Impact of Threshold Levels on Soil Quality Indicators in Some Orchards and Paddy Fields in the Marvu'ak Region, Lorestan Province

A. Salmanpour*

Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Khorram-Abad, Iran.**anahidsalmanpour@yahoo.com**

«**Research Article**»

Received: August 19, 2024 and Accepted: December 23, 2024

Abstract

This study aimed to compare Integrated and Nemoro soil quality indicators and investigate the impact of determining or not determining critical limits in scoring fuzzy and sigmoidal functions in apricot orchards and paddy fields near the Maru'ak dam in Dorud city, Lorestan Province. Twenty sites, including 10 apricot orchards and 10 rice fields, were selected for soil sampling. Samples were collected from a depth of 0 to 30 cm, and 16 soil and land properties were identified for the total dataset (TDS). Gravel content, bulk density, texture, salinity, acidity, calcium carbonate percentage, organic carbon, and available nutrient elements including P, K, Fe, Mn, Zn, and Cu, were measured. Slope percentages were also obtained by field observation and Google Earth software. Principal component analysis was utilized for weight assignment and minimum dataset (MDS) selection. Scoring of soil properties was carried out using fuzzy functions with specified threshold levels for each land use, as well as sigmoid functions without threshold limits. Subsequently, the integrated and Nemoro quality indicators were calculated and classified. Based on the results, soil acidity, available Fe, available K, and available Mn were identified as MDS and the most important factors controlling soil quality in the region. For both TDS and MDS, the integrated quality index values were greater than 0.6 (indicating high quality), and the Nemoro quality index values were less than 0.4 (moderate quality). This shows that there is a difference in soil quality evaluation when using various indices. Comparisons showed that MDS indices aligned closely with TDS indices across both land uses, suggesting that specific properties may serve as substitutes for overall soil properties. Furthermore, the results indicated that the absence of threshold limits in sigmoid functions did not accurately represent the conditions of Fe pollution in paddy fields, resulting in slightly higher indices than in orchards. This highlights that threshold limits can greatly affect how results are interpreted and how management strategies are developed. Further research is recommended to conduct additional research to establish standardized threshold limits for soil characteristics in different regions of Iran where such limits are not available.

Keywords: Integrated quality index, Nemoro quality index, Fuzzy functions, Sigmoid functions

* - Corresponding author's email: anahidsalmanpour@yahoo.com

پژوهش‌های خاک / الف / جلد ۳۸ / شماره۳ پاییز/ ۱۴۰۳/۲۵۱-۲۷۰
https://doi.org/ 10.22092/IJSR.2024.366751.757

اثر حد آستانه بر شاخص‌های کیفیت خاک در برخی باغ‌ها و شالیزارهای مرووک، استان لرستان

آناهید سلمان پور*

استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم آباد، ایران.anahidsalmanpour@yahoo.com

« مقاله پژوهشی»
دریافت: ۱۴۰۳/۵/۲۹ و پذیرش:۱۴۰۳/۱۰/۳

چکیده

تحقیق حاضر با هدف مقایسه دو شاخص کیفیت خاک تجمعی و نمورو و مقایسه اثر تعیین یا عدم تعیین حدود آستانه در دو تابع امتیازدهی فازی و سیگموئیدی در دو کاربری باغ زردآلو و شالیزارها در اراضی زیر سد مرووک، در شهرستان دورود استان لرستان انجام شد. برای این منظور تعداد ۱۰ باغ و ۱۰ زمین برنجکاری (مجموعا ۲۰ نقطه) انتخاب شد. از هر نقطه یک نمونه خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری تهیه و در مجموع ۱۶ ویژگی خاک و زمین به عنوان مجموعه کل داده انتخاب شد. درصد سنگریزه، جرم مخصوص ظاهری، بافت، شوری، اسیدیته، درصد آهک، کربن آلی، و عناصر تغذیه‌ای قابل جذب شامل فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، روی و مس، از آنالیزهای آزمایشگاهی و درصد شیب از مشاهدات صحرایی و تصاویر گوگل ارث بدست آمد. وزن‌دهی به ویژگی‌ها و انتخاب مجموعه حداقل داده با روش تجزیه مولفه‌های اصلی انجام شد. امتیازدهی به ویژگی‌ها با استفاده از توابع فازی (با انتخاب حدود آستانه مخصوص هرکاربری) و سیگموئیدی (بدون نیاز به تعیین حدود آستانه) انجام شد. در آخر، شاخص‌های کیفیت تجمعی و نمورو محاسبه و بر اساس گروه‌بندی های ارائه شده در منابع طبقه-بندی شدند. علاوه بر این مقادیر شاخص‌ها در دوکاربری و دو تابع بایکدیگر با استفاده از آزمون‌های آماری مقایسه شد. مطابق نتایج چهار ویژگی اسیدیته، آهن، پتاسیم و منگنز قابل جذب به عنوان مهمترین فاکتورهای موثر بر کیفیت خاک انتخاب شد. در هر دو مجموعه کل و حداقل، مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی بالاتر از ۰/۶ (بسیار خوب) و مقادیر شاخص‌های کیفیت نمورو کمتر از ۰/۴ (متوسط) به دست آمد که نشان از ارزیابی متفاوت شاخص‌ها از کیفیت خاک بود. در هر دوکاربری، مقادیر شاخص‌های کیفیت در مجموعه‌های کل و حداقل مشابه بود. بنابراین می‌توان از ویژگی‌های انتخاب شده به جای کل ویژگی‌های خاک استفاده کرد و ارزیابی یکسانی بدست آورد. همچنین، عدم تعیین حدود آستانه در توابع سیگموئیدی شرایط آلایندگی آهن در شالیزارها را منعکس نکرده و وضعیت کیفیت خاک در شالیزارها را کمی بهتر از باغ‌ها نشان داد. لذا تعیین یا عدم تعیین حدود آستانه بر تفسیر نتایج و ارائه راهکارهای مدیریتی موثر بوده و انجام مطالعاتی در این خصوص برای ویژگی‌هایی از خاک که چنین اطلاعاتی در دسترس نیست در مناطق مختلف ایران پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: شاخص کیفیت تجمعی، شاخص کیفیت نمورو، توابع فازی، توابع سیگموئیدی

*آدرس ایمیل نویسنده مسئول:anahidsalmanpour@yahoo.com

مقدمه

کیفیت خاک در کنار کیفیت آب و هوا، یکی از سه مولفه مهم در حفظ کیفیت محیط زیست است (بونمان، ۲۰۱۸). کیفیت خاک «ظرفیت خاک برای عملکرد در محدوده اکوسیستم و کاربری زمین برای حفظ بهره‌وری بیولوژیکی، کیفیت محیط و ارتقای گیاه و سلامت حیوانات و در نهایت انسان» تعریف می‌شود (دوران و پارکین، ۱۹۹۴؛ ۱۹۹۷). این تعریف مفهوم پیچیده‌ای دارد زیرا خاک نقش‌های متفاوتی در طبیعت داشته و برای اهداف گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد (نورتکلیف، ۲۰۰۲). کیفیت خاک برای بهبود مدیریت پایدار زمین و پیشگیری از تخریب فزاینده خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد. ارزیابی کیفیت خاک امری ساده نیست، زیرا مدیریت انسانی بخصوص در اراضی زراعی و باغی بر فرآیندهای خاک تأثیر میگذارند (اسمعیلی زاد و همکاران، ۱۴۰۲).

کیفیت خاک از طریق شاخص‌های کیفیت که مجموعه‌ای از ویژگی‌های خاک را یکپارچه سازی می‌کند ارزیابی می‌شود (واسو، ۲۰۱۶). از میان این شاخص‌ها، شاخص‌های کیفیت تجمعی (IQI) و نمورو (NQI) به دلیل سهولت محاسبه و انعطاف‌پذیری در تعداد و نوع ویژگی‌های مورد استفاده در آن‌ها بیشتر توجه محققان قرار گرفته است (درخشان-بابایی و همکاران، ۲۰۲۱). شاخص‌های کیفیت خاک بر اساس کل ویژگی‌های اندازه-گیری شده (مجموعه کل داده‌ها) یا تعداد محدودتر از ویژگی‌ها (مجموعه حداقل داده‌ها) قابل محاسبه است. ویژگی‌های انتخاب شده در هر منطقه بسته به نوع کاربری و مدیریت خاک و هدف مطالعه، از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک انتخاب می‌شود. از آنجا که اندازه‌گیری تمام ویژگی‌های خاک زمان‌بر و پرهزینه است، مجموعه حداقل داده‌ها با هدف شناسایی ویژگی‌هایی از خاک که نماینده مناسبی از کیفیت خاک هستند، نیز در مطالعات تعیین می‌شود (شاهپوری و همکاران، ۱۴۰۲). معمولا ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به دلیل ارتباط مستقیم با مشخصات ذاتی و پویای خاک و تاثیر بر شرایط زیستی گیاه و سهولت اندازه‌گیری در اولویت مطالعات قرار می‌گیرند. به عنوان مثال شاهپوری و همکاران (۱۴۰۲) با بررسی یازده ویژگی خاک در شش کاربری مختلف در شهرستان ملایر مشاهده کردند کربنات کلسیم و پتاسیم محلول مهمترین پارامترهای توضیح کیفیت خاک در این کاربری هاست. ایشان گزارش کردند کشاورزی دیم در مقایسه با باغ، کشاورزی آبی و نواحی صنعتی دارای کیفیت خاک بالاتری است. تقی‌پور و همکاران (۱۴۰۲) نیز با بررسی ۱۲ ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک در سه کاربری جنگل، مرتع و کشاورزی در منطقه تنکابن استان گیلان، درصد رس، میانگین وزنی قطر خاکدانه، کربن آلی و فسفر قابل دسترس را به عنوان مهمترین فاکتورهای موثر بر کیفیت خاک گزارش نموده و بیان کردند جنگل و کشاورزی کیفیت بالاتری نسبت به مرتع دارد. باریکلو و همکاران (۱۴۰۲) از میان ۲۲ ویژگی اندازه‌گیری شده در اراضی دشت ارومیه، شش ویژگی خاک شامل درصد شن، نسبت جذب سدیم، ظرفیت تبادل کاتیونی، فسفر قابل جذب، آهک فعال و نیکل را به عنوان مجموعه حداقل داده‌ها و مهمترین فاکتورهای کنترل کننده کیفیت خاک در کاربری های زراعی و باغی معرفی نمودند. رستمی‌نیا و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی دو شاخص کیفیت تجمعی و نمورو در اراضی مرتعی منطقه کانه سرخ ایلام مشاهده کردند از ۱۶ ویژگی انتخاب شده خاک، ۸ ویژگی ماده آلی، قابلیت هدایت الکتریکی، درصد کربنات کلسیم، گچ، رس، شن، اسیدیته و جرم مخصوص ظاهری به عنوان مهمترین فاکتورهای موثر بر کیفیت خاک به عنوان مجموعه حداقل داده معرفی شد. شهاب آرخازلو و همکاران (۱۳۹۱) نیز شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی و نمورو در دوکاربری زراعت و مرتع در اراضی جنوب مشهد را مقایسه کرده مشاهده کردند تغییرات شاخص کیفیت تجمعی در کاربری‌های مورد مطالعه تقریبا نزدیک به هم بود اما شاخص کیفیت نمورو در کاربری زراعت مقدار کمتری نسبت به مرتع

