پاسخ ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک به خاکورزی و زیرشکنی در کشت گلرنگ (*Carthamus tinctorius*)

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثر سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی، زیرشکنی و حضور یا عدم حضور گیاه بر برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک انجام شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های دوبار خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. تیمارها شامل سه سامانه خاک‌ورزی مرسوم، خاک‌ورزی کاهشی و بی‌خاک‌ورزی، دو سطح زیرشکنی و بدون زیرشکنی، و دو سطح کشت گلرنگ و بدون کشت گیاه بودند. نتایج نشان داد که مدیریت خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر تعدادی از شاخص‌های مورد بررسی داشت، به‌طوری‌که سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی کاهشی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم شرایط مطلوب‌تری را برای حفظ برخی شاخص‌های کیفیت خاک فراهم کردند. در این سامانه‌ها، کاهش اختلال مکانیکی، حفظ بقایای گیاهی در سطح خاک و بهبود پایداری ساختمان خاک با افزایش ماده آلی، کربن آلی و کربن زیست‌توده میکروبی همراه بود. اگرچه بیشترین تنفس پایه میکروبی خاک در تیمار خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد، این افزایش لزوماً نشان‌دهنده بهبود کیفیت زیستی خاک نیست و احتمالاً ناشی از افزایش هوادهی، برهم‌خوردن خاک و تسریع معدنی‌شدن ماده آلی در این سامانه است. در مقابل، مقادیر بیشتر کربن زیست‌توده میکروبی و کربن آلی در سامانه‌های حفاظتی نشان‌دهنده فراهم شدن شرایط نسبتاً پایدارتر برای نگهداری کربن و فعالیت زیستی خاک بود. همچنین حضور گلرنگ از طریق ترشحات ریشه‌ای، بقایای گیاهی و برهم‌کنش با شرایط فیزیکی خاک در بهبود برخی شاخص‌های زیستی نقش داشت. اثر زیرشکن نیز بسته به نوع سامانه خاک‌ورزی متفاوت بود و در برخی موارد از طریق تغییر شرایط فیزیکی خاک بر فعالیت میکروبی اثر گذاشت. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که در شرایط این آزمایش، سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی، به‌ویژه بی‌خاک‌ورزی، می‌توانند در کوتاه‌مدت نقش مؤثری در حفظ یا بهبود برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک داشته باشند.

کلمات کلیدی: بی‌خاکورزی، خاک‌ورزی حفاظتی، زیرشکن، کیفیت خاک، گلرنگ.

Response of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties to Tillage and Subsoiling in Safflower (*Carthamus tinctorius*) Cultivation

Short English Abstract

This study evaluated the effects of three tillage systems (conventional, reduced, and no-tillage), subsoiling, and safflower cultivation on soil physical, chemical, and biological properties using a split-split-plot design. Results indicate that tillage management significantly affects soil quality. Compared to conventional tillage, no-tillage and reduced tillage systems offer superior conditions by minimizing mechanical disturbance and retaining plant residues. These practices were associated with increased soil organic matter, organic carbon, and microbial biomass carbon. While conventional tillage exhibited higher basal soil respiration, this is indicative of accelerated organic matter mineralization and structural disturbance, rather than improved biological quality. In contrast, conservation tillage systems fostered more stable conditions for carbon retention and biological activity. Safflower cultivation further improved biological indicators through root exudates and residue integration, while the impact of subsoiling varied by tillage system. In conclusion, conservation tillage, particularly no-tillage, shows significant potential for maintaining and enhancing soil properties in the short term.

Keywords: Conservation tillage, No-tillage, Quality soil, Safflower, Subsoiler.

مقدمه

در دهه‌های اخیر توجه به توسعه سامانه‌های کشاورزی پایدار موجب شده است نقش مدیریت خاک در حفظ کارکردهای اکولوژیکی آن بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد (Futa et al., 2024). خاک علاوه بر آنکه بستر رشد گیاه محسوب می‌شود، یک سامانه پویا با فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی درهم تنیده است که پایداری تولید و عملکرد اکوسیستم‌های کشاورزی را تعیین می‌کند (Raupp et al., 2024). در واقع تعامل میان این ویژگی‌ها در حفظ حاصلخیزی خاک، چرخه عناصر غذایی، ذخیره و انتقال آب و در نهایت سلامت خاک نقش اساسی دارد و به عنوان یکی از پایه‌های کشاورزی پایدار شناخته می‌شود (Kumar et al., 2025).

گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L) از جمله گیاهان روغنی است که به دلیل سازگاری نسبتاً مناسب با شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، توانایی بهره‌برداری از رطوبت لایه‌های عمیق خاک و نیاز نسبتاً کم به نهاده‌های شیمیایی، در بسیاری از سامانه‌های زراعی به عنوان گزینه‌ای مناسب برای تنوع‌بخشی به الگوی کشت مطرح شده است (Rabbani, 2026). با این حال، دستیابی به عملکرد مطلوب این گیاه تا حد زیادی به وضعیت فیزیکی خاک، دسترسی به عناصر غذایی و سطح فعالیت زیستی خاک وابسته است که همگی تحت تأثیر شیوه‌های مدیریت خاک قرار دارند (Srivastava et al., 2024).

پیشینهٔ پژوهش

در میان عوامل مدیریتی، نوع و شدت خاکورزی از مهم‌ترین عواملی است که می‌تواند ساختار خاک، توزیع بقایای گیاهی، پویایی ماده آلی و شرایط زیستی خاک را تغییر دهد (Laghari et al., 2025; Nunes et al., 2020). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که استفاده از سامانه‌های خاکورزی حفاظتی در مقایسه با خاکورزی مرسوم می‌تواند موجب بهبود برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک شود و در بسیاری از موارد با افزایش ماده آلی خاک، بهبود ساختمان خاک و کاهش خطر فرسایش همراه است (Busari et al., 2015). همچنین گزارش شده است که در این سامانه‌ها تجمع عناصر غذایی و کربن آلی در لایه‌های سطحی خاک افزایش می‌یابد، هرچند شدت این تغییرات به شرایط اقلیمی، نوع خاک و نحوه مدیریت بقایا وابسته است (Liu et al., 2023).

کربن آلی خاک یکی از شاخص‌های کلیدی کیفیت خاک به شمار می‌رود و نقش مهمی در پایداری ساختمان خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب، فراهمی عناصر غذایی و تقویت فعالیت‌های زیستی دارد (Koorneef et al., 2024). افزایش کربن آلی در بسیاری از سامانه‌های خاکورزی کاهشی با بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش فعالیت میکروبی همراه گزارش شده است (Powlson et al., 2012). از این رو تغییر در نوع خاکورزی می‌تواند به طور مستقیم یا غیرمستقیم فرآیندهای زیستی خاک را نیز تحت تأثیر قرار دهد.

با وجود مزایای بالقوه سامانه‌های خاکورزی حفاظتی، فشردگی خاک همچنان یکی از محدودیت‌های مهم در بسیاری از اراضی کشاورزی محسوب می‌شود (Liang et al., 2025). افزایش چگالی ظاهری و مقاومت مکانیکی خاک می‌تواند نفوذ آب، تهویه خاک و گسترش ریشه را محدود کرده و در نهایت بر رشد گیاه و کارایی جذب آب و عناصر غذایی اثر منفی بگذارد (Chen et al., 2014). در چنین شرایطی استفاده از عملیات زیرشکنی به عنوان روشی برای شکستن لایه‌های متراکم خاک و بهبود نفوذپذیری و توسعه ریشه مورد توجه قرار گرفته است (Singh et al., 2019).

با این حال، اثر زیرشکنی تنها به اصلاح شرایط فیزیکی خاک محدود نمی‌شود و ممکن است با تغییر در توزیع ماده آلی، اختلاط لایه‌های خاک و دگرگونی در زیستگاه ریزجانداران همراه باشد (Yang et al., 2021). از این رو بررسی همزمان اثر سامانه‌های مختلف خاکورزی و عملیات زیرشکنی بر مجموعه‌ای از شاخص‌های کیفیت خاک اهمیت ویژه‌ای دارد.

با وجود مطالعات متعدد درباره اثر خاک‌ورزی بر ویژگی‌های خاک، هنوز اطلاعات کمی درباره اثر همزمان سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی، زیرشکنی و کشت گلرنگ بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک وجود دارد. این موضوع به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک اهمیت دارد؛ زیرا از یک سو خاک‌ورزی حفاظتی می‌تواند به حفظ ماده آلی و پایداری ساختمان خاک کمک کند و از سوی دیگر، فشردگی خاک ممکن است توسعه ریشه و کارایی این سامانه‌ها را محدود سازد. در چنین شرایطی، زیرشکنی می‌تواند با کاهش محدودیت‌های فیزیکی خاک، و گلرنگ نیز به دلیل برخورداری از ریشه عمیق و سازگاری با تنش خشکی، نقش مهمی در بهبود شرایط خاک و استفاده از منابع لایه‌های عمقی داشته باشد. بنابراین، نوآوری این پژوهش در بررسی همزمان و مقایسه‌ای اثر خاک‌ورزی، زیرشکنی و حضور گلرنگ بر مجموعه‌ای از شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک است. این پژوهش با هدف تعیین ترکیب مدیریتی مناسب برای بهبود کیفیت خاک و افزایش پایداری تولید گلرنگ در شرایط نیمه‌خشک انجام شد.

ویرایش اولیه

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی پاسخ گلرنگ به سامانه‌های مختلف خاکورزی و استفاده از زیرشکن، آزمایشی مزرعه‌ای در سال زراعی ۱۴۰۳–۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه رازی کرمانشاه اجرا شد. مزرعه دارای سابقه ۷ ساله مدیریت حفاظتی بوده و در اقلیم نیمه‌خشک سرد، در ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا و مختصات جغرافیایی ″۲۱ ′۱۹ °۳۴ شمالی و ″۷ ′۶ °۴۷ شرقی قرار دارد.

آزمایش به‌صورت کرت‌های دوبار خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل سامانه خاک‌ورزی در سه سطح بی‌خاک‌ورزی، خاک‌ورزی کاهشی و خاک‌ورزی مرسوم بود. عامل فرعی شامل کاربرد و عدم کاربرد زیرشکن و عامل فرعیِ فرعی شامل دو سطح گیاه، یعنی کشت گلرنگ و بدون کشت، در نظر گرفته شد. ابعاد کرت‌ها شامل طول ۵ متر و عرض ۲/۲ متر بود و برای جلوگیری از تداخل تیمارها، فاصله ۱ متری بین کرت‌ها و تکرارها در نظر گرفته شد.

پیش از کشت، خاک مزرعه در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن (جدول ۱) تعیین گردید (Carter & Gregorich, 2007). عملیات زیرشکنی قبل از کاشت و در رطوبت مناسب خاک فقط برای یک‌بار انجام شد و عمق کار ادوات حدود ۶۰ سانتی‌متر و به صورت عمقی بود (این عملیات ماهیت کلی خاک‌ورزی حفاظتی را نقض نمی‌کند، بلکه یک عملیات تکمیلی برای کاهش تراکم عمقی است). در سامانه مرسوم، خاک با گاوآهن برگردان‌دار شخم و سپس دیسک شد. در سامانه کاهشی، تنها یک مرحله چیزل‌کاری انجام گرفت، در حالی که در سامانه بی‌خاک‌ورزی، هیچ‌گونه عملیات مکانیکی خاک انجام نشد.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شاهد مزرعه آزمایشی در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری پیش از کشت گلرنگ

ویژگی	واحد	مقدار
بافت خاک	–	لومی رسی
pH	–	۷/۴
هدایت الکتریکی (EC)	$dS.\ m^{-1}$	۰/۸۶
کربن آلی (OC)	%	۰/۹۷
نیتروژن کل (N)	%	۰/۰۹۷
پتاسیم قابل جذب (K)	$mg.\ kg^{-1}$	۴۸۰
فسفر قابل جذب (P)	$mg.\ kg^{-1}$	۱۲

نکته: داده‌های جدول ۱ مربوط به نمونه خاک شاهد مزرعه آزمایشی بوده و صرفاً برای توصیف عمومی شرایط اولیه خاک منطقه ارائه شده‌اند. این داده‌ها برای مقایسه تفکیکی بین کرت‌های دارای سابقه مدیریتی مختلف تهیه نشده‌اند.

