Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research

(Soil and Water Sci.)

https:// srjournal.areeo.ir/

Assessing the Effects of Integrated Organic and Chemical Fertilizers on Soil Quality under Wheat Cultivation Using the Soil Management Assessment Framework (SMAF)

Rasoul Mirkhani[a*], and Farhad Moshiri[a]

[a] Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Alborz, Iran.

Article Info

Article Type
Research Article

Received
July 11, 2026
Revised
September 28, 2026
Accepted
October 04, 2026
Published online
November 16, 2026

Keywords
Alborz province
Compost
Cow manure
Fertilization management

[*]Corresponding author's email
Rasoul.mirkhani@gmail.com

Extended Abstract

Background and Objectives: Soil quality is one of the key determinants of agricultural productivity and environmental sustainability, and the Soil Management Assessment Framework (SMAF) is a widely used tool for assessing soil quality in agricultural soils. Soil quality plays a very important role in crop production. Rapid and quantitative soil quality assessment enables timely evaluation of management practices, including fertilization, on soil conditions. In order to investigate the effects of the combined use of organic and chemical fertilizers on soil quality, this research was conducted in the Alborz province.

Materials and Methods: This research was conducted in plots with an area of 200 square meters in a randomized complete block design with 9 treatments in three replications in the Alborz province. Fertilizer treatments included: 1) fallow, 2) control (without using fertilizer), 3) application of nitrogen, phosphorus (P) and potassium (K) fertilizers based on soil test, 4) application of 20 tons of cow manure every two years + application of 75% of the recommended nitrogen rate + application of 50% of the recommended amount of P and K, 5) application of 20 tons of compost every two years + application of 75% of the recommended amount of nitrogen + application of 50% of the recommended amount of P and K, 6) annual application of 20 tons of cow manure + application of 75% of the recommended nitrogen rate, 7) annual application of 20 tons of compost + application of 75% of the recommended nitrogen rate, 8) annual application of 20 tons of cow manure, 9) annual application of 20 tons of compost. After sampling the soil at the end of each crop and measuring the properties of pH, electrical conductivity, soil organic carbon, available P and K, bulk density were measured, and SMAF was calculated. Finally, changes in soil quality due to different management practices of organic and chemical fertilizers were evaluated.

Results: Results indicated significant differences among treatments across all years, excluding fallow and control. The highest average value of soil quality (SMAF) in the first and second years was related to treatment 4 (application of 20 tons of cow manure every two years + application of 75% of the recommended nitrogen rate + application of 50% of the recommended P and K amount) and in the third year it was related to treatment 6 (annual application of 20 tons of cow manure + application of 75% of the recommended nitrogen rate). In the first year, there was no significant difference between treatments 4 and 6, and in the third year between treatments 4, 6, 7, and 8. The lowest average value of the quality index (SMAF) in all years was related to the control treatment. In addition, there was a significant correlation between yield and soil quality in the first (r=0.36), second (r=0.39), and third (r=0.63) years.

Conclusion: The results showed that the combined application of organic (especially cow manure) and chemical fertilizers improved physical (soil structure and permeability) and chemical (increased available P) soil properties, thereby increasing soil quality and wheat yield. This combined approach performed better than the application of organic or chemical fertilizers alone. Among the combined treatments, the annual application of 20 tons of cow manure, along with 75% of the recommended nitrogen fertilizer, is recommended due to higher soil quality and crop yield, and 50% lower chemical fertilizer (P and K) use.

Cite this article: Mirkhani, R., Moshiri, F., 2026. Assessing the Effects of Integrated Organic and Chemical Fertilizers on Soil Quality under Wheat Cultivation Using the Soil Management Assessment Framework (SMAF). Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (3), pp 427-443.

DOI: https://doi.org/10.22092/ijsr.2026.373467.828
Publisher: Soil Science Society of Iran

Publisher: Soil Science Society of Iran

نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

https:// srjournal.areeo.ir/

ارزیابی تأثیر استفاده توأم کودهای شیمیایی و آلی بر کیفیت خاک تحت کشت گندم با استفاده از روش چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF)

رسول میرخانی[۱*] و فرهاد مشیری[۱]

[۱] مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۷/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۲۵

واژه‌های کلیدی
استان البرز
کمپوست
کود دامی
مدیریت کوددهی

***ایمیل نویسنده مسئول**
Rasoul.mirkhani@gmail.com

چکیده

کیفیت خاک یکی از عوامل کلیدی تعیین‌کننده بهره‌وری کشاورزی و پایداری زیست‌محیطی است. چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF) ابزاری پرکاربرد برای ارزیابی کیفیت خاک در خاک‌های کشاورزی است. این تحقیق، به‌منظور بررسی اثرات کاربرد کودهای آلی و شیمیایی بر کیفیت خاک به‌مدت سه سال در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با ۹ تیمار در سه تکرار در کرت‌های ۲۰۰ مترمربعی در استان البرز انجام شد. تیمارهای کودی شامل: ۱) آیش، ۲) شاهد (بدون مصرف کود)، ۳) کاربرد کودهای شیمیایی نیتروژنی، فسفری و پتاسیمی بر اساس آزمون خاک، ۴) کاربرد ۲۰ تن کود گاوی هر دو سال یک‌بار+ کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده بر اساس آزمون خاک + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده، ۵) کاربرد ۲۰ تن کمپوست پسماند هر دو سال یک‌بار + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده، ۶) کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده، ۷) کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده، ۸) کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی، ۹) کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند بود. پس از نمونه‌برداری خاک در پایان کشت گندم (هر سال) و تعیین ویژگی‌های pH، قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل استفاده و جرم مخصوص ظاهری، چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF) تعیین شد. نتایج نشان داد که بین تیمارها و سال اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد وجود داشت و همه تیمارها از نظر مقادیر شاخص کیفیت خاک نسبت به تیمار آیش و شاهد افزایش معنی‌داری داشتند. تیمارهای کاربرد توأم کود آلی (به‌ویژه کود گاوی) و شیمیایی موجب افزایش معنی‌داری عملکرد گندم نسبت به تیمار کاربرد کود شیمیایی و تیمارهای کاربرد کود آلی (کود گاوی و کمپوست پسماند) شد. در بین تیمارهای کاربرد توأم کودهای آلی و شیمیایی نیز تیمار کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی به همراه ۷۵ درصد توصیه کود نیتروژن، به‌دلیل مقادیر شاخص کیفیت خاک بالاتر (SMAF=۷/۷۱)، عملکرد محصول بهتر (۵۰۲۴ کیلوگرم در هکتار) و استفاده ۵۰ درصد کود شیمیایی فسفر و پتاسیم کمتر، پیشنهاد می‌گردد. همچنین بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد گندم در تمام سال‌ها به‌ویژه سال سوم (r=۰/۶۲۵) همبستگی معنی‌داری وجود داشت.

استناد: میرخانی، ر.، مشیری، ف.، ۱۴۰۵. ارزیابی تأثیر استفاده توأم کودهای شیمیایی و آلی بر کیفیت خاک تحت کشت گندم با استفاده از روش چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF). مقاله پژوهشی، *نشریه پژوهش‌های خاک*، (۳) ۴۰، ص ۴۲۷-۴۴۳ .

