



Research Article

Vol. 24, No. 2, Summer 2026, p. 163-181

The Effect of Tillage Systems on Nutrient Concentrations, Root Traits and Forage Yield and in Forage Legumes

N. Barati¹, M. Rafiee^{2*}, M. Diyant¹, M. R. Ardakani³, W. Weisany¹

1- Department of Agricultural Science and Engineering, SR. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Crop and Horticultural Science Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREO, Khorramabad, Iran

3- Department of Agronomy and Plant Breeding, Ka. C., Islamic Azad University, Karaj, Iran

(*- Corresponding author's Email: m.rafiei@areeo.ac.ir)

Received: 16 June 2025

Revised: 25 July 2025

Accepted: 30 July 2025

Available Online: 20 August 2025

How to cite this article:Barati, N., Rafiee, M., Diyant, M., Ardakani, M. R., & Weisany, W. (2026). The effect of tillage systems on nutrient concentrations, root traits and forage yield and in forage legumes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 24(2), 163-181. (In Persian with English abstract)<https://doi.org/10.22067/jcsc.2025.94086.1408>

Introduction

In recent years, application of conservation tillage methods has been widely considered in the world, and the use of conventional tillage methods has become outdated in some parts of the world. Conservation tillage systems are usually implemented in arid and semi-arid regions. In semi-arid regions, the key to increasing crop production is to maximize surface water infiltration. In addition, legumes are the main source of protein in developing countries, with about twice the protein content of cereals, and are a source of Inexpensive, good-quality protein and a suitable complement to cereal protein. These plants are very important in low-input farming systems and have a special place in the rotation of some agricultural systems in the world, especially in dry regions, and play a significant role in food production in these countries. Therefore, a field experiment was conducted to evaluate the effects of different tillage systems on nutrient concentrations, root traits, and forage yield of forage legumes at the research farm of the Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, located 8 km southwest of Khorramabad, Iran, during the 2022–2023 and 2023–2024 growing seasons.

Materials and Methods

This experiment was conducted as a split plot based on a randomized complete block design with three replications. Tillage methods (conventional, low-tillage, and no-tillage) were considered as the main factor, and forage legumes (Broujerd landrace faba bean, Lamei cultivar vetch, Grass pea, Barakat and Feyz cultivar faba bean) were considered as secondary factors. The water required by the plants was supplied by normal rainfall during the growing season, and no irrigation was performed. Disking, minimum tillage included a chisel plow or a combined toothed roller cultivator, and no-tillage involved no tillage operations.

Results and Discussion

The results of the analysis of variance showed that the main effect of tillage system and forage legumes on all measured traits and the interaction effect of tillage × forage legumes on forage yield, root length, root volume, and the concentration of copper, zinc, and phosphorus elements in aerial parts were significant. Based on the results of the tillage system × forage legume planting showed that the highest forage dry weight (2820.9 kg ha⁻¹) and copper concentration (50.17 ppm) were observed in the conventional tillage system and Lamei variety vetch. The highest forage fresh yield (10671.54 and 10581.19 kg ha⁻¹), root length (33.89 and 33.39 cm) and phosphorus concentration (0.85 and 0.84%) were observed in the conventional and low-tillage systems and

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/jcsc.2025.94086.1408>

Lamei variety vetch. Also low-tillage system and Lamei variety vetch had the highest zinc concentration (50.69 ppm) and root volume (11.74 cm³). The conventional tillage system increased root diameter by 32%, fresh forage weight by 26%, dry weight by 21%, potassium by 27%, iron by 6%, and manganese by 8% and soil respiration by 22% compared to the no-till system. Also, the results of comparing the average effect of planting different forage legumes on measured traits showed that the highest yield, root traits, and nutrient elements were observed in the Lamei variety vetch.

Conclusion

Overall, the results highlight the importance of selecting appropriate tillage systems and forage legume species to optimize forage yield and quality. Among the evaluated species, vetch exhibited superior performance under the environmental conditions of this study. Furthermore, conventional and minimum tillage significantly influenced forage yield, root characteristics, and nutrient concentrations by altering the soil's physical, chemical, and biological properties in the Khorramabad region.

Acknowledgement

Hereby, we would like to express our gratitude to the respected professors and laboratory staff of the Khorramabad Research Center for their guidance and assistance during the project.

Keywords: Manganese, Nitrogen, Phosphorus, Root length, Root volume

مقاله پژوهشی

جلد ۲۴، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۱۸۱-۱۶۳

اثر نظام‌های خاک‌ورزی بر غلظت عناصر غذایی، صفات ریشه و عملکرد علوفه در بقولات علوفه‌ای

نیلوفر براتی^۱، مسعود رفیعی^{۲*}، مرجان دیانت^۱، محمدرضا اردکانی^۳، وریا ویسانی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸

چکیده

در سال‌های اخیر، خاک‌ورزی حفاظتی به دلیل توانایی در افزایش نفوذ آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، جایگزین روش‌های مرسوم شده است. این روش‌ها به حداکثر رساندن تولید محصول کمک می‌کنند. همچنین حبوبات به‌عنوان یک منبع غنی و ارزان پروتئین، نقش حیاتی در تغذیه کشورهای در حال توسعه دارند. این گیاهان با ارزش، به‌ویژه در سیستم‌های کشاورزی کم‌بهداشته و در تناوب زراعی مناطق خشک، از اهمیت بالایی برخوردارند و به امنیت غذایی این مناطق کمک می‌کنند. بنابراین به‌منظور ارزیابی اثر نظام‌های خاک‌ورزی بر غلظت عناصر غذایی، صفات ریشه و عملکرد علوفه در بقولات علوفه‌ای، آزمایشی به‌طور اسپلیت پلات با قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در شهر خرم‌آباد، طی دو سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ و ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در آبان ماه اجرا شد. آب مورد نیاز گیاهان از بارندگی نرمال در طول فصل رشد تأمین شد و هیچ‌گونه آبیاری صورت نگرفت. عامل اصلی خاک‌ورزی (مرسوم، کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی) و عامل فرعی بقولات علوفه‌ای (باقلا (*Vicia faba* L.) توده بروجرد، ماشک (*Vicia sativa* L.) رقم لامعی، خلر (*Lathyrus sativus* L.) باقلا رقم برکت و فیض)) بود. خاک‌ورزی مرسوم شامل شخم با گاوآهن برگردان‌دار و سپس دیسک، کم‌خاک‌ورزی شامل چپ‌پل‌پکر یا خاک‌ورز مرکب غلطک لوله‌ای دنداندار و بی‌خاک‌ورزی فاقد هرگونه عملیات خاک‌ورزی بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی سیستم خاک‌ورزی و بقولات علوفه‌ای بر همه صفات اندازه‌گیری‌شده و اثر متقابل خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر عملکرد علوفه، طول ریشه، حجم ریشه، غلظت عناصر مس، روی و فسفر در اندام‌های هوایی معنی‌دار بودند. براساس نتایج اثر متقابل خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای، بیشترین میزان وزن خشک علوفه (۲۸۲۰/۹ کیلوگرم در هکتار) و عنصر مس (۵۰/۱۷ پی‌پی‌ام) در خاک‌ورزی مرسوم و گیاه ماشک مشاهده شد. بیشترین عملکرد تر علوفه (۱۰۶۷۱/۵۴ و ۱۰۵۸۱/۱۹ کیلوگرم در هکتار)، طول ریشه (۳۳/۸۹ و ۳۳/۳۹ سانتی‌متر) و غلظت عنصر فسفر (۰/۸۵ و ۰/۸۴ درصد) از خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی و گیاه ماشک به دست آمد. همچنین کم‌خاک‌ورزی و کشت گیاه ماشک از بیشترین غلظت عنصر روی (۵۰/۶۹ پی‌پی‌ام) و حجم ریشه (۱۱/۷۴ سانتی‌متر مکعب) برخوردار بودند. خاک‌ورزی مرسوم نسبت به بدون خاک‌ورزی، ۳۲ درصد قطر ریشه، ۲۶ درصد وزن تر علوفه، ۲۱ درصد وزن خشک، ۲۷ درصد پتاسیم، شش درصد آهن، هشت درصد منگنز و ۲۲ درصد تنفس خاک را افزایش داد. به‌طور کلی، این تحقیق بر اهمیت انتخاب سیستم خاک‌ورزی مناسب و نوع بذر در راستای بهینه‌سازی تولید علوفه و بهبود کیفیت آن تأکید دارد و نشان می‌دهد که ماشک در شرایط این آزمایش، عملکرد خوبی داشته است. همچنین روش‌های خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی به‌دلیل تغییراتی که در شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک ایجاد می‌کنند، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد، صفات ریشه و غلظت عناصر غذایی در منطقه خرم‌آباد دارند.

