



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources



Soil Science Society of Iran

(OPEN ACCESS)

Investigation of soil quality indices in agricultural and non-agricultural lands west of Urmia Plain

Zahra Dibaei¹, Hamid Reza Matinfar^{*2}, Mohammad Sadegh Askari³,
Aziz Majidi⁴, Shahrokh Fatehi⁵

1. Ph.D. Student of Soil Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran. E-mail: zdibaei@yahoo.com
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran. E-mail: matinfar.h@lu.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: askari@znu.ac.ir
4. Research Associate Prof., Soil and Water Research Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, West Azarbaijan, Urmia, Iran. E-mail: ma.majidi@areeo.ac.ir
5. Research Assistant Prof., Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran. E-mail: shahrokh.fatehi@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Identifying land uses and their effects on some soil functions, including biological production, water purification, and air purification, is today's environmental challenge. Soil quality index is a tool for expressing the ability of soil to provide biological services and water and air purification, and finally soil management and land use system. Various physical, chemical, and biological soil properties are known as indices affecting soil quality. These indices are used to calculate soil quality. These properties, which are sensitive to management and various environmental and topographic factors, are used to calculate the soil quality index using the proposed methods. The aim of this study is to investigate two different methods for calculating the soil quality index, the weighted quality index and the Nemro quality index, in the lands of the Urmia Plain.
Article history: Received: 06.15.2024 Revised: 12.30.2024 Accepted: 01.01.2025	
Keywords: Arid and Semi Arid, Minimum data set, Nemro, PCA	Materials and Methods: A number of 100 study points were selected using the conditional Latin supercube method and sampling was performed from the plowing depth. 14 properties affecting soil quality were measured using standard methods. Among the 14 characteristics, 10 soil characteristics were selected by reviewing previous research and using the principal component analysis method that had the most weight and influence on the final index of the minimum data set of each soil sample. Then, these characteristics were placed in weight coefficient relationships depending on whether they were "less-better", "more-better" or "optimal-better". Finally, the resulting number was placed in the formula for cumulative soil quality indices (SQIw and NQI), which are calculated by combining the characteristics affecting soil quality, and a soil quality map was prepared in the GIS environment.
	Results: The results showed that pasture, cropland and garden land uses have higher soil quality index values than barren (saline soils) and residential land uses, and salinity is an important factor in soil quality degradation. On the other hand, human intervention, destruction and

construction also severely reduce soil quality. Among the approaches studied, the SQIw index led to a proper assessment of the effects of land management practices on soil quality compared to the NQI index. In general, this study showed that the weighted soil quality index provides a proper estimate of soil quality compared to other methods and can be used for arid and semi-arid regions to assess soil quality.

Conclusion: In the current study, the characteristics affecting the final soil quality index include soil salinity, zinc, manganese, nitrogen, respiration, soil organic carbon and soil activated lime. These characteristics determined the fate of the soil quality degree by affecting the final soil quality index. The western and southwestern parts of the study area have the lowest soil quality index, which is due to the drying of Lake Urmia due to climate change. In the Nemro method, more than 24% of the soils are in the very poor quality class, 46% of the soils are in the poor quality class, 10% of the soils are in the medium quality class, 10% are in the good quality class, and the remaining 10% are in the very good quality class. The result of the soil quality class classification by the cumulative method showed that 47% of the soils are in the very good quality class, 21% are in the good quality class, 12% are in the medium quality class, 10% are in the poor quality class, and the remaining 10% are in the very poor quality class. The lands with poor and very poor classes are distributed in the southeast and southwest, which are areas with higher salinity. Therefore, due to the limitations of salinity for most crops and plants, the level of soil quality for performing its inherent functions is reduced. The results of the study of the two soil weight indices and the Nemeru soil quality index show that generally the Nemeru index is more stringent in the final selection of soil quality class and the soil weight index is more consistent with the current situation. Current construction and salinity in this part of the study area have led to a decrease in the soil quality index and have created critical conditions for the soil.

Cite this article: Dibaei, Zahra, Matinfar, Hamid Reza, Askari, Mohammad Sadegh, Majidi, Aziz, Fatehi, Shahrokh. 2025. Investigation of soil quality indices in agricultural and non-agricultural lands west of Urmia Plain. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 15 (1), 123-143.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2025.22449.2151

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



انجمن علوم خاک ایران

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار

شاپا چاپی: ۱۳۶۷-۲۳۲۲

شاپا آنالین: ۱۳۷۵-۲۳۲۲



دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گیلان

بررسی شاخص‌های کیفیت خاک در اراضی زراعی و غیرزراعی بخش غربی دریاچه ارومیه

زهرا دیبایی^۱، حمیدرضا متین‌فر^{۲*}، محمدصادق عسکری^۳، عزیز مجیدی^۴، شاهرخ فاتحی^۵

۱. دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران. رایانامه: zdibaei@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران. رایانامه: matinfar.h@lu.ac.ir

۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: askari@znu.ac.ir

۴. دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران. رایانامه: a.majidi@areeo.ac.ir

۵. استادیار پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: shahrokh.fatehi@gmail.com

چکیده	اطلاعات مقاله
نوع مقاله: سابقه و هدف: شناسایی کاربری‌های اراضی و تأثیر آن‌ها بر برخی از عملکردهای خاک شامل تولیدات زیستی، تصفیه آب و تصفیه هوا چالش امروز محیط‌زیست است. شاخص کیفیت خاک ابزاری برای بیان توان خاک در ارائه خدمات زیستی و تصفیه آب‌وهوا و بالاخره مدیریت خاک و سیستم کاربری اراضی است. ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک به‌عنوان نمایه‌های مؤثر بر کیفیت خاک شناخته می‌شوند. این نمایه‌ها برای محاسبه کیفیت خاک استفاده می‌شوند. این ویژگی‌ها که به مدیریت و عوامل مختلف محیطی و توپوگرافی حساس هستند، با استفاده از روش‌های پیشنهادی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک استفاده می‌شوند. هدف از این مطالعه بررسی دو روش مختلف محاسبه شاخص کیفیت خاک شاخص کیفیت وزنی و شاخص کیفیت نمره در اراضی دشت ارومیه است.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲
مواد و روش‌ها: تعداد ۱۰۰ نقطه مطالعاتی به روش ابرمکعب لاتین مشروط انتخاب و نمونه‌برداری از عمق شخم انجام شد. ۱۴ ویژگی مؤثر بر کیفیت خاک با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. از بین ۱۴ ویژگی، ۱۰ ویژگی خاک با بررسی پژوهش‌های گذشته و با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی دارای وزن و تأثیر بیشتری بر روی شاخص نهایی حداقل مجموعه داده هر نمونه خاک داشتند انتخاب شدند و سپس این ویژگی‌ها بسته به "کم‌تر-بهرتر"، "بیش‌تر-بهرتر" و یا "بهینه-بهرتر" بودن در روابط ضرایب وزنی جاگذاری شده و در نهایت عدد حاصله در فرمول شاخص‌های تجمعی کیفیت خاک (SQI_w و NQI) که با تلفیق	واژه‌های کلیدی: تحلیل مؤلفه‌های اصلی، حداقل داده، خشک و نیمه‌خشک، شاخص نمره

ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک محاسبه می‌شود جایگذاری شده و نقشه کیفیت خاک در محیط آرک مپ ترسیم گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد کاربری‌های مرتعی، زراعی و باغی دارای مقادیر شاخص کیفیت خاک بالاتری نسبت به کاربری‌های بایر (خاک‌های شور) و مسکونی هستند و شوری، عامل مهمی در تنزل کیفیت خاک است. از طرفی دخالت انسان، تخریب و ساخت‌وساز نیز به شدت کیفیت خاک را کاهش می‌دهد. در بین رویکردهای مورد مطالعه، شاخص SQIw در مقایسه با شاخص NQI منجر به ارزیابی مناسب اثرات شیوه‌های مدیریت زمین بر کیفیت خاک شد. به‌طورکلی این مطالعه نشان داد که شاخص کیفیت وزنی خاک برآورد مناسبی از کیفیت خاک را در مقایسه با روش‌های دیگر ارائه می‌دهد و می‌تواند برای مناطق خشک و نیمه‌خشک برای ارزیابی کیفیت خاک‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری: در مطالعه کنونی ویژگی‌های تأثیرگذار بر شاخص نهایی کیفیت خاک شامل شوری خاک، روی، منگنز، نیتروژن، تنفس، کربن آلی خاک و آهک فعال خاک است. این ویژگی‌ها با اثر بر روی شاخص نهایی کیفیت خاک سرنوشت درجه کیفیت خاک را تعیین نمودند. بخش غربی و جنوب‌غربی منطقه مورد مطالعه دارای کم‌ترین شاخص کیفیت خاک می‌باشند که از دلایل این امر می‌توان به خشکی دریاچه ارومیه به دلیل تغییرات اقلیمی اشاره کرد. در روش نمره، بیش از ۲۴ درصد خاک‌ها در کلاس کیفیت خیلی ضعیف، ۴۶ درصد خاک‌ها در کلاس کیفیت ضعیف، ۱۰ درصد خاک‌ها در کلاس کیفیت متوسط، ۱۰ درصد در کلاس کیفیت خوب و ۱۰ درصد باقی‌مانده در کلاس کیفیت خیلی خوب قرار دارند. نتیجه طبقه‌بندی کلاس کیفیت خاک‌ها به روش تجمعی نشان داد که ۴۷ درصد خاک‌ها در کلاس کیفیت خیلی خوب، ۲۱ درصد در کلاس کیفیت خوب، ۱۲ درصد در کلاس کیفیت متوسط، ۱۰ درصد در کلاس کیفیت ضعیف و ۱۰ درصد باقی‌مانده در کلاس کیفیت خیلی ضعیف قرار دارند. اراضی با کلاس ضعیف و خیلی ضعیف در جنوب شرق و جنوب غرب توزیع شده‌اند که این نواحی دارای شوری بیش‌تری می‌باشند. بنابراین، به علت محدودیت‌های شوری برای اغلب محصولات و گیاهان، میزان کیفیت خاک برای انجام وظایف ذاتی آن کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از بررسی دو شاخص وزنی خاک و شاخص نمره کیفیت خاک، نشان می‌دهد داد که عموماً شاخص نمره در انتخاب نهایی کلاس کیفیت خاک، سخت‌گیرانه‌تر عمل نموده و شاخص وزنی کیفیت خاک با وضعیت کنونی بیش‌تر مطابقت دارد. ساخت‌وسازهای کنونی و شوری در این بخش از منطقه مورد مطالعه منجر به کاهش شاخص کیفیت خاک شده و شرایط بحرانی برای خاک به وجود آورده است.

استناد: دیبایی، زهرا، متین‌فر، حمیدرضا، عسکری، محمدصادق، مجیدی، عزیز، فاتحی، شاهرخ (۱۴۰۴). بررسی شاخص‌های کیفیت خاک در اراضی زراعی و غیرزراعی بخش غربی دریاچه ارومیه. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۵ (۱)، ۱۴۳-۱۲۳.

DOI: 10.22069/ejsms.2025.22449.2151



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

خاک بسیاری از خدمات کلیدی اکوسیستم مانند تولید غذا، سازگاری با تغییرات آب‌وهوا، چرخه مواد مغذی، آب و ترسیب کربن را فراهم می‌کند (۱). تعریف رایج کیفیت خاک توانایی خاک در حفظ محیط‌زیست، حفظ بهره‌وری بیولوژیکی، ارتقای سلامت گیاهان و حیوانات درون اکوسیستم است (۲). کیفیت خاک که بر اساس این تعریف تمام فعالیت‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را دربر می‌گیرد، در سالیان اخیر در زمره مهم‌ترین معیارهای ارزیابی منابع خاک قرار گرفته است (۳). باین‌حال، از آن‌جاکه کیفیت خاک به‌طور مستقیم قابل‌اندازه‌گیری نیست، معمولاً از طریق اندازه‌گیری نمایه‌های^۱ مختلف فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، بیان می‌گردد. با توجه به تأثیر مستقیم بر رشد گیاه، این نمایه‌ها از اهمیت به‌سزایی در برآورد کیفیت خاک برخوردار هستند و به‌سرعت تحت تأثیر مدیریت نادرست اراضی قرار می‌گیرند (۴). کیفیت خاک بیش‌تر بر ویژگی‌های پویای خاک متمرکز است که می‌تواند تحت تأثیر مدیریت قرار گیرد و عمده‌تاً این ویژگی‌ها در عمق شخم خاک، مورد بررسی قرار می‌گیرند (۵). برخی از نمایه‌های خاک از جمله عمق خاک، جرم مخصوص ظاهری، پایداری خاکدانه‌ها، کربن آلی خاک، فراهمی عناصر غذایی، پ‌هاش خاک^۲ و قابلیت هدایت الکتریکی^۳، نمایه‌هایی از خاک می‌باشند که تحت تأثیر شرایط مدیریتی متفاوت، دچار تغییرات عمده می‌شوند از این دیدگاه، نمایه‌های گفته‌شده، معرف کیفیت خاک محسوب می‌شوند (۶). در اراضی کشاورزی ارزیابی تأثیر مدیریت بر فعالیت‌های کشاورزی و کشاورز پایدار تنها توسط شاخص‌های کیفیت خاک قابل بررسی است ارزیابی کیفیت خاک به این دلیل که تأثیر زیادی بر پایداری محیط زیست و

خاک دارد می‌تواند در اتخاذ تصمیمات آینده بسیار دارای اهمیت باشد (۷). در گذشته از روش‌های کیفی و بصری برای اندازه‌گیری کیفیت خاک استفاده می‌شد (۸). سپس روش‌های آماری و ریاضی مبتنی بر تجزیه و تحلیل‌های آزمایشگاهی که شامل شاخص‌های کیفیت خاک^۴ بود جایگزین این محاسبات شد (۹). شاخص کیفیت خاک تلفیقی از نمایه‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است که با استفاده از یک رابطه امتیازدهی نمایه‌های خاک سازمان‌دهی می‌شد و در نهایت در یک شاخص واحد تعریف می‌گردید (۲ و ۱۰). روش‌های امتیازدهی خطی و غیرخطی بی‌شماری توسط پژوهش‌گران مختلف گزارش شده است. در برخی از مطالعات (۱۱، ۱۲، ۱۳) از روش‌های امتیازدهی غیرخطی برای بررسی کیفیت خاک استفاده شده است، برخی از نتایج بیانگر برتری روش‌های امتیازدهی غیرخطی بر خطی است (۱۴) که بیانگر رفتار طبیعی غیرخطی ویژگی خاک‌ها است. روش‌های کمی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک شامل سه مرحله است انتخاب نمایه‌ها، امتیازدهی نمایه‌ها و ادغام امتیاز نمایه‌ها در یک شاخص (۹) برای تعیین مناسب‌ترین نمایه‌های مؤثر در کیفیت خاک به‌طورکلی دو روش حداقل تعداد داده‌ها^۵ و مجموعه کل داده‌ها^۶ ارائه شده است. در اغلب مطالعات کیفیت خاک، پژوهش‌گران جهت محاسبه شاخص کیفیت خاک از نمایه‌های مختلفی استفاده نموده‌اند (۱۵)، در روش استفاده از مجموعه کل داده‌ها شاخص کیفیت وابسته به‌تمامی نمایه‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است در این روش انتخاب حداقل ۷۰ درصد از نمایه‌هایی که دارای اختلاف معنی‌داری با نمایه‌های مورد مطالعه باشند مورد نظر است (۱۱). جهت ادغام نمایه‌های بدون بعد معمولاً از روش‌های امتیازدهی متفاوتی استفاده

4- Soil Quality index
5- Minimum Data Set
6- Total Data Set

1- Indicators
2- pH
3- Electrical Conductivity

می‌شود (۱۱، ۱۶ و ۱۷)، شاخص کیفیت خاک تجمعی^۱ (SQI_w) و شاخص کیفیت خاک نمرو^۲ (NQI) در مطالعات مختلف جهت ادغام نمایه‌های بدون بعد استفاده شده است امروزه نبود یک روش قابل قبول جهانی که بتواند شاخص‌های خاک را پیش‌بینی کرده و در گستره جغرافیایی وسیعی مورد استفاده قرار گیرد منجر به انجام هرچه بیش‌تر مطالعات کیفیت خاک در مقیاس‌های ملی و منطقه‌ای شده است (۱۱).

