Research Article

Agricultural Engineering., 46(2) (2023) 251-271
DOI: 10.22055/AGEN.2023.44957.1684

ISSN (P): 2588-526X

ISSN (E): 2588-5944

Assessment of soil quality indices using multivariate analysis in different land uses (Case study: Tootkabon, Guilan province)

M. Taghipour [1], N. Yaghmaeian Mahabadi[2,*] and M. Shabanpour [3]

1. Former MSc., Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran

2, 3. Associated Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran

Received: 7 October 2023 Accepted: 16 November 2023 *Corresponding Author: yaghmaeian_na@guilan.ac.ir

Abstract

Introduction: Soil quality index is used as a quantitative tool for assessing the impact of land use and management practices on soil condition. It is a sensitive indicator for revealing the dynamics of soil conditions, and it may vary with different land use and ecological restoration measures. The land use affects the physical and chemical properties, biological processes, and land productivity, which lead to the change in soil quality. Land use change and agricultural development can lead to degradation, erosion and reduction of surface and subsurface soil quality. In most of the conducted studies, the surface soil quality has been evaluated; but these studies provide incomplete information because subsurface soil have the greatest impact on soil function and crop. In spite of various soil quality assessment methods developed in former researches, there are fewer attempts for selecting suitable and sensitive soil quality index, especially in different land uses. In this study, soil quality indicators were evaluated using multivariate analysis in three different land uses to select the most suitable and appropriate soil quality index in Tootkabon area of Guilan province.

Materials and Methods: The study area is located in Tootkabon in Guilan province (latitude 36º 53' 21" N, longitude 49º 33' 44" E). Parent material is limestone and geomorphologic units that are comprised of hill land and plateau. In order to achieve the objectives of the research, 20 composite soil samples were taken from two depths of 0 to 15 and 15 to 30 cm from each of the land use, including forest, dry farming and rangeland (60 soil samples in total) with the same parent material. The three land uses were located next to each other and at a close distance. In this research, using the principal component analysis (PCA) method, among 12 physical, chemical and biological soil indicators as total data set (TDS), clay percent, mean weight diameter, organic matter and available phosphorus were determined as the MDS. Then, the soil quality was evaluated by integrated quality index (IQI) and Nemoro quality index (NQI) using two linear and non-linear scoring methods (LS and NLS) and two soil indicator selection approaches, a total data set (TDS) and a minimum data set (MDS). Finally, to prioritize the soil quality indices based on sensitivity index (SI) and efficiency ratio (ER), the ranks of both criteria were summed and then made appropriate decision. All soil parameters were tested using one-way analysis of variance and the differences among means were analyzed using Duncan's significant difference test at the probability level of 0.05.

© 2023 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Results and Discussion: The results of the present study showed that some soil properties including clay percentage, mean weight diameter, organic matter and available phosphorus had the greatest effect on soil quality in the study area. Most of the soil properties in rangeland and forest had a higher stratification ratio compared to dry farming. The soil quality indices calculated using linear function for MDS indicated soil quality of forest and dry farming were higher than rangeland. Maximum SI belonged to IQI-LS-TDS and IQI-LS-MDS with values of 1.56 and 1.40, respectively. Efficiency ratios (ER) were calculated to specify the power of each soil quality index being as representative index for whole soil parameters set. IQI-LS-MDS and IQI-NLS-MDS have the highest value of ER (75.0 %), it is obviously deducted that these developed soil quality indices correlate with much indicators than other indices. It has more efficiency ratio and therefore represents the soil overall condition highly. Finally prioritizing according to ranks of SI and ER showed that IQI-LS-MDS is the most suitable approach in soil quality assessment of study area.
Conclusion: Minimum data set selection using principal component analysis as a multivariate statistical method could adequately represent total data set method. Therefore, it seems to be an appropriate approach for choosing more effective indicators with respect to saving time and money in the developing countries The linear soil quality indices showed higher capability than non-linear indices to differentiate soil quality among different land uses. Overall results of the prioritization soil quality indices imply that the IQI-LS-MDS has the most efficiency and sensitivity for variation in land uses, so it is suggested to use this quality index for further and comprehensive soil quality assessments plans.

Key words: Land use change,sensitivity index, efficiency ratio, scoring methods

مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۶ شماره۳، پاییز ۱۴۰۲

مقاله پژوهشی

ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از تحلیل‌های‌چند متغیره درکاربری‌های مختلف اراضی (مطالعه موردی: توتکابن استان گیلان)

مژده تقی پور [۱]، نفیسه یغمائیان مهابادی [۲*] و محمود شعبانپور [۳]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

۲و ۳- دانشیار گروه علوم خاک دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵

پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۸/۲۵

کلمات کلیدی:

تغییر کاربری،

شاخص حساسیت،

درصد راندمان،

روش‌های نمره‌دهی

* عهده دار مکاتبات

Email: yaghmaeian_na@guilan.ac.ir

چکیده

شاخص کیفیت خاک یکی از روش‌های ساده و معمول کمّی کردن اثر کاربری اراضی بر ویژگی‌های خاک است. در این مطالعه شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از تحلیل‌های‌چند متغیره در سه کاربری مختلف در منطقه توتکابن استان گیلان مورد ارزیابی قرار گرفت. ٦٠ نمونه خاک مرکب از دو عمق صفر تا ۱۵ و ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری از سه کاربری جنگل، زراعی و مرتع برداشت شد. با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، از میان ۱۲ ویژگی موثر بر کیفیت خاک، چهار ویژگی شامل درصد رس، میانگین وزنی قطر خاکدانه، کربن آلی و فسفر قابل دسترس به‌عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب شدند. سپس کیفیت خاک با استفاده از دو مدل شاخص کیفیت تجمعی (IQI) و شاخص کیفیت نمورو (NQI) به روش‌های نمره‌دهی خطی و غیرخطی (LS و NLS) و هرکدام در دو مجموعه کل داده‌ها (TDS) و داده‌های حداقل (MDS) ارزیابی شد. برای اولویت‌دهی و ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک از مجموع دو معیار شاخص حساسیت و درصد راندمان استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های کیفیت خاک به روش نمره‌دهی خطی نسبت به غیرخطی تفاوت کیفیت خاک بین کاربری‌های مختلف را بهتر نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که کاربری جنگل و زراعی در مقایسه با مرتع از میانگین شاخص کیفیت خاک بالاتری برخوردار بود. بیشترین شاخص حساسیت برای IQI-LS-MDS و IQI-LS-TDS به ترتیب ۱/٥٦ و ۱/٤٠ به دست آمد. مقادیر درصد راندمان نشان داد که شاخص‌های IQI-LS و IQI-NLS برای مجموعه MDS در مقایسه با TDS با دارا بودن میزان راندمان ۷۵ درصد از کارآیی بالاتری برخوردار هستند. براساس اولویت‌دهی شاخص‌های کیفیت خاک، شاخص IQI-LS-MDS اولین رتبه را به خود اختصاص داد، بر این اساس از بین شاخص‌های کیفیت خاک، IQI-LS-MDS برای بررسی وضعیت کلی خاک و تغییر در شیوه‌های مدیریتی در اثر تغییر کاربری در منطقه مطالعاتی قابلیت بیشتری دارد.

مقدمه

کیفیت خاک تابعی پیچیده از کارکردهای آن است که به عنوان ظرفیت خاک برای حمایت تولیدات گیاهی و حیوانی، حفظ و بهبود کیفیت آب و هوا، تامین سلامت و سکونت‌گاه انسان در اکوسیستم‌های طبیعی و مدیریت‌شده تعریف شده است (۱۰). کیفیت خاک به‌طور مستقیم قابل‌اندازه‌گیری نیست، بلکه با شاخص‌های کیفیت خاک (SQI) [1] اندازه‌گیری می‌شود. شاخص کیفیت خاک یک روش ساده و معمول برای کمی کردن کیفیت خاک بوده (۳۲) که به دلیل کمی و انعطاف‌پذیر بودن، استفاده آسان و ارتباط نزدیک با شیوه‌های مدیریت خاک، به عنوان یک ابزار موثر برای ارزیابی کیفیت خاک کاربرد دارد؛ بنابراین برای ارزیابی کیفیت خاک در بسیاری از مقیاس‌ها و موقعیت‌ها استفاده می‌شود (۲۶).

تغییر کاربری اراضی پیامد رشد جمعیت جهان و نیاز به تولید غذا و مواد خام دیگر برای حمایت از جمعیت درحال افزایش است. هرچند تغییر کاربری اراضی، انسان را قادر به افزایش منابع اراضی مورد نیاز کرده است، اما ظرفیت اکوسیستم‌ها را برای تولید غذا، فراهم نمودن آب و تنظیم-کیفیت هوا کاهش می‌دهد (۲۸). تقاضای فعلی برای محصولات کشاورزی، تبدیل مداوم جنگل به زمین کشاورزی را گسترش می‌دهد که تأثیر منفی قابل‌توجهی بر کیفیت خاک دارد (۶).

