌طور گسترده‌تری مورداستفاده قرارگرفته و در بسیاری از تحقیقات به‌عنوان روش ارجح برای ارزیابی کیفیت خاک معرفی‌شده است (Karlen te al., 2001; Ibno Namr et al., 2023). چروبین و همکاران (۲۰۱۶) عنوان کرده‌اند اگرچه مقدار شاخص کیفیت ساده و وزنی از نظر آماری مشابه هستند؛ اما توصیه می‌شود به‌ویژه هنگامی‌که تعداد شاخص‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی نامتعادل است، از شاخص‌های وزنی استفاده شود. ابنونمر و همکاران (۲۰۲۳)، در مقایسه سه روش تعیین شاخص کیفیت خاک نشان دادند که شاخص‌های وزن‌دار در مقایسه با شاخص ساده کیفیت خاک به دلیل اختصاص وزن مناسب برای ویژگی‌های خاک کارآمدتر هستند. واعظی و همکاران (۱۳۹۹) شاخص‌های کیفیت تجمعی وزنی، ساده و شاخص کیفیت نمورو را با استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک تعیین کردند. نتایج نشان داد شاخص کیفیت خاک وزنی حاصل از حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک بر اساس آماره $R^2=0.92$، دقت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌های کیفیت خاک داشت. همتی و همکاران (۱۳۹۸) نیز درنتیجه تحقیق خود بر روی ارزیابی کیفیت خاک اراضی شالیزاری بیان نمودند که استفاده از مدل وزن‌دار شاخص کیفیت خاک و حداقل خصوصیات مؤثر بر کیفیت خاک بهتر توانسته است تغییرات عملکرد در رابطه باکیفیت خاک را توجیه نماید.

در کنار روش محاسبه، تفاوت بین مجموعه داده‌های استفاده‌شده نیز قابل‌توجه است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های حداقلی به‌طور میانگین مقادیر کمی بالاتری برای شاخص کیفیت خاک نسبت به مجموعه کل

داده‌ها به همراه دارد. با این حال، اختلاف میان این دو چندان زیاد نیست که نشان‌دهنده کارایی بالای مجموعه شاخص‌های منتخب در MDS است. روش MDS که معمولاً از طریق تحلیل آماری مانند تحلیل مؤلفه‌های اصلی تعیین می‌شود، قادر است با استفاده از تعداد کمتری از متغیرهای کلیدی، تصویری نزدیک به واقعیت از کیفیت خاک ارائه دهد. این امر به‌ویژه در شرایطی که منابع محدود هستند، زمان بررسی کم است یا در پروژه‌های پایش وسیع خاک، از اهمیت زیادی برخوردار است. کارایی بالاتر استفاده از مجموعه داده‌های حداقلی در مطالعات اندروز و همکاران (۲۰۰۴)، شوئیت و همکاران (۲۰۲۵)، یننه و همکاران (۲۰۲۴)، ملکی و همکاران (۲۰۲۲) و سایر پژوهش‌های نوین تأیید شده و جایگاه علمی آن به‌عنوان ابزاری کاربردی در ارزیابی سلامت خاک تثبیت‌شده است. در همه این پژوهش‌ها این نتیجه اعلام‌شده است که به طور معمول استفاده از مجموعه کل داده‌ها منجر به بهبود ارزیابی جامع کیفیت خاک و افزایش دقت ارزیابی‌ها می‌شود؛ اما تجزیه‌وتحلیل‌های پیچیده با توجه به تعداد زیادی از ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک، پرزحمت، پرهزینه و وقتگیر هستند؛ بنابراین در نظر گرفتن تعداد محدودتری از نشانگرهای خاک که نماینده بهتری از کیفیت خاک باشند، به‌عنوان MDS توصیه‌شده است.