شاخص‌های کیفیت خاک برای ارزیابی سلامت کلی و بهره‌وری خاک استفاده می‌شوند و رابطه بین شاخص‌های کیفیت خاک و کاربری اراضی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد (۱۸ و ۱۹). مطالعات متعددی تأثیر کاربری زمین بر شاخص‌های کیفیت خاک را بررسی کرده‌اند که نتایج آن‌ها نشان می‌دهد انواع کاربری‌های مختلف می‌توانند اثرات متفاوتی بر کیفیت خاک داشته باشند (۱۸ و ۱۹). نتایج یک مطالعه در کشور ایتوپی (۲۰۲۱) نشان داد که شاخص کیفیت خاک در کاربری‌ها مختلف در طبقه زیاد و متوسط کیفیت خاک قرار می‌گیرد، نتایج نشان داد مراتع بالاترین شاخص کیفیت خاک و پس‌از آن زمین‌های زیر کشت و زمین‌های آیش قرار دارند (۲۰). مطالعه دیگری نشان داد که زمین‌های زراعی و زمین‌های کشاورزی رها شده دارای شاخص کیفیت خاک^۳ بیش‌تری هستند که نشان می‌دهد کیفیت خاک این دو نوع کاربری بالاتر از حد متوسط است، در حالی که علفزارهای طبیعی، جنگل‌های لیمو و زمین‌های جنگلی صنوبر کم‌تر از حد متوسط هستند (۱۵). به‌طور خلاصه، رابطه بین شاخص‌های کیفیت خاک و کاربری اراضی پیچیده و تحت تأثیر عوامل مختلف است. انواع مختلف کاربری اراضی می‌توانند اثرات متفاوتی بر شاخص‌های کیفیت خاک داشته باشند و

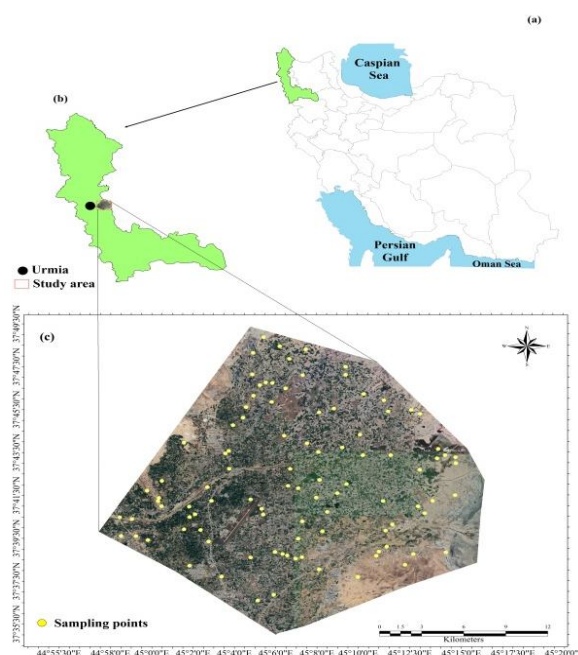
شاخص‌های کیفیت خاک تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک و هم‌چنین شیوه‌های کاربری زمین قرار می‌گیرند. درک رابطه بین شاخص‌های کیفیت خاک و کاربری زمین برای مدیریت پایدار زمین و تولید کشاورزی مهم است. خشکی دریاچه ارومیه و پایین آمدن سطح آب‌های زیرزمینی از یک‌سو و تمرکز اراضی کشاورزی در بخش غرب و جنوب غربی دریاچه ارومیه که دارای نقش کلیدی در تولید فرآورده‌های گیاهی دارد و نبود مطالعات کافی کیفیت خاک در بخش غربی دریاچه ارومیه (پایین‌تر از منطقه انزل) از جمله ضروریات لازم این پژوهش است. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر، طبقه‌بندی کیفیت خاک‌ها در کاربری‌های مختلف، محاسبه شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از توابع امتیازدهی و تعیین شاخص کیفیت خاک در اراضی زراعی، باغی، مرتعی، بایر و شهری بخش غربی دریاچه ارومیه و تهیه نقشه کیفیت خاک و میزان انطباق آن با وضعیت موجود است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه در استان آذربایجان غربی - شهرستان ارومیه و بخش غربی دریاچه ارومیه است (شکل ۱). این منطقه بین عرض جغرافیایی $37^{\circ} 28' 48''$ N - $37^{\circ} 44' 28''$ N و طول جغرافیایی $45^{\circ} 21' 41''$ E - $45^{\circ} 57' 20''$ E قرار دارد. متوسط ارتفاع محل از سطح دریای آزاد ۱۲۸۰ متر است. متوسط دمای سالیانه ۱۱/۵ درجه سلسیوس میانگین بارش ده‌ساله منطقه مورد مطالعه طبق آمار ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک ارومیه ۲۶۵ میلی‌متر است. رژیم حرارتی خاک طبق محاسبه با نرم‌افزار نیوهال^۴ مزیک^۵ و رژیم رطوبتی خاک زیریک^۶ است. کاربری‌های غالب منطقه زراعی، باغی و بایر است (۲۱).

4- Newhall
5- Mesic
6- Xeric

1- Weighted Soil Quality Index
2- Nemro
3- Soil Quality Index



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری.

Figure 1. Location of the sampling sites in the studied area.

لاتین مشروط برای تهیه نقشه‌های رقومی خاک و همچنین در تکنیک‌های یادگیری ماشین مانند طبقه‌بندی و درختان رگرسیون و جنگل‌های تصادفی و نمونه‌برداری خاک در مناطقی که دسترسی به برخی از نقاط بسیار دشوار است کارایی بیشتری دارد (۲۲، ۲۴ و ۲۵). در این پژوهش تعداد ۱۰۰ نمونه خاک از عمق شخم انتخاب شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و جهت اندازه‌گیری نمایه‌های فیزیکی و شیمیایی هوا خشک شدند.

آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی: ویژگی‌های فیزیکی شامل بافت خاک به روش هیدرومتر (۲۶)، وزن مخصوص ظاهری به روش کلوخه و پارافین (۲۷)، پایداری خاکدانه‌ها به روش الک تر در سری الک‌های ۲، ۱، ۰/۷۵، ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی‌متر، به مدت ۵ دقیقه محاسبه و سپس شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها^۳ (۲۸) محاسبه شد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک توسط نرم‌افزار SPAW6.2.74 (۲۹)، و به روش غیرمستقیم اندازه‌گیری شد. نمایه‌های

نمونه‌برداری: برای تعیین محل‌های نمونه‌برداری از روش ابرمکعب لاتین مشروط^۱ و با استفاده از بسته cLHS در نرم‌افزار R انجام شد (۲۲ و ۲۳) و متغیرهای کمکی مدل رقومی ارتفاعی^۲ اطلاعات تصاویر لندست ۸ استفاده شد. روش ابرمکعب لاتین مشروط بسط یافته تر از روش ابرمکعب لاتین بوده و برای نمونه‌برداری در شرایطی که خاک تحت تأثیر متغیرهای کمکی بی‌شماری باشد دارای ارجحیت است. مربع لاتین به معنای توزیع چهار مشاهده است که در داخل یک مربع توزیع شده‌اند. به‌طوری‌که در همه ردیف‌ها و ستون‌ها یک مشاهده وجود داشته باشد. و با تعمیم ابعاد این مکعب به تعداد بیشتر، با ابرمکعب لاتین روبرو خواهیم شد (۲۴). میناسنی و مک‌براتی در سال (۲۰۰۶) برای هر متغیر کمکی یکسری فواصل تعریف کردند، این فواصل به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که تعداد پیکسل‌های تصاویر ماهواره‌ای در حاشیه‌ها یکسان است. روش ابرمکعب

3- Mean weight diameter

1- Conditional Latin hyper cubic

2- DEM

که در آن، SL مقادیر عددی بین صفر تا ۱، X مقدار عددی متغیر مورد اندازه‌گیری، h حداقل مقدار متغیر مورد اندازه‌گیری.

نمایه‌هایی که مقدار بهینه آن‌ها مطلوب است شامل، هدایت الکتریکی و پهایش خاک (۹، ۱۸) می‌باشند. در مطالعه کنونی حد بهینه برای پهایش خاک ۷/۵ است (۱۸، ۴۰ و ۴۱). توابع غیرخطی شامل معادلات سیگموئیدی است (رابطه ۳) که توسط پژوهش‌گران بی‌شماری مورد مطالعه قرار گرفته است (۵، ۱۱ و ۱۲).

و b شیب رابطه است که عموماً برای توابع "بیش‌تر بهتر است" برابر با ۲/۵- برای توابع "کم‌تر بهتر است" برابر با ۲/۵ است (۴۲) امتیاز ۱ به نمایه‌هایی از خاک که در محدوده بهینه قرار دارند تعلق می‌گیرد.

$$S_n = a / (1 + (\frac{x}{x_0})^b) \quad (3)$$

در این رابطه، S_n امتیاز غیرخطی هر یک از نمایه‌های خاک، a بیش‌ترین امتیاز که عموماً برابر با ۱ بوده، X مقدار اندازه‌گیری شده نمایه‌های فیزیکی و شیمیایی برای هر نمونه خاک، x_0 میانگین هر نمایه.

