



## Sensitivity Assessment of Soil Organic Carbon Fractions to Fertilization Managements in a Wheat–Maize Rotation

Fardin Manbari<sup>1</sup> | Hossein Mirseyed Hosseini<sup>2✉</sup> | Farhad Moshiri<sup>3</sup> | Hossein Ali Alikhani<sup>4</sup>

1. Faculty of Agriculture, Department of Soil Science, Karaj, Iran. E-mail: [f\\_manbari@ut.ac.ir](mailto:f_manbari@ut.ac.ir)

2. Corresponding Author, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science, University of Tehran, Karaj, Iran.

E-mail: [mirseyed@ut.ac.ir](mailto:mirseyed@ut.ac.ir)

3. Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Extension and Education Organization (AREO), Imam Komeini Blvd., Meshkin Dasht, Karaj, Iran. E-mail: [fa.moshiri@yahoo.com](mailto:fa.moshiri@yahoo.com)

4. Faculty of Agriculture, Department of Soil Science, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [halikhan@ut.ac.ir](mailto:halikhan@ut.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

#### Article history:

**Received:** June. 8, 2026

**Revised:** July. 7, 2026

**Accepted:** July. 16, 2026

**Published online:** Sep. 2026

#### Keywords:

**Fertilizer management,  
Soil labile carbon,  
Soil organic carbon,  
Wheat–Corn rotation.**

### ABSTRACT

This study evaluated the sensitivity of various soil organic carbon (SOC) fractions, compared and ranked carbon pools based on their responsiveness to combined chemical and organic fertilizer applications, and identified the most sensitive SOC fraction for monitoring SOC dynamics under semi-arid conditions. The experiment was conducted at the Soil and Water Research Institute of Iran's research station in Meshkin Dasht, Karaj, using a randomized complete block design with three replications. Over seven years (2017–2024), six fertilizer treatments were continuously applied: an unfertilized control (CO), chemical NPK fertilizer, cattle manure (MF), municipal waste compost (CF), cattle manure combined with 75% of the recommended nitrogen rate (MNF), and municipal waste compost combined with 75% of the recommended nitrogen rate (CNF). In 2024, after the wheat harvest, soil samples were collected from a depth of 0–30 cm to measure active and passive fractions, as well as microbial biomass carbon. Results showed that organic fertilizers and their combined use with chemical nitrogen fertilizers significantly increased various SOC fractions ( $P \leq 0.01$ ). Integrated treatments (especially CNF and MNF) exhibited the highest sensitivity indices (SI), calculated as the percentage increase in each carbon fraction relative to the reference soil (RE), while the control treatment showed the lowest values. The relative sensitivity of SOC fractions followed this order: dissolved organic carbon (DOC) (3.93) > particulate organic carbon (POC) (1.94) > light fraction organic carbon (LFOC) (1.61) > passive carbon (PC) (1.08) > microbial biomass carbon (MBC) (0.70) > permanganate-oxidizable carbon (POXC) (0.61). This demonstrates the efficiency of dynamic indices for short-term monitoring of fertilizer management effects. Therefore, dissolved organic carbon can be considered a rapid and cost-effective indicator for assessing changes in SOC dynamics within crop rotation systems.

Cite this article: Manbari, F., Mirseyed Hosseini, H., Moshiri, F., & Alikhani, H. A. (2026). Sensitivity Assessment of Soil Organic Carbon Fractions to Fertilization Managements in a Wheat–Maize Rotation., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (7), 1559-1575. <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.414212.670151>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.414212.670151>



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Soil organic carbon (SOC) plays a fundamental role in soil fertility and ecosystem sustainability. However, due to the slow response of total SOC to short-term management changes, modern approaches emphasize the evaluation of different carbon fractions (labile and stable pools). The concept of "carbon fraction sensitivity" has emerged as an index for assessing the responsiveness of various carbon pools to agricultural management practices. Despite the importance of this topic, comparative and quantitative studies on the relative sensitivity ranking of different SOC fractions in long-term experiments, particularly in semi-arid ecosystems, remain limited. Therefore, this study was conducted with three main objectives: (1) to determine the response of different soil organic carbon fractions to fertilizer treatments in a long-term wheat-maize rotation; (2) to assess and rank the sensitivity and relative sensitivity of each fraction; and (3) to identify the most sensitive carbon fraction for monitoring carbon dynamics under semi-arid climatic conditions. The main hypothesis was that labile carbon fractions would show higher sensitivity to integrated organic-mineral fertilizer management compared to total SOC.

### Materials and Methods

This study was conducted as a seven-year long-term experiment (2017–2024) at the Research Station of the Soil and Water Research Institute of Iran in Meshkin Dasht, Karaj (semi-arid climatic conditions). The experiment was arranged in a randomized complete block design with three replications in permanent plots. Six fertilizer treatments were applied: unfertilized control (CO), chemical NPK fertilizer, cattle manure compost (MF), municipal waste compost (CF), cattle manure + 75% recommended nitrogen (MNF), and municipal waste compost + 75% recommended nitrogen (CNF). Additionally, an undisturbed plot (RE) was considered as reference soil to determine baseline conditions. After wheat harvest in the seventh year, soil samples were collected from the 0–30 cm depth, and various carbon fractions including total organic carbon (SOC), dissolved organic carbon (DOC), particulate organic carbon (POC), light fraction organic carbon (LFOC), microbial biomass carbon (MBC), permanganate-oxidizable carbon (POXC), and passive carbon (PC) were measured. The sensitivity index (SI) relative to reference soil (RE) and relative sensitivity index (RSI) relative to total SOC were calculated. Data were analyzed using analysis of variance and Tukey's mean comparison test at 1% and 5% probability levels.

### Results

Analysis of variance results showed that fertilizer management had significant effects ( $P \leq 0.01$ ) on all carbon fractions and grain yield. Integrated treatments (especially MNF and CNF) showed the highest increases in all carbon pools; the highest grain yield ( $6.94 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) and maximum values of SOC, DOC, POC, and LFOC were recorded in these treatments. Pearson correlation analysis also showed highly significant positive correlations among fractions, with the highest correlation between DOC and LFOC (0.98) and DOC and MBC (0.94).

Based on the sensitivity index (SI) results relative to reference soil, integrated treatments CNF and MNF showed the highest responsiveness. The mean sensitivity index of fractions was ranked as follows: DOC (274.30) > LFOC (141.82) > POC (135.07) > PC (83.20) > SOC (76.10) > MBC (41.59) > POXC (40.20).

Also, based on the relative sensitivity index (RSI), where SOC was considered equal to 1, the responsiveness order of fractions to fertilizer management was: DOC (3.93) > POC (1.94) > LFOC (1.61) > PC (1.08) > MBC (0.70) > POXC (0.61).

These values indicate that dissolved organic carbon (DOC) was on average about 4 times more sensitive than total SOC to management changes.

### Discussion and Conclusion

The findings of this long-term study confirmed that integrated application of organic and mineral fertilizers (simultaneous supply of energy through organic carbon and nutrients through chemical fertilizers) not only increases soil carbon stocks but also strongly enhances carbon cycle dynamics. The sensitivity ranking of fractions showed that these pools are not equally efficient for monitoring soil changes. Dissolved organic carbon (DOC), due to its mobile nature, independence from aggregate protection, and direct association with root exudates and microbial activity, was identified as the most sensitive and rapid indicator for short-term monitoring of fertilizer management effects. Following that, light fraction (LFOC) and particulate organic carbon (POC) showed high discrimination power as intermediate indicators. In contrast, MBC and POXC indices, despite their active nature, showed lower relative sensitivity compared to DOC and POC.

**Practical Implications:** The results of this study provide a scientific basis for the fertilizer industry and crop management. Practical recommendations include: prioritizing the production and consumption of

integrated organic-mineral fertilizers, applying approximately 20 Mg ha<sup>-1</sup> of organic fertilizer annually for wheat-maize rotation in semi-arid regions, controlling salinity quality in municipal waste composts, and using dissolved organic carbon (DOC) and particulate organic carbon (POC) as practical, rapid, and cost-effective indicators for field evaluation of fertilizer product efficiency and soil health monitoring.

**Funding**

This research was financially and morally supported by the Soil and Water Research Institute and the Vice Chancellor for Research, University of Tehran.

**Authorship contribution**

Conceptualization, H. Mirseyed, F. Moshiri.; methodology, F. Mambari, H. Mirseyed, F. Moshiri.; All authors contributed as required to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

**Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process**

There is no use of any type of artificial intelligence-based technology in this paper.

**Data availability statement**

Data from this study are available upon request from the authors.

**Acknowledgements**

The author would like to thank the cooperation and assistance of the various departments of the Iranian Soil and Water Research Institute who played an important role in conducting this research. We would also like to express our gratitude to the Department of Soil Science and Engineering, University of Tehran, for providing the facilities and context for this scientific cooperation.

**Ethical considerations**

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

## ارزیابی حساسیت جزءهای کربن آلی خاک به مدیریت‌های کودی در کشت تناوبی گندم-ذرت

فردین منبری<sup>۱</sup> | حسین میرسیدحسینی<sup>۲</sup> | فرهاد مشیری<sup>۳</sup> | حسینعلی علیخانی<sup>۴</sup><sup>۱</sup>. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [f\\_manbari@ut.ac.ir](mailto:f_manbari@ut.ac.ir)<sup>۲</sup>. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [mirsayed@ut.ac.ir](mailto:mirsayed@ut.ac.ir)<sup>۳</sup>. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشکین‌دشت، کرج، ایران. رایانامه: [fa.moshiri@yahoo.com](mailto:fa.moshiri@yahoo.com)<sup>۴</sup>. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [halikhan@ut.ac.ir](mailto:halikhan@ut.ac.ir)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۳/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۴/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲۵

تاریخ انتشار: مهر ۱۴۰۵

## واژه‌های کلیدی:

تناوب گندم-ذرت،

کربن آلی خاک،

کربن فراهم خاک،

مدیریت کودی

این پژوهش با هدف ارزیابی حساسیت اجزای مختلف کربن آلی خاک به منظور مقایسه و رتبه‌بندی مخازن کربن از نظر واکنش‌پذیری به کاربرد کودهای توام کودهای شیمیایی و آلی و شناسایی حساس‌ترین جزء کربن آلی برای پایش تغییرات پویایی کربن آلی خاک در شرایط اقلیم نیمه‌خشک انجام شد. پژوهش در ایستگاه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب ایران، واقع در مشکین‌دشت کرج در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. به مدت هفت سال (۱۳۹۶-۱۴۰۳) شش تیمار کودی شامل شاهد بدون کود (CO)، کود شیمیایی NPK، کود دامی گاوی (MF)، کمپوست پسماند (CF)، کود دامی به همراه ۷۵٪ نیتروژن توصیه‌شده (MNF) و کمپوست پسماند به همراه ۷۵٪ نیتروژن توصیه‌شده (CNF) در کرت‌های دایم اعمال شدند. در سال ۱۴۰۳ پس از برداشت گندم، نمونه‌هایی از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر خاک برداشت و بخش‌های فعال، غیرفعال و کربن آلی زیتوده میکروبی اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد کاربرد کودهای آلی و مصرف توام کودهای آلی و شیمیایی نیتروژنی سبب افزایش معنی‌دار اجزای مختلف کربن آلی خاک شد ( $P \leq 0.01$ ). تیمارهای تلفیقی (به‌ویژه CNF و MNF) بالاترین شاخص‌های حساسیت (SI) محاسبه‌شده به‌صورت درصد افزایش هر جزء کربن نسبت به خاک مرجع) را داشتند، در حالی که تیمار شاهد کمترین مقادیر را نشان داد. ترتیب حساسیت نسبی جزءهای کربن آلی به‌صورت کربن آلی محلول ( $3/93$ ) < کربن آلی ذره‌ای ( $1/94$ ) < جزء سبک کربن آلی ( $1/61$ ) < کربن غیرفعال ( $1/08$ ) < کربن زیست توده میکروبی ( $0/70$ ) < کربن اکسیده شده با پرمنگنات ( $0/61$ ) مشاهده گردید که بیانگر کارایی شاخص‌های پویا در پایش کوتاه‌مدت اثر مدیریت‌های کودی است. بر این اساس، کربن آلی محلول می‌تواند به‌عنوان شاخصی سریع و کم‌هزینه برای ارزیابی تغییرات پویایی کربن آلی خاک در سیستم‌های زراعی تناوبی معرفی شود.

