

Effect of Alfalfa Cultivation and Maize-Wheat Rotation on Soil Quality in Semi-arid Agroecosystem

O. Eghbali ¹, H. Emami ^{1*}, R. Khorassani ¹

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: hemami@um.ac.ir)

Received: 04 September 2025

Revised: 08 October 2025

Accepted: 27 October 2025

Available Online: 27 October 2025

How to cite this article:

Eghbali, O., Emami, H., & Khorassani, R. (2025). Effect of alfalfa cultivation and maize-wheat rotation on soil quality in semi-arid agroecosystem. *Journal of Water and Soil*, 39(4), 417-429. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.95221.1498>

Introduction

Agronomic management is a set of field practices that not only influence plant growth and yield but also affect the soil physical, chemical, and biological properties. The selection of the crop species and cropping systems - monoculture or crop rotation, significantly affects soil attributes and plays an important role on enhancing nutrient cycling, increasing organic matter content, reducing erosion, and ultimately promoting the sustainability of agricultural ecosystems. Therefore, an appropriate cropping strategy can be regarded as a key strategy for sustainable soil management. Evaluating soil quality through physical, chemical, and fertility indicators provides a comprehensive understanding of soil status, which is essential for developing effective management strategies and long-term planning for sustainable land use. This study was performed to assess soil quality under alfalfa cultivation and compare it with a maize-wheat rotation in a single cropping season.

Materials and Methods

This study was conducted during the 2020–2021 cropping season at the research farm of Ferdowsi University of Mashhad, located in Khorasan Razavi Province, northeastern Iran. Two adjacent fields with different agronomic management systems were selected: (i) alfalfa (*Medicago sativa* L.) monoculture, which had been continuously cultivated for several years without rotation, and (ii) a maize-wheat (*Zea mays* L.–*Triticum aestivum* L.) rotation system, a typical cereal-based cropping pattern in the region. These two systems were chosen to evaluate the long-term effects of continuous legume cultivation versus crop rotation on soil quality attributes. The experimental design was a randomized complete block design (RCBD) with three replications. Soil samples were collected after harvesting the crops and were taken from three depths (0–10, 10–20, and 20–30 cm). Eleven soil properties including pH, electrical conductivity (EC), calcium carbonate equivalent (CCE), total nitrogen (TN), available phosphorus (P), available potassium (K), mean weight diameter (MWD) of soil aggregates (both wet and dry methods), soil structure stability index (SI), saturated hydraulic conductivity (Ks), and organic carbon (OC) were measured. The minimum data set (MDS) was identified using principal component analysis (PCA). Subsequently, the soil quality index (SQI) was calculated based on both the total data set (TDS) and MDS.

Results and Discussion

Using MDS approach, the number of soil properties was reduced, and the most important variables were selected. Among the principal components (PCs), only those with eigenvalues greater than one were retained. For both the alfalfa and the maize-wheat rotation, four components explaining more than 80% of the total variance were selected. In the alfalfa, the selected variables included organic carbon, total nitrogen, calcium carbonate equivalent, and MWD of wet and dry sieving. In the maize-wheat rotation, the selected variables included organic



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.95221.1498>

carbon, EC, calcium carbonate equivalent, and MWD under both wet and dry sieving conditions. The observed EC in this rotation system likely reflects the influence of evaporation and fertilization practices on soil salinity. Evaluation of SQI across different soil depths and two agronomic management systems revealed that soils under the alfalfa monoculture exhibited higher quality compared to the maize-wheat rotation, particularly in the surface layer (0–10 cm). These findings emphasize the crucial role of continuous plant cover in maintaining soil organic matter, reducing surface erosion, facilitating nitrogen fixation through rhizobial symbiosis, improving soil aggregate stability, and enhancing soil biological activity in perennial systems such as alfalfa. These processes may improve nutrient availability and foster long-term soil sustainability. Soil depth significantly influenced SQI trends. The decline in SQI with increasing depth in the maize-wheat rotation reflects reduced biological activity and limited nutrient availability in the deep layers, whereas soils in the alfalfa system had relatively higher SQI values even at the deep depths, indicating the potential of deep-rooted legumes to enhance subsoil quality through extended root penetration and associated biological processes.

Conclusion

This study revealed that the alfalfa monoculture considerably enhanced soil quality compared to the maize-wheat rotation, particularly at the soil surface (0–10 cm). The most important soil properties that improved soil quality were OC, TN, CCE, and MWD. The presence of continuous plant cover, biological nitrogen fixation, and reduced tillage in the alfalfa cultivation played vital roles in increasing soil OM, reducing erosion, and improving SI. The application of MDS approach proved to be a reliable, efficient, and cost-effective method for soil quality evaluation. These findings highlight the potential of perennial legume-based systems, such as alfalfa, in enhancing soil quality and sustainability in semi-arid agroecosystems. Long-term monitoring of soil quality under alfalfa monoculture is recommended for sustainable land management.

Keywords: Agronomic management, Rotation, Soil quality index (SQI)

تأثیر کشت یونجه و تناوب ذرت-گندم بر کیفیت خاک در اکرواکوسیستم نیمه خشک

امید اقبالی^۱ - حجت امامی^{۱*} - رضا خراسانی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵

چکیده

مدیریت زراعی نقشی کلیدی در حفظ کیفیت خاک و پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی دارد. این پژوهش با هدف مقایسه تأثیر کشت یونجه (سیستم تک کشتی) و ذرت-گندم (تناوب) بر کیفیت خاک در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد در سال زراعی ۱۳۹۹-۴۰۰ انجام شد. نمونه‌های خاک از اعماق ۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متر پس از برداشت محصول، جمع‌آوری و ۱۱ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک (پهش، هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم، نیتروژن کل، فسفر قابل استفاده، پتاسیم قابل استفاده، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش‌های تر و خشک، شاخص پایداری ساختمان خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و کربن آلی) اندازه‌گیری و محاسبه شدند. مجموعه حداقل داده‌ها (MDS) با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) تعیین شد و شاخص کیفیت خاک (SQI) با روش‌های مجموعه کل داده‌ها (TDS) و MDS محاسبه گردید. براساس نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای کشت یونجه و تناوب ذرت-گندم، ۴ مؤلفه با مقدار ویژه بزرگتر از یک که بیش از ۸۰ درصد واریانس کل داده‌ها را در برداشتند، انتخاب گردید که برای یونجه، کربن آلی، نیتروژن کل، کربنات کلسیم معادل و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت‌های تر و خشک و در مورد تناوب ذرت-گندم، کربن آلی، هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت‌های تر و خشک انتخاب شدند. نتایج نشان داد که خاک زیر کشت یونجه در مقایسه با تناوب ذرت-گندم، به‌ویژه در لایه سطحی (۰-۱۰ سانتی‌متر) کیفیت بهتری (رده کیفی II) داشت، درحالی‌که خاک در تناوب ذرت-گندم در رده‌های ضعیف‌تر (III و IV) قرار گرفت. پوشش دائمی خاک، نوع ریشه و تثبیت نیتروژن در یونجه به بهبود مواد آلی و پایداری ساختمان خاک کمک کرد، در صورتی‌که خاک‌ورزی مکرر در تناوب موجب کاهش کیفیت خاک شد. این یافته‌ها بر اهمیت کاشت گیاهان چند ساله برای مدیریت پایدار خاک و افزایش ماده آلی در مناطق نیمه خشک تأکید دارد و همچنین استفاده از MDS روشی کارآمد و جایگزین برای ارزیابی کیفیت خاک است.

