

Effects of Tillage Systems on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties under Durum Wheat Cultivation

A. Beheshti Ale Agha^{1*}, H.R. Chaghazardi²

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

(*- Corresponding Author Email: beheshtiali97@gmail.com)

2- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 15 May 2026

Revised: 08 July 2026

Accepted: 28 July 2026

Available Online: 28 July 2026

How to cite this article:

Beheshti Ale Agha, A., & Chaghazardi, H.R. (2026). Effects of tillage systems on soil physical, chemical, and biological properties under Durum wheat cultivation role of tillage management on soil properties under Durum wheat cultivation. *Journal of Soil and Water*, 40(2), 181-210. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.2026.98698.1540>

Introduction

Tillage management is one of the main factors affecting soil quality and the sustainability of agricultural systems. Intensive conventional tillage can weaken soil structure, accelerate organic matter decomposition, and alter microbial activity due to continuous mechanical disturbance of the soil. In contrast, conservation tillage systems such as reduced tillage and no-tillage minimize soil disturbance and often retain crop residues on the soil surface, which can improve soil aggregation, enhance soil organic carbon storage, and increase nutrient retention. These systems also help reduce soil erosion, improve water infiltration, and create more favorable conditions for soil microorganisms. In semi-arid regions, where soil moisture is limited and soil degradation can occur rapidly, maintaining soil structure and fertility is particularly important for crop production. Durum wheat is an important cereal crop in many semi-arid areas, and its productivity is closely related to soil health and nutrient availability. Therefore, understanding how different tillage systems influence soil properties is essential for developing sustainable management strategies. This study was conducted to evaluate the effects of different tillage systems and crop presence on selected physical, chemical, and biological properties of soil.

Materials and Methods

The experiment was conducted as a split-split-plot arrangement within a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The treatments consisted of three tillage systems, including conventional tillage (CT), reduced tillage (RT), and no-tillage (NT), assigned to the main plots. The subsoiling treatments, including subsoiling and no-subsoiling, were allocated to the subplots, and two crop treatments, including control (uncultivated soil) and durum wheat (*Triticum durum*), were assigned to the sub-subplots. Soil samples were collected after the crop growing period from the experimental plots and prepared for laboratory analysis. A set of soil quality indicators representing physical, chemical, and biological aspects of soil functioning was measured. Physical and chemical assessments included pH, electrical conductivity (EC), water-dispersible clay (WDC), and mean weight diameter (MWD) of aggregates, which were used to evaluate salinity condition and aggregate stability. Chemical analyses included soil organic matter (SOM), soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), available phosphorus (P), and available potassium (K) as the main indicators of soil fertility and nutrient status. Biological properties were determined through basal soil respiration (BR) and substrate-induced respiration (SIR), in order to estimate microbial activity and the potential metabolic response of soil microorganisms to an added substrate. In addition, microbial biomass carbon was considered in the interpretation of biological responses where relevant. The collected data were statistically analyzed using analysis of variance (ANOVA) to test the significance of the main effects of tillage and crop treatment as well as their interaction effects on soil properties. Mean comparisons were performed using appropriate post hoc tests at the selected probability level.



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.2026.98698.1540>

Results and Discussion

The results showed that tillage management significantly influenced the measured soil properties. Conventional tillage generally resulted in higher EC and water-dispersible clay, indicating weaker structural stability, whereas no-tillage improved aggregation and produced the highest mean weight diameter of soil aggregates. These results confirm that reduced soil disturbance promotes aggregate formation and protects soil structure. Soil organic matter and soil organic carbon increased as tillage intensity decreased, with the highest values observed under no-tillage. This trend indicates that conservation systems reduce oxidation of organic materials and favor carbon accumulation within stable aggregates. Nutrient availability also improved under conservation practices, particularly in the no-tillage treatment, where nitrogen, phosphorus, and potassium values were generally higher than in conventional tillage. Crop treatment had a positive effect on several soil properties. Soils under durum wheat showed higher soil organic matter, soil organic carbon, and nutrient concentrations than uncultivated control soils, probably because of root residues, rhizosphere activity, and enhanced microbial interactions. Biological indicators also responded significantly to management practices. Basal respiration was greater under conventional tillage, suggesting more rapid decomposition of soil organic matter under intensive disturbance. In contrast, lower respiration values under no-tillage reflected greater stabilization of organic carbon. Substrate-induced respiration was significantly affected by tillage, crop treatment, and their interaction, indicating that microbial activity was highly sensitive to both soil disturbance and plant presence.

Conclusion

The findings demonstrate that tillage management has an important role in controlling soil quality in durum wheat systems. Conservation practices, especially no-tillage, improved soil structure, increased soil organic carbon and organic matter, and enhanced nutrient availability compared with conventional tillage. Durum wheat cultivation also contributed positively to soil improvement through rhizosphere effects and organic inputs. Overall, the combination of no-tillage and durum wheat cultivation appears to be a suitable management strategy for improving soil quality and supporting sustainable production in semi-arid conditions.

Keywords: Cereals, Residue management, Reduced tillage, Soil compaction, Subsoiling

اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در کشت گندم دوروم

علی بهشتی آل آقا^{۱*} - حمیدرضا چقازردی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثر سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی، کاربرد زیرشکن و نوع محصول بر برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه رازی کرمانشاه، واقع در اقلیم نیمه‌خشک سرد، انجام شد. خاک مزرعه دارای بافت لومی رسی و ماهیت آهکی بود. آزمایش به صورت کرت‌های دوبار خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل سامانه‌های خاک‌ورزی در سه سطح بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم، عامل فرعی شامل کاربرد و عدم کاربرد زیرشکن و عامل فرعی فرعی شامل دو سطح گندم دوروم و بدون کشت بود. نتایج نشان داد pH خاک تحت تأثیر تیمارها معنی‌دار نشد، اما هدایت الکتریکی خاک تحت تأثیر سامانه خاک‌ورزی، زیرشکن و نوع محصول معنی‌دار بود؛ به طوری که هدایت الکتریکی در خاک‌ورزی مرسوم ۰/۳۹ و در بی‌خاک‌ورزی ۰/۳۰ دسی‌زیمنس بر متر بود و در تیمار دارای زیرشکن نسبت به بدون زیرشکن از ۰/۳۴ به ۰/۳۶ دسی‌زیمنس بر متر افزایش یافت. بیشترین رس قابل انتشار در آب در خاک‌ورزی مرسوم (۰/۶۰ درصد) و کمترین آن در بی‌خاک‌ورزی (۰/۴۸ درصد) مشاهده شد. پایداری خاکدانه‌ها با شاخص میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) ارزیابی شد و این شاخص در بی‌خاک‌ورزی (۰/۴۶ میلی‌متر) نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (۰/۳۱ میلی‌متر) افزایش نشان داد. همچنین، بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم موجب افزایش کربن آلی خاک از ۰/۶۱ به ۱/۲۳ درصد، ماده آلی از ۱/۰۵ به ۲/۱۰ درصد، نیتروژن کل از ۰/۱۰ به ۰/۲۱ درصد، فسفر قابل جذب از ۱۰/۵۶ به ۱۸/۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم، پتاسیم قابل جذب از ۴۸۳/۵۸ به ۷۵۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کربن زیست‌توده میکروبی از ۱۱۷/۳۶ به ۲۹۰/۳۰ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک شد. در مقابل، تنفس پایه و تنفس ناشی از سوپسترا در خاک‌ورزی مرسوم به ترتیب با ۲۰۴/۱۱ و ۵۴۳/۰۸ میلی‌گرم دی‌اکسیدکربن بر کیلوگرم خاک در روز بیشترین مقدار را داشتند. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش شدت خاک‌ورزی، به ویژه در قالب بی‌خاک‌ورزی همراه با کشت گندم دوروم، می‌تواند با بهبود پایداری خاکدانه‌ها، افزایش ماده آلی و عناصر غذایی و ارتقای شاخص‌های زیستی خاک، نقش مؤثری در بهبود کیفیت و پایداری خاک در شرایط خاک‌های آهکی نیمه‌خشک داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: تراکم خاک، زیرشکنی، غلات، مدیریت بقایا

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: beheshtiali97@gmail.com)

۲- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

مقدمه

گندم دوروم (*Triticum durum* L.) به دلیل ارزش اقتصادی بالا و تحمل نسبی به تنش‌های محیطی، یکی از محصولات استراتژیک در بخش‌های وسیعی از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، از جمله غرب ایران است. با این حال، بهره‌وری این محصول در خاک‌های آهکی این مناطق به دلیل محدودیت بارندگی، فقر ماده آلی و تراکم خاک ناشی از سال‌ها خاک‌ورزی مرسوم، با چالش‌های جدی مواجه است (Heydari & Taran, 2025). رشد ریشه و جذب مواد مغذی در این خاک‌های آهکی، به شدت تحت تأثیر کیفیت محیط ریزوسفر است. محدودیت‌های فیزیکی، از جمله مقاومت مکانیکی بالا و تهویه ضعیف، نه تنها مسیر رشد ریشه را مسدود می‌کند، بلکه تبادلات گازی و فعالیت میکروبی را که کلید اصلی آزادسازی فسفر و نیتروژن است، مختل می‌نماید (Yu et al., 2020).

در دهه‌های اخیر، انتقال از سیستم‌های خاک‌ورزی متداول به کشاورزی حفاظتی (شامل بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) به عنوان راهبردی محوری جهت بهبود کیفیت خاک مطرح شده است. تحقیقات نشان می‌دهند که حفظ بقایا بر سطح خاک و کاهش دست‌خوردگی مکانیکی در این سامانه‌ها، از طریق تقویت پایداری خاکدانه‌ها و افزایش کربن آلی، به حفظ رطوبت و بهبود فعالیت‌های میکروبی کمک می‌کند (Busari et al., 2015; Dassou et al., 2024; Singh et al., 2025). با این وجود، یکی از انتقادات اساسی به سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی در خاک‌های سنگین و آهکی، تشکیل تدریجی لایه سخت (Hardpan) در عمق‌های زیرین است که به دلیل تردد ماشین‌آلات و نبود شخم عمیق ایجاد می‌شود. این پدیده، نفوذ عمقی ریشه را محدود کرده و گیاه را در برابر خشکی‌های پایان فصل بسیار آسیب‌پذیر می‌کند (Peralta et al., 2021). در چنین شرایطی، تلفیق بی‌خاک‌ورزی یا کم‌خاک‌ورزی با عملیات زیرشکن (Subsoiling) می‌تواند راهکاری مؤثر برای شکستن فیزیکی لایه‌های فشرده بدون برگرداندن خاک باشد که ضمن حفظ بقایای سطحی، مقاومت مکانیکی خاک را کاهش داده و تهویه و پایداری ساختار خاک را در میان‌مدت بهبود می‌بخشد (Becker et al., 2022).

علاوه بر جنبه‌های فیزیکی، پاسخ شیمیایی و زیستی خاک به مدیریت‌های تلفیقی، به‌ویژه در ناحیه ریزوسفر، نقشی تعیین‌کننده در کارایی مصرف منابع دارد (Liang et al., 2025). ریزوسفر به عنوان یک کانون فعالیت‌های بیولوژیکی، با ترشح اسیدهای آلی توسط ریشه گندم دوروم، پویایی دسترسی به عناصر غذایی تثبیت‌شده در خاک‌های آهکی را تغییر می‌دهد (Souid et al., 2026). عدم دست‌خوردگی خاک در سامانه‌های حفاظتی، به حفظ شبکه قارچ‌های میکوریزا و

جمعیت باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) کمک می‌کند که در نهایت منجر به بهبود جذب نیتروژن و فسفر می‌شود (Singh et al., 2021). با این وجود، بیشتر پژوهش‌های گذشته صرفاً به جنبه‌های کلی کشاورزی حفاظتی یا اثرات منفرد مدیریت‌های فیزیکی پرداخته‌اند و ارزیابی جامع اثرات متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی (تلفیق با زیرشکن) و حضور گندم دوروم بر ویژگی‌های سه‌گانه فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در شرایط خاص اقلیمی غرب ایران، همچنان با خلاء اطلاعاتی روبرو است.

با توجه به ضرورت پر کردن این خلاء پژوهشی، تحقیق حاضر با هدف بررسی اثر سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی (بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و مرسوم) و کاربرد زیرشکن بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در شرایط حضور و عدم حضور گندم دوروم طراحی و اجرا گردید. فرضیه اصلی این مطالعه این است که تلفیق زیرشکن با سامانه‌های حفاظتی، نه تنها محدودیت‌های فیزیکی را رفع می‌کند، بلکه با بهینه‌سازی محیط ریشه، کارایی جذب مواد مغذی را نیز افزایش می‌دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند به اتخاذ راهبردهای مدیریتی بهینه جهت بهبود کیفیت خاک و افزایش پایداری تولید گندم در مناطق نیمه‌خشک کمک کند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه، در مزرعه‌ای با سابقه ۷ سال مدیریت حفاظتی خاک، انجام شد. محل اجرای آزمایش در مختصات ۳۴ درجه و ۱۹ دقیقه و ۲۱ ثانیه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۷ دقیقه و ۱۲ ثانیه طول شرقی و در ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا واقع شده است. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد است و بیشترین بارش سالانه آن در فصل‌های پاییز و زمستان با میانگین ۴۰۱ میلی‌متر رخ می‌دهد.

آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار اجرا شد. سامانه‌های خاک‌ورزی (مرسوم، کاهشی و بی‌خاک‌ورزی) به عنوان عامل اصلی و تیمار زیرشکنی در ۲ سطح (با زیرشکن و بدون زیرشکن) به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. طول هر کرت ۵ متر و عرض آن برابر با عرض کاری دستگاه کشت (۲/۲ متر) تعیین شد. فاصله بین کرت‌ها و فاصله بین تکرارها ۱ متر در نظر گرفته شد تا اثرات جانبی و تداخل عملیات به حداقل برسد. پیش از کاشت، نمونه‌برداری تصادفی از خاک مزرعه انجام و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (Carter & Gregorich, 2007). نتایج تجزیه اولیه خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری

Table 1- Physical and chemical properties of soil at 0-30 cm depth						
بافت خاک	pH	EC	TNV	OC	N	P K
Soil texture		(dS m ⁻¹)	%	(%)		(mg kg ⁻¹)
Clay loam	7.40	0.86	15.2	0.97	0.097	12 480

تصحیح ۱/۷۲ روی داده‌های کربن آلی محاسبه گردید. همچنین میزان نیتروژن کل خاک (N) به روش هضم و تقطیر کج‌دال تعیین شد (Alef & Nannipieri, 1995).

در بررسی ویژگی‌های فیزیکی خاک، میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) به‌عنوان شاخص پایداری ساختمان خاک از طریق غربال کردن مرطوب خاکدانه‌ها در آب اندازه‌گیری شد و مقدار رس قابل انتشار در آب (WDC) با روش هیدرومتری (بافت‌سنجی بدون استفاده از عامل پراکنده‌ساز) به‌دست آمد (Carter & Gregorich, 2007).

ارزیابی پارامترهای زیستی شامل تنفس پایه خاک (BR) از طریق به تله انداختن دی‌اکسید کربن متصادف در سود طی آنکوباسیون نمونه‌ها در شرایط تاریکی و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. تنفس ناشی از سوبسترا (SIR) نیز با روندی مشابه و پس از افزودن گلوکز به‌عنوان منبع کربن سهل‌الوصول اندازه‌گیری شد. افزون بر این، کربن زیست‌توده میکروبی خاک (MBC) به روش تددین (گازدهی) با کلروفرم و خوابانیدن ۱۰ روزه نمونه‌ها تعیین گردید (Alef & Nannipieri, 1995; Anderson, 1982; Horwath & Paul, 1994).

داده‌ها پس از بررسی نرمال بودن و همگنی واریانس‌ها با آزمون‌های کلموگروف-اسمیرنوف و لون در نرم‌افزار SPSS 26، با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 و بر اساس طرح کرت‌های خردشده تجزیه و تحلیل شدند. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

pH خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی، نوع محصول، استفاده از زیرشکن و اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر pH خاک، معنی‌دار نبودند (جدول ۲).