جدول ۶- مقایسه میانگین شاخص‌های کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف

شاخص کیفیت خاک	نوع داده	کاربری بایر	کاربری باغ زیتون
SQI_A	TDS	۰/۴۴ [b]	۰/۷۶ [a]
	MDS	۰/۴۸ [b]	۰/۷۹ [a]
SQI_W	TDS	۰/۴۱ [b]	۰/۷۵ [a]
	MDS	۰/۴۷ [b]	۰/۷۷ [a]

کلاس‌بندی کیفیت خاک

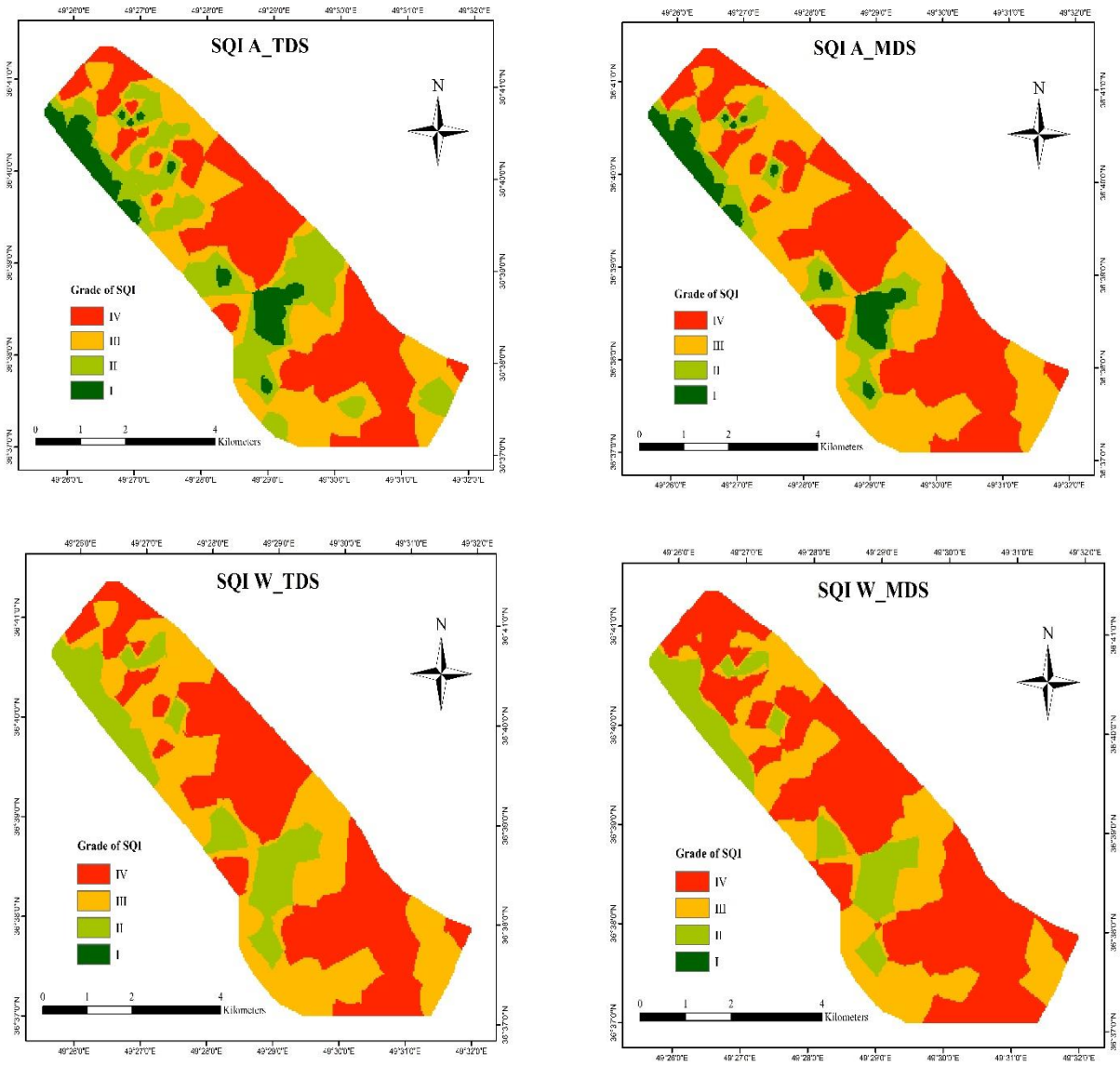
شاخص‌های کیفیت خاک مطابق طبقه‌بندی کیفیت خاک به روش کی و همکاران (۲۰۰۹) (جدول ۷) کهSQI را در دامنه صفر تا ۱ نمره‌دهی می‌کند و معمولاً به چهار کلاس کلی تقسیم می‌شود (کلاس I: عالی، کلاس II: خوب، کلاس III: متوسط و کلاس IV: ضعیف) طبقه‌بندی شدند. نقشه توزیع مکانی شاخص‌های کیفیت خاک در شکل ۲ نشان داده‌شده است.