استناد: منبری، فردین؛ میرسیدحسینی، حسین؛ مشیری، فرهاد و علیخانی، حسینعلی (۱۴۰۵). ارزیابی حساسیت جزءهای کربن آلی خاک به مدیریت‌های کودی در کشت تناوبی گندم-ذرت، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۷)، ۱۵۷۵-۱۵۵۹. <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.414212.670151>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.414212.670151>

## مقدمه

کربن آلی خاک (SOC) بزرگ‌ترین مخزن کربن در اکوسیستم‌های خشکی محسوب می‌شود و نقش بنیادینی در تنظیم حاصلخیزی خاک، پایداری ساختار خاکدانه‌ها، کارایی مصرف آب و چرخه جهانی کربن ایفا می‌کند. برآوردها نشان می‌دهد ذخایر کربن خاک‌ها از مجموع کربن موجود در اتمسفر و زیست‌توده گیاهی فراتر است، از این رو حتی تغییرات نسبتاً کوچک در کمیت یا کیفیت SOC می‌تواند پیامدهای مهمی برای امنیت غذایی، پایداری اکوسیستم و بازخوردهای اقلیمی داشته باشد (Hao et al., 2023; Gao et al., 2024). درک چگونگی تأثیر مدیریت‌های کشاورزی بر پویایی و تثبیت کربن خاک، به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های علوم خاک در دهه اخیر تبدیل شده است (Gocke et al., 2023).

با این حال، کربن آلی خاک یک مخزن یکنواخت و همگن نیست، بلکه طیفی از ترکیبات آلی با منشأ، ساختار مولکولی، سرعت تجزیه و سازوکارهای تثبیت متفاوت را شامل می‌شود. رویکردهای مفهومی جدید، SOC را نه به‌عنوان مجموعه‌ای از مخازن ایستا، بلکه به‌صورت یک پیوستار پویا از ترکیبات آلی در تعامل با میکروارگانیسم‌ها و سطوح معدنی خاک در نظر می‌گیرند (Lehmann et al., 2020). در این چارچوب، جزءهای کربن فراهم مانند کربن محلول (DOC)، کربن زیست‌توده میکروب (MBC)، جزء سبک (LFOC) و کربن آلی ذره‌ای (POC) دارای تجزیه سریع‌تر و وابستگی مستقیم‌تری به ورودی‌های تازه مواد آلی هستند، در حالی که کربن‌های پایدارتر - به‌ویژه کربن‌های مرتبط با فاز معدنی (MAOC) یا مخازن غیرفعال - عمدتاً از طریق جذب سطحی به ذرات ریز، برقراری پیوندهای آلی-معدنی و محصورشدگی در خاکدانه‌ها تثبیت می‌شوند و زمان اقامت طولانی‌تری دارند (Cotrufo et al., 2022). این تفاوت‌های مکانیسمی بیانگر آن است که پاسخ جزءهای مختلف SOC به مدیریت‌های زراعی یکسان نیست (Cotrufo et al., 2019; Chenu et al., 2019).

یافته‌های جهانی اخیر نشان داده‌اند که کاربرد کودهای آلی، مدیریت تلفیقی مواد آلی و معدنی، کشت‌های پوششی و کاهش شدت خاک‌ورزی، معمولاً موجب افزایش سریع‌تر مخازن فراهم (فعال) نسبت به کربن آلی کل می‌شوند (Cotrufo et al., 2022; Smith et al., 2020). در حالی که تغییر در مخازن پایدار نیازمند زمان طولانی‌تر و شرایط فیزیکی و شیمیایی خاص است (Lavallee et al., 2024). علاوه بر این، شواهد تازه حاکی از آن است که کاربرد بلندمدت کودهای آلی می‌تواند از طریق تغییر ترکیب مولکولی ماده آلی محلول و بازآرایی ساختار جامعه میکروبی، مسیرهای پایداری‌سازی کربن را تقویت و قابلیت تجزیه زیستی آن را کاهش دهد (Shi et al., 2025; Zhang et al., 2025). این یافته‌های جدید نشان می‌دهد که تحلیل جزءهای کربن، تصویری دقیق‌تر از فرآیندهای تثبیت و گردش کربن ارائه می‌دهد و نسبت به بررسی معمول SOC حساسیت بیشتری به تغییرات مدیریتی دارد (Lehmann et al., 2020).

در این چارچوب، مفهوم "حساسیت جزءهای کربن آلی خاک" به‌عنوان شاخصی تحلیلی برای ارزیابی میزان واکنش‌پذیری مخازن مختلف کربن نسبت به مدیریت‌های کشاورزی مطرح شده است. حساسیت بیانگر شدت تغییر یک جزء کربنی نسبت به وضعیت مرجع بوده و می‌تواند نشان دهد کدام مخزن، شاخص مناسب‌تری برای پایش کوتاه‌مدت و میان‌مدت تغییرات پویایی کربن آلی خاک است (Liptzin et al., 2022). بر اساس مبانی نظری، انتظار می‌رود جزءهای تغییرپذیر به دلیل وابستگی مستقیم به ورودی بقایا و فعالیت میکروبی، حساسیت بالاتری نسبت به مدیریت‌های کودی نشان دهند، در حالی که مخازن پایدار تغییرات آهسته‌تر اما بالقوه ماندگارتری را تجربه می‌کنند (Prairie et al., 2023; Carrascosa et al., 2025). با وجود اهمیت این مفهوم، مطالعات مقایسه‌ای درباره رتبه‌بندی حساسیت نسبی جزءهای مختلف SOC در آزمایش‌های بلندمدت کودی، به‌ویژه در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک، همچنان محدود است. این تازگی از دو جنبه اصلی نشئت می‌گیرد. نخست، مطالعات پیشین معمولاً یک یا دو جزء کربنی را به‌طور مجزا بررسی کرده‌اند، در حالی که رتبه‌بندی هم‌زمان شش جزء کربنی (از کربن محلول تا کربن غیرفعال) در قالب شاخص حساسیت نسبی واحد، در شرایط زراعی ایران تاکنون انجام نشده است. دوم، تناوب گندم-ذرت به دلیل تفاوت در نسبت C:N می‌تواند الگوی حساسیت کربنی متفاوتی نسبت به سایر تناوب‌های بررسی‌شده (مانند برنج-گندم) ایجاد کند که در شرایط اقلیمی ایران گزارش نشده است. ماهیت بلندمدت این آزمایش (هفت سال) نیز امکان ارزیابی اثرات تجمعی را فراهم می‌سازد که در مطالعات کوتاه‌مدت مشابه میسر نیست. بر این اساس، پژوهش حاضر برای نخستین بار چارچوبی یکپارچه برای رتبه‌بندی حساسیت جزءهای کربن آلی خاک در یک آزمایش کودی بلندمدت در تناوب گندم-ذرت ایران ارائه می‌دهد.

از سوی دیگر، سیستم‌های تناوبی با تنظیم کیفیت و کمیت بقایای گیاهی، نسبت C:N، توزیع ریشه و زمان‌بندی ورود مواد آلی به

خاک، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌دهی به مسیرهای تثبیت کربن دارند (Liu et al., 2026). تناوب گندم-ذرت، که یکی از رایج‌ترین سیستم‌های زراعی در مناطق نیمه‌خشک ایران است، به دلیل تفاوت در ترکیب بقایا و الگوی رشد دو محصول، می‌تواند بر توزیع و پویایی مخازن تغییرپذیر و پایدار کربن تأثیر متفاوتی بگذارد (Zhang et al., 2025). با این حال، تعامل میان مدیریت‌های کودی و این تناوب زراعی در تعیین سلسله مراتب حساسیت جزءهای کربن آلی خاک به‌طور نظام‌مند بررسی نشده است (Gorooei et al., 2025; Diop et al., 2026). اگرچه حساسیت بالاتر جزءهای فعال کربن نسبت به کربن آلی کل در مطالعات پیشین گزارش شده است (Cotrufo et al., 2022; Liu et al., 2024)، اما این مطالعات عمدتاً کوتاه‌مدت بوده یا تنها به یک یا دو جزء کربن پرداخته‌اند و کمی‌سازی دقیق میزان حساسیت نسبی با استفاده از خاک مرجع به‌عنوان پایه مقایسه، به‌ویژه در آزمایش‌های بلندمدت تناوبی در اقلیم نیمه‌خشک، کمتر انجام شده است. نوآوری این پژوهش در ارائه یک چارچوب کمی برای رتبه‌بندی هم‌زمان شش جزء کربن آلی خاک، بر پایه داده‌های هفت‌ساله کرت‌های دائمی، است که امکان مقایسه مستقیم و عددی توان تشخیصی هر جزء را در پایش کوتاه‌مدت مدیریت‌های کودی فراهم می‌کند.