هدایت الکتریکی خاک

بررسی تأثیر تیمارهای آزمایشی بر هدایت الکتریکی خاک نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی، نوع محصول، استفاده از زیرشکن و اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و استفاده از زیرشکن بر

عملیات زیرشکنی پیش از کاشت و در شرایط رطوبتی مناسب خاک فقط یکبار اجرا شد. در تیمارهای دارای زیرشکن، از ادوات زیرشکن با عمق کار حدود ۶۰ سانتی‌متر استفاده شد، در حالی که در تیمارهای بدون زیرشکن، خاک زیرسطحی بدون هرگونه مداخله مکانیکی باقی ماند. در سامانه خاک‌ورزی مرسوم، شخم با گاواهن برگردان‌دار انجام و سپس یک مرحله دیسک برای خرد کردن کلوخه‌ها اجرا شد. در سامانه کم‌خاک‌ورزی، تنها یک مرحله خاک‌ورزی با چیزل پکردار استوانه‌ای صورت گرفت. در سامانه بی‌خاک‌ورزی، خاک بدون دست‌کاری باقی ماند و کاشت بذر گندم دوروم (رقم ذهاب) با میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار، به‌صورت مستقیم با دستگاه کشت مستقیم آسکه ۲۲۰۰ انجام شد و ۳۰ درصد بقایای گیاهی سطح خاک حفظ گردید. سایر عملیات زراعی شامل مدیریت علف‌های هرز (وجین دستی)، بقایای گیاهی و مراقبت‌های زراعی به‌صورت یکنواخت در تمامی کرت‌ها اعمال شد. در طول دوره کاشت و داشت، از کودهای شیمیایی و آلی و سموم دفع آفات استفاده نشد. کاشت بذر گندم دوروم به‌طور کامل در ۲۴ آبان ماه انجام شد و اولین بارش مؤثر منطقه در ۲۹ آبان ماه رخ داد. در زمان اجرای آزمایش حداقل ۳۰ درصد بقایای گیاهی با استفاده از روش طناب بر روی سطح خاک باقی ماند (Asodar & Ghasemi-nejad Raini, 2008).

نمونه‌برداری خاک پس از برداشت محصول گندم دوروم و از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. نمونه خاک‌های برداشت شده، هوا خشک شدند تا ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شوند. همچنین بخشی از نمونه‌ها در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد تا اندازه‌گیری ویژگی‌های زیستی نگهداری شدند.

واکنش خاک (pH) و هدایت الکتریکی (EC) در گل اشباع به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های pH سنج و EC سنج قرائت شدند (Carter & Gregorich, 2007). تعیین فسفر قابل دسترس خاک (P) به روش طیف‌سنجی نوری پس از عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم (روش اولسن) انجام شد و غلظت پتاسیم قابل جذب (K) نیز پس از استخراج با اسات آمونیوم نرمال به کمک دستگاه فلیم‌فتومتر سنجیده شد (Carter & Gregorich, 2007). سنجش کربن آلی خاک (OC) بر پایه اکسایش مرطوب با دی‌کرومات پتاسیم (روش واکلی و بلک) صورت پذیرفت و مقدار ماده آلی خاک (OM) نیز با اعمال ضریب

هدایت الکتریکی خاک در سطح احتمال پنج و یک درصد معنی‌دار بودند و باقی اثرات متقابل معنی‌دار نشدند (جدول ۲). هدایت الکتریکی خاک تحت تأثیر معنی‌دار سیستم‌های خاک‌ورزی قرار گرفت و نتایج نشان داد که خاک‌ورزی مرسوم با ۰/۳۹ دسی‌زیمنس بر متر بالاترین میزان هدایت الکتریکی را به خود اختصاص داد، در حالی که سیستم بی‌خاک‌ورزی با مقدار ۰/۳۰ دسی‌زیمنس بر متر کمترین میزان را نشان داد که تفاوت آماری بین هر سه تیمار معنادار بود (شکل ۱). اگرچه هر دو مقدار در محدوده کاملاً غیرشور قرار دارند و این نوسانات از نظر کاربرد کشاورزی محدود است، اما افزایش نسبی هدایت الکتریکی در خاک ورزی مرسوم می‌تواند ناشی از تخریب ساختمان خاک و کاهش نفوذپذیری سطحی در شرایط دیم باشد که شستشوی طبیعی املاح محلول به لایه‌های زیرین را کندتر می‌کند (Blanco-Canqui & Ruis, 2018).

(Ruis, 2018). در مقابل، سیستم‌های حفاظتی با حفظ بقایای گیاهی و پایداری ساختار فیزیکی خاک، روند نفوذ آب را بهبود بخشیده و به تعدیل غلظت یون‌ها در لایه سطحی کمک می‌کنند (Palm et al., 2014).

نتایج نشان داد که اعمال زیرشکن تأثیر معنی‌داری بر هدایت الکتریکی خاک داشت. هدایت الکتریکی خاک در تیمار دارای زیرشکن به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار بدون زیرشکن بود (شکل ۲). به‌طوری‌که مقدار هدایت الکتریکی خاک در تیمار زیرشکن ۰/۳۶ دسی‌زیمنس بر متر و در تیمار بدون زیرشکن حدود ۰/۳۴ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری شد.

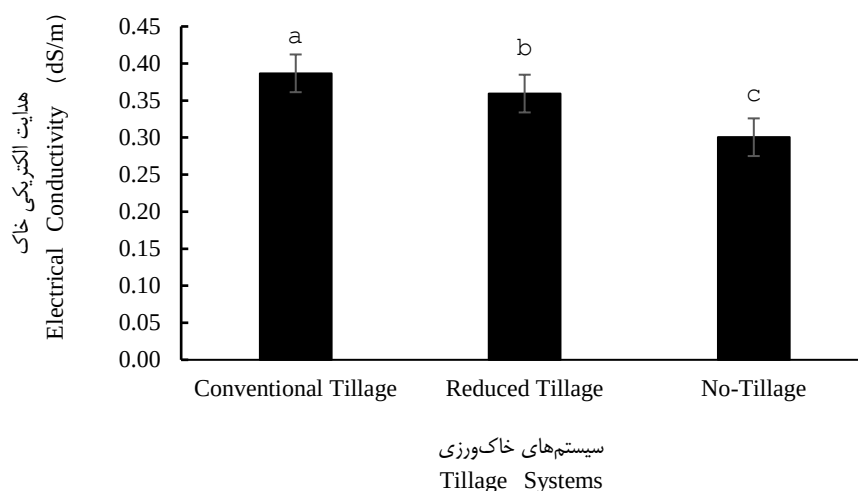
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تأثیر خاک‌ورزی، زیرشکن و نوع محصول بر pH و هدایت الکتریکی خاک، رس قابل انتشار در آب، میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها، مقدار کربن و ماده آلی خاک

Table 2- Analysis of variance results for the effects of tillage system, subsoiling, and crop type on soil pH, electrical conductivity, water-dispersible clay, mean weight diameter of soil aggregates, soil organic carbon, and soil organic matter

منابع تغییرات Source of variation	df	میانگین مربعات Mean Square					
		pH	هدایت الکتریکی EC	رس قابل انتشار در آب WDC	میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها MWD	کربن آلی OC	ماده آلی OM
بلوک Block	2	0.0010	0.0003	0.0064	0.0003	0.001	0.002
سیستم‌های خاک‌ورزی Tillage system	2	0.0209 ns	0.0229 *	0.0391 *	0.0512 *	0.103 *	0.300 *
خطای کرت اصلی Whole-plot error	4	0.0017	0.0002	0.0016	0.0001	0.003	0.007
زیرشکن Subsoiling	1	0.0003 ns	0.0063 *	0.0010 ns	0.0013 *	0.006 ns	0.018 ns
سیستم‌های خاک‌ورزی × زیرشکن Tillage × Subsoiling	2	0.0007 ns	0.0011 **	0.0001 ns	0.0000 ns	0.005	0.015
خطای کرت فرعی Split-plot error	6	0.0012	0.0001	0.0012	0.0000	0.006	0.016
نوع محصول Crop	1	0.4053 ns	0.1517 *	0.4138 *	0.0700 *	2.285 *	6.769 *
سیستم‌های خاک‌ورزی × نوع محصول Tillage × Crop	2	0.0040 ns	0.0005 ns	0.0003 ns	0.0015 ns	0.016 ns	0.019 ns
زیرشکن × نوع محصول Subsoiling × Crop	1	0.0001 ns	0.0008 ns	0.0000 ns	0.0002 ns	0.003 ns	0.010 ns
سیستم‌های خاک‌ورزی × زیرشکن × نوع محصول Tillage × Subsoiling × Crop	2	0.0037 ns	0.0004 ns	0.0003 ns	0.0001 ns	0.003 ns	0.009 ns
خطا Error	12	0.002	0.0001	0.002	0.0001	0.002	0.007
درصد ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	-	2.56	3.15	9.43	3.16	5.70	5.56

** و * به ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.

* and ** indicate significance at the 5% and 1% probability levels, respectively; ns = non-significant.

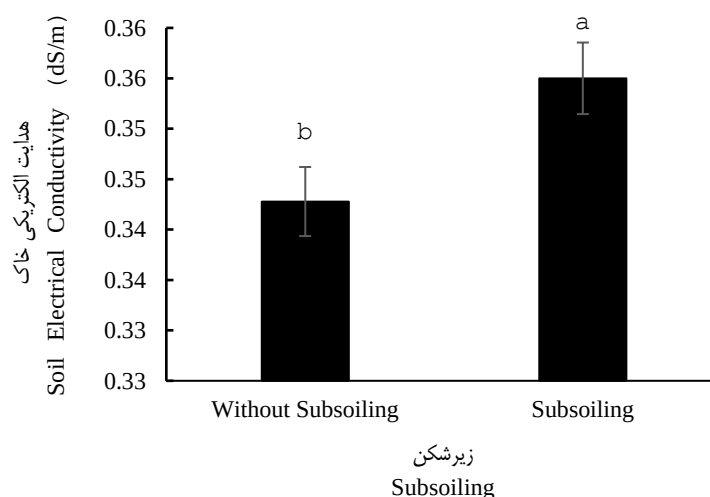


شکل ۱- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر هدایت الکتریکی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 1- Effect of tillage systems on soil electrical conductivity in durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۲- اثر استفاده از زیرشکن بر هدایت الکتریکی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

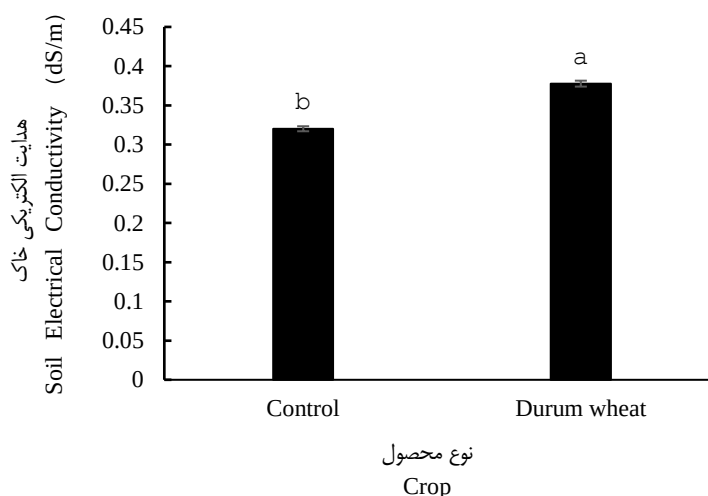
Figure 2- Effect of subsoiling on soil electrical conductivity in durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد (بدون کشت) بود (شکل ۳). به‌طوری‌که مقدار هدایت الکتریکی خاک در تیمار گندم دوروم ۰/۳۸ دسی‌زیمنس بر متر و در تیمار شاهد حدود ۰/۳۲ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری شد. این تغییر اندک نیز که کاملاً در محدوده غیرشور قرار دارد، می‌تواند به ترشحات ریزوسفری ریشه و تغییرات جزئی پتانسیل شیمیایی در ناحیه اطراف ریشه نسبت داده شود که به‌طور موقت حلالیت برخی یون‌ها را در فاز محلول خاک افزایش می‌دهد (Dakora & Phillips, 2002; Hinsinger et al., 2009).

با وجود معنی‌داری آماری، این اختلاف نظر کاربردی بسیار ناچیز بوده و نشان‌دهنده عدم تغییر در وضعیت شوری خاک است. این افزایش جزئی احتمالاً ناشی از بهبود کوتاه‌مدت تخلخل و تهویه پس از شکستن لایه‌های متراکم زیر سطحی است که می‌تواند انحلال موضعی برخی کربنات‌ها یا نمک‌های محلول را در خاک‌های آهکی تسهیل کند (Hamza & Anderson, 2005).

نتایج نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر هدایت الکتریکی خاک داشت. هدایت الکتریکی خاک در تیمار گندم دوروم



شکل ۳- اثر نوع محصول بر هدایت الکتریکی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 3- Effect of crop on soil electrical conductivity in durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

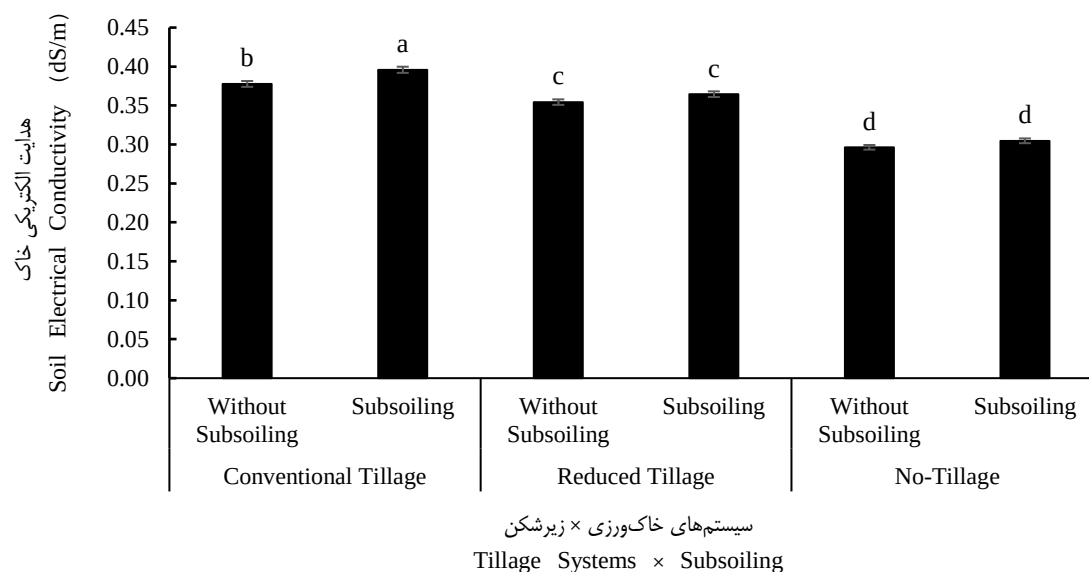
احتمال پنج درصد بر این صفت معنی‌دار شدند و باقی اثرات ساده و متقابل معنی‌دار نبودند (جدول ۲). نتایج نشان داد که سیستم خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر درصد رس قابل‌انتشار در آب داشت (شکل ۵). بیشترین مقدار رس قابل انتشار در آب در تیمار خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد که به میزان ۰/۶۰ درصد اندازه‌گیری گردید. در مقابل، مقدار رس قابل انتشار در آب در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی به ترتیب به میزان ۰/۵۰ و ۰/۴۸ درصد، مشاهده شدند (شکل ۵). این نتایج نشان می‌دهد که کاهش شدت خاک‌ورزی موجب کاهش رس قابل انتشار در آب و بهبود پایداری فیزیکی خاک شده است. افزایش رس قابل انتشار در آب در سیستم خاک‌ورزی مرسوم نشان‌دهنده تخریب ساختمان خاک و ناپایداری خاکدانه‌ها در اثر به هم ریختگی شدید خاک است. عملیات شخم مکرر با گسستن پیوندهای بین خاکدانه‌ها، زمینه پراکنش رس در آب را فراهم می‌کند. در مقابل، سیستم‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی با حفظ ساختمان خاک، افزایش ماده آلی و تقویت پیوندهای زیستی و شیمیایی بین ذرات، موجب کاهش پراکنش رس و بهبود پایداری خاکدانه‌ها شدند. این نتایج بیانگر نقش مؤثر خاک‌ورزی حفاظتی در ارتقای کیفیت فیزیکی خاک در شرایط دیم و خاک‌های آهکی منطقه است (He et al., 2021).

نتایج نشان داد که اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و زیرشکن بر هدایت الکتریکی خاک معنی‌دار بود (شکل ۴). بیشترین مقدار هدایت الکتریکی خاک مربوط به تیمار خاک‌ورزی مرسوم همراه با زیرشکن بود که به میزان ۰/۴۰ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری گردید (شکل ۴). پس از آن، تیمار خاک‌ورزی مرسوم بدون زیرشکن به میزان ۰/۳۸ دسی‌زیمنس بر متر قرار داشت. در سیستم کم‌خاک‌ورزی، مقادیر هدایت الکتریکی خاک در هر دو سطح زیرشکن و بدون زیرشکن کاهش یافت. همچنین کمترین مقادیر هدایت الکتریکی خاک مربوط به سیستم بی‌خاک‌ورزی با و بدون زیرشکن (۰/۳۰ دسی‌زیمنس بر متر) بود (شکل ۴).

