

Studying the Effect of Chemical and Organic Fertilizer Application on Soil Quality

R. Mirkhani ^{1*}, F. Moshiri ¹, A. Ghaffarinejad¹, H. Rezaei ¹

1- Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Alborz, Iran

(*- Corresponding Author Email: Rasoul_mirkhani@yahoo.com)

Received: 19 August 2025
Revised: 25 October 2025
Accepted: 03 November 2025
Available Online: 03 November 2025

How to cite this article:

Mirkhani, R., Moshiri, F., Ghaffarinejad, A., & Rezaei, H. (2025). Studying the effect of chemical and organic fertilizer application on soil quality. *Journal of Water and Soil*, 39(4), 403-416. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.95005.1494>

Introduction

Soil quality plays a very important role in crop production. Quantitative and rapid assessment of soil quality provides the possibility of timely evaluation of the effect of management methods, including fertilization management, on soil conditions. In order to study the state of soil quality, it is necessary to use characteristics that represent dynamic soil quality that are sensitive and effective to land use changes and various management practices. In order to investigate the effects of the combined use of organic and chemical fertilizers on soil quality, this research was conducted in the form of randomized complete blocks in with 9 treatments and three replications in the Alborz province.

Materials and Methods

This research was conducted in plots with an area of 200 square meters in the Alborz province. Fertilizer treatments included: 1) fallow, 2) control (without using fertilizer), 3) application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers based on soil test, 4) 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, 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 phosphorus and potassium, 6) annual application of 20 tons of cow manure + application 75% of the recommended amount of nitrogen, 7) annual application of 20 tons of compost + application of 75% of the recommended amount of nitrogen, 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 phosphorus and potassium, bulk density, mean weighted diameter, cumulative soil quality index (SQI) and nemero quality index (NQI) were calculated. Finally, changes in soil quality indicators due to different management practices of organic and chemical fertilizers were evaluated.

Results and Discussion

According to the results, there was a significant difference between the treatments in the studied indices in all years, which indicated the effect of different treatments on soil quality. Furthermore, no significant differences were observed between the years. In the second and third years, the highest wheat yield in the studied treatments



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.2025.95005.1494>

was related to treatment 7 (annual application of 20 tons of waste compost + application of 75% of the recommended nitrogen amount) with values of 3833 kg/ha (first year), 6733 kg/ha (second year) and 5211 kg/ha (third year). This resulted in increases of 44%, 105%, and 131% compared to the control treatment (without fertilizer) in the first, second, and third years, respectively. The combined application treatments of organic and chemical fertilizers (4, 5, 6 and 7) had a significant increase compared to the chemical fertilizer application treatment (treatment 3) and the organic fertilizer application treatment (treatments 8 and 9). Moreover, there was no significant difference between the combined application treatments of organic and chemical fertilizers (treatments 4, 5, 6 and 7). In addition, all treatments had a significant increase compared to the control treatment (treatment 2), which indicates the effect of the combined application of organic fertilizers with chemical fertilizers in improving soil quality and wheat yield. In the third year, there was a significant correlation between yield and soil quality indices ($p < 0.01$), which indicates the effect of increasing soil quality due to increasing organic matter and chemical fertilizers on increasing wheat yield.

Conclusion

The results showed that there was a significant difference between the treatments in the studied indices, but there was no significant difference between different years. The combined application treatments of organic and chemical fertilizers significantly increased wheat yield compared to the chemical fertilizer application treatment and the organic fertilizer application treatments, while there was no significant difference between the combined application treatments of organic and chemical fertilizers. In addition, compared to the control (without fertilizer), all treatments showed a significant increase. In the third year, there was a significant correlation between wheat yield and soil quality indices.

Keywords: Compost, Cow manure, Fertilization management, Nemero quality index

بررسی اثر کاربرد کودهای شیمیایی و آلی بر کیفیت خاک

رسول میرخانی^{۱*} - فرهاد مشیری^۱ - سید علی غفاری نژاد^۱ - حامد رضایی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲

چکیده

کیفیت خاک نقش بسیار مهمی در تولید محصول دارد. ارزیابی کمی و سریع کیفیت خاک امکان بررسی به موقع تأثیر روش‌های مدیریتی از جمله مدیریت کوددهی بر شرایط خاک را فراهم می‌نماید. به منظور بررسی اثرات کاربرد کودهای آلی و شیمیایی بر کیفیت خاک، این تحقیق به مدت سه سال در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در کرت‌های ۲۰۰ متر مربعی 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 + 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 نمونه برداری خاک در پایان کشت گندم (هر سال) و تعیین ویژگی‌های pH، هدایت الکتریکی، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل استفاده، جرم مخصوص ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها اندازه‌گیری و شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی (SQI) و نمودار (NQI) محاسبه شد. نتایج نشان داد که بین تیمارها در شاخص‌های مورد بررسی اختلاف معنی‌داری وجود داشت ولی بین ساله‌های مختلف اختلاف معنی‌دار نبود. تیمارهای کاربرد توأم کود آلی و شیمیایی موجب افزایش معنی‌داری عملکرد گندم نسبت به تیمار کاربرد کود شیمیایی و تیمارهای کاربرد کود آلی (کود گاوی و کمپوست پسماند) داشت و بین تیمارهای کاربرد توأم کودهای آلی و شیمیایی نیز اختلاف معنی‌داری وجود نداشت در ضمن همه تیمارها نیز نسبت به تیمار شاهد (تیمار بدون مصرف کود) افزایش معنی‌داری داشتند. در سال سوم بین عملکرد و شاخص‌های کیفیت خاک همبستگی معنی‌داری وجود داشت.

واژه‌های کلیدی: شاخص کیفیت نمودار، کمپوست، کود دامی، مدیریت کوددهی

مقدمه

خصوص کیفیت خاک تعاریف زیادی ارائه شده که در بیشتر آن‌ها، تأکید اصلی بر توانایی خاک در انجام وظایف مورد نظر است برای مثال کارلن و همکاران (Karlen et al., 1999) و پوال اوباد و لال (de Pual Obade & Lal, 2016) کیفیت خاک را توانایی دائم یک خاک در انجام وظایف خود به عنوان یک سیستم حیاتی زنده در داخل اکوسیستم و تحت بهره‌برداری‌های متفاوت تعریف نمودند، به گونه‌ای که علاوه بر حفظ حاصلخیزی بیولوژیکی، توانایی بهبود کیفیت آب و

خاک وظایف یا کارکردهای مختلفی دارد که از آن جمله می‌توان به توانایی تولید محصول، ذخیره کربن، نگهداری آب، چرخه عناصر غذایی و تصفیه آب اشاره کرد. از این رو بسته به هدف استفاده از خاک، می‌توان کیفیت آن را مورد توجه قرار داد. از دیدگاه کشاورزی، کیفیت خاک عبارت از توانایی تولید محصول یا باروری خاک است. در