انتخاب مجموعه داده‌های مؤثر بر کیفیت خاک: اکثر مطالعات پیشین بر روی یک یا چند ویژگی خاک متمرکز بودند، اما لازم است چندین نمایه مناسب (شیمیایی، بیولوژیکی و فیزیکی) شناسایی یا ادغام شوند که بتوان آن‌ها را پایش کرد تا اطلاعاتی در مورد مدیریت خاص زمین، خاک و شرایط محیطی ارائه دهد. به این دلایل، بر اساس موارد شناسایی شده در این بررسی، استفاده از مجموعه‌ای با استفاده از تکنیک‌های آماری چندمتغیره مانند تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای انتخاب نمایه مناسب برای کاهش حجم داده‌های خاک توصیه می‌شود (۷). به‌منظور کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در وقت توصیه می‌شود برای

شیمیایی خاک شامل کربن آلی خاک با روش والکلی و بلک^۱ (۳۰)، عناصر میکرو (آهن، منگنز، مس و روی) توسط روش عصاره‌گیری با DTPA (۳۱) و اکشن خاک با روش تهیه گل اشباع و اندازه‌گیری با پهایش‌متر (۳۲)، اندازه‌گیری فسفر با روش استخراج فسفر با بیکربنات سدیم نیم مولار در پهایش برابر ۸/۵ و قرائت توسط دستگاه طیف‌سنج نوری (۳۳)، پتاسیم و سدیم محلول توسط قرائت با روش شعله‌سنجی (۳۴) و کربنات کلسیم فعال توسط روش اکسیداسیون با اسید هیدروکلریک ۳۷ درصد و تیتراسیون با فنل فتالین (۳۵) اندازه‌گیری شد. تنفس میکروبی خاک توسط روش تدخین با انکوباسیون آزمایشگاهی تحت شرایط کنترل‌شده رطوبت ظرفیت مزرعه (۳۶) انجام شد.

وزن‌دهی نمایه‌های خاک: نمایه‌های خاک توسط توابع امتیازدهی خطی و غیرخطی دسته‌بندی می‌شوند، توابع خطی شامل معادلات "بیش‌تر بهتر است" (رابطه ۱)، "کم‌تر بهتر است" (رابطه ۲) و "بهینه- بهتر" است در این مطالعه توابع امتیازدهی کمتر بهتر شامل آن دسته از نمایه‌هایی از خاک است که افزایش آن‌ها تأثیر منفی بر عملکرد اکوسیستم خاک دارد، مانند وزن مخصوص ظاهری کربنات کلسیم فعال خاک و سدیم محلول (۱۱، ۱۶، ۳۷ و ۳۸). توابع امتیازدهی "بیش‌تر بهتر است" شامل آن دسته از نمایه‌هایی از خاک که افزایش آن‌ها در خاک‌های خشک و نیمه‌خشک منجر به بهبود و عملکرد اکوسیستم خاک می‌شوند. برخی از این نمایه‌ها شامل کربن آلی خاک (۳۷ و ۳۸) و پایداری خاکدانه‌ها (۳۷)، آهن، روی، منگنز، مس و پتاسیم محلول است (۳۹).

$$Sl = \frac{x - l}{h - l} \quad (1)$$

$$Sl = 1 - ((x - l) - (h - l)) \quad (2)$$

از نمایه‌ها است در این روش نمایه‌ای که حداقل بوده به متوسط نمایه‌ها افزوده می‌شود (۱۰ و ۱۴).

$$NQI = \frac{\sqrt{P^2_{ave} + P^2_{min}}}{2} \times \frac{n-1}{n} \quad (4)$$

که در آن، Pave امتیاز میانگین تعلق‌یافته به نمایه انتخاب‌شده، Pmin حداقل امتیاز موجود در بین نمایه‌ها، n تعداد نمایه‌های موردنظر.

شاخص کیفیت وزنی

$$SQIw = \sum_{i=1}^n Wi * Ni \quad (5)$$

در این رابطه، Wi ضریب وزنی برای نمایه خاک حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و Ni امتیاز نمایه است.

تجزیه و تحلیل آماری: در ابتدا آزمون نرمال بودن داده‌ها توسط نرم‌افزار spss ۲۵ انجام و نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف موردبررسی قرار گرفت و بعد از انجام آزمون تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به روش حداقل داده، تعداد ۱۰ نمایه خاک توسط شاخص وزندهی^۷ مناسب دارای وزن ویژه گردید. مقدار وزن برای هر نمایه از نسبت ضریب اشتراک هر نمایه به جمع ضریب اشتراک نمایه‌های موجود در روش حداقل تعداد داده‌ها استفاده شد (۳۹ و ۴۳) سپس از ضرب شاخص‌های وزنی بر میزان ضریب اشتراک هر یک از نمونه‌های خاک و جاگذاری این داده‌ها در روابط ۴ و ۵ شاخص کیفیت خاک محاسبه شد. خلاصه‌ای از مراحل انجام کار در شکل ۲ مورد ملاحظه است.

نتایج و بحث

جدول ۱ توصیفات آماری از جمله حداقل، حداکثر و انحراف استاندارد نمایه‌های مورد اندازه‌گیری خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. ابتدا داده‌های

انتخاب مجموعه داده‌های مؤثر بر کیفیت خاک از روش حداقل داده استفاده شود (۷).

روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی^۱ به‌عنوان یک ابزار مناسب جهت کاهش داده در روش حداقل نمایه مؤثر بر کیفیت خاک مورداستفاده قرار می‌گیرد (۱۱ و ۳۹) این روش تعداد نمایه‌ها را به تعداد وکتورهای کم‌تری تقلیل می‌بخشد (۲). در واقع روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی تعداد بی‌شماری از نمایه‌ها را به تعداد نمایه کم‌تر و با تأثیرگذاری بیش‌تری بر شاخص کیفیت خاک، انتخاب می‌کند (۲، ۴۳ و ۴۴). در این مطالعه ابتدا جهت تعیین میزان همبستگی بین متغیرها از تست اسپیرمن-پیرسون استفاده شد، سپس مؤلفه‌هایی که بعد از انجام آزمون تجزیه به مؤلفه‌های اصلی دارای مقادیر ویژه^۲ بیش‌تر از یک بودند و یا حداقل پنج درصد اختلاف با مؤلفه قبلی داشته باشند (۴۵) به‌عنوان فاکتورهایی که دارای وزن بالایی از بین سایر نمایه‌های خاک را به خود اختصاص داده‌اند انتخاب شد (۱۲ و ۴۶). جهت به دست آوردن تقریب متعامد^۳ از چرخش واریمکس^۴ در حین انجام آنالیز تجزیه به مؤلفه‌های اصلی استفاده شد (۴۷) زمانی که تعداد بی‌شماری متغیر در یک مؤلفه وجود دارد دو مورد از آن‌ها به‌عنوان معرف بقیه ضرایب همبستگی مؤلفه‌ها انتخاب می‌شود (۴۵) در این مطالعه از بین ۱۴ نمایه خاک، تعداد ۱۰ نمایه که توسط روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی جداشده و دارای مقدار ویژه^۵ بیش از یک بودند به‌عنوان حداقل مجموعه داده استفاده شدند.

شاخص کیفیت نمو: از این روش برای ادغام نمایه‌هایی که توسط روش‌های خطی و غیرخطی محاسبه گردیدند، استفاده می‌شود (۱۰) این روش توسط نمو گسترش پیدا کرده است، اساس این روش میانگین‌گیری

- 1- Principle compound analysis
- 2- Eign value
- 3- Orthogonal approximation
- 4- Varimax
- 5- Eigen value
- 6- Nemro

7- Communality

حاصل از نمایه‌های فیزیکی- شیمیایی و بیولوژیکی خاک استاندارد شد جدول ۱ نتایج آماری داده‌های مورد مطالعه با روش آزمون کولموگروف- اسمیرنوف را نشان می‌دهد.

جدول ۱- توصیف آماری نمایه‌های خاک در منطقه مورد مطالعه.

Table 1. Statistical description of soil properties in the studied area.

انحراف معیار ^۱	میانگین	حداکثر	حداقل	واحد	نمایه‌های خاک
0.49	7.76	8.84	4.76	-	پ‌هاش خاک pH
8.22	3.1	45.90	0.18	دسی‌زیمنس بر متر (dS/m)	قابلیت هدایت الکتریکی Electrical Conductivity
3.33	3.69	27.18	0	میلی‌گرم بر کیلوگرم (mg/kg)	مس Cu
3.66	8.22	20.25	0	میلی‌گرم بر کیلوگرم (mg/kg)	منگنز Mn
1.81	1.83	16.08	0	میلی‌گرم بر کیلوگرم (mg/kg)	روی Zn
13.02	17.42	78.06	0	میلی‌گرم بر کیلوگرم (mg/kg)	آهن Fe
0.64	1.58	51.3	0	درصد (%)	کربن آلی خاک Soil Organic Carbon
0.21	0.2	0.9	0	میلی‌متر (mm)	میانگین حسابی قطر خاکدانه‌ها Mean weight diameter
23.48	16.67	211.90	0	میلی‌گرم بر کیلوگرم (mg/kg)	پتاسیم K
79.13	78.743	559.23	0	میلی‌گرم بر کیلوگرم (mg/kg)	سدیم Na
9.57	43.22	98.82	21.13	درصد (%)	درصد آهک فعال Total Neutralizing Value (tnv)
2.67	1.98	9.04	0	میلی‌متر بر ثانیه (mm/s)	هدایت هیدرولیکی اشباع Saturated Hydraulic conductivity
0.06	0.24	0.35	0	میلی‌گرم بر کیلوگرم در روز (mg/kgday ⁻¹)	تنفس Respiration
1.49	0.44	14.14	0.08	میلی‌گرم بر کیلوگرم (mg/kg)	نیتروژن کل Total Nitrogen