بررسی این روند نشان می‌دهد که در سیستم خاک‌ورزی مرسوم، به هم خوردگی شدیدتر خاک به همراه اعمال زیرشکن، پتانسیل آزادسازی و جابجایی املاح در لایه سطحی را کمی افزایش داده است، در حالی که در سیستم‌های حفاظتی (به‌ویژه بی‌خاک‌ورزی)، ثبات ساختاری خاک مانع از تغییرات محسوس در هدایت الکتریکی شده است (Liu et al., 2024). با این حال، دامنه تمامی این تغییرات در کلیه تیمارها بسیار محدود بوده و مقادیر ثبت شده بسیار پایین‌تر از آستانه بحرانی شوری خاک قرار دارند.

رس قابل انتشار در آب

بررسی تأثیر تیمارهای آزمایشی بر مقدار رس قابل انتشار در آب نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول در سطح



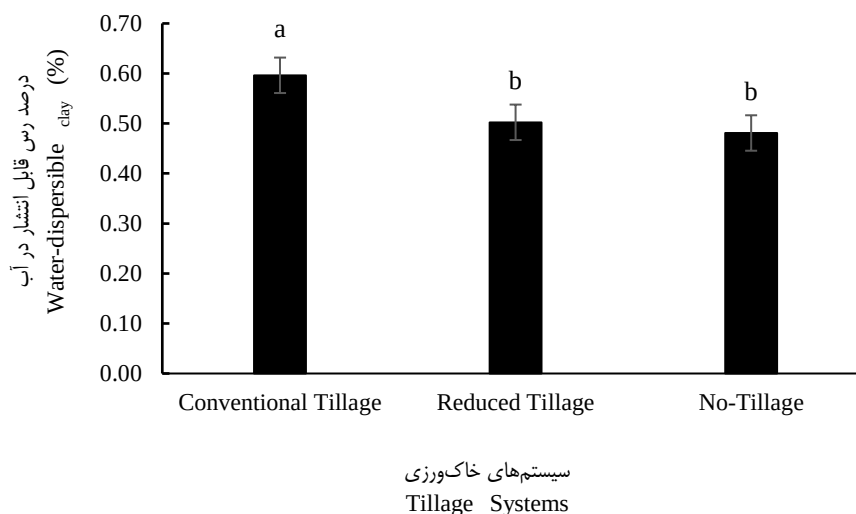
شکل ۴- اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و زیرشکن بر هدایت الکتریکی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 4- Interaction effects of tillage systems and subsoiling on soil electrical conductivity under durum wheat cultivation.
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

قرار داشت. کاهش رس قابل انتشار در آب در تیمار گندم دوروم نسبت به شاهد را می‌توان به نقش ریشه و فرآیندهای ریزوسفری در بهبود پایداری خاکدانه‌ها نسبت داد.

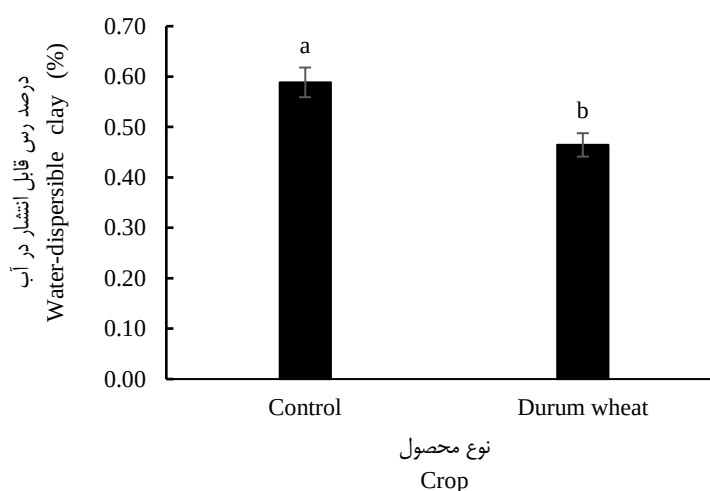
نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر درصد رس قابل انتشار در آب داشت (شکل ۶). بیشترین مقدار رس قابل انتشار در آب در تیمار شاهد (بدون کشت) به میزان ۰/۵۹ درصد مشاهده شد. در مقابل، تیمار گندم دوروم (۰/۴۶ درصد)



شکل ۵- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر درصد رس قابل انتشار در آب در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 5- Effect of tillage systems on water-dispersible clay content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۶- اثر نوع محصول بر درصد رس قابل انتشار در آب در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 6- Effect of crop on water-dispersible clay content under durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

خاکدانه‌ها منجر می‌شود (Almagro et al., 2021). در مقابل، خاک ورزی مرسوم با تخریب پیوندهای بین ذرات و گسستن خاکدانه‌های درشت، موجب کاهش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها شده است. قرارگیری کم‌خاک‌ورزی در حد واسطه نشان می‌دهد که کاهش شدت عملیات خاک‌ورزی می‌تواند بخشی از اثرات منفی خاک‌ورزی مرسوم بر ساختمان خاک را تعدیل کند (Modiba et al., 2025). این نتایج، همراه با کاهش رس قابل‌انتشار در آب، نشان‌دهنده بهبود پایداری ساختمان خاک در سیستم‌های حفاظتی است. هر چند تغییرات هدایت الکتریکی در تمامی تیمارها بسیار ناچیز و در محدوده غیرشور (کمتر از ۰/۴ دسی‌زیمنس بر متر) باقی ماند، اما به نظر می‌رسد ثبات فیزیکی خاک در این سیستم‌ها بیشتر متأثر از افزایش کربن آلی و کاهش دست‌خوردگی مکانیکی باشد تا تغییر در غلظت یا نوع کاتیون‌های محلول. در واقع، در مقادیر بسیار پایین هدایت الکتریکی، نقش پیونددهنده‌های آلی در مهار انتشار رس پررنگ‌تر از اثرات الکتروشیمیایی کاتیون‌ها است (PeeyushSharma et al., 2016). این امر نقش کلیدی خاک‌ورزی حفاظتی را در ارتقای کیفیت فیزیکی خاک در شرایط دیم و اقلیم سرد و خشک منطقه مورد مطالعه تأیید می‌کند.

نتایج نشان داد که کاربرد زیرشکن تأثیر معنی‌داری بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها داشت (شکل ۸). بیشترین و کمترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به ترتیب در تیمار بدون زیرشکن به میزان ۰/۴۰ میلی‌متر و تیمار زیرشکن به میزان ۰/۳۸ میلی‌متر مشاهده شدند (شکل ۸). کاهش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در لایه سطحی خاک تحت تیمار زیرشکن را نمی‌توان به اختلاط مستقیم مکانیکی ناشی از

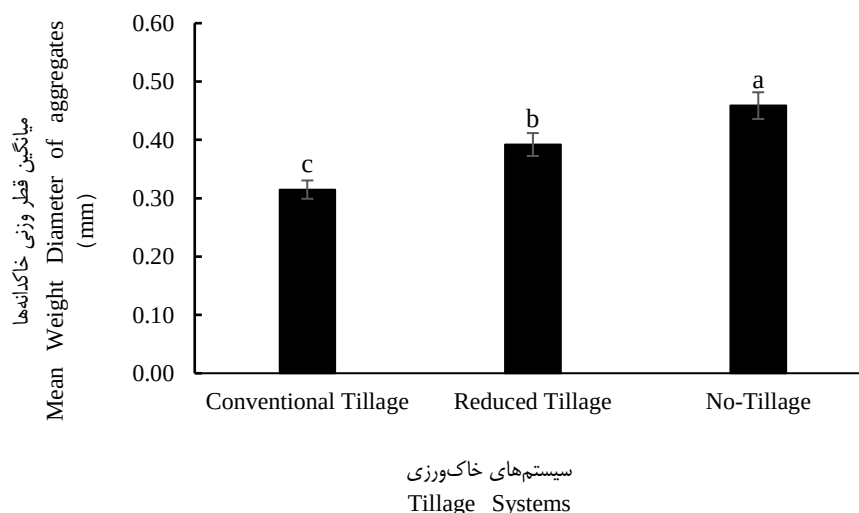
رشد ریشه و ترشح ترکیبات آلی، همراه با افزایش فعالیت میکروبی، موجب تقویت پیوندهای بین ذرات خاک و کاهش پراکنش رس در آب می‌شود. در مقابل، نبود پوشش گیاهی در تیمار شاهد باعث تضعیف ساختمان خاک و افزایش حساسیت آن به پراکنش ذرات رسی شده است. این نتایج بر اهمیت حضور گیاه در بهبود کیفیت فیزیکی خاک، به‌ویژه در سیستم‌های دیم، تأکید دارد (Kool et al., 2019; Traoré et al., 2000).

میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی، استفاده از زیرشکن و نوع محصول در سطح احتمال پنج درصد بر میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها معنی‌دار شدند و اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر این صفت معنی‌دار نبودند (جدول ۲). نتایج نشان داد که سیستم‌های خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها داشتند (شکل ۷). بیشترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار بی‌خاک‌ورزی به میزان ۰/۴۶ میلی‌متر مشاهده شد. کمترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها مربوط به خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۰/۳۱ میلی‌متر بود (شکل ۷). افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در سیستم بی‌خاک‌ورزی بیانگر بهبود پایداری ساختمان خاک در اثر کاهش به هم ریختگی مکانیکی و حفظ پیوستگی خاکدانه‌ها است (Six et al., 2004). عدم برهم‌زدن خاک، همراه با باقی‌ماندن بقایای گیاهی در سطح خاک، شرایط مناسبی برای تجمع ماده آلی، افزایش فعالیت زیستی و تشکیل پیوندهای پایدار بین خاکدانه‌ها فراهم می‌کند که در نهایت به افزایش اندازه و پایداری

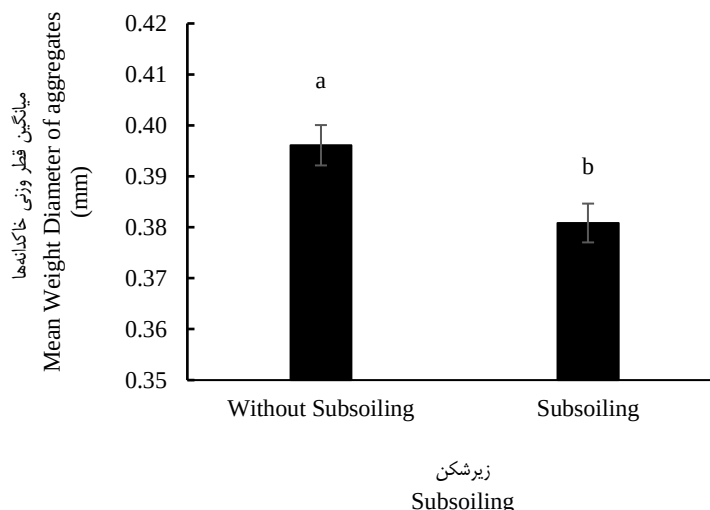
خاک مانع از تخریب خاکدانه‌های درشت سطحی گردید. با این حال، این کاهش جزیی در میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها لزوماً به معنای افت قطعی کیفیت ساختاری خاک نیست، چرا که زیرشکن با رفع لایه‌های متراکم در عمق خاک، نفوذپذیری و رشد ریشه را بهبود می‌بخشد که در بلندمدت می‌تواند از طریق تحریک فعالیت‌های زیستی و ترشحات ریشه‌ای به بازسازی ساختمان خاک کمک کند (Raper, 2005; Six et al., 2004).

شاخه زیرشکن نسبت داد، زیرا این عملیات در اعماق زیرسطحی اعمال می‌شود و نمونه‌برداری از لایه سطحی صورت گرفته است. در واقع، این کاهش بیشتر ناشی از تردد ماشین‌آلات سنگین و تراکتورهای با قدرت بالا برای کشیدن زیرشکن است که اعمال نیروی فشاری و برشی بر سطح خاک را افزایش داده و منجر به متلاشی شدن و گسستن خاکدانه‌های درشت‌تر سطحی شده است. در مقابل، در تیمار بدون زیرشکن، عدم تردد این ماشین‌آلات سنگین و حفظ پیوستگی ساختمان



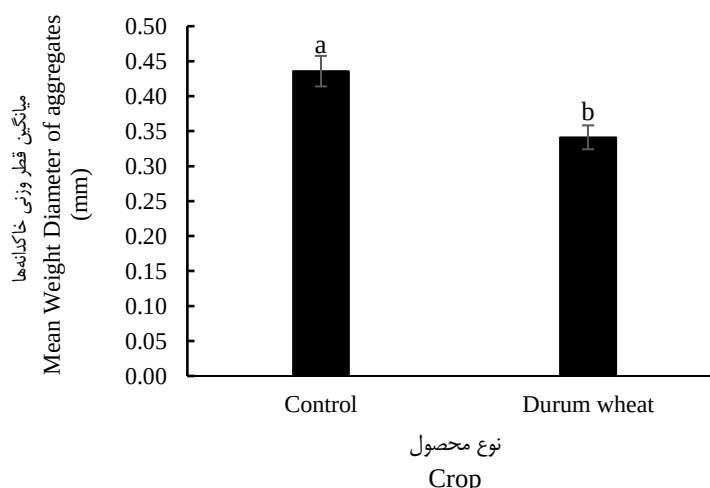
شکل ۷- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در کشت گندم دوروم
(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 7- Effect of tillage systems on the mean weight diameter of soil aggregates under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۸- استفاده از زیرشکن بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در کشت گندم دوروم
(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 8- Effect of subsoiling on the mean weight diameter of soil aggregates under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۹- اثر نوع محصول بر میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 9- Effect of crop type on the mean weight diameter of soil aggregates under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

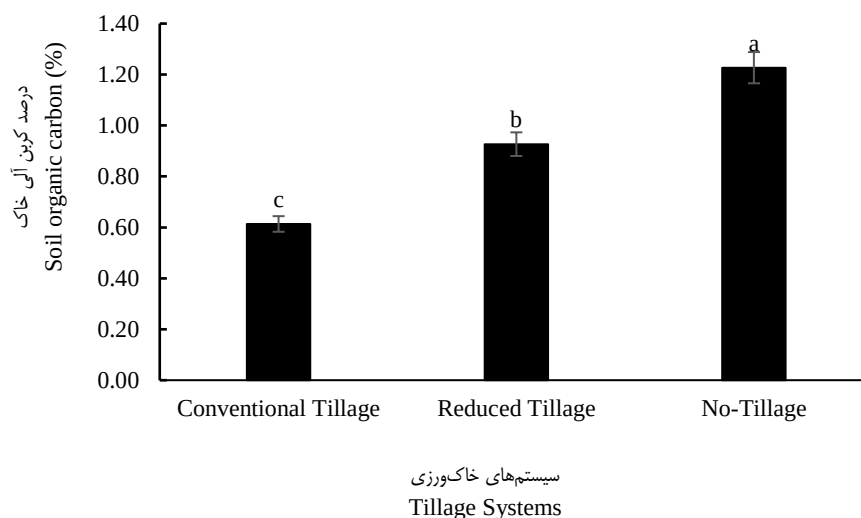
مربوط به خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۰/۶۱ درصد بود. کم‌خاک‌ورزی با کربن آلی به میزان ۰/۹۳ درصد در بین این دو تیمار قرار داشت (شکل ۱۰). همچنین بیشترین مقدار ماده آلی خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی به میزان ۲/۱۰ درصد اندازه‌گیری شد. کمترین مقدار ماده آلی در خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۱/۰۵ درصد بدست آمد. همچنین کم‌خاک‌ورزی با ماده آلی به میزان ۱/۵۹ درصد در بین این دو تیمار قرار داشت (شکل ۱۱).

افزایش ماده آلی و کربن آلی خاک در سیستم بی‌خاک‌ورزی نشان می‌دهد که کاهش برهم‌خوردگی مکانیکی خاک و باقی‌ماندن بقایای گیاهی در سطح، شرایط مناسب‌تری برای تجمع ترکیبات آلی فراهم کرده است (Blanco-Canqui & Lal, 2008; Franzluebbers, 2002). در این شرایط، کاهش اختلاط بقایا با خاک و پایداری بیشتر خاکدانه‌ها می‌تواند سرعت معدنی‌شدن ماده آلی را کاهش داده و از کربن آلی در برابر تجزیه میکروبی محافظت کند (Shokati, 2014). در مقابل، خاک‌ورزی مرسوم با تخریب خاکدانه‌ها و افزایش تهویه، تجزیه بقایای آلی را تسریع کرده و موجب کاهش ماده آلی و کربن آلی خاک می‌شود. قرارگیری کم‌خاک‌ورزی در حد واسطه نیز نشان می‌دهد که کاهش شدت خاک‌ورزی می‌تواند بخشی از این اثرات را تعدیل کند. در مجموع، نتایج این پژوهش بر نقش مثبت سیستم‌های حفاظتی، به‌ویژه بی‌خاک‌ورزی، در حفظ کربن آلی خاک دلالت دارد.