۱- مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(*)- نویسنده مسئول: Email: Rasoul.mirkhani@gmail.com

در ایران به دلیل ضعف مدیریت و استفاده نادرست از اراضی کشاورزی سالانه اراضی زیادی دچار تخریب و کاهش توان تولید می‌شوند. کشت‌های طولانی مدت و مستمر همراه با عملیات زراعی نامناسب، کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک و فرآیندهای خاک‌سازی را تحت تأثیر قرار داده و موجب پسرفت خاک می‌گردند. به منظور جلوگیری از پسرفت خاک و در راستای توسعه پایدار کشاورزی، شناخت عوامل ایجادکننده پسرفت خاک الزامی است. از اهداف مدیریت بهینه و استفاده پایدار از اراضی کشاورزی، شناسایی مدیریت‌هایی است که باعث حفظ کیفیت خاک و ارتقاء کمی و کیفی تولید در طولانی مدت گردند (Van Leeuwen et al., 2015). تاکنون تحقیقات زیادی برای ارزیابی کیفیت خاک در ایران انجام گرفته است که هر کدام دارای نقاط ضعف و قوت می‌باشند.

کازیک و همکاران (Tkaczyk et al., 2018) در پژوهشی به منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک بر عملکرد گندم، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و عملکرد گندم را در ۴۵ مزرعه کشاورزی تحت کشت گندم واقع در جنوب شرقی لهستان طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ اندازه‌گیری و مزارع را از نظر بافت، اسیدیته و حاصلخیزی کلاس‌بندی کردند. نتایج نشان داد که کلاس بافت خاک (به ویژه مقدار سیلت و رس) و کلاس اسیدیته تأثیر مثبتی بر عملکرد گندم زمستانه داشت و فسفر و پتاسیم قابل استفاده نیز تأثیر مثبتی بر عملکرد گندم زمستانه داشتند ولی این تأثیر معنی‌دار نبود. بیشترین عملکرد گندم مربوط به مزارع با کلاس بافتی سیلت، کلاس اسیدیته بالاتر از ۷/۲، کلاس حاصلخیزی با فسفر خیلی بالا، پتاسیم و منیزیم متوسط و نیتروژن ۶۱ تا ۹۰ کیلوگرم در هکتار بود.

بیبیرزیک و همکاران (Biberdzic et al., 2020) در پژوهشی در یک خاک رتی‌سول در غرب صربستان به 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 ($r=0/49$) و بین تراکم خاک و عملکرد گندم نیز همبستگی معنی‌داری ($r=0/85$) وجود داشت به طوری که با افزایش رطوبت خاک، عملکرد افزایش و با افزایش تراکم خاک عملکرد گندم کاهش یافت.

لی و همکاران (Li et al., 2019) در پژوهشی در ۱۳۲ مزرعه تحت کشت گندم دیم در شمال، شمال شرق و جنوب شرق چین، ۲۶ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را اندازه‌گیری و با استفاده از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA)، ماده آلی، نیتروژن کل، نیتروژن قابل هیدرولیز قلیایی^۲ و روی قابل استفاده را به عنوان

هوا و همچنین تأمین‌کننده سلامت انسان، حیوان و گیاه را دارا با شد. پاتزل و همکاران (Patzel et al., 2000) بیان داشتند که کیفیت خاک شامل مجموعه‌های متنوعی از ویژگی‌های مختلف خاک است که با توجه به پیچیدگی‌های آن‌ها در صورت مرتبط بودن با کارکردهای مورد نظر خاک می‌توانند معیار مناسبی از کیفیت خاک باشد؛ بنابراین می‌توان بیان کرد که کیفیت خاک^۱ مفهومی از کارکردهای خاک است.

ارزیابی کمی کیفیت خاک با استفاده از ترکیبی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مؤثر بر کیفیت خاک انجام می‌گیرد (Toledo et al., 2013). به منظور 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 آن که 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 از جمله مقدار عناصر غذایی سهم بسزایی در جلوگیری و کاهش اثرات مضر مدیریت‌های نامناسب حاصلخیزی خاک داشته (Sun et al., 2003) و ماده آلی به دلیل 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 کمی کیفیت خاک با استفاده از مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مؤثر بر کیفیت خاک در قالب یک مدل ریاضی به صورت عددی ارائه می‌شود. که این عدد به عنوان شاخص کلی کیفیت خاک بوده و منعکس‌کننده مجموعه‌ای ویژگی‌های مورد نظر خاک می‌باشد (Qi et al., 2009). از جمله این مدل‌ها می‌توان به معادله شاخص کیفیت خاک تجمعی ساده (SQI_A) و وزنی (SQI_W)، شاخص کیفیت نمرور^۲ (NQI) (Doran & Parkin, 1997) اشاره کرد. ارزیابی کیفیت خاک به عنوان یک ابزار در گزینش شیوه‌های مدیریتی ویژه نقش بسیار مهمی داشته و معیاری برای سنجش کشاورزی پایدار است (Van Leeuwen et al., 2015). آگاهی از وضعیت کیفیت خاک در کشاورزی و منابع طبیعی برای مدیریت بهینه اراضی و رسیدن به حداکثر بهره‌وری اقتصادی ضروری است. در کشورهای در حال توسعه به علت آسیب‌پذیری خاک‌های کشاورزی از نظر زیست‌محیطی، توجه به کیفیت خاک دارای اهمیت اقتصادی زیادی است.

گرفت. نتایج نشان داد که استراتژی‌های 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.

ایسونگو همکاران (Isong et al., 2022) با استفاده از ۱۱۰ نمونه خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متر) در فواصل ۲-۵ کیلومتری در ایالت کراس ریور، نیجریه جمع‌آوری کردند و ۱۱ ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک را تعیین شد. سپس کیفیت خاک را با استفاده از مجموعه کل ویژگی‌ها (TDS) و مجموعه حداقل ویژگی‌ها (پایداری ساختمان خاک، درصد شن، مقدار کربن آلی خاک و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها) محاسبه کردند و از دو تابع امتیازدهی خطی (L) و غیرخطی (NL) برای امتیازدهی استفاده کردند نتایج نشان داد که کیفیت خاک در منطقه جنوبی بالا و در منطقه شمالی پایین بود. کلاس با کیفیت خاک بالا ($< 49\%$) و کلاس کیفیت خاک متوسط ($< 14\%$) در همه مدل‌های پیش‌بینی استفاده شده بر منطقه مورد مطالعه غالب بود.