DOI: https://doi.org/10.22092/ijsr.2026.373467.828

مقدمه

کیفیت خاک یکی از عوامل کلیدی تعیین‌کننده بهره‌وری کشاورزی و پایداری زیست‌محیطی است. کیفیت خاک، به ظرفیت آن برای انجام وظایفش اشاره دارد. برای کیفیت خاک تعاریف زیادی ارائه شده که در بیشتر آن‌ها، تأکید اصلی بر توانایی خاک در انجام وظایف مورد نظر است. از دیدگاه کشاورزی، کیفیت خاک عبارت از توانایی تولید محصول یا باروری خاک است. ارزیابی کمی کیفیت خاک با استفاده از مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مؤثر بر کیفیت خاک در قالب یک مدل ریاضی به‌صورت عددی ارائه می‌شود؛ که این عدد به‌عنوان شاخص کلی کیفیت خاک بوده و منعکس‌کننده مجموعه‌ی ویژگی‌های مورد نظر خاک است (Qi et al., 2009). از جمله این مدل‌ها می‌توان به چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF[1]) اشاره کرد این مدل اولین بار در ایالات متحده آمریکا توسعه داده شد و به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی و کمی‌سازی تغییرات در کیفیت ناشی از کاربری زمین و شیوه‌های کشاورزی در آن منطقه و سایر نقاط جهان مورد استفاده قرار گرفته است (Cherubin et al., 2017). چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF)، ابزاری پرکاربرد برای ارزیابی کیفیت خاک در خاک‌های کشاورزی است (Zornoza et al., 2015). پروتکل ارزیابی بر اساس سه مرحله است: (۱) انتخاب شاخص (شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی)؛ (۲) تفسیر شاخص (منحنی‌های امتیازدهی غیرخطی)؛ و (۳) ادغام در یک شاخص کلی کیفیت خاک (Andrews et al., 2004). از زمان انتشار عمومی SMAF در سال ۲۰۰۴، به‌طور گسترده در ایالات متحده آمریکا برای ارزیابی تغییرات کیفیت خاک در اکوسیستم‌های طبیعی و کشاورزی در مقیاس‌های مختلف از مزارع آزمایشی (قطعات) گرفته تا ارزیابی‌های منطقه‌ای استفاده شده است (Andrews et al., 2004؛ Karlen et al., 2014). SMAF همچنین با موفقیت در چندین کشور دیگر در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است به‌عنوان مثال، آفریقای جنوبی (Swanepoel et al., 2015)، اتیوپی (Gelaw et al., 2015)، نپال (Kalu et al., 2015). اولین کاربرد SMAF در خاک‌های گرمسیری برزیل نیز توسط Cherubin و همکاران (a۲۰۱۶) انجام شد که تأیید کردند SMAF برای ارزیابی تغییرات کیفیت خاک ناشی از تغییر کاربری زمین برای گسترش نیشکر در منطقه مرکزی-جنوبی مؤثر است. به‌منظور بررسی وضعیت کیفیت خاک بایستی از ویژگی‌های معرف کیفیت پویای خاک بهره‌گیری نمود که نسبت به تغییر کاربری زمین و اعمال مدیریت‌های مختلف حساس و اثرپذیر باشند. با توجه به آن‌که نمی‌توان همه ویژگی‌ها را اندازه‌گیری نمود، بسته به اهداف و شرایط مطالعات پایش، اغلب حساس‌ترین آن‌ها در برابر تغییرات انتخاب می‌گردد. ویژگی‌های شیمیایی خاک نقش مهمی در تأمین عناصر لازم برای حاصلخیزی خاک و تولید محصول دارند (Sanchez & Swaminathan, 2005) ارزیابی ویژگی‌های شیمیایی خاک ازجمله مقدار عناصر غذایی سهم بسزایی در جلوگیری و کاهش اثرات مضر مدیریت‌های نامناسب حاصلخیزی خاک دارد (Sun et al., 2003) و ماده آلی به‌دلیل نقش حیاتی در فعالیت بیولوژیکی، بهبود تخلخل و کاهش جرم مخصوص ظاهری، بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت نگه‌داری آب و حاصلخیزی از مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک هستند. ارزیابی کیفیت خاک به‌عنوان یک ابزار در گزینش شیوه‌های مدیریتی ویژه نقش بسیار مهمی داشته و معیاری برای سنجش کشاورزی پایدار است (Van Leeuwen et al., 2015).

Biberdzicet و همکاران (2020) در پژوهشی در یک خاک ورتی‌سول در غرب صربستان با بررسی تأثیر سیستم‌های خاک‌ورزی بر تراکم خاک و عملکرد گندم زمستانه، نشان دادند که بیشترین تراکم خاک مربوط به سیستم بی‌خاک‌ورزی و کمترین تراکم مربوط به خاک‌ورزی رایج بود. همچنین بین رطوبت خاک و عملکرد گندم همبستگی معنی‌داری (r=۰/۴۹) و بین تراکم خاک و عملکرد گندم نیز همبستگی معنی‌داری (r=۰/۸۵-) وجود داشت؛ به‌طوری‌که با افزایش رطوبت خاک، عملکرد افزایش و با افزایش تراکم خاک عملکرد گندم کاهش یافت. Basak و همکاران (2022) با بررسی کیفیت خاک در سیستم کشت برنج (*Oryza sativa* L.) و گندم (*Triticumaestivam* L.) با استفاده از مدل اصلاح شده چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF)، شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی، تغذیه‌ای و بیولوژیکی خاک برای راهبردهای مدیریت مواد مغذی مختلف، یعنی کود معدنی (NPK)، NPK +۷/۵ تن در هکتار کود دامی(NPKF)، NPK + ۱۰ تن در هکتار کاه شلتوک(NPKP) و NPK + ۸ تن در هکتار کود سبز (NPKG) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که راهبردهای مدیریت عناصر غذایی به‌طور قابل توجهی بر شاخص‌های کیفیت خاک تأثیر داشت و تیمار NPKF بالاترین امتیاز کیفیت خاک را برای شاخص کیفیت فیزیکی، تغذیه‌ای و بیولوژیکی خاک و تیمار NPKP بالاترین امتیاز کیفیت خاک را برای شاخص کیفیت شیمیایی داشت.

Isong و همکاران (2022) در پژوهشی در ایالت کراس

[1] Soil Management Assessment Framework

ریور نیجریه به‌منظور ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از ۱۱۰ نمونه خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) با فواصل نمونه‌برداری ۲ تا ۵ کیلومتری، ۱۱ ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک را اندازه گیری شد. سپس کیفیت خاک با استفاده از مجموعه کل ویژگی‌ها[1] و مجموعه کمترین ویژگی‌ها[2] (پایداری ساختمان خاک، درصد شن، مقدار کربن آلی خاک و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها) محاسبه و از دو تابع امتیازدهی خطی[3] (L) و غیرخطی[4] (NL) برای امتیازدهی استفاده شد. نتایج نشان داد که کیفیت خاک در جنوب منطقه، بالا و در شمال منطقه، پایین بود. کلاس با کیفیت خاک بالا (> ۴۹٪) و کلاس کیفیت خاک متوسط (۴۹ درصد-۱۴ درصد) در همه مدل‌های استفاده شده در منطقه مورد مطالعه، کلاس‌های غالب بودند.

Mirkhani و همکاران (2020) در پژوهشی کیفیت خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) اراضی کشاورزی نظرآباد استان البرز را بررسی کردند. برای این منظور ویژگی فیزیکی و شیمیایی ۹۵ نمونه خاک را اندازه‌گیری و کمترین ویژگی‌ها شامل شن، جرم مخصوص ظاهری، کربنات کلسیم معادل، فسفر قابل استفاده، نسبت جذب سدیم و بور قابل استفاده با استفاده از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی[5] (PCA) انتخاب شدند. نتایج نشان داد که بین عملکرد گندم آبی و شاخص‌های IQI_w[6] (r=۰/۶۸)،[7] IQI_a (r=۰/۶۷) و NQI[8] (r=۰/۶۲) با استفاده از حداقل ویژگی‌های خاک همبستگی معنی‌دار در سطح یک درصد وجود داشت و حدود ۸۲ درصد منطقه نظرآباد دارای کیفیت خاک خیلی خوب و خوب بود.

Mirkhani و همکاران (2021) در پژوهشی کیفیت خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) اراضی کشاورزی ساوجبلاغ استان البرز را بررسی کردند. در این مطالعه کمترین متغیرهای مؤثر بر کیفیت خاک را با استفاده از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) انتخاب و شاخص‌های کیفیت تجمعی و نمورو تعیین شد. همچنین تغییرات مکانی شاخص‌های کیفیت با استفاده از روش کریجینگ معمولی تعیین شد. نتایج میانه مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی ساده (SQIa=۰/۶۳)، تجمعی وزنی (SQIa=۰/۶۴) و نمورو (SQIa=۰/۳۶) نشان داد که بیشتر ۵۰ درصد منطقه ساوجبلاغ دارای کیفیت خوب (کلاس II) و خیلی خوب (کلاس I) بود.

Jimenez و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی برای بررسی تأثیر طرح احیای جنگل‌های حرا بر مقدار شاخص کیفیت خاک در مزارع سه و هفت ساله، با استفاده از مجموعه کمترین داده‌ها، متشکل از pH و فسفر قابل استفاده به‌عنوان شاخص‌های شیمیایی، جرم مخصوص ظاهری به‌عنوان شاخص فیزیکی و کربن آلی خاک به‌عنوان شاخص زیستی، چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF) را تعیین کردند و نشان دادند که مقادیر کیفیت خاک جنگل‌های حرا با توسعه پوشش گیاهی افزایش داشت. به‌طوری که مقادیر شاخص کیفیت خاک در جنگل تخریب یافته، پس از سه سال کاشت مجدد، پس از ۷ سال کاشت مجدد و جنگل حرای بالغ، به ترتیب ۰/۶۰، ۰/۶۶، ۰/۷۴ و ۰/۹۶ بود. همچنین بیان کردند که استفاده از SMAF به‌عنوان ابزاری مؤثر برای بررسی کیفیت خاک جنگل‌های حرا بود.