تا حداکثر ۲۱۱/۹۰ میلی‌گرم در کیلوگرم است. مقدار عنصر روی از صفر تا حداکثر ۱۶/۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، آهن خاک از صفر تا ۱۸/۰۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، درصد آهک فعال از ۲۱/۱۳ تا حداکثر ۹۸/۸۲ درصد، کربن آلی خاک از صفر تا

نمایه‌های سدیم، پتاسیم و سپس آهن و قابلیت هدایت الکتریکی به ترتیب دارای بیش‌ترین انحراف معیار می‌باشند که نشان‌دهنده دامنه تغییرات زیاد این نمایه‌ها در خاک‌های مورد مطالعه است. مطابق با مقادیر جدول ۱ میزان پتاسیم محلول در خاک از صفر

1- Standard Deviation

۳/۵۱ درصد و دامنه تغییرات نیتروژن خاک از ۰/۰۸ تا ۱۴/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است. جدول ۲ میزان همبستگی بین نمایه‌های مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.

انتخاب نمایه‌ها^۱: ابتدا با اجرای محاسبه مؤلفه‌های اصلی از نمایه‌های اندازه‌گیری شده خاک تعداد شش مؤلفه که دارای مقدار ویژه^۲ بیش از یک و دارای درجه اهمیت بیشتری بودند انتخاب و به عنوان حداقل تعداد داده معرفی شدند. (جدول ۳). بردار ویژه^۳ بعد از انجام چرخش واریمکس نشان داد که در مؤلفه اول نمایه قابلیت هدایت الکتریکی خاک که ۲۰ درصد از کل واریانس داده‌ها را به خود اختصاص داده و سپس با رعایت شرط اختلاف ۱۰ درصد با نمایه اول عنصر روی و سپس آهن دارای درجه اهمیت بیشتری در خاک‌های مورد مطالعه می‌باشند (جدول ۳). مطابق با نتایج جدول ۲ همبستگی معکوس و قوی بین نمایه عنصر روی و پ‌هاش خاک وجود دارد که این نتیجه مطابق با یافته‌های قبلی است (۴۷). طبق نتایج جدول ۲ همبستگی مثبت بین آهن و منگنز ($r^2=0/210$)، مس ($r^2=0/391$) و آهن و روی ($r^2=0/326$) در سطح احتمال ۱ درصد و کربن آلی با قابلیت هدایت الکتریکی خاک ($r^2=0/335$) در سطح احتمال یک درصد وجود دارد. مؤلفه دوم تنها ۱۲/۰۵ درصد از کل واریانس داده‌ها را به خود اختصاص می‌دهد و دو ویژگی تنفس و سپس منگنز و کربن آلی خاک در این مؤلفه دارای درجه اهمیت بیشتری بودند. در مؤلفه سوم آهک فعال خاک، در مؤلفه چهارم هدایت هیدرولیکی با رعایت شرط ۱۰ درصد اختلاف با واکنش خاک و در مؤلفه پنجم نیتروژن کل و در مؤلفه ششم میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها^۴ دارای درجه اهمیت بیشتری می‌باشند (جدول ۳) که به ترتیب ۱۰/۸۶، ۱۰/۴۹، ۹/۳۵ و ۹/۳۳

درصد از واریانس را به خود اختصاص داده‌اند نتایج حاصل از آزمون تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که نمایه‌های قابلیت هدایت الکتریکی، عناصر روی، آهن، تنفس، منگنز، کربن آلی، آهک فعال، هدایت هیدرولیکی اشباع، نیتروژن و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، نمایه‌هایی هستند که مجموعه حداقل داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در مؤلفه پنجم نیتروژن دارای درجه اهمیت بیشتری است. این عنصر همبستگی بسیار قوی با کربن آلی خاک در سطح احتمال یک درصد دارد (جدول ۲). طبق جدول ۱ میزان نیتروژن کل در خاک‌های مورد مطالعه از ۰/۰۸ تا ۱۴/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک متغیر است.

نتایج جدول ۲ نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین نیتروژن و کربن آلی خاک است که این همبستگی در بسیاری از مطالعات قبلی نیز مشاهده شده است (۱۹) کربن آلی خاک با حفظ شرط ۱۰ درصد اختلاف با بقیه مؤلفه‌ها در مؤلفه دوم دارای اهمیت بیشتری است و به دلیل همبستگی بسیار بالایی که در این مطالعه با نیتروژن خاک دارد و به دلیل همبستگی کربن آلی خاک با مس، آهن و انتخاب کربن آلی در مؤلفه دوم، نیتروژن در مؤلفه پنجم کنار گذاشته شد نتایج حاصل از جدول ۳ مطابق با بسیاری از مطالعات انجام شده قبلی است آن دسته از ویژگی‌های شیمیایی از خاک که بیش‌تر تحت تأثیر شرایط مدیریتی خاک قرار می‌گرفتند شامل کربن آلی خاک (۱۳)، نیتروژن کل (۱۳) و پ‌هاش بوده و این همبستگی بالا در بسیاری از مطالعات قبلی نیز گزارش شده است (۴۹). ویژگی‌های فیزیکی که از فعالیت‌های مدیریتی خاک تأثیر می‌پذیرفتند شامل شاخص پایداری خاکدانه‌ها (۱۹) بودند. در بسیاری از مطالعات انجام شده ویژگی بیولوژیکی تنفس خاک نیز از شرایط مدیریتی خاک به راحتی تأثیر پذیرفته و جز ویژگی‌هایی است که شاخص نهایی کیفیت خاک بسیار تأثیرگذار بوده است (۱۲).

- 1- Indicator selection
- 2- Eigenvalue
- 3- Eigenvector
- 4- Mean weight diameter

جدول ۲- بررسی همبستگی بین نمایه‌های خاک در منطقه مطالعاتی.

Table 2. The correlation test between soil properties in the studied area.

کربن آلی SOC	مس Cu	منگنز Mn	روی Zn	آهن Fe	ذرات درشت‌تر از شن Gravel	میانگین حسابی قطر خاکانه‌ها Mean weight diameter	پتاسیم K	سدیم Na	درصد آهک فعال Total Neutralizing Value (tnv)	تنفس Respiration	هدایت شباع Saturated conductivity	کل نیترژن Total Nitrogen	ویژگی‌های خاک Soil Characteristic
1	-0.063	-0.171	0.038	0.0143	-0.0169	-0.015	-0.012	-0.097	-0.029	0.232*	-0.011	1**	کربن آلی (SOC)
1	0.168	0.119	0.386**	-0.391**	0.05	-0.09	0.04	0.176	0.09	0.103	-0.068	-0.063	مس (Cu)
	1	0.386**	0.210*	-0.326**	0.12	-0.169	0.058	-0.015	0.166	0.172	-0.0171	-0.017	منگنز (Mn)
		1	0.386**	-0.326**	0.085	-0.08	-0.032	-0.093	0.173	0.039	-0.87	0.038	روی (Zn)
			1	0.386**	0.15	0.05	-0.083	-0.133	0.034	0.034	-0.056	-0.143	آهن (Fe)
				1	1	-0.038	0.21	0.584	0.51	0.166	0.49	0.488	ذرات درشت‌تر از شن Gravel
						1	0.895	0.303	0.42	0.49	0.49	0.015	میانگین حسابی قطر خاکانه‌ها Mean weight diameter
							1	0.56	0.098	0.47	0.21	-0.015	پتاسیم (K)
								1	0.634	0.623	0.28	-0.0145	سدیم (Na)
									1	0.166	0.78	-0.093	درصد آهک فعال Total Neutralizing Value (tnv)
										1	0.79	0.052	تنفس Respiration
											1	-0.011	هدایت هیدرولیکی اشباع Saturated conductivity
												1	کل نیترژن Total Nitrogen

جدول ۳- نتایج آزمون تجزیه مؤلفه اصلی در محاسبات روش حداقل تعداد داده‌ها.

Table 3. Test results (PCA) in the calculations of the minimum data set method.