میرخانی و همکاران (Mirkhani et al., 2020) در پژوهشی کیفیت خاک اراضی کشاورزی نظرآباد استان البرز را بررسی کردند. برای این منظور ۹۵ نمونه خاک سطحی (صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) را به صورت شبکه‌بندی (1650×1650 متر) نمونه‌برداری و ۲۰ ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک را اندازه‌گیری کردند و کمترین ویژگی‌ها (MDS) شامل شن، جرم مخصوص ظاهری، کربنات کلسیم معادل، فسفر، نسبت جذب سدیم و بر با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) انتخاب شدند شاخص‌های کیفیت نمورو (NQI) و تجمعی ساده (IQI_a) و وزنی (IQI_w) را بررسی کردند نتایج نشان داد که بین عملکرد گندم آبی و شاخص‌های IQI_w ($r=0.68$)، IQI_a ($r=0.67$) و NQI ($r=0.62$) که با استفاده از حداقل ویژگی‌های خاک تعیین شده بود، همبستگی معنی‌دار ($p < 0.01$) بود همچنین با توجه به نتایج، شاخص IQI_w بر مبنای حداقل ویژگی‌های خاک، حدود ۸۲ درصد منطقه نظرآباد دارای کیفیت خاک خیلی خوب و خوب بود و حدود ۱۱ درصد کیفیت متوسط و حدود ۷ درصد کیفیت پایین و خیلی پایین بود.

میرخانی و همکاران (Mirkhani et al., 2021) در پژوهشی کیفیت خاک اراضی کشاورزی ساوجبلاغ استان البرز را بررسی کردند. در این مطالعه نمونه‌های خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متر) از ۵۰ مزرعه در منطقه ساوجبلاغ استان البرز نمونه‌برداری و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک اندازه‌گیری کردند. کل متغیرهای مؤثر بر کیفیت خاک را استخراج و کمترین متغیرهای مؤثر بر کیفیت خاک را با استفاده از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) انتخاب کردند و شاخص‌های کیفیت خاک شامل کیفیت تجمعی وزنی

کمترین ویژگی‌ها انتخاب و شاخص کیفیت تجمعی وزنی (SQI_w) را تعیین کردند. نتایج نشان داد که در سه سطح عملکرد بالا، متوسط و پایین گندم، شاخص کیفیت تجمعی به‌ترتیب برابر ۵۵/۰، ۴۸/۰ و ۳۹/۰ بود و شاخص کیفیت خاک با عملکرد گندم همبستگی معنی‌داری ($r=0.40$) در سطح یک درصد داشت.

نبی‌الهی و همکاران (Nabiollahi et al., 2017) به بررسی شاخص‌های کیفیت خاک در اراضی کشاورزی تحت تأثیر هدایت الکتریکی استان کردستان در ایران پرداختند. در این پژوهش از سه مدل تعیین شاخص کیفیت خاک تجمعی (IQI_a)، شاخص کیفیت تجمعی وزنی (IQI_w) و شاخص کیفیت نمورو در ۱۵۰ نمونه خاک استفاده کردند و ۹ ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک را اندازه‌گیری کردند با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، هدایت الکتریکی، اسیدیته، درصد سدیم تبادل، ظرفیت تبادل کاتیونی و جرم مخصوص ظاهری را به‌عنوان حداقل داده‌ها (MDS) را تعیین کردند. نتایج مقادیر ضریب همبستگی خطی نشان داد که ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از IQI_a ($R^2=0.82$) بهتر از IQI_a ($R^2=0.78$) و IQI_w ($R^2=0.74$) بود و استفاده از مجموع کل داده‌ها نیز بهتر از مجموعه حداقل داده‌ها بود. با این حال، استفاده از شاخص IQI_w و روش مجموعه حداقل داده‌ها به‌دلیل صرفه‌جویی در زمان و هزینه برای ارزیابی کیفیت خاک توصیه کردند.

کارکج و همکاران (Karkaj et al., 2019) طی پژوهشی به منظور انتخاب شاخص کیفیت مناسب برای اکوسیستم مرتع در منطقه نیمه‌خشک آذربایجان شرقی در شمال غرب ایران، با اندازه‌گیری ۱۶ ویژگی خاک با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، هفت ویژگی شامل درصد رس و سیلت، هدایت الکتریکی، ماده آلی، کربنات کلسیم معادل، ظرفیت تبادل کاتیونی و نسبت جذب سدیم را به‌عنوان حداقل ویژگی‌ها انتخاب کردند و با استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌ها، شاخص‌های کیفیت تجمعی وزنی، تجمعی ساده و شاخص کیفیت نمورو را تعیین کردند و با ارزیابی نسبت کارایی (ER) و شاخص حساسیت (SI) نشان دادند که شاخص کیفیت نمورو با استفاده از حداقل ویژگی‌ها با شاخص حساسیت ۶۰/۲ و نسبت کارایی ۷۱/۸۵ مناسب‌ترین روش برای ارزیابی کیفیت خاک مراتع نیمه‌خشک می‌باشد.

بازاک و همکاران (Basak et al., 2022) با بررسی کیفیت خاک در سیستم کشت برنج (*Oryza sativa* L.) و گندم (*Triticum aestivum* L.) با استفاده از مدل اصلاح شده چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF)، شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی، تغذیه‌ای و بیولوژیکی خاک برای استراتژی‌های مدیریت مواد مغذی مختلف، یعنی کود معدنی (NPK)، $7/5$ تن در هکتار کود دامی (NPKF)، 10 تن در هکتار کاه شلتوک (NPKP) و NPK 8 تن در هکتار کود سبز (NPKG) مورد تجزیه و تحلیل قرار

نمونه برداری خاک در پایان هر کشت، ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک شامل: pH، هدایت الکتریکی به وسیله EC سنج، کربن آلی به روش والکلی بلاک (Walkley & Black, 1934)، مقادیر فسفر قابل استفاده به روش اولسن (Olsen et al., 1982) و پتاسیم قابل استفاده به روش استخراج با استات آمونیوم یک نرمال، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Aria & Mirkhani, 2005) اندازه‌گیری شد. از مجموع ویژگی‌های خاک، شاخص‌های کیفیت خاک محاسبه شد. برای تعیین شاخص‌های کیفیت خاک بعد از نمره‌دهی و وزن‌دهی ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک و تعیین سهم هر ویژگی، شاخص‌های کیفیت برای هر نمونه خاک با استفاده از معادله تجمعی کیفیت خاک (ساده و وزنی) (SQI) و معادله شاخص کیفیت نمورو (NQI) محاسبه شد. هر یک از مدل‌های NQI و SQI با استفاده از کل ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک تعیین شد.

شاخص کیفیت خاک تجمعی ساده (IQI_A) (Andrews et al., 2002a, 2002b) و تجمعی وزنی (IQI_W) (Doran & Parkin, 1996; Karlen et al., 1997) به ترتیب به صورت زیر می‌باشند:

$$IQI_W = \sum_{i=1}^n S_i W_i \quad (1)$$

$$IQI_A = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{n} \quad (2)$$

که در آنها: S_i مقدار هر ویژگی خاک (امتیاز ویژگی)، W_i وزن هر ویژگی خاک و n تعداد ویژگی‌های مورد نظر است.