Zhu و همکاران (۲۰۲۶) با بررسی تأثیر کود دهی و برگرداندن کاه و کلش بر کیفیت خاک و عملکرد محصول در یک آزمایش مزرعه‌ای بلندمدت (۲۰۲۲-۲۰۰۵) در سیستم کشت برنج – گندم، نشان دادند که تیمار کود شیمیایی همراه با بازگرداندن کاه، عملکرد متوسط برنج و گندم را به ترتیب ۵۲/۹ و ۹۵/۴ درصد افزایش دادند و ماده آلی خاک، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل استفاده و مقادیر شاخص کیفیت خاک را افزایش داد و ماده آلی و فسفر قابل استفاده مهم‌ترین ویژگی‌های حاصلخیزی خاک بودند که تأثیر قابل توجهی بر عملکرد محصول داشتند. مطالعات Li و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان داده‌اند که کوددهی همراه با بازگرداندن کاه در سیستم‌های کشت می‌تواند عملکرد محصول و مقادیر کیفیت خاک را افزایش و با کاهش مصرف نهاده‌های کشاورزی، پایداری محیط زیست را بهبود دهد.

Manhou و همکاران (۲۰۲۶) طی یک مطالعه گلخانه‌ای تأثیر کمپوست بر کیفیت خاک و عملکرد گندم دوروم را طی سال‌های ۲۰۲۴-۲۰۲۳ با تیمارهای سه مقدار کمپوست (۱۵، ۲۰ و ۳۰ تن در هکتار) در چهار سطح شوری آب آبیاری (۰,۲، ۸، ۱۲ و ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر) در قالب طرح کاملاً تصادفی ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که کاربرد کمپوست، به‌ویژه با افزایش دسترسی به پتاسیم و کلسیم، حاصلخیزی خاک را بهبود بخشید و به‌طور قابل توجهی رشد گیاه را در شرایط شور افزایش داد و عملکرد دانه در شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر ۱۱/۲۵ درصد و در شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر ۳۱/۵۸ درصد در تیمار ۳۰ تن در هکتار کمپوست افزایش داشت و به‌طور کلی، یافته‌ها نشان داد که کاربرد کمپوست زباله سبز یک استراتژی مؤثر برای بهبود کیفیت خاک، حفظ رشد گندم دوروم و کاهش نسبی تنش شوری، به‌ویژه در شرایط آبیاری با شوری متوسط بود.

[1] Total Data Set
[2] Minimum Data Set
[3] Linear
[4] Non Linear
[5] Principal Component Analysis
[6] Weighted Additive Soil Quality Index
[7] Additive Soil Quality Index
[8] Nemero Quality Index

Zhou و همکاران (۲۰۲۶) طی پژوهشی برای ارزیابی شاخص کیفیت خاک، در ۶۱ زمین کشاورزی تحت کشت جو در مرکز و شمال استان هوبی در کشور چین، از ده ویژگی شیمیایی خاک اندازه‌گیری شده، شش ویژگی به‌عنوان حداقل داده انتخاب شد و کیفیت خاک تعیین گردید. نتایج نشان داد که مقادیر شاخص کیفیت خاک از ۰/۲۷ تا ۰/۶۹ با میانگین ۰/۴۵ متغیر بود که نشان دهنده کیفیت پایین خاک در منطقه مورد مطالعه بود.

Mirkhani و همکاران (2024) در پژوهش در ۲۰۶ گندم‌زار استان آذربایجان شرقی (دشت تبریز)، شاخص‌های کیفیت تجمعی ساده (SQI_A) و تجمعی وزنی (SQI_W) و نمورو (NQI) خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متری) و عملکرد گندم را بررسی کردند. نتایج نشان داد که همبستگی معنی‌داری در سطح یک در صد ($p<۰/۰۱$) بین عملکرد گندم و شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از حداقل ویژگی‌ها (r=۰/۶۳-۰/۶۰) و کل ویژگی‌ها (r=۰/۶۰-۰/۵۶) وجود داشت. لذا هر سه شاخص مورد بررسی برای منطقه مورد مطالعه مناسب بوده و استفاده از حداقل ویژگی‌ها به‌دلیل همبستگی نسبتاً بالاتر و تعداد ویژگی‌ها و هزینه کمتر، مناسب‌تر از روش استفاده از کل ویژگی‌ها بود.

در ایران مدیریت و استفاده نادرست از اراضی کشاورزی و کشت‌های طولانی‌مدت همراه با عملیات زراعی نامناسب، کیفیت خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد همچنین با توجه به پایین بودن مواد آلی در ایران و منطقه مورد مطالعه (۰/۴۹= %OC) و تأثیر ماده آلی بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین وضعیت فسفر و آهن پایین خاک مورد مطالعه انتظار می‌رود که تیمارهای کود آلی و شیمیایی و یا کاربرد توأم آن‌ها موجب بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه گردد. لذا در راستای کشاورزی پایدار، شناخت مدیریت‌های کوددهی که باعث حفظ و افزایش کیفیت خاک و افزایش کمی و کیفی محصول گردند (Van Leeuwen et al., 2015) ضروری است. با وجود مطالعات زیادی که در خصوص ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از شاخص‌های مختلف بخصوص شاخص‌های کیفیت تجمعی و نمورو انجام شده، ولی در خصوص کیفیت خاک با استفاده از چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF) تحقیقاتی انجام نشده است همچنین در خصوص تأثیر کاربرد کودهای آلی و شیمیایی بر کیفیت خاک مطالعات اندکی انجام شده است. لذا بررسی کیفیت خاک و ویژگی‌های خاک مرتبط با آن در مدیریت های مختلف کودی ضروری است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به‌منظور بررسی کیفیت خاک با استفاده از روش چارچوب ارزیابی مدیریت خاک در مدیریت‌های مختلف کاربرد کودهای آلی و شیمیایی در کشت گندم در سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ به‌مدت سه سال در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی با ۹ تیمار در سه تکرار در کرت‌های ۲۰۰ مترمربعی در مزارع ایستگاه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب واقع در استان البرز انجام شد. این منطقه با میانگین بارندگی سالیانه ۲۳۸ میلی‌متر، میانگین دمای ۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد و رژیم رطوبتی زریک و رژیم حرارتی مزیک در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارد. تیمارهای کودی شامل ۱) آیش، ۲) شاهد بدون مصرف کود، ۳) کاربرد کودهای شیمیایی نیتروژنی، فسفری و پتاسیمی بر اساس آزمون خاک ۴) کاربرد ۲۰ تن کود گاوی هر دو سال یکبار+ کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده بر اساس آزمون خاک + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده بر اساس آزمون خاک، ۵) کاربرد ۲۰ تن کمپوست پسماند هر دو سال یکبار + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده بر اساس آزمون خاک + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده، ۶) کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده، ۷) کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده، ۸) کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی و ۹) کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند بود. در پایان هر کشت، از خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متری) نمونه برداری خاک انجام شد و ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک شامل: pH گل اشباع، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع به‌وسیله EC سنج، کربن آلی به روش والکلی بلاک (Walkley and Black, 1934)، مقادیر فسفر قابل‌استفاده به روش اولسن (Olsen et al., 1982) و پتاسیم قابل‌استفاده به روش استخراج با استات آمونیوم یک نرمال (Page et al., 1982)، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه (Aria and Mirkhani, 2005) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عملکرد محصول از روش کیل گیری با استفاده از کادر یک مترمربعی انجام شد. برای تعیین شاخص‌های کیفیت خاک (SMAF)، این ویژگی‌ها با استفاده از منحنی‌های امتیازدهی غیرخطی به امتیازهای بدون واحد تبدیل شدند. سپس چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF) تعیین شد.

برای محاسبه امتیاز جرم مخصوص ظاهری از رابطه (۱) استفاده شد (Andrews et al., 2004):

$$y=0.994-b\times\exp(-cD_b^d) \quad (۱)$$

که در رابطه فوق، y بیانگر امتیاز عامل جرم مخصوص ظاهری، D_b بیانگر جرم مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شده برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، مقادیر b، c و d وابسته به کلاس بافت و مینرالوژی است.