واژه‌های کلیدی: حجم ریشه، طول ریشه، فسفر، منگنز، نیتروژن

۱- گروه علوم باغبانی و زراعی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران
۳- گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران
*- نویسنده مسئول: (Email: m.rafiiei@areeo.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.94086.1408>

مقدمه

کشاورزی مدرن به استفاده از کودها و آفت کش ها متکی می باشد که مشکلاتی برای سلامت خاک، گیاه، انسان و محیط زیست ایجاد کرده است. بنابراین، مدیریت پایدار کشاورزی اهمیت بیشتری پیدا کرده و به بهبود بهره وری، حفظ منابع زیست محیطی، افزایش رفاه انسان و تقویت تاب آوری بوم نظام و جامعه کمک می کند (Howard & Lincoln, 2023; Ramesh et al., 2024; Selvan et al., 2023). کشاورزی پایدار به معنای بهره برداری مداوم و سودآور از منابع طبیعی، بدون کاهش کیفیت خاک و محیط زیست است. این نوع کشاورزی با روش های "کم نهاده" یا "ارگانیک" متفاوت است و نیاز به راهبرد دوگانه از جمله افزایش جریان انرژی برای خروج از کشاورزی معیشتی و بهبود راندمان مصرف انرژی در کشاورزی مدرن دارد. خاک ورزی و آماده سازی بستر بذر نقش مهمی در مصرف انرژی دارند و انتخاب نوع مناسب خاک ورزی به عوامل مختلفی مانند بافت، ساختار و ذخایر آب و مواد مغذی بستگی دارد (Wang et al., 2024). کشاورزی پایدار بر تغییر روش های استفاده از کودها، مدیریت تلفیقی آفات، تناوب زراعی، آبیاری دقیق، کشت پوششی و خاک ورزی حفاظتی تمرکز دارد. هدف این روش ها، افزایش بهره وری و کارایی کشاورزی است. خاک ورزی حفاظتی با کاهش اختلال در خاک، سلامت آن را بهبود می بخشد و مزایایی چون بهبود رطوبت، افزایش تخلخل، افزایش محتوای کربن آلی و کاهش جرم مخصوص ظاهری را ارائه می دهد. در مقابل، خاک ورزی مرسوم می تواند به تخریب ساختار خاک منجر شود (Wang, Shen et al., 2019). هدف از خاک ورزی در کشاورزی، ایجاد شرایط مناسب برای جوانه زنی بذر و استقرار گیاهچه است. تأثیر روش های خاک ورزی به شدت به نوع نظام، ویژگی های خاک و شرایط محیطی وابسته است.

در مناطق خشک مدیترانه ای، کشاورزان معمولاً از خاک ورزی مرسوم برای جلوگیری از فشردگی خاک استفاده می کنند که مزایایی مانند کاهش خروج گاز، افزایش کربن آلی و کاهش فرسایش دارد. همچنین روندی جهانی به سمت کم خاک ورزی وجود دارد که در آن شخم زدن انجام نمی شود و بقایای محصولات قبلی روی سطح خاک باقی می ماند. بدون خاک ورزی نیز به بهبود برخی خواص شیمیایی خاک کمک می کند (López-Garrido et al., 2014). در روش های بدون خاک ورزی به دلیل بازگشت بقایای گیاهی به افق های سطحی خاک، افزایش میزان مواد آلی مشاهده می شود، در حالی که در روش های خاک ورزی مرسوم به هم خوردن خاک باعث تجزیه بیشتر و زودتر بقایای گیاهی شده که در نتیجه کاهش میزان مواد آلی را به همراه دارد (Chegeni et al., 2014). مطالعات نشان می دهند که انباشت کربن آلی در بدون خاک ورزی تا عمق ۱۰ سانتی متری بیشتر از خاک ورزی معمولی است و کانی سازی کربن آلی در بدون

خاک ورزی کمتر است که بر دسترسی مواد مغذی تأثیر می گذارد. در اقلیم های نیمه خشک، کانی سازی کربن آلی و دسترسی به نیتروژن، فسفر و گوگرد در خاک ورزی معمولی و کم خاک ورزی کمتر از بدون خاک ورزی است. همچنین شدت کانی سازی نیتروژن با افزایش شدت خاک ورزی بیشتر می شود، اما نتایج متناقضی نیز در این زمینه وجود دارد (Soane et al., 2012). این تغییرات در نهایت می تواند بر جذب عناصر در گیاه مؤثر باشد و میزان عناصر را در برگ و دانه دستخوش تغییر نماید. برخی محققان طی آزمایشی طولانی مدت به منظور بررسی اثر خاک ورزی بر کربن آلی خاک و مواد مغذی خاک گزارش دادند که مقدار کربن آلی خاک و پتاسیم خاک در خاک ورزی حداقل بیشتر از خاک ورزی مرسوم است (Spiegel et al., 2007).