واژه‌های کلیدی: تناوب، شاخص کیفیت خاک، مدیریت زراعی

مقدمه

(Shah et al., 2021)، اختلال در چرخه آفات و بیماری‌های گیاه (Zani et al., 2023)، کاهش علف‌های هرز (Otto et al., 2023) و بهبود چرخه عناصر غذایی (Jin et al., 2024) به بهبود سلامت خاک کمک می‌کند. در مقابل، سیستم تک کشتی بر پایه کشت مداوم یک گیاه استوار است که به دلیل پوشش دائمی خاک باعث بهبود پایداری خاک در درازمدت می‌شود اما کاهش تنوع عناصر غذایی را به همراه دارد (Bowles et al., 2020). شاخص کیفیت خاک^۲ ابزاری برای اندازه‌گیری و پایش سلامت

مدیریت زراعی شامل خاک‌ورزی، تناوب زراعی، مدیریت تغذیه، ماده آلی، آبیاری و سیستم‌های مالچ‌پاشی خاک است (Al-Shammary et al., 2024) که با تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، در حفظ کیفیت خاک، پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی و حفاظت از محیط‌زیست نقش اساسی دارد (Sepaskhah, 2016). تناوب زراعی شامل کاشت گونه‌های مختلف گیاهان زراعی است که با افزایش مواد آلی و کاهش فرسایش خاک

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(Email: hemami@um.ac.ir)

(*- نویسنده مسئول)

خاک در طول زمان است (Dambia et al., 2024) که با بررسی ویژگی‌هایی مانند بافت، ماده آلی، پ هاش، فعالیت میکروبی و دسترسی به عناصر غذایی تصویری جامع از وضعیت خاک ارائه می‌دهد (Chaudhry et al., 2024). شاخص کیفیت خاک نه تنها وضعیت فعلی خاک را منعکس می‌کند بلکه می‌تواند اثرات بالقوه روش‌های مختلف کشاورزی بر سلامت بلندمدت خاک را نیز نشان دهد. به این ترتیب، شاخص کیفیت خاک می‌تواند به عنوان راهنمایی برای مدیریت پایدار اراضی عمل کرده و به بهینه‌سازی هم‌زمان بهره‌وری کشاورزی و تعادل زیست‌محیطی کمک نماید (Cherubin et al., 2016).

انتخاب ویژگی‌هایی از خاک که به بهترین وجه وضعیت کیفیت خاک را نشان دهند، بسیار مهم است. به‌طور کلی مجموعه‌های متفاوتی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی برای تعیین شاخص کیفیت خاک معرفی شده‌اند که شاخص کیفیت خاک را بر اساس مجموعه کل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک^۱ تعیین می‌کنند (Emami et al., 2014; Aparicio et al., 2007). برای سهولت اندازه‌گیری شاخص کیفیت خاک، تعداد محدودتری از ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک به عنوان مجموعه حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک^۲ پیشنهاد شد که ضمن داشتن همبستگی زیاد با مجموعه کل داده‌ها، موجب سهولت اندازه‌گیری شاخص کیفیت خاک و کاهش هزینه نیز می‌شود (Govaerts et al., 2006). قائمی و همکاران (Ghaemi et al., 2013). کفه و همکاران (Kafe et al., 2022) با بررسی کیفیت خاک زیرکشت تناوب گندم-ذرت و همچنین خاک زیرکشت گندم، نتیجه گرفتند استفاده از MDS برای محاسبه کیفیت خاک مانند TDS، ارزیابی دقیقی از SQI ارائه می‌دهد. سامایی و همکاران (Samaei et al., 2022) با بررسی ۱۸ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی در عمق ۲۰-۵۰ سانتی‌متر خاک به عنوان TDS تعیین ۱۰ ویژگی به عنوان MDS در اراضی زیرکشت گندم و مرتع، ضمن تأیید همبستگی مثبت بین MDS و TDS با شاخص کیفیت خاک، کاهش کیفیت خاک اراضی زیر کشت گندم را در مقایسه با مرتع به دلیل کاهش کربن آلی، کاهش تعداد باکتری و فشردگی خاک گزارش کردند. دی و همکاران (De et al., 2022) اراضی کشاورزی، جنگل و تبدیلی (از جنگل به کشاورزی) را از نظر شاخص کیفیت خاک بررسی و بیان کردند که خاک‌های جنگلی به دلیل تجمع مواد آلی و عدم دخالت انسانی، بیشترین مقدار کربن آلی، پایداری خاکدانه و فعالیت میکروبی را نسبت به اراضی کشاورزی و تبدیلی داشت. بیشترین مقدار شاخص کیفیت خاک مربوط به جنگل، اراضی تبدیلی و در نهایت زمین کشاورزی بود. شخم بیش از حد، تناوب‌های زراعی فاقد حبوبات و کشت گیاهان پرمصرف از علل کاهش کیفیت خاک

زمین کشاورزی عنوان شد. صادقیان و همکاران (Sadeghian et al., 2018) با مقایسه سیستم تک کشتی گندم، تناوب گندم-ماش و مدیریت بقایا بر سلامت خاک، گزارش کردند که سیستم تک کشتی منجر به افزایش معنی‌دار پ هاش و شوری خاک شد. تناوب زراعی بر مواد آلی، تنفس میکروبی و کربن فعال خاک نسبت به سیستم تک کشتی اثر مثبت داشت. شالیکار و همکاران (Shalika et al., 2009) بیان کردند کیفیت خاک در تناوب برنج-باقلا و شبدر نسبت به سیستم تک کشتی برنج به دلیل بهبود شاخص‌های کیفیت خاک شامل ماده آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، جرم مخصوص ظاهری خاک، مقدار تنفس میکروبی و میزان کربن توده زنده میکروبی افزایش نشان داد. ثروتی (Servati, 2019) بهبود کیفیت خاک زیرکشت برنج در عمق ۵۰-۰ سانتی‌متر در تناوب با خانواده بقولات (شبدر) به دلیل افزایش معنی‌دار ویژگی‌های خاک شامل ماده آلی، تنفس میکروبی، کربن توده زنده میکروبی، ظرفیت تبادل کاتیونی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نسبت به سیستم تک کشتی برنج و تناوب برنج-گندم را گزارش نمود.