برای محاسبه امتیاز مربوط به کربن آلی خاک از رابطه (۲) استفاده شد (Andrews et al., 2004):

$$y = \frac{1}{1+50.1\times \exp\ (-c \times TOC)} \qquad (۲)$$

که در آن، y بیانگر عامل کربن آلی، TOC درصد کربن آلی اندازه‌گیری شده و c نشان‌دهنده کلاس ماده آلی، بافت خاک و اقلیم است.

امتیاز مربوط به فسفر قابل‌دسترس خاک از طریق روابط (۳)، (۵) و (۷) محاسبه شد (Andrews et al., 2004)

$$\text{if } P\times f_m \le P_{max}: \quad y = 0.00000925\times b + \frac{(P\times f_m)^{3.06}}{b+(P\times f_m)^{3.06}} \qquad (۳)$$

$$b = b_1 + (b_1\times b_2 \times b_3) \qquad (۴)$$

$$\text{if } P\times f_m > P_e: \quad y = 1-4.5\times \exp\left(-c\times (P\times f_m)^{-2}\right) \qquad (۵)$$

$$c = (c_1 + (c_1 \times c_2)) \times c_3) \qquad (۶)$$

$$\text{if } P_{max} < P < P_e: \quad y = 1 \qquad (۷)$$

در روابط فوق y امتیاز فسفر قابل استفاده، P: فسفر قابل‌استفاده اندازه‌گیری‌شده بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم، P_e: حد موردنیاز به‌منظور حفاظت محیط‌زیست، P_{max} برابر P_{opt} + 6، P_{opt}: مقدار فسفر بهینه گیاه، f_m: تابعی از روش اندازه‌گیری و عامل هوازدگی خاک، c1 وابسته به مقدار فسفر بهینه گیاه، مقادیر b_2 و c_2 در کلاس‌های مختلف ماده آلی با توجه به زیر رده خاک، b_3 و c_3 با توجه به بافت خاک و مقادیر c_1 نیز با توجه به کلاس شیب به دست می‌آیند.

برای محاسبه امتیاز پتاسیم قابل استفاده از رابطه (۸) استفاده شد (Andrews et al., 2004):

$$y=a(1-\exp(b*K)) \qquad (۸)$$

که در رابطه فوق، y بیانگر امتیاز عامل پتاسیم قابل استفاده، K بیانگر پتاسیم قابل استفاده اندازه‌گیری شده بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم و ضرایب a و b وابسته به کلاس بافت و کانی‌شناسی است.

در مرحله تلفیق امتیاز ویژگی‌ها، امتیاز تمامی ویژگی‌ها به‌عنوان یک امتیاز واحد تحت عنوان شاخص کیفیت خاک (SQI) در قالب رابطه (۹) ادغام شد. (Andrews et al., 2004):

$$SQI = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}\right)\times 10 \qquad (۹)$$

که در آن y بیانگر امتیاز ویژگی انتخاب شده و n بیانگر تعداد ویژگی‌های انتخاب‌شده است.

برای تجزیه و تحلیل آماری از نرم افزار SPSS 24 استفاده شد و تجزیه واریانس (میانگین مربعات) عملکرد گندم، شاخص کیفیت خاک و امتیاز ویژگی‌های خاک بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه خاک و کودهای آلی

جدول (۱) نتایج تجزیه خاک محل اجرای آزمایش را نشـــان می‌دهد. با توجه به نتایج تجزیه خاک، محل اجرای آزمایش دارای خاک قلیایی با ماده آلی پایین بوده و از نظر فسفر قابل اسـتفاده (کم)، آهن قابل اسـتفاده (خیلی کم) و منگنز قابل اســـتفاده (کم) دارای کمبود اســـت (Moshiri *et* al., 2014). جدول (۲) نتایج تجزیه کودهای آلی مورد اســـتفاده در تیمارهای آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 1. Soil physical and chemical properties of the test site.

NH_4^-	NO_3^-	PWP	FC	SP	CCE	OC	CEC	EC	pH	محل اجرا Test site
$mg.kg^{-1}$				Weight percent			$cmol.kg^{-1}$	$dS.m^{-1}$	-	
1.7	17.8	8.4	16.7	36.3	12.5	0.49	13.6	1.1	8.2	ایستگاه تحقیقاتی کرج
Soil Texture	Sand	Silt	Clay	Cu_{ava}	Zn_{ava}	Mn_{ava}	Fe_{ava}	K_{ava}	P_{ava}	Karaj
-		%				$mg.kg^{-1}$				
لوم	37	38	25	0.93	0.98	5.7	1.63	218	5.8	

CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، CCE: کربنات کلسیم معادل، FC: رطوبت ظرفیت زراعی، PWP: رطوبت نقطه پژمردگی دائم، SP: رطوبت اشباع

جدول ۲- نتایج تجزیه کودهای آلی مورد استفاده در تیمارهای آزمایش.

Table 2. Results of the analysis of organic fertilizers used in the experimental treatments.

سال Year	نوع کود آلی Type of organic fertilizer	pH	EC	OC	N_{total}	P_{total}	K_{total}	Moisture[1]	Mass loss at 400°C[2]
		-	$dS.m^{-1}$				٪		
سال اول (۱۳۹۶) First year (2017)	کود گاوی (cow manur)	8.6	8.3	20.2	1.35	0.78	1.12	22	41.2
	کمپوست(Compost)	6.9	8	14	1.03	0.87	0.43	20	30.7
		NO_3^-	NH_4^-	Fe_{total}	Mn_{total}	Zn_{total}	Cu_{total}	Cd_{total}	Pb_{total}
						$mg\ kg^{-1}$			
	کود گاوی (Cow manur)	77	630	3260	286	186	47	0.16	4.1
	کمپوست(Compost)	112	420	7578	420	425	22.5	1.11	133.5
		pH	EC	OC	N_{total}	P_{total}	K_{total}	Moisture	Mass loss at 400°C
		-	$dS\ m^{-1}$				٪		
سال دوم (۱۳۹۷) Second year (2018)	کود گاوی (Cow manur)	9.5	9.1	13.5	0.91	0.74	1.42	25	48.2
	کمپوست(Compost)	7.7	10.5	15.5	1.42	0.86	0.90	23	40.6
		NO_3^-	NH_4^-	Fe_{total}	Mn_{total}	Zn_{total}	Cu_{total}	Cd_{total}	Pb_{total}
						$mg\ kg^{-1}$			
	کود گاوی (Cow manur)	112	420	3550	295	122	33	0.2	3.1
	کمپوست(Compost)	196	590	15975	530	750	40	1.24	177
		pH	EC	OC	N_{total}	P_{total}	K_{total}	Moisture	Mass loss at 400°C
		-	$dS.m^{-1}$				٪		
سال سوم (۱۳۹۸) Third year (2019)	کود گاوی (Cow manur)	–	12.4	22.6	1.86	1.21	1.56	20	53.8
	کمپوست(Compost)	–	9.1	21.1	1.66	0.83	0.76	18	36.6
		NO_3^-	NH_4^-	Fe_{total}	Mn_{total}	Zn_{total}	Cu_{total}	Cd_{total}	Pb_{total}
						$mg\ kg^{-1}$			
	کود گاوی (Cow manur)	–	–	3544	297	200	65	0.33	5.2
	کمپوست(Compost)	–	–	9268	372	684	272	4.16	126

جدول (۳)، نتایج تجزیه واریانس امتیاز کربن آلی خاک را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج در همه سال‌ها بین تکرارها اختلاف معنی‌داری وجود نداشت ولی بین تیمارها در سال‌های دوم و سوم در مقادیر امتیاز کربن آلی خاک اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد وجود داشت که نشان‌دهنده تأثیر تیمارهای مختلف بر امتیاز کربن آلی خاک بود. همچنین بین سال‌های مختلف نیز اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد وجود داشت.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) امتیاز کربن آلی خاک بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد

Table 3. Results of variance analysis (mean of square) of soil organic carbon score based on LSD test at 5% level

سال Year	منبع تغییرات Source of variance	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات Mean of squares
			Soil organic carbon score
سال اول (۱۳۹۶) First year (2017)	تکرار (Replication)	2	0.002 ^{ns}
	تیمار (Treatment)	8	0.005 ^{ns}
سال دوم (۱۳۹۷) Secondyear (2018)	تکرار (Replication)	2	0.005 ^{ns}
	تیمار (Treatment)	8	0.037**
سال سوم (۱۳۹۸) Third year (2019)	تکرار (Replication)	2	0.000 ^{ns}
	تیمار (Treatment)	8	0.048 **
	سال (Year)	2	0.291 **

** معنی‌داری در سطح یک درصد * معنی‌داری در سطح پنج درصد nsغیرمعنی‌دار

ns, ** and *: non-significant, significant at $p\leq0.05$ and $p\leq0.01$, respectively.