کاشت گلرنگ با دستگاه کشت مستقیم آسکه ۲۲۰۰ و بدون جابه‌جایی بقایای گیاهی سطحی صورت گرفت. سایر عملیات زراعی در تمامی تیمارها به‌صورت یکنواخت اجرا شد. میزان بذر مصرفی ۲۰ کیلوگرم در هکتار از رقم فرامان بود. پس از برداشت گلرنگ، نمونه‌برداری خاک از هر کرت و در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر انجام شد (نمونه‌برداری خاک بلافاصله پس از برداشت گلرنگ انجام شد). نمونه‌ها پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، برای تعیین خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک مورد استفاده قرار گرفتند. واکنش خاک (pH) و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع، به‌ترتیب با استفاده از pHمتر و EC متر، اندازه‌گیری شد (Carter & Gregorich, 2007). فسفر قابل جذب خاک (P) به روش اولسن و پس از استخراج با محلول بی‌کربنات سدیم تعیین گردید، همچنین پتاسیم قابل جذب (K) نیز پس از عصاره‌گیری با استات آمونیوم با استفاده از فلیم‌فتومتر اندازه‌گیری شد (Carter & Gregorich, 2007). مقدار کربن آلی خاک (OC) با روش واکلی–بلک و نیتروژن کل (N) به روش کجلدال اندازه‌گیری شد (Alef & Nannipieri, 1995). ماده آلی خاک (OM) بر اساس کربن آلی و با ضریب ۱/۷۲ درصد محاسبه گردید (Alef & Nannipieri, 1995). شاخص‌های فیزیکی خاک شامل میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها (MWD) با روش الک‌تر و بر اساس توزیع خاکدانه‌های پایدار در آب و درصد رس قابل انتشار در آب (WDC) به روش هیدرومتری تعیین شدند (Carter & Gregorich, 2007). برای ارزیابی فعالیت زیستی خاک، تنفس پایه (BR) از طریق اندازه‌گیری دی اکسید کربن آزادشده از نمونه‌های خاک طی انکوباسیون کنترل‌شده و بدون افزودن سوبسترا اندازه‌گیری شد و تنفس ناشی از سوبسترا (SIR) پس از

ویرایش اولیه

افزودن سوبسترای گلوکز، و اندازه‌گیری دی اکسید کربن آزادشده طی انکوباسیون تعیین گردید، همچنین کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) به روش گازدهی با کلروفرم و خوابانیدن نمونه‌ها به مدت ۱۰ روز اندازه‌گیری گردید (Alef & Nannipieri, 1995; Carter & Gregorich, 2007). خواباندن نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در تاریکی انجام شد.

پیش از تجزیه و تحلیل آماری، نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگروف - اسمیرونوف و یکنواختی واریانس‌ها با آزمون لون در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۷ بررسی شد. تحلیل اصلی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹,۴ و بر اساس مدل مناسب طرح کرت‌های دوبار خردشده انجام گرفت. مقایسه میانگین تیمارها با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت پذیرفت. ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد.

یافته‌های پژوهش

pH خاک

نتایج تجزیه واریانس تیمارهای آزمایشی نشان داد که تأثیر سامانه‌های خاکورزی، زیرشکن و نوع محصول و اثرات متقابل تیمارها بر مقدار pH خاک معنی‌دار نبودند (جدول ۲).

هدایت الکتریکی خاک

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر سامانه‌های خاکورزی، نوع محصول و اثرات متقابل سامانه‌های خاکورزی و نوع محصول بر هدایت الکتریکی خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد و باقی اثرات ساده و متقابل تیمارها معنی‌دار نبودند (جدول ۲). بیشترین هدایت الکتریکی خاک در خاکورزی مرسوم به میزان ۰/۳۴ دسی‌زیمنس بر متر و کمترین مقدار هدایت الکتریکی خاک در سامانه بی‌خاکورزی و به میزان ۰/۲۷ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری گردید (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کشت گیاه گلرنگ موجب کاهش هدایت الکتریکی خاک می‌شود و بیشترین هدایت الکتریکی خاک، در تیمار بدون کشت به میزان ۰/۳۴ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد (جدول ۴).

نتایج اثر متقابل سامانه‌های خاکورزی و نوع محصول نشان داد که بیشترین هدایت الکتریکی خاک در تیمار خاکورزی مرسوم و بدون کشت گیاه، به میزان ۰/۳۶ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در سامانه بی‌خاکورزی و بدون کشت گیاه، به میزان ۰/۲۷ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری گردید. همچنین در تمامی سامانه‌های خاکورزی، کشت گلرنگ نسبت به تیمار بدون کشت موجب کاهش هدایت الکتریکی خاک شد (جدول ۵).

رس قابل انتشار در آب

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر سامانه‌های خاکورزی و نوع محصول بر درصد رس قابل انتشار در آب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد و باقی اثرات ساده و متقابل تیمارهای آزمایشی معنی‌دار نبودند (جدول ۲). نتایج تجزیه داده‌ها نشان داد که سامانه‌های مختلف خاکورزی تأثیر معنی‌داری بر رس قابل انتشار در آب داشتند (جدول ۳). بیشترین مقدار رس قابل انتشار در آب در سامانه خاکورزی مرسوم و به میزان ۰/۵۵ درصد مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در سامانه بی‌خاکورزی و به میزان ۰/۴۷ درصد اندازه‌گیری گردید. سامانه خاکورزی کاهشی نیز با مقدار ۰/۴۹ درصد تفاوت معنی‌داری با سامانه بی‌خاکورزی نداشت (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر رس قابل انتشار در آب داشت (جدول ۴). بیشترین مقدار رس قابل انتشار در آب در تیمار بدون کشت و به میزان ۰/۵۹ درصد مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار کشت گلرنگ و به میزان ۰/۴۱ درصد اندازه‌گیری گردید (جدول ۴).

ویرایش شده

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

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		pH خاک	هدایت الکتریکی	رس قابل انتشار در آب	میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها	کربن آلی	ماده آلی
تکرار	۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳
خاکورزی	۲	۰/۰۰۰۳ ns	۰/۰۱ **	۰/۰۲ **	۰/۰۸ **	۰/۲۰ **	۰/۵۹ **
خطای کرت اصلی	۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۲
زیرشکن	۱	۰/۰۰۰۰۲ ns	۰/۰۰۰۸ ns	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۰۴ ns	۰/۰۷ **	۰/۲ **
خاکورزی × زیرشکن	۲	۰/۰۰۱ ns	۰/۰۰۰۰۱ ns	۰/۰۰۱ ns	۰/۰۰۰۲ ns	۰/۰۰۳ ns	۰/۰۰۹ ns
خطای کرت فرعی	۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶
محصول	۱	۰/۰۵ ns	۰/۰۰۴ **	۰/۳ **	۰/۰۳ **	۰/۰۹ **	۰/۳ **
خاکورزی × محصول	۲	۰/۰۰۸ ns	۰/۰۰۲ **	۰/۰۰۰۹ ns	۰/۰۰۳ **	۰/۰۳ **	۰/۱ **
زیرشکن × محصول	۱	۰/۰۰۰۱ ns	۰/۰۰۰۰۰۳ ns	۰/۰۰۰۳ ns	۰/۰۰۰۰۸ ns	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۰۵ ns
خاکورزی × زیرشکن × محصول	۲	۰/۰۰۴ ns	۰/۰۰۰۰۹ ns	۰/۰۰۰۰۷ ns	۰/۰۰۰۰۲ ns	۰/۰۰۷ ns	۰/۰۲ ns
خطا	۱۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳
درصد ضریب تغییرات	–	۳/۶۴	۳/۷۵	۸/۴۱	۴/۳۰	۴/۹۱	۴/۷۹

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

جدول ۳. تأثیر سامانه‌های مختلف خاکورزی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

سامانه‌های خاکورزی	هدایت الکتریکی	رس قابل انتشار در آب	میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها	کربن آلی	ماده آلی
	($dS.\ m^{-1}$)	(%)	(mm)	(%)	
خاکورزی مرسوم	۰/۳۴ a	۰/۵۵ a	۰/۳۲ c	۰/۵۴ c	۰/۹۳ c
خاکورزی کاهشی	۰/۳۲ b	۰/۴۹ b	۰/۴۱ b	۰/۷۰ b	۱/۲۰ b
بی‌خاکورزی	۰/۲۷ c	۰/۴۷ b	۰/۴۸ a	۰/۷۹ a	۱/۳۷ a

میانگین‌های موجود در هر ستون که با حروف مشابه مشخص شده‌اند، در آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند

جدول ۴. تأثیر نوع محصول بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

نوع محصول	هدایت الکتریکی	رس قابل انتشار در آب	میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها	کربن آلی	ماده آلی
	($dS.\ m^{-1}$)	(%)	(mm)	(%)	
بدون کشت	۰/۳۴ a	۰/۵۹ a	۰/۴۳ a	۰/۶۳ b	۱/۰۸ b
گلرنگ	۰/۳۲ b	۰/۴۱ b	۰/۳۷ b	۰/۷۳ a	۱/۲۵ a

میانگین‌های موجود در هر ستون که با حروف مشابه مشخص شده‌اند، در آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند

جدول ۵. اثر متقابل سامانه‌های مختلف خاکورزی و نوع محصول بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

سامانه‌های خاکورزی	نوع محصول	هدایت الکتریکی	میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها	کربن آلی	ماده آلی
		($dS.\ m^{-1}$)	(mm)	(%)	
خاکورزی مرسوم	بدون کشت	۰/۳۶ a	۰/۳۱ e	۰/۴۸ d	۰/۸۳ d
	گلرنگ	۰/۳۲ b	۰/۳۳ d	۰/۶۰ c	۱/۰۳ c
خاکورزی کاهشی	بدون کشت	۰/۳۳ b	۰/۳۶ c	۰/۷۰ b	۱/۲۱ b
	گلرنگ	۰/۳۰ c	۰/۴۵ b	۰/۶۹ b	۱/۱۹ b
بی‌خاکورزی	بدون کشت	۰/۲۷ d	۰/۴۵ b	۰/۶۹ b	۱/۲۰ b
	گلرنگ	۰/۲۸ d	۰/۵۲ a	۰/۸۹ a	۱/۵۴ a

میانگین‌های موجود در هر ستون که با حروف مشابه مشخص شده‌اند، در آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند

ویرایش اولیه نشده

میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر سامانه‌های خاکورزی، نوع محصول و اثرات متقابل سامانه‌های خاکورزی و نوع محصول بر میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد و باقی اثرات ساده و متقابل تیمارها معنی‌دار نبودند (جدول ۲). بیشترین میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها در سامانه بی‌خاکورزی و به میزان ۰/۴۸ میلی‌متر مشاهده شد. پس از آن سامانه خاکورزی کاهشی به میزان ۰/۴۱ میلی‌متر قرار گرفت و کمترین مقدار این شاخص در سامانه خاکورزی مرسوم و به میزان ۰/۳۳ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها داشت (جدول ۴). بیشترین مقدار میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها در تیمار بدون کشت و به میزان ۰/۴۳ میلی‌متر مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار کشت گلرنگ و به میزان ۰/۳۷ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید (جدول ۴).

نتایج حاصل از داده‌های جدول ۵ نشان داد که اثر متقابل سامانه‌های مختلف خاکورزی و نوع محصول بر میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها معنی‌دار بود. بیشترین مقدار میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها در تیمار بی‌خاکورزی و زیر کشت گلرنگ به میزان ۰/۵۲ میلی‌متر و کمترین مقدار میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها در تیمار خاکورزی مرسوم بدون کشت به میزان ۰/۳۱ میلی‌متر بدست آمد (جدول ۵).

کربن و ماده آلی خاک

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر سامانه‌های خاکورزی، نوع محصول و اثرات متقابل سامانه‌های خاکورزی و نوع محصول بر مقدار کربن و ماده آلی خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد و باقی اثرات ساده و متقابل تیمارها بر این صفت‌ها معنی‌دار نبودند (جدول ۲). بیشترین مقدار کربن آلی خاک در سامانه بی‌خاکورزی به میزان ۰/۷۹ درصد و کمترین مقدار آن در سامانه خاکورزی مرسوم به میزان ۰/۵۴ درصد مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار ماده آلی خاک در سامانه بی‌خاکورزی و به میزان ۱/۳۷ درصد و کمترین مقدار آن در سامانه خاکورزی مرسوم و به میزان ۰/۹۳ درصد به دست آمد، در حالی که سامانه خاکورزی کاهشی از نظر این دو شاخص در حد واسط قرار گرفت (جدول ۳).