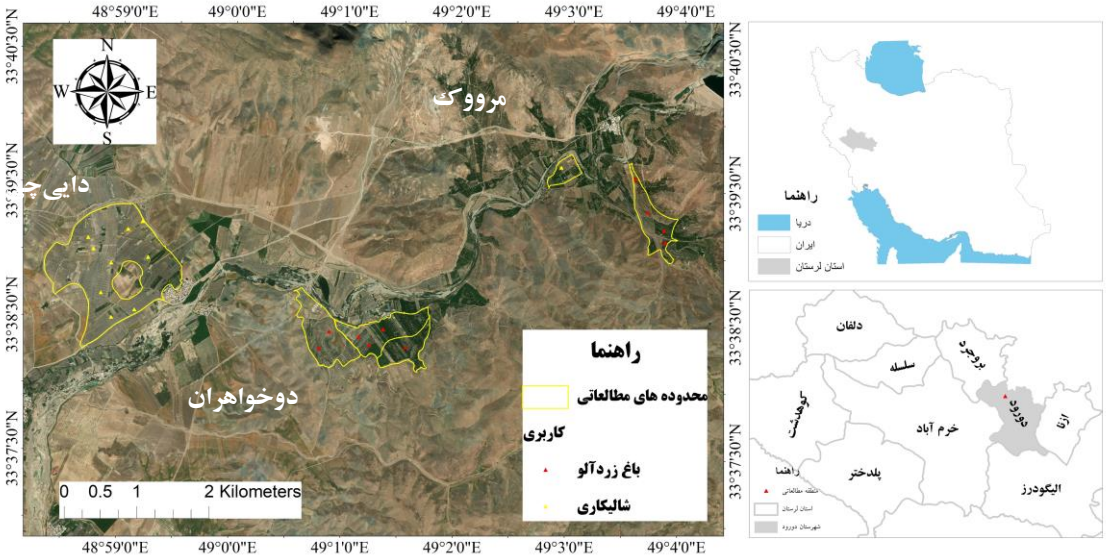
داشت. ایشان گزارش کردند وضعیت پایداری خاک مهمترین فاکتور در تغییر کیفیت خاک در این کاربری ها بوده است.

در محاسبات شاخص‌های کیفیت خاک، ویژگی‌های مورد مطالعه وزن دهی و با استفاده از توابع مختلف و با تعیین حدود آستانه بین صفر تا یک امتیازبندی می‌شوند. تعیین حدود آستانه بدون درنظر گرفتن نوع کاربری از منابع مختلف استخراج می‌شود و برای هر ویژگی مقدار ثابتی در نظر گرفته می‌گردد. بنابراین کیفیت خاک بصورت کلی بررسی شده و نوع کاربری خاک در آن تاثیری ندارد. با توجه به اینکه نیاز هر کاربری با دیگری متفاوت است و حدود آستانه متفاوتی برای ویژگی‌های خاک برای هر کاربری وجود دارد انتظار می رود مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک در هر کاربری نسبت به زمانی‌که شاخص‌ها مجموعا و بدون در نظر گرفتن نوع کاربری محاسبه می‌گردند متفاوت باشد. از این رو پژوهش حاضر با هدف مقایسه شاخص‌های کیفیت تجمعی و نمورو در دو کاربری باغ زردآلو و برنج با حدود آستانه مختص هر کاربری و تابع امتیاز دهی فازی و بدون حدود آستانه و تابع امتیاز دهی سیگموئیدی فازی انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه شامل اراضی زیر سد مرووک در امتداد رودخانه تیره، ۳۷ کیلومتری شمال غرب شهر دورود در استان لرستان و در محدوده ″۱۲ ′۵۸ °۴۸ تا ″۳۰ ′۰۴ °۴۸ طول شرقی و ″۰۶ ′۳۸ °۳۳ تا ″۴۱ ′۴۰ °۳۳ عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). بر اساس آمار بلندمدت ایستگاه سینوپتیک دورود (۱۳۹۰-۱۴۰۰) میانگین بارندگی و دمای سالانه در این منطقه به ترتیب ۶۵۲/۷ میلی متر و ۱۶/۳ درجه سانتی‌گراد است. ارتفاع از سطح دریا در منطقه مطالعاتی بین ۱۵۲۸ تا ۱۷۷۹ متغیر است.

در مجموع تعداد ۱۰ باغ و ۱۰ زمین برنجکاری (مجموعا ۲۰ نقطه) از سه روستای مرووک، دوخواهران و دای‌چی انتخاب شدند. نمونه برداری از هر نقطه بصورت مرکب انجام شد. به این صورت که سه نمونه بصورت شعاعی و با فاصله ۱۰ متری از نقطه مرکزی برداشت و با نقطه مرکزی مخلوط گردید. سعی بر آن شد تا نقاط نمونه برداری به گونه‌ای انتخاب شود که ویژگی‌های فیزیکی خاک بیشترین تشابه را نسبت به هم داشته باشند تا تاثیر ویژگی‌های ذاتی خاک به حداقل برسد و تغییرات کیفیت خاک در اراضی باغی و شالیکاری بیشتر وابسته به نوع کاربری خاک باشد، هرچند تنوع بالای خاک، زمین‌شناسی و کاربری در این منطقه باعث شد تا عامل محدود کننده-ای برای برداشت تعداد نمونه‌های بیشتر باشد.



شکل ۱-موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی در ایران و استان لرستان و پراکنش مکانی نقاط مطالعاتی در سه منطقه از روستاهای مرووک، دوخواهران و دایی‌چی

از هر نقطه یک نمونه خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری سطحی تهیه شد. در مجموع شانزده ویژگی شامل درصد حجمی سنگریزه، جرم مخصوص ظاهری (با روش سیلندر)، بافت و اجزاء آن به روش هیدرومتر (جی و باودر، ۱۹۸۶)، هدایت الکتریکی در عصاره اشباع، اسیدیته در گل اشباع، مواد خنثی شونده خاک به روش تیتراسیون برگشتی (ریچاردز، ۱۹۵۴)، کربن آلی به روش سوزاندن تر (والکی و بلک، ۱۹۳۴)، فسفر قابل جذب (اولسن و سامر، ۱۹۸۲)، پتاسیم قابل جذب به روش استات آمونیوم با فلیم فتومتر، آهن، منگنز، مس و روی قابل جذب با روش EDTA و قرائت با دستگاه جذب اتمی در سه تکرار اندازه‌گیری شد. درصد شیب برای هر نقطه با توجه به بازدید میدانی و با کمک گوگل ارث محاسبه گردید.

محاسبه شاخص کیفیت خاک

شاخص کیفیت خاک طی چند مرحله به شرح زیر محاسبه شد.

وزن‌دهی به ویژگی‌ها

وزن دهی به ویژگی‌ها با روش تجزیه مولفه‌های اصلی انجام شد. در این روش وزن هر متغیر برابر با درصد واریانس در هر مولفه می‌باشد. مقدار وزن برای متغیرهای غیر همبسته کامل و برای متغیرهایی که همبستگی دارند نصف می‌شود و مجموع وزن‌ها به عدد یک استاندارد می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۱۳).