جدول ۷- درجه‌بندی کیفیت خاک در دو روش TDS و MDS

SQI Model	Indicator Method	SQI Grade			
		I	II	III	IV
IQI	TDS	$IQI_{TDS}>0.76$	$0.76>IQI_{TDS}>0.66$	$0.66>IQI_{TDS}>0.56$	$0.56>IQI_{TDS}$
	MDS	$IQI_{MDS}>0.78$	$0.78>IQI_{MDS}>0.68$	$0.68>IQI_{MDS}>0.58$	$0.58>IQI_{MDS}$

نتایج حاصل از تحلیل نقشه‌های شاخص کیفیت خاک با استفاده از مدل‌های مختلف نشان می‌دهد همه مدل-ها توانسته‌اند به‌خوبی اثر کاربری بر کیفیت خاک را نشان دهند و کیفیت خاک در منطقه به‌طور محسوسی تحت تأثیر نوع کاربری زمین قرار دارد (شکل ۲). همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نواحی با کاربری بایر، مناطق شهری، مناطق

کوهستانی و دارای شیب زیاد، کیفیت خاک در پایین‌ترین سطح (کلاس IV) قرار دارد. این کاهش کیفیت می‌تواند ناشی از فرسایش، کاهش مواد آلی، فشردگی خاک و افزایش نمک‌های محلول باشد؛ عواملی که در مطالعات مشابه نیز به‌عنوان مؤلفه‌های مخرب اصلی در تخریب کیفیت خاک معرفی‌شده‌اند (Xiong et al., 2024; Geremew et al., 2023). در مقابل، باغ‌های زیتون و اراضی با پوشش گیاهی پایدار عمدتاً در کلاس II و I قرار دارند که نشان‌دهنده تأثیر مدیریت پایدار زمین و اثر حفاظتی پوشش گیاهی بر حفظ و ارتقای کیفیت خاک است. همچنین، باغ‌های زیتون احداث‌شده درشیب‌های زیاد و مناطق دارای پوشش گیاهی طبیعی نیمه بیابانی که در آن‌ها هنوز تا حدودی ویژگی‌های کیفی خاک حفظ‌شده است، دارای کیفیت متوسط تا نیمه‌پایدار هستند. به‌طورکلی، نقشه بیانگر آن است که هرچه کاربری زمین به سمت پایداری بیشتر و پوشش گیاهی دائمی پیش می‌رود، شاخص کیفیت خاک نیز بهبود می‌یابد و برعکس، تخریب پوشش گیاهی و بهره‌برداری بی‌رویه موجب کاهش چشمگیر کیفیت خاک می‌شود. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که پوشش گیاهی پایدار با بهبود ساختار خاک، افزایش فعالیت میکروبی و کنترل فرسایش، نقش مؤثری در حفظ سلامت خاک ایفا می‌کند (Zipori et al., 2020).