شاخص کیفیت نمورو (NQI) از رابطه زیر به دست می‌آید (Qin & Zhao, 2000):

$$NQI = \sqrt{\frac{P_{ava}^2 + P_{min}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n} \quad (3)$$

که در آن: P_{ave} میانگین مقادیر ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه خاک، P_{min} کمترین مقدار موجود در بین ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه و n تعداد ویژگی‌های مورد نظر برای محاسبه هر شاخص است.

با توجه به این که ویژگی‌های انتخاب شده دارای واحدهای متفاوتی هستند، به منظور این که بتوان آن‌ها را در قالب یک شاخص کلی درآورد، مقادیر ویژگی‌ها به اعداد بدون واحد بین صفر تا یک تبدیل شدند. برای این منظور از توابع عضویت فازی استفاده شد (Torbert et al., 2008). با استفاده از توابع عضویت فازی، ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه خاک به امتیازات بدون بعد صفر (کمترین مطلوبیت برای کیفیت خاک و محصول) تا یک (بیشترین مطلوبیت برای کیفیت خاک و محصول) تبدیل شدند (Yanbing et al., 2009).

(SQI_W) و تجمعی ساده (SQI_A) و شاخص کیفیت نمورو (NQI) تعیین کردند. همچنین تغییرات مکانی شاخص‌های کیفیت را با استفاده از روش زمین‌آمار تحلیل و توزیع مکانی آن‌ها را با استفاده از روش کریجینگ معمولی تعیین کردند. نتایج نشان داد که شاخص NQI با استفاده از کل ویژگی‌ها دقت بالاتری بر اساس آماره‌های R^2 برابر با ۰/۸۵ و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE=۰/۰۱) برای تهیه نقشه کیفیت خاک داشت و قسمت وسیعی از منطقه کیفیت بالا داشت (کلاس II).

میرخانی و همکاران (Mirkhani et al., 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 (۰-۳۰ سانتی‌متری) و عملکرد گندم را بررسی کردند. نتایج نشان داد که همبستگی معنی‌داری در سطح یک درصد ($p < 0.01$) بین عملکرد گندم و شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از حداقل ویژگی‌ها ($r = 0.63$ - 0.60) و کل ویژگی‌ها ($r = 0.56$ - 0.60) و همچنین بین استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌ها در NQI ($r = 0.81$)، SQI_W ($r = 0.84$) و SQI_A ($r = 0.88$) وجود داشت. لذا هر سه شاخص مورد بررسی برای منطقه مورد مطالعه مناسب بوده و استفاده از حداقل ویژگی‌ها به دلیل همبستگی نسبتاً بالاتر و تعداد ویژگی‌ها و هزینه کمتر، مناسب‌تر از روش استفاده از کل ویژگی‌ها بود. با وجود مطالعات زیادی که در خصوص کیفیت خاک انجام شده، 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 مدیریت‌های مختلف کودی ضروری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

طراحی آزمایش

این تحقیق به منظور بررسی اثرات کاربرد توأم کودهای شیمیایی و آلی بر کیفیت خاک زیر کشت گندم در سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ به مدت سه سال 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 + 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 و (۹) کاربرد سالانه ۲۰ تن کمپوست پسماند بود. پس از

ویژگی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک در نظر گرفته شد و وارد معادلات شاخص‌های کیفیت تجمعی ساده (SQI_A) و وزنی (SQI_W) و نمودار (NQI) شدند و در نهایت یک مقدار به عنوان شاخص کیفیت خاک ارائه شد (Qi et al., 2009). برای تعیین حدود طبقه‌بندی شاخص‌های کیفیت خاک، از جدول ۲ استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه خاک و کودهای آلی

جدول ۳ نتایج تجزیه خاک محل اجرای آزمایش را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج تجزیه خاک، محل اجرای آزمایش دارای خاک قلیایی با ماده آلی پایین بوده و از نظر فسفر قابل استفاده (کم)، آهن قابل استفاده (خیلی کم) و منگنز قابل استفاده (کم) دارای کمبود می‌باشد (Moshiri et al., 2014).

جدول ۴ نتایج تجزیه کودهای آلی مورد استفاده در تیمارهای آزمایش را نشان می‌دهد.

ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک

جدول ۵ مقادیر اشتراک‌پذیری و وزن ویژگی‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۵، کربن آلی خاک بالاترین وزن و فسفر قابل استفاده پایین‌ترین وزن را داشتند. بنابراین منطقه مورد مطالعه از نظر کربن آلی دارای محدودیت بیشتری است. لذا، کاربرد کود دامی علاوه بر بهبود شرایط شیمیایی خاک موجب بهبود شرایط فیزیکی خاک مثل بهبود ساختمان خاک شده و موجب بهبود کیفیت خاک و افزایش عملکرد محصول خواهد شد. امامی و همکاران (Emami et al., 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 ۶ نتایج تجزیه واریانس شاخص‌ها کیفیت خاک مورد بررسی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج در همه سال‌ها بین تکرارها اختلاف معنی‌داری وجود نداشت ولی بین تیمارها در شاخص‌های مورد بررسی اختلاف معنی‌داری وجود داشت که این اختلاف در سال اول (۱۳۹۶) در سطح ۵ درصد و در سال دوم (۱۳۹۷) و سوم (۱۳۹۸) در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود که نشان‌دهنده تأثیر تیمارهای مختلف بر کیفیت خاک بود. همچنین بین سال‌های مختلف اختلاف معنی‌دار نبود.

جدول ۷، وضعیت کیفیت خاک در تیمارهای مورد مطالعه را با

سه نوع منحنی نمره‌دهی “کمتر بهتر است”، “بیشتر بهتر است” و “حد بهینه” برای تبدیل مقادیر به امتیاز بدون بعد بین صفر تا یک استفاده شد. برای منحنی‌های نمره‌دهی “بیشتر بهتر است” و “کمتر بهتر است” به ترتیب با استفاده از روابط (۴) و (۵) و منحنی “حد بهینه” از تلفیق روابط (۴) و (۵) استفاده شد (MATLAB (R2015b, 2015):

$$f(x, a, b) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1-2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (4)$$

$$f(x, a, b) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ 1-2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (5)$$

که در آنها: $f(x)$ امتیاز ویژگی که بین صفر و یک است، x مقدار ویژگی، a مقدار آستانه پایین ویژگی و b مقدار آستانه بالای ویژگی هستند.