بیشترین مقدار کربن آلی خاک در تیمار بدون زیرشکن و به میزان ۰/۷۲ درصد مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار با زیرشکن و به میزان ۰/۶۳ درصد به دست آمد. همچنین بیشترین مقدار ماده آلی خاک در تیمار بدون زیرشکن برابر با ۱/۲۴ درصد و کمترین مقدار آن در تیمار با زیرشکن و به میزان ۱/۰۹ درصد اندازه‌گیری شد (جدول ۶).

نتایج نشان داد که نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر کربن آلی و ماده آلی خاک داشت (جدول ۴). بیشترین مقدار کربن آلی خاک در تیمار گلرنگ و به میزان ۰/۷۳ درصد مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن به تیمار بدون کشت و به میزان ۰/۶۳ درصد اختصاص داشت. همچنین ماده آلی خاک در تیمار گلرنگ با مقدار ۱/۲۵ درصد به طور معنی‌داری بیشتر از تیمار بدون کشت با مقدار ۱/۰۸ درصد بود (جدول ۴).

جدول ۶. تأثیر استفاده از زیرشکن بر مقدار کربن و ماده آلی خاک

نوع محصول	کربن آلی	ماده آلی
	(%)	
بدون زیرشکن	۰/۷۲ a	۱/۲۴ a
با زیرشکن	۰/۶۳ b	۱/۰۹ b

میانگین‌های موجود در هر ستون که با حروف مشابه مشخص شده‌اند، در آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند

نتایج نشان داد که اثر متقابل سامانه‌های خاکورزی و نوع محصول تأثیر معنی‌داری بر کربن آلی و ماده آلی خاک داشت (جدول ۵). بیشترین مقدار کربن آلی خاک در تیمار بی‌خاکورزی همراه با کشت گلرنگ و به میزان ۰/۸۹ درصد مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار خاکورزی مرسوم در شرایط بدون کشت و به میزان ۰/۴۸ درصد به دست آمد. همچنین بیشترین مقدار

ویرایش نشده

ماده آلی خاک در تیمار بی‌خاکورزی همراه با گلرنگ و به میزان ۱/۵۴ درصد مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار خاکورزی مرسوم در شرایط بدون کشت و به میزان ۰/۸۳ درصد بود (جدول ۵).

نیتروژن خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد تاثیر سامانه‌های خاکورزی، استفاده از زیرشکن و نوع محصول بر مقدار نیتروژن خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود و اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی معنی‌دار نشدند (جدول ۷). بیشترین مقدار نیتروژن خاک در تیمار بی‌خاکورزی و به میزان ۰/۱۳ درصد مشاهده شد. کمترین مقدار نیتروژن خاک در تیمار خاکورزی مرسوم و به میزان ۰/۰۹ درصد به دست آمد (جدول ۸).

بیشترین مقدار نیتروژن در تیمار بدون زیرشکن و به میزان ۰/۱۲ درصد مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار استفاده از زیرشکن و به میزان ۰/۱۱ درصد به دست آمد (جدول ۹).

بیشترین مقدار نیتروژن در تیمار کشت گلرنگ و به میزان ۰/۱۲ درصد مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار بدون کشت و به میزان ۰/۱۱ درصد به دست آمد (جدول ۱۰).

جدول ۷. نتایج تجزیه واریانس تأثیر خاکورزی، زیرشکن و نوع گیاه بر مقدار نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک، تنفس میکروبی خاک، تنفس ناشی از سوبسترا و کربن زیست توده میکروبی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		نیتروژن	فسفر	پتاسیم	تنفس میکروبی خاک	تنفس ناشی از سوبسترا	کربن زیست‌توده میکروبی
تکرار	۲	۰/۰۰۰۰۵	۰/۳۷	۱۲/۳۳	۱۵/۴۳	۲۴/۳۶	۲۱/۰۶
خاکورزی	۲	۰/۰۰۶ **	۳۶/۴۲ **	۷۷۵۸۱/۷۵ **	۹۸۶۱/۸۵ **	۱۸۵۴۵۶/۳۶ **	۷۹۸۷۰/۹۰ **
خطای کرت اصلی	۴	۰/۰۰۰۰۱	۰/۳۱	۳۴/۵۸	۲۸/۹۲	۲۳/۲۴	۱۰/۱۶
زیرشکن	۱	۰/۰۰۲ **	۰/۶۷ ns	۵۱/۳۶ ns	۵۶/۲۵ ns	۱۱۳۷۷/۷۸ **	۱۵۴۹۸/۲۲ **
خاکورزی × زیرشکن	۲	۰/۰۰۰۰۸ ns	۰/۰۲ ns	۲۸۷/۱۹ ns	۲۴/۱۹ ns	۳۸۳۴/۳۶ **	۸۱۲۹/۷۰ **
خطای کرت فرعی	۶	۰/۰۰۰۰۴	۰/۱۲	۵۹۰/۸۳	۱۱/۴۲	۲۶/۵۰	۱۴/۰۲
محصول	۱	۰/۰۰۲ **	۲۲۲/۵۱ **	۱۲۰۰۶۲/۲۵ **	۱۳۷۲۸/۰۳ **	۴۸۰۷/۱۱ **	۱۱۴۸۱/۲۱ **
خاکورزی × محصول	۲	۰/۰۰۱	۵/۳۷ **	۱۹۰۵۹/۰۸ **	۱۴۲/۷۵ **	۳۲۴۹۹/۳۶ **	۲۴۷۵۲/۳۲ **
زیرشکن × محصول	۱	۰/۰۰۰۴ ns	۰/۳۸ ns	۲۹۴/۶۹ ns	۰/۵۲ ns	۲۹۷۰۰ ns	۲۵/۸۵ ns
خاکورزی × زیرشکن × محصول	۲	۰/۰۰۰۰۱ ns	۰/۰۸ ns	۳۴۴/۵۳ ns	۶/۸۵ ns	۳۰/۵۸ ns	۷۵/۸۲ ns
خطا	۱۲	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۱۹	۳۱۰/۴۴	۱۴/۶۳	۲۴/۳۳	۱۷/۹۸
درصد ضریب تغییرات	–	۴/۷۸	۳/۸۸	۶/۶۳	۲/۱۹	۱/۱۶	۱/۹۱

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

جدول ۸. تأثیر سامانه‌های مختلف خاکورزی بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک

سامانه‌های خاکورزی	نیتروژن (%)	فسفر (mg. kg^{-1})	پتاسیم (mg. kg^{-1})	تنفس میکروبی خاک (mg CO_2. kg^{-1}. day^{-1})	تنفس ناشی از سوبسترا (mg CO_2. kg^{-1}. day^{-1})	کربن زیست‌توده میکروبی (mg C. kg^{-1})
خاکورزی مرسوم	۰/۰۹ c	۹/۳۱ c	۴۰۶/۶۷ c	۱۹۷/۵۶ a	۵۴۵/۵۸ a	۱۴۶/۶۹ c
خاکورزی کاهشی	۰/۱۲ b	۱۱/۳۱ b	۴۸۳/۱۷ b	۱۸۳/۶۹ b	۴۳۲/۰۰ b	۲۰۹/۸۴ b
بی‌خاکورزی	۰/۱۳ a	۱۳/۲۴ a	۵۶۷/۴۲ a	۱۴۲/۴۴ c	۲۹۷/۲۵ c	۳۰۸/۵۶ a

میانگین‌های موجود در هر ستون که با حروف مشابه مشخص شده‌اند، در آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند

ویرایشی نشده

جدول ۹. تأثیر استفاده از زیرشکن بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک

نوع محصول	نیتروژن (%)	تنفس ناشی از سوبسترا (mg CO_2. kg^{-1}. day^{-1})	کربن زیست‌توده میکروبی (mg C. kg^{-1})
بدون زیرشکن	۰/۱۲ a	۴۰۷/۱۷ b	۲۴۲/۴۴ a
با زیرشکن	۰/۱۱ b	۴۴۲/۷۲ a	۲۰۰/۹۴ b

میانگین‌های موجود در هر ستون که با حروف مشابه مشخص شده‌اند، در آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند

جدول ۱۰. تأثیر نوع محصول بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک

نوع محصول	نیتروژن (%)	فسفر (mg. kg^{-1})	پتاسیم (mg. kg^{-1})	تنفس میکروبی خاک (mg CO_2. kg^{-1}. day^{-1})	تنفس ناشی از سوبسترا (mg CO_2. kg^{-1}. day^{-1})	کربن زیست‌توده میکروبی (mg C. kg^{-1})
بدون کشت	۰/۱۱ b	۱۳/۷۷ a	۵۴۳/۵۰ a	۱۹۴/۰۹ a	۴۳۶/۵۰ a	۲۰۳/۸۴ b
گلرنگ	۰/۱۲ a	۸/۸۰ b	۴۲۸/۰۰ b	۱۵۵/۰۴ b	۴۱۳/۳۹ b	۲۳۹/۵۵ a

میانگین‌های موجود در هر ستون که با حروف مشابه مشخص شده‌اند، در آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند

فسفر خاک

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر سامانه‌های خاکورزی، نوع محصول و اثرات متقابل سامانه‌های خاکورزی و نوع محصول بر مقدار فسفر خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد و باقی اثرات ساده و متقابل تیمارها بر این صفت‌ها معنی‌دار نبودند (جدول ۷). بیشترین مقدار فسفر در تیمار بی‌خاکورزی و به میزان ۱۳/۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد که از نظر آماری در سطح بالاتری نسبت به سایر تیمارها قرار گرفت. کمترین مقدار فسفر در تیمار خاکورزی مرسوم و به میزان ۹/۳۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد (جدول ۸).

نتایج نشان داد که اثر نوع گیاه بر فسفر خاک معنی‌دار بود، به‌طوری‌که بیشترین مقدار فسفر در تیمار بدون کشت به میزان ۱۳/۷۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین مقدار آن در تیمار کشت گیاه گلرنگ ۸/۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد (جدول ۱۰). نتایج اثر متقابل سامانه‌های مختلف خاکورزی و نوع محصول نشان داد که مقدار فسفر خاک تحت تأثیر این برهم‌کنش قرار گرفت (جدول ۱۱). در هر سه سامانه خاکورزی، کشت گلرنگ نسبت به تیمار بدون کشت موجب کاهش مقدار فسفر خاک شد. در خاکورزی مرسوم، فسفر از ۱۱/۴۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار بدون کشت به ۷/۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در کشت گلرنگ کاهش یافت. روند مشابهی در خاکورزی کاهشی نیز مشاهده شد، به‌طوری‌که مقدار فسفر از ۱۳/۳۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار بدون کشت به ۹/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار گلرنگ رسید. همچنین در سامانه بی‌خاکورزی، فسفر از ۱۶/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در بدون کشت به ۹/۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در کشت گلرنگ کاهش یافت. در مجموع، بیشترین مقدار فسفر مربوط به تیمار بی‌خاکورزی در شرایط بدون کشت و کمترین مقدار آن مربوط به خاکورزی مرسوم همراه با کشت گلرنگ بود (جدول ۱۱).

پتاسیم خاک

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر سامانه‌های خاکورزی، نوع محصول و اثرات متقابل سامانه‌های خاکورزی و نوع محصول بر مقدار پتاسیم خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد و باقی اثرات ساده و متقابل تیمارها بر این صفت‌ها معنی‌دار نبودند (جدول ۷). بیشترین مقدار پتاسیم در سامانه بی‌خاکورزی با ۵۶۷/۴۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با دو سامانه دیگر داشت. کمترین مقدار پتاسیم مربوط به خاکورزی مرسوم با ۴۰۶/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. به طور کلی، با کاهش شدت خاکورزی از مرسوم به کاهشی و سپس بی‌خاکورزی، مقدار پتاسیم خاک روند افزایشی نشان داد (جدول ۸).

بیشترین مقدار پتاسیم در تیمار بدون کشت با ۵۴۳/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد، در حالی که در تیمار کشت گلرنگ مقدار آن به ۴۲۸/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت (جدول ۱۰). این نتایج بیانگر آن است که استقرار گیاه گلرنگ موجب کاهش پتاسیم قابل اندازه‌گیری در خاک نسبت به شرایط بدون کشت شده است. بیشترین مقدار پتاسیم در تیمار بی‌خاکورزی با بدون کشت با ۶۷۰/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشت. در مقابل، کمترین مقدار

ویرایشی نشده

پتاسیم مربوط به تیمار خاکورزی مرسوم همراه با کشت گلرنگ با ۳۷۶/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (جدول ۱۱). در هر سه سامانه خاکورزی، کشت گلرنگ نسبت به تیمار بدون کشت موجب کاهش مقدار پتاسیم خاک شد (جدول ۱۱).