شکل ۲- پهنه‌بندی شاخص‌های کیفیت خاک منطقه با استفاده از روش‌های مختلف

پهنه‌بندی شاخص‌های کیفیت خاک در کاربری-های مختلف

بررسی مساحت‌های مربوط به هریک از کلاس-های کیفیت خاک‌نشان داد که در روش SQI_{A-TDS}، حدود ۲۲۶/۶۳ هکتار از منطقه در کلاس کیفیت بسیار خوب (کلاس I) قرار دارد (جدول ۸). این مقدار در روش SQI_{A-MDS} کمی کمتر و برابر با ۲۱۷/۰۲ هکتار بود. در سطوح پایین‌تر کیفیت، مساحت اراضی افزایش‌یافته است؛ به‌طوری‌که در کلاس II، مساحت اراضی به ترتیب برای روش‌های SQI_{A-MDS} و SQI_{A-TDS} برابر با ۲۸۷/۵۶ و ۶۸۱/۱۷ هکتار برآورد شد. این روند در کلاس‌های III و IVنیز ادامه داشت و بیشترین مساحت‌ها در کلاس‌های پایین‌تر کیفیت متمرکز شدند. برای نمونه، روش-SQI_{A-MDS}کلاس III را با ۱۱۷۵/۶۵ هکتار و کلاس IV را با ۱۲۶۶/۸۵ هکتار شناسایی کرده است. در روش‌های تجمعی وزنی نیز الگوی مشابهی مشاهده شد. در روش -SQIW TDS، کلاسI مشاهده نشد و کلاس II برابر ۴۸۵/۹۶ هکتار بود که حاکی از آن است که هیچ بخشی از منطقه با کیفیت بسیار خوب شناسایی نشده و بیشتر اراضی در طبقات پایین‌تر کیفیت قرار گرفته‌اند. همین روش کلاس III را با ۱۱۷۱/۵۱ هکتار و کلاس IV را با ۱۲۸۹/۶۵ هکتار

شناسایی کرده است. همچنین، در روش $SQI_{W\text{-}MDS}$ نیز کلاس I مشاهده نشد، اما با افزایش کلاس کیفیت، به ترتیب مساحت‌ها افزایش یافت و کلاس IV با ۱۵۸۰/۴۸ هکتار بیشترین سطح را به خود اختصاص داد. این نتایج نشان می‌دهد که در روش‌های مختلف محاسبه شاخص کیفیت خاک، الگوی کلی پراکنش کلاس‌ها مشابه است؛ به‌طوری‌که بیشترین مساحت‌ها در کلاس‌های پایین‌تر کیفیت متمرکزشده‌اند و کلاس‌های با کیفیت بسیار خوب (کلاس I) بخش کوچکی از منطقه را تشکیل می‌دهند یا در برخی روش‌های وزنی مشاهده نمی‌شوند. با این حال، مقادیر دقیق مساحت هر کلاس بین روش‌ها تفاوت دارد. این تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از ماهیت محاسباتی و وزن‌دهی شاخص‌ها در هر روش است؛ برای مثال، در روش‌های تجمعی وزنی، اهمیت بیشتر به شاخص‌های کلیدی داده‌شده است و بنابراین ممکن است بخشی از اراضی به کلاس‌های پایین‌تر تنزل پیدا کند، درحالی‌که در روش‌های ساده کلاس‌بندی بر اساس میانگین شاخص‌ها است و بخشی از اراضی در کلاس‌های بالاتر قرار می‌گیرند. به‌عبارت‌دیگر، تفاوت‌های جزئی در مساحت‌ها به دلیل نحوه محاسبه شاخص ترکیبی، وزن‌دهی متغیرها و حساسیت روش‌ها ایجادشده است، ولی الگوی کلی پراکنش کلاس‌ها در همه روش‌ها هماهنگ و منطقی باقی‌مانده است.