در ایران نیز سالانه هزاران هکتار از اراضی تغییر کاربری می‌یابند. الگوی اصلی تغییر کاربری به طور وسیع شامل افزایش اراضی کشاورزی در پی تخریب اکوسیستم طبیعی و به ویژه جنگل به دلیل رشد جمعیت و افزایش نیاز جهانی به غذا است که بدون برنامه‌ریزی مشخص و عدم توجه به محدودیت‌های زیست‌محیطی صورت می‌گیرد (۲۲). این امر موجب از دست رفتن زیست‌بوم جنگلی و کاهش کیفیت خاک می‌شود (۶). بنابراین درک روابط بین تغییرات کاربری اراضی و کیفیت خاک ضروری است (۱۲).

روش‌های کمی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک شامل سه مرحله است: انتخاب ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک [2] که بهترین معرف کارکرد خاک باشند، امتیازدهی ویژگی‌ها براساس روش‌های خطی و غیرخطی‌و تلفیق امتیازها برای محاسبه شاخص کیفیت خاک (۳۲). فقدان مولفه‌هایی که معرف خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک باشند، حساسیت آنها را به تغییرات کیفیت خاک کاهش خواهد داد و منجر به نتایج غیردقیق می‌شود؛ بنابراین انتخاب مجموعه‌های محدود و قابل‌تفسیر شاخص‌های کیفیت خاک نیاز به مطالعه بیشتر دارد (۴۵). ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک [3] معمولا با واحدهای مختلف بیان می‌شوند، برای نرمال کردن داده‌ها از روش‌های نمره‌دهی خطی (LS) [4] (۲۷) و غیر خطی (NLS) [5] (۸) استفاده می‌شود. در روش‌های نمره‌دهی براساس حساسیت ویژگی‌های خاک نسبت به تغییرات کیفیت خاک، بین نمره کیفیت و داده‌های اندازه‌گیری شده روابطی تعریف می‌شود.

سانتوس فرانسیس و همکاران [6] (۳۹) در پژوهشی با استفاده از روش مجموعه داده حداقل و مجموعه داده کل با نمره‌دهی خطی و غیرخطی به محاسبه شاخص تجمعی وزنی و ساده و هم‌چنین شاخص نمورو کیفیت خاک در سه کاربری جنگل، مرتع و زراعی در عمق پروفیلی خاک در منطقه نیمه خشک اسپانیا پرداختند. با توجه به نتایج دریافتند شاخص‌های تجمعی وزنی و ساده ارزیابی بهتری از کیفیت خاک نسبت به شاخص نمورو ارائه می‌دهند. در مطالعه‌ای ژانگ و همکاران [7] (۴۷) به ارزیابی شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک در جنگل دست‌کاشت، بوته‌زار، مرتع و کشاورزی با استفاده از روش نمره‌دهی غیر خطی با مجموعه داده کل و مجموعه داده حداقل در مناطق نیمه گرمسیری چین پرداختند. کاربری جنگل ثانویه و اراضی کشاورزی به ترتیب از بالاترین و کم‌ترین مقدار شاخص

1- Soil quality index

2- Soil quality indicators
3- Soil quality indicators
4- Linear scoring
5- No-linear scoring
6- Santos-Frances *et al.*
7- Zhang *et al.*

کیفیت خاک در مجموعه داده کل و مجموعه داده حداقل برخوردار بودند. زراعت‌پیشه و همکاران[1] (۴۶) در پژوهشی اثرات جنگل‌تراشی و کشاورزی متراکم بر کیفیت خاک در کاربری جنگل، زراعی (دیم و آبی) و باغی در استان مازندران را بررسی کردند. با توجه به نتایج دریافتند که مقادیر شاخص کیفیت خاک به روش نمره‌دهی خطی در مقایسه با نمره‌دهی غیرخطی از معنی‌داری بالاتری برخوردار بود و شاخص کیفیت نمورو در مقایسه با شاخص تجمعی و ساده کیفیت خاک، دارای برآورد بهتری بود. کاربری جنگل و دیم‌زار به ترتیب از بالاترین وکم‌ترین مقادیر شاخص کیفیت خاک با استفاده از مجموعه داده کل و مجموعه داده حداقل در روش‌های نمره‌دهی خطی و غیرخطی برخوردار بودند. داوری و همکاران[2] (۱۲) در خصوص اثر جنگل‌تراشی و تبدیل آن به کاربری زراعی بر کیفیت خاک در استان کردستان نشان داد که جنگل در مقایسه با زراعی از مقدار شاخص تجمعی کیفیت خاک بالاتری برخوردار بود. مولائی آرپناهی و همکاران[3] (۳۱) اثر تغییر کاربری اراضی در کاربری‌های شامل جنگل بکر، باغ گردو، زمین کشاورزی و جنگل تخریب شده بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کیفیت خاک در منطقه بازفت استان چهارمحال و بختیاری را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که تخریب جنگل موجب کاهش شدید کیفیت خاک می‌گردد با این وجود تغییر کاربری از کشاورزی به باغ گردو منجر به بهبود کیفیت خاک می شود. شه‌پیری و همکاران[4] (۴۰) در بررسی شاخص‌های کیفی خاک در رویشگاه‌های جنگلی تخریب و تبدیل شده به مرتع در غرب مازندران گزارش کردند که تخریب رویشگاه‌های جنگلی و تغییر پوشش اراضی می‌تواند اثرات برجسته‌ای در تغییرپذیری شاخص‌های کیفی خاک داشته باشد.

تغییر کاربری اراضی و توسعه کشاورزی می‌تواند منجر به تخریب، فرسایش و کاهش کیفیت خاک سطحی و زیرسطحی شود. در اکثر مطالعات انجام شده به ارزیابی کیفیت خاک سطحی پرداخته شده است؛ اما این‌گونه مطالعات، اطلاعات ناقصی را در اختیار قرار می‌دهند زیرا که ویژگی‌های خاک زیرسطحی مانند حاصلخیزی و کربن آلی و ... بیش‌ترین تاثیر را بر کارکرد خاک داشته و تولید محصول متاثر از ویژگی‌های خاک سطحی و زیرسطحی می‌باشد (۳۸). بنابراین بررسی ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک در عمق زیرسطحی نیز لازم به نظر می‌رسد. در این مطالعه به منظور ارزیابی پیامد تغییر کاربری زمین‌های جنگلی، روش‌های مختلف محاسبه شاخص کیفیت خاک در سه کاربری جنگل، مرتع و دیم و در دو عمق خاک در منطقه توتکابن استان گیلان مورد بررسی قرار گرفت. کارآمدترین و مناسب‌ترین شاخص کیفیت خاک نیز از طریق محاسبه شاخص حساسیت و درصد راندمان انتخاب شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی

منطقه مورد مطالعه، بخشی از اراضی روستای شیرکوه شهرستان توتکابن واقع در جنوب استان گیلان را شامل می شود (شکل ۱). این منطقه در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۳ دقیقه و ۲۱ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۳ دقیقه و ۴۴ ثانیه شرقی واقع شده است. متوسط بارندگی سالیانه در منطقه ۹۵۴ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه ۱۸/۴ درجه سانتی-گراد می‌باشد. منطقه مورد مطالعه دارای مواد مادری آهکی و تیپ اراضی تپه ماهوری و فلات است. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک به ترتیب، زریک[5] و ترمیک[6] می‌باشد (۷).

به منظور دستیابی به اهداف پژوهش، ۲۰ نمونه خاک مرکب به روش نمونه‌برداری تصادفی از دو عمق صفر تا ۱۵ و ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری از هر کدام از کاربری‌ها شامل جنگل، زراعی (گندم دیم) و مرتع (در مجموع ۶۰ نمونه خاک) با مواد مادری یکسان برداشت شد. سه کاربری مورد بررسی در کنار هم و در فاصله نزدیکی از هم قرار داشتند. پوشش طبیعی منطقه شامل جنگل‌های طبیعی صنوبر (*Populus* nigra) است.

1- Zeraatpisheh *et al.*
2- Davari *et al.*
3- Molaei Arpnahi *et al.*
4- Shah Piri *et al.*
5- Xeric
6- Thermic

کاربری زراعی شامل کشت دیم گندم با سابقه کشت حدود ۱۷ سال است.

نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن، از الک ۲ میلی‌متری گذرانده شدند و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله درصد ذرات معدنی اولیه خاک (رس، سیلت و شن) به‌روش هیدرومتری (۱۶)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)[1] به‌روش الک تر (۲۳)، جرم مخصوص ظاهری به‌روش کلوخه و پارافین (۹)، pH عصاره اشباع توسط دستگاه pH متر و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع توسط دستگاه هدایت‌سنج (۲۴)، کربن آلی خاک به‌روش والکی و بلک (۴۳)، نیتروژن کل به‌روش کجلدال (۲۰)، فسفر قابل استفاده در خاک به‌روش اولسن (۳۳) و کلسیم کربنات معادل به روش تیتراسیون (۴۲) اندازه‌گیری شدند. مقدار ذخیره کربن با روش عمق ثابت با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (۱۴).