بر این اساس، پژوهش حاضر با سه هدف اصلی انجام شد: (۱) تعیین پاسخ جزءهای مختلف کربن آلی خاک به تیمارهای مختلف کودی در یک تناوب بلندمدت گندم-ذرت؛ (۲) ارزیابی حساسیت و حساسیت نسبی هر جزء به‌منظور رتبه‌بندی مخازن کربن از نظر واکنش‌پذیری؛ و (۳) شناسایی حساس‌ترین جزءهای کربن آلی خاک برای ارزیابی تغییرات پویایی کربن خاک در شرایط اقلیم نیمه‌خشک. فرضیه اصلی این مطالعه آن است که جزءهای کربن فراهم نسبت به کربن آلی کل حساسیت بیشتری به مدیریت تلفیقی کودهای آلی و معدنی نشان خواهند داد و تفاوت در کیفیت بقایای ناشی از تناوب گندم-ذرت این الگوی حساسیت را تقویت خواهد کرد. این پژوهش با تلفیق تحلیل جزءهای کربن و شاخص‌های حساسیت، چارچوبی فرآیندمحور برای درک پویایی و تثبیت کربن در سیستم‌های زراعی نیمه‌خشک ارائه می‌دهد و می‌تواند مبنایی علمی برای بهینه‌سازی راهبردهای مدیریت کودی و افزایش پتانسیل ترسیب کربن در خاک باشد.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش در ایستگاه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب ایران (۳۵/۷۵۵۰ درجه عرض شمالی و ۵۰/۹۵۸۸ درجه طول شرقی) واقع در مشکین دشت کرج در شرایط اقلیم نیمه‌خشک با میانگین بارندگی سالانه ۲۵۱ میلی‌متر و دمای میانگین ۱۴/۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد (جدول ۱). خاک ایستگاه تحقیقاتی کرج (سری فرح‌آباد) بر اساس سیستم طبقه‌بندی USDA در زیرگروه تیپیک هاپلوزرپتس (Typic Haploxerepts) با فامیل لومی، مخلوط (آهکی)، نیمه‌فعال و مزیک طبقه‌بندی می‌شود. بافت خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری لوم تعیین گردید. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار و در کرت‌های دائمی اجرا شد. ابعاد کرت‌های ثابت ۱۱/۵ متر در ۲۰ متر بود که توسط راهروهایی از یکدیگر جدا می‌شدند. به مدت هفت سال (۱۳۹۶-۱۴۰۳)، تناوب کشت گندم (*Triticum aestivum* L.) و ذرت علوفه‌ای (*Zea mays* L.) به‌صورت متوالی انجام گردید (جدول ۱). عملیات شخم، کاشت و برداشت محصولات با استفاده از ماشین‌آلات مرسوم انجام شد و بقایای هر محصول از مزرعه خارج گردید. گندم در پاییز کاشته شد و در اواخر خرداد تا اوایل تیرماه برداشت گردید. پس از یک دوره استراحت دو هفته‌ای، زمین آزمایشی برای کشت بعدی ذرت آماده شد. ذرت در اواسط تیرماه کاشته شد و در مهرماه برای سیلو برداشت گردید. در طول دوره هفت‌ساله، بقایای گیاهی (کاه و ساقه) هر دو محصول گندم و ذرت، به‌طور یکسان از تمامی کرت‌ها در تمام تیمارها جمع‌آوری و خارج شدند. در نتیجه، در تیمار NPK، ورودی‌های کربن به خاک منحصر به زیست‌توده ریشه و ترشحات ریشه‌ای بود؛ این در حالی است که در تیمارهای آلی و تلفیقی، کربن هم از طریق اصلاحیه‌های مصرفی و هم از منابع ریشه‌ای وارد خاک می‌شد. برای این آزمایش، ۶ تیمار با ۳ تکرار در نظر گرفته شد (جدول ۲). علاوه بر تیمارهای آزمایشی، یک قطعه زمین بکر (یک کرت آزمایشی با همان خصوصیات در مجاورت سایر کرت‌های آزمایشی که هیچ‌گونه عملیات شخم و کشتی در آن انجام نگردید) به عنوان خاک مرجع (RE) برای تعیین وضعیت پایه و ارزیابی تأثیر عملیات زراعی بر تغییرات مخازن کربن در نظر گرفته شد. همچنین ویژگی‌های خاک قبل از شروع آزمایش با RE0 در جدول (۲) آورده شده است. پس از برداشت گندم در سال پایانی (۱۴۰۳)، از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر در هر کرت ۶ نمونه مرکب تهیه شد. نمونه‌ها پس از عبور از الک ۲ میلی‌متری برای آنالیزهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی آماده شدند. برخی ویژگی‌های شیمیایی کود کمپوست گاوی و کود کمپوست زباله شهری در جدول (۳) آورده شده است. انتخاب سطوح تیمارهای کودی در این پژوهش بر اساس اصول مدیریت تلفیقی تغذیه گیاه و با استناد به نتایج طرح‌های تحقیقاتی

بلندمدت ملی در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک ایران انجام شد. هدف از اعمال ۲۰ تن در هکتار کود آلی، رسیدن به آستانه بهینه ماده آلی برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و زیستی خاک در اقلیم نیمه‌خشک بود. از سوی دیگر، سطح ۷۵ درصد نیتروژن شیمیایی (در کنار کود آلی) بر اساس نرخ معدنی‌شدن این اصلاح‌کننده‌های آلی در شرایط بومی انتخاب گردید؛ مطالعات پیشین نشان داده‌اند که کودهای آلی گاوی و کمپوست پسماند در سیستم‌های تناوبی گندم-ذرت، به طور متوسط قادر به تامین حدود ۲۵ درصد از نیاز نیتروژنی گیاه در طول فصل رشد هستند و کاهش بیشتر از این مقدار (مثلاً جایگزینی ۵۰ درصدی یا بیشتر) در اقلیم‌های نیمه‌خشک به دلیل هم‌زمانی پایین نرخ معدنی‌شدن نیتروژن آلی با اوج نیاز گیاه، منجر به افت عملکرد و رقابت میکروارگانسیم‌ها با گیاه برای نیتروژن می‌شود (Opala et al., 2010; Liu et al., 2024). در مقابل، مصرف ۱۰۰ درصد کود شیمیایی در کنار کود آلی، اگرچه ممکن است مخازن کربنی را تحت تاثیر قرار دهد، اما با اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی در تضاد است (Zhang et al., 2025). لذا، نسبت جایگزینی ۲۵ درصدی نیتروژن، به عنوان نقطه بهینه تعادلی بین پایداری عملکرد، ارتقای کیفیت خاک و توجیه اقتصادی در نظر گرفته شد.

جدول ۱. سیستم‌های کشت، موقعیت جغرافیایی، میانگین بارندگی سالانه و میانگین دمای سالانه در یک آزمایش ۷ ساله

| سال | دوره (سال زراعی) | سیستم کشت  | میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر) | میانگین دمای سالانه (درجه سانتی‌گراد) |
|-----|------------------|------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| ۱   | ۱۳۹۶-۱۳۹۷        | گندم       | ۱۹۷/۶۳                            | ۱۴/۱                                  |
| ۲   | ۱۳۹۷-۱۳۹۸        | گندم + ذرت | ۱۸۲/۲۲                            | ۱۷/۵                                  |
| ۳   | ۱۳۹۸-۱۳۹۹        | گندم       | ۳۶۸/۲۵                            | ۱۵/۱                                  |
| ۴   | ۱۳۹۹-۱۴۰۰        | گندم + ذرت | ۲۲۸/۰۷                            | ۱۶/۲                                  |
| ۵   | ۱۴۰۰-۱۴۰۱        | گندم       | ۱۴۷/۷۴                            | ۱۵/۹                                  |
| ۶   | ۱۴۰۱-۱۴۰۲        | گندم + ذرت | ۱۱۹/۱۰                            | ۹/۷                                   |
| ۷   | ۱۴۰۲-۱۴۰۳        | گندم       | ۱۷۲/۴۵                            | ۷/۲                                   |

جدول ۲. شرح تیمارهای آزمایشی

| تیمار | شرح                                                                        | کربن آلی (Mg ha <sup>-1</sup> ) | نیتروژن از کود آلی (kg ha <sup>-1</sup> ) | نیتروژن از کود شیمیایی (kg ha <sup>-1</sup> ) | فسفر (kg ha <sup>-1</sup> ) | پتاسیم (kg ha <sup>-1</sup> ) |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| CO    | شاهد (بدون مصرف کود)                                                       | .                               | .                                         | .                                             | .                           | .                             |
| NPK   | کودهای شیمیایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم                                      | .                               | .                                         | ۱۴۰                                           | ۶۹                          | ۳۸                            |
| MNF   | مصرف سالانه ۲۰ تن کود کمپوست گاوی به همراه ۷۵٪ نیتروژن توصیه‌شده           | ۴/۱۸                            | ۱۰۹                                       | ۱۰۵                                           | .                           | .                             |
| CNF   | مصرف سالانه ۲۰ تن کمپوست زباله شهری به همراه ۷۵٪ نیتروژن توصیه‌شده         | ۳/۶۴                            | ۳۰                                        | ۱۰۵                                           | .                           | .                             |
| MF    | مصرف سالانه ۲۰ تن کود کمپوست گاوی (۱۰ تن در کشت گندم و ۱۰ تن در کشت ذرت)   | ۲/۰۹                            | ۵۴/۵                                      | .                                             | .                           | .                             |
| CF    | مصرف سالانه ۲۰ تن کمپوست زباله شهری (۱۰ تن در کشت گندم و ۱۰ تن در کشت ذرت) | ۱/۸۲                            | ۱۵                                        | .                                             | .                           | .                             |

جدول ۳. برخی ویژگی‌های شیمیایی کود کمپوست گاوی و کود کمپوست زباله شهری

| ویژگی               | کمپوست گاوی | کمپوست زباله شهری |
|---------------------|-------------|-------------------|
| pH عصاره ۱:۵        | ۹/۱         | ۷/۶               |
| EC عصاره ۱:۵ (dS/m) | ۱۴          | ۱۰/۶              |
| ماده آلی (درصد)     | ۳۶          | ۳۰/۵              |
| کربن آلی (درصد)     | ۲۰/۹        | ۱۷/۴              |
| نیتروژن کل (درصد)   | ۱/۵۵        | ۱/۳۵              |
| فسفر کل (درصد)      | ۱/۲         | ۰/۸               |
| پتاسیم کل (درصد)    | ۰/۶۳        | ۲                 |

کربن آلی کل خاک (SOC) با روش اکسیداسیون مرطوب والکی-بلاک تعیین شد (Walkley and Black, 1934). کربن زیست‌توده میکروبی خاک (MBC) با استفاده از روش تدخین-استخراج کلروفرم اندازه‌گیری شد (Vance et al., 1987). بدین منظور،



۱۰ گرم خاک تازه به مدت ۲۴ ساعت با بخار کلروفرم تدخین و نمونه شاهد بدون تدخین نگهداری شد. سپس هر دو نمونه با ۴۰ میلی لیتر محلول  $K_2SO_4$  ۰/۵ مولار استخراج، صاف و کربن عصاره به روش دی کرومات تعیین گردید. مقدار MBC از اختلاف کربن استخراج شده در نمونه های تدخین شده و شاهد و با ضریب تصحیح ۰/۴۵ محاسبه و به صورت میلی گرم در کیلوگرم خاک خشک گزارش شد. کربن آلی محلول (DOC) در عصاره استخراج شده از ۱۰ گرم خاک در ۵۰ میلی لیتر آب مقطر (۱:۵ وزن به حجم)، تکان دادن به مدت ۳۰ دقیقه در ۲۵۰ دور در دقیقه و سانتریفیوژ به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه اندازه گیری شد. کربن آلی محلول در عصاره پس از عبور از صافی ۰/۴۵ میکرومتر، به روش اسپکتروفتومتری در طول موج ۶۰۰ نانومتر تعیین شد (Jones and Willett, 2006). کربن آلی ذره ای (POC) با پراکنش ۱۰ گرم خاک در ۳۰ میلی لیتر هگزامتافسفات سدیم (۵ گرم در لیتر)، تکان دادن ۱۶ ساعت در ۱۸۰ دور در دقیقه و عبور از الک ۵۳ میکرومتر تعیین شد (Cambardella and Elliott, 1993). جزء باقی مانده خشک، آسیاب و کربن آن با روش والکی-بلک اندازه گیری گردید.