درمجموع، نتایج نشان داد که بخش قابل‌توجهی از اراضی منطقه موردمطالعه در کلاس‌های متوسط تا ضعیف کیفیت خاک (III و IV) قرار دارند و تنها اراضی تحت کشت زیتون در مناطق کم‌شیب و پایین‌دست در کلاس‌های I و II جای گرفتند (شکل ۲). همچنین مقایسه روش‌های مختلف محاسبه شاخص کیفیت خاک بیانگر آن بود که استفاده از TDS ارزیابی سخت‌گیرانه‌تری ارائه می‌دهد و اراضی بیشتری را در کلاس‌های پایین‌تر قرار می‌دهد، درحالی‌که روش‌های مبتنی بر استفاده از MDS با وجود استفاده از تعداد شاخص کمتر، توانستند الگوی توزیع کیفیت خاک را با دقت قابل‌قبول بازنمایی کنند. این یافته‌ها نشان‌دهنده کارایی بالای روش MDS به‌عنوان جایگزینی اقتصادی و قابل‌اعتماد برای پایش کیفیت خاک در مقیاس‌های وسیع است؛ موضوعی که پیش‌تر نیز در مطالعات که پیش‌تر نیز توسط اندروز و همکاران (۲۰۰۴) و رحمانیپور و همکاران (۲۰۱۴) تأییدشده است.

جدول ۸ - مساحت کلاس‌های کیفیت خاک با استفاده از روش‌های مختلف (هکتار)

GRADE	$SQI_{A\text{-}TDS}$	$SQI_{A\text{-}MDS}$	$SQI_{W\text{-}TDS}$	$SQI_{W\text{-}MDS}$
I	۲۲۶/۶۳	۲۱۷/۰۲	۰	۰
II	۶۸۱/۱۷	۲۸۷/۵۶	۴۸۵/۹۶	۴۱۳/۱۳
III	۹۳۶/۶۷	۱۱۷۵/۶۵	۱۱۷۱/۵۱	۹۵۲/۹۱
IV	۱۱۰۲/۳۷	۱۲۶۶/۸۵	۱۲۸۹/۶۵	۱۵۸۰/۴۸

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این مطالعه به‌روشنی نشان داد که تغییر کاربری اراضی از وضعیت بایر با پوشش طبیعی نیمه‌بیابانی به باغ‌های زیتون، بهبود چشمگیری در کیفیت خاک منطقه لوشان، یکی از قطب‌های زیتون‌کاری ایران را به همراه دارد. ارتقاء ویژگی‌هایی نظیر افزایش کربن آلی، نیتروژن، ظرفیت تبادل کاتیونی، تنفس میکروبی و کاهش ضریب متابولیک در خاک باغ‌های زیتون نسبت به اراضی بایر، حاکی از

ارتقاء کارایی زیستی و حاصلخیزی خاک است. در بُعد روشی‌شناسی، مقایسه دو مدل محاسبه شاخص کیفیت خاک، یعنی مدل تجمعی ساده (SQI_A) و مدل تجمعی وزنی (SQI_W)، نشان داد که مدل وزنی با لحاظ کردن اهمیت نسبی هر ویژگی، ارزیابی دقیق‌تری از وضعیت عملکرد خاک ارائه می‌دهد. همچنین، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در انتخاب مؤثرترین ویژگی‌های خاک برای تشکیل مجموعه داده‌های حداقلی (MDS) موفق عمل کرده و با کاهش تعداد متغیرها، کارایی زمانی و اقتصادی ارزیابی کیفیت خاک را بهبود بخشید؛ بدون آنکه دقت نتایج به‌طور معنی‌داری کاهش یابد؛ بنابراین، ترکیب MDS و SQI_Wبه‌عنوان یک چارچوب تحلیلی مؤثر برای پایش سلامت خاک در مقیاس منطقه‌ای پیشنهاد می‌شود. نتایج تأکیددارند که بهره‌برداری پایدار از اراضی، همراه با انتخاب مناسب نوع کاربری و مدیریت صحیح آن، نقش کلیدی در حفظ و ارتقاء عملکرد خاک و امنیت غذایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک خواهد داشت.