$$C_S = OC \times Bd \times e \qquad (۱)$$

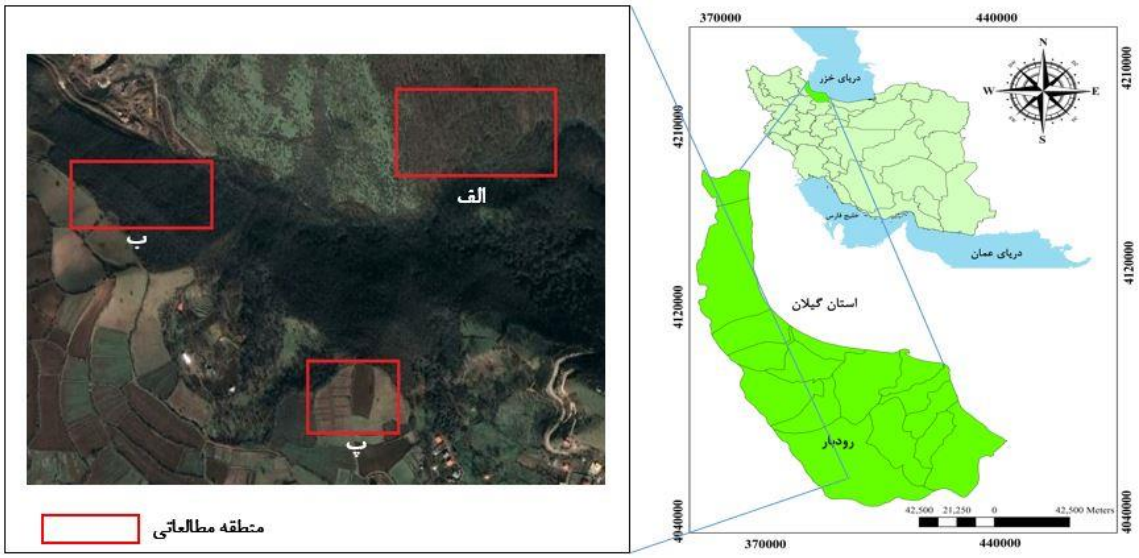
در این رابطه C_S مقدار ذخیره کربن (کیلوگرم بر متر مربع)، OC کربن آلی خاک (گرم بر کیلوگرم)، Bd جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، e عمق خاک (متر) می‌باشد.

جهت بررسی تاثیرپذیری ویژگی‌های خاک حاصل از تغییر کاربری جنگل به کاربری زراعی شاخص حساسیت[2] جداگانه برای هر عمق، از نسبت ویژگی اندازه‌گیری شده در زیست‌بوم طبیعی (جنگل) به ویژگی اندازه‌گیری شده در زیست‌بوم زراعی محاسبه گردید (۳۵). هم‌چنین نسبت لایه‌بندی[3] برای هر کاربری اراضی از نسبت مقدار ویژگی اندازه‌گیری شده در لایه سطحی به لایه زیرسطحی محاسبه گردید (۱۵)؛ به طوری‌که صرف نظر از ویژگی مورد نظر، کاربری دارای نسبت لایه‌بندی بیش‌تر از کیفیت خاک بالاتری برخوردار است (۱۱ و ۲۵).

محاسبه شاخص کیفیت خاک

جهت کاهش تعداد متغیرهای مورد مطالعه و ایجاد مؤلفه‌های مستقل از هم، برای تعیین ویژگی‌هایی که بیش‌ترین نقش را در توجیه تغییرات ویژگی‌های خاک دارند، از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، استفاده شد. به این ترتیب که مطابق روش گوارتس و همکاران[4] (۱۷) مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه[5] بیش از یک در نظر گرفته شدند. بعد از انتخاب تعداد مؤلفه‌های اصلی، درون هر مولفه، ویژگی که دارای بیش‌ترین وزن باشد به همراه ویژگی‌هایی که دارای اختلاف کم‌تر از ۱۰ درصد با آن باشند به عنوان حداقل ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک (MDS) انتخاب شدند. در صورت انتخاب بیش از یک ویژگی برای هر مؤلفه، ویژگی‌های با ضرایب همبستگی بالا ($r > 0.6$) و وزن پایین‌تر حذف شدند (۳۲). در این مطالعه از روش‌های نمره‌دهی خطی (LS) و غیرخطی (NLS) استفاده شد. در روش نمره‌دهی خطی، سه نوع تابع مورد استفاده قرار گرفت. برای ویژگی‌هایی که با افزایش و یا کاهش مقدار آن‌ها، کیفیت خاک بهبود می‌یابد، به ترتیب توابع بیش‌تر-بهتر[6] (رابطه ۲) و کمتر-بهتر[7] (رابطه ۳) و برای ویژگی‌هایی که دارای دامنه بهینه هستند، تابع دامنه بهینه[8] (رابطه ۴) استفاده شد (جدول ۱). تابع امتیازدهی "محدوده بهینه" برای ویژگی‌هایی که دارای حدود بهینه مناسبی می‌باشند، مورد استفاده قرار گرفت. به این ترتیب که یک محدوده بهینه برای آن ویژگی خاک تعریف شد و سپس با استفاده از توابع" بیشتر بهتر است "و" کمتر بهتر است "بسته به این که مقدار ویژگی اندازه‌گیری شده پایینتر یا بالاتر از حد بهینه بود، امتیازدهی ویژگی‌ها صورت گرفت. اگر مقدار ویژگی خاک معادل با محدوده بهینه بود، امتیاز آن ویژگی برابر یک در نظر گرفته شد (۲).

1- Mean weight diameter
2- Sensitivity index
3- Stratification ratio
4- Govaerts *et al.*
5- Eigen value
6- More is better
7- Less is better
8- Optimal range



شکل(۱) موقعیت جغرافیایی منطقه و کاربری‌های مورد مطالعه، الف) کاربری مرتع، ب) کاربری جنگل و پ) کابری دیم

Figure(1) Location of the study area, a) range, b) forest and c) dry farming land uses

$$M(x)=\begin{cases}0.1 & x<x_1\\ 0.9\times\dfrac{x-x_1}{x_2-x_1}+0.1 & x_1\le x\le x_2\\ 1 & x>x_2\end{cases} \qquad (۲)$$

$$L(x)=\begin{cases}1 & x<x_1\\ 1-0.9\times\dfrac{x-x_1}{x_2-x_1} & x_1\le x\le x_2\\ 0.1 & x>x_2\end{cases} \qquad (۳)$$

$$R(x)=\begin{cases}0.1 & x<x_1\\ 0.9\times\dfrac{x-x_1}{r_1-x_1}+0.1 & x_1\le x<r_1\\ 1 & r_1\le x\le r_2\\ 1-0.9\times\dfrac{x-r_2}{x_2-r_2} & r_2<x\le x_2\\ 0.1 & x>x_2\end{cases} \qquad (۴)$$

جدول (۱) توابع نمره‌دهی ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک
Table (1) Scoring functions for Total data set

U حد بالا	L حد پایین	نوع تابع نمره‌دهی Scoring function type	ویژگی خاک Soil property
35	15	بهینه Optimum	رس (%) Clay
70	35	بهینه Optimum	شن(%) Sand
1.73	1.2	کم‌تر- بهتر Less is better	جرم مخصوص ظاهری ($g.\ cm^{-3}$) Bulk density
1.93	0.03	بیش‌تر- بهتر More is better	میانگین وزنی قطر خاکدانه (mm) MWD
6.5	5.5	بهینه Optimum	واکنش خاک pH
1.5	0.2	کم‌تر- بهتر Less is better	قابلیت هدایت الکتریکی ($dS.m^{-1}$) EC
2.5	1.0	بیش‌تر- بهتر More is better	کربن آلی (%) Organic carbon
30	5	بیش‌تر- بهتر More is better	فسفر قابل دسترس ($mg.\ kg^{-1}$) Available P
0.15	0.03	بیش‌تر- بهتر More is better	نیتروژن کل (%) Total N

در این روابط $M(x)$ تابع نمره‌دهی بیشتر-بهتر، $L(x)$ تابع نمره‌دهی کمتر-بهتر، $R(x)$ تابع نمره‌دهی دامنه بهینه، x_1 و x_2 به ترتیب حدود آستانه پایینی[1] و بالایی[2]، r_1 و r_2 به ترتیب مقادیر پایینی[3] و بالایی[4] دامنه بهینه و x مقدار ویژگی خاکی مورد نظر است.

تابع نمره‌دهی غیرخطی با استفاده از رابطه ۵ به دست آمد (۳).

$$NLS = \frac{1}{1 + (\frac{X}{X_m})^b} \qquad (۵)$$

در رابطه ۵، NLS تابع نمره‌دهی غیرخطی، X مقدار ویژگی خاک اندازه‌گیری شده، X_m میانگین ویژگی مورد نظر، b شیب معادله که برای معادله بیش‌تر- بهتر و کم‌تر- بهتر به ترتیب عدد ۲/۵- و ۲/۵+ استفاده می‌شود.

در نهایت شاخص کیفیت تجمعی (IQI) و شاخص کیفیت نمورو (NQI) به‌ترتیب بر اساس روابط ۶ (۱) و ۷ (۸) محاسبه شدند.

$$IQI = \sum_{i=1}^{N} W_i N_i \qquad (۶)$$

در رابطه ۶، W_i وزن ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک است که با استفاده از نسبت سهم[5] حاصل از تجزیه عامل[6] به مجموع سهم‌های مورد نظر به دست آمد (۳۴) و Ni نمره ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک می‌باشد.

$$NQI = \sqrt{\frac{P_{ava}^2 - P_{min}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n} \qquad (۷)$$

در این رابطه، P_{ave} میانگین امتیاز تعلق یافته به ویژگی‌های انتخاب شده در هر نمونه خاک، P_{min} حداقل امتیاز موجود در بین ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه و n تعداد ویژگی‌های مورد نظر است.