مؤلفه اول PC1	مؤلفه دوم PC2	مؤلفه سوم PC3	مؤلفه چهارم PC4	مؤلفه پنجم PC5	مؤلفه ششم PC6	
20.01	12.05	10.86	10.49	9.35	9.33	واریانس نمایه‌های خاک Soil characteristic Variance
23.93	12.20	10.39	9.92	8.76	7.89	مقدار ویژه Eigen Value
20.03	32.05	42.91	53.40	62.76	72.09	واریانس تجمعی Cumulative Variance
0.007	-0.11	0.07	-0.072	<u>0.842</u>	-0.122	نیترژن کل N
0.025	0.08	<u>0.682</u>	-0.098	0.166	0.219	آهک فعال Total Neutralizing Value
<u>0.948</u>	-0.077	-0.061	-0.048	-0.031	-0.101	قابلیت هدایت الکتریکی Electrical Conductivity
0.056	-0.180	-0.367	0.527	-0.277	-0.071	سدیم محلول Na
0.513	0.464	0.399	-0.098	-0.043	-0.365	مس Cu
0.404	<u>0.606</u>	0.399	0.2	0.046	-0.081	منگنز Mn
<u>0.902</u>	0.218	0.023	0.097	0.193	-0.051	روی Zn
<u>0.783</u>	-0.035	0.196	-0.077	-0.197	0.232	آهن Fe
-0.155	-0.026	0.07	<u>0.686</u>	0.319	0.306	واکنش خاک pH
-0.045	<u>0.577</u>	-0.02	-0.305	-0.491	-0.026	کربن آلی خاک SOC
-0.066	0.215	-0.075	0.113	-0.198	0.216	پتاسیم K
-0.113	0.098	0.181	<u>0.727</u>	-0.104	-0.2	هدایت هیدرولیکی اشباع Hydraulic conductivity Unsaturated
0.007	0.082	0.033	-0.005	-0.120	<u>0.903</u>	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها Mean Weight Diameter
-0.061	<u>0.776</u>	-0.256	0.031	-0.092	0.189	تنفس Respiration

در مطالعه کنونی نیز ویژگی تنفس جز ویژگی‌های تأثیرگذار بر شاخص نهایی انتخاب شد. پ‌هاش خاک با تأثیر بر چرخه مواد غذایی، نیتروژن کل با تأثیر بر چرخه نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون بر چرخه نیتروژن و نسبت کربن به نیتروژن مؤثر است (۴۰). جهت محاسبه شاخص کیفیت خاک نمایه‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک در سه گروه کم‌تر- بهتر، بیش‌تر- بهتر و بهینه- بهتر تقسیم‌بندی

گردید. جدول ۴ خلاصه‌ای از دسته‌بندی نمایه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نمایه پ‌هاش در محدوده بهینه- بهتر است محاسبه شده (جدول ۴) نمایه‌های عناصر غذایی میکرو از جمله منگنز، روی، آهن و پتاسیم جزء گروه بیش‌تر- بهتر دسته‌بندی گردید (جدول ۴). نمایه قابلیت هدایت الکتریکی خاک جز آن دسته از نمایه‌های خاک است که کم بودن آن در خاک مطلوب است.

جدول ۴- دسته‌بندی نمایه‌های مورد مطالعه.

Table 4. Classification of studied sample.

میانگین Mean	شیب منحنی Slope Curve	حداکثر Maximum	حداقل Minimum	منحنی ضرایب Scoring Curve	نمایه‌های خاک Soil Index
7.74	بازگشت منحنی Return Curve	9.26	4.76	بهینه- بهتر Moderate is better	واکنش خاک pH
4.09	2.5	74.20	0.17	کم‌تر- بهتر Less is better	هدایت الکتریکی Electrical Conductivity
7.88	-2.5	20.25	0	بیش‌تر- بهتر More is better	منگنز Manganese
1.86	2.5	16.08	0	بیش‌تر- بهتر More is better	روی Zn
16.67	-2.5	78.06	0	بیش‌تر- بهتر More is better	آهن Fe
1.61	-2.5	3.51	0.43	بیش‌تر- بهتر More is better	کربن آلی خاک Soil Organic Carbon
0.27	-2.5	1	0.42	بیش‌تر- بهتر More is better	میانگین حسابی قطر خاکدانه‌ها Mean weighted diameter
21.19	-2.5	218.42	5.24	بیش‌تر- بهتر More is better	پتاسیم K
0.24	-2.5	0.35	0.08	بیش‌تر- بهتر More is better	تنفس Respiration

جهت محاسبه ضرایب وزنی^۱ از میانگین نسبی واریانس هر یک از نمایه‌های خاک استفاده شد.

از ضرب شدن ضرایب وزنی هر نمایه خاک بر نتایج توابع خطی و غیرخطی (معادلات ۱، ۲ و ۳)، حداقل تعداد داده‌ها^۲ به صورت خطی و غیرخطی

حاصل شد. در بسیاری از مطالعات نتایج حاصل از توابع غیر خطی بر توابع خطی ارجحیت داشت (۱۳). نتایج حاصل از توابع خطی با وجود این‌که ساده و کارایی بیش‌تری داشت به دلیل این‌که دارای واریانس بیش‌تری بود و با فرض این‌که توانایی محاسبه عملکرد پیچیده طبیعت را نداشت جهت محاسبات

1- Commuality

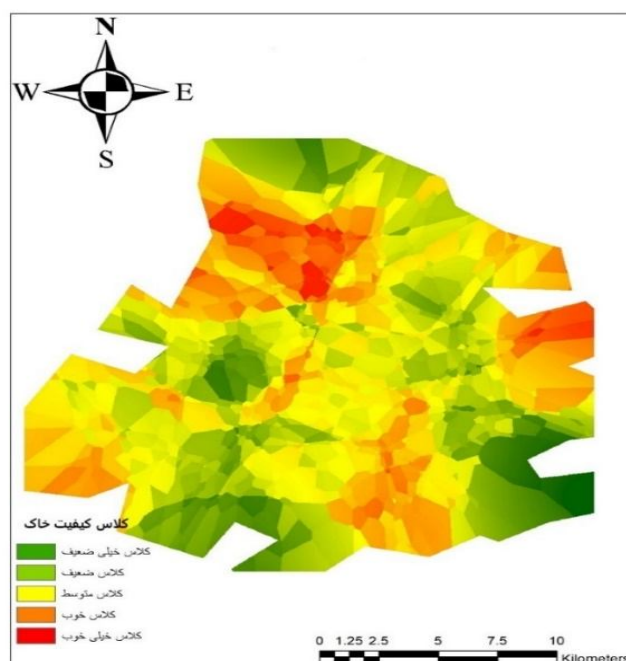
2- MDS

وزنی و نمره کیفیت خاک در شکل ۳ نشان‌دهنده توزیع کلاس‌های کیفیت خاک در منطقه است. نقشه شاخص وزنی کیفیت خاک بیانگر آن است که نواحی غربی دارای بالاترین کیفیت و نواحی مرکزی و حاشیه دریاچه نمک دارای کمترین کیفیت می‌باشند که می‌تواند بیانگر تأثیر شوری بر کاهش کیفیت خاک‌ها باشد.

شاخص نهایی خاک مطلوب نبود (۱۴ و ۴۱). در این مطالعه با توجه به همین فرض نتایج حاصل از نمایه‌های خطی کنار گذاشته شد. نتایج حاصل از نمایه‌های غیرخطی در معادلات ۴ و ۵ جاگذاری گردید و برای هر نمونه خاک شاخص کیفیت خاک (نمره و تجمعی) برای حداقل تعداد داده‌های انتخاب شده محاسبه شد. نقشه طبقه‌بندی‌شده کیفیت خاک منطبق با جدول ۵ و محاسبه‌شده به روش شاخص

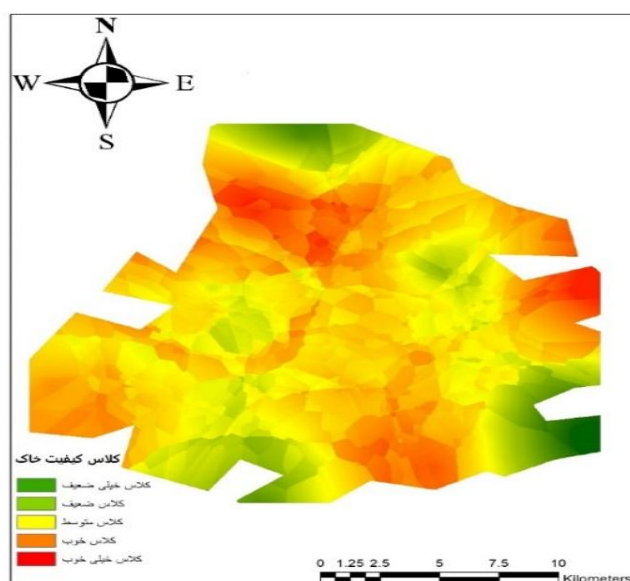
جدول ۵- کلاس‌های کیفیت خاک (۵۰).

Table 5. Soil quality classes.					
کلاس کیفیت	۱ (خیلی ضعیف)	۲ (ضعیف)	۳ (متوسط)	۴ (خوب)	۵ (خیلی خوب)
مقدار شاخص کیفیت خاک	0-0.19	0.2-0.39	0.4-0.59	0.6-0.79	0.8-1



شکل ۳- نقشه کلاس کیفیت خاک به روش نمره مبتنی بر حداقل داده‌ها.