نتایج نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها داشت (شکل ۹). بیشترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار شاهد (بدون کشت) به میزان ۰/۴۴ میلی‌متر مشاهده شد. کاهش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار گندم دوروم (۰/۳۴ میلی‌متر) نسبت به شاهد، لزوماً به معنای تخریب خاکدانه‌های درشت نیست؛ بلکه می‌تواند نشان‌دهنده بازآرایی ساختمان خاک در ناحیه ریزوسفر و جابه‌جایی به سمت خاکدانه‌های کوچک‌تر باشد. فعالیت ریشه، ترشحات آلی و تحریک جمعیت‌های میکروبی ممکن است ضمن افزایش پایداری خاکدانه‌ها، به تشکیل و تثبیت خاکدانه‌های ریزتر کمک کند (Baranian Kabir et al., 2017). در مقابل، در تیمار شاهد به دلیل نبود ریشه و اختلال کمتر، خاکدانه‌های موجود حفظ شده‌اند و بنابراین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها بالاتر باقی مانده است. از این رو، تفسیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها باید در کنار شاخص‌های پایداری دیگر، مانند رس قابل‌انتشار در آب و کربن آلی، انجام شود (Amelung et al., 2024).

کربن و ماده آلی خاک

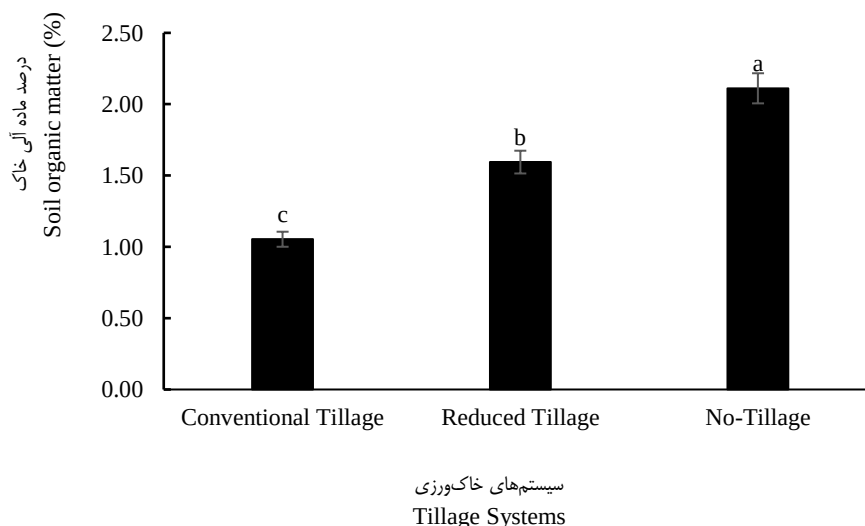
بررسی تأثیر تیمارهای آزمایشی بر کربن و ماده آلی خاک نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول در سطح احتمال پنج درصد بر این صفات معنی‌دار شدند و باقی‌اثرات ساده و متقابل معنی‌دار نبودند (جدول ۲). نتایج نشان داد که سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر کربن آلی و ماده آلی خاک داشتند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). بیشترین مقدار کربن آلی خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی به میزان ۱/۲۳ درصد مشاهده شد. در حالی که کمترین مقدار کربن آلی



شکل ۱۰- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر مقدار کربن آلی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 10- Effect of tillage systems on soil organic carbon content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



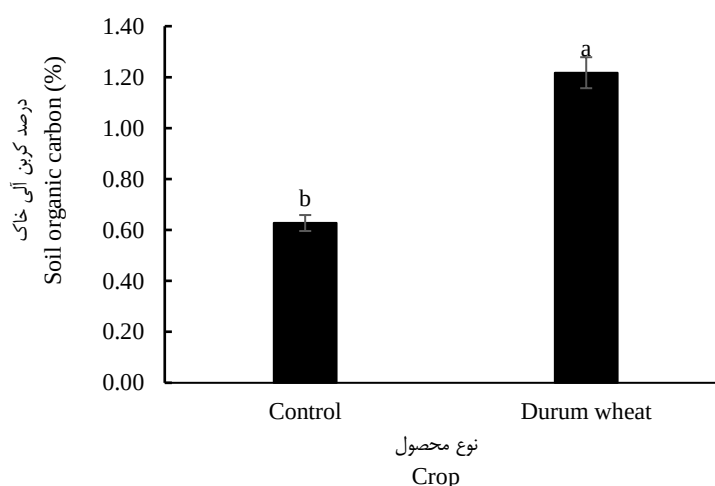
شکل ۱۱- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر مقدار ماده آلی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 11- Effect of tillage systems on soil organic matter content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

شاهد به میزان ۰/۶۳ درصد مشاهده شد (شکل ۱۲). الگوی مشابهی برای ماده آلی خاک نیز مشاهده شد. به‌طوری‌که بیشترین و کمترین مقدار ماده آلی در تیمار گندم دوروم به‌ترتیب، به میزان ۲/۰۹ و ۱/۰۸ درصد مشاهده شد (شکل ۱۳).

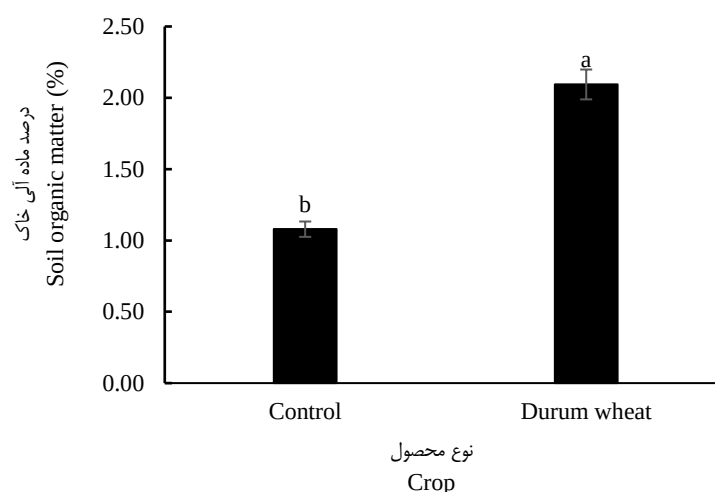
نتایج نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر کربن آلی و ماده آلی خاک داشت. همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار کربن آلی خاک در تیمار کشت گندم دوروم به میزان ۱/۲۲ درصد بدست آمد، در حالی‌که کمترین مقدار آن در تیمار



شکل ۱۲- اثر نوع محصول بر مقدار کربن آلی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 12- Effect of crop type on soil organic carbon content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۱۳- اثر نوع محصول بر مقدار ماده آلی خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 13- Effect of crop type on soil organic matter content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

و تقویت فرآیند تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها، به تشکیل خاکدانه‌های پایدار کمک می‌کند؛ فرایندی که می‌تواند موجب حفاظت فیزیکی کربن آلی درون خاکدانه‌ها و کاهش سرعت تجزیه آن شود (Thotakuri *et al.*, 2025; Tou *et al.*, 2024). در مقابل، در تیمار شاهد به دلیل نبود پوشش گیاهی و عدم ورود مداوم ترکیبات آلی ناشی از فعالیت ریشه‌ها، ورودی کربن به خاک محدود بوده و در نتیجه مقادیر ماده آلی و کربن آلی خاک کمتر مشاهده شد (Kuznyakov & Domanski, 2000).

افزایش کربن آلی و ماده آلی خاک در تیمار کشت گندم دوروم را می‌توان به نقش سیستم ریشه‌ای گیاه و فرایندهای ریزوسفری نسبت داد. رشد و توسعه ریشه‌ها در طول دوره رشد گیاه باعث ورود مقادیر قابل توجهی از ترکیبات آلی به خاک می‌شود که این ترکیبات شامل ترشحات ریشه، سلول‌های ریشه‌ای مرده و بقایای ریشه هستند (Cui *et al.*, 2023). این مواد به عنوان یکی از منابع مهم کربن برای خاک عمل کرده و می‌توانند موجب افزایش تدریجی ذخایر ماده آلی خاک شوند. علاوه بر این، فعالیت ریشه‌ها با تحریک فعالیت ریزجانداران خاک

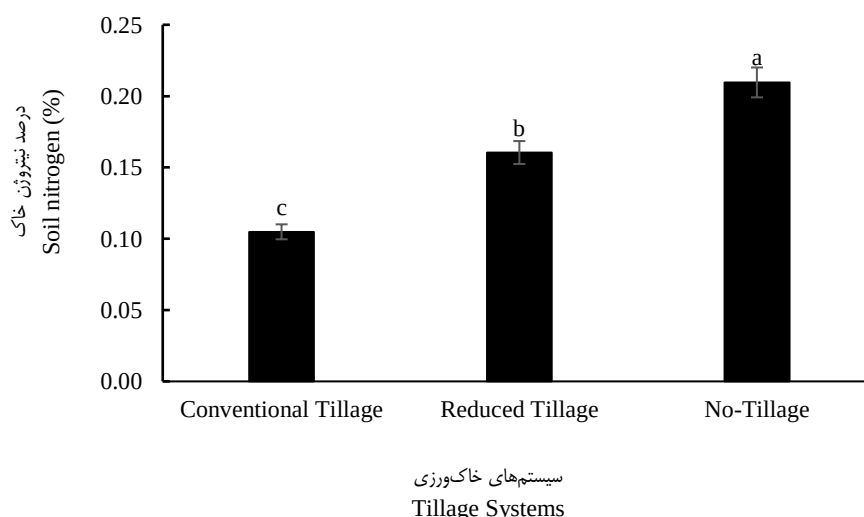
نیتروژن خاک

بررسی تأثیر تیمارهای آزمایشی بر مقدار نیتروژن خاک نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی، نوع محصول و اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار نیتروژن خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند و باقی اثرات ساده و متقابل معنی‌دار نشدند (جدول ۳). نتایج نشان داد که سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر نیتروژن کل خاک داشتند. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار نیتروژن کل خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی و به میزان ۰/۲۱ درصد بدست آمد. پس از آن، تیمار کم‌خاک‌ورزی به میزان ۰/۱۶ درصد قرار گرفت. کمترین مقدار نیتروژن کل نیز در تیمار خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۰/۱۰ درصد مشاهده شد.

افزایش نیتروژن کل خاک در سیستم بی‌خاک‌ورزی را می‌توان به تجمع بیشتر بقایای گیاهی در سطح خاک و کاهش برهم‌خوردگی مکانیکی خاک نسبت داد. در این شرایط، بقایای گیاهی به تدریج تجزیه شده و موجب افزایش ورود ترکیبات آلی و نیتروژن به خاک می‌شوند (Paltineanu et al., 2024). همچنین، پایداری بیشتر خاکدانه‌ها در سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی می‌تواند با حفاظت فیزیکی ترکیبات آلی حاوی نیتروژن درون خاکدانه‌ها، از معدنی‌شدن سریع آن‌ها بکاهد (Karami et al., 2012). در مقابل، در سیستم خاک‌ورزی مرسوم، برهم‌زدن شدیدتر خاک و افزایش تهویه معمولاً تجزیه ماده آلی و

معدنی‌شدن ترکیبات آلی را تسریع می‌کند. این فرآیند ممکن است دسترسی کوتاه‌مدت نیتروژن معدنی را افزایش دهد، اما در صورت فراهم بودن شرایط محیطی، می‌تواند زمینه را برای افزایش برخی مسیرهای اتلاف نیتروژن، مانند آبشویی نیترات یا دنیتریفیکاسیون، نیز فراهم سازد. با این حال، از آنجاکه در این مطالعه تنها نیتروژن کل خاک در پایان فصل اندازه‌گیری شده است، قضاوت قطعی درباره سازوکارهای اتلاف نیتروژن یا تغییرات بلندمدت ذخایر آن امکان‌پذیر نیست. بنابراین، نتایج این پژوهش صرفاً نشان می‌دهد که کاهش شدت خاک‌ورزی، دست‌کم در کوتاه‌مدت، می‌تواند در جهت حفظ نیتروژن خاک و پایداری حاصلخیزی مؤثر باشد (Angon et al., 2023).

نتایج نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر نیتروژن کل خاک داشت. همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار نیتروژن کل خاک در تیمار کشت گندم دوروم (۰/۲۱ درصد) و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد (۰/۱۱ درصد) به‌دست آمد. افزایش نیتروژن کل خاک در تیمار گندم دوروم را می‌توان به نقش سیستم ریشه‌ای گیاه و فرآیندهای ریزوسفری نسبت داد (Kuzuyakov & Xu, 2013). هرچند گیاه در طول فصل رشد بخشی از نیتروژن معدنی خاک را جذب می‌کند، اما حضور ریشه‌ها به‌طور هم‌زمان موجب ورود ترکیبات آلی حاوی نیتروژن به خاک از طریق ترشحات ریشه، بقایای ریشه و سلول‌های تجزیه‌شده ریشه‌ای می‌شود (Hayat et al., 2017).



شکل ۱۴- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر مقدار نیتروژن خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 14- Effect of tillage systems on soil nitrogen content under durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر خاک‌ورزی، زیرشکن و نوع محصول بر مقدار نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک، تنفس پایه خاک، تنفس ناشی از سوپسترا و کربن زیست توده میکروبی

Table 3- Analysis of variance results for the effects of tillage, subsoiling, and crop type on soil nitrogen, phosphorus, and potassium contents, basal soil respiration, substrate-induced respiration, and microbial biomass carbon

منابع تغییرات Source of variation	df	میانگین مربعات Mean square					
		نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K	تنفس پایه خاک BR	تنفس ناشی از سوپسترا SIR	کربن زیست توده میکروبی MBC
بلوک Block	2	0.00002	0.25	114.3	6.99	2179.00	4.47
سیستم‌های خاک‌ورزی Tillage system	2	0.03295 **	192.13 **	226896.6 **	14048.39 **	103994.33 **	92796.53 **
خطای کرت اصلی Whole-plot error	4	0.00001	0.15	253.3	2.55	2016.21	11.07
زیرشکن Subsoiling	1	0.00006 ns	1.10 ns	10.0 ns	4.00 ns	2721.36 ns	38.50 ns
سیستم‌های خاک‌ورزی × زیرشکن Tillage × Subsoiling	2	0.00007 ns	0.07 ns	317.2 ns	2.11	1928.11 ns	33.72 ns
خطای کرت فرعی Split-plot error	6	0.00006	0.25	639.5	8.66	351.19	10.76
نوع محصول Crop	1	0.09392 **	1.03 ns	167690.3 **	11990.74 **	7310.25 **	3066.73 **
سیستم‌های خاک‌ورزی × نوع محصول Tillage × Crop	2	0.01634 **	26.15 **	4726.8 **	943.60 **	9114.33 **	12914.41 **
زیرشکن × نوع محصول Subsoiling × Crop	1	0.00012 ns	0.15 ns	448.0 ns	0.89 ns	506.25 ns	8.12 ns
سیستم‌های خاک‌ورزی × زیرشکن × نوع محصول Tillage × Subsoiling × Crop	2	0.00010 ns	0.07 ns	318.4 ns	14.46 ns	1027.00 ns	16.84 ns
خطا Error	12	0.00002	0.32	295	3.23	1250.44	14.73
درصد ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	-	3.37	4.09	2.81	1.02	7.84	1.80

** و * به ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.

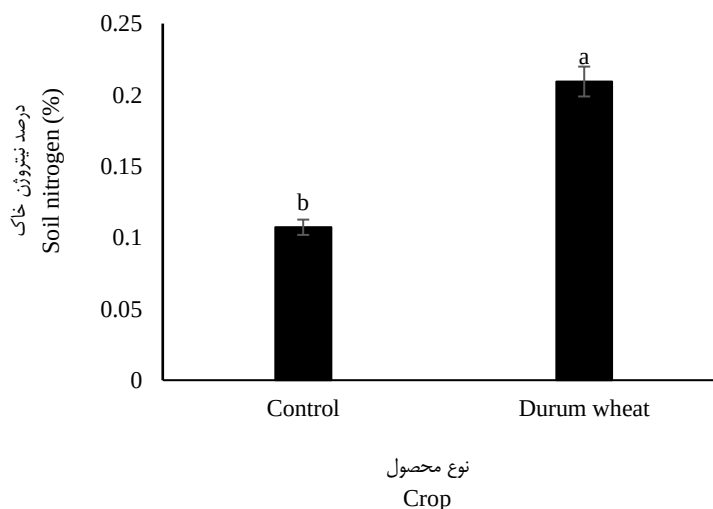
** and * indicate significance at the 5% and 1% probability levels, respectively; ns = non-significant.