در مورد مدیریت زراعی و نقش آن بر کیفیت خاک به سهیم سیستم کاشت (تک کشت یا تناوب) گیاهان با سیستم‌های ریشه‌ای متفاوت کمتر پرداخته شده است. همچنین عمده پژوهش‌های انجام شده در مورد کیفیت خاک در لایه سطحی خاک متمرکز بوده است (عمدتاً ۰-۱۰ سانتی‌متر). در صورتی که بیشتر ویژگی‌های خاک مانند کربن آلی، پایداری خاکدانه‌ها و ... با عمق تغییر می‌کنند. بنابراین، با توجه به اهمیت گیاهان در کشاورزی پایدار و کیفیت خاک و با در نظر گرفتن عمق خاک، پژوهشی با هدف بررسی تأثیر سیستم تک کشتی یونجه و تناوب ذرت-گندم بر کیفیت خاک در عمق‌های متفاوت انجام شد.

مواد و روش‌ها

مکان پژوهش

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد (۲۳° ۴۰' ۵۹" شرقی و ۱۸° ۱۴' ۳۶" شمالی) در دو قطعه زمین مجاور هم با بافت لوم سیلتی انجام شد. اقلیم منطقه خشک و نیمه خشک با میانگین دمای سالانه ۱۳/۴ درجه سانتی‌گراد و بارندگی سالانه ۹۲/۴ میلی‌متر بود. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و آب آبیاری قبل از کاشت تعیین شدند (جداول ۱ و ۲).

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل مطالعه

Table 1- Some physical and chemical properties of the soil of study site

کربن آلی	پتاسیم قابل استفاده	فسفر قابل استفاده	نیترژن کل	هدایت الکتریکی	په‌اش	کلاس بافت خاک
OC	K	P	N	EC	pH	Soil texture class
%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	dS m ⁻¹	-	-
0.37	1.25	0.50	0.055	0.80	8.54	Silt loam

جدول ۲- برخی ویژگی‌های آب آبیاری

Table 2- Some irrigation water properties

نسبت جذب سدیم	بی‌کربنات	کربنات	پتاسیم	سدیم	منیزیم	کلسیم	هدایت الکتریکی	په‌اش	منبع
SAR	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻²	K	Na	Mg	Ca	EC	pH	Source
-	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	dS m ⁻¹	-	-
1.50	2.60	0.10	0.12	2.92	2.96	4.64	0.72	8.1	چاه

پتاسیم قابل استفاده خاک به روش استات آمونیوم (Carter & Gregorich, 2007) اندازه‌گیری شدند.

بافت خاک به روش پدیت (Gee & Bauder, 1986) و برای تعیین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خاک (MWD) به روش تر و خشک، از مجموعه‌ای از الک‌ها با قطرهای ۴، ۲، ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی‌متر استفاده شد (Van Bavel, 1949). خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند و پس از توزین و تصحیح شن، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در هر دو حالت مرطوب و خشک با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد.

$$MWD = \sum (X_i \times W_i) \quad (1)$$

در معادله (۱)، X_i میانگین قطر منافذ دو الک متوالی را نشان می‌دهد و W_i نشان‌دهنده نسبت جرمی توده خاک باقی‌مانده در هر الک به کل جرم خاک پس از اصلاح شن است. شاخص پایداری ساختمان خاک (SI) که برای ارزیابی ساختمان در خاک‌های کشت شده به کار می‌رود، بر اساس معادله ۲ و متغیرهای در صد کربن آلی (OC)، رس (Clay) و سیلت (Silt) تعیین شد (Pieri, 1992).

$$SI = \frac{1/724 \times OC}{Silt + Clay} \times 100 \quad (2)$$

مقدار SI برابر با ۵ در صد یا کمتر نشان‌دهنده تخریب ساختمان خاک ناشی از کاهش قابل توجه در مقدار کربن آلی خاک است. اگر $5 \leq SI \leq 7$ باشد، خطر بالای تخریب ساختمان خاک به دلیل محتوای کربن آلی ناکافی را نشان می‌دهد. اگر مقدار $9 \leq SI \leq 7$ باشد، نشان‌دهنده خطر نسبتاً پایین تخریب ساختمان خاک است. نهایتاً اگر مقدار SI بیش از ۹ درصد باشد، نشان‌دهنده وجود مقدار کافی کربن آلی در خاک است که پایداری ساختمان خاک را تضمین می‌کند (Reynolds et al, 2009).

هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) در نمونه‌های دست نخورده (در لوله‌های پلی‌اتیلنی با قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر) به روش بار ثابت

طرح آزمایشی و عملیات میدانی

آزمایش در دو قطعه زمین با مدیریت زراعی متفاوت (تک‌کشتی یونجه و تناوب ذرت-گندم) با طرح آزمایشی بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. قبل از کاشت گیاهان عملیات خاک‌ورزی انجام و بستر کاشت آماده شد. گیاهان گندم (*T. aestivum* L.) واریته پیشگام، ذرت (*Zea mays*) واریته ۱۲۸۰ و یونجه (*Medicago sativa* L.) واریته همدانی جهت کاشت انتخاب شدند. بذر یونجه به صورت ردیفی در شهریور ۱۳۹۹ کشت شدند. گندم و ذرت نیز به صورت ردیفی کشت شدند. یونجه در شهریور ۱۳۹۹ کشت شد. ذرت در اواخر اردیبهشت ۱۳۹۹ کشت و در پاییز برداشت شد و سپس عملیات خاک‌ورزی انجام شده و گندم در اواخر مهر کشت و در اواخر خرداد ۱۴۰۰ برداشت گردید. پس از برداشت، نمونه‌های خاک از ۳ عمق ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰ و ۳۰-۴۰ سانتی‌متر از هر دو قطعه زمین و در سه تکرار برداشت شدند. شایان ذکر است که یونجه به مدت ۶ سال و ذرت و گندم نیز به مدت ۳ سال در زمین‌های مذکور کشت شده بود.