جزء سبک کربن آلی (LFOC) با استفاده از محلول یدید سدیم با چگالی ۱/۸ گرم بر سانتی متر مکعب (۱۰ گرم خاک در ۳۰ میلی لیتر)، تکان دادن ۱ ساعت در ۲۰۰ دور در دقیقه و سانتریفیوژ ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰ دور در دقیقه جداسازی شد (Cambardella and Elliott, 1992). محلول رویی با خشک کردن در ۶۰ درجه سانتی گراد، از نظر کربن آلی به روش والکی-بلک تعیین شد. کربن آلی فعال قابل اکسید با پرمنگنات (POXC) با افزودن ۲۰ میلی لیتر محلول ۳۳۳ میلی مولار پرمنگنات پتاسیم به ۱/۵ گرم خاک، تکان دادن به مدت ۱ ساعت و سانتریفیوژ در ۱۰ دقیقه با ۴۰۰۰ دور در دقیقه اندازه گیری شد. جذب نور محلول رویی پس از رقیق سازی (۱:۲۵۰) در طول موج ۵۶۵ نانومتر قرائت گردید. کربن اکسید شده به عنوان جزء فعال در نظر گرفته شد. تفاضل کربن آلی فعال از کربن آلی کل به عنوان جزء غیرفعال در نظر گرفته شد (Blair et al., 1995). مقدار ذخیره هر جزء کربن آلی خاک (مگاگرم در هکتار) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\text{رابطه (۱)} \quad 10 \times \text{جرم مخصوص ظاهری (g cm}^{-3}\text{)} \times \text{عمق خاک (m)} \times \text{غلظت جزء کربن (g kg}^{-1}\text{)} = \text{ذخیره جزء کربن (Mg ha}^{-1}\text{)}$$

برای ارزیابی میزان پاسخ پذیری مخازن کربن به مدیریت های کودی، شاخص حساسیت (SI) هر جزء نسبت به تیمار شاهد از رابطه (۲) و شاخص حساسیت نسبی از رابطه (۳) محاسبه شدند.

$$\text{رابطه (۲)} \quad \text{شاخص حساسیت} = \frac{\text{مقدار جزء کربن در خاک مرجع} - \text{مقدار جزء کربن در تیمار کودی}}{\text{مقدار جزء کربن در خاک مرجع}} \times 100$$

خاک بکر (RE)، به دلیل عدم انجام هرگونه عملیات شخم، کاشت یا کوددهی طی دوره آزمایش، بیانگر وضعیت پایه و دست نخورده مخازن کربن آلی خاک است و به عنوان مبنای مرجع برای سنجش کل اثر تغییر کاربری اراضی (شامل هم اثر شخم و کشت و هم اثر مدیریت های کودی) در نظر گرفته شد. این رویکرد در مطالعات مشابه ارزیابی کیفیت خاک نیز رایج است، جایی که خاک های بکر یا دست نخورده به عنوان معیار بازتاب دهنده ظرفیت ذاتی خاک برای ذخیره کربن استفاده می شوند (Islam and Weil, 2000; Karlen et al., 1997). در مقابل، تیمار شاهد زراعی (CO) خود تحت تأثیر شخم و زراعت مداوم (بدون دریافت کود) قرار داشته و بنابراین نسبت به RE از قبل دچار کاهش کربن است. استفاده از CO به عنوان مرجع، تنها اثر افزایشی ناشی از کوددهی را روی یک پایه از پیش تخریب شده نشان می دهد و اثر واقعی و کامل تخریب ناشی از عملیات زراعی (که بخش مهمی از تغییرپذیری بین تیمارها را تشکیل می دهد) را پنهان می کند. علاوه بر این، از آنجا که RE هیچ گونه عملیات مدیریتی طی هفت سال آزمایش دریافت نکرده، به عنوان یک مبنای پایدارتر و کمتر در معرض نوسانات سالانه نسبت به CO عمل می کند.

$$\text{رابطه (۳)} \quad \text{شاخص حساسیت نسبی} = \frac{\text{مقدار شاخص حساسیت جزء کربن}}{\text{مقدار شاخص حساسیت کربن آلی}}$$

داده ها با استفاده از نرم افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و مقایسه میانگین ها با آزمون توکی در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد انجام گرفت.

## نتایج و بحث

## ویژگی‌های خاک

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که مدیریت‌های مختلف کودی پس از هفت سال اجرای تناوب گندم-ذرت، اثر معنی‌داری بر برخی ویژگی‌های بنیادین خاک شامل ظرفیت تبادل کاتیونی ( $P \leq 0.05$ )، نسبت کربن به نیتروژن ( $P \leq 0.05$ ) و عملکرد دانه ( $P \leq 0.01$ ) داشته است. با این حال، پارامترهایی نظیر pH، هدایت الکتریکی (EC)، جرم مخصوص ظاهری و نیتروژن کل تحت تأثیر معنی‌دار تیمارهای آزمایشی قرار نگرفتند که می‌تواند ناشی از خاصیت بافری بالای این خاک‌ها در اقلیم نیمه‌خشک و یا نیاز به بازه زمانی طولانی‌تر برای تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پایدار خاک باشد.

جدول ۴. تجزیه واریانس ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک تحت تیمارهای مدیریتی مختلف

| میانگین مربعات جزء کربن آلی خاک     |            |                     |                                       |                                                        |                                        |                     |          |
|-------------------------------------|------------|---------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|----------|
| منابع تغییرات                       | درجه آزادی | pH                  | هدایت الکتریکی ( $\text{dS m}^{-1}$ ) | ظرفیت تبادل کاتیونی ( $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ ) | جرم مخصوص ظاهری ( $\text{g cm}^{-3}$ ) | نیتروژن کل (%)      | نسبت C:N |
| عملکرد دانه ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) |            |                     |                                       |                                                        |                                        |                     |          |
| اثر ویژگی خاک                       | ۵          | ۰/۰۱۷ <sup>ns</sup> | ۰/۰۴۹ <sup>ns</sup>                   | ۴/۵۷*                                                  | ۰/۰۰۳ <sup>ns</sup>                    | ۰/۰۰۳ <sup>ns</sup> | ۳۷/۵۹*   |
| خطای آزمایش                         | ۱۰         | ۰/۰۱۴               | ۰/۰۲۷                                 | ۰/۸۵                                                   | ۰/۰۱۱                                  | ۰/۰۰۰۱              | ۷/۲۳     |
| ضریب تغییرات (%)                    | -          | ۱/۳۸                | ۱۵/۵۱                                 | ۵/۲۴                                                   | ۷/۵۸                                   | ۱۴/۳۷               | ۱۸/۳۱    |

\*\* اختلاف معنی‌دار در سطح  $\alpha = 0.01$ ؛ \* اختلاف معنی‌دار در سطح  $\alpha = 0.05$ ؛ ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار

جدول ۵. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک تحت تیمارهای مدیریتی مختلف

| مدیریت کودی | pH     | هدایت الکتریکی ( $\text{dS m}^{-1}$ ) | ظرفیت تبادل کاتیونی ( $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ ) | جرم مخصوص ظاهری ( $\text{g cm}^{-3}$ ) | نیتروژن کل (%) | نسبت C:N | عملکرد دانه ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) |
|-------------|--------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------|----------|-------------------------------------|
| CO          | ۸/۸۶ a | ۰/۸۱ a                                | ۱۷/۲۵ b                                                | ۱/۴۳ a                                 | ۰/۰۶ a         | ۱۰/۶۷ b  | ۲/۵۵ c                              |
| NPK         | ۸/۶۳ a | ۱/۰۴ a                                | ۱۹/۹۷ a                                                | ۱/۴۰ a                                 | ۰/۰۷ a         | ۱۱/۶۳ ab | ۵/۳۰ ab                             |
| MNF         | ۸/۶۹ a | ۱/۰۹ a                                | ۱۷/۷۰ ab                                               | ۱/۳۷ a                                 | ۰/۰۷ a         | ۱۸/۹۷ a  | ۶/۹۴ a                              |
| CNF         | ۸/۷۱ a | ۱/۱۴ a                                | ۱۶/۴۹ b                                                | ۱/۴۰ a                                 | ۰/۰۸ a         | ۱۷/۰۵ ab | ۴/۶۶ b                              |
| MF          | ۸/۷۲ a | ۱/۱۱ a                                | ۱۶/۷۹ b                                                | ۱/۴۴ a                                 | ۰/۰۹ a         | ۱۲/۲۸ ab | ۴/۶۴ b                              |
| CF          | ۸/۶۹ a | ۱/۱۷ a                                | ۱۷/۵۴ ab                                               | ۱/۴۳ a                                 | ۰/۰۷ a         | ۱۷/۴۷ ab | ۴/۱۷ bc                             |
| RE          | ۸/۶۶   | ۱/۶۴                                  | ۱۶/۲۰                                                  | ۱/۴۰                                   | ۰/۰۶           | ۹/۷۸     | -                                   |
| RE0         | ۸/۶۶   | ۱/۶۶                                  | ۱۶/۲۷                                                  | ۱/۴۰                                   | ۰/۰۵           | ۹/۸۷     | -                                   |

بر اساس مقایسه میانگین‌ها (جدول ۵)، بیشترین میزان ظرفیت تبادل کاتیونی در تیمار کود شیمیایی (NPK) با مقدار  $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$  ۱۹/۹۷ مشاهده شد و تیمارهای حاوی کمپوست گاوی و پسماند (مانند MNF و CF) نیز مقادیر بالاتری نسبت به شاهد نشان دادند. افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی در تیمارهای حاوی کودهای آلی و تلفیقی احتمالاً ناشی از افزایش گروه‌های عاملی فعال (مانند کربوکسیل و هیدروکسیل) در اثر تجزیه ماده آلی است که سطوح تبادلی خاک را تقویت می‌کند. مطالعات اخیر نیز تأیید کرده‌اند که مدیریت طولانی‌مدت کودهای آلی و معدنی از طریق بهبود کیفیت هوموس، ظرفیت نگهداری عناصر را ارتقا می‌دهد (Singbah, 2024). نسبت C:N خاک در تمامی تیمارهای حاوی منابع آلی به طور معنی‌داری بالاتر از تیمار شاهد (۱۰/۶۷) بود، به طوری که بیشترین مقدار در تیمار MNF (۱۸/۹۷) ثبت گردید. بالا بودن این نسبت در تیمارهای آلی و تلفیقی نشان‌دهنده ورود مداوم کربن آلی و تغییر در تعادل بیوشیمیایی خاک است که می‌تواند بر سرعت معدنی شدن و پویایی عناصر غذایی در درازمدت تأثیر بگذارد (Zhang et al., 2025). در خصوص عملکرد دانه، تیمار تلفیقی MNF (مصرف کود دامی + ۷۵٪ نیتروژن) با تولید ۶/۹۴ مگاگرم در هکتار بالاترین عملکرد را داشت و پس از آن تیمار NPK (۵/۳۰ مگاگرم در هکتار) قرار گرفت. کمترین میزان عملکرد نیز در تیمار شاهد (۲/۵۵ مگاگرم در هکتار) مشاهده شد. برتری تیمارهای تلفیقی (به‌ویژه MNF و CNF) در مقایسه با مصرف صرفاً آلی یا شیمیایی، نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی تأمین هم‌زمان عناصر غذایی



سریع‌رهاشونده و بهبود ویژگی‌های زیستی خاک توسط ماده آلی است که منجر به بهینه‌سازی تولید در سیستم‌های تناوبی می‌گردد (Zhang et al., 2025).

### جزء‌های کربن آلی

مدیریت‌های کودی اثر معنی‌داری ( $P < 0.01$ ) بر مقدار کربن آلی خاک، کربن آلی فعال قابل اکسید با پرمنگنات، کربن غیرفعال خاک، کربن زیست‌توده میکروبی خاک، کربن محلول خاک، جزء سبک کربن آلی خاک و کربن آلی ذره‌ای خاک داشتند (جدول ۶).