تعیین حدود آستانه و نمره‌دهی به ویژگی‌ها

از آنجا که واحد ویژگی‌های گزینش شده با یکدیگر تفاوت دارند، نمره دهی متغیرها از طریق تبدیل مقادیر هر یک از ویژگی های برگزیده شده به مقادیر بدون واحد انجام می‌شود تا بتوان آنها را با یکدیگر جمع کرد. برای انجام این کار از توابع نمره دهی برای تبدیل ویژگی‌های خاک به مقادیر صفر تا یک استفاده می‌شود (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۱). در این پژوهش از دو تابع امتیاز دهی استفاده شد:

توابع فازی

برازش توابع فازی برای ویژگی‌های خاک نیاز به تعیین حدود آستانه برای آنها دارد. توابع فازی در سه گروه هرچه بیشتر بهتر، هرچه کمتر بهتر و حدود بهینه تعریف می‌شوند و برای هر تابع حدود آستانه بالایی و پایینی تعریف می‌گردد. هر ویژگی بسته به وضعیت آن در خاک در یکی از این گروه طبقه‌بندی شدند (جدول ۲). حدود آستانه برای درصد سنگریزه، شیب، بافت خاک، شوری، اسیدیته، آهک و کربن آلی خاک بر اساس نوع

کاربری و از جداول نیازهای رویشی زردآلو و برنج (سایس و همکاران، ۱۹۹۳) و حدود آستانه عناصر پرمصرف و کم‌مصرف از جداول گزارش شده توسط ملکوتی و همکاران (۱۳۷۹) استخراج گردید. پس از آن، نمره دهی برای هر دو مجموعه کل و حداقل داده بر اساس معادلات مربوط انجام شد. مقادیر بهینه برای هر ویژگی با عدد یک، و شرایط زیر حد بحرانی با عدد ۰/۱ تعریف شد. مقدار جرم مخصوص ظاهری در شالیزارها با وجودی که بالای حد آستانه قرار داشت (بالاتر از ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مربع) به دلیل وجود شرایط بهینه برای کشت برنج در محدوده مناسب قرار گرفت و به آن نمره یک تعلق گرفت. گروهبندی و حدود آستانه برای هر ویژگی در جدول ۱ آورده شده است.

توابع سیگموئیدی

توابع سیگموئیدی نیازی به حدود آستانه ندارند. برای این توابع دو گروه بیشتر بهتر و کمتر بهتر برای هر دو مجموعه کل و حداقل داده استفاده شد. گروه بیشتر بهتر شامل آن دسته از ویژگی‌هایی است که افزایش مقادیر آنها باعث بهبود کیفیت خاک؛ و گروه کمتر بهتر شامل ویژگی‌هایی است که کاهش آنها باعث بهبود کیفیت خاک می‌شود. از این رو، درصد رس خاک، کربن آلی، و عناصر تغذیه‌ای شامل فسفر، پتاسیم، آهن، مس، روی و منگنز قابل جذب در گروه بیشتر بهتر و درصد شیب، سنگریزه، آهک، شن و سیلت در گروه کمتر بهتر قرار گرفتند.

در نهایت با استفاده از فرمول زیر امتیاز دهی انجام شد.

$$S = a/(1 + (x/x_0)^b)$$

در این معادله S نمره ویژگی خاک، a بالاترین نمره‌ای که توسط تابع، به ویژگی تعلق می‌گیرد که برابر یک است. x مقدار ویژگی خاک و X_0 میانگین ویژگی مورد مطالعه و b شیب معادله است. این شیب برای تابع " بیشتر بهتر"، برابر ۲/۵- و برای تابع " کمتر بهتر" برابر ۲/۵+ است.

تعیین مجموعه حداقل داده‌ها

برای این بخش نیز از روش تجزیه مولفه‌های اصلی استفاده شد. در این روش مولفه‌هایی که مقادیر ویژه بزرگتر از ۱ داشتند به عنوان مولفه‌های اصلی انتخاب شدند (عسکری و هولدن، ۲۰۱۵). در هر مؤلفه صرف نظر از علامت مثبت یا منفی، متغیری که بیشترین مقدار را داشت یا در محدوده ۱۰ درصد بیشترین وزن موجود در آن مؤلفه بود، به عنوان مجموع حداقل داده‌ها انتخاب شد. در هر مولفه از بین ویژگی‌هایی که با یکدیگر همبستگی داشتند ویژگی که بیشترین بار عاملی را داشت انتخاب و بقیه حذف شد. علامت منفی در هر مولفه به‌دلیل رابطه عکس بین ویژگی مورد نظر با سایر ویژگی‌های درون هر مؤلفه است.

محاسبه شاخص کیفیت خاک

به منظور ارزیابی وضعیت کیفیتی خاک از دو شاخص کیفیت تجمعی (IQI) (دوران و پارکین، ۱۹۹۴) و نمورو (NQI) (کین و ژاو، ۲۰۰۰) استفاده شد. معادلات این دو شاخص در ادامه ارائه می‌شود.

$$IQI = \sum_{i=1}^{n} W_i N_i$$

در این معادله Wi وزن تعلق یافته به هر ویژگی خاک، Ni مقدار نمره تعلق یافته به هر ویژگی و n تعداد ویژگی‌های مورد نظر است.

جدول ۱- معادلات بکاررفته برای ویژگی های انتخاب شده در باغات زردآلو و شالیزارها

ویژگی انتخاب شده	LL	UL	ویژگی انتخاب شده	LL	UL	معادلات
باغ			برنج			
شن (٪)	30	80				$F(x)=\begin{cases}0.1 & x\le L\\ 0.9\times\frac{x-L}{U-L}+0.1 & L\le x\le U\\ 0.1 & x\ge U\end{cases}$
سیلت (٪)	5	70				
رس (٪)	15	40				
فسفر قابل جذب (mgkg-1)	7	15		8	15	
پتاسیم قابل جذب (mgkg-1)	300	750		200	750	
آهن قابل جذب (mgkg-1)	5	32		5	25	
مس قابل جذب (mgkg-1)	2	4		0	2	
روی قابل جذب (mgkg-1)	2	3		1	6	
منگنز قابل جذب (mgkg-1)	10	20		9	30	
کربن آلی (٪)	0.5	1.5		0.8	2.0	$F(x)=\begin{cases}0.1 & x\le L\\ 0.9\times\frac{x-L}{U-L}+0.1 & L\le x\le U\\ 1 & x\ge U\end{cases}$
			سیلت (٪)	20	80	
			رس (٪)	30	60	
			جرم مخصوص ظاهری (gcm-1)	1.2	2.1	
			شن (٪)	10.0	45.0	$F(x)=\begin{cases}1 & x\le L\\ 1-0.9\times\frac{x-L}{U-L} & L\le x\le U\\ 0.1 & x\ge U\end{cases}$
اسیدیته	7.8	8.5		7.5	8.2	
هدایت الکتریکی (dSm^{-1})	2.2	8.5		3.0	6.0	
مواد خنثی شونده (٪)	25.0	55.0		40.0	50.0	
سنگ و سنگریزه سطحی (٪)	45.0	70.0		0.0	3.0	
شیب (٪)	4.0	15.0		0.0	1.0	
جرم مخصوص ظاهری (gcm^{-3})	1.2	2.10				

$$NQI = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{min}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n}$$

در این معادله Pave میانگین نمره تعلق یافته به ویژگی‌های انتخاب شده در هر نمونه خاک، Pmin حداقل نمره موجود در بین ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه و n تعداد ویژگی‌های مورد نظر برای محاسبه شاخص است. در نهایت وضعیت کیفیت خاک در منطقه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۲).

جدول ۲-درجه‌بندی کلاس‌های شاخص کیفیت خاک (IQI و NQI) در مجموعه کل و حداقل داده (باریکلو و همکاران، ۱۴۰۲)

	I (بسیار خوب)	II (خوب)	III (متوسط)	IV (پایین)	V (بسیار پایین)
IQI_{TDS}	≥0.66	0.57-0.66	0.48-0.57	0.39-0.48	≤0.39
IQI_{MDS}	≥0.78	0.68-0.78	0.58-0.68	0.48-0.58	≤0.48
NQI_{TDS}	≥0.45	0.39-0.45	0.33-0.39	0.27-0.33	≤0.27
NQI_{MDS}	≥0.47	0.41-0.47	0.35-0.41	0.29-0.35	≤0.29

آنالیزهای آماری

آنالیزهای آماری در این پژوهش در محیط نرم‌افزار SPSS (16.0) انجام شد. این موارد شامل آزمون همبستگی خطی پیرسون برای تمام نمونه‌های خاک برای بررسی همبستگی خطی بین ویژگی‌های خاک، مقایسه میانگین شاخص‌های کیفیت خاک بین دو کاربری با آزمون حداقل تفاوت معنی‌داری فیشر[1] و مقایسه میانگین دو مجموعه کل و حداقل داده با آزمون تی (در سطح احتمال یک درصد) بودند.

بحث و نتایج

آمار توصیفی ویژگی‌های خاک

خلاصه آمار توصیفی ویژگی‌های خاک در دوکاربری باغ‌های زردآلو و برنجکاری در جدول ۳ آمده است. مطابق جدول، مقادیر رس در باغات ۱۸-۳۶ و در شالیزارها ۵۶-۳۲ درصد، مقادیر شن از ۱۳ تا ۵۱ در باغات و از ۲ تا ۳۵ درصد در شالیزارها متغیر بود. ضریب تغییرات رس و شن در باغات به ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۴۵ و در شالیزارها به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۸۲ بود. جرم مخصوص ظاهری در باغ-ها ۱/۳۵-۱/۳ و در شالیزارها ۱/۸-۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مربع بود. درصد آهک از ۳/۸ تا ۲۷/۴ در باغ‌ها و از ۶/۸ تا ۲۳ در شالیزارها تغییر می‌کرد و ضریب تغییرات آن به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۳۷ برای باغات و شالیزارها بود. درصد سنگ و سنگریزه در شالیزارها صفر و در باغات از ۲ تا ۴۰ و درصد شیب در شالیزارها کمتر از یک و در باغات از کمتراز یک تا ۱۲ متغیر بود. گوپال (۲۰۱۵) بیان کرده است ضریب تغییرات بالا در ویژگی‌های خاک ناشی از تنوع در فرایندهای خاک‌سازی، نوع کاربری و کوددهی است. براین اساس به طور کلی ویژگی‌های ذاتی خاک در باغ‌های زردآلو نسبت به شالیزارها تنوع بیشتری دارد. در اراضی باغی شیب و توپوگرافی با تاثیر بررطوبت خاک، فرایند غالب بر تغییرات ویژگی‌های خاک است، بخصوص زمانی‌که خاک پوشش گیاهی نداشته باشد، درصورتی‌که تغییرات مکانی در شالیزارها باشیب هموار تحت تاثیر شیب، رطوبت یا دوره رشد گیاه نیست (ژو و لین، ۲۰۱۱).