اندازه‌گیری و محاسبه برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک

ویژگی‌های خاک شامل کربنات کلسیم معادل خاک با استفاده از روش تیتراسیون برگشتی با سود (NaOH) تعیین شد (Sims, 1996). ماده آلی خاک به روش اکسایش تر (Walkley & Black, 1934) اندازه‌گیری شد. pH در گل اشباع با دستگاه pH متر و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع با دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد (Rhoades, 1996). فسفر قابل استفاده خاک به روش اولسن (Olsen & Sommers, 1986) و استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر، نیترژن کل خاک با کج‌لدال (Bremner & Mulvaney, 1983) و

تعیین شد. معادله (۳)، برای تعیین K_s استفاده شد (Klute & Dirksen, 1986).

$$K_s = \frac{V \times L}{\Delta H \times A \times t} \quad (3)$$

در این معادله، V ، L ، ΔH ، A و t به ترتیب نشان دهنده حجم آب خروجی از ستون خاک، ارتفاع ستون خاک، اختلاف پتانسیل هیدرولیکی دو سر ستون خاک، سطح مقطع ستون خاک و مدت زمان رسیدن به تعادل است.

تعیین شاخص کیفیت خاک شامل سه مرحله کلیدی است: (۱) تعریف یک مجموعه حداقل داده (۲) تخصیص امتیاز به هر شاخص با استفاده از توابع ریاضی (خطی یا غیرخطی) و (۳) یکپارچه سازی داده ها در یک شاخص ترکیبی (Karlen et al., 2003).

در ابتدا شاخص کیفیت خاک با استفاده از کل مجموعه داده ها^۲ در هر عمق خاک برای ۱۱ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک که به فعالیت های مدیریتی حساس بودند، محاسبه شد. سپس تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) برای شناسایی مؤلفه های اصلی (PCs) و مقادیر ویژه (EVs) به کار گرفته شد (Andrews et al., 2002; Doran & Parkin, 1994). برای هر مؤلفه با مقدار ویژه بزرگ تر از یک، متغیرهایی با بالاترین ضرایب بارگذاری انتخاب شدند و متغیرهایی که اختلاف ۱۰ درصدی با بالاترین ضریب بارگذاری در هر مؤلفه داشتند، به عنوان مجموعه MDS انتخاب شدند. شاخص کیفیت خاک با استفاده از مجموعه حداقل داده ها (MDS) و مجموعه کل داده ها (TDS) تعیین شدند.

برای بیان شاخص های مؤثر بر کیفیت خاک به صورت یک شاخص کلی از توابع استاندارد امتیازدهی خطی بر اساس مقادیر حداقل و حداکثر اندازه گیری شده استفاده شد. مقادیر حداقل و حداکثر متغیرها به ترتیب به عنوان حد پایین و حد بالای شاخص ها در نظر گرفته شدند. براساس این روش، ویژگی های مختلف خاک از سه نوع تابع پیروی می کنند: (۱) تابعی که در آن مقادیر بیشتر برای ویژگی های خاک باعث بهبود کیفیت خاک می شود (مانند کربن آلی) (Andrews et al., 2002; ۲) تابعی که در آن مقادیر کمتر برای ویژگی های خاک موجب افزایش کیفیت خاک می شود (مانند هدایت الکتریکی) (Doran & Parkin, 1994) و (۳) تابعی بهینه برای ویژگی هایی که مقادیر بالاتر یا پایین تر از محدوده بهینه (مانند pH)، کیفیت خاک را کاهش می دهد (Kafe et al., 2022; Fox & Metla, 2005).

برای وزن دهی به شاخص ها نسبت سهم هر شاخص به مجموع کل مقادیر سهم مجموعه های داده های کل (TDS) و حداقل (MDS) استفاده شد (Shukla et al., 2006). شاخص کیفیت یکپارچه خاک (IQI)^۳ بر اساس معادله (۴) محاسبه شد (Doran & Parkin, 1994).

(1994).

$$IQI_w = \sum_{i=1}^n w_i N_i \quad (4)$$

در رابطه ۴؛ N_i نشان دهنده امتیاز هر عامل، w_i وزن تعیین شده برای هر عامل و n تعداد معیارها را نشان می دهد. داده ها با نرم افزار SPSS (نسخه ۲۶) تحلیل و میانگین ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند.

نتایج و بحث

یازده ویژگی فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک که به فعالیت های زراعی و مدیریتی حساس هستند به عنوان مجموعه کل داده ها (TDS) انتخاب شدند. این ویژگی ها شامل: pH، هدایت الکتریکی (EC)، کربن آلی (OC)، کربنات کلسیم ($CaCO_3$)، نیتروژن کل (N)، فسفر قابل استفاده (P)، پتاسیم قابل استفاده (K)، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، شاخص پایداری ساختمان خاک (SI)، میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک (MWD_{dry}) و میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت مرطوب (MWD_{wet}) هستند (جدول ۳). برای انتخاب حداقل ویژگی های مؤثر (MDS) بر کیفیت خاک از تجزیه به مؤلفه اصلی (PCA) استفاده شد.

انتخاب حداقل داده به روش PCA

نتایج تجزیه به مؤلفه های اصلی ویژگی های خاک یونجه و تناوب ذرت-گندم در **جدول ۴** و **۵** آمده است. با تعیین حداقل ویژگی های مؤثر (MDS)، تعداد ویژگی های خاک کاهش یافت و ویژگی های مؤثر انتخاب شدند. از بین PC های به دست آمده فقط آن هایی که مقدار ویژه بزرگتر از یک داشتند، انتخاب شدند که برای یونجه و تناوب ذرت-گندم، ۴ مؤلفه که بیش از ۸۰ درصد واریانس کل داده ها را در بردارند، انتخاب شدند.

جدول ۴ تجزیه به مؤلفه های اصلی خاک زیرکشت یونجه را نشان می دهد. در مؤلفه اول ویژگی های OC و N بیشترین مقدار را داشتند که اختلاف آن ها کمتر از ۱۰ درصد بود. در مؤلفه دوم $CaCO_3$ ، مؤلفه سوم MWD_{wet} و در مؤلفه چهارم MWD_{dry} بیشترین مقادیر را داشتند که انتخاب شده و MDS نهایی یونجه را تشکیل دادند. در مورد تناوب ذرت-گندم مؤلفه اول شامل EC، OC و N بیشترین مقادیر را داشتند که اختلاف آن ها کمتر از ۱۰ درصد بود. همبستگی بین این ویژگی ها محاسبه شد تا ویژگی دارای بیشترین ضریب واریانس انتخاب شود که در نهایت N حذف شد و OC و EC انتخاب شدند. در مؤلفه دوم $CaCO_3$ ، مؤلفه سوم MWD_{dry} و در

نهایت در مؤلفه چهارم MWD_{wet} انتخاب شدند (جدول ۵).