جدول ۶. تجزیه واریانس جزء‌های کربن آلی خاک در مدیریت‌های کودی مختلف

| میانگین مربعات جزء کربن آلی خاک |         |         |         |       |        |       | درجه آزادی | منابع تغییرات    |
|---------------------------------|---------|---------|---------|-------|--------|-------|------------|------------------|
| POC                             | LFOC    | DOC     | MBC     | PC    | POXC   | SOC   |            |                  |
| ۱۸۱/۲**                         | ۱۵۱/۴** | ۰/۲۴۲** | ۰/۱۲۸** | ۸۱۵** | ۶/۰۲** | ۹۲۴** | ۵          | اثر مدیریت کودی  |
| ۳/۴۳                            | ۲/۵۱    | ۰/۰۰۳   | ۰/۰۰۹   | ۱۶    | ۰/۴۶   | ۲۱    | ۲۵         | خطای آزمایش      |
| ۱۰/۷۷                           | ۱۳/۷۶   | ۱۱/۴۷   | ۹/۴۸    | ۱۰/۲۱ | ۱۱/۳۰  | ۱۰/۰۶ | -          | ضریب تغییرات (%) |

\*\* اختلاف معنی‌دار در سطح  $\alpha = 0.01$

نتایج بیانگر آن است که نوع و نحوه مدیریت کودی نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرپذیری و دینامیک جزء‌های مختلف کربن خاک دارد. مطالعه‌های اخیر نیز نشان داده‌اند که کاربرد کودهای آلی و معدنی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر افزایش مخازن مختلف کربن خاک داشته و پاسخ‌های متفاوتی در بخش‌های فعال و غیرفعال ایجاد کند (Zhang et al., 2025; Liu et al., 2024). مقایسه میانگین مربعات اثر تیمار با خطای آزمایش نشان داد که سهم تغییرات ناشی از مدیریت کودی در تمامی شاخص‌ها به مراتب بیشتر از تغییرات تصادفی بوده است که حاکی از تأثیر واقعی و قابل توجه تیمارها می‌باشد. این یافته مطابق با بررسی‌های جهانی است که نشان داده‌اند مدیریت‌های کودی به طور قابل توجهی بخش‌های مختلف کربن را تحت تأثیر قرار می‌دهند و افزایش قابل توجهی در بخش‌های فعال مشاهده می‌شود (Wu et al., 2024). در این میان، کربن زیست‌توده میکروبی و کربن محلول دارای مقادیر بالاتری از میانگین مربعات تیمار نسبت به خطا بودند که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر جزء‌های فعال و سریع چرخه کربن به تغییرات مدیریتی است. این جزء‌ها به دلیل ماهیت پویا و ارتباط مستقیم با فعالیت‌های میکروبی و ورود مواد آلی تازه، سریع‌تر از کربن آلی کل به مدیریت‌های کودی پاسخ می‌دهند (Zhang et al., 2025). کربن آلی فعال قابل اکسید با پرمنگنات نیز به طور معنی‌داری تحت تأثیر مدیریت‌های کودی قرار گرفت که بیانگر کارایی این شاخص در ارزیابی تغییرات کوتاه‌مدت پویایی کربن آلی خاک است. اگرچه کربن غیرفعال نیز تحت تأثیر مدیریت قرار گرفت، اما تغییرات آن احتمالاً ناشی از روندهای تجمعی و تثبیت تدریجی مواد آلی پایدار در خاک می‌باشد. معنی‌دار بودن جزء سبک و کربن آلی ذره‌ای نیز نشان می‌دهد که این جزء‌ها به دلیل حساسیت بالا به ورودی‌های آلی، نقش کلیدی در پویایی کربن خاک ایفا می‌کنند و به خوبی می‌توانند مراحل انتقال مواد آلی از بقایای تازه به مخازن پایدارتر خاک را منعکس کنند (Liu et al., 2024; Wu et al., 2024). ضریب تغییرات برای تمامی صفات کمتر از ۱۴ درصد بود که بیانگر دقت مناسب آزمایش و یکنواختی داده‌ها است و اعتبار نتایج را تأیید می‌کند.

جدول ۷. نتایج مقایسه میانگین جزء‌های کربن آلی خاک در مدیریت‌های کودی مختلف

| POC ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) | LFOC ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) | DOC ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) | MBC ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) | PC ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) | POXC ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) | SOC ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) | مدیریت کودی   |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------|
| ۹/۳۹ <sup>d</sup>           | ۵/۳۸ <sup>d</sup>            | ۰/۲۱ <sup>c</sup>           | ۰/۸۲ <sup>b</sup>           | ۲۴/۱۳ <sup>d</sup>         | ۴/۸۰ <sup>b</sup>            | ۲۸/۹۳ <sup>c</sup>          | CO            |
| ۱۲/۱۰ <sup>d</sup>          | ۵/۶۵ <sup>d</sup>            | ۰/۲۶ <sup>c</sup>           | ۰/۸۲ <sup>b</sup>           | ۲۸/۸۰ <sup>d</sup>         | ۴/۷۲ <sup>b</sup>            | ۳۳/۵۲ <sup>c</sup>          | NPK           |
| ۲۰/۸۰ <sup>ab</sup>         | ۱۵/۲۹ <sup>ab</sup>          | ۰/۶۵ <sup>a</sup>           | ۱/۱۲ <sup>ab</sup>          | ۴۹/۸۰ <sup>ab</sup>        | ۶/۷۰ <sup>a</sup>            | ۵۶/۵۰ <sup>a</sup>          | MNF           |
| ۲۳/۸۷ <sup>a</sup>          | ۱۷/۳۱ <sup>a</sup>           | ۰/۶۹ <sup>a</sup>           | ۱/۱۶ <sup>a</sup>           | ۵۳/۲۵ <sup>a</sup>         | ۶/۱۲ <sup>a</sup>            | ۵۹/۳۷ <sup>a</sup>          | CNF           |
| ۱۷/۲۳ <sup>c</sup>          | ۱۱/۴۱ <sup>c</sup>           | ۰/۵۲ <sup>b</sup>           | ۰/۹۸ <sup>bc</sup>          | ۳۷/۱۵ <sup>c</sup>         | ۶/۹۳ <sup>a</sup>            | ۴۴/۰۹ <sup>b</sup>          | MF            |
| ۱۹/۷۶ <sup>bc</sup>         | ۱۴/۰۴ <sup>bc</sup>          | ۰/۵۹ <sup>ab</sup>          | ۱/۰۵ <sup>ab</sup>          | ۴۴/۷۸ <sup>b</sup>         | ۶/۷۶ <sup>a</sup>            | ۵۱/۵۴ <sup>ab</sup>         | CF            |
| ۷/۳۱                        | ۴/۷۶                         | ۰/۱۳                        | ۰/۷۰                        | ۲۱/۶۴                      | ۴/۲۸                         | ۲۹/۹۳                       | خاک مرجع (RE) |

مدیریت‌های کودی تأثیر معنی‌داری بر تمامی شاخص‌های مورد بررسی داشتند و بین تیمارها از نظر آماری تفاوت مشاهده شد (جدول ۷). یافته‌های مشابه در مطالعات اخیر نیز نشان می‌دهند که کاربرد منابع آلی و تلفیقی به‌طور قابل توجهی بخش‌های مختلف کربن آلی

خاک از جمله قسمت‌های فعال، غیرفعال و کربن میکروبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Zhang et al., 2022; Singbah et al., 2024). در خصوص کربن آلی کل خاک، بیشترین مقدار مربوط به تیمارهای CNF ( $59/37 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) و MNF ( $56/50 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) بود که در یک گروه آماری قرار گرفتند و اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها نشان دادند، در حالی که کمترین مقدار در تیمار شاهد (CO) مشاهده شد، این امر نشان می‌دهد ادغام کودهای آلی با شیمیایی می‌تواند به افزایش SOC کمک کند (Zhang et al., 2022). روند مشابهی برای کربن غیرفعال همانند کربن آلی کل مشاهده شد، به‌طوری‌که تیمارهای CNF ( $53/25 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) و MNF ( $49/80 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) بیشترین مقادیر را به خود اختصاص دادند و با سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار داشتند، که نشان‌دهنده تأثیر تجمعی مصرف کودهای آلی و تلفیقی در افزایش مخزن پایدار کربن خاک است. در مورد کربن آلی فعال قابل اکسید پرمنگنات، تیمارهای آلی و تلفیقی شامل MNF، CNF، MF و CF ( $6/93-6/12 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) در گروه آماری بالاتری قرار گرفتند و نسبت به تیمارهای CO ( $4/80 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) و NPK ( $4/72 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) اختلاف معنی‌دار داشتند که بیانگر نقش مثبت منابع آلی در افزایش بخش فعال کربن است (Liu et al., 2024). در مورد کربن زیست‌توده میکروبی، تیمارهای CNF و MNF با مقادیر  $1/16 \text{ Mg ha}^{-1}$  و  $1/12 \text{ Mg ha}^{-1}$  در بالاترین گروه آماری قرار گرفتند و اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها نشان دادند، در حالی که کمترین مقدار در تیمار شاهد مشاهده شد. این نتایج بیانگر تحریک فعالیت میکروبی خاک در اثر مصرف منابع آلی و کاربرد تلفیقی کود آلی و شیمیایی است. همچنین کربن محلول خاک به طور معنی‌داری تحت تأثیر مدیریت کودی قرار گرفت و بیشترین مقدار آن در تیمار CNF ( $0/69 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) و سپس MNF ( $0/65 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشتند. جزء سبک کربن آلی و کربن آلی ذره‌ای نیز روند مشابهی را نشان دادند، به‌گونه‌ای که تیمارهای CNF و CF در گروه‌های آماری بالاتر قرار گرفتند و تیمار شاهد کمترین مقدار را به خود اختصاص داد (Liu et al., 2024). به طور کلی، نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کاربرد همزمان منابع آلی و شیمیایی (به‌ویژه CNF و MNF) بیشترین تأثیر را در افزایش تمامی جزءهای کربن آلی خاک داشته است. این امر بیانگر آن است که مدیریت تلفیقی کودها نه تنها موجب افزایش کربن آلی کل می‌شود، بلکه سبب بهبود جزءهای فعال و پایدار کربن نیز می‌گردد و می‌تواند راهبردی مؤثر برای ارتقای پویایی کربن آلی خاک و تقویت پتانسیل ترسیب کربن در سیستم تناوب گندم-ذرت باشد.

نتایج تحلیل همبستگی پیرسون بین جزءهای مختلف کربن آلی خاک (جدول ۸) نشان داد که تمامی شاخص‌های مورد بررسی دارای همبستگی‌های مثبت و بسیار معنی‌داری ( $P < 0.01$ ) با یکدیگر هستند. ضرایب همبستگی محاسبه‌شده در محدوده  $0/72$  تا  $0/99$  متغیر بودند. بر اساس این یافته‌ها، بیشترین همبستگی مثبت با کربن آلی کل (SOC) به ترتیب مربوط به کربن غیرفعال (PC) با ضریب  $0/99$ ، کربن آلی ذره‌ای (POC) با ضریب  $0/98$ ، جزء سبک (LFOC) و کربن محلول (DOC) با ضریب  $0/97$  و کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) با ضریب  $0/96$  بود. در مقابل، کربن آلی فعال قابل اکسید با پرمنگنات (POXC) با ضریب  $0/77$ ، کمترین همبستگی را با SOC نشان داد. همچنین، بررسی همبستگی‌های درون گروهی میان جزءهای فعال و سریع‌چرخه حاکی از روابط بسیار قوی بین آن‌ها بود؛ به‌طوری‌که بالاترین ضریب همبستگی مشاهده‌شده در این بخش، مربوط به همبستگی بین کربن آلی محلول (DOC) و جزء سبک (LFOC) با مقدار  $0/98$ ، و همچنین همبستگی کربن آلی محلول DOC با MBC ( $0/94$ ) و LFOC با MBC ( $0/93$ ) بود.