مقادیر نیتروژن کل در تیمارهای شاهد در هر سه سیستم خاک‌ورزی کمتر بود. به طوری که تیمار شاهد در کم‌خاک‌ورزی و شاهد در بی‌خاک‌ورزی به ترتیب به میزان ۰/۱۲ و ۰/۱۲ درصد اندازه‌گیری شدند (شکل ۱۶). کمترین مقدار نیتروژن کل خاک نیز در تیمار شاهد در خاک‌ورزی مرسوم با میانگین حدود ۰/۰۸ درصد مشاهده شد.

افزایش نیتروژن کل خاک در ترکیب سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی با کشت گندم دوروم را می‌توان به تجمع بیشتر بقایای گیاهی، کاهش برهم‌خوردگی مکانیکی خاک و افزایش فعالیت زیستی در ناحیه ریزوسفر نسبت داد. در سیستم بی‌خاک‌ورزی، بقایای گیاهی در سطح خاک باقی مانده و به تدریج تجزیه می‌شوند که این امر موجب افزایش ورود ترکیبات آلی حاوی نیتروژن به خاک می‌شود (Pecci Canisares et al., 2021).

علاوه بر این، تحریک فعالیت ریزجانداران در ناحیه ریزوسفر می‌تواند به افزایش تثبیت زیستی و نگهداشت نیتروژن در قالب زیست توده میکروبی و ترکیبات آلی خاک کمک کند. بنابراین، برآیند حضور گیاه در این پژوهش، با وجود برداشت نیتروژن توسط گیاه، به افزایش نیتروژن کل خاک نسبت به تیمار شاهد منجر شد. در مقابل، در تیمار شاهد به دلیل نبود پوشش گیاهی و عدم ورود پیوسته مواد آلی و ترکیبات ریشه‌ای به خاک، مقدار نیتروژن کل خاک کمتر بود (Bardgett & Van Der Putten, 2014; Kuzyakov & Xu, 2013).

نتایج نشان داد که اثر متقابل سیستم خاک‌ورزی و نوع محصول بر نیتروژن کل خاک معنی‌دار بود. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار نیتروژن کل خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی همراه با کشت گندم دوروم به میزان ۰/۳۰ درصد اندازه‌گیری گردید. در مقابل،



شکل ۱۵- اثر نوع محصول بر مقدار نیتروژن خاک در کشت گندم دوروم

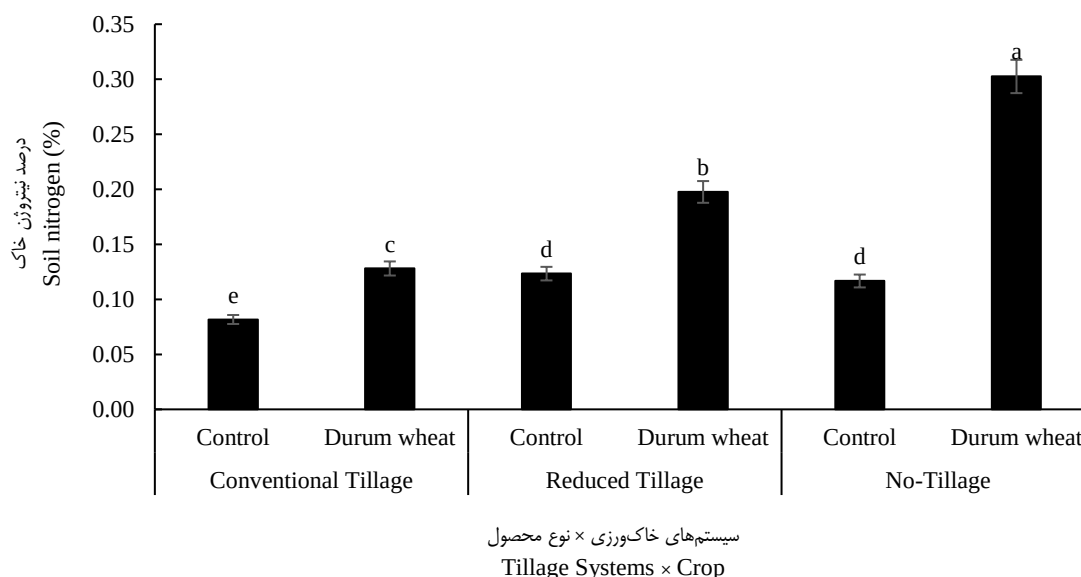
(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 15- Effect of crop type on soil nitrogen content under durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

آبشویی و دنیتریفیکاسیون از دسترس خارج می‌شود. بنابراین ترکیب سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی با کشت گیاه می‌تواند نقش مؤثری در افزایش و پایداری ذخایر نیتروژن خاک در سامانه‌های زراعی ایفا کند (Angon et al., 2023).

همچنین پایداری بیشتر خاکدانه‌ها در این سیستم می‌تواند از طریق حفاظت فیزیکی مواد آلی، به حفظ ترکیبات آلی حاوی نیتروژن در خاک کمک کند (Sekaran et al., 2021). در مقابل، در خاک‌ورزی مرسوم به دلیل برهم‌زدن شدید خاک و افزایش تهویه، سرعت تجزیه ماده آلی افزایش یافته و بخشی از نیتروژن خاک از طریق فرآیندهایی مانند



شکل ۱۶- اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار نیتروژن خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 16- Interaction effect of tillage systems and crop type on soil nitrogen content under durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

فسفر خاک

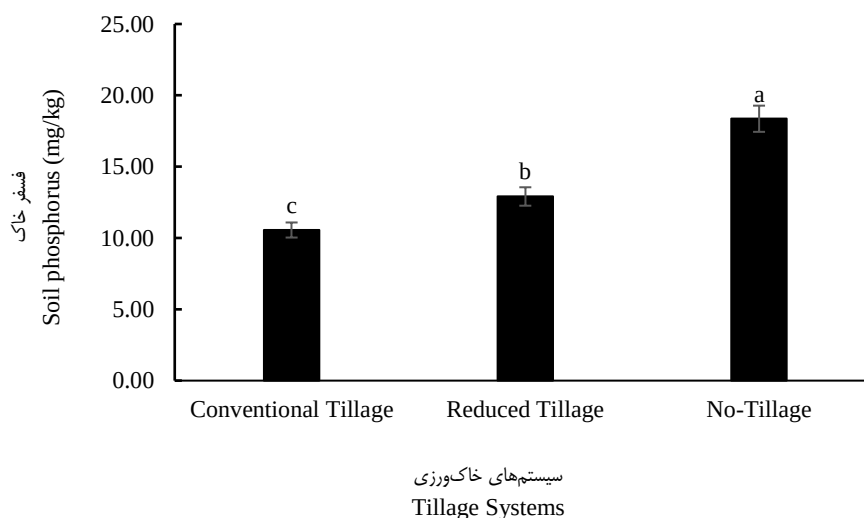
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی و اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار فسفر خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند و باقی اثرات ساده و متقابل معنی‌دار نشدند (جدول ۳).

نتایج نشان داد که سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر فسفر قابل دسترس خاک داشتند. همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار فسفر قابل دسترس خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی به میزان ۱۸/۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. کمترین مقدار فسفر در تیمار خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۱۰/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد. افزایش فسفر قابل دسترس در سیستم بی‌خاک‌ورزی را می‌توان به تجمع بقایای گیاهی در سطح خاک و افزایش تدریجی ماده آلی نسبت داد. تجزیه بقایای گیاهی و ترکیبات آلی می‌تواند از طریق تولید اسیدهای آلی و کلاته کردن عناصر، به افزایش قابلیت دسترسی فسفر در خاک کمک کند. علاوه بر این، کاهش برهم‌خوردگی مکانیکی خاک در سیستم‌های حفاظتی موجب پایداری بیشتر خاکدانه‌ها و حفظ ریزمحیط‌های زیستی مناسب برای فعالیت ریزجانداران حل‌کننده فسفر می‌شود (Kataria et al., 2024).

در مقابل، در سیستم خاک‌ورزی مرسوم، اختلاط شدیدتر خاک و

تسریع تجزیه ماده آلی می‌تواند از تجمع ترکیبات آلی و زیستی مؤثر در پویایی فسفر بکاهد. از آنجاکه همه تیمارها در خاک آهکی انجام شدند و تغییرات pH نیز محدود بود، تفاوت مشاهده‌شده در فسفر قابل دسترس را نمی‌توان صرفاً به تغییر در واکنش‌های شیمیایی کلسیم-فسفر نسبت داد. به نظر می‌رسد این اختلاف بیشتر ناشی از اثرات مدیریتی خاک‌ورزی بر توزیع بقایا، ماده آلی، فعالیت ریزوسفری و شرایط میکروبی خاک باشد؛ عواملی که ممکن است به بهبود گردش فسفر و کاهش نسبی اثرات تثبیت آن کمک کرده باشند. بنابراین، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاهش شدت خاک‌ورزی و استفاده از سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی، دست کم در کوتاه‌مدت، می‌تواند به بهبود فسفر قابل دسترس خاک در شرایط اقلیمی سرد و خشک کمک کند (Ding et al., 2025).

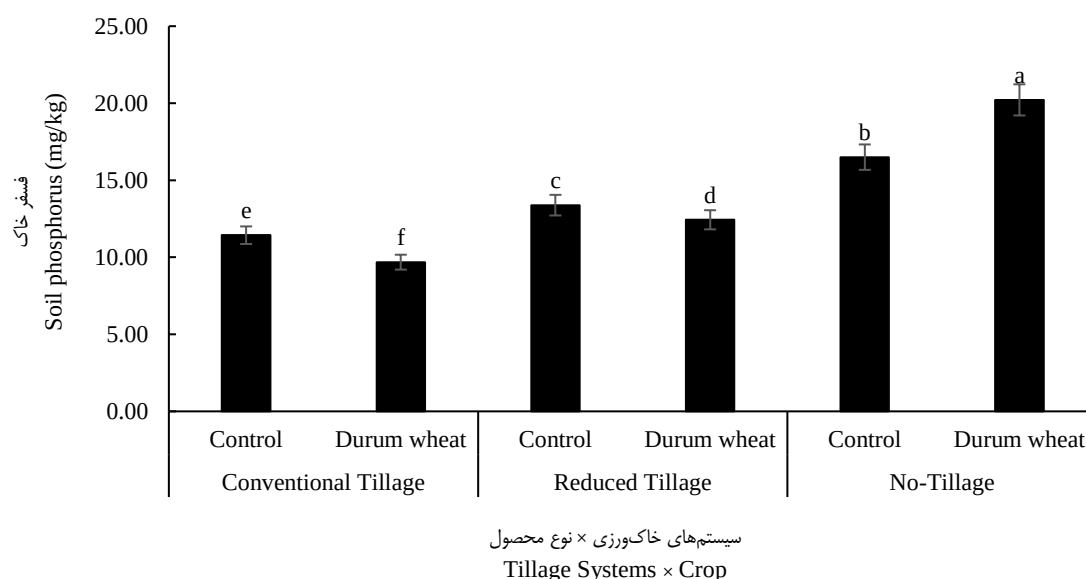
نتایج نشان داد که اثر متقابل سیستم خاک‌ورزی و نوع محصول بر فسفر قابل دسترس خاک معنی‌دار بود. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، بالاترین مقدار فسفر قابل دسترس خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی همراه با کشت گندم دوروم به میزان ۲۰/۲۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد. کمترین مقدار فسفر قابل دسترس خاک در تیمار خاک‌ورزی مرسوم و تحت کشت گندم دوروم به میزان ۹/۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد (شکل ۱۸).



شکل ۱۷- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر مقدار فسفر خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 17- Effect of tillage systems on soil phosphorus content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's)



شکل ۱۸- اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار فسفر خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

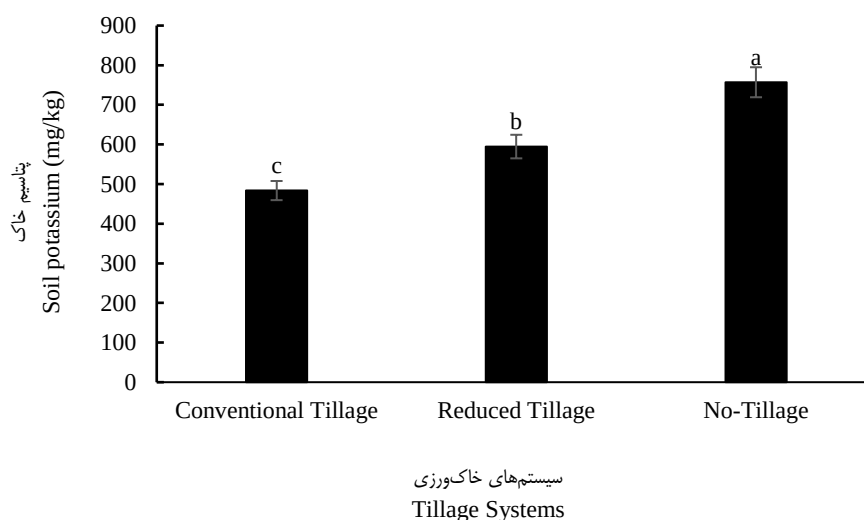
Figure 18- Interaction effect of tillage systems and crop type on soil phosphorus content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

پتاسیم خاک

بررسی تأثیر تیمارهای آزمایشی بر مقدار پتاسیم خاک نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی، نوع محصول و اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار پتاسیم خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند و باقی اثرات ساده و متقابل معنی‌دار نشدند (جدول ۳). بررسی نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین مقدار پتاسیم قابل دسترس در سیستم بی‌خاک‌ورزی به میزان ۷۵۷ میلی گرم بر کیلوگرم مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در سیستم خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۴۸۳/۵۸ میلی گرم بر کیلوگرم به دست آمد (شکل ۱۹).

افزایش پتاسیم قابل دسترس در سیستم بی‌خاک‌ورزی احتمالاً با حفظ بقایای گیاهی در سطح خاک و آزادسازی تدریجی پتاسیم طی فرآیند تجزیه آن‌ها مرتبط بوده است. بخش قابل توجهی از پتاسیم موجود در بافت‌های گیاهی به صورت محلول و غیرساختاری ذخیره می‌شود؛ از این رو این عنصر معمولاً سریع‌تر از بقایای گیاهی آزاد شده و وارد محلول خاک می‌گردد. با این حال، از آنجاکه در این پژوهش نمونه‌برداری خاک به صورت تجمیعی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر انجام شد، افزایش مشاهده شده لزوماً به معنای توزیع یکنواخت پتاسیم در سراسر این عمق نیست و ممکن است بیشتر بازتاب غنی‌شدگی لایه‌های نزدیک به سطح خاک باشد. افزون بر این، تحرک بیشتر پتاسیم نسبت به عناصری مانند فسفر می‌تواند به جابه‌جایی آن در محدوده لایه نمونه‌برداری شده کمک کرده باشد.

با توجه به نتایج مشاهده شده، افزایش فسفر قابل دسترس در سیستم بی‌خاک‌ورزی، به‌ویژه در تیمار کشت گندم دوروم، احتمالاً بازتابی از تغییر در پویایی فسفر در لایه سطحی خاک در مقایسه با سیستم خاک‌ورزی مرسوم است. در خاک‌های آهکی، فسفر به‌طور ذاتی به دلیل واکنش با کلسیم در معرض تثبیت قرار دارد. در سیستم بی‌خاک‌ورزی، حفظ بقایای گیاهی در سطح خاک (مالچ)، می‌تواند به افزایش تمرکز مواد آلی در لایه سطحی منجر شود. اگرچه در این مطالعه نرخ تجزیه بقایا و غلظت اسیدهای آلی مستقیماً اندازه‌گیری نشده است، اما بر اساس ادبیات علمی، تجزیه تدریجی این مواد آلی می‌تواند از طریق تولید اسیدهای آلی ضعیف (مانند سیتریک و مالیک) و فرآیند کلاته کردن کلسیم، پتانسیل آزادسازی فسفات‌های تثبیت شده را افزایش دهد. عامل دیگر، نقش احتمالی ریزوسفر گندم دوروم است؛ حضور ریشه‌های فعال در سیستم حفاظتی ممکن است از طریق ترشحات ریشه‌ای و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز، به بسیج موضعی منابع فسفر کمک کند. بنابراین، بالاترین میزان فسفر قابل دسترس در تیمار بی‌خاک‌ورزی گندم دوروم می‌تواند حاصل برهم‌کنش میان حفظ مواد آلی سطحی و افزایش فعالیت‌های زیستی در ناحیه ریزوسفر باشد که احتمالاً اثرات مکانیسم‌های تثبیت فسفر را در این خاک‌های آهکی تعدیل کرده است. در مقابل، در سیستم خاک‌ورزی مرسوم، اختلال در ساختار خاک و اکسیداسیون سریع‌تر مواد آلی ممکن است فرصت کافی برای این فرآیندهای زیستی را فراهم نکرده و در نتیجه منجر به کاهش فراهمی این عنصر شده باشد (Richardson & Simpson, 2011; Hinsinger, 2001).