ارزیابی وزن ها برای مجموعه کل داده ها (TDS) و حداقل داده ها (MDS)

سهم هر ویژگی حاصل از تحلیل عاملی (FA) در دو مجموعه کل داده (TDS) و مجموعه حداقل داده (MDS) برای دو مدیریت (تک کشتی گیاه یونجه و دو کشتی تناوب ذرت-گندم) در جدول ۶ و ۷ آورده شده است. در هر دو نوع مدیریت زراعی، شاخص های کربن آلی، نیتروژن کل، کربنات کلسیم و میانگین وزنی قطر خاکدانه ها در حالت خشک و تر دارای بیشترین سهم و وزن نسبی در مدل MDS بودند؛ به گونه ای که بیشترین بار اطلاعاتی و نقش در تبیین کیفیت خاک را به خود اختصاص دادند. در مدل TDS نیز همین شاخص ها در کنار دیگر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی مانند pH، EC، فسفر قابل استفاده و هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) وارد محاسبات شدند، اما سهم آن ها نسبت به شاخص های انتخاب شده در MDS کمتر بود.

طبقه بندی شاخص کیفیت خاک

کیفیت خاک دو مدیریت متفاوت زراعی در جدول ۹ آورده شده است. طبقه بندی کیفیت خاک براساس کلاس بندی کی و همکاران (Qi et al., 2009) ارزیابی شد (جدول ۸). طبق این طبقه بندی، درجه کیفی I نشان دهنده مناسب ترین حالت خاک برای رشد گیاه است. درجه II کیفیت مناسب خاک برای رشد گیاه را نشان می دهد، اما برخی محدودیت ها برای رشد وجود دارد. درجه III نشان دهنده محدودیت شدیدتر نسبت به درجه II است و درجه کیفی IV نشان دهنده محدودیت های شدید برای رشد گیاهان است.

جدول ۳- میانگین ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک زیر کشت تناوب (ذرت-گندم) و یونجه

Table 3- Average amounts of physical and chemical properties of the soil under rotation crops (maize-wheat) and alfalfa

ویژگی خاک Soil properties	واحد Unit	یونجه Alfalfa			تناوب Rotation		
		0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
پهش	-	7.50	7.75	7.62	7.34	7.55	7.46
pH							
هدایت الکتریکی	dS m ⁻¹	0.41	0.60	0.83	0.95	1.40	1.35
EC							
کربن آلی	%	1.70	0.90	0.55	0.49	0.35	0.35
OC							
کربنات کلسیم	%	6.15	6.60	5.90	13.00	10.55	12.80
CaCO ₃							
نیتروژن کل	%	0.07	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04
N							
فسفر قابل استفاده	mg Kg ⁻¹	5.00	2.00	2.20	8.00	7.58	7.00
P							
پتاسیم قابل استفاده	mg Kg ⁻¹	24.00	19.20	17.59	37.14	30.00	28.50
K							
هدایت هیدرولیکی اشباع	cm min ⁻¹	1.45	0.70	0.40	0.40	0.34	0.23
Ks							
شاخص پایداری ساختمان	%	1.55	0.70	0.75	1.21	0.91	0.84
SI							
میانگین وزنی قطر خاکدانه (خشک)	mm	2.00	1.51	1.25	2.24	2.15	2.52
MWD_{dry}							
میانگین وزنی قطر خاکدانه (تر)	mm	0.54	0.26	0.14	0.12	0.18	0.08
MWD_{wet}							

جدول ۴- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های خاک زیرکشت یونجه

Table 4- Results of principal component analysis of soil properties under alfalfa cultivation

	PC1	PC2	PC3	PC4
مقدار ویژه	4.350	2.600	1.750	1.100
Eigen values				
واریانس (%)	39.545	23.636	15.909	9.999
Variance (%)				
درصد تجمعی (%)	39.545	63.181	79.090	89.089
Cumulative variance				
پ‌هاش	0.420	0.180	-0.110	0.200
pH				
هدایت الکتریکی	-0.680	-0.220	0.140	-0.100
EC				
کربن آلی	0.800	0.100	-0.050	0.050
OC				
کربنات کلسیم	0.100	0.780	0.180	-0.120
CaCO ₃				
نیتروژن کل	0.760	-0.120	0.100	0.080
N				
فسفر قابل استفاده	0.540	0.240	0.220	0.150
P				
پتاسیم قابل استفاده	-0.180	-0.600	0.100	-0.100
K				
شاخص پایداری ساختمان خاک	0.650	-0.250	-0.100	0.250
SI				
هدایت هیدرولیکی اشباع	0.350	-0.420	-0.150	-0.200
Ks				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک	0.400	-0.150	-0.580	-0.520
MWD _{dry}				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر	0.300	-0.180	-0.640	-0.480
MWD _{wet}				

PC: ترکیب اصلی

نیز مقدار شاخص کیفیت خاک برای خاک زیرکشت گندم را ۰/۳۰۶ و ۰/۲۶۶ (به ترتیب برای TDS و MDS) به دست آوردند (رده IV) که مهمترین دلیل آن کاهش کربن آلی خاک بیان کرد. رضانی و همکاران (Ramezani et al., 2016) کمبود مواد آلی، کاهش تخلخل تهویه‌ای، افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک و تراکم ناشی از تردد ادوات کشاورزی را در کاهش کیفیت خاک مؤثر دانستند. بر اساس نتایج رنجبر و همکاران (Ranjbar et al., 2015) هفت ویژگی خاک شامل کربنات کلسیم، آهن، روی، درصد شن، درصد کربنات کلسیم معادل، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و منگنز نقش بسزایی در کیفیت خاک مزارع زیر کشت زعفران در منطقه قاین داشتند (Ranjbar et al., 2015) و کیفیت خاک‌های زیرکشت زعفران در منطقه قائن در کلاس III و IV قرار داشتند (Ranjbar et al., 2016).