برای پاسخ به این سؤال که آیا تیمارهای خاک ورزی حفاظتی در کشاورزی ارگانیک در واقع حاصلخیزی طولانی مدت خاک، ریشه زایی و عملکرد را بهبود می بخشد یا خیر، یک آزمایش مزرعه ای طولانی مدت طی ۱۰ سال (۲۰۱۵-۲۰۲۴) در خاک لومی شنی در فرانسه انجام شد. پژوهشگران مشاهده نمودند که تیمارهای خاک ورزی حفاظتی اثرات مثبتی بر اجزای شیمیایی خاک در لایه فوقانی خاک داشت و به افزایش زیست توده گندم (*Triticum aestivum* L.) تا مرحله پنجه زنی کمک کرد. با این حال، تفاوت عملکرد گندم بین تیمارها مشاهده نشد. خواص فیزیکی و زیستی خاک پس از ۱۰ سال خاک ورزی حفاظتی به طور معنی داری بهبود نیافت. این موضوع ممکن است به دلیل مدت زمان ناکافی آزمایش برای تأثیر مثبت کرم خاکی بر تخلخل خاک، یا به دلیل شنی بودن و حساسیت بالای خاک به تراکم در کشت ارگانیک باشد (Peigné et al., 2018). مناطق خشک با کمبود مواد علوفه ای مواجه اند که در تابستان به دلیل رقابت بین تولید غذای انسان و خوراک دام تشدید می شود. تلاش ها برای بهبود عملکرد و کیفیت محصولات علوفه ای متمرکز است. توالی کشت علف ها و حبوبات به بهبود خواص خاک و حفظ منابع طبیعی کمک می کند. حبوبات خواص شیمیایی و بیولوژیکی خاک را بهبود بخشیده و حاصلخیزی آن را افزایش می دهند که به کاهش نیاز به کودهای مصنوعی و افزایش عملکرد محصولات بعدی کمک می کند. همچنین ادغام این محصولات در تناوب های کشاورزی، پایداری زیست محیطی و اقتصادی را افزایش می دهد (Mansour et al., 2021). بهترین راه حفاظت خاک در راستای کشاورزی حفاظتی، استفاده از پوشش گیاهی است. نقش پوشش گیاهی در کاهش فرسایش و رسوب فقط به قسمت بالا و بیرونی گیاهان محدود نمی شود، بلکه ریشه های گیاهان نیز در این زمینه نقش حساسی دارند، زیرا آن ها با نفوذ در اعماق خاک، زمینه چسبندگی خاکدانه ها به خود را فراهم کرده و مانع از متلاشی شدن خاکدانه ها به هنگام ریزش های جوی می شوند (Khosropour, 2018).

مواد و روش‌ها

این مطالعه به منظور بررسی اثر نظام‌های خاک‌ورزی بر غلظت عناصر غذایی، صفات ریشه و عملکرد علوفه در بقولات علوفه‌ای اجرا شد. آزمایش طی دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۳ در مزرعه پژوهشی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان در هشت کیلومتری جنوب غربی شهر خرم‌آباد، با موقعیت جغرافیایی $48^{\circ} 18' N$ و $33^{\circ} 29' E$ و ارتفاع ۱۱۹۵ متر از سطح دریا با سه تکرار اجرا شد. متوسط بارندگی سالیانه براساس آمار هواشناسی ۳۵ ساله ۵۱۶ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت درازمدت $16/2^{\circ} C$ درجه سانتی‌گراد بود. تغییرات میزان دما و بارندگی در بازه زمانی ابتدای آبان تا پایان خرداد هر دو سال زراعی این منطقه جغرافیایی در **جدول ۱** ارائه شده است. این آزمایش به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام گردید. قبل از شروع آزمایش، برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌هایی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک از نقاط مختلف مزرعه جمع‌آوری و سپس به آزمایشگاه خاک ارسال شد. نتایج مربوط به آنالیز خاک در **جدول ۲** آمده است.

پژوهش زیادی پیرامون اثرات خاک‌ورزی روی گیاهان مختلف انجام شده است، لیکن مطالعه جامع و هم‌زمان پیرامون جنبه‌های مختلف زراعی و بیوشیمیایی در گیاه، ریشه و جذب عناصر غذایی در بقولات متنوع صورت نگرفته است که در این آزمایش به آن پرداخته شد. همچنین تلفیق زراعت گیاهان علوفه‌ای یک مسئله مهم در توسعه زراعت این گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود. افزایش تنوع نظام‌های کشت می‌تواند بهره‌وری زمین‌های کشاورزی را بهبود بخشد و تولید محصولات علوفه‌ای نه تنها تنوع محصول را افزایش دهد، بلکه عملکرد زیست‌توده کل زمین‌های کشاورزی را نیز در شرایط محدود افزایش دهد (Renard & Tilman, 2019). در استان لرستان، ۷۰ درصد اراضی در مناطق کوهستانی شیب‌دار و ۳۰ درصد در دشت‌ها قرار دارد که منجر به خروج سالانه ۱۲ میلیارد مترمکعب رواناب می‌شود. کوهستانی بودن و شیب بالای زمین‌ها باعث شده که فرسایش خاک در این استان سه برابر میانگین کشوری و سه تا پنج برابر متوسط جهانی باشد. همچنین تولید کل علوفه در کشور حدود ۵-۷ میلیون تن است که برای تغذیه دام‌ها کافی نیست. بنابراین، هدف از این پژوهش معرفی ارقام مناسب گیاهان علوفه‌ای و استفاده از ظرفیت مزارع دیم برای افزایش تولید علوفه احساس می‌باشد. در واقع، به منظور حفظ منابع آب و خاک و دستیابی به کشاورزی پایدار، باید عملیات تهیه بستر را از طریق خاک‌ورزی حفاظتی کاهش داد.

جدول ۱- داده‌های هواشناسی شامل دما و بارندگی طی دوره اجرای آزمایش

Table 1- Metrological data of temperature and precipitation during the experimental period

سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ Year 2021-2022				سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ Year 2022-2023			
ماه Month	حداکثر دما Maximum temperature (°C)	حداقل دما Minimum temperature (°C)	بارندگی Precipitation (mm)	ماه Month	حداکثر دما Maximum temperature (°C)	حداقل دما Minimum temperature (°C)	بارندگی Precipitation (mm)
مهر September	33	12.7	0	مهر September	31.1	13.1	1.4
آبان October	22	8.5	71.1	آبان October	22.5	8.1	45.8
آذر November	16.2	3.7	28.8	آذر November	17.4	1.9	29.2
دی December	11	0.7	55.2	دی December	14.5	1.3	43
بهمن January	11.3	-0.3	92.7	بهمن January	13.4	1.4	99.6
اسفند February	19.5	4.1	65.8	اسفند February	15.5	2.1	67.8
فروردین March	20	5.7	123.9	فروردین March	21.9	6.2	94.6
اردیبهشت April	27.6	8.5	21.6	اردیبهشت April	26.1	10.5	108
خرداد May	34.8	15.1	15.1	خرداد May	36.8	16.1	0.4

جدول ۲- آنالیز خاک مزرعه

Table 2- Farm soil analysis

سال Year	بافت Texture	درجه اسیدی pH	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	مس Cu (ppm)	روی Zn (ppm)	منگنز Mn (ppm)	آهن Fe (ppm)	کربن C (%)	نیتروژن N (%)	فسفر P (ppm)	پتاسیم K (ppm)
۱۴۰۰-۱۴۰۱ 2021-2022	لومی Loam	7.6	1.27	0.74	0.25	6.2	7.1	0.92	0.31	12.1	332
۱۴۰۱-۱۴۰۲ 2022-2023	لومی Loam	7.5	1.25	0.81	0.32	6.9	6.8	0.94	0.42	13.5	361

مشاهده نگردید. برداشت بقولات به صورت هم زمان صورت نگرفت. بدین صورت که برداشت ماشک هم زمان با مرحله ۵۰ درصد گل دهی در تاریخ ۲۰ فروردین و برداشت ارقام باقلا و خلر در مرحله شروع خمیری و در تاریخ ۲۵ فروردین انجام شد. صفات اندازه گیری شامل عملکرد علوفه تر و خشک، طول ریشه، حجم ریشه، قطر ریشه، وزن تر و خشک ریشه، تنفس خاک و عناصر غذایی اندام هوایی (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز) بود.