1- Lower threshold
2- Upper threshold
3- Lower value of optimal range
4- Upper value of optimal range

5- Community
6- Factor Analysis

شاخص حساسیت و درصد راندمان

جهت ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک، از شاخص حساسیت و درصد راندمان استفاده شد (۴۱):

$$SI = \frac{SQI_{max}}{SQI_{min}} \qquad (۸)$$

در رابطه ۸، SI شاخص حساسیت، SQI_{max}، SQI_{min} به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل شاخص کیفیت خاک در هر روش محاسباتی است، میزان شاخص حساسیت بالاتر نمایان‌گر مناسب بودن و حساسیت بیش‌تر شاخص مدنظر نسبت به تغییرات مدیریتی است.

$$ER = \left(\frac{K}{N}\right) \times 100 \qquad (۹)$$

در این رابطه، ER درصد راندمان، K تعداد همبستگی معنی‌دار بین شاخص کیفیت و ویژگی‌های خاک در هر روش محاسباتی، N تعداد ویژگی‌های خاک است. بالاتر بودن درصد راندمان نشان می‌دهد که کدام یک از شاخص‌های محاسباتی کیفیت برای شرایط کلی خاک کارآیی بهتری دارد. سرانجام، مقادیر شاخص حساسیت و درصد راندمان رتبه‌بندی شدند به طوری‌که بالاترین مقدار، رتبه ۱ و مقادیر پایین‌تر، به ترتیب دارای رتبه‌های بعدی بودند. جهت تصمیم‌گیری و اولویت‌دهی[1] شاخص کیفیت خاک مناسب، مجموع رتبه‌های شاخص حساسیت و درصد راندمان هر شاخص کیفیت خاک محاسباتی در نظر گرفته شد (۴۱).

نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگروف- اسمیرنوف[2] در نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور کاربری (در سه سطح) و عمق خاک (در دو سطح) در نرم افزار SAS نسخه ۹ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد و آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی و ضریب همبستگی پیرسون در نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. نمودارها توسط EXCEL رسم گردید.

نتایج و بحث

جدول ۲ خلاصه آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. تفاوت معنی‌دار ویژگی‌های خاک بین سه کاربری در هر دو عمق خاک وجود داشت. به جز مقدار سیلت و قابلیت هدایت الکتریکی سایر ویژگی های خاک به طور معنی داری ($p \leq 0.05$) بین سه کاربری در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر متفاوت بودند. در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر تفاوت معنی‌دار سه کاربری برای اغلب ویژگی‌ها به جز درصد سیلت، جرم مخصوص ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه، قابلیت هدایت الکتریکی و درصد ازت مشاهده شد.

شاخص حساسیت درصد شن، MWD، کربن آلی و ذخیره کربن در عمق صفر تا ۱۵ سانتی متری بیشتر از ۱/۵ بوده و شاخص حساسیت این ویژگی‌ها در عمق دوم کمتر از عمق اول بود (شکل ۲- الف). به عبارتی ویژگی‌های مذکور نسبت به سایر ویژگی‌ها به تغییر کاربری حساس‌تر بودند. سمیع و همکاران[3] (۳۸) در بررسی شاخص حساسیت کاربری‌های جنگل، مرتع و زراعی نشان دادند که که کلسیم کربنات معادل، ماده آلی، MWD و شاخص پایداری ساختمان خاک نسبت به سایر ویژگی‌ها به تغییر کاربری حساس‌تر بودند. در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی متری بالاترین شاخص حساسیت برای درصد شن، کربن آلی و ذخیره کربن مشاهده شد. بیش‌ترین شاخص حساسیت در عمق سطحی و زیر سطحی مربوط به درصد کربن آلی خاک بود (شکل۲- الف).

1- Priority
2- Kolmogorov- Smirnov
3- Samie *et al.*

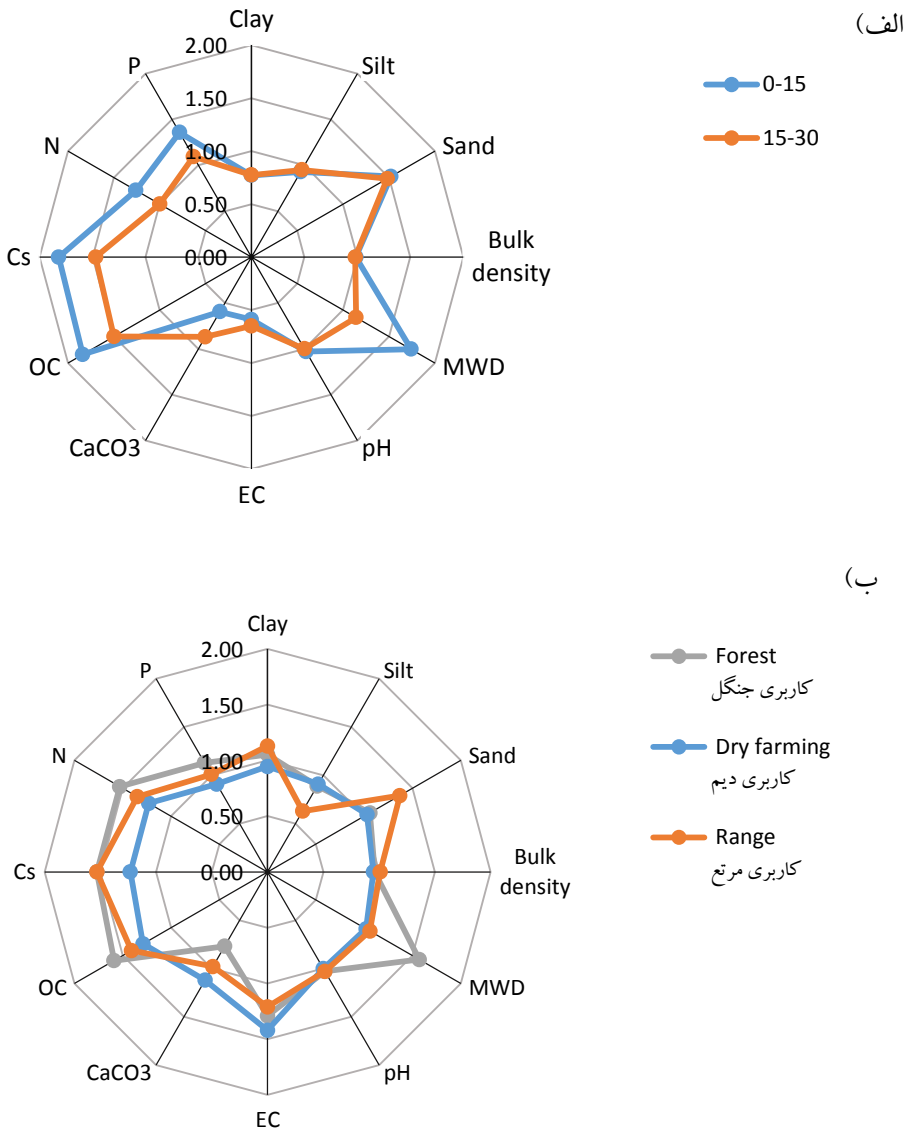
جدول (۲) توصیف آماری ویژگی‌های خاک

Table (2) Descriptive statistics of soil properties

کاربری مرتع Range		کاربری دیم Dry farming		کاربری جنگل Forest		عمق Depth (cm)	ویژگی خاک Soil property
انحراف معیار SE	میانگین Mean	انحراف معیار SE	میانگین Mean	انحراف معیار SE	میانگین Mean		
7.35	41.7 [a]	7.10	41.3[a]	6.37	33.7 [b]	0-15	رس Clay (%)
5.55	36.8 [b]	5.77	43.7 [a]	7.12	32.0[b]	15-30	رس Clay (%)
3.44	24.5 [a]	4.14	32.7 [a]	3.49	30.4 [a]	0-15	سیلت Silt (%)
4.43	38.6 [a]	5.76	35.8 [a]	2.65	34.1 [a]	15-30	سیلت Silt (%)
3.18	33.8 [a]	4.48	23.6 [b]	3.49	35.9 [a]	0-15	شن Sand (%)
5.67	24.6 [b]	5.87	22.9 [b]	3.99	33.9 [a]	15-30	شن Sand (%)
0.11	1.56 [a]	0.10	1. 48 [b]	0.09	1.46 [b]	0-15	جرم مخصوص ظاهری Bulk density ($g.\ cm^{-3}$)
0.09	1.54 [a]	0.13	1.55 [a]	0.11	1.52 [a]	15-30	جرم مخصوص ظاهری Bulk density ($g.\ cm^{-3}$)
0.52	2.21 [b]	0.42	1.96 [b]	0.43	3.42 [a]	0-15	میانگین وزنی قطر خاکدانه MWD (mm)
0.28	2.08 [a]	0.22	1.92 [a]	0.32	2.38 [a]	15-30	میانگین وزنی قطر خاکدانه MWD (mm)
0.73	7.5 [a]	0.63	6.5 [b]	0.50	6.7 [b]	0-15	واکنش خاک pH
0.57	7.4 [a]	0.47	6.5 [b]	0.64	6.5 [b]	15-30	واکنش خاک pH
0.05	0.8 [a]	0.04	3.2 [a]	0.03	1.9[a]	0-15	قابلیت هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)
0.03	0.7 [a]	0.03	2.2 [a]	0.05	1.5 [a]	15-30	قابلیت هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)
0.65	0.8 [c]	0.62	1.9 [b]	0.66	3.5 [a]	0-15	کربن آلی Organic carbon (%)
0.68	0.5 [b]	0.52	1.5 [a]	0.61	2.2 [a]	15-30	کربن آلی Organic carbon (%)
4.12	1.9 [b]	5.12	4.2 [b]	1.12	7.7 [a]	0-15	ذخیره کربن Carbon pool ($kg.m^{2}$)
4.98	1.2 [b]	4.98	3.4 [a]	1.43	5.0 [a]	15-30	ذخیره کربن Carbon pool ($kg.m^{2}$)
5.72	42.6 [a]	5.12	37.3 [a]	4.73	22.2 [b]	0-15	کلسیم کربنات معادل $CaCO_3$ (%)
7.34	43.4 [a]	7.54	33.4 [b]	3.56	29.1 [b]	15-30	کلسیم کربنات معادل $CaCO_3$ (%)
3.18	21.1 [b]	2.18	24.0 [b]	3.34	32.7 [a]	0-15	فسفر قابل دسترس Available P ($mg.\ kg^{-1}$)
2.52	21.0 [b]	2.12	26.5 [b]	2.66	29.0 [a]	15-30	فسفر قابل دسترس Available P ($mg.\ kg^{-1}$)
0.10	0.27[b]	0.07	0.27[b]	0.09	0.34 [a]	0-15	نیتروژن کل Total N (%)
0.09	0.20 [a]	0.09	0.22 [a]	0.11	0.22 [a]	15-30	نیتروژن کل Total N (%)

حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین کاربری‌های مختلف در هرعمق می‌باشد.

Same letters indicate non-significant differences at $P \leq 0.05$ in each soil depth among different land uses.



شکل (۲) الف) شاخص حساسیت ویژگی‌های خاک و ب) نسبت لایه‌بندی ویژگی‌های خاک. Bulk density: جرم مخصوص ظاهری، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه، OC: کربن آلی، Cs: ذخیره کربن، N: نیتروژن کل، P: فسفر قابل دسترس

Figure (2) a. Sensitivity index of soil properties, b. Stratification ratio of soil properties. MWD: Mean weight diameter of aggregates, OC: Organic carbon, CS: Carbon pool, N: Total N, P: Available P.

نسبت لایه‌بندی به عنوان یک شاخص کمی برای ارزیابی کیفیت خاک یا کارکرد خاک پیشنهاد شده است؛ بنابراین می‌تواند به عنوان ابزار مناسبی برای ارزیابی تغییرات کیفیت خاک مورد استفاده قرار گیرد. از آنجاییکه لایه‌بندی بسیاری از ویژگی‌های خاک با عمق در اکوسیستم‌های طبیعی، دست نخورده و یا کمتر دست خورده معمول‌تر است، بنابراین نسبت لایه‌بندی، پتانسیل کمی کردن تغییرات کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف اراضی یا بعد از تغییر کاربری اراضی را دارا است (۱۵ و ۲۹). نسبت لایه‌بندی در سه کاربری دیم، مرتع و جنگل به ترتیب در دامنه ۰/۹۱ تا ۱/۴۲، ۰/۶۳ تا ۱/۵۳ و ۰/۷۷ تا ۱/۵۹ بود. اغلب ویژگی‌های خاک در کاربری مرتع و جنگل در مقایسه با کاربری دیم از نسبت لایه‌بندی بیش‌تری برخوردار بودند

(شکل ۲-ب). مقادیر بیشتر نسبت لایه‌بندی برای اراضی مرتعی و جنگلی نسبت به اراضی زراعی توسط سایر پژوهشگران گزارش شده است (۳۷ ، ۳۵ و ۵). با تغییر پوشش گیاهی طبیعی به زیست بوم‌های کشاورزی، کیفیت خاک به دلیل مخلوط شدن خاک سطحی و زیر سطحی و کاهش لایه‌بندی ماده آلی خاک تنزل می‌یابد (۳۶). مقادیر نسبت لایه‌بندی بیش‌تر از ۱/۵ برای تشخیص اثر تغییر کاربری اراضی بر کیفیت خاک از اهمیت بیش‌تری برخوردار است (۱۵). بر همین اساس با توجه به مقادیر بیش‌تر از ۱/۵ نسبت لایه‌بندی MWD، کربن آلی، ذخیره کربن آلی و نیتروژن کل می‌توان اظهار داشت که این ویژگی‌ها می‌توانند تخریب کیفیت خاک در اثر تغییر کاربری را به‌خوبی نشان دهند (۳۵). نسبت لایه‌بندی بالاتر OC (۱/۵۹ در مقابل ۱/۲۹) و نیتروژن کل (۱/۵۳ در مقابل ۱/۲۳) در خاک جنگل نسبت به خاک های زراعی نشان دهنده ورودی‌های آلی بیشتر از طریق پوشش گیاهی طبیعی و خاک نسبتاً کمتر تخریب شده و با کیفیت بالاتر است (۱۵).

با استفاده از آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی (جدول ۳)، سه مولفه اصلی با ارزش ویژه بزرگ‌تر از ۱ با درصد واریانس تجمعی ۷۰/۵۸ استخراج شد، ویژگی‌های با بیش‌ترین سهم یا بزرگ‌ترین مقادیر بردار ویژه در مولفه اول با درصد واریانس ۴۲/۰۲ شامل درصد رس، شن و MWD بودند که به دلیل همبستگی بالای (r > 0.6) ویژگی‌ها (جدول ۴)، درصد رس با دارا بودن وزن بیش-تر در مجموعه داده حداقل قرار گرفت. در مولفه دوم با واریانس ۱۶/۲۲ درصد کربن آلی و ذخیره کربن دارای بالاترین وزن بودند و به دلیل همبستگی بالا ($r > 0.6$) تنها درصد کربن آلی در مجموعه داده حداقل قرار گرفت. در مولفه سوم با واریانس ۱۲/۳۴ MWD و فسفر قابل دسترس شامل ۱۰ درصد بالاترین وزن بودند و با توجه به همبستگی پایین (جدول ۴) هردو ویژگی به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب شدند.

تمامی ویژگی‌های خاکی با استفاده از توابع عضویت فازی بین مقادیر ۰/۱ تا یک امتیازدهی شدند و وزن‌های مجموعه TDS و MDS به دست آمدند (جدول ۵). به این ترتیب شاخص‌های تجمعی وزن‌دار و شاخص نمورو کیفیت خاک برای مجموعه ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک (TDS) و حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک (MDS) محاسبه شدند (جدول ۶).

نتایج نشان داد که میانگین شاخص کیفیت خاک به جز شاخص‌های IQI-LS و NQI-LS در مورد سایر شاخص‌ها اختلاف معنی‌داری بین سه کاربری نشان نمی‌دهند. در مورد شاخص کیفیت خاک IQI-LS برای هر دو مجموعه TDS و MDS، کمترین شاخص کیفیت خاک مربوط به کاربری مرتع بود که از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با دو کاربری دیگر نشان دادند. همچنین کمترین میانگین شاخص کیفیت خاک NQI-LS در مجموعه MDS برای کاربری مرتع به دست آمد که با دو کاربری جنگل و دیم اختلاف معنی‌داری نشان داد. بنابراین شاخص کیفیت خاک به روش نمره‌دهی خطی نسبت به روش نمره‌دهی غیرخطی تفاوت کیفیت خاک بین کاربری‌های مختلف را بهتر نشان می‌دهد. در سایر پژوهش‌ها (۱۸، ۴ و ۴۴) نیز برتری روش نمره‌دهی خطی بر غیرخطی به منظور ارزیابی کیفیت خاک در کاربری و مدیریت‌های مختلف کشاورزی گزارش شده است؛ با این حال امکان افزایش دقت روش‌های غیرخطی از طریق اصلاح پارامترهای مدل وجود دارد (۱۸). حمیدی نهرانی و همکاران[1] (۱۹) به منظور تعیین مناسب‌ترین ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک با آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی به بررسی ویژگی‌های خاک به طور جداگانه و مجموع کل ویژگی‌های خاک به روش نمره‌دهی خطی و غیرخطی در دو کاربری کشاورزی آبی و دیم پرداختند و نشان دادند که هر دو روش محاسباتی کارآیی لازم برای ارزیابی کیفیت خاک را داشتند و روش نمره‌دهی خطی در مقایسه با غیرخطی از معنی‌داری بالاتری برخوردار بود. کمالی و همکاران[2] (۲۱) در بررسی تعیین موثرترین ویژگی‌ها به منظور ارزیابی کیفیت خاک در اراضی کشاورزی دشت محمدشهر کرج گزارش کردند که شاخص IQI در مجموعه کل داده‌ها نسبت به شاخص NQI دارای دقت و حساسیت بیشتری برای ارزیابی کیفیت خاک بود؛ لیکن بررسی ضرایب تبیین، قابل اطمینان بودن استفاده از مجموعه حداقل داده‌ها

1- Hamidi Nehrani *et al.*
2- Kamali *et al.*

به جای مجموعه کل داده‌ها در هر دو مدل IQI و NQI را نشان داد.