جدول ۱ تابع نمره‌دهی، حد بهینه، کمینه و بیشینه محدود کننده ویژگی‌های اندازه‌گیری شده برای رشد گندم را نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۱ برای ویژگی‌هایی مانند پایداری خاکدانه‌ها، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل جذب از منحنی نمره‌دهی “بیشتر بهتر است” استفاده شد. برای ویژگی‌هایی مانند هدایت الکتریکی، جرم مخصوص ظاهری، از منحنی “کمتر بهتر است” استفاده شد. برای ویژگی‌هایی مانند پدپ‌هاش، از منحنی “حد بهینه” استفاده شد (Cherubin et al., 2016).

در ادامه سهم اشتراک‌پذیری^۴ هر ویژگی به روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی به وسیله نرم‌افزار SPSS ۲۴ انجام شد سپس نسبت مقدار سهم اشتراک‌پذیری هر ویژگی به مجموع مقادیر سهم اشتراک‌پذیری کل ویژگی‌ها در هر مجموعه، به عنوان وزن هر

3- Optimum range

4- Communalilty

1- Less is better

2- More is better

به تیمارهای ۲، ۳، ۵ و ۷ اختلاف معنی دار داشت و در سال دوم کمترین و بیشترین مقدار کیفیت خاک به ترتیب مربوط به تیمارهای ۱ و ۴ بود و تیمار ۴ نسبت به سایر تیمارها اختلاف معنی داری داشت که نشان دهنده تأثیر معنی دار کاربرد توأم کود گاوی و شیمیایی بر کیفیت خاک می باشد که دلیل آن تأثیر کود گاوی بر بهبود ویژگی های فیزیکی و تأثیر کود شیمیایی پرمصرف به ویژه فسفر بر بهبود فسفر قابل استفاده خاک می باشد. خارج و همکاران (*Kharche et al., 2013*) در تحقیقی به منظور بررسی کودهای شیمیایی و آلی و کاه و کلس و کود سبز بر کیفیت خاک نشان دادند که کاربرد مداوم کودهای شیمیایی همراه با کودآلی بیش از کاربرد کودهای شیمیایی تنها موجب بهبود خصوصیات فیزیکی خاک شده است.

استفاده از شاخص های کیفیت نمورو (NQi)، شاخص کیفیت تجمعی ساده (SQI_a) و شاخص کیفیت تجمعی وزنی (SQI_w) را نشان می دهد. با توجه به نتایج، تیمارهای مورد مطالعه دارای طیف وسیعی از محدوده کیفیت خاک می باشد و محدوده کیفیت خاک در شاخص های NQi، SQI_a، SQI_w، در سال اول به ترتیب ۰/۲۷۰ - ۰/۱۸۲، ۰/۴۷۸ - ۰/۳۲۲ و ۰/۴۷۴ - ۰/۳۴۲ و در سال دوم به ترتیب ۰/۳۹۳ - ۰/۱۷۲، ۰/۶۷۰ - ۰/۳۰۵ و ۰/۶۴۰ - ۰/۳۰۳ و در سال سوم به ترتیب ۰/۲۸۵ - ۰/۱۳۸، ۰/۴۹۹ - ۰/۲۴۴ و ۰/۵۰۵ - ۰/۲۳۹ بودند. در سال اول کمترین و بیشترین مقدار کیفیت خاک در شاخص های مورد مطالعه به ترتیب مربوط به تیمارهای ۳ و ۹ بود و تیمار ۹ نسبت

جدول ۱- تابع نمره دهی، حد بهینه، کمینه و بیشینه محدود کننده ویژگی های اندازه گیری شده برای رشد گندم
Table 1- Scoring functions and upper, optimum and lower threshold values of measured properties for wheat growth

ویژگی های خاک Soil properties	بافت Texture	تابع نمره دهی Scoring function	حد کمینه محدود کننده Lower threshold values	حد بیشینه محدود کننده Upper threshold values
جرم مخصوص ظاهری (Bd) (g.cm ⁻³)	لوم Loam	Less is better	1.4	1.7
میانگین وزنی قطر خاکدانه ها (MWD) (cm)		More is better	0	3.38
کربن آلی (OC) (%)		More is better	0	2
فسفر قابل استفاده (P _{ava}) (mg.kg ⁻¹)		More is better	5	15
پتاسیم قابل استفاده (K _{ava}) (mg.kg ⁻¹)		More is better	100	200

جدول ۲- طبقه بندی شاخص های کیفیت خاک (Mirkhani, 2020)

Table 2-Classification of soil quality grades					
شاخص Index	کلاس کیفیت خاک Soil quality grade				
	خیلی خوب (I) Very high	خوب (II) High	متوسط (III) Moderate	پایین (IV) Low	خیلی پایین (V) Veryhigh
	>0.417	0.365- 0.417	0.314- 0.365	0.263- 0.314	<0.263
NQi	>0.417	0.365- 0.417	0.314- 0.365	0.263- 0.314	<0.263
SQI _a	>0.649	0.580- 0.649	0.512- 0.580	0.444- 0.512	<0.444
SQI _w	>0.663	0.600- 0.663	0.521- 0.600	0.410- 0.521	<0.410

NQi: شاخص کیفیت نمورو، SQI_a: شاخص کیفیت خاک تجمعی ساده و SQI_w: شاخص کیفیت خاک تجمعی وزنی

جدول ۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 3-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	
Soil Texture	Sand	Silt	Clay	Cu _{ava}	Zn _{ava}	Mn _{ava}	Fe _{ava}	K _{ava}	P _{ava}	ایستگاه تحقیقاتی کرج 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 ۴- نتایج تجزیه کودهای آلی مورد استفاده در تیمارهای آزمایش

Table 4- Results of the analysis of organic fertilizers used in the experimental treatments

سال Year	نوع کود آلی Type of organic fertilizer	pH	EC dS.m ⁻¹	OC	N _{total}	P _{total}	K _{total}	Moisture %	Mass loss at 400°C
سال اول (۱۳۹۶) First year (2017)	کود گاوی (cow manur)	8.6	8.3	۲۰/۲	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
سال دوم (۱۳۹۷) Second year (2018)	نوع کود آلی Type of organic fertilizer	pH	EC dS m ⁻¹	OC	N _{total}	P _{total}	K _{total}	Moisture %	Mass loss at 400°C
	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
سال سوم (۱۳۹۸) Third year (2019)	نوع کود آلی Type of organic fertilizer	pH	EC dS.m ⁻¹	OC	N _{total}	P _{total}	K _{total}	Moisture %	Mass loss at 400°C
	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)	-	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

جدول ۵- مقادیر وزن ویژگی‌های خاک

Table 5- Weight values of soil properties

ویژگی‌های خاک Soil properties	اشتراک‌پذیری Communality	وزن Weight
جرم مخصوص ظاهری (Bd) (g.cm ⁻³)	0.603	0.180
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) (cm)	0.732	0.218
کربن آلی % (OC)	0.780	0.233
فسفر قابل استفاده (P _{ava}) (mg.kg ⁻¹)	0.530	0.158
پتاسیم قابل استفاده (K _{ava}) (mg.kg ⁻¹)	0.708	0.211