زمان نمونه برداری ها و بررسی عملکرد هم زمان با برداشت بقولات علوفه ای با رعایت ۲۰ سانتی متر حاشیه از دو سر هر کرت روی چهار ردیف وسط نیمه بالایی از هر کرت در سطحی معادل یک مترمربع برداشت صورت گرفت. در ابتدا نمونه های جمع آوری شده توزین شدند و عملکرد علوفه تازه آن اندازه گیری گردید، همچنین برای اندازه گیری عملکرد علوفه خشک، سطح برداشت علوفه تر از هر تیمار به طور تصادفی انتخاب و نمونه ها به مدت ۴۸ ساعت در دستگاه آون در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد خشک و توزین شد.

به منظور اندازه گیری عناصر غذایی، پس از اتمام دوره آزمایش، اندام های هوایی (برگ و ساقه) جدا شدند و پس از شست و شوی دقیق، به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی گراد قرار داده شدند. پس از خشک شدن، نمونه ها با آسیاب برقی به صورت پودر شدند. پس از تهیه خاکستر از مواد گیاهی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی گراد، عصاره گیری با استفاده از ۱۰ میلی لیتر انجام شد. از این عصاره برای اندازه گیری عناصر غذایی استفاده گردید. میزان عناصر نیتروژن به صورت تیتراسیون با دستگاه تمام اتوماتیک کج لدا، فسفر با معرف وانادات مولیبدات با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (model: BT600 Plus, Canada) در طول موج ۴۵۰ نانومتر، میزان عنصر پتاسیم (با محلول کلروسزیم ۰/۸۷ گرم در لیتر) در عصاره استخراج شده با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر (model: PFP7, UK) اندازه گیری شدند (Waling et al., 1989). غلظت عناصر آهن، روی، مس و منگنز در عصاره حاصل از هضم خشک با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Perkin Elmer, USA make Analyst 400) اندازه گیری گردید.

برای جمع آوری نمونه های ریشه، خاک اطراف ریشه با حفر گودال

عامل های مورد مطالعه شامل خاک ورزی به عنوان کرت اصلی با سه سطح (مرسوم، کم خاک ورزی و بدون خاک ورزی) و بقولات علوفه ای به عنوان کرت فرعی با پنج سطح علوفه ای (باقلا (*Vicia faba* L.) توده بروجرد، ماشک (*Vicia sativa* L.) رقم لامعی، خلر (*Lathyrus sativus* L.)، باقلا رقم برکت و فیض) بود. در تجزیه واریانس مرکب، عامل خاک ورزی در حکم محیط در نظر گرفته شد. خاک ورزی هر سال در بقایای حداقل ۳۰ درصدی گندم (درصد پوشش بقایا روی سطح زمین) اجرا شد که هر خاک ورزی به عرض ۶/۷۵ متر (سه برابر عرض دنباله بند) و طول ۷۶ متر با فاصله دو متر از یکدیگر بود. خاک ورزی مرسوم شامل شخم با گاو آهن برگردان دار و سپس دیسک، کم خاک ورزی شامل چیل پکر یا خاک ورز مرکب غلطک لوله ای دنداندار و بی خاک ورزی فاقد هر گونه عملیات خاک ورزی بود. هر قطعه خاک ورزی به سه تکرار با فواصل دو متر تقسیم و در هر تکرار پنج بقولات علوفه ای در نه خط کاشت با فاصله بین خطوط ۵۰ سانتی متری و عرض سه متر (در جهت خاک ورزی) به مساحت کرت ۱۳/۵ مترمربع کشت گردید. تأمین نیاز کودی گیاه با توجه به آزمایش خاک، کود فسفر به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع سوپرفسفات تریپل در هنگام کاشت و به صورت نواری در کف شیارها و پنج سانتی متر از طرفین بذر قرار گرفت. همچنین کود نیتروژن به میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار از منبع اوره به صورت سرک و تقسیط در دو مرحله یک دوم در مرحله رزت و یک دوم آن در زمان به ساقه رفتن (رشد سریع در اسفند ماه) مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا خطوط کاشت به وسیله فوکا با عرض ۵۰ و به عمق حداکثر پنج سانتی متر (مشابه دستگاه کشت مستقیم) ایجاد و کاشت در اواسط آبان در هر دو سال زراعی انجام شد. میزان بذر مصرفی برای بقولات علوفه ای شامل ماشک، باقلا (رقم برکت، رقم فیض، توده محلی بروجرد) و خلر به ترتیب ۸۰، ۱۵۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد. آبیاری مطابق عرف منطقه و بسته به نیاز به روش بارانی کلاسیک صورت گرفت. در طول فصل رشد، مراقبت های لازم شامل مبارزه با علف های هرز به صورت وجین دستی در یک مرحله و در اواسط اسفند ماه انجام شد. همچنین در طی فصل رشد، آسیب قابل توجهی از نظر هجوم آفات یا بیماری های گیاهی

نرمال سود به‌صورت جداگانه در ظروف حاوی خاک، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در انکوباتور نگهداری شدند. در پایان، مقدار CO_2 آزادشده به‌روش تیتراسیون سود باقی‌مانده با اسید ۰/۲۵ نرمال اندازه‌گیری و میزان C-CO_2 برحسب میلی‌گرم در کیلوگرم خاک خشک محاسبه گردید (Anderson, 1982).

پس از دو سال آزمایش، نتایج جمع‌آوری‌شده مورد بررسی قرار گرفت و فرض همگنی واریانس با آزمون بارتلت تأیید شد. این امر نشان‌دهنده یکنواختی و هموژنی واریانس‌ها بود و به اثبات رسید که تجزیه مرکب برای داده‌های تحقیق مناسب است. تحلیل داده‌ها به‌وسیله نرم‌افزار SAS Ver. 9 انجام شد و مقایسه میانگین‌ها به‌روش LSD در سطح احتمال پنج درصد محاسبه گردید. همچنین برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

کنار زده شد و نمونه‌ها به‌صورت پنج‌تایی و به‌صورت تصادفی انتخاب شدند، ریشه‌ها بدون آسیب خارج شدند. طول ریشه از جمله صفات مورد بررسی بود که با خط‌کش و برحسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد، حجم ریشه با قرار دادن ریشه‌ها در استوانه‌های مدرج و تعیین میزان تغییر سطح آب، اندازه‌گیری گردید، قطر ریشه نیز به‌وسیله کولیس محاسبه شد. وزن تر ریشه‌ها توسط ترازوی دقیق دیجیتالی اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه، نمونه‌ها در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند و پس از خشک شدن، نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دقیق دیجیتالی توزین و وزن خشک نمونه‌ها تعیین شدند. جهت اندازه‌گیری تنفس خاک، ابتدا ۵۰ گرم خاک الک‌شده به ظروف منتقل گردید، سپس با اضافه کردن ۲۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۵

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب اثر خاک‌ورزی بر عملکرد و صفات ریشه بقولات علوفه‌ای

Table 3- Combined analysis of variance of Tillage on forage legumes yield and root traits