Figure 3. Map of soil quality class based on Nemero method based on Minimum Data Set.



شکل ۴- نقشه کلاس کیفیت خاک به روش تجمعی مبتنی بر حداقل داده.

Figure 4. Soil quality class map based on minimum data cumulative method.

دارای شوری بیش‌تری می‌باشند، بنابراین به‌علت محدودیت‌های شوری برای اغلب محصولات و گیاهان میزان کیفیت خاک برای انجام وظایف ذاتی آن کاهش می‌یابد.

نواحی غربی و مرکزی دارای کیفیت خیلی‌خوب و خوب می‌باشند، این مشخصه با نوع کاربری‌های منطقه و تولیدات متنوع و خدمات اکوسیستمی خاک‌های منطقه منطبق است. جدول ۶ خلاصه‌ای از توصیف آماری کلاس‌های کیفیت خاک را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد میانگین شاخص کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف بیش‌ترین مقدار متعلق به مرتع و پس‌از آن زراعت‌های آبی، زراعت دیم، باغ‌ها، اراضی بایر و کاربری‌های شهری قرار دارند، مطابق با جدول ۶ و پایین بودن شاخص کیفیت خاک نمره در کاربری‌های متفاوت که دارای حداقل شاخص ۰/۱ در کاربری شهری و حداکثر ۰/۲۹ در کاربری مرتع بیانگر این است که دخالت‌های انسانی در بهره‌برداری از اراضی موجب کاهش کیفیت خاک می‌شود. شاخص کیفیت نمره روشی سخت‌گیرانه‌تر از

نقشه کریجینگ گسترش‌یافته^۱ شاخص‌های کیفیت خاک با کمک نرم‌افزار ارکمپ در پنج کلاس خیلی‌خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی‌ضعیف طبقه‌بندی شدند و همان‌طور که شکل ۴ نشان می‌دهد در شاخص محاسبه شده کیفیت خاک به روش نمره، بیش از ۲۴ درصد خاک‌ها در کلاس کیفیت خیلی‌ضعیف ۴۶ درصد خاک‌ها در کلاس کیفیت ضعیف و ۱۰ درصد خاک‌ها در کلاس کیفیت متوسط و ۱۰ درصد در کلاس کیفیت خوب و ۱۰ درصد باقی‌مانده در کلاس کیفیت خیلی‌خوب قرار دارند. نتیجه طبقه‌بندی کلاس کیفیت خاک‌ها (شکل ۳) به روش تجمعی نشان می‌دهد ۴۷ درصد خاک‌ها در کلاس کیفیت خیلی‌خوب، ۲۱ درصد در کلاس کیفیت خوب، ۱۲ درصد در کلاس کیفیت متوسط، ۱۰ درصد در کلاس کیفیت ضعیف و ۱۰ درصد باقی‌مانده در کلاس کیفیت خیلی‌ضعیف قرار دارند. اراضی با کلاس ضعیف و خیلی‌ضعیف در جنوب‌شرق و جنوب‌غرب توزیع شده‌اند، این نواحی

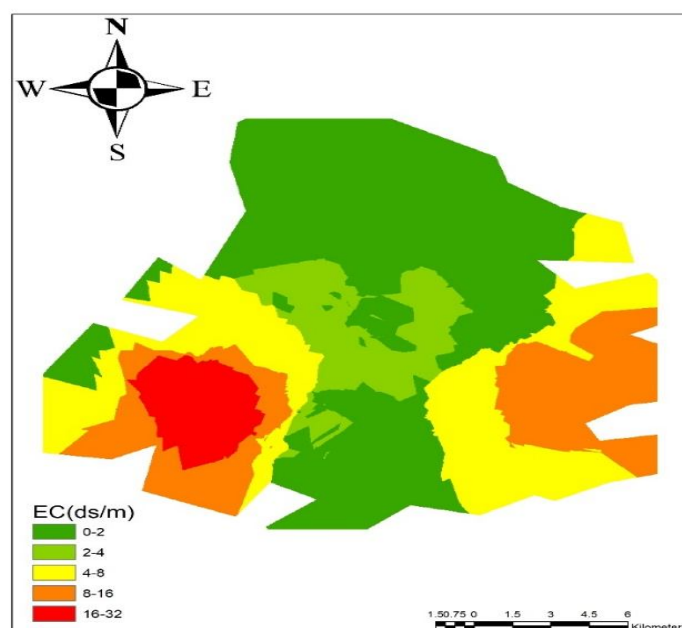
1- Exponential Kriging

شاخص تجمعی است، بنابراین همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد (جدول ۶) متوسط این شاخص در کاربری‌های مختلف کمتر از مقادیر آن در شاخص کیفیت تجمعی است و این یافته مطابق با سایر مطالعات انجام شده است (۱۴). این نتایج هم‌چنان نشان می‌دهد شاخص کیفیت خاک تجمعی در کاربری‌های مرتع، باغی، زراعت دیم و آبی بیش‌تر از کاربری‌های بایر (اراضی شور) و شهری است که بیانگر نقش مداخلات انسانی مانند ساخت‌وسازها و شوری بر کاهش کیفیت خاک است (شکل ۵).

جدول ۶- خلاصه آماری شاخص کیفیت خاک وزنی و نمره در کاربری‌های منطقه مطالعاتی.

Table 6. Statistical summary of soil quality index (NQI, SQI_w) in different land uses of study.

شهری Urban	بایر Barren	مرتع Pasture	باغی Horticultural lands	زراعت دیم Dry farming	زراعت آبی Irrigated farming		
0.22	0.78	0.99	0.88	0.91	0.95	میانگین Mean	SQI _w
1	1	1	1	1	1	حداکثر Max	
0.49	0.56	0.96	0.49	0.61	0.83	حداقل Min	
0.18	0.23	0.15	0.19	0.21	0.19	میانگین Mean	NQI
0.1	0.24	0.8	0.9	0.1	0.11	حداقل Min	
0.23	0.27	0.29	0.31	0.31	0.28	حداکثر Max	



شکل ۵- نقشه شوری خاک منطقه مطالعاتی.

Figure 5. Soil salinity map of the study area.

نتیجه گیری

نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی نشان داد، مؤلفه اول نمایه هدایت الکتریکی خاک است که ۲۰ درصد از کل واریانس داده‌ها را به خود اختصاص داده است، بنابراین می‌تواند نقش بالایی در تعیین کیفیت خاک داشته باشد. همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد محدوده‌های جنوب شرق و جنوب غرب دارای بیشترین مقادیر شوری می‌باشند؛ که منطبق با همین نواحی کیفیت خاک پایین‌تر را نشان می‌دهد.

در مطالعه کنونی ویژگی‌های تأثیرگذار بر شاخص کیفیت خاک شامل شوری خاک، روى، منگنز، نیتروژن، تنفس، کربن آلی خاک و آهک فعال خاک است. این ویژگی‌ها با اثر بر روى شاخص کیفیت خاک سرنوشت درجه کیفیت خاک را تعیین نمودند. خشکی دریاچه ارومیه به دلیل تأثیر بر روى ویژگی‌های خاک از جمله شوری به طور غیرمستقیم بر شاخص نهایی کیفیت خاک تأثیرگذار بود. تطابق و شباهت نقشه ویژگی شوری کیفیت خاک با نقشه کیفیت خاک به‌ویژه در در بخش غربی و جنوب غربی دریاچه

ارومیه می‌توانست به دلیل تأثیر کاهش کیفیت خاک‌های متأثر از نمک در حاشیه دریاچه ارومیه باشد. نتایج میانگین شاخص کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف، نشان می‌دهد بیش‌ترین مقدار متعلق به خاک‌هایی با کاربری مرتع و پس‌از آن به ترتیب زراعت‌های آبی، زراعت دیم، باغ‌ها، اراضی بایر و بایر حاشیه شهری دارای کیفیت پایین‌تری از شاخص نهایی کیفیت خاک بودند. این نتایج بیانگر این است که دخالت‌های انسانی در بهره‌برداری از اراضی موجب کاهش کیفیت خاک می‌شود. به‌طور کلی نتایج حاصل از بررسی دو شاخص وزنی کیفیت خاک و شاخص نمره کیفیت خاک، نشان می‌دهد که عموماً شاخص نمره در انتخاب نهایی کلاس کیفیت خاک سخت‌گیرانه‌تر بوده و شاخص وزنی کیفیت خاک با وضعیت کنونی بیش‌تر مطابقت دارد. ساخت‌وسازهای کنونی و شوری در این بخش از منطقه مورد مطالعه منجر به کاهش شاخص کیفیت خاک شده و شرایط بحرانی برای خاک به وجود آورده است.