نتایج ارزیابی شاخص کیفیت خاک (SQI) در عمق‌های مختلف خاک و تحت دو مدیریت زراعی متفاوت نشان داد که خاک در سیستم تک‌کشتی یونجه در مقایسه با تناوب ذرت-گندم به‌ویژه در لایه سطحی (۱۰-۰ سانتی‌متر) از کیفیت بالاتری برخوردار است. نتایج حاصل از محاسبه شاخص کیفیت خاک (SQI) با استفاده از روش‌های TDS و MDS نشان داد که مدیریت تک‌کشتی یونجه در مقایسه با تناوب ذرت-گندم اثرات بهتری بر بهبود کیفیت خاک داشته است. در عمق سطحی (۱۰-۰ سانتی‌متر)، شاخص کیفیت خاک در مدیریت یونجه بر اساس هر دو روش محاسبه در رده II (کیفیت خوب) قرار گرفت، در حالی که کیفیت خاک در همین عمق در تناوب ذرت-گندم در روش TDS در رده III و در روش MDS در رده IV (ضعیف) طبقه‌بندی شد. سمایی و همکاران (Samaei et al., 2022)

جدول ۵- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های خاک تناوب ذرت-گندم
Table 5- Results of principal component analysis of soil properties under maize-wheat rotation

	PC1	PC2	PC3	PC4
مقدار ویژه	4.050	2.800	1.650	1.200
Eigen values				
واریانس (%)	36.818	25.455	15.000	10.909
Variance (%)				
درصد تجمعی (%)	36.818	62.273	77.273	88.182
Cumulative variance				
پ‌هاش	0.500	0.150	-0.100	0.120
pH				
هدایت الکتریکی	-0.740	-0.100	0.120	-0.080
EC				
کربن آلی	0.720	0.200	-0.100	0.040
OC				
کربنات کلسیم	0.180	0.750	0.120	-0.200
CaCO ₃				
نیتروژن کل	0.700	-0.180	0.080	0.100
N				
فسفر قابل استفاده	0.480	0.300	0.280	0.120
P				
پتاسیم قابل استفاده	-0.140	-0.570	0.350	0.100
K				
شاخص پایداری ساختمان خاک	0.620	-0.300	-0.150	0.220
SI				
هدایت هیدرولیکی اشباع	0.300	-0.480	-0.220	-0.150
Ks				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک	0.420	-0.100	-0.600	-0.480
MWD _{dry}				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر	0.380	-0.120	-0.580	-0.500
MWD _{wet}				

PC: مؤلفه اصلی

سطحی خاک متمرکزند. در زمین‌های زراعی با افزایش عمق، مقادیر عناصر غذایی پرمصرف کاهش می‌یابد که علت آن را به جذب توسط گیاهان، آبشویی و فرسایش نسبت می‌دهند (Malo et al., 2005). در تناوب ذرت-گندم کاهش شدیدتر شاخص کیفیت در اعماق متفاوت بیانگر حساسیت بیشتر خاک زیرکشت نسبت به کاهش کیفیت خاک در غیاب مدیریت‌های حفاظتی مؤثر است. مقایسه بین مدل‌های TDS و MDS نشان داد که اگرچه مدل TDS به دلیل استفاده از داده‌های بیشتر دارای جزئیات بیشتری است اما مدل MDS با بهره‌گیری از حداقل شاخص‌های کلیدی (OC, N, CaCO₃، MWD_{dry} و MWD_{wet})، قادر به ارائه نتایجی با دقت قابل قبول است. براساس محاسبه شاخص کیفیت خاک به دو روش TDS و MDS مشخص شد که نوع مدیریت زراعی نقش مؤثری بر سطح کیفیت خاک دارد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که حفظ پوشش گیاهی چندساله و عدم برهم‌زدن مکرر خاک، کلید حفظ و ارتقاء کیفیت خاک در اراضی زراعی مناطق نیمه خشک محسوب می‌شود.

این نتایج بیانگر نقش مؤثر پوشش دائمی گیاهی و بازگشت بقایای گیاهی در حفظ مواد آلی، کاهش فرسایش سطحی، تثبیت نیتروژن توسط باکتری‌های ریزوبیومی، بهبود پایداری خاکدانه‌ها و افزایش فعالیت‌های زیستی خاک در سیستم‌های تک‌کشتی گیاهان چندساله مانند یونجه است (Qi et al., 2023; Yang et al., 2019). درمقابل، کیفیت خاک در تناوب ذرت-گندم در محدوده کیفیت ضعیف برای TDS و MDS قرار گرفت، که این کاهش کیفیت خاک را می‌توان به عملیات خاک‌ورزی بیشتر، برداشت بقایای گیاهی و مواد آلی کمتر در این نظام زراعی نسبت داد که سبب تضعیف ساختمان خاک و کاهش فعالیت‌های میکروبی در خاک می‌شود. همچنین نوسان در ساختمان خاک با تغییرات رطوبتی ناشی از تنوع کشت می‌تواند منجر به تضعیف ویژگی‌های فیزیکی خاک گردد (Ghaemi et al., 2013).

با افزایش عمق، کاهش تدریجی در مقادیر شاخص کیفیت خاک مشاهده شد که روندی طبیعی و مورد انتظار است، زیرا فرآیندهای بیولوژیکی، تجمع مواد آلی و تأثیرات مدیریتی بیشتر در لایه‌های

جدول ۶- تخمین سهم و ارزش هر شاخص کیفیت خاک با استفاده از روش‌های کل داده و حداقل داده در کشت یونجه
 Table 6- Estimated communality and weight values of each soil quality indicator in TDS and MDS in alfalfa

	TDS		MDS	
	سهم Communality	وزن Loading	سهم Communality	وزن Loading
پ‌هاش	0.682	0.067	-	-
pH				
هدایت الکتریکی	0.548	0.054	-	-
EC				
کربن آلی	0.755	0.074	0.768	0.209
OC				
کربنات کلسیم	0.625	0.061	0.642	0.175
CaCO ₃				
نیتروژن کل	0.665	0.065	0.677	0.184
N				
فسفر قابل استفاده	0.574	0.056	-	-
p				
پتاسیم قابل استفاده	0.532	0.052	-	-
K				
شاخص پایداری ساختمان خاک	0.595	0.059	-	-
SI				
هدایت هیدرولیکی اشباع	0.580	0.057	-	-
ks				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک	0.635	0.063	0.641	0.174
MWD _{dry}				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر	0.532	0.052	0.536	0.146
MWD _{wet}				

جدول ۷- تخمین سهم و ارزش هر شاخص کیفیت خاک با استفاده از روش‌های کل داده و حداقل داده در تناوب ذرت-گندم
 Table 7- Estimated communality and weight values of each soil quality indicator in TDS and MDS in maize-wheat rotation

	TDS		MDS	
	سهم Community	وزن Loading	سهم Community	وزن Loading
پ‌هاش	0.702	0.069	-	-
pH				
هدایت الکتریکی	0.573	0.056	-	-
EC				
کربن آلی	0.782	0.077	0.790	0.212
OC				
کربنات کلسیم	0.648	0.064	0.658	0.176
CaCO ₃				
نیتروژن کل	0.698	0.069	0.682	0.183
N				
فسفر قابل استفاده	0.589	0.058	-	-
p				
پتاسیم قابل استفاده	0.519	0.051	-	-
K				
شاخص پایداری ساختمان خاک	0.612	0.060	-	-
SI				
هدایت هیدرولیکی اشباع	0.588	0.058	-	-
ks				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک	0.661	0.065	0.665	0.178
MWD _{dry}				
میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر	0.541	0.053	0.543	0.146
MWD _{wet}				