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares							
		عملکرد علوفه تر Fresh forage yield	عملکرد علوفه خشک Dry forage yield	طول ریشه Root length	حجم ریشه Root volume	قطر ریشه Root diameter	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن تر ریشه Root fresh weight	تنفس خاک Soil respiration
سال Year (Y)	1	481094.72 ^{ns}	3235543.74 ^{ns}	41.31 ^{**}	54.07 ^{**}	2.18 ^{ns}	11.38 ^{**}	48.60 ^{**}	0.18 ^{**}
تکرار در سال R/Y	4	1212339.99	2359855.98	2.86	0.04	2.57	0.01	0.21	0.006
خاک‌ورزی Tillage (T)	2	2207917.12 ^{**}	1843998.24 ^{**}	179.75 ^{**}	13.25 ^{**}	0.90 ^{**}	1.80 ^{**}	26.12 ^{**}	0.12 ^{**}
سال × خاک‌ورزی Y × T	2	2.81 ^{ns}	1.13 ^{ns}	6.23 ^{ns}	6.02 ^{ns}	5.23 ^{ns}	4.25 ^{ns}	1.40 ^{**}	4.69 ^{ns}
خطای a	8	710975.81	43543.72	0.17	0.03	0.03	0.10	0.03	0.005
بقولات علوفه‌ای Forage crops (FC)	4	2317242.81 ^{**}	1670838.80 ^{**}	337.15 ^{**}	28.91 ^{**}	2.61 ^{**}	2.83 ^{**}	35.59 ^{**}	0.13 ^{**}
سال × بقولات علوفه‌ای Y × FC	4	7.02 ^{ns}	2.97 ^{ns}	8.91 ^{ns}	7.33 ^{ns}	1.27 ^{ns}	2.03 ^{ns}	2.93 ^{ns}	1.34 ^{ns}
خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای T × FC	8	117121.01 ^{**}	131732.57 ^{**}	9.17 ^{**}	1.07 ^{**}	0.10 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.57 ^{ns}	0.007 ^{ns}
سال × خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای Y × T × FC	8	1.01 ^{ns}	5.60 ^{ns}	5.36 ^{ns}	9.50 ^{ns}	1.94 ^{ns}	1.27 ^{ns}	4.55 ^{ns}	4.67 ^{ns}
خطای b Error b	48	889652.13	36620.44	1.21	0.13	0.09	0.05	0.36	0.0008
ضریب تغییرات C.V (%)	-	9.4	8.7	4.3	4.0	6.4	10.79	10.1	16.6

ns، * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطوح احتمال خطای پنج و یک درصد.

ns, * and **: are non- significant and significant in probabilitie levels of 5 and 1 %, respectively.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی × کاشت بقولات علوفه‌ای بر عملکرد، برخی عناصر غذایی و صفات ریشه
Table 4- Comparison of the mean interaction of tillage × planting forage legumes on yield, some nutrients and root traits

تیمارها Treatments		عملکرد علوفه تر Fresh forage yield	عملکرد علوفه خشک Dry forage yield	طول ریشه Root length (cm)	حجم ریشه Root volume (cm ³)	فسفر P (%)	مس Cu	روی Zn
خاک‌ورزی Tillage	بقولات علوفه‌ای Forage crops	(kg ha ⁻¹)		(ppm)				
مرسوم Conventional	باقلا توده بروجرد Faba bean (Borujerd landrace)	10131.21 ^{abc*}	2370.99 ^{bcd}	27.36 ^d	8.86 ^{fg}	0.81 ^{cd}	39.98 ^e	41.99 ^{ef}
	ماشک رقم لامعی Vetch (c.v. Lamei)	10671.54 ^a	2820.9 ^a	33.89 ^a	10.28 ^b	0.85 ^a	50.17 ^a	49.34 ^{ab}
	خلر Grass pea	10398.06 ^{ab}	2461.16 ^{bcd}	28.76 ^c	8.21 ^h	0.82 ^{bcd}	42.41 ^{cd}	46.96 ^{bc}
	باقلا رقم برکت Faba bean (c.v. Barkat)	10093.17 ^{abc}	2352.8 ^{cde}	25.57 ^e	9.02 ^{fg}	0.80 ^d	37.57 ^f	46.77 ^{bcd}
	باقلا رقم فیض Faba bean (c.v. Feyz)	10255.11 ^{ab}	2391.16 ^{fg}	27.98 ^{cd}	8.62 ^{gh}	0.81 ^{cd}	42.11 ^d	46.91 ^{bcd}
کم‌خاک‌ورزی Reduced tillage	باقلا توده بروجرد Faba bean (Borujerd landrace)	9683.08 ^{abc}	2001.1 ^{fg}	23.23 ^{fg}	9.93 ^{bc}	0.74 ^g	33.51 ^h	43.68 ^{de}
	ماشک رقم لامعی Vetch (c.v. Lamei)	10581.19 ^a	2551.11 ^b	33.39 ^a	11.74 ^a	0.84 ^a	48.55 ^{ab}	50.69 ^a
	خلر Grass pea	9967.18 ^{abc}	2276.61 ^{de}	25.31 ^e	9.14 ^{def}	0.77 ^e	37.32 ^f	45.88 ^{bcd}
	باقلا رقم برکت Faba bean (c.v. Barkat)	9475.18 ^{ab}	1751.18 ^h	19.12 ^h	6.64 ^j	0.65 ^h	31.98 ⁱ	42.18 ^{ef}
	باقلا رقم فیض Faba bean (c.v. Feyz)	9873.09 ^{abc}	2047.82 ^{gh}	24.41 ^{ef}	9.36 ^{de}	0.74 ^{fg}	31.59 ^g	45.69 ^{bcd}
بدون خاک‌ورزی No tillage	باقلا توده بروجرد Faba bean (Borujerd landrace)	9595.21 ^{abc}	1834.5 ^{gh}	22.12 ^g	10.09 ^b	0.73 ^g	32.18 ⁱ	43.21 ^{de}
	ماشک رقم لامعی Vetch (c.v. Lamei)	10345.14 ^{ab}	2514.04 ^{bc}	30.64 ^b	7.59 ^j	0.83 ^{bc}	43.19 ^c	48.74 ^{ab}
	خلر Grass pea	9906.85 ^{abc}	2214.15 ^{ef}	25.15 ^e	9.19 ^{def}	0.77 ^{ef}	36.9 ^f	45.85 ^{bcd}
	باقلا رقم برکت Faba bean (c.v. Barkat)	9100.74 ^c	1331.14 ⁱ	17.21 ⁱ	6.24 ^j	0.63 ^h	28.26 ^j	38.74 ^f
	باقلا رقم فیض Faba bean (c.v. Feyz)	9732.12 ^{abc}	1941.12 ^{gh}	23.57 ^f	9.52 ^{cd}	0.74 ^g	34.77 ^g	44.92 ^{cde}

* میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون برای هر عامل تفاوت معنی‌داری با یکدیگر در سطح پنج درصد براساس آزمون LSD ندارند.
* Similar letters in each column for each factor are not significantly different based on LSD test (p≤0.05).

نتایج و بحث

عملکرد علوفه

متقابل خاک‌ورزی × تیمار بقولات علوفه‌ای، بیشترین عملکرد علوفه تر با میانگین‌های ۱۰۶۷۱/۵ و ۱۰۵۸۱/۱۹ کیلوگرم در هکتار با کاشت بقولات علوفه‌ای ماشک در خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی مشاهده شد که با اکثر تیمارهای آزمایشی اختلاف معنی‌داری نداشتند و نسبت به کمترین میزان آن در تیمار کشت گیاه باقلا رقم برکت در بدون خاک‌ورزی به میزان ۱۲ و ۱۴ درصد عملکرد علوفه تر را افزایش داد. همچنین تیمار کاشت ماشک در خاک‌ورزی مرسوم با میانگین

براساس نتایج تجزیه واریانس مرکب (جدول ۳)، اثر اصلی خاک‌ورزی، کاشت بقولات علوفه‌ای و اثر متقابل خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر عملکرد علوفه تر و خشک در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار بودند. بر مبنای نتایج مقایسه میانگین اثر

برتری گیاه ماشک از نظر عملکرد علوفه به تثبیت نیتروژن توسط آن و جذب عناصر غذایی خاک، تجزیه به‌موقع و آزادسازی عناصر غذایی (Kebede, 2021; Gomez-Munoz et al., 2014) بر می‌گردد.