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) شاخص‌های کیفیت خاک بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد

Table 6- 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		
			NQI	SQIa	SQIw
سال اول (۱۳۹۶) First year (2017)	تکرار (Replication)	2	0.002 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.003 ^{ns}
	تیمار (Treatment)	8	0.002*	0.007*	0.006*
سال دوم (۱۳۹۷) Second year (2018)	تکرار (Replication)	2	0.001 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.001 ^{ns}
	تیمار (Treatment)	8	0.015**	0.042**	0.034**
سال سوم (۱۳۹۸) Third year (2019)	تکرار (Replication)	2	0.002 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.007 ^{ns}
	تیمار (Treatment)	8	0.006**	0.018**	0.019**
	سال (Year)	2	0.020 ^{ns}	0.023 ^{ns}	0.002 ^{ns}

** معنی‌داری در سطح ۱٪ * معنی‌داری در سطح ۵٪ ns غیرمعنی‌دار

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

جدول ۷- مقادیر شاخص های کیفیت خاک در تیمارهای آزمایشی
Table 7- Values of soil quality indices in the experimental treatments

تیمار Treatment	سال اول (۱۳۹۶) First year (2017)			سال دوم (۱۳۹۷) Second year (2018)			سال سوم (۱۳۹۸) Third year (2019)		
	NQI	SQLa	SQLw	NQI	SQLa	SQLw	NQI	SQLa	SQLw
1	0.245 ^{abc}	0.404 ^{abcd}	0.406 ^{bcd}	0.172 ^d	0.305 ^f	0.303 ^f	0.138 ^b	0.244 ^b	0.239 ^c
2	0.217 ^{cd}	0.382 ^{cd}	0.395 ^{cd}	0.256 ^c	0.454 ^c	0.459 ^c	0.229 ^a	0.405 ^a	0.408 ^{ab}
3	0.182 ^d	0.322 ^d	0.342 ^d	0.317 ^b	0.543 ^b	0.529 ^b	0.230 ^a	0.406 ^a	0.410 ^{ab}
4	0.249 ^{abc}	0.419 ^{abc}	0.424 ^{abc}	0.393 ^a	0.670 ^a	0.640 ^a	0.270 ^a	0.476 ^a	0.478 ^{ab}
5	0.218 ^{bcd}	0.378 ^{cd}	0.384 ^{cd}	0.316 ^b	0.539 ^{bc}	0.522 ^{bc}	0.231 ^a	0.408 ^a	0.406 ^b
6	0.254 ^{abc}	0.423 ^{abc}	0.431 ^{abc}	0.293 ^{bc}	0.517 ^{bc}	0.531 ^{bc}	0.261 ^a	0.461 ^a	0.462 ^{ab}
7	0.220 ^{bcd}	0.383 ^{cd}	0.393 ^{cd}	0.303 ^{bc}	0.507 ^{bc}	0.523 ^{bc}	0.271 ^a	0.479 ^a	0.485 ^{ab}
8	0.266 ^{ab}	0.468 ^{ab}	0.474 ^{ab}	0.218 ^d	0.386 ^{df}	0.404 ^{df}	0.285 ^a	0.499 ^a	0.505 ^a
9	0.270 ^a	0.478 ^a	0.476 ^a	0.189 ^d	0.319 ^{df}	0.345 ^{df}	0.265 ^a	0.465 ^a	0.466 ^{ab}

(۱) آیش، (۲) شاهد بدون مصرف کود، (۳) کاربرد کودهای شیمیایی نیتروژنی، فسفوری و پتاسیمی بر اساس آزمون خاک، (۴) 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، (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 ۲۰ تن کود گاوی + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده، (۷) کاربرد ۲۰ تن کمپوست پسماند + کاربرد ۷۵ درصد مقدار نیتروژن توصیه شده، (۸) کاربرد ۲۰ تن کود گاوی، (۹) کاربرد ۲۰ تن کمپوست پسماند

وسیعی از عملکرد می‌باشد. با توجه به میانگین عملکرد گندم در تیمارهای مورد مطالعه، میانگین عملکرد گندم در تیمار ۷ (با مقادیر ۳۸۳۳ (سال اول)، ۶۷۳۳ (سال دوم) و ۵۲۱۱ (سال سوم) کیلوگرم در هکتار) نسبت به تیمار شاهد (بدون استفاده از کود) در سال‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۴۴، ۱۰۵ و ۱۳۱ درصد افزایش داشت. در سال اول تیمار ۵، بجز تیمار ۶، با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری داشت و سایر تیمارها نیز با هم اختلاف معنی‌داری نداشتند در سال دوم نیز تیمار ۷، بجز تیمار ۶، با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری داشت در سال سوم نیز تیمارهای کاربرد توأم کود آلی و شیمیایی (۴، ۵، ۶ و ۷) افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار بدون مصرف کود (تیمار ۲)، تیمار کاربرد کود شیمیایی (تیمار ۳) و تیمار کاربرد کود آلی (تیمارهای ۸ و ۹) داشت و بین تیمارهای کاربرد توأم کودهای آلی و شیمیایی (تیمارهای ۴، ۵، ۶ و ۷) نیز اختلاف معنی‌داری وجود نداشت در ضمن در سال سوم همه تیمارها نیز نسبت به تیمار شاهد (تیمار ۲) افزایش معنی‌داری داشتند که این نتایج نشان‌دهنده تأثیر تیمارهای کاربرد توأم کودهای آلی (بدلیل تأثیر بر فعالیت‌های بیولوژیکی خاک، بهبود ساختمان خاک و نفوذپذیری به‌ویژه در سال سوم) به همراه کود شیمیایی پرمصرف فسفر به‌دلیل افزایش و بهبود فسفر قابل استفاده خاک بر افزایش عملکرد گندم می‌باشد که با نتایج دیگر پژوهگران مطابقت داشت.

در سال سوم نیز کمترین و بیشترین مقدار کیفیت خاک به ترتیب مربوط به تیمارهای ۱ و ۸ بودند البته در سال سوم همه تیمارها نسبت به تیمار ۱ افزایش معنی‌داری داشتند ولی نسبت به هم اختلاف معنی‌داری نداشتند ولی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از کود گاوی بهتر بوده ولی این اختلاف نسبت به کمپوست معنی‌دار نبود و کاربرد کود شیمیایی نیز تأثیر معنی‌داری با عدم کاربرد آن نداشت. که این نتایج نشان‌دهنده تأثیر تیمار کود دامی و کمپوست پسماد در بهبود کیفیت خاک می‌باشد. لی و همکاران (Li et al., 2020) با بررسی تأثیر کودهای آلی و شیمیایی بر کیفیت خاک و عملکرد کلزا در اراضی دیم منطقه نیمه گرم سیر در چین نشان دادند که ماده آلی با عملکرد کلزا ($r=0.69$) 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.