مقادیر شوری در خاک‌های مورد مطالعه بسیار پایین و در باغ‌ها بین ۰/۳۱ تا ۰/۸۱ و در شالیزارها ۰/۳۷ تا ۰/۷۲ دسی‌زیمنس بر متر بود. مقادیر کربن آلی در باغات بین ۱/۱۳ و ۲/۲۲ و در شالیزارها ۰/۵۲ و ۰/۹۹ متغیر بود. این مقادیر نشان می‌داد باغات از نظر ذخایر کربن آلی وضعیت مناسب‌تری نسبت به شالیزارها دارد که می‌تواند به مدیریت اراضی مانند مصرف کودهای آلی و حفظ بقایای گیاهی بر سطح خاک در باغات و خارج کردن یا سوزاندن کاه و کلش پس از فصل برداشت در شالیزارها مرتبط باشد .

[1] Fisher's least significant difference test (LSD)

جدول ۳- آماره‌های توصیفی داده‌های خصوصیات خاک در باغات زردآلو و مزارع برنج و کل نمونه‌های خاک

آماره	هدایت الکتریکی (dSm-1)	اسیدیته	آهک (٪)	کربن آلی (٪)	عناصر قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)						شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	سنگریزه سطحی (٪)	شیب (٪)	جرم مخصوص ظاهری ($gr.cm^{-3}$)
					فسفر	پتاسیم	آهن	منگنز	روی	مس						
باغ																
دامنه	0.50	0.56	27.4	1.52	7.00	300	7.94	12.26	1.74	1.72	51	31	36	38	11	0.05
کمینه	0.31	7.43	3.8	0.7	7.00	280.00	4.14	4.88	0.32	0.24	13	16	18	2	1	1.30
بیشینه	0.81	7.99	31.2	2.22	14.00	580.00	12.08	17.14	2.06	1.96	64	47	54	40	12	1.35
میانگین	0.51	7.6	11.36	1.13	9.13	428.40	7.46	10.37	1.11	1.00	34.3	30.7	35	25.2	6.4	1.33
انحراف معیار	0.19	0.17	8.6	0.50	2.30	96.22	3.65	3.54	0.62	0.5	15.27	10.1	10.96	13.76	4.03	0.02
واریانس	0.04	0.03	74	0.25	5.31	9257.82	7.00	12.54	0.38	0.25	233.12	102.01	120.22	189.29	16.27	0.00
ضریب تغییرات (٪)	37.25	2.24	75.70	44.25	25.19	22.46	48.93	34.14	55.86	50.00	44.52	32.90	31.31	54.60	62.97	1.50
برنج																
دامنه	0.35	0.34	23	0.47	3.9	250	28.5	6.3	4.61	3.84	35	14	24	-	-	0.12
کمینه	0.37	7.45	6.8	0.52	4.5	110	23.89	8.52	1.28	1.68	2	31	32	-	-	1.72
بیشینه	0.72	7.79	29.8	0.99	8.4	360	52.39	14.82	5.89	5.52	37	45	56	-	-	1.80
میانگین	0.57	7.65	19.82	0.81	5.85	238.9	39.65	10.93	4.2	3.67	12.3	39.3	48.4	-	-	1.77
انحراف معیار	0.12	0.1	7.3	0.16	1.34	85.2	7.83	2.18	1.27	1.11	10.04	4.16	7.11	-	-	0.04
واریانس	0.01	0.01	53.23	0.03	1.79	7259	61.26	4.75	1.62	1.22	100.9	17.34	50.49	-	-	0.00
ضریب تغییرات (٪)	21.05	1.31	36.83	19.75	22.91	35.66	19.75	19.95	30.24	30.25	81.63	10.59	14.69	-	-	2.26

جدول ۴-آزمون همبستگی بین ویژگی های خاک

		هدایت الکتریکی (dSm-1)	اسیدیته	آهک (٪)	کربن آلی (٪)	عناصر قابل جذب (mgKg-1) فسفر	پتاسیم	آهن	منگنز	روی	مس	شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	سنگریزه سطحی (٪)	شیب (٪)	جرم مخصوص ظاهری (grcm^{-3})
هدایت الکتریکی (dSm-1)		1															
اسیدیته		.557*	1														
آهک (٪)		.347	.303	1													
کربن آلی (٪)		-.157	-.258	-.285	1												
عناصر قابل جذب (mg/kg)	فسفر	-.353	-.528*	-.481*	.565**	1											
	پتاسیم	-.270	-.247	-.396	.751**	.707**	1										
	آهن	.216	.209	.474*	-.860**	-.595**	-.662**	1									
	منگنز	.222	.165	.260	-.017	.169	.257	.203	1								
	روی	.181	.038	.438	-.611**	-.542*	-.540*	.780**	.172	1							
	مس	.317	.243	.530*	-.721**	-.490*	-.460*	.918**	.347	.670**	1						
شن (٪)		-.270	-.151	-.417	.445*	.221	.137	-.679**	-.474*	-.539*	-.754**	1					
سیلت (٪)		.241	.052	.341	-.353	-.108	-.203	.518*	.453*	.446*	.537*	-.792**	1				
رس (٪)		.218	.186	.360	-.392	-.247	-.048	.614**	.359	.462*	.712**	-.883**	.413	1			
سنگریزه سطحی (٪)		.125	.103	-.530*	.690**	.543*	.658**	-.768**	-.039	-.748**	-.680**	.375	-.367	-.278	1		
شیب (٪)		-.145	-.267	-.646**	.600**	.676**	.451*	-.740**	-.347	-.708**	-.697**	.419	-.321	-.378	.717**	1	
جرم مخصوص ظاهری (grcm^{-3})		.166	.197	.492*	-.846**	-.679**	-.708**	.934**	.080	.812**	.829**	-.694**	.516*	.638**	-.796**	-.719**	1

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

(تریبرتی و همکاران، ۲۰۰۸). مدیریت کربن آلی خاک بر عناصر تغذیه‌ای و به تبع آن کیفیت خاک نیز تاثیر دارد که می‌توان آن را با همبستگی بین کربن آلی خاک و عناصر تغذیه‌ای در خاک‌های مورد مطالعه تایید کرد (جدول ۴).

مطابق نتایج مقادیر عناصر فسفر و پتاسیم در باغ‌ها در محدوده مناسب (به ترتیب ۱۴-۷ و ۵۸۰-۲۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در شالیزارها در محدوده کمبود (به ترتیب ۸/۴-۴/۵ و ۳۶۰-۱۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) قرار داشت. آهن قابل جذب در باغات در محدوده مناسب (۱۲/۰۸-۴/۱۴ میلی گرم بر کیلوگرم) و در شالیزارها تقریبا تمام خاک‌ها مطابق جدول ۱ بالاتر از حد بالایی آستانه (ملکوتی و همکاران، ۱۳۷۹) قرار داشت (۵۲/۳۹-۲۳/۸۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم). در هر دوکاربری مقادیر مس و روی قابل جذب زیر حد بحرانی بود و منگنز قابل جذب از حد کمبود تا مناسب متغیر بود. مقادیر روی و مس قابل جذب در باغات به ترتیب در محدوده ۲/۰۶-۰/۳۲ و ۱/۹۶-۰/۲۴ و در شالیزارها به ترتیب ۵/۸۹- ۱/۲۸ و ۵/۵۲-۱/۳۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار داشت. مقادیر منگنز قابل جذب نیز به ترتیب ۱۷/۱۴-۴/۸۸ برای باغات و ۱۴/۸۲-۸/۵۲ میلی گرم بر کیلوگرم برای شالیزارها بود. بیش‌بود آهن، کمبود روی و مس در شالیزارها در اثر غرقاب شدن خاک، ایجاد شرایط احیاء و افزایش قابلیت دسترسی آنها و انحلال به افق‌های پایین‌تر اتفاق می‌افتد (فلاح نصرت آباد، ۱۳۹۹). همچنین تحقیقات نشان داده است کشت متراکم و عدم تعادل در استفاده از کودهای آلی، تثبیت توسط خاک و محدودیت منابع ذاتی در دراز مدت باعث کاهش قدرت بازیابی فسفر و پتاسیم در شالیزارها می‌گردد (غفاری نژاد و همکاران، ۱۳۹۶؛ جلالی و متین، ۲۰۱۳؛ گلستانی‌فرد و همکاران، ۲۰۲۰).

وزن دهی با روش تجزیه عامل ها

مقادیر سهم هر ویژگی[2] حاصل از تجزیه عاملی در مجموعه کل و حداقل داده در جدول ۵ آمده است.