طول ریشه

تجزیه واریانس صفات ریشه در تیمارهای مختلف اعمال‌شده، تأثیر معنی‌دار سال، خاک‌ورزی، کاشت بقولات علوفه‌ای و اثر متقابل خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر طول ریشه در سطح احتمال خطای یک درصد را نشان داد (جدول ۳). مقایسه میانگین نشان داد که سال دوم نسبت به سال اول به‌میزان پنج درصد از طول ریشه بیشتری برخوردار بود (جدول ۴). براساس نتایج برهم‌کنش خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر طول ریشه، بیشترین میزان طول ریشه با میانگین‌های ۳۳/۸۹ و ۳۳/۳۴ سانتی‌متر در گیاه ماشک به‌ترتیب در خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی مشاهده شد. همچنین کمترین طول ریشه با میانگین ۱۷/۲۱ سانتی‌متر از گیاه باقلا رقم برکت در بدون خاک‌ورزی به دست آمد (جدول ۴). روش‌های خاک‌ورزی به‌طور قابل توجهی بر طول و توزیع ریشه در خاک تأثیر می‌گذارند. به‌طور کلی، خاک‌ورزی مرسوم تمایل به تشویق رشد ریشه عمیق‌تر و گسترده‌تر دارد، درحالی که روش‌های بدون خاک‌ورزی اغلب منجر به سیستم‌های ریشه‌ای سطحی‌تر و افقی‌تر می‌شوند. باین‌حال، اثرات خاص می‌تواند بسته به نوع خاک، محصول و سایر عوامل محیطی متفاوت باشد. سیستم‌هایی مانند خاک‌ورزی کاهش‌یافته یا حداقل خاک‌ورزی می‌توانند ترکیبی از ویژگی‌های هر دو روش مرسوم و بدون خاک‌ورزی را نشان دهند، به‌طوری که ریشه‌ها به‌طور بالقوه عمیق‌تر از روش بدون خاک‌ورزی رشد می‌کنند، اما به اندازه خاک‌ورزی مرسوم عمیق نیستند. به‌عنوان مثال، عدم شخم ممکن است در خاک‌های شنی مفیدتر باشد، زیرا به حفظ رطوبت و بهبود ساختار خاک کمک می‌کند، درحالی که شخم زدن مرسوم ممکن است در خاک‌های رسی برای کاهش فشردگی ترجیح داده شود. عواملی مانند بارندگی، دما و در دسترس بودن مواد مغذی نیز می‌توانند بر توسعه ریشه در پاسخ به شخم‌زدن تأثیر بگذارند. به‌طور خلاصه، شیوه‌های خاک‌ورزی با تغییر خواص خاک مانند تراکم و هوادهی، بر طول و توزیع ریشه تأثیر می‌گذارند. خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند رشد ریشه را عمیق‌تر کند، درحالی که بدون خاک‌ورزی اغلب منجر به یک سیستم ریشه‌ای کم‌عمق‌تر، اما بالقوه متراکم‌تر در خاک سطحی می‌شود. رویکرد بهینه به شرایط خاص سیستم کشاورزی و شرایط محیطی بستگی دارد (Holder et al., 2025).

۲۸۲۰/۹ کیلوگرم در هکتار و تیمار کاشت گیاه باقلا رقم برکت در بدون خاک‌ورزی با میانگین ۱۳۳۱/۱ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب بیشترین و کمترین عملکرد علوفه خشک را به خود اختصاص دادند. در این مقایسه میانگین تیمارهای کاشت باقلا رقم بروجرد و گیاه خلر در خاک‌ورزی مرسوم با کاشت گیاه ماشک و باقلا رقم فیض در کم‌خاک‌ورزی و گیاه ماشک در بدون خاک‌ورزی در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۴).

در تولید علوفه، خاک‌ورزی مرسوم که شامل به‌هم‌خوردگی شدید خاک است، در برخی موارد، ممکن است به‌دلیل بهبود تماس بذر با خاک و آزادسازی سریع‌تر مواد مغذی منجر به عملکرد اولیه علوفه بالاتر به‌ویژه در کوتاه‌مدت شود. هدف از خاک‌ورزی کاهش‌یافته، کاهش به‌هم‌خوردگی خاک در مقایسه با خاک‌ورزی کاهش‌یافته است و می‌تواند مزایایی مانند بهبود نفوذ آب و کاهش فرسایش را ارائه دهد، اما ممکن است برای جلوگیری از کاهش عملکرد، نیاز به مدیریت دقیق نیز داشته باشد. بدون خاک‌ورزی، که در آن هیچ خاکی به‌هم‌خورده نمی‌شود، می‌تواند رطوبت خاک را حفظ کند، فرسایش را کاهش دهد و ساختار خاک را در طول زمان بهبود بخشد، اما در ابتدا ممکن است به‌دلیل عواملی مانند کندتر شدن چرخه مواد مغذی و احتمال فشردگی منجر به عملکرد کمتر شود (Torabi et al., 2020; Ramadhan & Muhsin, 2021). گزارش شده است که کاهش عملکرد در تیمارهای بدون خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم و حداقل، ناشی از عوامل متعددی است که شامل شرایط سرد و مرطوب خاک در زمان جوانه‌زنی (که باعث تأخیر در سبز شدن می‌شود)، وجود علف‌های هرز، تجمع بقایای گیاهی، و افزایش تراکم خاک (که مانع رشد ریشه می‌گردد) هستند. در سیستم کم‌خاک‌ورزی، آزادسازی نیتروژن به‌دلیل اختلاط کمتر بقایا با خاک کندتر است، اما این روش به‌دلیل ماده آلی بیشتر و کیفیت بهتر خاک، معمولاً عملکرد بالاتری نسبت به بدون خاک‌ورزی دارد. محدودیت جذب آب ناشی از تراکم زیاد خاک و تشکیل لایه سخت نیز از دیگر دلایل کاهش عملکرد در سیستم بدون شخم است (Ahmadi et al., 2024).

نائل و همکاران (Nael et al., 2023) در بررسی سه‌ساله خاک‌ورزی حفاظتی و گیاه پوششی ماشک و خلر بر عملکرد علوفه ذرت (*Zea mays* L.) اظهار داشتند که خاک‌ورزی حفاظتی موجب بهبود عملکرد علوفه در ذرت شدند. همچنین گزارش کردند که تأثیر ماشک بر این صفت بیشتر از خلر بود. فیض‌بخش (Feyzbakhsh, 2023) نیز در بررسی عملکرد کمی و کیفی علوفه گیاهان ماشک، باقلا و خلر در شرایط آب‌وهوایی گرگان گزارش کرد که بیشترین و کمترین علوفه خشک به‌ترتیب از ماشک و خلر با ۸۱۴۰ و ۵۹۰۳ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. همچنین به نظر می‌رسد که دلیل

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر اصلی سال بر برخی عناصر غذایی و صفات ریشه بقولات علوفه‌ای

Table 5- Means comparison of main effect of Year on forage crops some nutrients and root traits

سال Years	طول ریشه Root length (cm)	حجم ریشه Root volume (cm ³)	قطر ریشه Root diameter (mm)	وزن خشک ریشه Root dry weight (g)	وزن تر ریشه Root fresh weight (g)	فسفر P (%)	مس Cu (%)	تنفس خاک Soil respiration (mg CO ₂ g ⁻¹ dm ⁻¹ 24 ⁻¹)
اول First	25.23 ^{b*}	8.17 ^b	1.65 ^b	1.76 ^b	5.13 ^b	0.75 ^b	35.42 ^b	0.52 ^b
دوم Second	26.20 ^a	9.79 ^a	2.26 ^a	2.49 ^a	6.66 ^a	0.86 ^a	38.74 ^a	0.61 ^a

* میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون برای هر عامل تفاوت معنی‌داری با یکدیگر در سطح پنج درصد براساس آزمون LSD ندارند.