جدول ۱۱. اثر متقابل سامانه‌های مختلف خاکورزی و نوع محصول بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک

سامانه‌های خاکورزی	نوع محصول	فسفر (mg. kg^{-1})	پتاسیم (mg. kg^{-1})	تنفس میکروبی خاک (mg CO_2. kg^{-1}. day^{-1})	تنفس ناشی از سوبسترا (mg CO_2. kg^{-1}. day^{-1})	کربن زیست‌توده میکروبی (mg C. kg^{-1})
خاکورزی مرسوم	بدون کشت	۱۱/۴۳ c	۴۳۶/۶۷ c	۲۱۳/۱۷ a	۴۹۸/۵۰ b	۱۳۲/۱۸ e
	گلرنگ	۷/۱۸ e	۳۷۶/۶۷ d	۱۸۱/۹۴ c	۵۹۲/۶۶ a	۱۶۱/۲۰ d
خاکورزی کاهشی	بدون کشت	۱۳/۳۸ b	۵۲۳/۰۰ b	۲۰۴/۵۵ b	۴۶۱/۵۰ b	۲۳۵/۶۳ b
	گلرنگ	۹/۲۳ d	۴۴۳/۳۳ c	۱۶۲/۸۳ d	۴۰۲/۵۰ c	۱۸۴/۰۵ c
بی‌خاکورزی	بدون کشت	۱۶/۵۰ a	۶۷۰/۸۳ a	۱۶۴/۵۵ d	۳۴۹/۵۰ d	۲۴۳/۷۰ b
	گلرنگ	۹/۹۸ d	۴۶۴/۰۰ c	۱۲۰/۳۳ e	۲۴۵/۰۰ e	۳۷۳/۴۱ a

میانگین‌های موجود در هر ستون که با حروف مشابه مشخص شده‌اند، در آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند

تنفس میکروبی خاک

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر سامانه‌های خاکورزی، نوع محصول و اثرات متقابل سامانه‌های خاکورزی و نوع محصول بر مقدار تنفس میکروبی خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد و باقی اثرات ساده و متقابل تیمارها بر این صفت‌ها معنی‌دار نبودند (جدول ۷). بیشترین مقدار تنفس میکروبی خاک در سامانه خاکورزی مرسوم با ۱۹۷/۵۶ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار تنفس میکروبی خاک مربوط به سامانه خاکورزی کاهشی با ۱۴۲/۴۴ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز بود (جدول ۸).

بیشترین مقدار تنفس میکروبی خاک در تیمار بدون کشت با ۱۹۴/۰۹ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار تنفس میکروبی خاک در تیمار کشت گلرنگ با ۱۵۵/۰۴ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز به دست آمد (جدول ۱۰).

بیشترین مقدار تنفس میکروبی خاک در تیمار خاکورزی مرسوم همراه با بدون کشت با ۲۱۳/۱۷۷ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشت. پس از آن تیمار خاکورزی کاهشی بدون کشت به میزان ۲۰۴/۵۵ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز قرار گرفت. در مقابل، کمترین مقدار تنفس میکروبی خاک مربوط به تیمار بی‌خاکورزی همراه با کشت گلرنگ با ۱۲۰/۳۳ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز بود (جدول ۱۱).

تنفس ناشی از سوبسترا در خاک

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر سامانه‌های خاکورزی، استفاده از زیرشکن، نوع محصول و اثر متقابل سامانه‌های خاکورزی و نوع محصول و اثر متقابل سامانه‌های خاکورزی و استفاده از زیرشکن بر مقدار تنفس ناشی از سوبسترا در خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد و باقی اثرات متقابل تیمارها بر این صفت‌ها معنی‌دار نبودند (جدول ۷). بیشترین مقدار تنفس ناشی از سوبسترا در سامانه خاکورزی مرسوم با ۵۴۵/۵۸ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار این شاخص در سامانه بی‌خاکورزی با ۲۹۷/۲۵ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز به دست آمد (جدول ۸).

بیشترین مقدار تنفس ناشی از سوبسترا در تیمار با زیرشکن با ۴۴۲/۷۲ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد، در حالی که در تیمار بدون زیرشکن این مقدار ۴۰۷/۱۷ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز بود (جدول ۹).

ویرایشی نشده

کمترین مقدار تنفس ناشی از سوبسترا در تیمار کشت گلرنگ با ۴۱۳/۳۹ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد، در حالی که بیشترین مقدار آن در تیمار بدون کشت با ۴۳۶/۵۰ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز به دست آمد (جدول ۱۰).

بیشترین مقدار تنفس ناشی از سوبسترا در تیمار خاکورزی مرسوم همراه با کشت گلرنگ با ۵۹۲/۶۶ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار بی‌خاکورزی همراه با کشت گلرنگ با ۲۴۵/۰۰ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز به دست آمد (جدول ۱۱).

بیشترین مقدار تنفس ناشی از سوبسترا در تیمار خاکورزی مرسوم همراه با زیرشکن با ۵۸۳/۶۷ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن در تیمار بی‌خاکورزی بدون زیرشکن با ۲۹۲/۸۳ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر کیلوگرم خاک در روز به دست آمد (جدول ۱۲).

جدول ۱۲. اثر متقابل سامانه‌های مختلف خاکورزی و استفاده از زیرشکن بر ویژگی‌های زیستی خاک

سامانه‌های خاکورزی	نوع محصول	تنفس ناشی از سوبسترا ($mg\ CO_2.\ kg^{-1}.\ day^{-1}$)	کربن زیست‌توده میکروبی ($mg\ C.\ kg^{-1}$)
خاکورزی مرسوم	بدون زیرشکن	۵۰۷/۵۰ b	۱۵۴/۳۷ e
	با زیرشکن	۵۸۳/۶۷ a	۱۳۹/۰۰ f
خاکورزی کاهشی	بدون زیرشکن	۴۲۱/۱۶ d	۲۱۳/۶۸ d
	با زیرشکن	۴۴۲/۸۳ c	۲۰۶/۰۰ c
بی‌خاکورزی	بدون زیرشکن	۲۹۲/۸۳ f	۳۵۹/۲۸ a
	با زیرشکن	۳۰۱/۶۷ e	۲۵۷/۸۴ b

میانگین‌های موجود در هر ستون که با حروف مشابه مشخص شده‌اند در آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند

کربن زیست‌توده میکروبی

بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر سامانه‌های خاکورزی، استفاده از زیرشکن، نوع محصول و اثر متقابل سامانه‌های خاکورزی و نوع محصول و اثر متقابل سامانه‌های خاکورزی و استفاده از زیرشکن بر کربن زیست‌توده میکروبی در خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد و باقی اثرات متقابل تیمارها بر این صفت‌ها معنی‌دار نبودند (جدول ۷). بیشترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در تیمار بی‌خاکورزی با مقدار ۳۰۸/۵۶ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک مشاهده شد. کمترین مقدار این شاخص در سامانه خاک‌ورزی مرسوم با ۱۴۶/۶۹ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک به دست آمد (جدول ۸).

بر اساس نتایج، استفاده از زیرشکن تأثیر معنی‌داری بر کربن زیست‌توده میکروبی خاک داشت. مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در تیمار بدون زیرشکن ۲۴۲/۴۴ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک بود، در حالی که در تیمار همراه با زیرشکن این مقدار به ۲۰۰/۹۴ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک افزایش یافت (جدول ۹). بیشترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در تیمار کشت گلرنگ با ۲۳۹/۵۵ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک مشاهده شد، در حالی که در تیمار بدون کشت مقدار آن ۲۰۳/۸۴ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک بود (جدول ۱۰). اثر متقابل سامانه‌های خاک‌ورزی و نوع محصول بر کربن زیست‌توده میکروبی خاک معنی‌دار بود (جدول ۱۱). بیشترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در تیمار بی‌خاکورزی همراه با کشت گلرنگ با ۳۷۳/۴۱ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک مشاهده شد. کمترین مقدار این شاخص در تیمار خاک‌ورزی مرسوم بدون کشت با ۱۳۲/۱۸ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک به دست آمد، در حالی که در خاک‌ورزی مرسوم همراه با کشت گلرنگ مقدار آن به ۱۶۱/۲۰ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک افزایش یافت (جدول ۱۱).

بیشترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در تیمار بی‌خاکورزی بدون زیرشکن با ۳۵۹/۲۸ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک مشاهده شد. پس از آن تیمار بی‌خاکورزی همراه با زیرشکن با ۲۵۷/۸۴ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک قرار گرفت. کمترین مقدار این شاخص در تیمار خاک‌ورزی مرسوم همراه با زیرشکن با ۱۳۹/۰۰ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک به دست آمد، در حالی که در خاک‌ورزی مرسوم بدون زیرشکن مقدار آن ۱۵۴/۳۷ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم خاک بود (جدول ۱۲).

ویرایش نشده

بحث

مدیریت خاک‌ورزی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک است و می‌تواند از طریق تغییر در ساختار خاک، توزیع بقایای گیاهی، پویایی عناصر غذایی و فعالیت میکروبی، کیفیت خاک را تحت تأثیر قرار دهد (Lv et al., 2023). نتایج این پژوهش نشان داد که نوع سامانه خاک‌ورزی و حضور گیاه گلرنگ، به‌صورت جداگانه و متقابل، موجب تغییرات معنی‌داری در برخی ویژگی‌های خاک طی یک فصل زراعی شد. بنابراین، یافته‌های حاضر بیانگر پاسخ کوتاه‌مدت برخی شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک به مدیریت خاک‌ورزی و حضور گیاه گلرنگ است.

pH خاک

اگرچه pH خاک در این پژوهش تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی تغییر معنی‌داری نشان نداد، این عدم پاسخ می‌تواند به ویژگی‌های ذاتی خاک‌های مناطق نیمه‌خشک نسبت داده شود. در این خاک‌ها، وجود مقادیر قابل‌توجه کربنات‌ها و ظرفیت بافری بالا موجب می‌شود که تغییرات ناشی از مدیریت خاک یا استقرار گیاهان به‌راحتی در واکنش خاک منعکس نشود. به بیان دیگر، سامانه‌های خاک‌ورزی و حضور گلرنگ ممکن است بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک اثرگذار باشند، اما pH به دلیل پایداری شیمیایی بیشتر و توان بالای بافری خاک، در دامنه تغییرات کوتاه‌مدت و متوسط، پاسخ معنی‌داری نشان ندهد. از این رو، ثبات pH در این آزمایش را می‌توان نشانه‌ای از قدرت بافری خاک و نقش کربنات‌ها در تعدیل تغییرات احتمالی واکنش خاک دانست (Dvořáčková et al., 2022).

هدایت الکتریکی

هدایت الکتریکی خاک شاخصی از غلظت یون‌های محلول در محلول خاک است و می‌تواند تحت تأثیر فرایندهایی مانند معدنی‌شدن مواد آلی، آزادسازی و جذب عناصر غذایی، جابه‌جایی املاح، وضعیت رطوبتی خاک و مدیریت آبیاری قرار گیرد (Carmo et al., 2016). در این پژوهش، بیشترین مقدار هدایت الکتریکی در سامانه خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن مربوط به تیمار بی‌خاک‌ورزی بود. افزایش هدایت الکتریکی در خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند ناشی از اختلال بیشتر خاک، افزایش تماس خاک با هوا و تسریع تجزیه بقایای آلی باشد که در نهایت آزادسازی یون‌های محلول در خاک را افزایش می‌دهد (Rahman et al., 2008). افزون بر این، برهم خوردن ساختمان خاک در این سامانه ممکن است توزیع املاح در لایه‌های خاک را تغییر داده و موجب افزایش غلظت یون‌ها در لایه نمونه‌برداری‌شده شود (Liu et al., 2024). در مقابل، در سامانه بی‌خاک‌ورزی، به دلیل حفظ نسبی ساختمان خاک، کاهش شدت اختلال مکانیکی و کندتر بودن فرایندهای معدنی‌شدن، آزادسازی یون‌ها می‌تواند تدریجی‌تر باشد و در نتیجه هدایت الکتریکی در سطح پایین‌تری قرار گیرد (Paz et al., 2023).