[2] Communality

جدول ۵- درصد واریانس و وزن هر ویژگی در روش مجموعه کل داده‌ها و مجموعه حداقل داده‌ها

متغیر	کل ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک		حداقل ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک	
	درصد واریانس	وزن	درصد واریانس	وزن
هدایت الکتریکی (dSm^{-1})	0.784	0.029		
اسیدیته	0.833	0.031	0.686	0.249
آهک (٪)	0.656	0.027		
کربن آلی (٪)	0.768	0.032		
فسفر قابل جذب ($mgKg^{-1}$)	0.662	0.031		
پتاسیم قابل جذب ($mgKg^{-1}$)	0.835	0.028	0.721	0.231
آهن قابل جذب ($mgKg^{-1}$)	0.942	0.036	0.722	0.297
منگنز قابل جذب ($mgKg^{-1}$)	0.735	0.027	0.681	0.224
روی قابل جذب ($mgKg^{-1}$)	0.84	0.030		
مس قابل جذب ($mgKg^{-1}$)	0.929	0.034		
شن (٪)	0.774	0.036		
سیلت (٪)	0.604	0.021		
رس (٪)	0.69	0.032		
سنگریزه سطحی (٪)	-0.762	0.036		
شیب (٪)	-0.818	0.032		
جرم مخصوص ظاهری ($grcm^{-3}$)	0.937	0.037		

سهم هر ویژگی درصد واریانس آن است که نشان دهنده میزان تاثیر آن ویژگی در کنترل کیفیت خاک است (کمالی و همکاران، ۱۴۰۰). وزن هر ویژگی نیز سهم هر ویژگی است که به عدد یک استاندارد شده است. وزن ویژگی‌هایی که با یکدیگر همبستگی دارد در مجموعه کل داده به دو تقسیم می‌گردد. نتایج نشان داد در هر دو مجموعه کل و حداقل داده ها بیشترین سهم مربوط به آهن قابل جذب بود. در مجموعه کل داده ها، پس از آهن قابل جذب بیشترین سهم‌ها به ترتیب مربوط به مس قابل جذب و جرم مخصوص ظاهری و کمترین سهم‌ها مربوط به درصد سیلت خاک بود. از میان ۱۶ ویژگی، چهار ویژگی اسیدیته، پتاسیم، آهن و منگنز قابل جذب به عنوان مجموعه حداقل داده انتخاب شد که از میان آن‌ها بیشترین سهم مربوط به آهن قابل جذب و کمترین مربوط به منگنز قابل جذب بود.

نمره دهی با روش تجزیه به مولفه های اصلی

نتایج حاصل از روش تجزیه مولفه‌های اصلی در جدول ۶ آمده است. این روش برای وزن دهی به ویژگی‌ها و انتخاب مجموعه حداقل داده به عنوان مناسب‌ترین معیار برای انتخاب متغیرهای تاثیرگذار بر کیفیت خاک و طبقه-بندی شاخص‌های کیفیت خاک گزارش شده است (زنگی آبادی و همکاران، ۱۴۰۰). هرچند مقدار بیشتر متغیرها نماینده جامع‌تری از کیفیت خاک است، اما تکرار متغیرها زمانی‌که بین آن‌ها همبستگی وجود داشته باشد، مشکلاتی ایجاد می‌کند. همچنین آنالیزهای آزمایشگاهی به‌دلیل ویژگی‌های زیاد خاک، طاقت‌فرسا می‌شود (لیو و همکاران، ۲۰۱۴). از این رو انتخاب مجموعه حداقل داده‌ها گزینه مطلوبی برای محققان به شمار می‌رود. با این وجود باید خاطر نشان کرد حذف برخی ویژگی‌ها به معنی از دست دادن اطلاعات کیفیت خاک از طریق متغیرهای حذف شده است و بنابراین محدودیتی که در مجموعه حداقل داده ها وجود دارد را نمی‌توان نادیده گرفت (رحمانی‌پور و همکاران، ۲۰۱۴).

جدول ۳-نتایج تجزیه مولفه های اصلی در منطقه مطالعاتی

مقادیر ویژه	7.24	2.90	1.82
درصد	0.452	0.181	0.114
درصد تجمعی	0.452	0.633	0.747
مولفه‌های اصلی / متغیرها	PC1	PC2	PC3
هدایت الکتریکی (dSm^{-1})	0.33	-0.027	0.784
اسیدیته	0.297	0.115	0.833
آهک (٪)	0.656	-0.038	0.246
کربن آلی (٪)	-0.209	-0.768	0.155
فسفر قابل جذب ($mgkg^{-1}$)	-0.662	-0.524	-0.296
پتاسیم قابل جذب ($mgkg^{-1}$)	-0.042	-0.835	-0.203
آهن قابل جذب ($mgkg^{-1}$)	0.942	0.148	-0.138
منگنز قابل جذب ($mgkg^{-1}$)	0.319	-0.735	0.168
روی قابل جذب ($mgkg^{-1}$)	0.840	0.104	-0.192
مس قابل جذب ($mgkg^{-1}$)	0.929	-0.059	-0.057
شن (٪)	-0.774	0.508	0.033
سیلت (٪)	0.604	-0.439	-0.02
رس (٪)	0.690	-0.421	-0.033
سنگریزه سطحی (٪)	-0.762	-0.277	0.424
شیب (٪)	-0.818	-0.099	0.014
جرم مخصوص ظاهری ($grcm^{-3}$)	0.937	0.188	-0.164

در مجموع سه مولفه اصلی دارای مقادیر ویژه بیشتر از یک بودند که مجموعا حدود ۷۴/۷ درصد از تغییرات را به خود اختصاص دادند. در مولفه اول به ترتیب آهن قابل جذب، جرم مخصوص ظاهری، مس قابل جذب بیشترین بار عاملی را داشتند. پس از آن روی قابل جذب، شیب، سنگریزه، شن، رس، فسفر، آهک و سیلت قرار داشت. بنابراین می‌توان به این شکل تفسیر نمود که در مولفه اول از گروه عناصر تغذیه‌ای آهن، مس، روی و فسفر قابل جذب و از گروه ویژگی‌های خاک و زمین شن، سیلت، رس، سنگریزه سطحی، شیب، جرم مخصوص ظاهری و آهک از عوامل موثر بر کیفیت خاک بوده و حدودا ۴۵ درصد تغییرات آن را کنترل می‌کنند. در مولفه دوم پتاسیم قابل جذب، کربن آلی و منگنز قابل جذب بیشترین بار عاملی را داشتند که می‌توان آن را گروه ویژگی‌های آلی و تغذیه‌ای خاک نامید که حدود ۱۸ درصد از رفتار خاک متاثر از این عوامل است. در مولفه سوم شوری و اسیدیته نیز حدود ۱۱ درصد تغییرات خاک را توضیح می‌دهند. بنابراین از میان ویژگی‌های شیمیایی که متاثر از مدیریت خاک است عناصر تغذیه‌ای نقش کلیدی‌تری در کنترل کیفیت خاک در منطقه مطالعاتی داشته‌اند.

برای تعیین مجموعه حداقل داده‌ها، ابتدا متغیرها با بیشترین بار عاملی مشخص شدند و سپس از بین متغیرهایی که دارای همبستگی بودند آن‌که دارای بار عاملی بیشتری بود انتخاب شد. مطابق این الگو، از مولفه اول آهن قابل جذب، از مولفه دوم پتاسیم و منگنز قابل جذب و از مولفه سوم اسیدیته انتخاب شد. بنابراین در منطقه مطالعاتی آهن، پتاسیم و منگنز قابل جذب از عناصر پرمصرف و ریزمغذی ها و اسیدیته نقش موثر در کنترل کیفیت خاک در دوکاربری زردآلو و برنج داشته اند. اهمیت این ویژگی‌ها به عنوان فاکتورهای تاثیر گذار بر کیفیت خاک در مطالعات مختلف گزارش شده است. به عنوان مثال شکوری و همکاران (۱۳۹۹) از میان ۱۶ ویژگی خاک، درصد نیتروژن کل، فسفر قابل استفاده، درصد رس، رطوبت اشباع و انرژی انتگرالی را به عنوان مجموعه حداقل داده در شالیزارهای بخش مرکزی

استان گیلان معرفی نمودند. در تحقیقی دیگر شش ویژگی شامل کربن آلی، اسیدیته، تعداد نماتد، پتاسیم، فسفر و روی قابل جذب از میان ۱۵ ویژگی خاک توسط یغمائیان و همکاران (۱۳۹۹) به عنوان مجموعه حداقل داده در چایکاری‌های غرب استان گیلان گزارش شد. اسمعیلی زاد و همکاران (۱۴۰۲) با بررسی وضعیت کیفیت خاک در اراضی زیرحوضه هنام در استان لرستان نیز از میان ۲۲ ویژگی خاک، ۱۵ ویژگی را به عنوان مجموعه حداقل داده معرفی کردند که عناصر قابل جذب مس، روی، اهن و منگنز، شوری، درصد آهک و درصد رس خاک در آن مشاهده می‌شد. زاهدی فر (۲۰۲۳) نیز درصد شن، کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری، فسفر و روی قابل جذب و درصد رطوبت حجمی و وزنی خاک را از عوامل مهم در کنترل کیفیت خاک در سه کاربری کشاورزی، جنگل و مرتع عنوان کرد.

مقایسه شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی و نمورو

نتایج مقایسه میانگین بین دو شاخص کیفیت خاک تجمعی و نمورو و در دو کاربری باغ‌ها و برنجکاری در جدول ۷ آمده است. در هر کاربری دو شاخص کیفیت تجمعی و نمورو با دو روش نمره دهی فازی و سیگموئیدی نشان داده شده است.