جدول ۸. نتایج همبستگی جزءهای کربن آلی خاک

| POC | LFOC        | DOC         | MBC         | PC          | POXC        | SOC         | جزء کربن آلی خاک |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------|
|     |             |             |             |             |             | ۱           | SOC              |
|     |             |             |             |             | ۱           | $0/77^{**}$ | POXC             |
|     |             |             |             | ۱           | $0/73^{**}$ | $0/99^{**}$ | PC               |
|     |             |             | ۱           | $0/95^{**}$ | $0/82^{**}$ | $0/96^{**}$ | MBC              |
|     |             | ۱           | $0/94^{**}$ | $0/96^{**}$ | $0/81^{**}$ | $0/97^{**}$ | DOC              |
|     | ۱           | $0/98^{**}$ | $0/93^{**}$ | $0/97^{**}$ | $0/76^{**}$ | $0/97^{**}$ | LFOC             |
| ۱   | $0/97^{**}$ | $0/96^{**}$ | $0/92^{**}$ | $0/98^{**}$ | $0/72^{**}$ | $0/98^{**}$ | POC              |

در تبیین این یافته‌ها می‌توان بیان کرد که همبستگی‌های بسیار قوی و نزدیک به واحد میان کربن آلی غیرفعال (PC) و کربن آلی ذره‌ای (POC) با کربن کل، از نظر منطقی کاملاً قابل انتظار است؛ زیرا این جزءها به دلیل ماهیت فیزیکی و شیمیایی خود (محافظت فیزیکی و اتصال به کانی‌ها)، سهم عمده‌ای از مخزن کل کربن خاک را تشکیل داده و تغییرات آن‌ها نشان‌دهنده روندهای تجمعی و



بلندمدت ترسیب کربن است (Lugato et al., 2024; Wu et al., 2024). در مقابل، ضریب همبستگی پایین تر POXC با SOC، بیانگر ماهیت متفاوت این شاخص به عنوان یک زیرمجموعه به شدت فعال و حساس است که نوسانات آن بیشتر بازتاب دهنده تغییرات کوتاه مدت مدیریتی بوده و پیش از آنکه در کربن کل نمود پیدا کند، واکنش نشان می دهد؛ لذا POXC را می توان به عنوان یک شاخص برای پایش زود هنگام تغییران کربن آلی خاک در نظر گرفت (Roper et al., 2024; Liu et al., 2025). از سوی دیگر، همبستگی های فوق العاده بالای میان دیگر جزءهای فعال کربن آلی خاک (DOC، LFOC و MBC) نشان دهنده وجود یک چرخه بیولوژیکی-فیزیکی به هم پیوسته در خاک است. بر اساس این هم افزایی، می توان استنباط کرد که ورود کربن آلی محلول (DOC) به عنوان منبع غذایی فوری، فعالیت زیست توده میکروبی (MBC) را تحریک کرده و متعاقب آن، محصولات متابولیک میکروها و بقایای سلولی آنها همراه با مواد آلی نیمه تجزیه شده، جزء سبک (LFOC) را تشکیل می دهند (Zhou et al., 2025). این شبکه همبستگی تأیید می کند که مدیریت های کودی با افزایش همزمان این جزءهای فعال، مسیر تبدیل بقایای تازه به مخازن پایدارتر را تسهیل کرده و دینامیک کربن خاک را به طور هماهنگ ارتقا می بخشد (Zhang et al., 2025; Chen et al., 2025).

### شاخص حساسیت (SI)

نتایج تجزیه واریانس شاخص حساسیت جزءهای کربن آلی خاک در جدول ۹ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مدیریت های کودی اثر معنی داری بر مقدار شاخص حساسیت کربن آلی خاک، کربن آلی فعال قابل اکسید با پرمنگنات، کربن غیرفعال خاک، کربن زیست توده میکروبی خاک، کربن محلول خاک، جزء سبک کربن آلی خاک و کربن آلی ذره ای خاک داشتند ( $P \leq 0.01$ ).

جدول ۹. تجزیه واریانس شاخص حساسیت جزءهای کربن آلی خاک در مدیریت های مختلف کود

| منابع تغییرات    | درجه آزادی | میانگین مربعات شاخص حساسیت |         |          |        |         |        |
|------------------|------------|----------------------------|---------|----------|--------|---------|--------|
|                  |            | POC                        | LFOC    | DOC      | MBC    | PC      | POXC   |
| اثر مدیریت کودی  | ۵          | ۳۳۸۷۸**                    | ۶۶۷۹۰** | ۱۴۳۷۲۰** | ۲۵۷۹** | ۱۷۳۹۶** | ۳۲۷۸** |
| خطای آزمایش      | ۲۵         | ۶۴۱                        | ۱۱۰۸    | ۱۸۲۷     | ۱۷۸    | ۳۵۰     | ۲۵۱    |
| ضریب تغییرات (%) |            | ۱۸/۷۵                      | ۲۳/۴۷   | ۱۵/۵۸    | ۳۲/۰۷  | ۲۲/۴۹   | ۳۹/۳۸  |

\*\* اختلاف معنی دار در سطح  $\alpha = 0.01$

جدول ۱۰. نتایج مقایسه میانگین شاخص حساسیت (SI) جزءهای کربن آلی خاک در مدیریت های کودی مختلف

| مدیریت کودی | SOC                 | POXC               | PC                   | MBC                 | DOC                  | LFOC                 | POC                  |
|-------------|---------------------|--------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| CO          | ۱۱/۵۹ <sup>c</sup>  | ۱۲/۰۹ <sup>b</sup> | ۱۱/۴۹ <sup>d</sup>   | ۱۷/۴۰ <sup>c</sup>  | ۶۴/۱۹ <sup>c</sup>   | ۱۳/۰۶ <sup>d</sup>   | ۲۸/۳۹ <sup>d</sup>   |
| NPK         | ۲۹/۲۹ <sup>c</sup>  | ۱۰/۲۶ <sup>b</sup> | ۳۳/۰۵ <sup>d</sup>   | ۱۷/۰۲ <sup>c</sup>  | ۱۰۲/۵۱ <sup>c</sup>  | ۱۸/۶۸ <sup>d</sup>   | ۶۵/۴۸ <sup>d</sup>   |
| MNF         | ۱۱۷/۹۲ <sup>a</sup> | ۵۶/۴۵ <sup>a</sup> | ۱۳۰/۰۸ <sup>ab</sup> | ۶۳/۳۵ <sup>ab</sup> | ۳۹۷/۹۳ <sup>a</sup>  | ۲۲۱/۲۱ <sup>ab</sup> | ۱۸۴/۳۸ <sup>ab</sup> |
| CNF         | ۱۲۸/۹۹ <sup>a</sup> | ۴۲/۹۱ <sup>a</sup> | ۱۴۶/۰۲ <sup>a</sup>  | ۶۴/۹۲ <sup>a</sup>  | ۴۲۸/۰۲ <sup>a</sup>  | ۲۶۳/۴۹ <sup>a</sup>  | ۲۲۶/۴۱ <sup>a</sup>  |
| MF          | ۷۰/۰۳ <sup>b</sup>  | ۶۱/۸۱ <sup>a</sup> | ۷۱/۶۵ <sup>c</sup>   | ۴۰/۳۵ <sup>bc</sup> | ۲۹۷/۱۴ <sup>b</sup>  | ۱۳۹/۷۲ <sup>c</sup>  | ۱۳۵/۵۶ <sup>c</sup>  |
| CF          | ۹۸/۷۷ <sup>ab</sup> | ۵۷/۷۱ <sup>a</sup> | ۱۰۶/۸۹ <sup>b</sup>  | ۴۹/۵۳ <sup>ab</sup> | ۳۵۵/۹۹ <sup>ab</sup> | ۱۹۴/۷۶ <sup>bc</sup> | ۱۷۰/۱۸ <sup>bc</sup> |
| میانگین SI  | ۷۶/۱۰               | ۴۰/۲۰              | ۸۳/۲۰                | ۴۱/۵۹               | ۲۷۴/۳۰               | ۱۴۱/۸۲               | ۱۳۵/۰۷               |
| رتبه بندی   | ۵                   | ۷                  | ۴                    | ۶                   | ۱                    | ۲                    | ۳                    |

نتایج مقایسه میانگین شاخص حساسیت جزءهای مختلف کربن آلی خاک (جدول ۱۰) نشان داد که مدیریت های کودی اثر معنی داری بر میزان پاسخ پذیری مخازن مختلف کربن در سطح احتمال یک درصد داشتند ( $P \leq 0.01$ ). به طور کلی، تیمارهای تلفیقی حاوی کود آلی و شیمیایی (به ویژه CNF و MNF) در تمامی شاخص ها بالاترین مقادیر حساسیت را نشان دادند، در حالی که تیمار شاهد (CO) کمترین مقادیر را به خود اختصاص داد. این الگو بیانگر آن است که ورود همزمان منابع آلی و عناصر غذایی معدنی، نه تنها موجب افزایش ذخایر کربن خاک می شود، بلکه شدت پاسخ این مخازن به مدیریت را نیز به طور چشمگیری تقویت می کند. بیشترین شاخص حساسیت در میان تمامی جزءها مربوط به کربن محلول (DOC) بود؛ به طوری که تیمار CNF با مقدار ۴۲۸/۰۲ و پس از آن MNF با ۳۹۷/۹۳ در بالاترین گروه آماری قرار گرفتند. این مقادیر بسیار بالا نشان می دهد که DOC به عنوان پویاترین و در دسترس ترین شکل کربن، سریع ترین و شدیدترین واکنش را به بهبود مدیریت تغذیه ای نشان می دهد. افزایش شدید حساسیت DOC بیانگر تشدید گردش کربن، افزایش ترشحات