بررسی اثر متقابل تیمارها نشان داد که بیشترین مقدار هدایت الکتریکی در ترکیب خاک‌ورزی مرسوم و تیمار بدون کشت مشاهده شد. در این شرایط، اختلال مکانیکی خاک می‌تواند آزادسازی یون‌ها را افزایش دهد، در حالی که به دلیل نبود گیاه، جذب عناصر و یون‌های محلول توسط ریشه انجام نمی‌شود و بنابراین امکان تجمع نسبی یون‌ها در محلول خاک بیشتر است (Warkentin, 2001). حضور گلرنگ در برخی تیمارها با کاهش نسبی هدایت الکتریکی همراه بود؛ با این حال، این کاهش نباید به‌صورت قطعی به کاهش شوری خاک یا اثر مستقل گیاه نسبت داده شود. زیرا هدایت الکتریکی علاوه بر جذب یون‌ها توسط ریشه، به عواملی مانند مقدار و توزیع رطوبت خاک، جابه‌جایی و آبشویی املاح و الگوی مصرف آب نیز وابسته است. بنابراین، کاهش نسبی EC در تیمارهای دارای گلرنگ احتمالاً می‌تواند ناشی از ترکیبی از جذب عناصر غذایی توسط ریشه، فعالیت ریزوسفری، تغییر در مصرف آب و جابه‌جایی املاح در خاک باشد (Cochavi et al., 2020; Dakora & Phillips, 2002). ازاین‌رو، نتایج حاضر تنها نشان‌دهنده تغییرات کوتاه‌مدت هدایت الکتریکی در لایه نمونه‌برداری‌شده است و برای نتیجه‌گیری قطعی درباره نقش گلرنگ در کاهش شوری خاک، بررسی‌های دقیق‌تر بر اساس پایش رطوبت، رژیم آبیاری و دینامیک املاح در اعماق مختلف خاک ضروری است.

ویراستاری نشده

درصد رس قابل انتشار در آب

رس قابل انتشار در آب شاخصی از میزان پایداری ذرات ریز خاک در برابر پراکنش در محیط آبی است و به طور مستقیم تحت تأثیر وضعیت ساختمان خاک، نیروهای پیوند دهنده بین ذرات و شدت اختلال مکانیکی خاک قرار دارد. نتایج نشان داد که سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی موجب تغییر در مقدار رس قابل انتشار در آب شدند. در سامانه خاک‌ورزی مرسوم، به دلیل اختلال شدید مکانیکی و تخریب نسبی خاکدانه‌ها، پیوند بین ذرات خاک تضعیف شده و در نتیجه ذرات ریز رس در تماس با آب راحت‌تر از یکدیگر جدا شده و پراکنده می‌شوند. این امر می‌تواند باعث افزایش مقدار رس قابل انتشار در آب شود (Jin et al., 2023; Peng et al., 2024).

در مقابل، در سامانه بی‌خاکورزی به دلیل حداقل برهم‌خوردگی خاک و حفظ پیوستگی خاکدانه‌ها، نیروهای نگهدارنده بین ذرات خاک بهتر حفظ می‌شوند و در نتیجه پایداری خاکدانه‌ها در برابر پراکنش افزایش می‌یابد (Jimenez et al., 2025). همچنین تجمع بیشتر مواد آلی و ترکیبات آلی–معدنی در این سامانه می‌تواند به عنوان عامل پیوند دهنده بین ذرات عمل کرده و از پراکنش ذرات رس در محیط آبی جلوگیری کند (Xue et al., 2019). بنابراین، کاهش شدت خاک‌ورزی با افزایش پایداری ساختمان خاک می‌تواند مقدار رس قابل انتشار در آب را کاهش داده و مقاومت خاک در برابر پراکنش و تخریب ساختاری را افزایش دهد (Daraghmeh et al., 2009).

میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها

نتایج نشان داد که سامانه‌های با اختلال کمتر خاک، به‌ویژه بی‌خاک‌ورزی، دارای مقادیر بالاتر میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها بودند. در این سامانه‌ها، کاهش آشفتگی مکانیکی خاک موجب حفظ خاکدانه‌های درشت‌تر و کاهش تخریب فیزیکی ساختمان خاک می‌شود. افزون بر این، باقی‌ماندن بقایای گیاهی در سطح خاک و تجزیه آن‌ها می‌تواند از طریق افزایش مواد آلی و تولید ترکیبات چسبنده زیستی، به اتصال ذرات خاک و پایداری خاکدانه‌ها کمک کند (Rabbi et al., 2024). در مقابل، خاک‌ورزی مرسوم با شکستن مداوم خاکدانه‌ها، افزایش تماس مواد آلی با اکسیژن و کاهش پایداری ساختمان خاک، می‌تواند موجب کاهش میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها شود (Weidhuner et al., 2021). بنابراین، افزایش میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها در سامانه بی‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم را می‌توان عمدتاً ناشی از کاهش اختلال مکانیکی و حفظ بهتر پیوستگی خاکدانه‌ها دانست.

با وجود این، نتایج اثر اصلی نوع محصول نشان داد که میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها در تیمار کشت گلرنگ کمتر از تیمار بدون کشت بود. این کاهش می‌تواند به اثرات کوتاه‌مدت رشد ریشه و زمان نمونه‌برداری مربوط باشد. از آنجا که نمونه‌برداری خاک بلافاصله پس از برداشت گلرنگ انجام شد، احتمالاً فرصت کافی برای بازآرایی و پایدارسازی مجدد خاکدانه‌ها فراهم نشده بود. همچنین رشد و نفوذ ریشه گلرنگ، به‌ویژه به دلیل سامانه ریشه‌ای عمیق آن، می‌تواند در کوتاه‌مدت موجب فشار مکانیکی، ایجاد شکاف‌های موضعی و خردشدگی بخشی از خاکدانه‌های ضعیف شود. بنابراین، کاهش میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها در تیمار گلرنگ نسبت به شاهد لزوماً بیانگر تخریب پایدار ساختمان خاک نیست، بلکه می‌تواند بازتاب پاسخ موقتی خاک به فعالیت ریشه و زمان نمونه‌برداری بلافاصله پس از برداشت باشد (Almagro et al., 2023; Zheng et al., 2023).

از سوی دیگر، معنی‌دار شدن اثر متقابل سامانه خاک‌ورزی و نوع محصول نشان داد که پاسخ میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها به حضور گلرنگ در همه سامانه‌ها یکسان نبوده است. بیشترین مقدار میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها در تیمار بی‌خاک‌ورزی همراه با کشت گلرنگ مشاهده شد؛ این موضوع نشان می‌دهد که در شرایط حداقل اختلال مکانیکی، اثرات مثبت بقایای گیاهی و فعالیت ریشه بر پایداری خاکدانه‌ها بهتر حفظ شده است. در مقابل، در سامانه‌های دارای اختلال بیشتر، اثرات مکانیکی خاک‌ورزی می‌تواند بخشی از اثرات مثبت ریشه و مواد آلی را خنثی کند. بنابراین، اثر گلرنگ بر پایداری خاکدانه‌ها وابسته به نوع سامانه خاک‌ورزی بوده و در شرایط بی‌خاک‌ورزی مطلوب‌تر ظاهر شده است.

ویرایش نشده

کربن آلی و ماده آلی خاک

کربن آلی و ماده آلی خاک از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت و حاصلخیزی خاک به شمار می‌روند و نقش اساسی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارند. این دو شاخص به طور مستقیم تحت تأثیر میزان ورود بقایای گیاهی به خاک، سرعت تجزیه آن‌ها و شدت اختلال ناشی از عملیات خاک‌ورزی قرار می‌گیرند (Xu et al., 2024). نتایج این پژوهش نشان داد که سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی موجب تغییرات معنی‌داری در مقدار کربن آلی و ماده آلی خاک شدند، به‌طوری که مقادیر بالاتر این شاخص‌ها در سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی، به‌ویژه بی‌خاکورزی مشاهده شد (Blanco-Canqui & Lal, 2008).

در سامانه بی‌خاکورزی، بقایای گیاهی عمدتاً در سطح خاک باقی می‌مانند و تجزیه آن‌ها به صورت تدریجی انجام می‌شود. این شرایط موجب افزایش تدریجی ورود ترکیبات آلی به خاک و در نتیجه تجمع بیشتر کربن آلی و ماده آلی در لایه سطحی می‌شود. علاوه بر این، حفظ ساختار خاک و پایداری بیشتر خاکدانه‌ها در این سامانه می‌تواند از تجزیه سریع ماده آلی جلوگیری کرده و به حفاظت فیزیکی ترکیبات آلی درون خاکدانه‌ها کمک کند (Franzluebbers, 2004).

در مقابل، در سامانه خاک‌ورزی مرسوم به دلیل اختلاط شدید خاک و افزایش هوادهی، سرعت فعالیت میکروبی و معدنی‌شدن مواد آلی افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند منجر به تجزیه سریع‌تر بقایای آلی و در نتیجه کاهش ذخایر کربن آلی و ماده آلی خاک شود. بنابراین، در چارچوب نتایج کوتاه‌مدت این پژوهش، کاهش شدت خاک‌ورزی با مقادیر بالاتر کربن آلی و ماده آلی خاک همراه بود. با این حال، تأیید نقش پایدار سامانه‌های حفاظتی در افزایش ذخیره کربن آلی و ماده آلی خاک نیازمند پایش چندساله و ارزیابی بلندمدت تغییرات کربن در خاک است (Seitz et al., 2018; Toth et al., 2025).

نیتروژن کل خاک

نیتروژن خاک ارتباط نزدیکی با مقدار ماده آلی خاک دارد، زیرا بخش عمده نیتروژن در ترکیبات آلی خاک ذخیره می‌شود. نتایج نشان داد که روند تغییرات نیتروژن کل تا حد زیادی مشابه کربن آلی بود. در سامانه‌های با حداقل خاک‌ورزی، تجمع بقایای گیاهی و مقادیر بالاتر ماده آلی می‌تواند در دوره مورد بررسی با حفظ بیشتر نیتروژن کل خاک همراه شده باشد. در مقابل، در خاک‌ورزی مرسوم به دلیل معدنی‌شدن سریع‌تر مواد آلی و احتمال اتلاف نیتروژن از طریق آبشویی یا فرآیندهای میکروبی، مقدار نیتروژن کل کمتر بود. حضور گیاه نیز با جذب نیتروژن از خاک می‌تواند بر پویایی این عنصر تأثیر بگذارد (Özbolat et al., 2023; Paltineanu et al., 2024).

فسفر قابل جذب

فسفر یکی از عناصر غذایی کم‌تحرک در خاک است و توزیع آن تا حد زیادی تحت تأثیر مدیریت خاک و فعالیت ریشه‌ها قرار دارد. در سامانه‌های بی‌خاکورزی، به دلیل تجمع بقایا و مواد آلی در سطح خاک، فسفر تمایل دارد در لایه‌های سطحی متمرکز شود. همچنین فعالیت ریشه و ترشحات ریزوسفری می‌تواند به افزایش قابلیت دسترسی فسفر برای گیاه کمک کند (Díaz-Zorita & Grove, 2002). در مقابل، خاک‌ورزی مرسوم با مخلوط کردن لایه‌های خاک ممکن است توزیع فسفر را در عمق خاک یکنواخت‌تر کند، اما در برخی موارد می‌تواند موجب کاهش تمرکز آن در لایه سطحی شود (Li et al., 2019; Vu et al., 2009).

در حضور گلرنگ، کاهش فسفر قابل جذب خاک را می‌توان تنها به برداشت مستقیم توسط گیاه نسبت نداد؛ بلکه ترشحات ریشه‌ای این گیاه و تغییرات ایجادشده در ریزوسفر نیز می‌توانند نقش مهمی داشته باشند. ترشحات ریشه‌ای با ایجاد اسیدی شدن موضعی در اطراف ریشه و آزادسازی ترکیبات آلی، امکان حل شدن بخشی از فسفر تثبیت‌شده را فراهم می‌کنند و در نتیجه دسترسی گیاه به فسفر را افزایش می‌دهند. از سوی دیگر، به دلیل ریشه‌های عمیق گلرنگ، بخش قابل توجهی از جذب می‌تواند از لایه‌های پایین‌تر خاک صورت گیرد؛ بنابراین کاهش فسفر اندازه‌گیری‌شده در لایه صفر تا ۳۰ سانتی‌متری لزوماً فقط بازتاب برداشت سطحی نیست، بلکه می‌تواند ناشی از انتقال و جذب عمقی نیز باشد (Kruthika et al., 2024; Pantigoso et al., 2020). بر این اساس، کاهش فسفر قابل جذب در تیمارهای دارای گلرنگ را باید حاصل برهم‌کنش جذب گیاه، فعالیت ریزوسفری و جابجایی عمقی عناصر غذایی در پروفیل خاک دانست.