* Similar letters in each column for each factor are not significantly different based on LSD test ($p \leq 0.05$).

در بدون خاک‌ورزی موجب افزایش ۴۵ درصد حجم ریشه شد (جدول ۴).

میزان رشد ریشه گیاهان زراعی با درجه تراکم خاک ارتباط معکوسی دارد و این ارتباط ممکن است تحت تأثیر خاک‌ورزی قرار گیرد. رشد ریشه نیز می‌تواند در کشت مستقیم به دلیل تراکم لایه سطحی خاک محدودتر گردد که نتیجه آن، تولید سیستم ریشه‌ای عمدتاً سطحی‌تر در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم است (Salih et al., 1998). حجم کمتر ریشه در سیستم بدون شخم به دلیل وجود لایه سخت حاصل می‌شود، ولی خاک‌ورزی متداول بر دمای خاک، مقاومت مکانیکی، پیوستگی حفرات درشت، رطوبت قابل دسترس و عمق توزیع ریشه اثر می‌گذارند. در یک مطالعه روی گیاه ذرت علوفه‌ای، بدون خاک‌ورزی موجب کاهش ۴۳ درصدی حجم ریشه نسبت به خاک‌ورزی مرسوم شد (Afshon et al., 2020). بره‌رسی و همکاران (Burr-Hersey et al., 2017) اثر کاشت گیاهان پوششی مختلف بر حجم ریشه را بررسی کردند و اظهار داشتند که گیاه یولاف و ماشک به ترتیب از بیشترین حجم ریشه برخوردار بودند.

قطر ریشه

براساس نتایج تجزیه واریانس مرکب (جدول ۳)، اثر اصلی خاک‌ورزی و کاشت بقولات علوفه‌ای در سطح احتمال خطای یک درصد بر قطر ریشه معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که سال دوم نسبت به سال اول، ۲۷ درصد از قطر ریشه بیشتری برخوردار بود (جدول ۴). تغییرات قطر ریشه در نظام‌های خاک‌ورزی مختلف نیز نشان داد که خاک‌ورزی مرسوم با میانگین ۲/۴۰ میلی‌متر، بیشترین میزان قطر ریشه را به خود اختصاص داد که نسبت به کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی به میزان ۳۳ درصد قطر ریشه را افزایش داد. در بین بقولات علوفه‌ای نیز مشاهده شد که بیشترین و کمترین قطر ریشه با میانگین‌های ۲/۵۲ و ۱/۴۵ میلی‌متر به ترتیب در گیاه ماشک و گیاه باقلا رقم برکت مشاهده شد. گیاه باقلا توده برورجد با گیاه خلر و باقلا رقم فیض اختلاف معنی‌داری نداشت

در این آزمایش، عملیات خاک‌ورزی با ایجاد تغییر در ساختمان خاک، شکستن لایه‌های خاک و سست نمودن آن باعث کاهش مقاومت خاک گردید و در نتیجه ریشه‌های بقولات علوفه‌ای توانستند از عمق نفوذ بیشتری برخوردار باشند. در پژوهشی، نتایج بررسی روش‌های خاک‌ورزی (حفاظتی، بدون خاک‌ورزی و شخم مرسوم) بر طول ریشه نشان داد که روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و فعالیت‌های ریشه محصول، شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود بخشیده و غنای تغذیه‌ای آن را افزایش می‌دهند. این تغییرات به بهبود ترکیبات میکروبی و افزایش جمعیت میکروبی در ریزوسفر کمک کرده و در نهایت به بهبود شرایط غذایی خاک و طول ریشه منجر می‌شود (Wang et al., 2020). نتایج سایر محققان نیز بیانگر آن بود که در خاک‌هایی که خاک‌ورزی انجام می‌گیرد، به علت جابه‌جایی ذرات خاک، تراکم خاک کاهش یافته و نفوذ و گسترش ریشه‌ها بیشتر است (Sha et al., 2024). تأثیر کاشت بقولات علوفه‌ای بر طول ریشه قابل توجه است، زیرا بقولات دارای ویژگی‌های رشد ریشه منحصربه‌فرد است که سلامت خاک و پویایی مواد مغذی را افزایش می‌دهند. تحقیقات نشان می‌دهد که حبوبات علوفه‌ای، طول ریشه و معماری متفاوتی را نشان می‌دهند که می‌تواند ساختار خاک را بهبود ببخشد (Acikbas et al., 2021).

حجم ریشه

از نظر آماری اثر اصلی سال، خاک‌ورزی، کاشت بقولات علوفه‌ای و اثر متقابل خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر حجم ریشه تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال خطای یک درصد داشتند (جدول ۳). تغییرات حجم ریشه طی سال‌های زراعی مختلف نشان داد که بیشترین میزان حجم ریشه با میانگین ۹/۷۹ سانتی‌مترمکعب متعلق به سال دوم بود (جدول ۴). نتایج برهم‌کنش خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر حجم ریشه نشان داد که بیشترین میزان حجم ریشه با میانگین ۱۱/۷ سانتی‌مترمکعب در گیاه ماشک در کم‌خاک‌ورزی مشاهده شد و نسبت به کمترین حجم ریشه در گیاه باقلا رقم برکت

(جدول ۵). در بیان چرایی این رویداد می‌توان گفت که خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند خاک را، به‌ویژه در خاک سطحی، فشرده کند و تعداد و اندازه منافذی را که ریشه‌ها برای رشد به آن نیاز دارند، کاهش دهد. این فشرده‌سازی می‌تواند باعث شود که ریشه‌ها به‌جای نفوذ عمیق، به‌صورت جانبی در نزدیکی سطح رشد کنند و در نتیجه سیستم ریشه‌ای کم‌عمق‌تر و فشرده‌تر ایجاد شود. در برخی موارد، فشرده‌سازی می‌تواند باعث افزایش قطر ریشه‌ها در اثر مواجهه با مقاومت شود، اما این اغلب با کاهش طول کلی ریشه و زیست‌توده

همراه است. ولی در سیستم‌های شخم حفاظتی، عملیات شخم موجب ایجاد ساختار خاک مطلوب‌تری با منافذ بزرگ‌تر و فشرده‌گی کمتر می‌شود. این می‌تواند منجر به نفوذ عمیق‌تر ریشه و توزیع یکنواخت‌تر ریشه‌ها شود، که به‌دلیل مقاومت کمتر، احتمالاً قطرهای کوچک‌تری دارند. اثر خاص شخم بر قطر ریشه به عوامل مختلفی از جمله نوع خاک، گونه‌های گیاهی و شیوه‌های خاص شخم مورد استفاده نیز بستگی دارد (Ahmadi et al., 2025; Holder et al., 2025).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر اصلی خاک‌ورزی و کاشت گیاهان علوفه بر برخی عناصر غذایی و صفات ریشه