جدول ۴-میانگین مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک در دو تابع نمره‌دهی همراه با مقایسه میانگین هر کاربری

	شاخص کیفیت خاک تجمعی				شاخص کیفیت خاک نمورو			
	تابع فازی[1]		تابع سیگموئیدی[2]		تابع فازی[1]		تابع سیگموئیدی[2]	
کاربری	TDS	MDS	TDS	MDS	TDS	MDS	TDS	MDS
باغ	0.76	0.68	0.73	0.64	0.37	0.30	0.28	0.28
برنج	0.72	0.62	0.95	0.86	0.36	0.29	0.38	0.37
مقایسه میانگین توابع در دو کاربری با آزمون حداقل تفاوت معنی‌داری فیشر								
Sig.	0.462	0.132	0.246	0.003	0.411	0.114	0.000	0.000
مقایسه میانگین دو مجموعه حداقل و کل با آزمون تی								
Sig. (T-Test)	0.000		0.000		0.000		0.000	

۱توابع فازی با حدود آستانه مخصوص هر کاربری

۲ توابع سیگموئیدی بدون حدود آستانه

در هر کاربری دو شاخص کیفیت تجمعی و نمورو با دو روش نمره دهی فازی و سیگموئیدی نشان داده شده است. مطابق جدول مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی بالاتر از ۰/۶ و مقادیر شاخص‌های کیفیت نمورو کمتر از ۰/۴ بدست آمد. چنانچه این داده‌ها را با گروهبندی ارائه شده توسط باریکلو وهمکاران (۱۴۰۲) مقایسه نماییم (جدول ۱)، خاک‌های باغ‌ها و شالیزارها در منطقه مطالعاتی مطابق مقادیر شاخص کیفیت تجمعی در گروه بسیار خوب و بر اساس مقادیر شاخص کیفیت نمورو در گروه متوسط ارزیابی می‌گردد. از مشاهدات صحرایی و وضعیت ویژگی-های فیزیکی و تغذیه‌ای خاک می‌توان استنباط کرد که مقادیر شاخص‌های کیفیت تجمعی ارزیابی واقع‌بینانه‌تری نسبت به شاخص‌های نمورو داشته باشند. محققان نیز بیان کرده‌اند شاخص کیفیت تجمعی قابلیت بالاتری برای ارزیابی کیفیت خاک نسبت به شاخص کیفیت نمورو دارد و مقادیر آن به واقعیت نزدیک‌تر است (واسو و همکاران، ۲۰۱۶؛ کاراسا و همکاران، ۲۰۲۱)، زیرا شاخص کیفیت تجمعی علاوه بر امتیاز دهی به ویژگی‌های خاک برای هر کدام وزن-هایی در نظر می‌گیرد در حالیکه شاخص کیفیت نمورو بر اساس مقادیر میانگین و کمترین امتیاز به ویژگی‌ها محاسبه می‌گردد و ارزیابی کم برآوردی از کیفیت خاک ارائه می‌دهد (رستمی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۸). قابلیت و حساسیت شاخص کیفیت تجمعی در ارزیابی شاخص کیفیت خاک در مطالعات

چاودهاری و همکاران (۲۰۲۴) و رومادون و همکاران (۲۰۲۴) نیز گزارش شده است.

متخصصان و بهره‌برداران بسیار کمک کننده است. از سوی دیگر محققانی مانند کمالی و همکاران (۱۴۰۰) و آلابز و همکاران (۲۰۲۱) بیان کرده اند مجموعه حداقل داده در شاخص‌های کیفیت خاک نتایج قابل قبولی برای ارزیابی کیفیت خاک ارائه می‌دهند.

مقایسه شاخص‌های کیفیت خاک در دو مجموعه کل و حداقل داده

مقادیر میانگین شاخص‌های کیفیت خاک در دومجموعه کل و حداقل و نتایج آزمون تی برای تشخیص تفاوت معنی‌داری بین دو مجموعه در جدول ۷ آمده است. مطابق نتایج، مقادیر شاخص کیفیت خاک تجمعی با مجموعه کل داده در هر دو کاربری بین ۰/۹- ۰/۷ و برای مجموعه حداقل داده ۰/۸- ۰/۶ بدست آمد. مقادیر شاخص کیفیت نمورو نیز برای مجموعه کل داده ۰/۳۸-۰/۲۸ و برای مجموعه حداقل داده ۰/۳۷-۰/۲۸ بدست آمد. نتایج آزمون-تی نیز نشان داد شاخص‌های کیفیت خاک و مجموعه کل تفاوت معنی داری در سطح یک درصد با شاخص‌های کیفیت و مجموعه حداقل داشتند، با این وجود حذف برخی ویژگی‌های خاک برای تعیین مجموعه حداقل داده تغییری در ارزیابی و تفسیر وضعیت کیفیت خاک بوجود نیاورد. این بدان معناست که شاخص‌های کیفیت تجمعی با مجموعه حداقل با استفاده از ویژگی‌های کمتر ارزیابی مشابه مجموعه کل داده‌ها ارائه داد و بنابراین می‌توان از ویژگی‌های انتخاب شده به جای کل ویژگی‌های خاک استفاده کرد.

نظرات متفاوتی از قابلیت ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک با مجموعه کل و حداقل داده ارائه شده است. دوران و پارکین (۱۹۹۷) معتقد بودند شاخص کیفیت خاک تجمعی با مجموعه کل داده، دقت و حساسیت بیشتری برای ارزیابی کیفیت خاک دارد و شاخص‌های بدست آمده از مجموعه حداقل داده به معنای حذف قسمتی از اطلاعات است که چهارچوبی را برای ارزیابی کیفیت خاک ارائه نمی‌دهد، هرچند تعیین مجموعه حداقل داده برای شناسایی و اندازه-گیری ویژگی‌های مهم در اکوسیستم خاک، درک مدیریت کشاورزی بر عملکرد و کیفیت خاک برای مدیران،

مقایسه شاخص‌های کیفیت خاک در دو روش امتیازدهی فازی و سیگموئیدی

میانگین شاخص‌های کیفیت خاک در دو روش امتیازدهی فازی و سیگموئیدی در جدول ۷ آمده است. نتایج نشان داد مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک که با دوتابع متفاوت فازی و سیگموئیدی محاسبه شده بودند روندهای متفاوتی را از وضعیت کیفیت خاک در کاربری ها نشان دادند. بطور کلی مطابق مقادیر شاخص‌های کیفیت تجمعی و نمورو که با استفاده از توابع امتیاز دهی فازی محاسبه شده بودند، برای هر دو مجموعه کل و حداقل داده، در باغ بیشتر از شالیزار بود، درحالی‌که شاخص‌هایی که با استفاده از توابع امتیازدهی سیگموئیدی محاسبه شده‌بودند در هر دو مجموعه کل و حداقل داده در شالیزار بیشتر از باغ بود. میانگین شاخص کیفیت خاک تجمعی با روش فازی در دو مجموعه کل و حداقل در باغ‌ها به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۶۸ و در شالیزارها به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۶۲ بود. میانگین شاخص کیفیت نمورو با روش فازی در دو مجموعه کل و حداقل در باغ‌ها به ترتیب ۰/۳۷ و ۰/۳ و در شالیزارها ۰/۳۶ و ۰/۲۹ بود. در مقابل میانگین شاخص کیفیت خاک تجمعی با روش سیگموئیدی در دو مجموعه کل و حداقل داده در باغ‌ها به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۶۴ و در شالیزارها به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۸۶ بود. همچنین مقادیر شاخص کیفیت نمورو با روش سیگموئیدی برای هر دو مجموعه کل و حداقل در باغ‌ها ۰/۲۸ و در شالیزارها به ترتیب ۰/۳۸ و ۰/۳۷ بدست آمد. بر

اساس نتایج آزمون مقایسه میانگین (جدول ۷) تنها در توابع سیگموئیدی و بین مقادیر شاخص کیفیت تجمعی در مجموعه حداقل داده و مقادیر شاخص کیفیت نمورو، در هر دو مجموعه داده در دو کاربری تفاوت معنی‌دار وجود داشت و در بقیه موارد تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد.

همانگونه که پیشتر به آن اشاره شد آهن، پتاسیم و منگنز قابل استفاده و اسیدیته بیشترین سهم را در کنترل کیفیت خاک در منطقه مطالعاتی بر عهده داشتند که به عنوان مجموعه حداقل نیز انتخاب شدند. بنابراین امتیازدهی مثبت به وضعیت مناسب این ویژگی‌ها در توابع فازی در باغات منجر به بیشتر شدن مقادیر شاخص کیفیت خاک نسبت به شالیزارها شد. از سوی دیگر اثر منفی آلایندگی آهن قابل جذب در شالیزارها در توابع سیگموئیدی نادیده گرفته شد و باعث شد مقادیر شاخص کیفیت خاک در این کاربری مشابه یا کمی از باغات بیشتر باشد. از این نتایج اینگونه استنباط می‌شود که توابع سیگموئیدی تاثیرات کاربری بر ویژگی‌های خاک را به خوبی انعکاس نداده است و تعیین حدود آستانه می‌تواند نقش مهمی بر ارزیابی و تفسیر کیفیت خاک داشته باشد.