فهرست منابع

۱. تقی پور، م.، یغمائیان مهابادی، ن. و شعبانپور، م. (۱۴۰۲). ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از تحلیل‌های‌چند متغیره درکاربری‌های مختلف اراضی (مطالعه موردی: توتکابن استان گیلان) .مهندسی زراعی. ۴۶ (۳).۲۵۱-۲۷۱.

۲. حیدری, ن.، موسوی، س.ب.، بهشتی آل آقا، ع.، رخش، ف. و کریمی, ا. (۱۴۰۱). تأثیر تغییر کاربری اراضی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۳ (۷), ۱۶۲۵-۱۶۴۳.

۳. عاکف، م.، و رحیمی لاکه، هادی.۱۳۸۶،ارزیابی کیفی تناسب اراضی برای محصول زیتون در بخشی از اراضی شهرستان رودبار (استان گیلان)،دهمین کنگره علوم خاک ایران،کرج.

۴. مقامی مقیم، ف.، کریمی، ع.، باقری بداغ آبادی، م.، و امامی، ح. (۱۴۰۱). ارزیابی نقش سامانه های مدیریتی مختلف بر شاخص کیفیت خاک با استفاده از عملکرد محصول (مطالعه موردی: دشت نیشابور). آب و خاک. ۳۶ (۱). ۹۵-۱۱۲.

۵. مولائی آرپناهی، م.، صالحی، م.، کریمیان اقبال، م.، و مصلح، ز. (۱۳۹۹). تأثیر تغییر کاربری اراضی بر برخی از شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی کیفیت خاک، منطقه بازفت، (استان چهارمحال و بختیاری) .آب و خاک.۳۴ (۳). ۷۰۷-۷۲۰.

۶. میرخانی، ر.، واعظی، ع.، و رضائی، ح. (۱۳۹۹). بررسی شاخص‌های کیفیت خاک در کشتزارهای گندم آبی در منطقه نظرآباد در غرب استان البرز .آب و خاک.۳۴ (۵).۱۱۲۵-۱۱۳۹.

۷. میرخانی، ر.، بایبوردی، ا.، سعادت، س.، اسمعیل‌نژاد، ل.، و رضایی، ح.(۱۴۰۲). ارزیابی کیفیت خاک اراضی تحت کشت گندم آبی در دشت تبریز، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۱۲). ۱۹۸۱-۱۹۹۴.

۸. همتی، س.، یغمائیان مهابادی، ن.، فرهنگی، م.، و صبوری، ع. (۱۳۹۸). ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک و ارتباط آن با عملکرد برنج در شالیزارهای مرکزی استان گیلان .مجله مدیریت خاک و تولید پایدار. ۹ (۱).۱۳۵-۱۵۰.

۹. یغمائیان مهابادی، ن.، فیاض، ح.، صبوری، ع.، و شیرین فکر، ا. (۱۳۹۹). مقایسه روش‌های ارزیابی کیفیت خاک و ارتباط آن با عملکرد در اراضی چایکاری غرب استان گیلان .پژوهش های خاک. ۳۴ (۴). ۴۳۵-۴۵۰.