هرچند که میانگین تمامی شاخص‌های کیفیت خاک تفاوت معنی‌داری در دو عمق نشان ندادند؛ با این‌حال عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متری هر سه کاربری در مقایسه با عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری از میانگین شاخص کیفیت خاک بالاتری برخوردار بود.

شاخص کیفیت خاک بیشتر در کاربری دیم نسبت به مرتع به دلیل حضور مقادیر بیشتر کربن آلی کاربری دیم در مقایسه با مرتع است (جدول ۲) چرا که که مراتع منطقه دارای پوشش گیاهی متوسط و تحت چرای شدید دام هستند ولی در اراضی دیم‌کاری که از عملکرد نسبتا خوبی برخوردار هستند، بازگشت مواد آلی بیشتر از مراتع است؛ همچنین استفاده از کود و وجود بقایای گیاهی در سطح زمین می‌تواند علت این امر باشد. دونووان و موناگان (۱۳) نیز دلیل کیفیت خاک کمتر اراضی مرتعی را مدیریت نامناسب اراضی و چرای مفرط بیان کردند.

جدول (۳) نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های خاک (۰-۳۰ سانتی‌متر) برای سه مؤلفه اول

Table (3) Results of principle component analysis for soil properties (0-30 cm) for the first 3 PCs

مولفه ۳ PC3	مولفه ۲ PC2	مولفه ۱ PC1	
			بردارهای ویژه Eigenvectors
-0.524	0.624	<u>-0.971</u>	رس (٪) Clay
0.261	-0.113	0.813	سیلت (٪) Silt
0.397	-0.691	0.887	شن (٪) Sand
0.337	-0.687	0.618	جرم مخصوص ظاهری ($g.cm^{-3}$) Bulk density
<u>-0.647</u>	-0.680	0.936	میانگین وزنی قطر خاکدانه (mm) MWD
-0.532	0.290	0.694	واکنش خاک pH
0.376	-0.364	-0.106	قابلیت هدایت الکتریکی ($dS.m^{-1}$) EC
0.472	<u>0.802</u>	0.476	کربن آلی (%) OC
0.417	0.761	0.461	ذخیره کربن ($kg.m^{2}$) Carbon pool
-0.592	0.119	0.738	کلسیم کربنات معادل (%) $CaCO_3$
<u>-0.591</u>	-0.537	-0.675	فسفر قابل دسترس ($mg.\ kg^{-1}$) Available P
-0.242	0.349	0.638	نیتروژن کل (%) Total N
1.28	2.06	7.05	ارزش ویژه Eigenvalue
12.34	16.22	42.02	درصد واریانس Percentage of variance
70.58	58.24	42.02	درصد واریانس تجمعی Cumulative percentage

اعداد پررنگ به‌عنوان بیشترین وزن در نظر گرفته شدند. اعداد پررنگ که زیر آنها خط کشیده شده است، به‌عنوان MDS انتخاب شدند.

Bold factor loadings are considered highly weighed, and underlined bold represent soil properties selected as MDS.

جدول(٤) ماتریس ضرایب همبستگی برای مؤلفه‌های با بیشترین وزن برای ۳ مؤلفه اول
Table(4) Correlations matrix s for the highly weighted variables under the first 3 PCs

Available P	Carbon pool	OC	MWD	Sand	Clay	
					1	رس (٪) Clay
				1	-0.866**	شن (٪) Sand
			1	-0.352*	0.616**	میانگین وزنی قطر خاکدانه (mm) MWD
		1	0.341*	0.154	0.495**	کربن آلی (%) OC
	1	0.996**	0.311*	0.113	0.425*	ذخیره کربن ($kg.m^2$) Carbon pool
1	0.256	0.307*	-0.202	0.082	0.342*	فسفر قابل دسترس ($mg.\ kg^{-1}$) Available P

** و * به ترتیب همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵ را نشان می‌دهد.
** and *indicate significant differences at 0.01 and 0.05 probability level, respectively.

.

جدول (۵) پارامترهای توابع نمره‌دهی خطی و غیر خطی و وزن ویژگی‌های TDS و MDS
Table (5) Parameters of non-linear and linear equations and weights of TDS and MDS

وزن Weight		تابع نمره‌دهی غیر خطی Nonlinear scoring function		تابع نمره‌دهی خطی Linear scoring function		
MDS	TDS	Slope	Mean	X_{min}	X_{max}	
0.26	0.07	- 2.5	38.2		43.7	رس Clay
	0.08	2.5	1.52	1.46		جرم مخصوص ظاهری Bulk density
0.12	0.12	- 2.5	2.16		2.72	میانگین وزنی قطر خاکدانه MWD
	0.06	- 2.5	6.85		7.5	واکنش خاک pH
	0.05	2.5	1.76	0.56		قابلیت هدایت الکتریکی EC
0.33	0.11	- 2.5	1.76		2.65	کربن آلی OC
	0.10	- 2.5	39.7		70.08	ذخیره کربن Carbon pool
	0.08	- 2.5	34.7		43.44	کلسیم کربنات معادل $CaCO_3$
0.29	0.10	- 2.5	0.26		32.7	فسفر قابل دسترس Available P
	0.11	- 2.5	25.7		0.33	نیتروژن کل Total N

جدول (٦) مقایسه میانگین شاخص‌های کیفیت خاک در کاربری و عمق‌های مختلف

Table (6) Comparison of mean soil quality indices in different land uses and depths

کاربری مرتع Range	کاربری دیم Dry farming	کاربری جنگل Forest	عمق (cm)		شاخص کیفیت خاک Soil quality index
0.52^{Ba}	0.59^{Aa}	0.65^{Aa}	0-15	TDS	IQI-LS
0.48^{Ba}	0.56^{Aa}	0.61^{Aa}	15-30		
0.48^{Ba}	0.57^{Aa}	0.63^{Aa}	0-15	MDS	
0.45^{Ba}	0.54^{Aa}	0.59^{Aa}	15-30		
0.47^{Aa}	0.52^{Aa}	0.57^{Aa}	0-15	TDS	IQI-NLS
0.44^{Aa}	0.46^{Aa}	0.51^{Aa}	15-30		
0.44^{Aa}	0.50^{Aa}	0.53^{Aa}	0-15	MDS	
0.42^{Aa}	0.48^{Aa}	0.50^{Aa}	15-30		
0.38^{Aa}	0.43^{Aa}	0.46^{Aa}	0-15	TDS	NQI-LS
0.37^{Aa}	0.40^{Aa}	0.42^{Aa}	15-30		
0.36^{Ba}	0.42^{Aa}	0.44^{Aa}	0-15	MDS	
0.34^{Ba}	0.39^{Aa}	0.38^{Aa}	15-30		
0.41^{Aa}	0.41^{Aa}	0.42^{Aa}	0-15	TDS	NQI-NLS
0.36^{Aa}	0.37^{Aa}	0.38^{Aa}	15-30		
0.32^{Aa}	0.38^{Aa}	0.36^{Aa}	0-15	MDS	
0.30^{Aa}	0.35^{Aa}	0.34^{Aa}	15-30		

(حروف بزرگ مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین کاربری‌های مختلف در هر عمق خاک می‌باشد. حروف کوچک مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین اعماق مختلف در هر کاربری می‌باشد.)

(Same capital letters indicate non-significant differences at $P \leq 0.05$ in each soil depth among different land uses. Same lowercase letters indicate non-significant differences at $P \leq 0.05$ in each land use among different soil depths.).

با محاسبه شاخص حساسیت می‌توان از بین شاخص‌های کیفیت خاک مختلف، شاخص کیفیت با کارآیی بیشتر را تعیین کرد (۳۰ و ۴۸). دامنه تغییرات و شاخص حساسیت برای شاخص‌های مختلف کیفیت خاک در جدول ۷ آورده شده است. مقادیر شاخص حساسیت نشان می‌دهد که شاخص‌های کیفیت خاک حاصل از روش‌های نمره دهی خطی نسبت به غیر خطی از شاخص حساسیت بالاتری برخوردار بودند(۳۶). بیشترین شاخص حساسیت برای IQI-LS-MDS و IQI-LS-TDS به ترتیب ۱/۵۶ و ۱/۴۰ به دست آمد (جدول ۷). درصد راندمان معیاری است که در بررسی کارآیی شاخص کیفیت خاک در توصیف وضعیت کلی خاک کاربرد دارد (۴۱). جهت دستیابی به نتایج درصد راندمان، همبستگی بین شاخص کیفیت خاک با ویژگی‌های TDS (۱۰ ویژگی) و MDS (۴ ویژگی) در نظر گرفته شد؛ برای هر یک از شاخص‌های کیفیت خاک، تعداد ویژگی‌هایی که دارای همبستگی معنی‌داری با شاخص کیفیت خاک مورد نظر بودند بر مجموع تعداد کل ویژگی‌ها تقسیم شد. مقادیر درصد راندمان نشان داد که شاخص‌های IQI-LS و IQI-NLS برای مجموعه MDS در مقایسه با TDS با دارا بودن میزان راندمان ۷۵ درصد از کارآیی بالاتری برخوردار بود (جدول ۸).