جدول (۴)، میانگین امتیاز کربن آلی خاک در تیمارهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، در سال سوم بالاترین مقدار امتیاز کربن آلی خاک مربوط به تیمار کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی و پایین‌ترین امتیاز کربن آلی مربوط به

[1] رطوبت

[2] افت در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد

تیمار آیش بود و بین تیمارهای آیش، شاهد (بدون مصرف کود) و کاربرد کودهای شیمیایی (تیمار ۳) اختلاف معنی‌دار نبود. Emamie و همکاران (2014) طی پژوهش با بررسی تأثیر مواد آلی بر مقادیر کمی کیفیت خاک نشان دادند که افزودن مواد آلی سبب بهبود کیفیت خاک شد و کلاس کیفیت خاک بین یک یا دو درجه ارتقاء داد.

جدول ۴-مقایسه میانگین امتیاز کربن آلی خاک در تیمارهای آزمایشی.

Table 4. Comparison of the mean Soil organic carbon score in experimental treatments.

تیمار Treatment	سال (Year)		
	First year (2017)	Secondyear (2018)	Third year (2019)
آیش (Fallow)	0.275 ab	0.248 d	0.287 e
شاهد (بدون مصرف کود) Control (without using fertilizer)	0.256 ab	0.299 cd	0.315 ed
کاربرد کودهای شیمیایی نیتروژنی، فسفری و پتاسیمی بر اساس آزمون خاک Application of nitrogen,phosphorus and potassium fertilizers based on soil test	0.204 abc	0.408 bc	0.369 cde
کاربرد ۲۰ تن کود گاوی هر دو سال یکبار+ کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده Application of 20 tons of cow manure every two years + application of 75% of the recommended amount of nitrogen + application of 50% of the recommended amount of phosphorus and potassium	0.240 ab	0.291 cd	0.434 bcd
کاربرد ۲۰ تن کمپوست پسماند هر دو سال یکبار + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده Application of 20 tons of compost every two years + application of 75% of the recommended amount of nitrogen + application of 50% of the recommended amount of phosphorus and potassium	0.152 c	0.312 cd	0.394 cde
کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده Annual application of 20 tons of cow manure + application 75% of the recommended amount of nitrogen	0.247 ab	0.437 b	0.497 bc
کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده Annual application of 20 tons of compost + application of 75% of the recommended amount of nitrogen	0.227 abc	0.620 a	0.540 b
کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی Annual application of 20 tons of cow manure	0.213 abc	0.359 bcd	0.698 a
کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند Annual application of 20 tons of compost	0.287 a	0.394 bc	0.390 cde

جدول (۵)، نتایج تجزیه واریانس امتیاز فسفر قابل استفاده خاک را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج در همه سال‌ها بین تکرارها اختلاف معنی‌داری وجود نداشت ولی بین تیمارها در مقادیر امتیاز فسفر قابل استفاده خاک اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد وجود داشت که نشان‌دهنده تأثیر تیمارهای مختلف بر امتیاز فسفر قابل استفاده خاک بود. همچنین بین ساله‌های مختلف نیز اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد وجود داشت.

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) امتیاز فسفر قابل استفاده خاک بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد.

Table 5. Results of variance analysis (mean of square) of soil available phosphorus score based on LSD test at 5% level.

سال Year	منبع تغییرات Source of variance	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات Mean of squares
			Soil available phosphorus score
سال اول (۱۳۹۶) First year (2017)	تکرار (Replication)	2	0.000 ns
	تیمار (Treatment)	8	0.079 *ns
سال دوم (۱۳۹۷) Secondyear (2018)	تکرار (Replication)	2	0.001 ns
	تیمار (Treatment)	8	0.305**
سال سوم (۱۳۹۸) Third year (2019)	تکرار (Replication)	2	0.001 ns
	تیمار (Treatment)	8	0.124 **
	سال (Year)	2	0.099 *

** معنی‌داری در سطح یک درصد * معنی‌داری در سطح پنج درصد nsغیرمعنی‌دار.

ns, ** and *: non-significant, significant at $p\leq0.05$ and $p\leq0.01$, respectively.

جدول (۶)، میانگین امتیاز فسفر قابل استفاده خاک در تیمارهای مورد مطالعه را نشـــان می‌دهد. با توجه به نتایج، در سال‌های دوم و سوم پایین‌ترین امتیاز فسفر قابل ا ستفاده خاک مربوط به تیمار شـاهد (بدون مصـرف کود) بود و در سـال اول مربوط به تیمار آیش بود که با تیمار شـــاهد اختلاف معنی‌داری نداشـت. در سـال اول بالاترین امتیاز مربوط به تیمارهای کاربرد توأم کودهای آلی و شیمیایی (تیمارهای ۵، ۴، ۶ و ۷) و در سال دوم مربوط تیمارهای آلی و شـیمیایی نیتروژن، فسـفر و پتاسـیم (تیمارهای ۴ و ۵) و در سال سوم مربوط به کاربرد کوهای گاوی و شیمیایی (تیمارهای ۴ و ۶) و تیمار کاربرد کود شیمیایی (تیمار ۳) و تیمار کاربرد ســـالانه کود گاوی (تیمار ۸) بود که با هم اختلاف معنی‌داری نداشتند. در سال سوم تیمار کود گاوی بدلیل درصـد فسـفر کل بالاتر نسـبت به کود کمپوسـت، تأثیر بهتری داشت.

جدول ۶-مقایسه میانگین امتیاز فسفر قابل استفاده خاک در تیمارهای آزمایشی.

Table 6. Comparison of the mean soil available phosphorus score in experimental treatments.

تیمار Treatment	سال (Year)		
	First year (2017)	Secondyear (2018)	Third year (2019)
آیش (Fallow)	0.418 d	0.337 c	0.350 c
شاهد (بدون مصرف کود) Control (without using fertilizer)	0.496 d	0.172 d	0.233 d
کاربرد کودهای شیمیایی نیتروژنی، فسفری و پتاسیمی بر اساس آزمون خاک Application of nitrogen,phosphorus and potassium fertilizers based on soil test	0.697 bc	1.000 a	0.731 a
کاربرد ۲۰ تن کود گاوی هر دو سال یکبار+ کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده Application of 20 tons of cow manure every two years + application of 75% of the recommended amount of nitrogen + application of 50% of the recommended amount of phosphorus and potassium	0.854 a	0.979 a	0.782 a
کاربرد ۲۰ تن کمپوست پسماند هر دو سال یکبار + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده Application of 20 tons of compost every two years + application of 75% of the recommended amount of nitrogen + application of 50% of the recommended amount of phosphorus and potassium	0.871 a	1.000 a	0.531 b
کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده Annual application of 20 tons of cow manure + application 75% of the recommended amount of nitrogen	0.849 a	0.535 b	0.801 a
کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده Annual application of 20 tons of compost + application of 75% of the recommended amount of nitrogen	0.802 ab	0.554 b	0.605 b
کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی Annual application of 20 tons of cow manure	0.639 c	0.347 c	0.784 a
کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند Annual application of 20 tons of compost	0.670 c	0.435 bc	0.530 b

جدول (۷)، نتایج تجزیه واریانس شـــاخص‌ها کیفیت خاک مورد بررســـی را نشـــان می‌دهد. با توجه به نتایج در همه ســـال‌ها بین تکرارها اختلاف معنی‌داری وجود نداشـــت ولی بین تیمارها در شاخص‌های مورد بررسی اختلاف معنی‌داری در سطح یک در صد وجود دا شت که ن شان‌دهنده تأثیر تیمارهای مختلف بر کیفیت خاک بود. همچنین بین ســاله‌های مختلف نیز اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد وجود داشت.

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) شاخص‌های کیفیت خاک بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد.

Table 7. Results of variance analysis (mean of square) of soil quality indicators based on LSD test at 5% level.