10. Anderson TH, Domsch KH (2010) Soil microbial biomass: the eco-physiological approach. Soil Biol and Biochem 42 (12): 2039-2043. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.06.026.
11. Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. Soil Science Society of America Journal, 68(6), 1945-1962.
12. Bandyopadhyay, S., & Maiti, S. K. (2021). Different soil factors influencing dehydrogenase activity in mine degraded lands—state-of-art review. Water, Air, & Soil Pollution, 232(9), 360.
13. Beck T, Joergensen RG, Kandeler E, Makeschin F, Nuss E, Oberholzer HR, Scheu S (1997) An inter-laboratory comparison of ten different ways of measuring soil microbial biomass C. Soil Biol and Biochem 29 (7):1023-1032. doi: 10.1016/S0038-0717(97)00030-8.
14. Blake G.R, Hartage K.H (1986) Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), Method of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph no. 9, second ed., pp. 363–375.
15. Bower, C. A., Reitemeier, R. F., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. Soil science. 73(4), 251-262.
16. Bremner J. M, Mulvaney C. S (1982) Nitrogen-total. Methods of soil analysis, part 2 chemical and microbiological properties, 9, 595-624
17. Chen, S., Zhang, G., Zhu, P., Wang, C., & Wan, Y. (2023). Impact of land use type on soil erodibility in a small watershed of rolling hill northeast China. Soil and Tillage Research, 227, 105597.
18. Ding, J. N. (2023). EFFECT OF CULTIVATION AND NATURAL RESTORATION ON SOIL MICROBIAL FUNCTIONAL STRUCTURE IN COLDREGION WETLANDS. Applied Ecology & Environmental Research, 21(2).
19. Doran J.W., and Parkin B.T. (1994). Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (Eds.), Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA, pp. 3–21. Special Publication. Number 35.
20. Fu, Z., Liu, Y., Jiang, X., Guo, H., Wang, S., & Li, Z. (2025). Health of plateau soil environment: Corresponding relationship of heavy metals in different land use/cover types (LULCC). Science of The Total Environment, 973, 179162.
21. Gee, G.W. and Bauder J.M. (1986). Partical-size analysis. In Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods. Agronomy Monogroph No. 9 (2nd edition), American Society of Agronomy, Madison, WI. Pp 383-411.
22. Geremew, B., Tadesse, T., Bedadi, B., Gollany, H. T., Tesfaye, K., & Aschalew, A. (2023). Impact of land use/cover change and slope gradient on soil organic carbon stock in Anjeni watershed, Northwest Ethiopia. Environmental Monitoring and Assessment, 195(8), 971.
23. Hemmati, S., Yaghmaeian, N., Farhangi, M. B., & Sabouri, A. (2023). Soil quality assessment of paddy fields (in Northern Iran) with different productivities: Establishing the critical limits of minimum data set indicators. Environmental Science and Pollution Research, 30(4), 10286-10296.

24. Ibno Namr, K., & Bel-Lahbib, S. (2023). Use of spatial variability of Soil Quality Index models and Soil properties for Soil Quality evaluation in the Irrigated Perimeter, Semi-arid Region of Morocco. Earth Systems and Environment, 7(4), 857-879.
25. Joshi, R. K., & Garkoti, S. C. (2023). Influence of vegetation types on soil physical and chemical properties, microbial biomass and stoichiometry in the central Himalaya. Catena, 222, 106835.
26. Karlen, D. L., Andrews, S. S. and Doran, J. W. (2001). Soil quality: Current concepts and applications. Advances in Agronomy 74: 1-40.
27. Kemper W.D. and Rosenau R.C. (1986). Aggregate stability and size distribution. In: Klute A (ed). Methods of Soil Analysis. Part a: Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America, Madison, WI. Pp 425–442.
28. Lemenih, M. (2004). Effects of land use changes on soil quality and native flora degradation and restoration in the highlands of Ethiopia: Implications for sustainable land management (No. 306).
29. Lindsay W.L. and Norvel W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for Zinc, Iron, Manganese and Copper
30. 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.
31. Manas, P., & De las Heras, J. (2024). Nutrient content in olive leaves through sustained irrigation with treated wastewater. *Scientia Horticulturae*, *330*, 113084.
32. Martín-Sanz, J. P., de Santiago-Martín, A., Valverde-Asenjo, I., Quintana-Nieto, J. R., González-Huecas, C., & López-Lafuente, A. L. (2022). Comparison of soil quality indexes calculated by network and principal component analysis for carbonated soils under different uses. Ecological Indicators, 143, 109374.
33. Masto, R., Chhonkar, P., Singh, D. and Patra, (2008); A. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilization and managing for 31 years in the semi-arid soils of India. Environ. Monit. Assess., 136: 419-435.
34. Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Eskandari, S. (2018). Assessing and monitoring the soil quality of forested and agricultural areas using soil-quality indices and digital soil-mapping in a semi-arid environment. Archives of Agronomy and soil science, 64(5), 696-707.
35. Okolo, C. C., Gebresamuel, G., Retta, A. N., Zenebe, A., & Haile, M. (2019). Advances in quantifying soil organic carbon under different land uses in Ethiopia: a review and synthesis. Bulletin of the National Research Centre, 43, 1-24.
36. Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S. and Dean L.A. (1954). Estimation of Available Phosphorous in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate; U.S. Department of Agriculture: Washington, D.C., USDA Circ. 939.
37. Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R.(1982). Methods of Soil Analysis, part2, chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of Aamerica, Madison, WI.
38. Poeplau, C., & Don, A. (2013). Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. Geoderma, 192, 189-201.
39. Poeplau, C., & Don, A. (2013). Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. Geoderma, 192, 189-201.