شکل ۱۹- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر مقدار پتاسیم خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 19- Effect of tillage systems on soil potassium content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's)

از سوی دیگر، جذب پتاسیم توسط گیاه و بازگشت آن از طریق بقایای گیاهی، چرخه این عنصر را در سیستم زراعی تقویت می‌کند. در مقابل، در تیمار بدون کشت، به دلیل نبود ریشه زنده و تحریک ریزوسفری، این فرآیندها محدودتر بوده و در نتیجه پتاسیم قابل دسترس کمتری مشاهده می‌شود (Awoniyi et al., 2025).

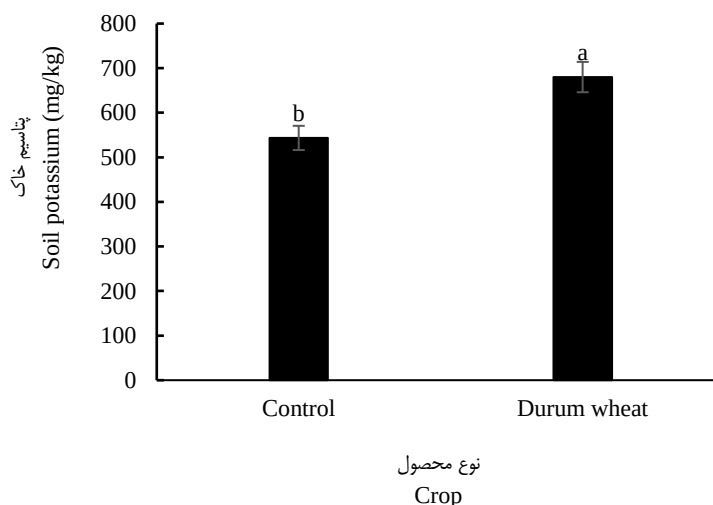
بیشترین مقدار پتاسیم قابل دسترس در تیمار بی‌خاک‌ورزی همراه با گندم دوروم به میزان ۸۴۳/۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار خاک‌ورزی مرسوم همراه با شاهد به میزان ۴۳۶/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد. در هر سه سیستم خاک‌ورزی، مقدار پتاسیم قابل دسترس در حضور گندم دوروم بیشتر از تیمار شاهد بود. همچنین با کاهش شدت خاک‌ورزی از خاک‌ورزی مرسوم به کم‌خاک‌ورزی و سپس بی‌خاک‌ورزی، مقدار پتاسیم قابل دسترس افزایش نشان داد (شکل ۲۱).

تنفس پایه خاک

بررسی نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای آزمایشی بر مقدار تنفس پایه خاک نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی، نوع محصول و اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار تنفس پایه خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند و باقی اثرات ساده و متقابل معنی‌دار نشدند (جدول ۳). بیشترین میزان تنفس پایه خاک در سیستم خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۲۰۴/۱۱ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد.

بنابراین، نتایج حاضر بیشتر نشان‌دهنده بهبود پویایی پتاسیم در سیستم بی‌خاک‌ورزی است، نه لزوماً افزایش یکنواخت آن در کل عمق ۳۰ سانتی‌متری (Algarin et al., 2025; Andrews et al., 2021). در مقابل، در سیستم خاک‌ورزی مرسوم به دلیل اختلال شدید در ساختمان خاک و اختلاط بقایای گیاهی با خاک، معدنی شدن مواد آلی با سرعت بیشتری رخ می‌دهد و بخشی از پتاسیم آزادشده ممکن است، بسته به شرایط رطوبتی و ویژگی‌های خاک، به لایه‌های عمیق‌تر منتقل شود (Wacker et al., 2022). همچنین کاهش تجمع ماده آلی و تخریب خاکدانه‌ها در این سیستم می‌تواند ظرفیت نگهداری عناصر غذایی در لایه سطحی خاک را کاهش دهد (Li et al., 2020). بنابراین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاهش شدت خاک‌ورزی و استفاده از سیستم‌های حفاظتی می‌تواند نقش مهمی در افزایش و حفظ پتاسیم قابل دسترس خاک در شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه داشته باشد. نتایج نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر پتاسیم قابل دسترس خاک داشت (شکل ۲۰). بیشترین مقدار پتاسیم قابل دسترس در تیمار گندم دوروم به میزان ۶۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار شاهد به میزان ۵۴۳/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد. این افزایش بیانگر نقش فعال کشت گندم دوروم در بهبود وضعیت پتاسیم خاک نسبت به شرایط بدون کشت است.

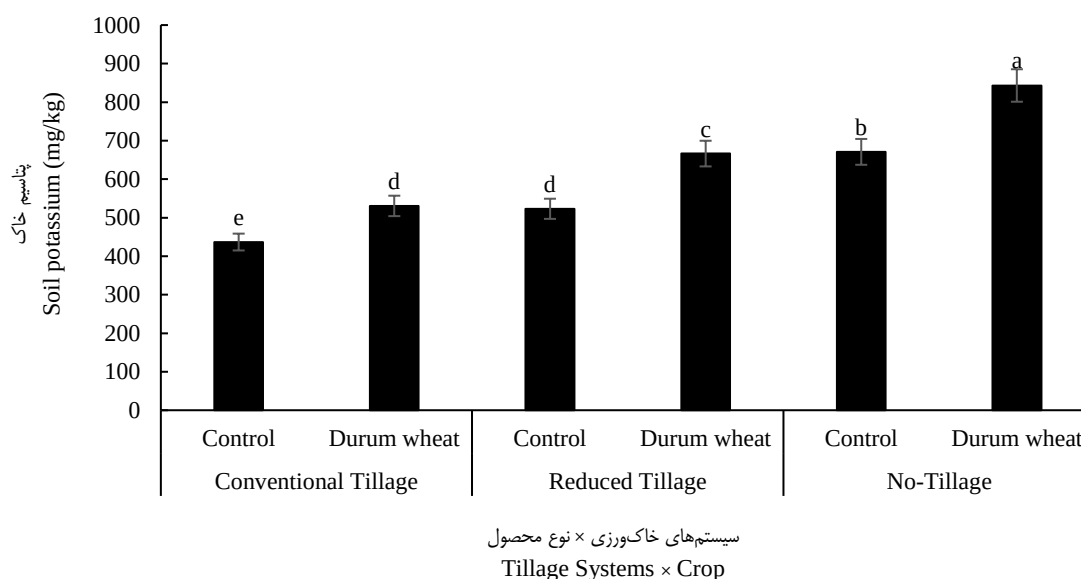
افزایش پتاسیم قابل دسترس در تیمار گندم دوروم احتمالاً ناشی از فعالیت ریزوسفری ریشه‌ها و تشدید چرخه زیستی پتاسیم در خاک بوده است. ریشه‌های فعال با ترشح ترکیبات آلی و پروتون‌ها می‌توانند آزادسازی پتاسیم از فازهای تبادلی و تا حدی معدنی را تسهیل کنند و



شکل ۲۰- اثر نوع محصول بر مقدار پتاسیم خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 20- Effect of crop type on soil potassium content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۲۱- اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار پتاسیم خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 21- Interaction effect of tillage systems and crop type on soil potassium content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

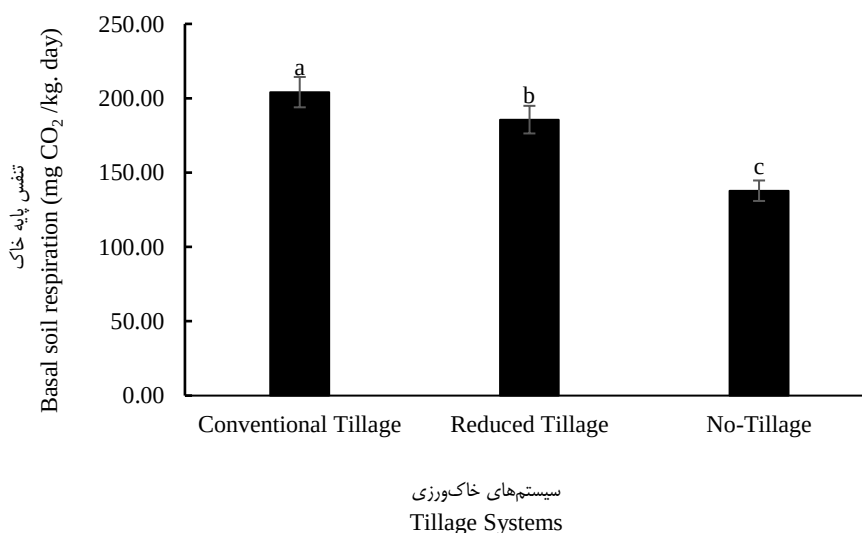
و در نتیجه تشدید فعالیت میکروبی و معدنی شدن کربن آلی نسبت داد. در مقابل، کاهش معنی‌دار تنفس پایه خاک در سیستم بی‌خاک‌ورزی نشان‌دهنده پایداری بیشتر کربن آلی خاک و محدود شدن اکسیداسیون زیستی آن به دلیل حفظ ساختمان خاکدانه‌ها و کاهش اختلال فیزیکی خاک است. این روند بیانگر نقش سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی در

کمترین میزان تنفس پایه خاک مربوط به سیستم بی‌خاک‌ورزی به میزان ۱۳۷/۸۰ میلی گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز بود (شکل ۲۲).

افزایش تنفس پایه خاک در خاک‌ورزی مرسوم را می‌توان به برهم‌خوردگی شدید مکانیکی خاک، افزایش تماس ماده آلی با اکسیژن

۲۳). این کاهش به معنای کاهش جمعیت یا غیرفعال شدن ریزجانداران در حضور گیاه نیست؛ بلکه نشان‌دهنده بهبود کارایی مصرف کربن (CUE) در ریزوسفر گندم دوروم و ترجیح ریزجانداران به تخصیص کربن به زیست‌توده میکروبی و تولید آنزیم‌ها به جای اتلاف آن به صورت تنفس است.

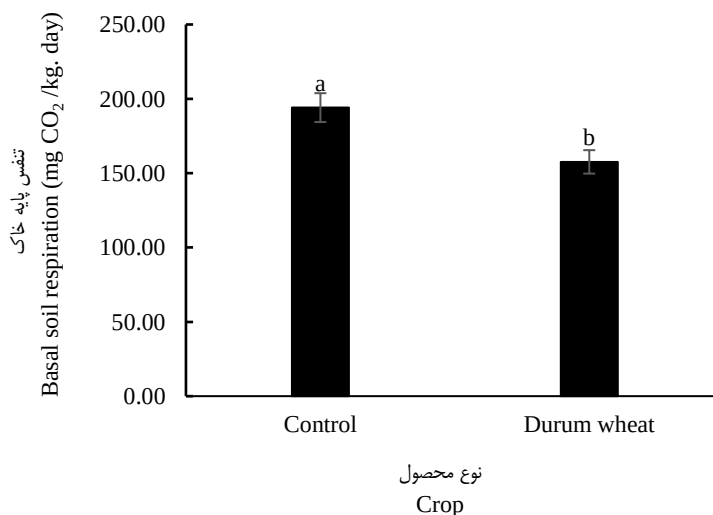
کاهش اتلاف کربن و بهبود پایداری زیستی خاک در مقایسه با خاک ورزی مرسوم می‌باشد (Wasikoyo et al., 2026).
بیشترین میزان تنفس پایه خاک در تیمار شاهد با میانگین حدود ۱۹۴/۰۹ میلی گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد، در حالی که این مقدار در تیمار گندم دوروم به حدود ۱۵۷/۵۹ میلی گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز کاهش یافت (شکل



شکل ۲۲- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر مقدار تنفس پایه خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 22- Effect of tillage systems on basal soil respiration under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's)



شکل ۲۳- اثر نوع محصول بر مقدار تنفس پایه خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 23- Effect of crop type on basal soil respiration content under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's)

نوع محصول نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. در مقابل، سایر اثرات ساده و متقابل از نظر آماری معنی‌دار نبودند (جدول ۳). بیشترین تنفس ناشی از سوبسترا در خاک در سیستم خاک‌ورزی مرسوم با میانگین حدود ۵۴۳/۰۸ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد. این مقدار در کم‌خاک‌ورزی به حدود ۴۵۲/۲۵ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز کاهش یافت و کمترین مقدار آن در سیستم بی‌خاک‌ورزی با حدود ۳۵۶/۹۲ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز اندازه‌گیری شد (شکل ۲۵).

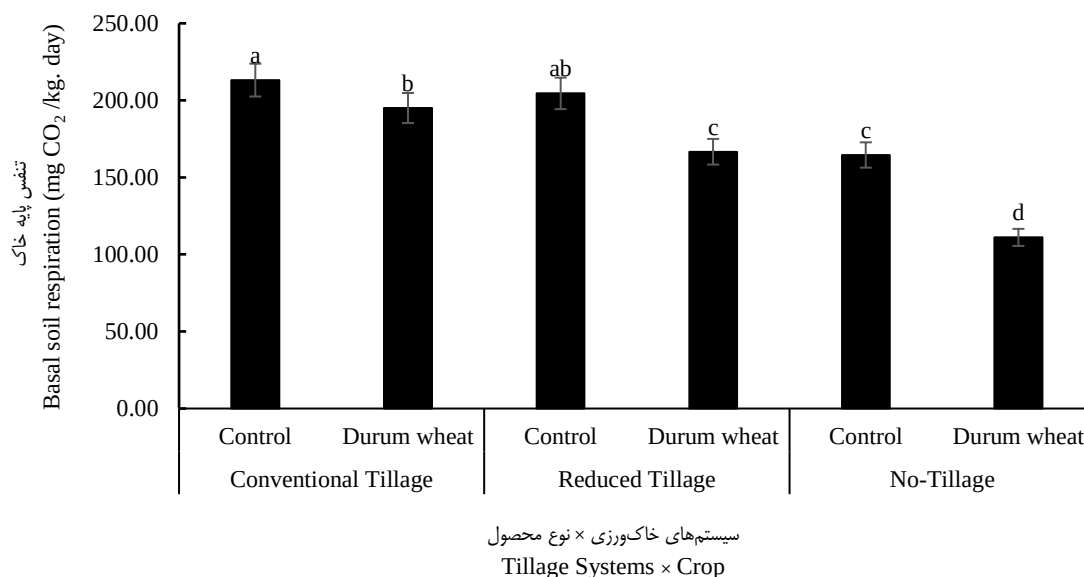
افزایش تنفس ناشی از سوبسترا در خاک در خاک‌ورزی مرسوم را می‌توان به برهم‌خوردگی شدید ساختمان خاک و افزایش دسترسی ریزجانداران به منابع آلی قابل تجزیه نسبت داد که موجب تحریک فعالیت میکروبی پس از افزودن سوبسترا می‌شود. در مقابل، در سیستم بی‌خاک‌ورزی به دلیل پایداری بیشتر خاکدانه‌ها، توزیع یکنواخت‌تر ماده آلی و کاهش اختلال فیزیکی خاک، بخشی از کربن آلی در داخل خاکدانه‌ها محافظت شده و دسترسی سریع ریزجانداران به سوبسترا محدودتر می‌شود، در نتیجه شدت تنفس ناشی از سوبسترا کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی می‌توانند با افزایش پایداری ساختمان خاک و حفاظت از کربن آلی، الگوی فعالیت میکروبی خاک را نسبت به خاک‌ورزی مرسوم تغییر دهند (Franco-Luesma et al., 2020; Mtyobile et al., 2020).

علاوه بر این، فعالیت ریشه‌ها و ترشحات ریزوسفری با کمک به پایداری خاکدانه‌ها، بخش عمده‌ای از کربن آلی را از دسترس مستقیم اکسیداسیون زیستی خارج کرده و پایداری ساختمانی خاک را افزایش می‌دهند. در مقابل، افزایش عناصر غذایی قابل دسترس در تیمار گندم دوروم که در بخش‌های پیشین ذکر شد، ناشی از همین تحریک کیفی فعالیت میکروبی (تولید آنزیم‌ها و اسیدهای آلی در ریزوسفر) است که آزادسازی عناصر را بدون افزایش در تنفس پایه و اتلاف کربن تسهیل می‌کند (Li et al., 2020).

بیشترین میزان تنفس پایه خاک در تیمار خاک‌ورزی مرسوم همراه با شاهد به میزان ۲۱۳/۱۷ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد. پس از آن تیمار کم‌خاک‌ورزی همراه با شاهد به میزان ۲۰۴/۵۶ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز قرار گرفت. در مقابل، کمترین تنفس پایه خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی همراه با کشت گندم دوروم و به میزان ۱۱۱/۰۶ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز به دست آمد (شکل ۲۴).