سال Year	منبع تغییرات Source of variance	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات Mean of squares
			SMAF
سال اول (۱۳۹۶) First year (2017)	تکرار (Replication)	2	0.021 ns
	تیمار (Treatment)	8	0.309 *ns
سال دوم (۱۳۹۷) Secondyear (2018)	تکرار (Replication)	2	0.149 ns
	تیمار (Treatment)	8	2.164**
سال سوم (۱۳۹۸) Third year (2019)	تکرار (Replication)	2	0.012 ns
	تیمار (Treatment)	8	3.296**
	سال (Year)	2	4.356 **

** معنی‌داری در سطح یک درصد * معنی‌داری در سطح پنج درصد nsغیرمعنی‌دار

ns, ** and *: non-significant, significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively.

جدول (۸)، میانگین مقادیر شـــاخص کیفیت خاک در تیمارهای مورد مطالعه را با ا ستفاده از شاخص چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF) را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، به‌جز تیمار آیش و شاهد (بدون مصرف کود) بین تیمارها در سال‌های اول، دوم و سوم اختلاف معنی‌دار بود و بی شترین مقدار میانگین مقادیر شـاخص کیفیت خاک در سـال‌های اول و دوم مربوط به تیمار ۴ (کاربرد ۲۰ تن کود گاوی هر دو سـال یکبار+ کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده) و در سال سوم مربوط به تیمار ۶ (کاربرد ســالانه ۲۰ تن کود گاوی + کاربرد ۷۵ درصـــد مقدار نیتروژن توصیه شده) بود زیرا در سیستم تغذیه تلفیقی، وجود کود نیتروژن در مراحل اولیه ر شد باعث افزایش ر شد رویشی گندم می‌گردد و در مراحل بعدی رشد، آزادسازی نیتروژن و دیگر عناصر غذایی بر اثر معدنی شـدن کودهای آلی، موجب تقویت رشـد زایشـی گیاه می‌شـود لذا با مصـرف کود اوره به همراه کودهای آلی، نسـبت C/Nکاهش و سرعت معدنی شدن کودهای آلی افزایش می‌یابد (Havlin et al., 2016). از طرف دیگر، بر اثر تجزیه کودهای آلی، انواع ا سیدهای آلی آزاد می شود که سبب کاهش pH خاک و افزایش فراهمی عنا صر غذایی در خاک می‌گردد. در سال اول بین تیمارهای ۴ و ۶ و در سال سوم بین تیمارهای ۴، ۶، ۷ و ۸ اختلاف معنی‌دار نبود. کمترین مقدار میانگین شاخص کیفیت در هر سـه سـال مربوط به تیمار شـاهد بود که نشـان‌دهنده تأثیر معنی‌دار کاربرد توأم کود گاوی و شیمیایی بر کیفیت خاک ا ست که دلیل آن تأثیر کود گاوی بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی و تأثیر کود شیمیایی پرمصرف به‌ویژه فسفر بر بهبود فسفر قابل استفاده خاک اسـت. Kharche و همکاران (2013) در تحقیقی به‌منظور بررســی کودهای شــیمیایی و آلی و کاه و کلش و کود ســبز بر کیفیت خاک نشـــان دادند که کاربرد مداوم کودهای شـــیمیایی همراه با کود آلی بیش از کاربرد کودهای شـــیمیایی تنها موجب بهبود خصوصیات فیزیکی خاک شده ا ست. همچنین ا ستفاده از کود گاوی به دلیل فســـفر و پتاســـیم کل بالاتر بهتر از کود کمپوســـت بود و بین تیمارهای ۴ با ۵ و ۸ با ۹ اختلاف معنی‌دار بود ولی بین تیمارهای ۶ با ۷ اختلاف معنی‌دار نبود. Emamie و همکاران (2014) طی پژوهش با بررســـی تأثیر مواد آلی بر مقادیر کمی کیفیت خاک نشـــان دادند که افزودن مواد آلی سبب بهبود کیفیت خاک شد و کلاس کیفیت خاک بین یک یا دو درجه ارتقاء داد.

جدول ۸-مقایسه میانگین شاخص کیفیت خاک (SMAF) در تیمارهای آزمایشی.

Table 8. Comparison of the mean soil quality index (SMAF) in experimental treatments.

تیمار Treatment	سال (Year) First year (2017)	Secondyear (2018)	Third year (2019)
آیش (Fallow)	5.533 cd	5.106 e	5.272 d
شاهد (بدون مصرف کود) Control (without using fertilizer)	5.266 d	4.908 e	4.960 d
کاربرد کودهای شیمیایی نیتروژنی، فسفری و پتاسیمی بر اساس آزمون خاک Application of nitrogen,phosphorus and potassium fertilizers based on soil test	5.433 d	6.786 b	6.041 c
کاربرد ۲۰ تن کود گاوی هر دو سال یکبار+ کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده Application of 20 tons of cow manure every two years + application of 75% of the recommended amount of nitrogen + application of 50% of the recommended amount of phosphorus and potassium	6.138 a	7.426 a	7.480 a
کاربرد ۲۰ تن کمپوست پسماند هر دو سال یکبار + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده Application of 20 tons of compost every two years + application of 75% of the recommended amount of nitrogen + application of 50% of the recommended amount of phosphorus and potassium	5.821 bc	6.564 bc	6.587 b
کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده Annual application of 20 tons of cow manure + application 75% of the recommended amount of nitrogen	6.129 a	6.194 cd	7.710 a
کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده Annual application of 20 tons of compost + application of 75% of the recommended amount of nitrogen	5.849 ab	6.521 bc	7.522 a
کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی Annual application of 20 tons of cow manure	5.954 ab	5.269 e	7.589 a
کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند Annual application of 20 tons of compost	6.090 ab	5.886 d	6.168 bc

جدول (۹)، نتایج تجزیه واریانس عملکرد گندم را نشـــان می‌دهد. با توجه به نتایج در همه ســـال‌ها بین تکرارها اختلاف معنی‌داری وجود نداشت ولی بین تیمارها و سال اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد وجود داشت که نشان‌دهنده تأثیر تیمارهای مختلف بر عملکرد گندم بود.

جدول ۹- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) عملکرد گندم بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد.

Table 9. Results of variance analysis (mean of square) of Wheat yield based on LSD test at 5% level.

سال Year	منبع تغییرات Source of variance	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات Mean of squares yield
سال اول (۱۳۹۶) First year (2017)	تکرار (Replication)	2	21666.7 ns
	تیمار (Treatment)	7	1337883.6 *
سال دوم (۱۳۹۷) Secondyear (2018)	تکرار (Replication)	2	158509.7 ns
	تیمار (Treatment)	7	7806434.7 **
سال سوم (۱۳۹۸) Third year (2019)	تکرار (Replication)	2	36551.4 ns
	تیمار (Treatment)	7	3421818 **
	سال (Year)	2	15154350 **

** معنی‌داری در سطح یک درصد * معنی‌داری در سطح پنج درصد nsغیرمعنی‌دار.

ns, ** and *: non-significant, significant at $p\leq0.05$ and $p\leq0.01$, respectively.

عملکرد محصول اندازه‌گیری شده در تیمارهای مورد بررسی

جدول (۱۰) مقادیر کمینه، بیشـینه و میانگین عملکرد گندم را نشـان می‌دهد. محدوده عملکرد گندم در تیمارهای مورد مطالعه در سال‌های اول تا سوم به‌ترتیب ۳۸۳۳- ۱۶۶۷، ۶۷۳۳- ۲۳۸۳ و ۵۳۲۳- ۲۴۹۸ کیلوگرم در هکتار اســـت. لذا تیمارهای

مورد مطالعه دارای محدوده وسیعی از عملکرد است. با توجه به میانگین عملکرد گندم در تیمارهای مورد مطالعه، میانگین عملکرد گندم در تیمار ۶ (با مقادیر ۳۸۳۳ (سال اول)، ۵۷۱۷ (سال دوم) و ۵۰۲۴ (سال سوم) کیلوگرم در هکتار) نسبت به تیمار شاهد (بدون استفاده از کود) در سال‌های اول، دوم و سوم به‌ترتیب ۴۴، ۷۶ و ۱۱۹ درصد افزایش داشت. در سال اول و سوم، تیمار ۶، بجز تیمار ۵، با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری داشت و سایر تیمارها نیز با هم اختلاف معنی‌داری نداشتند. در سال دوم نیز تیمار ۷، به‌جز تیمار ۶، با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری داشت که این نتایج نشان‌دهنده تأثیر تیمارهای کاربرد توأم کودهای آلی (به‌دلیل تأثیر بر فعالیت‌های بیولوژیکی و فیزیکی خاک به‌ویژه در سال سوم) به همراه کود شیمیایی پرمصرف فسفر به‌دلیل افزایش و بهبود فسفر قابل استفاده خاک بر افزایش عملکرد گندم است. Liu و همکاران (2017) نیز در پژوهشی بر روی گیاه روغنی *Camellia oleifera* در منطقه نیمه‌گرمسیری چین نشان داد که نمونه‌های خاک کشتزارهای دارای عملکرد بالا به‌طور معنی‌داری دارای مقادیر بالای مواد آلی خاک، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم بودند. در مقابل نمونه‌های خاک کشتزارهای دارای عملکرد پایین فاقد فسفر و پتاسیم و قابل‌استفاده بودند.