ریشه‌ای و فعالیت میکروبی در اثر کاربرد منابع آلی است. پاسخ بیشتر این ماده به مدیریت نشان می‌دهد که ترشحات ریشه، بقایا و مواد آلی اضافه‌شده حاوی کربن آلی محلول هستند (Chantigny et al., 2002; Lu et al., 2004). کربن آلی محلول در آب یک منبع کربن برای میکروارگانیسم‌ها است و اعتقاد بر این است که این منبع به واسطه میکروبیologically است (Christ and David, 1996)؛ جریان کربن از طریق اجزای محلول، سوبسترای گردش زیست‌توده میکروبی را تامین می‌کند (McGill et al., 1986). علاوه بر ترشحات ریشه‌ای، تفاوت معماری ریشه گندم (C3، افشان و کم‌عمق) و ذرت (C4، عمیق‌تر و پرحجم‌تر) بخشی از حساسیت بالای DOC و MBC را توضیح می‌دهد؛ ذرت به دلیل ریزوداپوزیشن بیشتر، ترشحات محلول بیشتری تولید می‌کند که مستقیماً وارد مخزن کربن آلی محلول شده و سوبسترای میکروبی فراهم می‌آورد (Fischer and Kuzyakov, 2010; Mendez-Millan et al., 2011). بخشی از DOC و MBC اندازه‌گیری شده پس از برداشت گندم را می‌توان به اثر باقی‌مانده ورودی‌های ریشه‌ای ذرت در فصل کشت قبلی نسبت داد؛ بنابراین تناوب گندم-ذرت با ایجاد توالی متفاوت کمیت و کیفیت ترشحات ریشه‌ای، دامنه نوسان این دو جزء را نسبت به تک‌کشتی هر گیاه تشدید می‌کند (Wang et al., 2015). پس از کربن محلول خاک، جزء سبک کربن آلی خاک (LFOC) و کربن آلی ذره‌ای (POC) نیز شاخص حساسیت بالایی نشان دادند، به‌ویژه در تیمارهای CNF و MNF، که بیانگر نقش این جزءهای حدواسط در انتقال کربن تازه وارد به مخازن پایدارتر است. افزایش حساسیت این جزءها نشان می‌دهد که مدیریت تلفیقی موجب تسریع فرآیندهای تجمع بقایا و تشکیل ساختارهای آلی-معدنی می‌شود (Bucka et al., 2021). کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) نیز در تیمارهای تلفیقی بیشترین حساسیت را نشان داد و در گروه آماری بالاتری نسبت به تیمارهای منفرد قرار گرفت. این موضوع حاکی از آن است که فعالیت زیستی خاک به شدت تحت تأثیر هم‌افزایی منابع آلی و معدنی قرار می‌گیرد. در واقع، تأمین همزمان انرژی (از طریق کربن آلی) و عناصر غذایی (از طریق کود شیمیایی) شرایط بهینه‌ای برای رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌کند که این امر به افزایش پویایی چرخه کربن منجر می‌شود (Gong et al., 2009). در مورد کربن آلی فعال قابل اکسید با پرمنگنات (POXC)، اگرچه اختلاف معنی‌دار بین تیمارها مشاهده شد، اما دامنه تغییرات آن نسبت به DOC و LFOC کمتر بود که نشان می‌دهد این جزء در مقایسه با بخش‌های بسیار پویا، از پایداری نسبی بیشتری برخوردار است. در مقابل، کربن غیرفعال (PC) کمترین حساسیت نسبی را در بین جزءهای بررسی‌شده نشان داد، هرچند در تیمارهای CNF و MNF به طور معنی‌داری افزایش یافت. این امر بیانگر آن است که تغییر در مخزن پایدار کربن نیازمند تداوم مدیریت مناسب در بلندمدت است و پاسخ آن نسبت به جزءهای فعال کندتر اما پایدارتر می‌باشد. افزایش ذخایر کربن ناپایدار با استفاده از کودهای آلی نشان می‌دهد که اقدامات مدیریتی به حفظ یا بهبود عملکرد خاک به عنوان کربن ناپایدار کمک می‌کند و سرعت گردش سریع، منبع انرژی مهمی برای شبکه غذایی خاک است و بنابراین بر کیفیت مواد غذایی خاک تأثیر می‌گذارد (Chan et al., 2001).

به طور کلی، ترتیب حساسیت جزءهای کربن آلی خاک به مدیریت‌های کودی به صورت  $DOC > LFOC \approx POC > MBC > POXC > SOC > PC$  مشاهده شد که نشان می‌دهد جزءهای فعال و حدواسط بیشترین واکنش‌پذیری را نسبت به تغییرات مدیریتی دارند، در حالی که مخازن پایدارتر تغییرات تدریجی‌تری نشان می‌دهند. این نتایج حاکی از آن است که مدیریت تلفیقی کودها، علاوه بر افزایش مقدار کربن آلی خاک، موجب تقویت پویایی چرخه کربن و تسریع فرآیندهای تثبیت تدریجی آن در مخازن پایدار می‌شود. بنابراین، استفاده از شاخص حساسیت می‌تواند ابزاری کارآمد برای ارزیابی کارایی راهبردهای مدیریتی در بهبود پویایی کربن آلی خاک و افزایش پتانسیل ترسیب بلندمدت کربن در سیستم‌های زراعی باشد.

جدول ۱۱. نتایج شاخص حساسیت نسبی (RSI) جزءهای کربن آلی خاک در مدیریت‌های کودی مختلف

| مدیریت کودی | SOC | POXC | PC   | MBC  | DOC  | LFOC | POC  |
|-------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| CO          | ۱   | ۱/۰۴ | ۰/۹۹ | ۱/۵  | ۵/۵۴ | ۱/۱۳ | ۲/۴۵ |
| NPK         | ۱   | ۰/۳۵ | ۱/۱۳ | ۰/۵۸ | ۳/۵۰ | ۰/۶۴ | ۲/۲۴ |
| MNF         | ۱   | ۰/۴۸ | ۱/۱۰ | ۰/۵۱ | ۳/۳۷ | ۱/۸۸ | ۱/۵۶ |
| CNF         | ۱   | ۰/۳۳ | ۱/۱۳ | ۰/۵۰ | ۳/۳۲ | ۲/۰۴ | ۱/۷۶ |
| MF          | ۱   | ۰/۸۸ | ۱/۰۲ | ۰/۵۸ | ۴/۲۴ | ۲    | ۱/۹۴ |
| CF          | ۱   | ۰/۵۸ | ۱/۰۸ | ۰/۵۰ | ۳/۶۰ | ۱/۹۷ | ۱/۷۲ |
| میانگین SI  | ۱   | ۰/۶۱ | ۱/۰۸ | ۰/۷۰ | ۳/۹۳ | ۱/۶۱ | ۱/۹۴ |
| رتبه‌بندی   | ۰   | ۶    | ۴    | ۵    | ۱    | ۳    | ۲    |



نتایج شاخص حساسیت نسبی (RSI) جزءهای مختلف کربن آلی خاک (جدول ۱۱) نشان داد که میزان پاسخ‌پذیری مخازن کربن نسبت به کربن آلی کل (SOC) در مدیریت‌های مختلف کودی تفاوت قابل توجهی داشته است. در این شاخص، مقدار SOC برابر یک در نظر گرفته شده و سایر جزءها نسبت به آن مقیاس‌بندی شده‌اند؛ بنابراین مقادیر بزرگ‌تر از یک نشان‌دهنده حساسیت بیشتر آن جزء نسبت به کربن آلی کل است. بر اساس میانگین مقادیر RSI، کربن محلول (DOC) با مقدار ۳/۹۳ بیشترین حساسیت نسبی را نشان داد و در رتبه نخست قرار گرفت. این بدان معناست که DOC به طور متوسط ۴ برابر حساس‌تر از SOC نسبت به تغییرات مدیریتی واکنش نشان داده است. این نتیجه بیانگر پویایی بسیار بالای این جزء و نقش آن به عنوان سریع‌ترین شاخص پاسخ به تغییرات مدیریت تغذیه‌ای است. پس از آن، کربن آلی ذره‌ای (POC) با میانگین ۱/۹۴ و جزء سبک کربن آلی (LFOC) با ۱/۶۱ در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند که نشان‌دهنده حساسیت بالای جزءهای حدواسط در مقایسه با مخزن کل کربن خاک است. کربن غیرفعال (PC) با میانگین ۱/۰۸ در رتبه چهارم قرار گرفت که حاکی از آن است که حتی مخزن پایدار کربن نیز نسبت به SOC تغییرپذیری بیشتری نشان داده است، هرچند دامنه تغییرات آن کمتر از جزءهای فعال بوده است. کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) با میانگین ۰/۷۰ در رتبه پنجم و کربن آلی فعال قابل اکسید با پرمنگنات (POXC) با ۰/۶۱ در رتبه ششم قرار گرفتند. این الگو نشان می‌دهد که اگرچه MBC و POXC جزءهای فعال محسوب می‌شوند، اما در مقیاس نسبی و در مقایسه با DOC و POC شدت پاسخ کمتری داشته‌اند. به طور کلی، ترتیب حساسیت نسبی جزءهای کربن آلی خاک به صورت  $DOC > POC > LFOC > PC > MBC > POXC > SOC$  مشاهده شد. این روند بیانگر آن است که جزءهای بسیار پویا و در دسترس، بیشترین کارایی را برای پایش کوتاه‌مدت اثر مدیریت‌های کودی دارند. بنابراین استفاده از شاخص حساسیت نسبی می‌تواند ابزاری دقیق برای شناسایی مناسب‌ترین شاخص‌های پایش پویایی کربن آلی خاک و ارزیابی کارایی مدیریت‌های تلفیقی در افزایش پویایی و تثبیت تدریجی کربن در سیستم تناوب گندم-ذرت باشد.

## نتیجه‌گیری

این مطالعه بلندمدت نشان داد که مدیریت‌های کودی تأثیر معنی‌داری بر جزءهای کربن آلی خاک در تناوب گندم-ذرت تحت شرایط اقلیم نیمه‌خشک دارند. تیمارهای تلفیقی آلی-معدنی بیشترین بهبود را در تمامی مخازن کربن ایجاد کردند و نسبت به کاربرد جداگانه کود شیمیایی یا عدم مصرف کود برتری آشکار داشتند. رتبه‌بندی حساسیت جزءهای کربنی نشان داد که این جزءها از نظر کارایی برای پایش تغییرات کربن خاک یکسان نیستند؛ کربن آلی محلول (DOC) به‌عنوان حساس‌ترین و سریع‌ترین شاخص شناسایی شد و پس از آن جزء سبک کربن آلی (LFOC) و کربن آلی ذره‌ای (POC) قرار گرفتند، در حالی که کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) و کربن فعال قابل اکسید با پرمنگنات (POXC) کمترین حساسیت نسبی را نشان دادند و حتی از کربن غیرفعال (PC) نیز کم‌واکنش‌تر بودند؛ این یافته بیانگر آن است که صرف فراهم‌بودن یک جزء کربنی، تضمین‌کننده حساسیت بالای آن نیست، بلکه ماهیت محلول و عدم وابستگی به حفاظت خاکدانه‌ای نقش تعیین‌کننده‌تری دارد. با این حال، در مجموع، اهداف و فرضیات پژوهش محقق شدند: پاسخ جزءهای کربنی به مدیریت کودی تعیین شد، رتبه‌بندی حساسیت نسبی آن‌ها به‌دست آمد و مناسب‌ترین شاخص برای پایش کوتاه‌مدت معرفی گردید. از منظر کاربردی نیز نتایج پژوهش، مبنایی برای تدوین توصیه‌های تولیدی در صنعت کود کشور فراهم می‌کند؛ از جمله اولویت تولید کودهای تلفیقی آلی-معدنی به‌جای کاربرد جداگانه منابع آلی یا شیمیایی، کنترل کیفیت شوری در کمپوست‌های تولیدی به‌ویژه از پسماند شهری، توصیه مصرف حدود ۲۰ تن در هکتار در سال در افق زمانی چندساله متناسب با تناوب گندم-ذرت، و به‌کارگیری کربن آلی محلول و کربن آلی ذره‌ای به‌عنوان شاخص‌های عملی برای ارزیابی و اثبات میدانی کارایی محصولات کودی. در مجموع، یافته‌های این پژوهش ضمن ارائه چارچوبی علمی برای شناسایی شاخص‌های سریع پایش کربن خاک، مسیری کاربردی برای بهینه‌سازی راهبردهای مدیریت کودی و افزایش پتانسیل ترسیب کربن در سیستم‌های زراعی نیمه‌خشک کشور فراهم می‌آورد. یکی از محدودیت‌های این پژوهش، عدم اندازه‌گیری مستقیم زیست‌توده ریشه، نسبت ریشه به اندام هوایی و میزان ترشحات ریشه‌ای در تیمارهای مختلف است؛ در حالی که این پارامترها، به‌ویژه در تیمار کود شیمیایی که فاقد ورودی مستقیم ماده آلی است، نقش کلیدی در تبیین دقیق منشأ تغییرات جزءهای کربن آلی خاک دارند. پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی با اندازه‌گیری زیست‌توده ریشه و برآورد کمی ترشحات ریشه‌ای، امکان مقایسه دقیق‌تر و منصفانه‌تر سهم منابع کربنی مختلف (آلی در برابر زیستی-گیاهی) را در پویایی کربن آلی خاک فراهم آورند.