در نهایت و با فرض اینکه دو معیار شاخص حساسیت و درصد راندمان سهم و تاثیر یکسانی در انتخاب شاخص کیفیت خاک مناسب و کارآمد دارند (۴۱)، برای اولویت دهی شاخص‌های کیفیت خاک از مجموع دو معیار شاخص حساسیت و درصد راندمان استفاده شد (شکل ۳). از نظر شاخص حساسیت، IQI-LS-MDS دارای رتبه ۱ (شاخص حساسیت ۱/۵۶) و IQI-LS-TDS دارای رتبه ۲ (شاخص حساسیت ۱/۴۰) بوده و NQI-NLS-TDS با پایین‌ترین میزان شاخص حساسیت (۱/۱۷) در رتبه ۸ قرار گرفت.

هم‌چنین از نظر درصد راندمان، شاخص‌های IQI-LS-MDS و NQI-NLS-MDS دارای رتبه ۱ بودند. به این ترتیب براساس اولویت‌دهی شاخص‌های کیفیت خاک، IQI-LS-MDS در اولین رتبه و NQI-NLS-(TDS,MDS) در پایین‌ترین رتبه قرار می‌گیرد (شکل ۳).

جدول(۷) توصیف آماری و شاخص حساسیت برای شاخص‌های کیفیت خاک

Table(7) Descriptive statistics and sensitivity index of SQIs

NQI-NLS		NQI-LS		IQI-NLS		IQI-LS		
MDS	TDS	MDS	TDS	MDS	TDS	MDS	TDS	
0.30	0.36	0.33	0.35	0.43	0.45	0.43	0.48	حداقل Minimum
0.36	0.42	0.44	0.46	0.54	0.58	0.67	0.67	حداکثر Maximum
0.34	0.39	0.38	0.41	0.48	0.5	0.54	0.57	میانگین Average
1.20	1.17	1.33	1.31	1.26	1.29	1.56	1.40	شاخص حساسیت Sensitivity ratio
7	8	3	4	6	5	1	2	رتبه‌بندی Rank

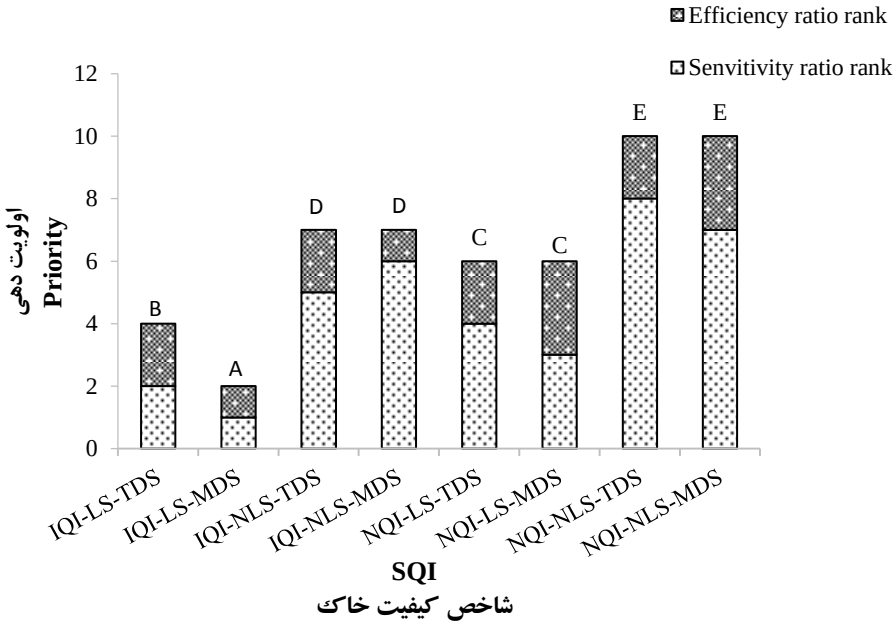
جدول(۸) درصد راندمان و همبستگی پیرسون شاخص‌های کیفیت خاک و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

Table(8) Efficiency ratio and correlation matrix between each SQIs value and soil indicators

NQI-NLS		NQI-LS		IQI-NLS		IQI-LS		
MDS	TDS	MDS	TDS	MDS	TDS	MDS	TDS	
0.46^{**}	0.54^{**}	0.48^{**}	0.60^{**}	0.52^{**}	0.66^{**}	0.57^{**}	0.69^{**}	رس Clay
-	-0.32^{*}	-	-0.47^{**}	-	-0.54^{**}	-	-0.57^{**}	جرم مخصوص ظاهری Bulk density
0.05	0.16	0.09	0.18	0.11	0.23	0.15	0.22	میانگین وزنی قطر خاکدانه MWD
-	0.15	-	0.16	-	0.15	-	0.18	واکنش خاک pH
-	-0.14	-	-0.17	-	-0.21	-	-0.21	قابلیت هدایت الکتریکی EC
0.48^{**}	0.56^{**}	0.59^{**}	0.64^{**}	0.65^{**}	0.68^{**}	0.69^{**}	0.71^{**}	کربن آلی OC
-	0.52^{**}	-	0.61^{**}	-	0.64^{**}	-	0.68^{**}	ذخیره کربن Carbon pool
-	0.17	-	0.19	-	0.22	-	0.24	کلسیم کربنات معادل $CaCO_3$
0.18	0.49^{**}	0.23	0.55^{**}	0.35^{**}	0.59^{**}	0.54^{**}	0.62^{**}	فسفر قابل دسترس Available P
-	0.46^{**}	-	0.49^{**}	-	0.59^{**}	-	0.65^{**}	نیتروژن کل Total N
50.0	60.0	50.0	60.0	75.0	60.0	75.0	60.0	درصد راندمان Efficiency ratio (%)
3	2	3	2	1	2	1	2	رتبه‌بندی Rank

** و * به ترتیب همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵ را نشان می‌دهد.

** and *indicate significant differences at 0.01 and 0.05 probability level, respectively.



شکل (۳) اولویت‌دهی شاخص‌های مختلف کیفیت خاک. (A اولین، B دومین،C سومین، D چهارمین، E پنجمین)

Figure (3) Prioritizing of various SQIs (A is first, B is second, C is third, D is fourth, and E is fifth priority)

IQI-LS-TDS: شاخص کیفیت تجمعی-نمره دهی خطی-مجموعه کل داده‌ها، IQI-LS-MDS: شاخص کیفیت تجمعی-نمره دهی خطی-مجموعه حداقل داده‌ها، IQI-NLS-TDS: شاخص کیفیت تجمعی-نمره دهی غیرخطی-مجموعه کل داده‌ها، IQI-NLS-MDS: شاخص کیفیت تجمعی-نمره دهی غیرخطی-مجموعه حداقل داده‌ها، NQI-LS-TDS: شاخص کیفیت نمورو-نمره دهی خطی-مجموعه کل داده‌ها، NQI-LS-MDS: شاخص کیفیت نمورو-نمره دهی خطی-مجموعه حداقل داده‌ها، NQI-NLS-TDS: شاخص کیفیت نمورو-نمره دهی غیرخطی-مجموعه کل داده‌ها، NQI-NLS-MDS: شاخص کیفیت نمورو-نمره دهی غیرخطی-مجموعه حداقل داده‌ها

نتیجه‌گیری

تغییر کاربری اراضی و توسعه کشاورزی می‌تواند منجر به تخریب، فرسایش و کاهش کیفیت خاک سطحی و زیرسطحی شود. در این مطالعه روش‌های مختلف محاسبه شاخص کیفیت خاک در سه کاربری جنگل، مرتع و دیم به منظور ارزیابی پیامد تغییر کاربری اراضی جنگلی در منطقه توتکابن استان گیلان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که چهار ویژگی شامل درصد رس، میانگین وزنی قطر خاکدانه، کربن آلی و فسفر قابل دسترس بیشترین تأثیر را بر کیفیت خاک در منطقه مورد مطالعه داشتند. اغلب ویژگی‌های خاک در کاربری مرتع و جنگل در مقایسه با کاربری دیم از نسبت لایه‌بندی بیش‌تری برخوردار بودند. نتایج نشان داد که میانگین شاخص کیفیت خاک به جز شاخص‌های IQI-LS و NQI-LS در مورد سایر شاخص‌ها اختلاف معنی‌داری بین سه کاربری نشان نمی‌دهند. بنابراین شاخص کیفیت خاک به روش نمره‌دهی خطی نسبت به روش نمره‌دهی غیرخطی تفاوت کیفیت خاک بین کاربری‌های مختلف را بهتر نشان می‌دهد. کمترین مقادیر IQI-LS و NQI-LS در مجموعه MDS برای کاربری مرتع به دست آمد که با دو کاربری جنگل و دیم اختلاف معنی‌داری نشان داد. بر اساس اولویت‌دهی نهایی و با در نظر گرفتن مجموع رتبه‌های شاخص حساسیت و درصد راندمان مشخص شد که IQI-LS-MDS در اولین رتبه قرار گرفته است بر این اساس می‌توان اظهار داشت که شاخص مذکور کارآمدترین و مناسب‌ترین شاخص کیفیت خاک در منطقه مورد مطالعه است که می‌تواند برای بررسی وضعیت کلی خاک و تغییر در شیوه‌های مدیریتی در اثر تغییر کاربری در منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار گیرد.

Reference

1. Andrews, S. S., Karlen, D. L., and Mitchell, J. P. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. Agriculture, ecosystems and environment, 90(1): 25-45.

2. Armenise, E., Redmile-Gordon, M. A., Stellacci, A. M., Ciccarese, A., and Rubino, P. 2013. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. Soil and Tillage Research, 130: 91-98.