بطور کلی تعیین حدود آستانه به منظور تعیین ارتباط یا عدم ارتباط بین دو گروه داده ضروری است، هر چند انتخاب روش مناسب برای تعیین حدود آستانه به دلیل تاثیر آن بر نتایج یکی از چالش‌های موجود در ارزیابی کیفیت خاک است (کوتو و همکاران، ۲۰۱۷). حدود آستانه-ای که در معادلات غیر خطی استفاده می‌شوند، بر اساس مطالعات و تحقیقات انجام شده پیشین و نظر متخصصان (کای و همکاران، ۲۰۱۹) تعیین می‌شود یا متناسب با شرایط مورد مطالعه از منابع مختلف استخراج می‌گردد (تقی‌پور، ۱۴۰۲)؛ و از این رو معمولا مفاهیم معنادارتری را برای شاخص‌های کیفیت خاک ارائه می‌دهد. با این وجود توابع سیگموئیدی که نیاز به تعیین حدود آستانه ندارند محبوبیت بیشتری دارند زیرا این حدود برای همه ویژگی‌های خاک و برای تمام خاک‌ها به درستی تعیین نشده و باید از منابع استخراج گردد (رئیسی، ۲۰۱۷). به همین دلیل در بیشتر مطالعات به جای تعیین حدود آستانه تمرکز بر تعیین ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک است (کای و همکاران، ۲۰۱۹)، زیرا شاخص‌هایی که با هزینه اندک قابل محاسبه بوده و نتایج آن به راحتی با استفاده از آستانه‌های از پیش تعریف شده قابل تفسیر باشد بیشتر مورد توجه هستند (چروبین، ۲۰۱۵).

در نهایت باید به این نکته نیز اشاره کرد هر چند به نظر می‌رسد ارائه دادن یک شاخص کلی کیفیت خاک مطلوب محققان است اما این شاخص‌ها چندان مفهومی ندارند زیرا کیفیت خاک در نهایت در ارتباط با مجموعه‌ای از عملکردهای خاص خاک ارزیابی می‌شود. به همین دلیل در بیشتر تحقیقات معیارها بر اساس تجربه، عملکرد محصول یا موقعیت های کیفیت خاک منطقه‌ای تعریف می-شوند (ارشد و مارتین، ۲۰۰۲). از این رو پیشنهاد شده است بجای ارائه یک شاخص کیفیت کلی، استفاده از یک روش نمایش گرافیکی از نحوه عملکردهای مختلف خاک در شرایط متفاوت در برقراری ارتباط با بهره‌برداران، کاربران وعموم مردم میتواند موثرتر باشد. همچنین می‌توان بسته به مجموعه مواردی که کیفیت خاک را تهدید می‌کند یا خدماتی‌که خاک در اکوسیستم ارائه می‌دهد مجموعه‌های متفاوتی از کیفیت خاک با وزن‌های مختلف را ارائه داد (بونمان و همکاران، ۲۰۰۸). در پایان باید خاطر نشان کرد لزوم انجام مطالعات در خصوص تعیین حدود آستانه استاندارد با مجموعه داده‌های بزرگتر برای ویژگی‌هایی از خاک که حدود آستانه برای آن‌ها وجود ندارد در مناطق مختلف ایران توسط متخصصان و محققان را نمی‌توان نادیده گرفت.

نتیجه گیری کلی

در تحقیق حاضر وضعیت کیفیت خاک در دو کاربری باغ و شالیزار در برخی خاک‌های اراضی زیر سد

مرووک با استفاده از دو شاخص کیفیت خاک تجمعی و نمورو و دو تابع امتیازدهی فازی و سیگموئیدی مورد ارزیابی قرار گرفت. داده‌های آماری نشان داد ویژگی‌های شیمیایی خاک‌ها در هر دو کاربری تغییرپذیری کمتری نسبت به ویژگی‌های فیزیکی داشتند که از آن می‌توان استنباط کرد علارغم تنوع خاک‌ها در منطقه، مدیریت اراضی مشابه و نزدیک به هم بوده است. به همین دلیل از میان ۱۵ ویژگی، آهن قابل جذب، پتاسیم قابل جذب، منگنز قابل جذب و اسیدیته که بیشتر تحت تاثیر مدیریت قرار می‌گیرند بیشترین سهم را در کنترل وضعیت کیفیت خاک بر عهده داشتند و توسط مدل تجزیه عامل‌های اصلی به عنوان مجموعه حداقل داده انتخاب شدند. استفاده از مجموعه حداقل داده نه تنها باعث کاهش مقادیر شاخص کیفیت خاک نشد بلکه ارزیابی مشابهی در مقایسه با شاخص‌های محاسبه شده با مجموعه کل بدست آمد.

بر اساس نتایج، مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی بسیاربالاتر از شاخص‌های کیفیت خاک نمورو بدست آمد. شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی اراضی مورد مطالعه را در گروه بسیار خوب و شاخص کیفیت خاک نمورو خاک‌ها را در گروه متوسط ارزیابی کرد. این تفاوت به دلیل کم‌برآورد کردن شاخص‌های کیفیت نمورو از ارزیابی کیفیت خاک بود. بنابراین می‌توان شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی را قابل اعتبارتر در نظر گرفت. نتایج همچنین نشان داد عدم تعیین حدود آستانه در توابع سیگموئیدی شرایط آلایندگی آهن در شالیزارها را منعکس نکرده و وضعیت کیفیت خاک در شالیزارها را کمی بهتر از باغات نشان داد. بنابراین تعیین یا عدم تعیین حدود آستانه برای توابع امتیازدهی می‌تواند ارزیابی از کیفیت خاک را تغییر دهد و تفسیر متفاوتی از کیفیت خاک ارائه دهد. شاخص‌های کیفیت خاک برای تعیین اثرات مدیریت خاک بر روند تغییرات کیفیت خاک است و تفسیر نامناسب می‌تواند ارائه راهکارمناسب برای مدیریت پایدار خاک را با چالش مواجه کند. ازاین رو انجام مطالعاتی در خصوص تعیین حدود آستانه استاندارد برای ویژگی‌هایی از خاک که حدود آستانه برای آن‌ها وجود ندارد در مناطق مختلف ایران و با مجموعه داده بزرگ‌تر توسط متخصصان و محققان لازم و ضروری است.

تشکر و قدردانی

این تحقیق از محل اعتبار قرار داد (۱۳۰۶۰۱۲۰۰۴) (تجهیز و نوسازی اراضی زیر مخزنی و سدهای انحرافی مستقل و شالیزارها: در اجرای تکالیف قانون حفاظت از خاک بر اساس مطالعات خاک سنجی و تهیه نقشه های مدیریتی خاک (۳۰۵/۶/۱۰۷) انجام شده است. بدین‌وسیله از معاونت آب و خاک وزارت جهاد کشاورزی که اعتبار این پژوهش را فراهم کردند و همکاران محترم در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی لرستان که زحمت انجام آزمایش‌های خاک را برعهده داشتند صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم.

فهرست منابع

۱. اسمعیلی زاد، اشرف، شکری، رسول، دوات گر، ناصر، و کاری دولت اباد، حسین، ۱۴۰۲. ارزیابی نقش ویژگی‌های زیستی در کیفیت خاک زیر حوضه هنام استان لرستان. *زیست شناسی خاک*، ۱۱(۲)، صص ۱۱۵-۱۳۷. https://doi.org/10.22092/sbj.2023.362579.253

۲. باریکلو، علی، علمداری، پریسا، رضاپور، سالار، تقی زاده مهرجردی، روح الله، ۱۴۰۲. ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک در تیپ‌های مختلف خاک دشت ارومیه. *پژوهش های فرسایش محیطی*، ۳ (۳)، صص ۱۷۳-۱۹۳.

۳. تقی پور، مژده، یغمائیان مهابادی، نفیسه، و شعبانپور، محمود، ۱۴۰۲. ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از تحلیل‌های‌چند متغیره درکاربری‌های مختلف اراضی (مطالعه موردی: توتکابن استان گیلان). مهندسی زراعی، ۴۶(۳)، صص ۲۵۱-۲۷۱. https://doi.org/10.22055/agen.2023.44957.1684

۴. خسروتهرانی، خ. ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران (رشته زمین‌شناسی). انتشارات دانشگاه پیام نور. ۳۴۴ ص.