تنفس ناشی از سوبسترا در خاک

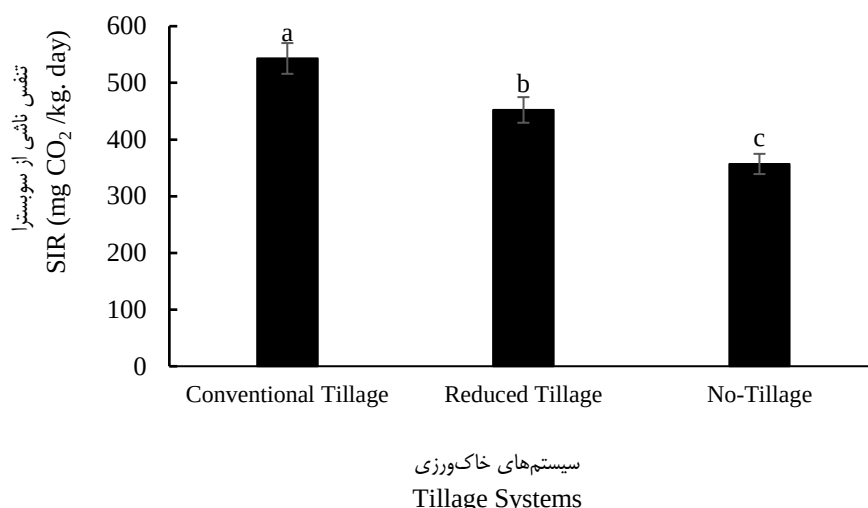
بر اساس نتایج تجزیه واریانس، سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول اثر معنی‌داری (در سطح احتمال یک درصد) بر تنفس ناشی از سوبسترا در خاک داشتند. همچنین اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و



شکل ۲۴- اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر مقدار تنفس پایه خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 24- Interaction effect of tillage systems and crop type on basal soil respiration content under durum wheat cultivation (Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۲۵- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر تنفس ناشی از سوبسترا در خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 25- Effect of tillage systems on substrate- induced respiration (SIR) in soil under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's)

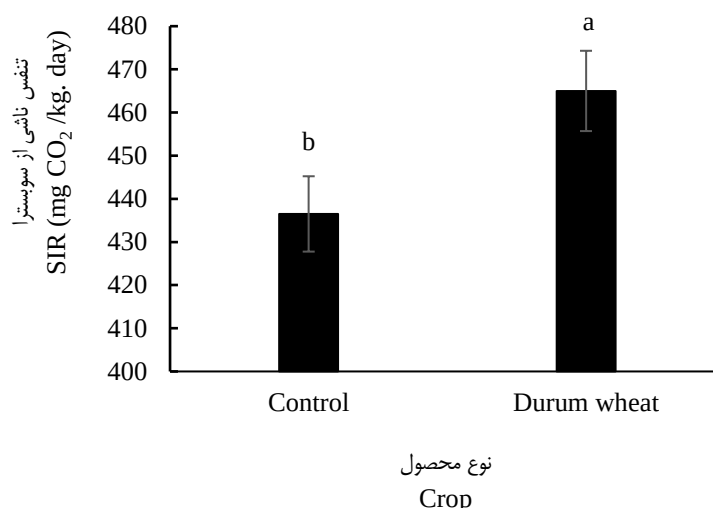
(*al.*, 2015).

بیشترین مقدار تنفس ناشی از سوبسترا در تیمار خاک‌ورزی مرسوم همراه با گندم دوروم با میانگین حدود ۵۸۷/۶۷ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد. کمترین مقادیر تنفس ناشی از سوبسترا نیز در سیستم بی‌خاک‌ورزی مشاهده شد، به‌طوری‌که مقدار آن در تیمار شاهد حدود ۳۴۹/۵۰ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز و در تیمار گندم دوروم حدود ۳۶۴/۳۳ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز بود (شکل ۲۷).

کربن زیست‌توده میکروبی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده سیستم‌های خاک‌ورزی، نوع محصول و همچنین اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی × نوع محصول بر کربن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. در مقابل، سایر اثرات ساده و متقابل از نظر آماری معنی‌دار نبودند (جدول ۳). بیشترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در سیستم بی‌خاک‌ورزی به میزان ۲۹۰/۳۰ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود. همچنین کمترین مقدار این شاخص نیز در سیستم خاک‌ورزی مرسوم به میزان ۱۱۷/۳۶ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد (شکل ۲۸).

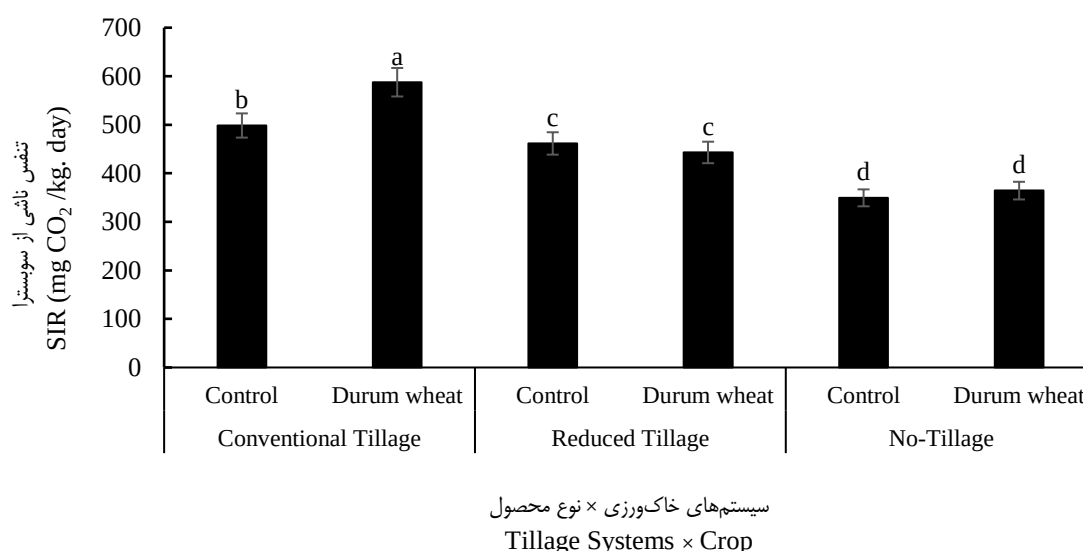
بیشترین مقدار تنفس ناشی از سوبسترا در خاک در تیمار گندم دوروم با میانگین حدود ۴۶۵ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد، در حالی‌که در تیمار شاهد مقدار آن حدود ۴۳۶/۵۰ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز اندازه‌گیری شد (شکل ۲۶). افزایش تنفس ناشی از سوبسترا در حضور گندم دوروم را می‌توان به فعالیت بیشتر ریزوسفر و افزایش دسترسی ریزجانداران به ترکیبات آلی قابل تجزیه نسبت داد. ترشحات ریشه، بقایای ریشه و ترکیبات آلی آزادشده در ناحیه ریزوسفر می‌توانند به‌عنوان منبع انرژی برای ریزجانداران عمل کرده و ظرفیت پاسخ متابولیکی آن‌ها را پس از افزودن سوبسترا افزایش دهند (He et al., 2026). این در حالی است که کاهش تنفس پایه در حضور گندم، لزوماً با این یافته در تناقض نیست؛ زیرا تنفس پایه و تنفس ناشی از سوبسترا دو جنبه متفاوت از فعالیت میکروبی خاک را نشان می‌دهند. تنفس پایه بیشتر بیانگر شدت تنفس میکروبی در شرایط طبیعی خاک و بدون افزودن منبع کربن خارجی است، در حالی‌که تنفس ناشی از سوبسترا توان بالقوه و پاسخ سریع جامعه میکروبی به یک منبع کربن قابل‌دسترس را منعکس می‌کند. بنابراین، ممکن است حضور گندم با کاهش تجزیه سریع کربن بومی خاک یا افزایش کارایی مصرف کربن، تنفس پایه را کاهش داده باشد، اما همزمان از طریق تقویت فعالیت ریزوسفر و فراهم کردن ترکیبات آلی تازه، ظرفیت پاسخ میکروبی به سوبسترای افزوده‌شده را افزایش داده باشد. در مقابل، در تیمار شاهد به‌دلیل نبود گیاه و کاهش ورودی ترکیبات آلی تازه، فعالیت ریزوسفری محدودتر بوده و در نتیجه تنفس ناشی از سوبسترا در سطح پایین‌تری مشاهده شد (Birge et



شکل ۲۶- اثر نوع محصول بر تنفس ناشی از سوبسترا در خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 26- Effect of crop type on substrate- induced respiration (SIR) in soil under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)



شکل ۲۷- اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر تنفس ناشی از سوبسترا در خاک در کشت گندم دوروم

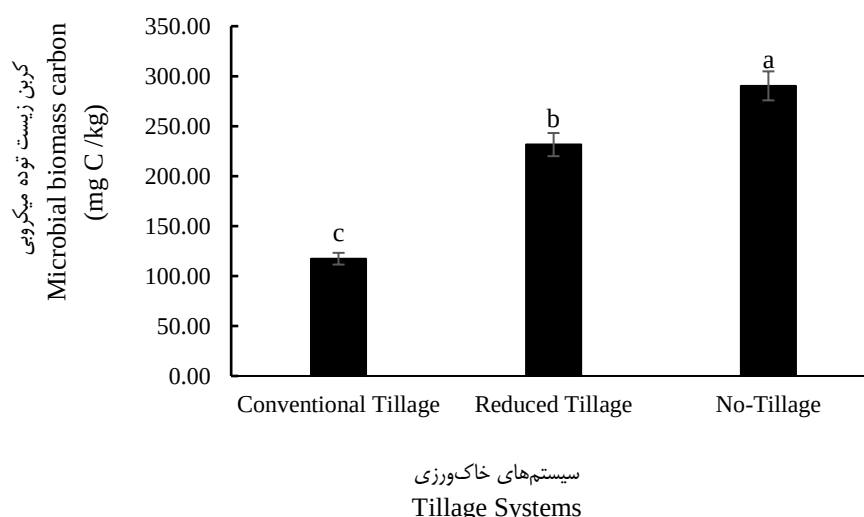
(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 27- Interaction effect of tillage systems and crop type on substrate- induced respiration (SIR) in soil under durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

برای فعالیت و استقرار ریزجانداران خاک نسبت داد. در مقابل، در سیستم خاک‌ورزی مرسوم به دلیل اختلال بیشتر در ساختمان خاک و تسریع تجزیه ماده آلی، مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در سطح پایین‌تری قرار گرفت (Gosai et al., 2010).

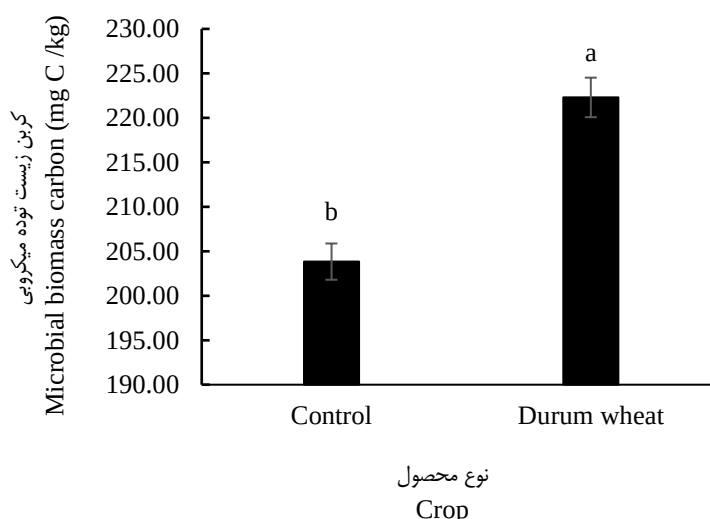
به‌طور کلی، با کاهش شدت خاک‌ورزی از خاک‌ورزی مرسوم به بی‌خاک‌ورزی، مقدار کربن زیست‌توده میکروبی افزایش یافت. این افزایش را می‌توان به کاهش برهم‌خوردگی مکانیکی خاک، حفظ بقایای گیاهی در سطح خاک، افزایش ماده آلی و فراهم شدن شرایط مناسب‌تر



شکل ۲۸- اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر کربن زیست‌توده میکروبی در خاک در کشت گندم دوروم

(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 28- Effect of tillage systems on microbial biomass carbon in soil under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's)



شکل ۲۹- اثر نوع محصول بر کربن زیست‌توده میکروبی در خاک در کشت گندم دوروم

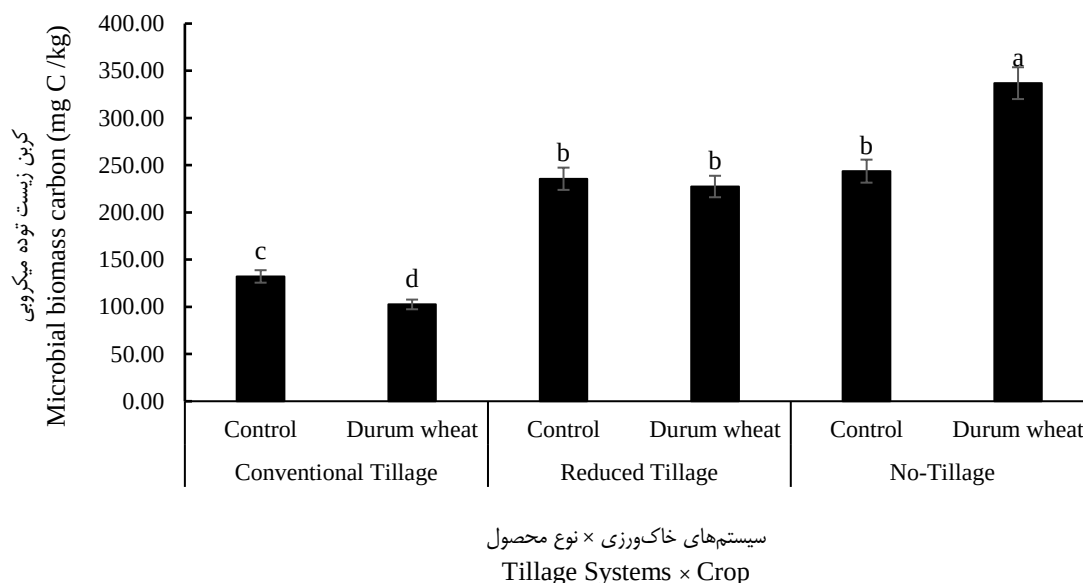
(حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 29- Effect of crop type on microbial biomass carbon in soil under durum wheat cultivation
(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

فراهم می‌کند (Afzal et al., 2024).

بیشترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در تیمار بی‌خاک‌ورزی همراه با گندم دوروم با میانگین حدود ۳۳۶/۹۰ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود. همچنین کمترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی نیز در تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد. به‌طوری‌که مقدار آن در تیمار شاهد حدود ۱۳۲/۱۸ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک و در تیمار گندم دوروم حدود ۱۰۲/۵۴ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک بود (شکل ۳۰).

بیشترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در تیمار گندم دوروم با میانگین حدود ۲۲۲/۳۰ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد بود. کمترین مقدار این شاخص در تیمار شاهد با میانگین حدود ۲۰۳/۸۴ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد (شکل ۲۹). افزایش کربن زیست‌توده میکروبی در حضور گندم دوروم را می‌توان به ترشحات ریشه، افزایش ورود ترکیبات آلی به خاک و تحریک فعالیت ریزجانداران ناحیه ریزوسفر نسبت داد که شرایط مناسب‌تری را برای رشد و توسعه جامعه میکروبی



شکل ۳۰- اثر متقابل سیستم‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر کربن زیست‌توده میکروبی در خاک در کشت گندم دوروم (حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن هستند)

Figure 30- Interaction effect of tillage systems and crop type on microbial biomass carbon in soil under durum wheat cultivation

(Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to Duncan's test)

به صورت متقابل، نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک‌های آهکی نیمه‌خشک دارند. در میان اثرات مستقل، کاهش شدت خاک‌ورزی و استقرار سامانه بی‌خاک‌ورزی بهبود معنی‌داری در پایداری خاکدانه‌ها، ذخیره ماده آلی، کربن آلی، نیتروژن کل و عناصر غذایی قابل‌دسترس ایجاد کرد. در حالی که خاک‌ورزی مرسوم به دلیل اختلال شدید مکانیکی، به تسریع معدنی‌شدن مواد آلی و افزایش تنفس خاک منجر شد. افزون بر این، کشت گندم دوروم به طور مؤثری شاخص‌های حاصلخیزی و کیفیت زیستی خاک را ارتقا بخشید و عملیات زیرشکن نیز در بهبود پایداری فیزیکی و برخی شاخص‌های ساختمانی خاک نقش مثبتی ایفا نمود. در کنار این اثرات ساده، نتایج برهم‌کنش تیمارها نشان‌دهنده هم‌افزایی و وابستگی متقابل برخی ویژگی‌ها به‌ویژه شاخص‌های زیستی خاک به ترکیب هم‌زمان مدیریت خاک‌ورزی و حضور گیاه بود. امری که اهمیت اتخاذ یک رویکرد تلفیقی را در مدیریت نشان می‌دهد. در مجموع، یافته‌های این مطالعه بر پتانسیل بالای سامانه‌های حفاظتی، به‌ویژه ترکیب بی‌خاک‌ورزی با کشت گندم دوروم و کاربرد زیرشکن، در بهبود کیفیت خاک و حفظ پایداری تولید در مناطق نیمه‌خشک دلالت دارد. با این حال، به دلیل کوتاه‌مدت بودن این مطالعه، اعتباربخشی به پایداری این اثرات و تعمیم آن‌ها به شرایط زراعی بلندمدت، مستلزم انجام پژوهش‌های طولانی‌مدت‌تر در شرایط اقلیمی و مدیریتی متنوع‌تر است.