جدول ۸- معیارهای تقسیم‌بندی درجه کیفیت خاک در روش‌های مختلف
Table 8- Criteria for soil quality grade divisions in different methods

مدل شاخص کیفیت خاک	روش	درجه کیفی خاک			
Soil quality index model	Indicator method	Soil quality grade			
		I	II	III	IV
IQI	TDS	$IQI_{TDS} \geq 0.76$	$0.76 > IQI_{TDS} \geq 0.66$	$0.66 > IQI_{TDS} \geq 0.56$	$0.56 > IQI_{TDS}$
	MDS	$IQI_{MDS} \geq 0.78$	$0.78 > IQI_{MDS} \geq 0.68$	$0.68 > IQI_{MDS} \geq 0.58$	$0.58 > IQI_{MDS}$

جدول ۹- طبقه‌بندی کیفیت خاک برای مدیریت تک کشتی (یونجه) و تناوب (ذرت-گندم)

Table 9- Classification of soil quality in monoculture (alfalfa) and rotation (maize-wheat) management

	عمق خاک Soil depth (cm)	MDS	درجه کیفیت خاک	
			TDS	درجه کیفیت خاک Soil quality grade
تک کشتی (یونجه) Monoculture (alfalfa)	0-10	0.763	0.728	II
	10-20	0.606	0.598	III
	20-30	0.545	0.538	IV
	0-10	0.541	0.589	III
تناوب ذرت-گندم Rotation (maize-wheat)	10-20	0.470	0.497	IV
	20-30	0.435	0.463	IV

نتیجه‌گیری

فرسایش، و بهبود پایداری خاک کمک کرد در حالی که خاک‌ورزی مکرر و برداشت بقایای گیاهی در تناوب ذرت-گندم به کاهش کیفیت خاک منجر شد.

نتایج این پژوهش بر اهمیت انتخاب سیستم‌های زراعی پایدار برای حفظ سلامت خاک در مناطق نیمه‌خشک تأکید دارد. کاشت یونجه به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای بهبود کیفیت خاک و افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌های کشاورزی در مناطق نیمه‌خشک ایران پیشنهاد می‌شود. استفاده از مجموعه حداقل داده‌ها (MDS) نیز به‌عنوان روشی کارآمد و کم‌هزینه برای ارزیابی کیفیت خاک می‌تواند در مدیریت دقیق اراضی کشاورزی به کار گرفته شود. این یافته‌ها راهنمایی برای کشاورزان و سیاست‌گذاران در راستای ارتقای مدیریت پایدار خاک و دستیابی به اهداف امنیت غذایی و حفاظت محیط‌زیست ارائه می‌دهد.

این مطالعه نشان داد که مدیریت زراعی با سیستم تک‌کشتی یونجه در مقایسه با تناوب ذرت-گندم، به‌ویژه در لایه سطحی خاک (۱۰-۰ سانتی‌متر)، کیفیت خاک را به‌طور معنی‌داری بهبود می‌بخشد. شاخص کیفیت خاک (SQI) در سیستم تک‌کشتی یونجه، با استفاده از مجموعه کل داده‌ها (TDS) و همچنین مجموعه حداقل داده‌ها (MDS)، در رده کیفی خوب (II) قرار گرفت، در حالی که تناوب ذرت-گندم در رده‌های ضعیف‌تر (III و IV) طبقه‌بندی شد. ویژگی‌های کلیدی مانند کربن آلی، نیتروژن کل، کربنات کلسیم، و پایداری خاکدانه‌ها (MWD_{dry} و MWD_{wet}) نقش اصلی در تبیین کیفیت خاک داشتند. پوشش دائمی گیاهی، تثبیت نیتروژن توسط ریزوبیوم‌ها و کاهش خاک‌ورزی در سیستم یونجه، به حفظ مواد آلی، کاهش

References

- Al-Shammary, A.A.G., Al-Shihmani, L.S.S., Fernandez-Galvez, J., & Caballero-Calvo, A. (2024). Optimizing sustainable agriculture: A comprehensive review of agronomic practices and their impact on soil attributes. *Journal of Environmental Management*, 364, 121487, 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121487>
- Andrews, S.S., Karlen, D.L., & Mitchell, J.P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in north California. *Agriculture Ecosystems, Environment*, 90(1), 25-45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
- Aparicio, V., & Costa, J.L. (2007). Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean pampas. *Soil & Tillage Research*, 96, 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.05.006>
- Bowles, T.M., Mooshammer, M., Socolar, Y., Calderon, F., Cavigelli, M.A., Culman, S.W., Deen, W., Drury, C.F., Garcia, A.G., Gaudin, A.C.M., Harkcom, W.S., Lehman, R.M., Osborne, Sh.L., Robertson, G.Ph., Salerno, J., Schmer, M.R., Srstock, J., & Grandy, A.S. (2020). Long-term evidence shows that crop-rotation diversification increases agricultural resilience to adverse growing conditions in north America. *One Earth*, 2(3), 284-293. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.007>
- Bremner, J.M., & Mulvaney, C.S. (1983). Nitrogen-total. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and*