Li و همکاران (2020) با بررسی تأثیر کودهای آلی و شیمیایی بر کیفیت خاک و عملکرد کلزا در اراضی دیم منطقه نیمه گرمسیر در چین نشان دادند که ماده آلی با عملکرد کلزا (r=۰/۶۹) معنی‌داری در سطح یک درصد داشت و افزودن کودهای آلی نه تنها کیفیت خاک را بهبود بخشید، بلکه باعث افزایش عملکرد کلزا در مقایسه با کودهای شیمیایی شد. Brar و همکاران (2015) با بررسی تأثیر استفاده از کودهای معدنی و کود آلی بر کربن آلی خاک و خواص فیزیکی خاک در تناوب گندم- ذرت در طی ۳۶ سال در دانشگاه پنجاب هند نشان دادند که کشت مداوم و استفاده توأم کودهای آلی و معدنی باعث افزایش عملکرد دانه و تولید محصول گردید. استفاده از کودهای معدنی به همراه کود آلی، بهترین گزینه برای تولید بالای محصول در تناوب ذرت و گندم بود.

جدول ۱۰- مقادیر میانگین عملکرد گندم (کیلوگرم در هکتار) در تیمارهای آزمایشی.

Table 10. Mean of wheat yield values in experimental treatments.

تیمار Treatment	سال (Year)		
	First year (2017)	Secondyear (2018)	Third year (2019)
آیش (Fallow)	fallow	fallow	fallow
شاهد (بدون مصرف کود) Control (without using fertilizer)	2667^{b}	3283^{cd}	2498^{d}
کاربرد کودهای شیمیایی نیتروژنی، فسفری و پتاسیمی بر اساس آزمون خاک Application of nitrogen,phosphorus and potassium fertilizers based on soil test	1833^{b}	3867^{cb}	3656^{c}
کاربرد ۲۰ تن کود گاوی هر دو سال یکبار+ کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه‌شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه‌شده Application of 20 tons of cow manure every two years + application of 75% of the recommended amount of nitrogen + application of 50% of the recommended amount of phosphorus and potassium	2833^{b}	4756^{b}	4661^{b}
کاربرد ۲۰ تن کمپوست پسماند هر دو سال یکبار + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده + کاربرد ۵۰ درصد مقدار فسفر و پتاسیم توصیه شده Application of 20 tons of compost every two years + application of 75% of the recommended amount of nitrogen + application of 50% of the recommended amount of phosphorus and potassium	2833^{ab}	2383^{d}	5323^{a}
کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده Annual application of 20 tons of cow manure + application 75% of the recommended amount of nitrogen	3833^{a}	5717^{ab}	5024^{ab}
کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده Annual application of 20 tons of compost + application of 75% of the recommended amount of nitrogen	2667^{b}	6733^{a}	4678^{b}
کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی Annual application of 20 tons of cow manure	1667^{b}	2689^{d}	3436^{cd}
کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند Annual application of 20 tons of compost	2667^{b}	2456^{d}	2738^{d}

رابطه بین عملکرد محصول و شاخص کیفیت خاک (SMAF)

جدول (۱۱) همبستگی بین شاخص‌های کیفیت خاک و عملکرد گندم در تیمارهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد گندم در تمام سال‌ها همبستگی معنی‌داری وجود داشت که در سال اول (r=۰/۳۶) و دوم (r=۰/۳۹) در سطح پنج درصد ولی در سال سوم (r=۰/۶۳) در سطح یک درصد معنی‌دار بود. Li و همکاران (2019) در پژوهشی در اراضی دیم تحت کشت گندم و ذرت نشان دادند که بین عملکرد گندم و شاخص کیفیت تجمعی وزنی همبستگی معنی‌داری (r=۰/۴۰) در سطح یک درصد وجود داشت. Nabiollahiet و همکاران (2017) نیز در پژوهشی در اراضی کشاورزی تحت تأثیر شوری در استان کردستان ایران نشان دادند که بین عملکرد گندم آبی و IQI_w (r=۰/۷۰)، IQI_a (r=۰/۷۱) و NQI (r=۰/۷۱) با حداقل ویژگی ها همبستگی معنی‌دار ($p<۰/۰۱$) بود. Paul و همکاران (2020) با بررسی کیفیت خاک حوزه آبخیز Bansloi در شرق هند، همبستگی بین عملکرد گندم و ذرت با شاخص کیفیت تجمعی وزنی را به‌ترتیب R^2=۰/۲۱ و R^2=۰/۰۹ و با تجمعی ساده را به‌ترتیب R^2=۰/۲۰ و R^2=۰/۰۸ بیان کردند. Li و همکاران (2013) با ارزیابی کیفیت خاک شالیزارهای شهرستان یجینگ در استان جیانگشی چین بیان کردند که بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد برنج همبستگی معنی‌داری (r=۰/۴۱) در سطح یک درصد وجود داشت.

جدول ۱۱- همبستگی بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد گندم.

Table 11. Correlation between soil quality index and wheat yield.

شاخص کیفیت Soil Quality Index	سال اول (۱۳۹۶) First year (2017)	سال دوم (۱۳۹۷) Second year (2018)	سال سوم (۱۳۹۸) Third year (2019)
SMAF	0.362 *	0.391 *	0.625 **

نتیجه‌گیری

با توجه به پایین بودن ماده آلی و فسفر قابل استفاده خاک اولیه، کاربرد توأم کودهای آلی (به‌ویژه کود گاوی به دلیل مقادیر فسفر کل بالا) و شیمیایی به دلیل بهبود ویژگی‌های فیزیکی (ساختمان خاک و نفوذپذیری خاک) و شیمیایی (افزایش و بهبود فسفر قابل استفاده خاک) موجب بهبود کیفیت خاک و افزایش عملکرد گندم شدند که این تأثیر نسبت به کاربرد فقط کودهای آلی و یا شیمیایی بهتر بوده در بین کاربرد توأم کودهای آلی و شیمیایی نیز تیمار کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی به همراه ۷۵ درصد توصیه کود نیتروژن به دلیل مقادیر شاخص کیفیت خاک و عملکرد محصول بالاتر و عدم استفاده از کود شیمیایی فسفر و پتاسیم توصیه می‌گردد.