این الگو نشان می‌دهد که اثر گندم بر کربن زیست‌توده میکروبی را نمی‌توان به صورت یک اثر کلی و مستقل تفسیر کرد، بلکه این اثر زمانی برجسته می‌شود که گیاه در شرایطی مانند بی‌خاک‌ورزی قرار گیرد که اختلال خاک کمتر، حفظ بقایای گیاهی بیشتر و رطوبت و ماده آلی خاک مناسب‌تر باشد. در چنین شرایطی، حضور ریشه زنده، ترشحات ریشه و بقایای گیاهی می‌تواند بستر مناسب‌تری برای رشد و فعالیت جامعه میکروبی فراهم کند و در نتیجه به افزایش کربن زیست‌توده میکروبی بینجامد. در مقابل، در سیستم خاک‌ورزی مرسوم، اختلال شدید خاک، تخریب بیشتر ساختار، تهویه بالاتر و تسریع تجزیه ماده آلی ممکن است پایداری زیستگاه میکروبی و دسترسی پیوسته به منابع کربنی را محدود کرده باشد. از این رو، حضور گندم در این شرایط لزوماً به افزایش کربن زیست‌توده میکروبی منجر نشده است. بنابراین، به نظر می‌رسد افزایش کربن زیست‌توده میکروبی در حضور گندم تنها زمانی قابل انتظار است که شرایط فیزیکی و زیستی خاک، به‌ویژه در سامانه‌های حفاظتی مانند بی‌خاک‌ورزی، امکان بهره‌برداری مؤثرتر از ورودی‌های ریشه‌ای و آلی را برای ریزجانداران فراهم کند (Gosai et al., 2010).

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کند که سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی، نوع محصول و عملیات زیرشکن به طور مستقل و در مواردی

References

1. Afzal, M.Y., Das, B.K., Valappil, V.T., Scaria, J., & Brözel, V.S. (2024). Root exudate compounds change the bacterial community in bulk soil. *Rhizosphere*, 30, 100885. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100885>
2. Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012513840-6/50014-8>
3. Algarin, C.A.V., Thiengo, C.C., Cherubin, M.R., Bieluczyk, W., Mariano, E., Amorim, D.J., Franco, M.F.S., González, A.C., & Lavres, J. (2025). Can no-tillage and crop diversification sustain nutrient stocks in acidic and poorly-fertilized soils? Evidence from 32 years of real-world agricultural management in Paraguay. *Soil Advances*, 4, 100084. <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2025.100084>
4. Almagro, M., Ruiz-Navarro, A., Díaz-Pereira, E., Albaladejo, J., & Martínez-Mena, M. (2021). Plant residue chemical quality modulates the soil microbial response related to decomposition and soil organic carbon and nitrogen stabilization in a rainfed Mediterranean agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 156, 108198. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108198>
5. Amelung, W., Tang, N., Siebers, N., Aehelst, M., Eusterhues, K., Felde, V.J.M.N.L., Guggenberger, G., Kaiser, K., Kögel-Knabner, I., Klumpp, E., Knief, C., Kruse, J., Lehndorff, E., Mikutta, R., Peth, S., Ray, N., Prechtel, A., Ritschel, T., Schweizer, S.A.,...Totsche, K.U. (2024). Architecture of soil microaggregates: Advanced methodologies to explore properties and functions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 187(1), 17–50. <https://doi.org/10.1002/jpln.202300149>
6. Anderson, J.P. (1982). Soil respiration. In *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties* (Vol. 9, pp. 831–871).
7. Andrews, E.M., Kassama, S., Smith, E.E., Brown, P.H., & Khalsa, S.D.S. (2021). A review of potassium-rich crop residues used as organic matter amendments in tree crop agroecosystems. *Agriculture*, 11(7), 580. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070580>
8. Angon, P.B., Anjum, N., Akter, M.M., Kc, S., Suma, R.P., & Jannat, S. (2023). An overview of the impact of tillage and cropping systems on soil health in agricultural practices. *Advances in Agriculture*, 2023(1), 8861216. <https://doi.org/10.1155/2023/8861216>
9. Asodar, M.A., & Ghasemi-nejad Raini, M. (2008). *Agricultural machines*. Shahid Chamran University Press, Ahvaz.
10. Awoniyi, A.S., Adeyemo, A.J., Agbenin, J.O., Ilori, A.O., da Silva Oliveira, D.M., & de Freitas, D.A.F. (2025). Potassium release from K-bearing minerals treated with organic acids under laboratory conditions. *Discover Soil*, 2(1), 69. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00096-7>
11. Baranian Kabir, E., Bashari, H., Mosaddeghi, M.R., & Bassiri, M. (2017). Soil aggregate stability and organic matter as affected by land-use change in central Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(13), 1823–1837. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1308492>
12. Bardgett, R.D., & Van Der Putten, W.H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 515(7528), 505–511. <https://doi.org/10.1038/nature13855>
13. Becker, R.K., Barbosa, E.A.A., Giarola, N.F.B., Kochinski, E.G., Povh, F.P., Paula, A.L.d., & Cherubin, M.R. (2022). Mechanical intervention in compacted no-till soil in southern Brazil: Soil physical quality and maize yield. *Agronomy*, 12(10), 2281. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102281>
14. Birge, H.E., Conant, R.T., Follett, R.F., Haddix, M.L., Morris, S.J., Snapp, S.S., Wallenstein, M.D., & Paul, E.A. (2015). Soil respiration is not limited by reductions in microbial biomass during long-term soil incubations. *Soil Biology and Biochemistry*, 81, 304–310. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.028>
15. Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2008). *Principles of soil conservation and management*. Springer Science & Business Media.
16. Blanco-Canqui, H., & Ruis, S.J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164–200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
17. Busari, M.A., Kukal, S.S., Kaur, A., Bhatt, R., & Dulazi, A. A. (2015). Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(2), 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002>
18. Carter, M.R., & Gregorich, E.G. (2007). *Soil Sampling and Methods of Analysis, Second Edition*. Taylor & Francis.
19. Cui, H., Mo, C., Chen, P., Lan, R., He, C., Lin, J., Jiang, Z., & Yang, J. (2023). Impact of rhizosphere priming on soil organic carbon dynamics: Insights from the perspective of carbon fractions. *Applied Soil Ecology*, 189, 104982. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104982>
20. Dakora, F.D., & Phillips, D.A. (2002). Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil*, 245(1), 35–47. <https://doi.org/10.1023/A:1020809400075>
21. Dassou, A.G., Yemadje, P.L., Atchadé, M.N., Gohouédé, L.C., Aboua, C.D., Boulakia, S., Balarabe, O., Sekloka, E., & Tittonell, P. (2024). Conservation agriculture compared to conventional tillage improves the trade-off between

- ground-dwelling arthropod trophic groups for natural pest regulation in cotton cropping systems. *Global Ecology and Conservation*, 55, e03223. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03223>
22. Ding, W., Sun, L., Qi, Z., Li, S., Filipović, V., Wu, X., & He, H. (2025). Conservation tillage enhances both organic and inorganic carbon in dryland: Insights from a 20-year field experiment and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 393, 109845. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109845>
23. Franco-Luesma, S., Caverio, J., Plaza-Bonilla, D., Cantero-Martínez, C., Arrúe, J.L., & Álvaro-Fuentes, J. (2020). Tillage and irrigation system effects on soil carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) emissions in a maize monoculture under Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research*, 196, 104488. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104488>
24. Franzluebbers, A. (2002). Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research*, 66(2), 95–106. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00018-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00018-1)
25. Gosai, K., Arunachalam, A., & Dutta, B.K. (2010). Tillage effects on soil microbial biomass in a rainfed agricultural system of northeast India. *Soil and Tillage Research*, 109(2), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.04.006>
26. Hayat, S., Faraz, A., & Faizan, M. (2017). Root exudates: composition and impact on plant–microbe interaction. *Biofilms in Plant and Soil Health*, 179–193. <https://doi.org/10.1002/9781119246329.ch10>
27. He, S., Fu, L., Shi, Y., Shi, W., Zhang, S., Gao, Z., & Li, X. (2026). Root exudate-mediated nutrient exchange in the rhizosphere: multi-element networks, dynamic regulation, and implications for sustainable agriculture. *Journal of Advanced Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2026.02.039>
28. He, Y., Yang, M., Huang, R., Wang, Y., & Ali, W. (2021). Soil organic matter and clay zeta potential influence aggregation of a clayey red soil (Ultisol) under long-term fertilization. *Scientific Reports*, 11(1), 20498. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99769-w>
29. Heydari, N., & Taran, F. (2025). Effect of climate change on wheat yield and water productivity in Iran and the world. *Iranica Journal of Energy and Environment*, 16(2), 253–269. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.02.08>
30. Hinsinger, P., Bengough, A.G., Vetterlein, D., & Young, I.M. (2009). Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and Soil*, 321, 117–152. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9885-9>
31. Horwath, W., & Paul, E. (1994). Microbial biomass. In *Methods of soil analysis: part 2 microbiological and biochemical properties* (Vol. 5, pp. 753–773).
32. Karami, A., Homaei, M., Afzalinia, S., Ruhipour, H., & Basirat, S. (2012). Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 148, 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.10.021>
33. Kataria, P., Singh, J., Singh, G., Mavi, M., Sillanpää, M., & Al-Farraj, S. (2024). Residual phosphorus availability after soil application of different organic waste in varying soil P status soils. *Heliyon*, 10(7), e25732. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25732>
34. Kool, D., Tong, B., Tian, Z., Heitman, J., Sauer, T., & Horton, R. (2019). Soil water retention and hydraulic conductivity dynamics following tillage. *Soil and Tillage Research*, 193, 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.020>
35. Kuzyakov, Y., & Domanski, G. (2000). Carbon input by plants into the soil. Review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163(4), 421–431. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200008\)163:4%3C421::AID-JPLN421%3E3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200008)163:4%3C421::AID-JPLN421%3E3.0.CO;2-R)
36. Kuzyakov, Y., & Xu, X. (2013). Competition between roots and microorganisms for nitrogen: mechanisms and ecological relevance. *New Phytologist*, 198(3), 656–669. <https://doi.org/10.1111/nph.12235>
37. Li, J., Yuan, X., Ge, L., Li, Q., Li, Z., Wang, L., & Liu, Y. (2020). Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 304, 107126. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107126>
38. Li, M., Qing, W., & Songtao, S. (2020). Response of soil aggregate stability and distribution of organic carbon to alpine grassland degradation in Northwest Sichuan. *Geoderma Regional*, 22, e00309. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00309>
39. Liang, X., Yu, S., Ju, Y., Wang, Y., & Yin, D. (2025). Integrated management practices foster soil health, productivity, and agroecosystem resilience. *Agronomy*, 15(8), 1816. <https://doi.org/10.3390/agronomy15081816>
40. Liu, Y., He, Y., & Peng, B. (2024). Relationship between salt accumulation and soil structure fractals in cotton fields in an arid inland basin. *Agronomy*, 14(11), 2673. <https://doi.org/10.3390/agronomy14112673>
41. Hamza M.A., & Anderson W.K.. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
42. Modiba, M.M., Ocansey, C.M., Ibrahim, H.T.M., Birkás, M., Dekemati, I., & Simon, B. (2025). Assessing 16 years of tillage dynamics on soil physical properties, crop root growth and yield in an endocalcic chernozem soil in Hungary. *Agronomy*, 15(4), 801. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040801>
43. Mtyobile, M., Muzangwa, L., & Mnkeni, P.N.S. (2020). Tillage and crop rotation effects on soil carbon and selected soil physical properties in a Haplic Cambisol in Eastern Cape, South Africa. *Soil and Water Research*, 15(1), 47–54. <https://doi.org/10.17221/176/2018-SWR>

44. Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., & Grace, P. (2014). Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 187, 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>
45. Paltineanu, C., Dumitru, S., Vizitiu, O., Mocanu, V., Lăcătușu, A.-R., Ion, S., & Domnariu, H. (2024). Soil organic carbon and total nitrogen stocks related to land use and basic environmental properties – assessment of soil carbon sequestration potential in different ecosystems. *CATENA*, 246, 108435. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108435>
46. Pecci Canisares, L., Grove, J., Miguez, F., & Poffenbarger, H. (2021). Long-term no-till increases soil nitrogen mineralization but does not affect optimal corn nitrogen fertilization practices relative to inversion tillage. *Soil and Tillage Research*, 213, 105080. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105080>
47. PeeyushSharma, V., Sharma, K., Sharma, N., Phogat, V., & Vikas, V. (2016). Impact of conservation tillage on soil organic carbon and physical properties—a review. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 7(1), 151–161. <https://doi.org/10.5958/0976-4038.2016.00024.5>
48. Peralta, G., Alvarez, C.R., & Taboada, M.Á. (2021). Soil compaction alleviation by deep non-inversion tillage and crop yield responses in no tilled soils of the Pampas region of Argentina. A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 211, 105022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105022>
49. Raper, R. (2005). Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics*, 42(3-4), 259–280. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.10.010>
50. Sekaran, U., Sagar, K.L., & Kumar, S. (2021). Soil aggregates, aggregate-associated carbon and nitrogen, and water retention as influenced by short and long-term no-till systems. *Soil and Tillage Research*, 208, 104885. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104885>
51. Shokati, B. (2014). Effect of conservation tillage on soil fertility factors: A review. *International Journal of Biosciences*, 4(11), 144–156. <https://doi.org/10.12692/ijb/4.11.144-156>
52. Singh, N., Singh, S., Dutta, P., Sulochna, H., Yadav, R., Ghosh, S., Panotra, N., & Thakre, T. (2025). Role of conservation tillage strategies in reducing soil degradation and enhancing water infiltration. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 11(2), 374–387.
53. Singh, P., Mukherjee, S., Saha, N., Biswas, S., & Mandal, B. (2021). Conservation agriculture in reshaping belowground microbial diversity. In A. Rakshit, S. K. Singh, P. C. Abhilash, & A. Biswas (Eds.), *Soil Science: Fundamentals to Recent Advances* (pp. 141–173). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0917-6_8
54. Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7–31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
55. Souid, A., Hamdi, W., Attallah, A., Louhichi, B., L'taief, B., Jellali, S., Lobna, H.-H., Alshaharni, M.O., Algopishi, U.B., & Farissi, M. (2026). Synergistic effects of durum wheat–chickpea intercropping on phosphorus mobilization, rhizosphere enzymatic activity, and agroecosystem productivity in semi-arid Mediterranean soils. *Plant and soil*, 521(1), 563–581. <https://doi.org/10.1007/s11104-026-08411-z>
56. Thotakuri, G., Angidi, S., & Athelly, A. (2024). Soil carbon pool as influenced by soil microbial activity—an overview. *American Journal of Climate Change*, 13(02), 175–193. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2024.132010>
57. Tou, C., Liu, X., Gan, J., Wanek, W., Jones, D.L., Wu, L., & Ma, Q. (2025). Plant residue quality regulates its incorporation into soil aggregates and organic carbon stabilisation. *Geoderma*, 460, 117407. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117407>
58. Traoré, O., Groleau-Renaud, V., Plantureux, S., Tubeileh, A., & Boeuf-Tremblay, V. (2000). Effect of root mucilage and modelled root exudates on soil structure. *European Journal of Soil Science*, 51(4), 575–581.
59. Wacker, T.S., Jensen, L.S., & Thorup-Kristensen, K. (2022). Conservation agriculture affects soil organic matter distribution, microbial metabolic capacity and nitrogen turnover under Danish field conditions. *Soil and Tillage Research*, 224, 105508. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105508>
60. Wasikoyo, E., Zsembeli, J., Gashi, N., Gumisiriya, C., & Csaba, J. (2026). Plant–soil microbe interactions' effects on CO₂ emissions, soil organic carbon and nutrients under different tillage systems. *Agriculture*, 16(4), 429. <https://doi.org/10.3390/agriculture16040429>
61. Yu, Q., Wang, H., Wen, P., Wang, S., Li, J., Wang, R., & Wang, X. (2020). A suitable rotational conservation tillage system ameliorates soil physical properties and wheat yield: An 11-year in-situ study in a semi-arid agroecosystem. *Soil and Tillage Research*, 199, 104600. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104600>