۵. رستمی نیا، محمود، نوری، نسیم، کشاورزی، علی، و حمانی، اصغر، ۱۳۹۸. ارزیابی کمّی و پهنه‌بندی پراکنش مکانی شاخص کیفیت خاک در بخشی از اراضی خشک و نیمه‌خشک غرب ایران (مطالعه موردی: منطقه کَنِ سرخ، استان ایلام). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰(۷)، صص ۱۷۰۱-۱۷۱۹. 10.22059/ijswr.2019.274080.668097

۶. زنگی آبادی، مهدی، گرجی اناری، منوچهر، و کشاورز، پیمان، ۱۴۰۰. تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک‌های با بافت متوسط و سبک در استان خراسان رضوی. *آب و خاک*، ۳۵(۱)، صص ۱۰۷-۱۱۹. https://doi.org/10.22067/jsw.2020.15000.0

۷. شاهپوری، فاطمه، حسن زاده، نسرین، سلگی، عیسی، و ضرابی، محبوبه، ۱۴۰۲. ارزیابی شاخص کیفیت خاک (SQI) در کاربری‌های مختلف شهرستان ملایر با استفاده از روش مجموعه حداقل داده (MDS). *نشریه محیط زیست طبیعی*، ۷۶(۴)، صص ۵۷۹-۵۹۲. https://doi.org/10.22059/jne.2022.334297.2339

۸. شکوری کتیگری، مریم، شعبانپور، محمود، دواتگر، ناصر، و وظیفه دوست، مجید، ۲۰۲۱. ارزیابی کیفیت خاک در خاک‌های شالیزاری با عملکردهای متفاوت (مطالعه موردی: کوچصفهان استان گیلان). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۱(۱۲)، صص ۳۱۶۱-۳۱۷۶. https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.305420.668660

۹. شهاب آرخازلو، حسین، امامی، حجت، و حق نیا، غلامحسین، ۱۳۹۱. ارزیابی رابطه مدل های تعیین کیفیت خاک و شاخص های پایداری آن در زمین های کشاورزی و مرتعی جنوب مشهد. *پژوهش های خاک (علوم خاک و آب)*، ۲۶(۳ الف)، صص ۲۲۷-۲۳۴. https://sid.ir/paper/158905/fa

۱۰. غفاری نژاد، سید علی، ۱۳۹۶. آزمایش‌های بلند مدت، ضرورتی برای ارزیابی روش‌های مدیریت حاصلخیزی خاک. *مدیریت اراضی*، ۵(۲)، صص۹۹-۱۱۲. https://doi.org/10.22092/lmj.2018.115853

۱۱. فلاح نصرت آباد، علی. ۱۳۹۹. مروری بر مزایای مصرف سنگ فسفات در اراضی شالیزاری. *مجله ترویجی شالیزار*، ۲(۱)، صص ۲۳-۳۲.

۱۲. کمالی، کوروش، زهتابیان، غلامرضا، مصباح زاده، طیبه، عرب خدری، محمود، شهاب آرخازلو، حسین، و مقدم نیا، علیرضا، ۱۴۰۰. تعیین مؤثرترین ویژگی‌ها به منظور ارزیابی کیفیت خاک در اراضی کشاورزی دشت محمدشهر کرج. آب و خاک، ۳۵(۲)، صص ۲۵۱-۲۶۶. https://doi.org/10.22067/jsw.2021.15005.0

۱۳. ملکوتی، محمدجعفر و غیبی، محمدنبی، ۱۳۷۹. تعیین حد بحرانی عناصر غذایی موثر در خاک، گیاه و میوه (درراستای افزایش عملکرد کمی و کیفی محصولات استراتژیک کشور). نشر آموزش کشاورزی. ۹۲ ص.

۱۴. یغمائیان مهابادی، نفیسه، فیاض، حورا، صبوری، عاطفه، و شیرین فکر، احمد، ۱۳۹۹. مقایسه روش‌های ارزیابی کیفیت خاک و ارتباط آن با عملکرد در اراضی چایکاری غرب استان گیلان. پژوهش های خاک، ۳۴(۴)، صص ۴۳۵-۴۵۰. https://doi.org/10.22092/ijsr.2021.351656.551

15. Alaboz, P., Dengiz, O. and Demir, S., 2021. Barley yield estimation performed by ANN integrated with the soil quality index modified by biogas waste application. Zemdirbyste-Agriculture, 108(3), pp. 217-226. DOI: 10.13080/z-a.2021.108.028
16. Arshad, M. A. and Martin, S., 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. Agriculture, ecosystems and environment, 88(2), pp. 153-160. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00252-3
17. Askari, M.S. and Holden N.M., 2014. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. Geoderma 230, pp. 131-142. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.019
18. Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., De Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W. and Mäder, P., 2018. Soil quality–A critical review. Soil biology and biochemistry, 120, pp. 105-125. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030
19. Chaudhry, H., Vasava, H. B., Chen, S., Saurette, D., Beri, A., Gillespie, A. and Biswas, A., 2024. Evaluating the Soil Quality Index Using Three Methods to Assess Soil Fertility. Sensors, 24(3), 864.
20. Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Cerri, C. E., Franco, A. L., Tormena, C. A., Davies, C. A. and Cerri, C. C., 2016. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. PloS one, 11(3), e0150860. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860
21. Couto, C. M. V., Comin, C. H. and da Fontoura Costa, L., 2017. Effects of threshold on the topology of gene co-expression networks. Molecular BioSystems, 13(10), pp. 2024-2035. https://doi.org/10.1039/ C7MB00101K
22. Derakhshan-Babaei, F., Nosrati, K., Mirghaed, F. A. and Egli, M., 2021. The interrelation between landform, land-use, erosion and soil quality in the Kan catchment of the Tehran province, central Iran. Catena, 204, 105412. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105412
23. Doran, J. W. and Parkin, T. B., 1994. Defining and assessing soil quality. Defining soil quality for a sustainable environment, 35, pp. 1-21.
24. Doran, J. W. and Parkin, T. B., 1997. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. Methods for assessing soil quality, 49, pp. 25-37.

25. Gee, G. and Bauder, J., 1986. Particle size analysis. In A. Klute, (Ed.), Methods of soil analysis. Part1: hysical and Mineralogical Methods. Agronomy Monograph No. 9 (2nd ed., pp. 383–411). American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Madison.
26. Golestanifard, A., Santner, J., Aryan, A., Kaul, H. P. and Wenzel, W. W., 2020. Potassium fixation in northern Iranian paddy soils. Geoderma, 375, 114475. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114475
27. Gopal, B., Shetty, A. and Chaya, D., 2015. Spatial variability of topsoil chemical properties. Indian Journal of Agricultural Research, 49 (2), pp. 134-141. 10.5958/0976-058X.2015.00019.0
28. Jalali, M. and Matin, N. H., 2013. Soil phosphorus forms and their variations in selected paddy soils of Iran. Environmental Monitoring and Assessment, 185, pp. 8557-8565. https://doi.org/10.1007/s10661-013-3195-2
29. Karaca, S., Dengiz, O., Turan, İ. D., Özkan, B., Dedeoğlu, M., Gülser, F., Sargin, B., Demirkaya, S. and Ay, A., 2021. An assessment of pasture soils quality based on multi-indicator weighting approaches in semi-arid ecosystem. Ecological Indicators, 121, 107001. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107001
30. Li, Q., Xu, M., Liu, G., Zhao, Y. and Tuo D., 2013. Cumulative effects of a 17-year chemical fertilization on the soil quality of cropping system in the Loess Hilly Region China. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 176, pp. 249-259. 10.1002/jpln.201100395
31. Liu, Z., Zhou, W., Shen, J., Li, S. and Ai C., 2014. Soil quality assessment of yellow clayey paddy soils with different productivity. Biology and Fertility of Soils 50, pp. 537-548. https://doi.org/10.1007/s00374-013-0864-9
32. Nortcliff, S., 2002. Standardisation of soil quality attributes. Agriculture, ecosystems and environment, 88(2), pp. 161-168. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00253-5
33. Olsen, S. and Sommers, L. 1982. Phosphorus. In A.L. Page (Ed.), Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties. Agronomy Monograph No. 9 (2nd ed. p. 403–430). American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Madison.
34. Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W. and Gu, Zh., 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province China. Geoderma 149, pp. 325-334. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015
35. Qin, M.Z. and Zhao, J., 2000. Strategies for sustainable use and characteristics of soil quality changes in urban-rural marginal area: a case study of Kaifeng. Acta Geographica Sinica-Chinese 55, pp. 545–554 (In Chinese with English abstract). https://doi.org/10.11821/xb200005004
36. Rahmanipour, F., Marzaioli, R., Bahrami, H.A., Fereidouni, Z. and Bandarabadi, S.R., 2014. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province Iran. Ecological Indicators 40, pp. 19-26. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.12.003
37. 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, pp. 307-320 .http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.049
38. Richards, L., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Handbook, 60. US Department of Agriculture.

39. Romadhon, M. R., Mujiyo, M., Cahyono, O., Dewi, W. S., Hardian, T., Anggita, A., Hasanah, K., Irmawati, V. and Istiqomah, N. M., 2024. Assessing the Effect of Rice Management System on Soil and Rice Quality Index in Girimarto, Wonogiri, Indonesia. Journal of Ecological Engineering, 25(2), pp. 126-139. https://doi.org/10.12911/22998993/176772
40. Sys, C. Van Ranst, E. Debaveye, J. and Beernaert, F., 1993. Land evaluation part III crop requirements. Agricultural Publications n° 7, G.A.D.C. Brussels. Belgium. 191p.
41. Triberti, L., Nastri, A., Giordani, G., Comellini, F., Baldoni, G. and Toderi, G., 2008. Can mineral and organic fertilization help sequestrate carbon dioxide in cropland? European Journal of Agronomy, 29(1), pp.13-20. https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.009
42. Vasu, D., Singh, S. K., Ray, S. K., Duraisami, V. P., Tiwary, P., Chandran, P., Nimkar, A. M. and Anantwar, S. G., 2016. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. Geoderma, 282, 70-79. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.010
43. Walkey, A. and Black, I., 1934. An examination of the method for determining soil organic matter and a proposed chromic acid titration method. Soil Science, 37, 29–38.
44. Zahedifar, M., 2023. Assessing alteration of soil quality, degradation, and resistance indices under different land uses through network and factor analysis. Catena, 222, 106807 . https://doi.org/10.1016/j.catena.2022. 106807
45. Zhang C. Liu G. Xue S. and Song Z., 2011. Rhizosphere soil microbial activity under different vegetation types on the Loess Plateau China. Geoderma 161, 115-125. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.003
46. Zhu, Q. and Lin, H., 2011. Influences of soil, terrain, and crop growth on soil moisture variation from transect to farm scales. Geoderma, 163(1-2), 45-54. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.03.015.