ویراستاری نشده

پتاسیم قابل جذب

نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت خاک‌ورزی می‌تواند بر میزان پتاسیم قابل جذب خاک اثر معنی‌داری داشته باشد. این تغییرات را نمی‌توان صرفاً به آزاد شدن پتاسیم از بقایای گیاهی نسبت داد، زیرا پتاسیم در بافت گیاه عمدتاً به صورت یونی و محلول در واکوئل‌ها ذخیره شده و پس از مرگ بافت گیاهی یا در مراحل اولیه تجزیه به‌سرعت آزاد می‌شود؛ بنابراین بقایای گیاهی معمولاً منبع تدریجی و بلندمدت تأمین پتاسیم محسوب نمی‌شوند (Marschner & Marschner, 2011).

به نظر می‌رسد تفاوت مشاهده‌شده میان سامانه‌های خاک‌ورزی بیشتر ناشی از تغییر در توزیع عمقی پتاسیم، شدت اختلاط خاک و تغییرات احتمالی در فرایندهای جذب–واجذب (تبادل کاتیونی) مرتبط با کانی‌های رسی و ماده آلی باشد. در سامانه بی‌خاک‌ورزی، به دلیل عدم اختلاط خاک و تمرکز مواد آلی و عناصر غذایی در سطح، پتاسیم تبادلی تمایل به تجمع در لایه‌های سطحی خاک دارد. در مقابل، در خاک‌ورزی مرسوم به علت اختلاط لایه‌های خاک در عمق شخم، توزیع پتاسیم در پروفیل خاک یکنواخت‌تر شده و غلظت آن در سطح خاک کاهش می‌یابد (Lemanowicz et al., 2025; Mühlbachová et al., 2024). شایان ذکر است که در این پژوهش ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و کربنات کلسیم معادل (CCE) اندازه‌گیری نشدند؛ ازاین‌رو، تفسیر نقش این ویژگی‌ها در پویایی پتاسیم باید با احتیاط و به‌صورت کیفی انجام شود و در چارچوب داده‌های حاضر امکان قضاوت قطعی درباره سهم ظرفیت تبادل کاتیونی و کربنات کلسیم معادل در الگوهای مشاهده‌شده وجود ندارد.

در مورد اثر گلرنگ، کاهش پتاسیم قابل جذب را نیز می‌توان فراتر از برداشت مستقیم گیاه تفسیر کرد. ریشه‌های عمیق گلرنگ قادرند از لایه‌های پایین‌تر خاک پتاسیم را جذب کنند و بدین ترتیب باعث کاهش غلظت اندازه‌گیری‌شده در نمونه سطحی شوند. علاوه بر این، تغییرات ریزوسفری ناشی از فعالیت ریشه و ترشحات آن می‌تواند بر تعادل یونی و تحرک پتاسیم در ناحیه ریشه اثر بگذارد. بنابراین، کاهش پتاسیم در حضور گلرنگ می‌تواند نتیجه هم‌زمان جذب عمقی، برداشت گیاه و تغییر در پویایی پتاسیم در ریزوسفر باشد، نه صرفاً مصرف مستقیم آن از لایه نمونه‌برداری‌شده (Abbadi et al., 2019).

علاوه بر این، تفاوت در رطوبت خاک، شدت فرسایش و شرایط فیزیکی ایجادشده در اثر نوع خاک‌ورزی نیز می‌تواند بر رفتار پتاسیم در خاک اثرگذار باشد. از آنجا که بخش عمده پتاسیم قابل جذب به صورت پتاسیم تبادلی روی سطوح کانی‌های رسی و مواد آلی نگهداری می‌شود، هرگونه تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌تواند تعادل بین شکل‌های مختلف پتاسیم و در نتیجه قابلیت جذب آن توسط گیاه را تحت تأثیر قرار دهد (Deubel et al., 2011).

همچنین، نتایج یک تحقیق نشان داد که در سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی، پتاسیم عمدتاً در لایه‌های سطحی خاک تجمع می‌یابد و غلظت آن با افزایش عمق کاهش پیدا می‌کند. این پژوهش بیان کرد که چنین لایه‌بندی‌ای را نمی‌توان تنها به تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی نسبت داد، بلکه نحوه توزیع عناصر در پروفیل خاک و محدود بودن جابجایی عمقی پتاسیم نیز نقش مهمی در این فرایند دارند. نویسندگان همچنین اشاره کردند که حتی در شرایطی که پتاسیم در سطح خاک تجمع یافته است، خشک شدن سریع‌تر لایه‌های سطحی می‌تواند انتقال پتاسیم در محلول خاک به سمت ریشه را محدود کند و در نتیجه دسترسی واقعی گیاه به این عنصر کاهش یابد. بنابراین، نوع خاک‌ورزی علاوه بر تغییر در الگوی توزیع پتاسیم، می‌تواند بر کارایی جذب این عنصر توسط گیاه نیز اثرگذار باشد (Artuso et al., 2024).

تنفس میکروبی خاک

در مطالعه حاضر، بیشترین مقدار تنفس میکروبی خاک در سامانه خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد. این افزایش می‌تواند ناشی از برهم‌خوردگی مکانیکی خاک، افزایش هوادهی و اختلاط بقایای گیاهی با خاک باشد که در کوتاه‌مدت دسترسی ریزجانداران به ترکیبات کربنی قابل تجزیه را افزایش داده و موجب تشدید معدنی‌شدن مواد آلی و آزادسازی بیشتر دی اکسید کربن می‌شود. بنابراین، افزایش تنفس میکروبی در خاک‌ورزی مرسوم الزاماً به معنی بهبود وضعیت زیستی خاک نیست، بلکه می‌تواند بازتاب مصرف سریع‌تر منابع کربنی و کاهش پایداری کربن آلی خاک باشد (Guo et al., 2013; Hendrix et al., 1988).

در مقابل، در سامانه‌های با اختلال کمتر مانند بی‌خاک‌ورزی، بقایای گیاهی عمدتاً در سطح خاک باقی می‌مانند و تجزیه آن‌ها به‌صورت تدریجی‌تر انجام می‌شود. در چنین شرایطی، تنفس میکروبی ممکن است در کوتاه‌مدت کمتر از خاک‌ورزی مرسوم باشد،

ویرایش اولیه

زیرا تماس مستقیم بقایا با خاک، شدت هوادهی و دسترسی فوری میکروارگانیسم‌ها به کربن قابل تجزیه کاهش می‌یابد. با این حال، حفظ ساختار خاک و پایداری بیشتر خاکدانه‌ها در سامانه‌های حفاظتی می‌تواند به حفظ بهتر ساختار خاک و ماده آلی کمک کند؛ هرچند تأیید این اثرات در مقیاس بلندمدت نیازمند مطالعات چندساله است (Li et al., 2023; Yudina & Kuzyakov, 2023). نتایج برهم‌کنش خاک‌ورزی و نوع محصول نیز نشان داد که بیشترین تنفس میکروبی در تیمار خاک‌ورزی مرسوم و بدون کشت مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار مربوط به بی‌خاک‌ورزی همراه با کشت گلرنگ بود. بالاتر بودن تنفس در تیمار بدون کشت می‌تواند به نبود جذب گیاهی و باقی‌ماندن بخشی از کربن و عناصر غذایی قابل دسترس برای فعالیت میکروبی مربوط باشد. در مقابل، در تیمار کشت گلرنگ، رقابت گیاه و میکروارگانیسم‌ها برای منابع قابل دسترس، جذب عناصر غذایی توسط گیاه و تغییر شرایط ریزوسفری ممکن است شدت تنفس پایه را کاهش داده باشد. بنابراین، اثر نوع محصول باید با احتیاط تفسیر شود، زیرا تفاوت میان تیمار کشت گلرنگ و بدون کشت تنها به خاک‌ورزی مربوط نیست، بلکه حضور یا عدم حضور گیاه نیز در آن نقش دارد.

از دیدگاه اکولوژی میکروبی، اگر افزایش تنفس پایه در خاک‌ورزی مرسوم همزمان با کاهش زیست‌توده میکروبی رخ دهد، می‌تواند بیانگر افزایش ضریب متابولیک باشد. در این حالت، میکروارگانیسم‌ها به ازای واحد زیست‌توده، دی اکسید کربن بیشتری آزاد می‌کنند که معمولاً با کاهش کارایی استفاده از کربن و افزایش تنش محیطی مرتبط است. بنابراین، تنفس بالاتر در خاک‌ورزی مرسوم را نباید به‌تنهایی شاخص بهبود کیفیت زیستی خاک دانست، بلکه می‌تواند نشان‌دهنده مصرف سریع‌تر کربن، آشفتگی زیستگاه‌های میکروبی و فشار اکولوژیک بر جامعه میکروبی باشد (Babujia et al., 2010; Holm et al., 2025).

کربن زیست‌توده میکروبی

نتایج نشان می‌دهد که سامانه‌های مدیریتی خاک، به ویژه شدت خاک‌ورزی، تأثیر قابل توجهی بر مقدار کربن زیست‌توده میکروبی دارند. در سامانه‌های با حداقل اختلال مانند بی‌خاک‌ورزی، شرایط برای توسعه و پایداری جامعه میکروبی مناسب‌تر است. در این سامانه‌ها به دلیل حفظ ساختمان خاک و پایداری بیشتر خاکدانه‌ها، زیستگاه‌های میکروبی کمتر دچار اختلال شده و محیط فیزیکی خاک برای استقرار و فعالیت ریزجانداران پایدارتر باقی می‌ماند. همچنین باقی ماندن بقایای گیاهی در سطح خاک و تجزیه تدریجی آن‌ها باعث فراهم شدن منابع کربنی پیوسته برای ریزجانداران می‌شود که این امر می‌تواند به افزایش اندازه و فعالیت جامعه میکروبی منجر شود (Kabiri et al., 2016; Li et al., 2024).

در مقابل، خاک‌ورزی مرسوم با ایجاد اختلال مکانیکی شدید در خاک، ساختار خاک را تا حدی تخریب کرده و باعث گسسته شدن زیستگاه‌های میکروبی می‌شود. این اختلال می‌تواند موجب کاهش پایداری جمعیت‌های میکروبی و محدود شدن رشد آن‌ها شود. علاوه بر این، افزایش هوادهی و تسریع تجزیه مواد آلی در اثر خاک‌ورزی شدید ممکن است در کوتاه‌مدت موجب افزایش معدنی‌شدن شود، اما در بلندمدت با کاهش ذخایر ماده آلی و منابع انرژی، اندازه زیست‌توده میکروبی کاهش می‌یابد (Hu et al., 2021).

کاهش کربن زیست‌توده میکروبی در خاک‌ورزی مرسوم، همراه با افزایش تنفس پایه، می‌تواند مؤید افزایش ضریب متابولیک و کاهش کارایی استفاده از کربن در جامعه میکروبی باشد (Holm et al., 2025). به طور کلی، افزایش کربن زیست‌توده میکروبی در سامانه‌های با اختلال کمتر خاک نشان می‌دهد که این سامانه‌ها در دوره مورد بررسی شرایط مناسب‌تری برای جامعه میکروبی فراهم کرده‌اند. با این حال، نتیجه‌گیری قطعی درباره بهبود پایدار کیفیت زیستی خاک و پایداری اکوسیستم خاک نیازمند داده‌های بلندمدت و پایش چندساله است (Kesharwani et al., 2025).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که نوع مدیریت خاک‌ورزی، استفاده از زیرشکن و حضور گیاه گلرنگ می‌توانند در کوتاه‌مدت بر برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک اثرگذار باشند. در شرایط این آزمایش و طی یک فصل زراعی، سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی، به‌ویژه بی‌خاک‌ورزی، با مقادیر بالاتر ماده آلی، کربن آلی، پایداری خاکدانه‌ها و کربن زیست‌توده میکروبی همراه بودند.