عملکرد محصول اندازه‌گیری شده در تیمارهای مورد بررسی

جدول ۸ مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین عملکرد گندم را نشان می‌دهد. محدوده عملکرد گندم در تیمارهای مورد مطالعه در سال‌های اول تا سوم به ترتیب ۳۸۳۳-۱۶۶۷، ۶۷۳۳-۲۳۸۳ و ۵۲۱۱-۲۲۵۶ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. لذا تیمارها مورد مطالعه دارای محدوده

جدول ۸- مقادیر عملکرد گندم در تیمارهای آزمایشی
Table 8- Wheat yield values in experimental treatments

تیمار Treatment	سال (Year)		
	First year (2017)	Second year (2018)	Third year (2019)
آیش (Fallow)	fallow	fallow	fallow
شاهد (بدون مصرف کود) Control (without using fertilizer)	2667 ^b	3283 ^{cd}	2256 ^d
کاربرد کودهای شیمیایی نیتروژن، فسفری و پتاسیمی بر اساس آزمون خاک Application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers based on soil test	1833 ^b	3867 ^{cb}	3656 ^{cb}
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	2833 ^b	4756 ^b	5164 ^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	2833 ^{ab}	2383 ^d	4776 ^{ab}
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 ^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	2667 ^b	6733 ^a	5211 ^a
کاربرد سالانه ۲۰ تن کود گاوی Annual application of 20 tons of cow manure	1667 ^b	2689 ^d	3096 ^c

بین عملکرد گندم و شاخص کیفیت تجمعی وزنی همبستگی معنی داری ($r=0/40$) در سطح یک درصد وجود داشت. نبی الهی و همکاران (Nabiollahi et al., 2017) نیز در پژوهشی در اراضی کشاورزی تحت تأثیر شوری در استان کردستان ایران نشان دادند که بین عملکرد گندم آبی و IQI_w ($r=0/70$)، IQI_a ($r=0/71$) و NQI ($r=0/71$) با حداقل ویژگی‌ها همبستگی معنی دار ($p<0/01$) است. پاول و همکاران (Paul et al., 2020) با بررسی کیفیت خاک حوزه آبخیز Bansloi در شرق هند، همبستگی بین عملکرد گندم و ذرت با شاخص کیفیت تجمعی وزنی را به ترتیب $R^2=0/21$ و $R^2=0/09$ و با تجمعی ساده را به ترتیب $R^2=0/20$ و $R^2=0/08$ بیان کردند. لی و همکاران (Li et al., 2013) با ارزیابی کیفیت خاک شالیزارهای شهرستان یچینگ در استان جیانگشی چین بیان کردند که بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد برنج همبستگی معنی داری ($r=0/41$) در سطح یک درصد وجود داشت.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که بین تیمارها در شاخص‌های مورد بررسی اختلاف معنی داری وجود داشت ولی بین سال‌های مختلف اختلاف معنی دار نبود. تیمارهای کاربرد توأم کود آلی و شیمیایی موجب افزایش معنی داری عملکرد گندم نسبت به تیمار کاربرد کود شیمیایی و تیمارهای کاربرد کود آلی (کود گاوی و کمپوست) شد و بین تیمارهای کاربرد توأم کودهای آلی و شیمیایی نیز اختلاف معنی داری وجود نداشت.

برای مثال برار و همکاران (Brar et al., 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. لیو و همکاران (Liu et al., 2017) نیز در پژوهشی بر روی گیاه روغنی *Camellia oleifera* در منطقه نیمه گرمسیری چین نشان داد که نمونه‌های خاک کشتزارهای دارای عملکرد بالا به طور معنی داری 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 قابل استفاده بودند.

رابطه بین عملکرد محصول و شاخص‌های کیفیت خاک

جدول ۹ همبستگی بین شاخص‌های کیفیت خاک و عملکرد گندم در تیمارهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، در سال‌های اول و دوم بین عملکرد گندم و مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک همبستگی معنی داری وجود نداشت ولی در سال سوم بین عملکرد و شاخص‌های کیفیت خاک همبستگی معنی داری وجود داشت ($p<0/01$) که نشان‌دهنده تأثیر افزایش کیفیت خاک بر افزایش عملکرد گندم بدلیل بهبود ویژگی‌های فیزیکی حاصل از کاربرد کود آلی با گذشت زمان و همچنین بهبود وضعیت عناصر پرمصرف خاک بویژه فسفر قابل استفاده می‌باشد. لی و همکاران (Li et al., 2019) در پژوهشی در اراضی دیم تحت کشت گندم و ذرت نشان دادند که

جدول ۹- همبستگی بین شاخص‌های کیفیت خاک و عملکرد گندم

Table 9- Correlation between soil quality indicators and wheat yield

سال Year		NQI	SQI _a	SQI _w	عملکرد گندم Wheat yield
سال اول (۱۳۹۶) First year (2017)	NQI	1			
	SQI _a	0.99 **	1		
	SQI _w	0.97 **	0.99 **	1	
	Wheat yield	0.25	0.11	0.08	۱
سال دوم (۱۳۹۷) Second year (2018)	NQI	1			
	SQI _a	1 **	1		
	SQI _w	0.99 **	0.99 **	1	
	Wheat yield	0.48	0.48	0.14	1
سال سوم (۱۳۹۸) Third year (2019)	NQI	1			
	SQI _a	1 **	1		
	SQI _w	1 **	1 **	1	
	Wheat yield	0.74 **	0.75 **	0.74 **	1

نیز نسبت به تیمار شاهد (تیمار بدون مصرف کود) افزایش معنی‌داری داشتند. در سال سوم بین عملکرد و شاخص‌های کیفیت خاک هم‌ستگی معنی‌داری وجود داشت که نشان‌دهنده بهبود ویژگی‌های فیزیکی حاصل از کاربرد کود آلی با گذشت زمان می‌باشد.