3. Askari, M. S., and Holden, N. M. 2014. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. Geoderma, 230: 131-142.

4. Askari, M. S., and Holden, N. M. 2015. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. Soil and Tillage Research, 150: 57-67.

5. Babu, S., Mohapatra, K. P., Yadav, G. S., Lal, R., Singh, R., Avasthe, R. K., Das, A., Chandra, P., Gudade, B. A., and Kumar, A. 2020. Soil carbon dynamics in diverse organic land use systems in North Eastern Himalayan ecosystem of India. Catena, 194: 104785.

6. Bakhshandeh, E., Hossieni, M., Zeraatpisheh, M., and Francaviglia, R. 2019. Land use change effects on soil quality and biological fertility: a case study in northern Iran. European Journal of Soil Biology, 95: 103119.

7. Banaei, H. M. 1998. Soil moisture and temperature regimes map of Iran (1: 2500000). Soil and Water Research Institute. (in Persian)

8. Bi, C. J., Chen, Z. L., Wang, J. and Zhou, D. 2013. Quantitative assessment of soil health under different planting patterns and soil types. Pedosphere, 23(2): 194-204

9. Blake, G. R., and Hartge, K. H. 1986. Bulk density. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods, 5: 363-375.

10. Cao, Z. H., and Zhou, J. M. 2008. Soil quality of China.Science Press, Beijing.

11. Corral-Fernández, R., Parras-Alcántara, L., and Lozano-García, B. 2013. Stratification ratio of soil organic C, N and C: N in Mediterranean evergreen oak woodland with conventional and organic tillage. Agriculture, ecosystems and environment, 164: 252-259.

12. Davari, M., Gholami, L., Nabiollahi, K., Homaee, M., and Jafari, H. J. 2020. Deforestation and cultivation of sparse forest impacts on soil quality (case study: West Iran, Baneh). Soil and Tillage Research, 198: 104504.

13. Donovan, M., and Monaghan, R., 2021, Impacts of grazing on ground cover, soil physical properties and soil loss via surface erosion: A novel geospatial modelling approach, Journal of Environmental Management, 287: 112206.

14. Fang, X., Xue, Z., Li, B., and An, S. 2012. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China. Catena, 88: 6-13.

15. Franzluebbers, A. J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. Soil and Tillage Research, 66(2): 95-106.

16. Gee, G. W., Bauder, J. W., and Klute, A. 1986. Methods of soil analysis, part 1, physical and mineralogical methods. Soil Science Society of America Book Series. American Society of Agronomy, Inc. and Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, 404-410.

17. Govaerts, B., Sayre, K. D., and 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.

18. Guo, L., Sun, Z., Ouyang, Z., Han, D., and Li, F. 2017. A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River. Catena, 152: 135-143.

19. Hamidi Nehrani, S., Askari, M. S., Saadat, S., Delavar, M. A., and Taheri, M. 2020. Using multivariate analysis to evaluate soil quality in agricultural lands of Zanjan province. Applied Soil Research, 8(2): 158-173. (in Persian with English abstract)

20. Hesse, P. R. 1971. A text book of soil chemical analysis. John Murray. London. 556 p.

21. Kamali, K., Zehtabian, G., Mesbahzadeh, T., Arabkhedri, M., Shohab Arkhazloo, H., and Moghadamnia, A. 2021. Determining the most effective properties to evaluate soil quality of agriculture lands in Mohammadshahr plain of Karaj. Water and Soil, 35(2), 251-266. (in Persian with English abstract)

22. Kavian, A., Azmoodeh, A., and Solaimani, K. 2014. Deforestation effects on soil properties, runoff and erosion in northern Iran. Arabian Journal of Geosciences, 7(5): 1941-1950.

23. Kemper, W. D., and Rosenau, R. C. 1986. Aggregate stability and size distribution.

24. Knudsen, D., Peterson, G. A. and Pratt, P. F. 1982. Lithium, sodium and potassium. In: A.L. Page (Ed.). Methods of Soil Analysis. Part 2. America Society of Agronomy. Madison, WI. pp. 225-246.

25. Li, D., Gao, G., Lü, Y., and Fu, B. 2016. Multi-scale variability of soil carbon and nitrogen in the middle reaches of the Heihe River basin, northwestern China. Catena, 137: 328-339.

26. Liu, J., Wu, L.C., Chen, D., Yu, Z.G., Wei, C.J., 2018. Development of a soil quality index for Camellia oleifera forestland yield under three different parent materials in southern China. Soil and Tillage Research. 176, 45–50.

27. Liu, Z., Zhou, W., Shen, J., Li, S., He, P., and Liang, G. 2014. Soil quality assessment of Albic soils with different productivities for eastern China. Soil and Tillage Research, 140, 74-81.

28. Macias, M.D.G., Carbajal, N., Vargas, J.T., 2020. Soil deterioration in the southern Chihuahuan Desert caused by agricultural practices and meteorological events. J. Arid Enviro. 176: 104-097.

29. Madejón, E., Murillo, J.M., Moreno, F., López, M.V., Arrue, J.L., Alvaro-Fuentes, J.,Cantero, C., 2009. Effect of long-term conservation tillage on soil biochemicalproperties in Mediterranean Spanish areas. Soil and Tillage Research. 105: 55–62.

30. Mamehpour, N., S. Rezapour, and N. Ghaemian. 2021. Quantitative assessment of soil quality indices for urban croplands in a calcareous semi-arid ecosystem. Geoderma 382: 114781.

31. Molaei Arpnahi, M., Salehi, M., Karimian Egbal, M., and Mosleh, Z. 2020. Effect of land-use change on some physical and chemical indices of soil quality in the Bazoft region, (Chaharmahal-va-Bakhtiari province). Water and Soil, 34(3): 707-720. (in Persian with English abstract)

32. Nabiollahi, K., Golmohamadi, F., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., and 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.

33. Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S. and Dean, L. A. 1954. Estimation of Available Phosphorous in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate. U.S. Department of Agriculture: Washington, D.C., USDA Circ. 939.

34. 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: 19-26.

35. Raiesi, F. 2017. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. Ecological Indicators, 75: 307-320.

36. Sa, J. C. D. M., and Lal, R. 2009. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. Soil and Tillage Research, 103(1): 46-56.

37. Salek-Gilani, S., Raiesi, F., Tahmasebi, P., Ghorbani, N., 2013. Soil organic matter inrestored rangelands following cessation of rainfed cropping in a mountainoussemi-arid landscape. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 96: 215–232.

38. Samie, F., Yaghmaeian Mahabadi, N., Abrishamkesh, S., Maslahatjou, A. 2022. Impact of land use change on erodibility and soil quality indicators (case study: Sidasht, Guilan Province), Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization, (Scientific Journal of Agriculture), 45(1): 58-78. (in Persian with English abstract)

39. Santos-Francés, F., Martínez-Graña, A., Ávila-Zarza, C., Criado, M. and Sánchez-Sánchez, Y., 2021. Soil quality and evaluation of spatial variability in a semi-arid ecosystem in a region of the Southeastern Iberian Peninsula (Spain). Land, 11(1), p.5.

40. Shah Piri, A., Kooch, Y., and Dianati Tilaki, G. A. 2021. Evaluation of soil quality indicators in degraded and converted forest habitats to rangeland in western Mazandaran. Iranian Journal of Soil and Water Research, 52(3): 857-867. (in Persian with English abstract)

41. Sheidai Karkaj, E., A. Sepehry, H. Barani, J. Motamedi, and F. Shahbazi. 2019. Establishing a suitable soil quality index for semi-arid rangeland ecosystems in northwest of Iran. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 19(3): 648-658.

42. Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Leoppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, G. T. and Summer, M. E. 1996. Methods of Soil Analysis, Soil Science Society of American Journal. Book Series No. 5.

43. Walkley, A., and 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.

44. Yaghmaeian Mahabadi, N., Fayyaz, H., Sabouri, A., and Shirinfekr, A. 2021. Comparison of Soil Quality Evaluation Methods and Their Relationships with Tea Yield in West Guilan Province. Iranian Journal of Soil Research, 34(4): 435-450. (in Persian with English abstract)

45. Yu, P., Han, D., Liu, S., Wen, X., Huang, Y., and Jia, H. 2018. Soil quality assessment under different land uses in an alpine grassland. Catena, 171: 280-287.

46. Zeraatpisheh, M., Bakhshandeh, E., Hosseini, M. and Alavi, S.M., 2020. Assessing the effects of deforestation and intensive agriculture on the soil quality through digital soil mapping. Geoderma, 363, p.114139.

47. Zhang, Y., Xu, X., Li, Z., Xu, C. and Luo, W. 2021. Improvements in soil quality with vegetation succession in subtropical China karst. Science of the Total Environment, 775: 145876.

48. Zhou, M., Y. Xiao, Y. Li, X. Zhang, G. Wang, J. Jin, G. Ding, and X. Liu. 2022. Soil quality index evaluation model in responses to six-year fertilization practices in Mollisols. Archives of Agronomy and Soil Science 68(2): 180-194.

49. Zhou, Y., Ma, H.B., Xiea, Y.B., J., Su, T., Lia, j., and Shena, Y.B., 2020. Assessment of soil quality indexes for different land use types in typical steppe in the loess hilly area, China Ecological Indicators. 118: 106-743.