ویرایشی نشده

این وضعیت احتمالاً ناشی از کاهش اختلال مکانیکی، حفظ بقایای گیاهی و فراهم شدن شرایط مناسب‌تر برای پایداری ساختار خاک و فعالیت جامعه میکروبی است. در مقابل، خاک‌ورزی مرسوم با افزایش تنفس میکروبی همراه بود که می‌تواند ناشی از افزایش هوادهی، اختلاط بقایای گیاهی با خاک و تسریع معدنی‌شدن مواد آلی در کوتاه‌مدت باشد؛ بنابراین، افزایش تنفس میکروبی در این سامانه الزاماً به معنی بهبود کیفیت زیستی خاک نیست و باید همراه با شاخص‌هایی مانند کربن زیست‌توده میکروبی و ماده آلی خاک تفسیر شود. بر اساس نتایج این پژوهش، در اقلیم‌های نیمه‌خشک و خاک‌های مشابه، استفاده از بی‌خاک‌ورزی یا خاک‌ورزی کاهشی همراه با حفظ بقایای گیاهی می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای عملی برای کاهش اختلال خاک و بهبود تدریجی ماده آلی، پایداری خاکدانه‌ها و فعالیت زیستی خاک پیشنهاد شود. در مزارعی که با تراکم لایه‌های زیرسطحی مواجه هستند، کاربرد زیرشکن بهتر است به‌صورت هدفمند و غیرسالانه، در ترکیب با سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی انجام گیرد. همچنین، کشت گلرنگ در تناوب‌های زراعی مناطق نیمه‌خشک می‌تواند به‌عنوان گیاهی متحمل به خشکی و دارای ریشه عمیق مدنظر قرار گیرد، هرچند ارزیابی دقیق اثرات آن بر کیفیت خاک نیازمند مطالعات بلندمدت است. برای مروجان کشاورزی نیز توصیه می‌شود توسعه سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی به‌صورت تدریجی و همراه با آموزش مدیریت بقایا، کنترل علف‌های هرز و پایش شاخص‌های خاک انجام شود. با توجه به اینکه این مطالعه تنها در یک فصل زراعی انجام شد، نتیجه‌گیری قطعی درباره پایداری بلندمدت خاک، ترسیب کربن و اثرات پایدار سامانه‌های خاک‌ورزی امکان‌پذیر نیست. همچنین، به دلیل نمونه‌برداری یکپارچه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر، ممکن است بخشی از اثر لایه‌بندی در سامانه بی‌خاک‌ورزی، به‌ویژه در عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متر، کمتر نمایان شده باشد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، نمونه‌برداری به‌صورت تفکیک‌شده در عمق‌های صفر تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر انجام شود و اثرات بلندمدت این سامانه‌ها بر ذخیره کربن، ویژگی‌های زیستی، پایداری خاکدانه‌ها و پویایی عناصر غذایی بررسی گردد.

منابع

Abbadi, J., Dittert, K., Steingrobe, B., & Claassen, N. (2019). Mechanisms of potassium uptake efficiency and dynamics in the rhizosphere of safflower and sunflower in different soils. *Journal of Plant Nutrition*, *42*(19), 2459–2483. https://doi.org/https//:doi.org/10.1080/01904167.2019.1655035

Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012513840-6/50014-8

Almagro, M., Díaz-Pereira, E., Boix-Fayos ,C., Zornoza, R., Sánchez-Navarro, V., Re, P., Fernández, C., & Martínez-Mena, M. (2023). The combination of crop diversification and no tillage enhances key soil quality parameters related to soil functioning without compromising crop yields in a low-input rainfed almond orchard under semiarid Mediterranean conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *345*, 108320. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108320

Artuso, D. R., Moterle, D. F., Santos, D. R. d., & Tiecher, T. (2024). Potassium distribution in soil profiles under no-tillage system. *Revista brasileira de Ciência do Solo*, *48*, e0230125. https://doi.org/https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230125

Babujia, L. C., Hungria, M., Franchini, J. C., & Brookes, P. C. (2010). Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. *Soil Biology and Biochemistry*, *42*(12), 2174–2181. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.08.013

Blanco-Canqui, H & ,.Lal, R. (2008). No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. *Soil Science Society of America Journal*, *72*(3), 693–701. https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0233

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/https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002

ویراستاری پذیرفته

Carmo, D. L. d., Silva, C. A., Lima ,J. M. d., & Pinheiro, G. L. (2016). Electrical conductivity and chemical composition of soil solution: comparison of solution samplers in tropical soils. *Revista brasileira de Ciência do Solo*, *40*(00), e0140795. https://doi.org/https://doi.org/10.1590/1806٩۶٥٧rbcs20140795

Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2007). *Soil Sampling and Methods of Analysis, Second Edition*. Taylor & Francis .

Chen, G., Weil, R. R., & Hill, R. L. (2014). Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil and Tillage Research*, *136*, 61–69. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.004

Cochavi, A., Cohen, I. H., & Rachmilevitch, S. (2020). The role of different root orders in nutrient uptake. *Environmental and Experimental Botany*, *179*, 104212. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104212

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/https://doi.org/10.1023/A:1020809400075

Daraghmeh, O. A., Jensen, J. R., & Petersen, C. T. (2009). Soil structure stability under conventional and reduced tillage in a sandy loam. *Geoderma*, *150*(1), 64–71. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.007

Deubel, A., Hofmann, B., & Orzessek, D. (2011). Long-term effects of tillage on stratification and plant availability of phosphate and potassium in a loess chernozem. *Soil and Tillage Research*, *117*, 85–92. https://doi.org/https://doi.org/١٠١٠١۶/j.still.2011.09.001

Díaz-Zorita, M., & Grove, J. H. (2002). Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic Paleudalfs. *Soil and Tillage Research*, *66*(2), 165–174. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00024-7

Dvořáčková, H., Dvořáček, J., Hueso González, P., & Vlček, V. (2022). Effect of different soil amendments on soil buffering capacity. *PLoS One*, *17*(2), e0263456. https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263456

Franzluebbers, A. J. (2004). *Tillage and residue management effects on soil organic matter*. CRC Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9780203496374.ch8

Futa, B., Gmitrowicz-Iwan, J., Skersienė, A., Šlepetienė, A., & Parašotas, I. (2024). Innovative Soil Management Strategies for Sustainable Agriculture. *Sustainability*, *16*(21), 9481. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su16219481

Guo, D., Li, X., Li, X., Wang, J., & Fu, H. (2013). Conventional tillage increases soil microbial biomass and activity in the Loess Plateau, China. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science*, *63*(6), 489–496. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/09064710.2013.807356

Hendrix, P. F., Han, C.-R., & Groffman, P. M. (1988). Soil respiration in conventional and no-tillage agroecosystems under different winter cover crop rotations. *Soil and Tillage Research*, *12*(2), 135–148. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90037-2

Holm, L. B., Elsgaard, L., Zong, M., & Liang, Z. (2025). Improved Microbial Carbon Use Efficiency With Low Tillage Intensity: Evidence and Research Gaps. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, *4*(1), e70046. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/sae2.70046

Hu, X., Liu, J., Liang, A., Li, L., Yao, Q., Yu, Z., Li ,Y., Jin, J., Liu, X., & Wang, G. (2021). Conventional and conservation tillage practices affect soil microbial co-occurrence patterns and are associated with crop yields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *319*, 107534. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107534

Jimenez, P. A. J., Severo, E. M., Serafim, M. E., Medeiros, B. M., Silva, B. M., Avanzi, J. C., Marques, J. J., Cisse, A., Diakite, M., Curi, N., & Silva, M. L. N. (2025). Soil aggregates

stability as indicator of soil crust susceptibility in southern Mali using different methodological approaches. *Geoderma Regional*, *42*, e00995. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e00995

Jin, H., Huang, S., Shi, D., Li, J., Li, J., Li, Y., & Zhu, H. (2023). Effects of Different Tillage Practices on Soil Stability and Erodibility for Red Soil Sloping Farmland in Southern China. *Agronomy*, *13*(5), 1310. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy13051310

Kabiri, V., Raiesi, F., & Ghazavi, M. A. (2016). Tillage effects on soil microbial biomass, SOM mineralization and enzyme activity in a semi-arid Calcixerepts. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *232*, 73–84. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.022

Kesharwani, A., Goyal, G., Kumar, D., Kumari, R., Pandey, A. K., Innazent, A., Naan, T., Ojha, N., & Kumar, V. (2025). Evaluating the Impact of Tillage on Soil Biological Communities: Fungi, Bacteria and Actinomycetes. *Oriental Journal of Chemistry*, *41*(5). https://doi.org/https://dx.doi.org/10.13005/ojc/41 ٠٥٣٣

Koorneef, G. J., Pulleman, M. M., Comans, R. N. J., van Rijssel, S. Q., Barré, P., Baudin, F., & de Goede, R. G. M. (2024). Assessing soil functioning: What is the added value of soil organic carbon quality measurements alongside total organic carbon content? *Soil Biology and Biochemistry*, *196*, 109507. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109507

Kruthika, S., Ashu, A., Anand, A., Sammi Reddy, K., Vara Prasad, P. V., & Gurumurthy, S. (2024). Unveiling the Role of Root Exudates in Plant Adaptation to Drought and Heat Stress. *Journal of Crop Health*, *76*(5), 941–955. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10343-024-01013-8

Kumar, M., Kumari, P., & Kumari, A. (2025). Determinants of Soil Health and its Role in Environmental Sustainability. *CABI Books*, 238–250. https://doi.org/https://doi.org/10.1079/9781800624597.0014

Laghari, A. A., Abro, Q.-u.-a., Leghari, A., Kumar, A., Kumari, L., Nindwani, B. A., & Gull, S. (2025). Soil organic matter and soil structure changes with tillage practices and straw incorporation in a saline-sodic soil. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1681651. https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1681651

Lemanowicz, J., Balontayova, E., Dębska, B., Bartkowiak, A., & Wasilewski, P. (2025). Tillage System as a Practice Affecting the Quality of Soils and Its Sustainable Management. *Sustainability*, *17*(7), 2867. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su17072867

Li, H., Mollier, A., Ziadi, N., Messiga, A. J., Shi, Y., Pellerin, S., Parent, L.-É., & Morel, C . .(٢٠١٩)Long-term modeling of phosphorus spatial distribution in the no-tilled soil profile. *Soil and Tillage Research*, *187*, 119–134. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.014

Li, J.-Y., Chen, P., Li, Z.-G., Li, L.-Y., Zhang, R.-Q., Hu, W., & Liu, Y. (2023). Soil aggregate-associated organic carbon mineralization and its driving factors in rhizosphere soil. *Soil Biology and Biochemistry*, *186*, 109182. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109182

Li, Y.-m., Wang, Y.-m ,.Qiu, G.-w., Yu, H.-j., Liu, F.-m., Wang, G.-l., & Duan, Y. (2024). Conservation tillage facilitates the accumulation of soil organic carbon fractions by affecting the microbial community in an eolian sandy soil. *Frontiers in Microbiology*, *15*, 1394179. https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1394179

Liang, X., Rehman, S. U., Zhiqi, W., Raza, M. A., Haider, I., Khalid, M. H. B., Saeed, A., Iqbal, Z., Fatima, S., Siddiqa, A., Ansar, M., Ijaz, S. S., & Zhongming, M. (2025). Impacts of Conservation Tillage on Agricultural Land Development: A Review. *Journal of Soil*

Science and Plant Nutrition, *25*(1), 428–449. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42729-024-02142-9

Liu, W.-S., Wei, Y.-X., Deng, P.-P., Oladele, O. P., N'Dri Bohoussou, Y., Dang ,Y. P., Zhao, X., & Zhang, H.-L. (2023). Conservation tillage increases surface soil organic carbon stock by altering fungal communities and enzyme activity. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(33), 80901–80915. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-023-28062-2

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/https://doi.org/10.3390/agronomy14112673

Lv, L., Gao, Z., Liao, K., Zhu, Q., & Zhu, J. (2023). Impact of conservation tillage on the distribution of soil nutrients with depth. *Soil and Tillage Research*, *225*, 105527. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105527

Marschner, H & ,.Marschner, P. (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic press .