References

1. Andrews, S.S., Karlen, D.L. and Cambardella, C.A., 2004. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 1945–1962. doi.org/10.2136/sssaj2004.1945.
2. Aria, P. and Mirkhani, R., 2005. Methods of Soil Physical Analysis, *Technical Bulletin*, Soil and Water Research Institute, IranNo:479. (In Persian).
3. Basak, N., Mandal, B., Biswas, S., Basak, P., Mitran, T., Saha, B. and Datta, A., 2022. Impact of long term nutrient management on soil quality indices in rice-wheat system of lower indo-gangetic plain .*Sustainability*, *14*(11), 6533. doi.org/10.3390/su14116533
4. Biberdzic, M., Barac, S., Lalevic, D., Djikic, A., Prodanovic, D. and Rajicic, V., 2020. Influence of soil tillage system on soil compaction and winter wheat yield. *Chilean Journal of Agricultural Research*, *80*(1), 80-89. doi.org/10.4067/S0718-58392020000100080
5. Brar, B.S., Singh, J., Singh, G. and Kaur, G., 2015. Effects of long term application of inorganic and organic fertilizers on soil organic carbon and physical properties in maize–wheat rotation. *Agronomy*, *5*(2), 220-238. doi.org/10.3390/agronomy5020220
6. Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Franco, A.L.C., Cerri, C.E.P., Tormena, C.A. and Cerri, C.C., 2016. A soil management assessment framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. *Soil Science Society of America Journal*, *80*, 215–22. doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0328.
7. Cherubin, M.R., Tormena, C.A. and Karlen, D.L., 2017. Soil quality evaluation using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with contrasting texture. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *41*, e0160148.
8. da Luz, F.B., da Silva, V.R., Mallmann, F.J.K., Pires, C.A.B., Debiasi, H., Franchini, J. C. snd Cherubin, M. R., 2019. Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *281*, 100-110. doi.org/10.1016/j.agee.2019.05.006.
9. Emami, H., Astaraei, A.R. and Fotovat, A., 2014. Evaluating the effect of organic matter on soil quality score functions. *Journal of Water and Soil*,*28*(3), 565-574.
10. Gelaw, A.M., Singh, B.R. and Lal, R., 2015. Soil quality indices for evaluating smallholder agricultural land uses in northern Ethiopia. *Sustainability*, *7*(3), 2322-2337. doi.org/10.3390/su7032322.
11. Havlin, J.L., Tisdale, S.L., Beaton, J.D. and Nelson, W.L., (2016). *Soil fertility and fertilizers*. Pearson India.
12. Isong, I.A., John, K., Okon, P.B., Ogban, P.I. and Afu, S.M., 2022. Soil quality estimation using environmental covariates and predictive models: an example from tropical soils of Nigeria. *Ecological Processes*,*11*(1), 1-22. doi.org/10.1186/s13717-022-00411-y.
13. Jimenez, L.C.Z., Queiroz, H.M., Cherubin, M.R. and Ferreira, T.O., 2022. Applying the soil management assessment framework (SMAF) to assess mangrove soil quality. *Sustainability*, *14*(5), 3085. doi.org/10.3390/su14053085.
14. Kharche, V.K., Patil, S.R., Kulkarni, A.A., Patil, V.S. and Katkar, R.N., 2013. Long-term integrated nutrient management for enhancing soil quality and crop productivity under intensive cropping system on vertisols. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, *61*(4), 323-332. doi.org/10.5958/0974-0228.2023.00025.7
15. Karkaj, E., Sepehry, A., Barani, H., Motamedi, J. and Shahbazi, F., 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. doi.org/10.1007/s42729-019-00065-4.
16. Karlen, D.L., Stott, D.E., Cambardella, C.A., Kremer, R.J., King, K.W. and McCarty, G.W., 2014. Surface soil quality in five midwestern cropland Conservation Effects Assessment Project watersheds. *Journal of soil and water conservation*, *69*(5), 393-401. doi.org/10.2489/jswc.69.5.393.
17. Kalu, S., Koirala, M., Khadka, U.R. and Anup, K.C., 2015. Soil quality assessment for different land use in the Panchase area of western Nepal. *International Journal of Environmental Protection*, *5*(1), 38-43.
18. Li, P., Shi, K., Wang, Y., Kong, D., Liu, T., Jiao, J., ... and Hu, F., 2019. Soil quality assessment of wheat-maize cropping system with different productivities in China: Establishing a minimum data set. *Soil and Tillage Research*, *190*, 31-40. doi.org/10.1016/j.still.2019.02.019.

19. Li, P., Wu, M., Kang, G., Zhu, B., Li, H., Hu, F. and Jiao, J., 2020. Soil quality response to organic amendments on dryland red soil in subtropical China.*Geoderma*,*373*, 114416. doi.org/10.1016/j. geoderma.2020.114416.
20. Li, P., Zhang, T., Wang, X. and Yu, D., 2013. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. *Soil and Tillage Research*, *126*, 112-118. doi.org/10.1016/j.still.2012.07.011.
21. Li, N., Zhao, Y., Han, J., Yang, Q., Liang, J., Liu, X., Wang, Y. and Huang, Z., 2024. Impacts of future climate change on rice yield based on crop model simulation—A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, *949*, p.175038. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175038.
22. Liu, J., Wu, L., Chen, D., Li, M. and Wei, C., 2017. Soil quality assessment of different *Camellia oleifera* stands in mid-subtropical China.*Applied Soil Ecology*,*113*, 29-35. doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.01. 010.
23. Manhou, K., Hmouni, D., Moussadek, R., Zouahri, A., Yachou, H., Lhaj, M.O., Sanad, H., Ghanimi, A. and Dakak, H., 2026. Compost application enhances soil quality, growth, and yield of durum wheat under saline conditions. *Scientific Reports*.
24. Mirkhani, R., Bybordi, A., Saadat, S., Rezaei, H. and Esmaeelnejad, L., 2024. Evaluation of the soil quality of the lands under irrigated wheat cultivation in Tabriz plain.*Iranian Journal of Soil and Water Research*,*54*(12), 1981-1994.(In Persian with English abstract). doi.org/10.22059/ijswr.2023.363792.669555.
25. Mirkhani, R., Vaezi, A.R. and Rezaei, H., 2020. Investigation of the soil quality indices in irrigated wheat farms of Nazarabadregion in west of Alborz province. *Water and Soil*, *34*(5), 1125-1139.(In Persian with English abstract). doi.org/10.22067/jsw.v34i5.85526.
26. Mirkhani, R., Vaezi, A.R. and Rezaei, H., 2021. Spatial distribution of soil quality in Savojbolagh fields in Alborz province. *Applied Soil Research*, *9*(2), 1-14.(In Persian with English abstract)
27. Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R. and Moradian, S., 2017. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological Indicators*, *83*, 482-494. doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.001.
28. Moshiri, F.,Shahabi, A.A., Keshavarz, P.,Khogar, Z.,FeiziAsl, V., Tehrani, M.M., AsadiRahmani, H., Samawt, S., Ghaibi, M.N.,Sedari, M.H., Rashidi, N., Saadat, S. and Khademi, Z., 2014. Guidelines for integrated soil fertility and plant nutriation management of wheat. *Soil and Water Research Institute (SWRI).* 84 p.
29. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S. and Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Dept. of Agric. Circ. 939pp.
30. Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R., 1982. Methods of Soil Analysis, part 2, chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Inc. *Soil Science Society of America*, *115*9p.
31. Paul, G.C., Saha, S. and Ghosh, K.G., 2020. Assessing the soil quality of Bansloi river basin, eastern India using soil-quality indices (SQIs) and Random Forest machine learning technique. *Ecological Indicators*, *118*, 106804. doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106804.
32. Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W. and Gu, Z., 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China.*Geoderma*,*149*(3), pp. 325-334. doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015.
33. Sanchez, P.A. and Swaminathan, M.S., 2005. Hunger in Africa: the link between unhealthy people and unhealthy soils. *The Lancet*, *365*(9457), pp. 442-444.
34. Sun, B., Zhou, S. and Zhao, Q., 2003. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*, *115*(1), pp. 85-99. Swanepoel, P.A., Du Preez, C.C., Botha, P.R., Snyman, H.A. and Habig, J., 2015. Assessment of tillage effects on soil quality of pastures in South Africa with indexing methods. *Soil Research*, *53*(3), pp. 274-285. doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00078-8.
35. Toledo, D.M., Galantini, J., Dalurzo, H., Vazquez, S. and Bollero, G., 2013. Methods for assessing the effects of land use changes on carbon stocks of subtropical oxisols. *Soil Science Society of America Journal*, *77*(5), pp. 1542-1552. doi.org/10.2136/sssaj2013.03.0087.
36. Van Leeuwen, J.P., Moraetis, D., Lair, G.J., Bloem, J., Nikolaidis, N.P., Hemerik, L., and de Ruiter, P.C., 2015. Ecological soil quality affected by land use and management on semi-arid Crete. *Soil Discussions*, *2*, pp.187-215. doi.org/10.5194/soild-2-187-2015.

37. Walkley, A. and Black, I.A., 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter anda proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*,*37*, pp. 29-37.
38. Zhou, Y., Wang, C., Tong, Y., Cao, Q., Fu, X., Liu, L., ... and Ren, X., 2026. Diagnosis of Soil Quality in Barley Farmlands in Central and Northern Hubei Province. *Agronomy*, *16*(11), p. 1023. doi.org/10.3390/agronomy16111023.
39. Zornoza, R., Acosta, J.A., Bastida, F., Domínguez, S.G., Toledo, D.M. and Faz, A., 2015. Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, *management practices and human health*, 1, pp. 173–185. doi.org/10.5194/soil-1-173-2015, 2015.
40. Zhu, D., Zhang, Z., Zhang, F., Xia, Y., Liu, D., Fan, X., ... and Wu, M., 2026. Assessing the Sustainability of Crop Yield and Soil Quality in a Rice (Oryza sativa L.)–Wheat (Triticum aestivum L.) System Under Climate Change: An 18-Year Fertilization and Straw Management Study. *Agriculture*, *16*(3), p. 380. doi.org/10.3390/agriculture16030380.