40. Rahmanipour, F., R. Marzaioli, H. A. Bahrami and Z. Fereidouni. 2014. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. Ecological Indicators. 40: 19–26.
41. 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.
42. Rangzan, K., Abdehvand, Z. Z., Mousavi, S. R., & Karimi, D. (2025). Spatial analysis of soil quality in agricultural land using machine learning and environmental covariates: A case study of Khuzestan Province. Soil and Tillage Research, 252, 106591.
43. Reynolds W.D., Drury C.F., Tan C.S., Fox C.A. and Yang X.M. (2009). Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality. Geoderma, 152: 252-263
44. Rhoades, J.D. (1982). Soluble salts. In: Page AL (ed) Methods of soil analysis, part II, 2nd ed., ASA, Monograph No. 9, Madison, WI, pp 167-179. https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c10
45. Shuite, Z., Demessie, A., & Abebe, T. (2025). Land use effect on soil quality and its implication to soil carbon storage in Aleta Chuko, Ethiopia. Geoderma Regional, 40, e00917.
46. Shukla M.K., Lal R. and Ebinger M. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. Soil Tillage Research, 87:194–204.
47. 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.
48. Torbert H.A., Krueger E. and Kurtene D. (2008). Soil quality assessment using fuzzy modeling. International Agrophysics, 22: 365-370.
49. Uthappa, A. R., Devakumar, A. S., Das, B., Mahajan, G. R., Chavan, S. B., Jinger, D., ... & Fahad, S. (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.
50. Walkley A. and Black I.A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, 37: 29-37.
51. Xiong, J., Shao, X., Li, N., Yuan, H., Liu, E., & Wu, M. (2024). Effects of land-use on soil C, N, and P stocks and stoichiometry in coastal wetlands dependent on soil depth and latitude. Catena, 240, 107999.
52. Yan, Y., Wang, C., Zhang, J., Sun, Y., Xu, X., Zhu, N., ... & Chen, J. (2022). Response of soil microbial biomass C, N, and P and microbial quotient to agriculture and agricultural abandonment in a meadow steppe of northeast China. Soil and Tillage Research, 223, 105475.
53. Yanbing Q., Darilek J.L., Biao H., Yongcun Z., Sun W. and Gu Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. Geoderma, 149: 325-334.
54. Yeneneh, N., Elias, E., & Feyisa, G. L. (2024). Monitoring soil quality of different land use systems: a case study in Suha watershed, northwestern highlands of Ethiopia. Environmental Systems Research, 13(1), 7.
55. Zahedifar, M., 2023. Assessing alteration of soil quality, degradation, and resistance indices under different land uses through network and factor analysis. Catena, 222, p.106807.
56. Zeraatpisheh, M., Bakhshandeh, E., Hosseini, M., & Alavi, S. M. (2020). Assessing the effects of deforestation and intensive agriculture on the soil quality through digital soil mapping. Geoderma, 363, 114139.

57. Zipori, I., Erel, R., Yermiyahu, U., Ben-Gal, A., & Dag, A. (2020). Sustainable management of olive orchard nutrition: A review. Agriculture, 10(1), 11.