Mühlbachová, G., Růžek, P., Kusá, H., Vavera, R., & Káš, M. (2024). Nutrient Distribution in the Soil Profile Under Different Tillage Practices During a Long-Term Field Trial. *Agronomy*, *14*(12), 3017. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agronomy14123017

Nunes, M. R., Karlen, D. L., & Moorman, T. B. (2020). Tillage Intensity Effects on Soil Structure Indicators—A US Meta-Analysis. *Sustainability*, *12*(5), 2071. https//:doi.org/https://doi.org/10.3390/su12052071

Özbolat, O., Sánchez-Navarro, V., Zornoza, R., Egea-Cortines, M., Cuartero, J., Ros, M., Pascual, J. A., Boix-Fayos, C., Almagro, M., de Vente, J., Díaz-Pereira, E., & Martínez-Mena, M. (2023). Long-term adoption of reduced tillage and green manure improves soil physicochemical properties and increases the abundance of beneficial bacteria in a Mediterranean rainfed almond orchard. *Geoderma*, *429*, 116218. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.11 ۶۲۱۸

Paltineanu, C., Dumitru, S., Vizitiu, O., Mocanu, V., Lăcătusu, 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/https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108435

Pantigoso, H. A., Yuan, J., He, Y., Guo, Q., Vollmer, C., & Vivanco, J. M. (2020). Role of root exudates on assimilation of phosphorus in young and old Arabidopsis thaliana plants. *PLoS One*, *15*(6), e0234216. https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234216

Paz, A. M., Amezketa, E., Canfora, L., Castanheira, N., Falsone, G., Goncalves, M. C., Gould, I., Hristov, B., Mastrorilli, M ,.Ramos, T., Thompson, R., & Costantini, E. A. C. (2023). Salt-affected soils: field-scale strategies for prevention, mitigation, and adaptation to salt accumulation. *Italian Journal of Agronomy*, *18*(2), 2166. https://doi.org/https://doi.org/10.4081/ija.2 ۰۲۳/۲۱۶۶

Peng, J., Wu, Y., Geng, T., Zhang, C., Wang, J., & Cai, C. (2024). Soil pore dynamics and infiltration characteristics as affected by cultivation duration for Mollisol in northeast China. *Geoderma*, *449*, 117021. https://doi.org/https://doi.org/10/۱۰۱۶.j.geoderma.2024.117021

Powlson, D. S., Bhogal, A., Chambers, B. J., Coleman, K., Macdonald, A. J., Goulding, K. W. T., & Whitmore, A. P. (2012). The potential to increase soil carbon stocks through reduced tillage or organic material additions in England and Wales: A case study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *146*(1), 23–33. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.10.004

Rabbani, M. T. (2026). Safflower (*Carthamus tinctorius* L.): A Comprehensive Review of Its Diverse Applications and Recent Advances in Genetic Improvement. *International Journal of Plant and Soil Science*, *38*(1), 308–337. https://doi.org/https://doi.org/10.9734/ijpss/2026/v38i15950

Rabbi, S. M. F., Warren, C. R., Swarbrick, B., Minasny, B., McBratney, A. B & ,.Young, I. M. (2024). Microbial decomposition of organic matter and wetting–drying promotes aggregation in artificial soil but porosity increases only in wet-dry condition. *Geoderma*, *447*, 116924. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.1169 ۲۴

Rahman, M. H., Okubo, A., Sugiyama, S., & Mayland, H. (2008). Physical, chemical and microbiological properties of an Andisol as related to land use and tillage practice. *Soil and Tillage Research*, *101*(1-2), 10–19. https://doi.org/https://doi.org/10.1/۰۱۶j.still.2008.05.006

Raupp, P., Carrillo, Y., & Nielsen, U. N. (2024). Soil Health to Enhance Ecological Restoration and Conservation. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, *3*(4), e70022. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/sae2.70022

Seitz, S., Goebes, P., Puerta, V. L., Pereira, E. I. P., Wittwer, R., Six, J., van der Heijden, M. G. A., & Scholten, T. (2018). Conservation tillage and organic farming reduce soil erosion. *Agronomy for Sustainable Development*, *39*(1), 4. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13593-018-0545-z

Singh, K., Choudhary, O. P., Singh, H. P., Singh, A., & Mishra, S. K. (2019). Sub-soiling improves productivity and economic returns of cotton-wheat cropping system. *Soil and Tillage Research*, *189*, 131–139. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.013

Srivastava, R. K., Purohit, S., Alam, E., & Islam, M. K. (2024). Advancements in soil management: Optimizing crop production through interdisciplinary approaches. *Journal of Agriculture and Food Research*, *18*, 101528. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101528

Toth, M., Davies, J., Quinton, J., Davies, J., Stumpp, C., Klik, A., Mehdi-Schulz, B., Strauss, P., Liebhard, G., Bartmann, J., & Strohmeier, S. (2025). Long-term effects of tillage practices and future climate scenarios on topsoil organic carbon stocks in Lower Austria – A modelling and long-term experiment study. *International Soil and Water Conservation Research*, *13*(2), 486–499. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2025.02.011

Vu, D., Tang, C., & Armstrong, R. (2009). Tillage system affects phosphorus form and depth distribution in three contrasting Victorian soils. *Soil Research*, *47*(1), 33–45. https://doi.org/https://doi.org/10.1071/SR08108

Warkentin, B. P. (2 .(۰۰۱The tillage effect in sustaining soil functions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *164*(4), 345–350 .

Weidhuner, A., Hanauer, A., Krausz, R., Crittenden, S. J., Gage, K., & Sadeghpour, A. (2021). Tillage impacts on soil aggregation and aggregate-associated carbon and nitrogen after 49 years. *Soil and Tillage Research*, *208*, 104878. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104878

Xu, L., Yu, Q., Bai, S., Wang, M., Sun, W., Xu, S., Shi, X., Lu, J., Xie, X., & Qiu, W. (2024). Soil organic carbon impact on soil physical properties through quantity and quality modifications. *Soil Advances*, *2*, 100014. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilad.2024.100014

Xue, B., Huang, L., Huang, Y., Zhou, F., Li, F., Kubar, K. A., Li, X., Lu, J., & Zhu, J. (2019). Roles of soil organic carbon and iron oxides on aggregate formation and stability in two

paddy soils. *Soil and Tillage Research*, *187*, 161–171. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.010

Yang, Y., Wu, J., Zhao, S ,.Mao, Y., Zhang, J., Pan, X., He, F., & van der Ploeg, M. (2021). Impact of long-term sub-soiling tillage on soil porosity and soil physical properties in the soil profile. *Land Degradation & Development*, *32*(10), 2892–2905. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ldr.3874

Yudina, A., & Kuzyakov, Y. (2023). Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores. *Geoderma*, *434*, 116478. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116478

Zheng, F., Liu, X., Ding, W., Song, X., Li, S & ,.Wu, X. (2023). Positive effects of crop rotation on soil aggregation and associated organic carbon are mainly controlled by climate and initial soil carbon content: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *355*, 108600. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108600

ویراستاری نشده

Response of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties to Tillage and Subsoiling in Safflower (*Carthamus tinctorius*) Cultivation

Extended Abstract

Introduction

This study was conducted to evaluate the response of selected soil physical, chemical, and biological properties to different tillage systems, subsoiling, and plant presence under safflower cultivation conditions. The main objective was to identify soil management practices that could help maintain or improve soil quality under the conditions of the experiment. Soil management practices are widely recognized as important drivers of soil structural stability, nutrient dynamics, and microbial activity, particularly in semi-arid regions where soil degradation and organic matter depletion can limit crop production. Intensive soil disturbance may accelerate organic matter mineralization, disrupt soil aggregates, and increase carbon loss from soil. In contrast, conservation-oriented practices can improve soil conditions by minimizing disturbance, maintaining crop residues on the soil surface, and providing a more stable habitat for soil microorganisms. In addition, subsoiling is often used to alleviate soil compaction and improve root penetration and water movement, although its effectiveness may depend on the prevailing tillage system and soil conditions. Therefore, this research aimed to investigate the combined effects of tillage systems, subsoiling, and safflower presence on key indicators of soil quality.

Methods

The experiment was conducted during the 2022–2023 growing season at the research farm of Razi University in Kermanshah, Iran, located in a cold semi-arid climatic region at an altitude of 1320 m above sea level, 34°19′21″ N and 47°06′07″ E. The experimental field had been managed under conservation-oriented practices for seven years prior to the study. The experiment was arranged as a split-split-plot design within a randomized complete block design with three replications. The main plots consisted of three tillage systems: conventional tillage, reduced tillage, and no-tillage. The subplots included two subsoiling levels: with subsoiling and without subsoiling. The sub-subplots consisted of two plant conditions: safflower cultivation and no-crop condition. Subsoiling was performed before sowing at an approximate depth of 60 cm under suitable soil moisture conditions. In the conventional tillage treatment, the soil was plowed using a moldboard plow followed by disking. In the reduced tillage system,

soil disturbance was limited to a single chisel pass, whereas in the no-tillage treatment, no mechanical soil disturbance was applied. Safflower (Carthamus tinctorius L.), cultivar Farman, was sown at a seeding rate of 20 kg. ha^{-1} using a direct drill, while crop residues were retained on the soil surface. Soil samples were collected from a depth of 0–30 cm before sowing and after harvest. The measured chemical properties included soil pH, electrical conductivity, available phosphorus, available potassium, organic carbon, organic matter, and total nitrogen. The physical properties evaluated were mean weight diameter of aggregates and water-dispersible clay. Biological properties included basal respiration, substrate-induced respiration, and microbial biomass carbon. Data were analyzed after testing the assumptions of normality and homogeneity of variance, and treatment means were compared using Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

Results

The results indicated that soil management practices influenced several soil properties, although the magnitude and direction of these responses varied among the studied variables. Soil pH was not significantly affected by tillage system, subsoiling, plant condition, or their interactions, suggesting that short-term variations in soil disturbance and management intensity had limited influence on this relatively stable soil property. In contrast, soil electrical conductivity was significantly affected by tillage system, plant condition, and the interaction between tillage system and plant condition at the 1% probability level. The highest electrical conductivity values were observed under conventional tillage, whereas the lowest values occurred under no-tillage, indicating that reduced soil disturbance contributed to more favorable soil chemical conditions. The no-crop condition showed higher electrical conductivity than safflower cultivation, and in all tillage systems, the presence of safflower reduced soil electrical conductivity relative to the no-crop condition. The highest electrical conductivity value was recorded under conventional tillage without crop, while the lowest value occurred under no-tillage without crop. Overall, the pattern of results suggested that conservation-based tillage systems, particularly no-tillage and reduced tillage, provided more favorable conditions for maintaining several soil quality indicators than conventional tillage. These systems improved soil physical stability by reducing mechanical disturbance and maintaining plant residues on the soil surface, which likely contributed to aggregate preservation and reduced susceptibility to structural degradation. In addition, reduced soil disturbance helped preserve soil organic carbon and organic matter by slowing their mineralization and limiting oxidation processes. By contrast, intensive tillage operations increased soil aeration and aggregate disruption, thereby accelerating the decomposition of organic matter and increasing the risk of carbon loss from soil. The biological indicators further highlighted the sensitivity of soil microbial processes to management practices. Basal respiration was highest under conventional tillage, reflecting increased microbial respiration associated with greater soil aeration, disruption of soil aggregates, and rapid decomposition of readily available organic substrates. However, the higher basal respiration observed under conventional tillage should not necessarily be interpreted as an indicator of improved biological soil quality. Rather, it may indicate accelerated mineralization of organic matter and greater carbon loss from soil. In contrast, microbial biomass carbon was generally greater under less intensive tillage systems, particularly where soil structure remained relatively undisturbed and organic substrates were more consistently available. No-tillage also appeared to provide a more stable habitat for soil microorganisms by preserving soil aggregates, moderating fluctuations in soil temperature and moisture, and maintaining carbon inputs near the soil surface. Safflower cultivation influenced biological properties through rhizosphere processes, root exudates, and root-derived carbon inputs, which can stimulate microbial activity and contribute to improved biological functioning compared with the no-crop condition. The effect of subsoiling varied

depending on the soil property considered and its interaction with the tillage system. In some cases, subsoiling improved the soil physical environment by reducing compaction and facilitating the movement of water and air through the soil profile. However, the response of biological indicators, including microbial biomass carbon and respiration, depended on the interaction between subsoiling and the overall tillage regime. This suggests that the effectiveness of deep soil loosening practices should be evaluated within the broader context of soil management intensity rather than as an isolated intervention.

Conclusion

Overall, the results of this study showed that soil physical, chemical, and biological properties responded differently to tillage systems, subsoiling, and plant presence. However, the general trend supported the relative advantages of conservation-based soil management under the conditions of this experiment. No-tillage and reduced tillage were more effective than conventional tillage in maintaining several soil quality indicators, as they minimized soil disturbance, preserved plant residues on the soil surface, enhanced the retention of soil organic matter, and provided relatively more favorable conditions for soil microbial communities. Although conventional tillage increased basal respiration, this response was more likely associated with accelerated organic matter decomposition and carbon loss rather than improved biological sustainability. Safflower cultivation also contributed positively to some soil properties through rhizosphere processes and organic carbon inputs, while the effects of subsoiling were context-dependent and influenced by the prevailing tillage system. Taken together, these findings indicate that reducing tillage intensity and adopting conservation-oriented soil management practices can help maintain or improve some physical, chemical, and biological properties of soil in safflower-based cropping systems in semi-arid environments. However, further long-term studies with more detailed soil-depth sampling are needed to confirm the persistence of these responses over time.

Keywords: Conservation tillage, No-tillage, Quality soil, Safflower, Subsoiler.

Author Contributions

All authors equally contributed to all stages of the study, including the design and implementation of the research, data collection, statistical analysis, interpretation of the results, preparation of the manuscript draft, verification of the findings, and revision and finalization of the manuscript.

Data Availability Statement

The data supporting the findings of this study are available from the authors upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere appreciation to the Vice-Chancellor for Research of Razi University, Kermanshah, for their moral support and cooperation in conducting this research.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this paper.

ویرایش شده