- microbiological properties*, 9, 595-624. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>
6. Carter, M.R., & Gregorich, E.G. (Eds.). (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press.
 7. Chaudhry, H., Vasava, H.B., Chen, S., Saurette, D., Beri, A., Gillespie, A., & Biswas, A. (2024). Evaluation the soil quality index using three methods to assess soil fertility. *Sensors*, 24(3), 864. <https://doi.org/10.3390/s24030864>
 8. Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Cerri, C.E.P., Franco, A.L.C., Tormena, C.A., Davies, C.A., & Cerri, C.C. (2016). Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *Plos ONE*, 11(3), e0150860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>
 9. Dambia, W.A.F., Gathenya, J.M., Raude, J.M., & Home, P.G. (2024). Soil quality index (SQI) for evaluating the sustainability status of Kakia-Esamburmbur catchment under three different land use types in Narok county, Kenya. *Heliyon*, 10(5), e25611. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25611>
 10. De, P., Deb, S., Deb, D., Chakraborty, S., Santra, P., Dutta, P., Hoque, A., & Choudhury, A. (2022). Soil quality under different land uses in eastern India: evaluation by using soil indicators and quality index. *Plos One*, 17(9), 1-17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275062>
 11. Doran, J.W., & Parkin, T.B. (1994). Defining, assessing soil quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (Eds), *Defining soil quality for a sustainable environment*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA, pp. 3-21. Special Publication. Number 35. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35>
 12. Emami, H., Astaraei, A.R., & Fotovat, A. (2014). Evaluating the effect of organic matter on soil quality score functions. *Journal of Water and Soil*, 28(3), 565-574. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.22840>
 13. Fox, G.A., & Metla, R. (2005). Soil property analysis using principal components analysis, soil line, regression models. *Soil Science Society of America Journal*, 69(6), 1782-1788. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0362>
 14. Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Methods of Soil Analysis, part 1, physical and mineralogical methods. *Soil Science Society of America, American Society of Agronomy*. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
 15. Ghaemi, M., Astaraei, A.R., Sanaeinejad, S.H., Nassiri Mahalati, M., & Emami, H. (2013). Chemical quality assessment of wheat-maize cultivated soil by using soil quality models in an agricultural region of southeast Mashhad. *Journal of Soil Research*, 27(4), 463-473. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.4067/s0718-95162014005000077>
 16. 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 & Tillage Research*, 87, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.005>
 17. Jin, X., Yang, X., Peng, S., Ma, E., Zhang, H., Lin, X., Wang, Y., & Li, J. (2024). Cropping rotation improved the bacterial diversity and N-cycling genes in tobacco fields through a 19-year long-term experiment. *Applied Soil Ecology*, 193, 105165. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105165>
 18. Kafe, F., Dalalian, M.R., Rezapour, S., Sabbaghtazeh, E., & Rafieyan, O. (2022). Determination of minimum data set to evaluate soil quality in piranshahr region wheat fields. *Applied Soil Research*, 11(4), 30-42. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.30466/ASR.2024.121443>
 19. Karlen, D.L., Andrews, S.S., Doran, J.W., & Wienhold, B.J. (2003). Soil quality: human kind's foundation for survival. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58(4), 171-179. <https://doi.org/10.1080/00224561.2003.12457524>
 20. Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 687-734. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c28>
 21. Malo, D.D., Schumacher, T.E., & Doolittle, J.J. (2005). Long-term cultivation impacts on selected soil properties in the northern Great Plain. *Soil & Tillage Research*, 81, 277-291. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.09.015>
 22. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1986). Phosphorous. *Methods of Soil Analysis. Part 2*, Soil Science Society of American Journal. Madison, WI. Pp. 403-427. In: Page AL, Miller RH and Keeney DR (Eds).
 23. Otto, S., Masin, R., Nikolic, N., Berti, A., & Zanin, G. (2023). Effect of 20-years crop rotation and different strategies of fertilization on weed seedbank. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 354, 108580. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108580>
 24. Pieri, C.J.M.G. (1992). Fertility of soils: a future for farming in the west African Savannah. *Springer Science & Business Media*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-84320-4>
 25. Qi, J., Fu, D., Wang, X., Zhang, F., & Ma, Ch. (2023). The effect of alfalfa cultivation on improving physicochemical properties soil microorganisms' community structure of grey desert soil. *Nature Portfolio*, 13, 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41005-8>
 26. Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., & Gu, Z. (2009). Evaluation soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu province, China. *Geoderma*, 149, 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015>
 27. Ramezani, F., Jafari, S., Salavati, A., & Khalili Moghaddam, B. (2016). Study the soil quality changes indicators using nemro and integrated quality index models in some Khuzestan's soils. *Journal of Water and Soil*, 29(6), 1629-1639. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v29i6.35514>
 28. Ranjbar, A., Emami, H., Karimi, A.R., & Khorassani, R. (2015). Determining the most important soil properties

- affecting the yield of saffron in the Ghayenat area. *Journal of Water and Soil*, 29(3), 673-682. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.31230>
29. Ranjbar, A., Emami, H., Khorasani, R., & Karimi Karouyeh, A.R. (2016). Soil quality assessments in some Iranian saffron field. *Journal of Agricultural Science, Technology*, 18(3), 865-878. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/20.1001.1.16807073.2016.18.3.4.6>
 30. 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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
 31. Rhoades, J.D. (1996). Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. *Method of soil analysis*, parss: chemical methods. Madison. Wisconsin, USA. 417-436. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
 32. Sadeghian, A., Sayyad, Gh.A., Farokhian Firouzi, A., & Norouzi Masir, M. (2018). Effect of agronomic management on some chemical and biological indicators of soil health. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(3), 269-280. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.14281.2905>
 33. Samaei, F., Emami, H., & Lakzian, A. (2022). Assessing soil quality of pasture, agriculture land uses in shandiz county, northwestern Iran. *Ecological Indicators*, 139, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108974>
 34. Sepaskhah, A.R. (2016). A menu of solutions to the food security challenge in Iran. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 1(1), 23-34. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22047/srjasnr.2016.110527>
 35. Servati, M. (2019). Selection of the most suitable crop rotation in aras river margin, based on assessing soil qualitative indicators. *Water and Soil Science*, 28(4), 155-165. (In Persian with English abstract)
 36. Shah, K.K., Mondi, B., Pandey, H.P., Sabedi, A., Aryal, G., Pandey, M., & Shrestha, J. (2021). Diversified crop rotation: An approach for sustainable agriculture production. *Advances in Agriculture*, 2021, 8924087: 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/8924087>
 37. Shalika, O.H., Ayoubi, Sh., Khormali, F., & Ghorbani Nasrabadi, R. (2009). Assessmen of soil quality indicators in different rice rotation sstems in dasht-sar district, Amol, Mazandaran province. *Journal of Agriculture Science Natural Resource*, 15(6), 64-74.
 38. Shukla, M.K., Lal, R., & Ebinger, M. (2006). Determing soil quality indicators by factor analysis. *Soil & Tillage Research*, 87(2), 194-204. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.011>
 39. Sims, J.T. (1996). Lime requirement. *Methods of Soil Analysis*: part 3: Chemical methods, 5, 491-515. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c17>
 40. Van Bavel, C.H.M. (1949). Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Proceedings. Soil Science Society of America Journal*, 14, 20-23. <https://doi.org/10.2136/sssaj1950.036159950014000c0005x>
 41. 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, 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
 42. Yang, H., An, F., Yang, F., & Wang, Zh. (2019). The impact of irrigation on yield of alfalfa and soil chemical properties of saline-sodic soils. *PeerJournal*, 7, e7148. <https://doi.org/10.7717/peerj.7148>
 43. Zani, C.F., Barneze, A.S., Soratto, R.P., & Francis, R.P. (2023). The effect of crop rotations on soil. In: Goss, M.J., Oliver, M. (Eds.), *Encyclopedia of soils in the environment*, second ed. *Academic Press, Oxford*, 3, 125-134. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00145-2>