## ملاحظات اخلاقی

### حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی موسسه تحقیقات خاک و آب و همچنین معاونت پژوهشی دانشگاه دانشگاه تهران انجام شد.

### مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: نویسنده اول؛ تهیه گزارش پژوهش: نویسنده اول؛ تحلیل داده‌ها: نویسنده اول و دوم و سوم  
نویسندگان اول و دوم و سوم همچنین در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

### اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان از هیچ نوع فناوری مبنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش استفاده نکرده‌اند.

### بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

### سپاسگزاری

بدینوسیله از همکاری و مساعدت اساتید محترم و کارکنان بخش‌های مختلف موسسه تحقیقات آب و خاک ایران که نقش مهمی در انجام این پژوهش ایفا کردند تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران برای فراهم کردن امکانات و زمینه این همکاری علمی تشکر و قدردانی می‌گردد.

### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

### تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

## REFERENCES

- Bucka, F. B., Pihlap, E., Kaiser, J., Baumgartl, T., & Kögel-Knabner, I. (2021). A small-scale test for rapid assessment of the soil development potential in post-mining soils. *Soil and Tillage Research*, 211, 105016. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105016>
- Carrascosa, A., Moreno, G., Cotrufo, M. F., Frade, C., Rodrigo, S., & Rolo, V. (2025). Improved management increases soil mineral-protected organic carbon storage via plant-microbial-nutrient mediation in semi-arid grasslands. *Soil*, 11(2), 911–937. <https://doi.org/10.5194/soil-11-911-2025>
- Chan, K. Y., Bowman, A., & Oates, A. (2001). Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an Oxic Paleustalf under different pasture leys. *Soil Science*, 166(1), 61–67.
- Chantigny, M. H., Angers, D. A., & Rochette, P. (2002). Fate of carbon and nitrogen from animal manure and crop residues in wet and cold soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(4), 509–517. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00209-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00209-7)
- Chenu, C., Angers, D. A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., & Balesdent, J. (2019). Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research*, 188, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>
- Christ, M. J., & David, M. B. (1996). Dynamics of extractable organic carbon in Spodosol forest floors. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(9), 1171–1179. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(96\)00128-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(96)00128-9)
- Cotrufo, M. F., Ranalli, M. G., Haddix, M. L., Six, J., & Lugato, E. (2019). Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, 12(12), 989–994. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>
- Cotrufo, M. F., Haddix, M. L., Kroeger, M. E., & Stewart, C. E. (2022). The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 168, 108648. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108648>
- de Alencar, G. V., Gomes, L. C., Barros, V. M. D. S., Ortiz Escobar, M. E., de Oliveira, T. S., & Mendonca,



- E. D. S. (2024). Organic farming improves soil carbon pools and aggregation of sandy soils in the Brazilian semi-arid region. *Soil Use and Management*, 40(3), e13097. <https://doi.org/10.1111/sum.13097>
- Diop, M., El Mejahed, K., Acuña-Guzman, S. F., Cicek, H., El Abidine, A. Z., El Gharous, M., & Beniaich, A. (2026). Effects of tillage reversal and crop rotation on soil health and soil organic carbon fractions and stocks in wheat-based cropping systems under dryland Morocco. *Journal of Agriculture and Food Research*, 102641. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2026.102641>
- Fischer, H., Eckhardt, K. U., Meyer, A., Neumann, G., Leinweber, P., Fischer, K., & Kuzyakov, Y. (2010). Rhizodeposition of maize: Short-term carbon budget and composition. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(1), 67–79. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800293>
- Gao, G., Li, G., Liu, M., Liu, J., Ma, S., Li, D., ... & Li, Z. (2024). Microbial carbon metabolic activity and bacterial cross-profile network in paddy soils of different fertility. *Applied Soil Ecology*, 195, 105233. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105233>
- Gocke, M. I., Guigue, J., Bauke, S. L., Barkusky, D., Baumecker, M., Berns, A. E., ... & Amelung, W. (2023). Interactive effects of agricultural management on soil organic carbon accrual: A synthesis of long-term field experiments in Germany. *Geoderma*, 438, 116616. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116616>
- Gong, W., Yan, X. Y., Wang, J. Y., Hu, T. X., & Gong, Y. B. (2009). Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools under a wheat-maize cropping system in North China plain. *Plant and Soil*, 314(1-2), 67–76. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9705-2>
- Gorooei, A., Srivastava, A. K., Jahanbakhshi, F., Ahmadi, A., Aynehan, A., Nendel, C., ... & Kamali, B. (2025). Projected climate change impacts on future soil organic carbon dynamics and wheat yields under different agricultural management strategies for two contrasting environments in Iran. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 30(7), 55. <https://doi.org/10.1007/s11027-025-10242-9>
- Hao, X., Abou Najm, M., Steenwerth, K. L., Nocco, M. A., Basset, C., & Daccache, A. (2023). Are there universal soil responses to cover cropping? A systematic review. *Science of the Total Environment*, 861, 160600. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160600>
- Lavallee, J. M., Chomel, M., Alvarez Segura, N., De Castro, F., Goodall, T., Magilton, M., ... & Bardgett, R. D. (2024). Land management shapes drought responses of dominant soil microbial taxa across grasslands. *Nature Communications*, 15(1), 29. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43864-1>
- Lehmann, J., Hansel, C. M., Kaiser, C., Kleber, M., Maher, K., Manzonei, S., ... & Kögel-Knabner, I. (2020). Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. *Nature Geoscience*, 13(8), 529–534. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0612-3>
- Liptzin, D., Norris, C. E., Cappellazzi, S. B., Mac Bean, G., Cope, M., Greub, K. L., ... & Honeycutt, C. W. (2022). An evaluation of carbon indicators of soil health in long-term agricultural experiments. *Soil Biology and Biochemistry*, 172, 108708. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108708>
- Liu, C., He, C., Chang, S. X., Chen, X., An, S., Wang, D., ... & Li, P. (2024). Fertilization and tillage influence on soil organic carbon fractions: A global meta-analysis. *Catena*, 246, 108404. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108404>
- Liu, R., Hafeez, A., Hussain, S., Guo, T., Wen, M., Zhang, S., ... & Wang, J. (2026). Effects of long-term diversified crop rotations on soil carbon dynamics mediated by microbial carbon degradation genes in the Loess Plateau. *Industrial Crops and Products*, 240, 122487. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122487>
- Lu, Y. H., Watanabe, A., & Kimura, M. (2004). Contribution of plant photosynthates to dissolved organic carbon in a flooded rice soil. *Biogeochemistry*, 71(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-3258-0>
- McGill, W. B., Cannon, K. R., Robertson, J. A., & Cook, F. D. (1986). Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton L after 50 years of cropping to two rotations. *Canadian Journal of Soil Science*, 66(1), 1–19. <https://doi.org/10.4141/cjss86-001>
- Mendez-Millan, M., Dignac, M. F., Rumpel, C., Rasse, D. P., Bardoux, G., & Derenne, S. (2012). Contribution of maize root derived C to soil organic carbon throughout an agricultural soil profile assessed by compound specific <sup>13</sup>C analysis. *Organic Geochemistry*, 42(12), 1502–1511. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2011.02.008>
- Opala, P. A., Othieno, C. O., Okalebo, J. R., & Kisinyo, P. O. (2010). Effects of combining organic materials with inorganic phosphorus sources on maize yield and financial benefits in western Kenya. *Experimental Agriculture*, 46(1), 23–34. <https://doi.org/10.1017/S0014479709990457>
- Prairie, A. M., King, A. E., & Cotrufo, M. F. (2023). Restoring particulate and mineral-associated organic carbon through regenerative agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(21), e2217481120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2217481120>

- Shi, J., Deng, L., Wu, J., Huang, Y., Dong, Y., Peñuelas, J., ... & Kuzyakov, Y. (2025). Global change modulates microbial carbon use efficiency: mechanisms and impacts on soil organic carbon dynamics. *Global Change Biology*, 31(5), e70240. <https://doi.org/10.1111/gcb.70240>
- Singbah, P. T. (2024). *Long-term organic and inorganic fertilization affect soil pH, humus carbon fractions, and crop yield in three soil types* (SSRN Scholarly Paper No. 5117633). Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5117633>
- Smith, P., Soussana, J. F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D. P., ... & Klumpp, K. (2020). How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology*, 26(1), 219–241. <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>
- Wang, J., Wang, X., Xu, M., Feng, G., Zhang, W., Yang, X., & Huang, S. (2015). Contributions of wheat and maize residues to soil organic carbon under long-term rotation in North China. *Scientific Reports*, 5(1), 11409. <https://doi.org/10.1038/srep11409>
- Wu, B., Zhang, M., Zhai, Z., Dai, H., Yang, M., Zhang, Y., & Liang, T. (2024). Soil organic carbon, carbon fractions, and microbial community under various organic amendments. *Scientific Reports*, 14(1), 25431. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75771-w>
- Yadav, M., Mittal, R., Kumari, A., Bhatia, A., Khatri, A., & Bhateria, R. (2025). Soil carbon fractions and their role in climate-resilient agriculture: A review. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 100127. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2025.100127>
- Zhang, C., Zhao, Z., Li, F., & Zhang, J. (2022). Effects of organic and inorganic fertilization on soil organic carbon and enzymatic activities. *Agronomy*, 12(12), 3125. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123125>
- Zhang, G., Wu, Y., Ouyang, S., Duan, H., Wang, J., & Tie, L. (2025). The impact of nitrogen and phosphorus enrichment on litter decomposition: Soil biota roles and biochemical pathways. *Plant and Soil*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07887-5>
- Zhang, H., Zhai, H., Zan, R., Tian, Y., Ma, X., Ji, H., & Zhang, D. (2025). Balanced fertilization improves crop production and soil organic carbon sequestration in a wheat–maize planting system in the North China plain. *Plants*, 14(6), 838. <https://doi.org/10.3390/plants14060838>
- Zhou, G., Li, G., Liang, H., Liu, R., Ma, Z., Gao, S., ... & Cao, W. (2025). Green manure coupled with straw returning increases soil organic carbon via decreased priming effect and enhanced microbial carbon pump. *Global Change Biology*, 31(5), e70232. <https://doi.org/10.1111/gcb.70232>