با توجه به کمبود ماده آلی و فسفر قابل استفاده خاک اولیه، این نتایج نشان‌دهنده تأثیر تیمارهای کاربرد توأم کودهای آلی و شیمیایی بدلیل بهبود ویژگی‌های فیزیکی (ساختمان خاک و نفوذپذیری خاک) و شیمیایی (افزایش و بهبود فسفر قابل استفاده خاک) و تأثیر بر بهبود کیفیت خاک و افزایش عملکرد گندم می‌باشد در ضمن همه تیمارها

References

1. Andrews, S.S., Karlen, D.L., & Mitchell, J.P. (2002b). A comparison of soil quality indices methods for vegetable production system in northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 90, 25–45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
2. Andrews, S.S., Mitchell, J.P., Mancinelli, R., Karlen, K.L., Hartz, T.K., Horwath, W.R., Pettygrove, G.S., Scow, K.M., & Munk, D.S. (2002a). On-farm assessment of soil quality in California's central valley. *Agronomy Journal*, 94, 12–23. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.0012>
3. Aria, P., & Mirkhani, R. (2005). Methods of Soil Physical Analysis, *Technical Bulletin*, Soil and Water Research Institute, Iran No:479. (In Persian)
4. Basak, N., Mandal, B., Biswas, S., Basak, P., Mitran, T., Saha, B., & 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. <https://doi.org/10.3390/su14116533>
5. Biberdzic, M., Barac, S., Lalevic, D., Djikic, A., Prodanovic, D., & Rajicic, V. (2020). Influence of soil tillage system on soil compaction and winter wheat yield. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 80(1), 80–89. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392020000100080>
6. Brar, B.S., Singh, J., Singh, G., & 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. <https://doi.org/10.3390/agronomy5020220>
7. Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Franco, A.L.C., Cerri, C.E.P., Tormena, C.A., & 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. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0328>
8. De Paul Obade, V., & Lal, R. (2016). Towards a standard technique for soil quality assessment. *Geoderma*, 265, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.023>
9. Doran, J.W., & Parkin, T.B. (1997). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. *Methods for assessing soil quality*/editors, John W. Doran and Alice J. Jones; editor-in-chief SSSA, Jerry M. Bigham; managing editor, David M. Kral; associate editor, Marian K. Viney. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c2>
10. 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. <https://sid.ir/paper/141916/en>
11. Isong, I.A., John, K., Okon, P.B., Ogban, P.I., & 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. <https://doi.org/10.1186/s13717-022-00411-y>
12. Kharche, V.K., Patil, S.R., Kulkarni, A.A., Patil, V.S., & 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. <https://doi.org/10.5958/0974-0228.2023.00025.7>
13. Karkaj, E., Sepehry, A., Barani, H., Motamedi, J., & 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. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00065-4>
14. Karlen, D.L., Parkin, T.B., & Eash, N.S. (1996). Use of soil quality indicators to evaluate conservation reserve program sites in Iowa. In: Doran, J.W., Jones, A.J. (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality. Methods for Assessing Soil Quality*, 49(1997), 345–355. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c21>
15. Karlen, D.L., Rosek, M.J., Gardner, J.C., Allan, D.L., Alms, M.J., Bezdicek, D.F., Flock, M., Huggins, D.R., Miller, B.S., & Staben, M.L. (1999). Conservation reserve program effects on soil quality indicators. *Journal of Soil and Water Conservation*, 54(1), 439–444. <https://doi.org/10.1080/00224561.1999.12457260>
16. Li, P., Shi, K., Wang, Y., Kong, D., Liu, T., Jiao, J., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.019>
17. Li, P., Wu, M., Kang, G., Zhu, B., Li, H., Hu, F., & Jiao, J. (2020). Soil quality response to organic amendments on dryland red soil in subtropical China. *Geoderma*, 373, 114416. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114416>

18. Li, P., Zhang, T., Wang, X., & Yu, D. (2013). Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 126, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.011>
19. Liu, J., Wu, L., Chen, D., Li, M., & Wei, C. (2017). Soil quality assessment of different *Camellia oleifera* stands in mid-subtropical China. *Applied Soil Ecology*, 113, 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.01.010>
20. MATLAB R2015b. (2015). Software for technical computing and model-based design. The Math Works Ins, USA.
21. Mirkhani, R. (2020). Investigation of soil quality indices and their spatial variations in agricultural lands of Alborz province Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/jstnar.23.1.3>
22. Mirkhani, R., Bybordi, A., Saadat, S., Rezaei, H., & 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). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363792.669555>
23. Mirkhani, R., Vaezi, A.R., & Rezaei, H. (2020). Investigation of the soil quality indices in irrigated wheat farms of Nazarabad region in west of Alborz province. *Water and Soil*, 34(5), 1125-1139. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i5.85526>
24. Mirkhani, R., Vaezi, A.R., & 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)
25. Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., & Moradian, S. (2017). Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological Indicators*, 83, 482-494. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.001>
26. Moshiri, F., Shahabi, A.A., Keshavarz, P., Khoghar, Z., FeiziAsl, V., Tehrani, M.M., AsadiRahmani, H., Samawt, S., Ghaibi, M.N., Sedari, M.H., Rashidi, N., Saadat, S., & Khademi, Z. (2014). Guidelines for integrated soil fertility and plant nutrition management of wheat. *Soil and Water Research Institute (SWRI)*. 84 p.
27. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., & Dean, L.A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Dept. of Agric. Circ. 939pp.
28. Patzel, N., Sticher, H., & Karlen, D.L. (2000). Soil fertility-phenomenon and concept. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163(2), 129-142. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-2624\(200004\)163:2%3C129::AID-JPLN129%3E3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-2624(200004)163:2%3C129::AID-JPLN129%3E3.0.CO;2-D)
29. Paul, G.C., Saha, S., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106804>
30. Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., & Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149(3), 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015>
31. Qin, M.Z., & Zhao, J. (2000). Strategies for sustainable use and characteristics of soil quality changes in urban-rural marginal area: a case study of Kaifeng. *CTA GEOGRAPHICA SINICA-CHINESE EDITION*, 55(5), 545-554.
32. Sanchez, P.A., & Swaminathan, M.S. (2005). Hunger in Africa: the link between unhealthy people and unhealthy soils. *The Lancet*, 365(9457), 442-444. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(05\)17834-9](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(05)17834-9)
33. Sun, B., Zhou, S., & 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), 85-99. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00078-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00078-8)
34. Tkaczyk, P., Bednarek, W., Dresler, S., & Krzyszczak, J. (2018). The effect of some soil Physicochemical properties and nitrogen fertilization on winter wheat yield. *Acta Agrophysica*, 25(1), 107-116. <https://doi.org/10.31545/aagr0009>
35. Toledo, D.M., Galantini, J., Dalurzo, H., Vazquez, S., & 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), 1542-1552. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.03.0087>
36. Torbert, H.A., Krueger, E., & Kurtener, D. (2008). Soil quality assessment using fuzzy modeling. *International Agrophysics*, 22(4), 365-370.
37. Van Leeuwen, J.P., Moraetis, D., Lair, G.J., Bloem, J., Nikolaidis, N.P., Hemerik, L., & de Ruiter, P.C. (2015). Ecological soil quality affected by land use and management on semi-arid Crete. *Soil Discussions*, 2, 187-215. <https://doi.org/10.5194/soild-2-187-2015>
38. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-37.
39. Yanbing, Q., Darilek, J.L., Biao, H., Yongcun, Z., Sun, W., & Gu, Z. (2009). Evaluating 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>