منابع

1. Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological economics*, 69(9), 1858-1868.
2. Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, 35 (1-21) <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>.
3. Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>.
4. Matinfar, H. R., Jalali, M., & Mohamadi, S. (2019). Soil Quality, *Jihad Daneshgahi* publication, Tehran. [In Persian]
5. Karlen, D. L., Ditzler, C. A., & Andrews, S. S. (2003). Soil quality: why and how? *Geoderma*, 114(3-4), 145-156.
6. Arshad, M. A., & Coen, G. M. (1992). Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7(1-2), 25-31.
7. Abdel Rahman, M. A., & Tahoun, S. (2019). GIS model-builder based on comprehensive geostatistical approach to assess soil quality. *Remote sensing Applications: society and Environment*, 13, 204-214.
8. Ball, B. C., Batey, T., & Munkholm, L. J. (2007). Field assessment of soil structural

- quality—a development of the Peerlkamp test. *Soil use and Management*, 23(4), 329-337. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00102.x>.
9. 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. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>.
10. Qi, Y., Darilek, J. L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., & Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149(3-4), 325-334.
11. Askari, M. S., O'Rourke, S. M., & Holden, N. M. (2015). Evaluation of soil quality for agricultural production using visible–near-infrared spectroscopy. *Geoderma*, 243, 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.12.012>.
12. Bastida, F., Moreno, J. L., Hernández, T., & García, C. (2006). Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(12), 3463-3473.
13. Li, P., Zhang, T., Wang, X., & Yu, D. (2013a). Development of biological soil quality indicators system for subtropical China. *Soil Tillage Res.* 126, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.011>.
14. Nabiollahi, K., Golmohamadi, F., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., & Davari, M. (2018). Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma*, 318, 16-28. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.024>.
15. Yred, M., Kibebew, K., Bobe, B., & Muktar, M. (2021). Soil quality evaluation under different land use types in Kersa sub-watershed, eastern Ethiopia, *Environmental Systems Research*, 10, 1-11.
16. Biswas, S., Hazra, G. C., Purakayastha, T. J., Saha, N., Mitran, T., Roy, S. S., Basak, N., & Mandal, B. (2017). Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. *Geoderma*, 292, 34-48. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.003>.
17. Gomez, C., Le Bissonnais, Y., Annabi, M., Bahri, H., & Raclot, D. (2013). Laboratory Vis–NIR spectroscopy as an alternative method for estimating the soil aggregate stability indexes of Mediterranean soils. *Geoderma*, 209, 86-97. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.002>.
18. Rezaee, L., Moosavi, A. A., Davatgar, N., & Sepaskhah, A. R. (2020). Soil quality indices of paddy soils in Guilan province of northern Iran: Spatial variability and their influential parameters. *Ecological Indicators*, 117, 106566.
19. Rahmanipour, F., Marzaioli, R., Bahrami, H. A., Fereidouni, Z., & Bandarabadi, S. R. (2014). Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological indicators*, 40, 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.12.003>.
20. Moges, A., Dagnachew, M., & Yimer, F. (2013). Land Use Effects on Soil Quality Indicators: A Case Study of Abo-Wonsho Southern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2013(1), 784989.
21. Ahmadi, K., Ebadzadeh, H. M., Hatami, F., Mohammad Niya Afrozi, S. H., Talgani, R. A., Yari, S. H., & Kalantari, M. (2022). Agricultural statistics, the third volume of horticultural and horticultural products, Ministry of Agricultural Jihad, Planning and Economic Deputy, *Information and Communication Technology Center*, 44, 1-17. (In Persian)
22. Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., & Yang, X. M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to

- quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152 (3-4), 252-263.
23. Roudier, P. (2011). Clhs: A R Package for Conditioned Latin Hypercube Sampling. Roudier, P., Beaudette, D., Hewitt, A., 2012. A Conditioned Latin Hypercube Sampling Algorithm *Incorporating Operational Constraints*. pp. 227-231.
24. Brus, D. J. (2019). Sampling for digital soil mapping: A tutorial supported by R scripts. *Geoderma*, 338, 464-480.
25. Mulder, V., de Bruin, S., & Schaepman, M. (2013). Representing major soil variability at regional scale by constrained latin hypercube sampling of remote sensing data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 21, 301-310. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.004>.
26. Ramirez-Lopez, L., Schmidt, K., Behrens, T., van Wesemael, B., Dematte, J., & Scholten, T. (2014). Sampling optimal calibration sets in soil infrared spectroscopy. *Geoderma*. 226, 140-150. <https://doi.org/10.1016/j.Geoderma.2014.02.002>.
27. Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986) Particle-Size Analysis. In: Klute, A., Ed., *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, Agronomy Monograph No. 9, 2nd Edition, *American Society of Agronomy/ Soil Science Society of America*, Madison, WI, 383-411.
28. Brasher, B. R., Franzmeier, D. P., Valassis, V., & Davidson, S. E. (1966). Use of saran resin to coat natural soil clods for bulk-density and water-retention measurements. *Soil Science*, 101(2), 108.
29. Nath, A. J., & Rattan, L. A. L. (2017). Effects of tillage practices and land use management on soil aggregates and soil organic carbon in the north Appalachian region, USA. *Pedosphere*, 27 (1), 172-176. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160 \(17\) 60301-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160 (17) 60301-1).
30. Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, 70 (5), 1569-1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>.
31. Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
32. Lindsay, W. L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42(3), 421-428.
33. Thomas, G. W. (1996). Soil pH and Soil Acidity. P: 475-490. In: D. L. Sparks et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3. SSSA, ASA, Madison WI.
34. Olsen, S. R., & Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. *Agronomy, Monograph*. 9: *Methods of Soil Analysis*. Part, 2, 401-430.
35. Knudsen, D., Peterson, G. A., & Pratt, P. F. (1983). Lithium, sodium, and potassium. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9, 225-246.
36. Carter and Gary, D., Peterson, G. A., & Pratt, P. F. (1983). Lithium, sodium, and potassium. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9, 225-246.
37. Nannipieri, P., Greco, S., & Ceccanti, B. (1990). Ecological significance of the biological activity in soil. In: Bollag, J. M., Stozky, G. (Eds.), *Soil Biochemistry*. 6, Marcel Dekker, New York, 293-355.
38. Nakajima, T., Lal, R., & Jiang, S. (2015). Soil quality index of a crosby silt loam in central Ohio. *Soil and Tillage Research*, 146, 323-328. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.001>.
39. Lal, R. (1994). Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. Department of Agronomy The Ohio State University Columbus, Ohio. *Soil Management Support Services USDA*

- Soil Conservation Service, and U.S. Agency for International Development*, 1, 2-70.
40. Raiesi, F., & Kabiri, V. (2016). Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment. *Ecological Indicators*, 71, 198-207.
41. Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, ecosystems & environment*, 90 (1), 25-45.
42. Liebig, M. A., Varvel, G., & Doran, J., (2001). A simple performance-based index for assessing multiple agroecosystem functions. *Agronomy Journal*, 93 (2), 313-318. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.932313x>.
43. Askari, M. S., O'Rourke, S. M., & Holden, N. M. (2015). Evaluation of soil quality for agricultural production using visible–near-infrared spectroscopy. *Geoderma*, 243, 80-91.
44. Brejda, J., Moorman, T. B., Karlen, D. L., & Dao, T. H. (2000). Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and Southern High Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 2115-2124.
45. Nocita, M., Kooistra, L., Bachmann, M., Müller, A., Powell, M., & Weel, S. (2011). Predictions of soil surface and topsoil organic carbon content through the use of laboratory and field spectroscopy in the Albany Thicket Biome of Eastern Cape Province of South Africa. *Geoderma*, 167, 295-302.
46. Navar, J., Moorman, T. B., Karlen, D. L., & Dao, T. H. (2000). Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and Southern High Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 2115-2124.
47. Govaerts, B., Sayre, K. D., & Deckers, J. (2006). A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and tillage research*, 87 (2), 163-174.
48. Hendrickson, A. E., & White, P. O. (1964). Promax: A quick method for rotation to oblique simple structure. *British journal of statistical psychology*, 17 (1), 65-70.
49. Kaštovská, E., Pícek, T., Bárta, J., Mach, J., Cajthaml, T., & Edwards, K. (2012). Nutrient addition retards decomposition and C immobilization in two wet grasslands. *Hydrobiologia*, 692, 67-81.
50. Rezaee, L., Moosavi, A. A., Davatgar, N., & Sepaskhah, A. R. (2020). Soil quality indices of paddy soils in Guilan province of northern Iran: *Spatial variability and their influential parameters. Ecological Indicators*, 117, 106566.
51. Da Silva, M. G., de Aguiar Netto, A. D. O., de Jesus Neves, R. J., do Vasco, A. N., Almeida, C., & Faccioli, G. G. (2015). Sensitivity analysis and calibration of hydrological modeling of the watershed Northeast Brazil. *Journal of Environmental Protection*, 6 (08), 837.