Table 6- Mean the main effects Tillage and planting forage crops on some nutrients and root traits

تیماها Treatments	قطر ریشه Root diameter (mm)	وزن تر ریشه Root fresh weight (g)	وزن خشک ریشه Root dry weight (g)	نیتروژن N (%)	پتاسیم K (%)	آهن Fe (ppm)	منگنز Mn (ppm)	تنفس خاک Soil respiration (mg CO ₂ g ⁻¹ dm ⁻¹ 24 ⁻¹)
خاک‌ورزی Tillage								
مرسوم Conventional	2.40 ^{a*}	6.93 ^a	2.48 ^a	3.96 ^b	2.90 ^a	192.07 ^a	105.92 ^a	0.65 ^a
کم‌خاک‌ورزی Reduced tillage	1.67 ^b	5.58 ^b	2.09 ^b	4.95 ^a	2.311 ^b	184.29 ^b	98.81 ^b	0.56 ^b
بدون خاک‌ورزی No tillage	1.62 ^b	5.16 ^c	1.96 ^b	3.66 ^c	2.19 ^c	182.56 ^c	97.56 ^b	0.51 ^b
بقولات علوفه‌ای Forage crops								
باقلا توده بروجرد Faba bean (Borujerd landrace)	1.60 ^{bc}	5.59 ^c	1.93 ^{cd}	3.75 ^{cd}	2.19 ^b	182.32 ^c	97.28 ^c	0.55 ^{cd}
ماشک رقم لامعی Vetch (c.v. Lamei)	2.52 ^a	8.05 ^a	2.75 ^a	5.28 ^a	2.91 ^a	198.43 ^a	108.25 ^a	0.68 ^a
خلر Grass pea	1.74 ^b	6.03 ^b	2.31 ^b	4.35 ^b	2.36 ^b	187.13 ^b	103.23 ^b	0.60 ^b
باقلا رقم برکت Faba bean (c.v. Barkat)	1.45 ^c	4.20 ^d	1.74 ^d	3.47 ^d	2.10 ^b	178.64 ^d	94.20 ^d	0.47 ^d
باقلا رقم فیض Faba bean (c.v. Feyz)	1.69 ^b	5.72 ^{bc}	2.61 ^{bc}	4.02 ^c	2.27 ^b	185.13 ^{bc}	100.20 ^{bc}	0.53 ^{bc}

* میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون برای هر عامل تفاوت معنی‌داری با یکدیگر در سطح پنج درصد براساس آزمون LSD ندارند.

* Similar letters in each column for each factor are not significantly different based on LSD test ($p \leq 0.05$).

مطالعات نشان می‌دهند که خاک‌ورزی بر رشد و توزیع ریشه تأثیر دارند و روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی موجب رشد و توزیع بیشتر ریشه در لایه سطحی خاک می‌شوند (Wasaya et al., 2019). عملیات خاک‌ورزی با ایجاد تغییر در ساختمان خاک، شکستن لایه‌های خاک و سست نمودن آن باعث کاهش مقاومت خاک گردیده و در نتیجه ریشه‌های گیاهان مورد مطالعه توانستند از قطر

ریشه بیشتری برخوردار باشند. از سوی دیگر، نتایج تحقیقاتی نشان داد که گیاهان تحت خاک‌ورزی مرسوم، ریشه‌های طولانی‌تر و توده ریشه‌ای بزرگ‌تری (قطر بیشتر) داشتند که به جذب بهتر مواد مغذی و آب کمک کرده و رشد زیست‌توده و تجمع عناصر درشت را تحریک می‌کند (Szczepanek et al., 2024). نتایج یک پژوهش نشان داد که روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و فعالیت‌های ریشه محصول،

شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود بخشیده و غنای تغذیه‌ای آن را افزایش می‌دهند. این تغییرات به بهبود ترکیبات میکروبی و افزایش جمعیت میکروبی در ریزوسفر کمک کرده و در نهایت به افزایش قطر ریشه منجر می‌شود (Wang et al., 2020).

وزن تر و خشک ریشه

طبق جدول تجزیه واریانس مرکب (جدول ۳)، اثر اصلی سال، خاک‌ورزی و کاشت بقولات علوفه‌ای در سطح احتمال خطای یک درصد بر وزن تر و خشک ریشه معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی بر وزن خشک و تر ریشه (جدول ۴) نشان داد که سال دوم نسبت به سال اول، ۲۹ درصد وزن خشک ریشه و ۲۳ درصد وزن تر ریشه بیشتری برخوردار بود. در بین نظام‌های خاک‌ورزی نیز مشاهده شد که سیستم خاک‌ورزی مرسوم با میانگین‌های ۲/۴۸ و ۶/۹۳ گرم به ترتیب بیشترین میزان وزن خشک و تر ریشه را به خود اختصاص داد و نسبت به کمترین میزان آن‌ها در بدون خاک‌ورزی به میزان ۲۰ درصد وزن خشک و ۲۶ درصد وزن تر ریشه را افزایش داد. تغییرات وزن تر و خشک ریشه در بین بقولات علوفه‌ای مختلف کاشت‌شده نشان داد که گیاه ماشک با میانگین‌های ۲/۷۴ و ۸/۰۵ گرم به ترتیب از بیشترین وزن خشک و تر ریشه برخوردار بود که نسبت به کمترین میزان آن‌ها در گیاه باقلا رقم برکت به میزان ۵۰ درصد وزن خشک و ۴۹ درصد وزن تر ریشه را افزایش داد. گیاه باقلا توده بروجد با گیاه باقلا رقم فیض اختلاف معنی‌داری از نظر وزن خشک و تر ریشه ایجاد نکرد (جدول ۵).

در این آزمایش به دلیل اینکه گیاه ماشک در بین نظام‌های خاک‌ورزی مختلف دارای بیشترین طول ریشه، حجم ریشه و قطر ریشه بود، در نتیجه از بیشترین وزن تر و خشک ریشه نیز برخوردار بود. در توجیه کاهش وزن ریشه در بدون خاک‌ورزی می‌توان چنین استنباط نمود که افزایش فشردگی خاک باعث کاهش تخلخل خاک و اکسیژن موجود در خاک گردید و در نتیجه اکسیژن که به عنوان فعال‌کننده تغذیه گیاه محسوب می‌شود، به اندازه کافی برای تهویه در دسترس ریشه قرار نگرفت. ربیعی و همکاران (Rabiee et al., 2021) در بررسی اثر خاک‌ورزی بر وزن ریشه اظهار داشتند که بیشترین وزن ریشه در خاک‌ورزی مرسوم حاصل شد که نسبت به بدون خاک‌ورزی به میزان ۱۲ درصد وزن ریشه را افزایش داد.

تنفس خاک

تنفس خاک نقش مهمی در تولید کربن بوم‌نظام‌های خشکی دارد و اندازه‌گیری آن برای بودجه‌بندی کربن ضروری است. نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که تنفس خاک تحت تأثیر اصلی سال، سیستم خاک‌ورزی و کاشت گیاهان علوفه‌ای در سطح احتمال خطای

یک درصد معنی‌دار شدند (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که در بین دو سال زراعی، سال دوم با میانگین ۰/۶۱ میلی گرم دی‌اکسیدکربن در سانتی‌مترمربع در روز از تنفس خاک بیشتری برخوردار بود (جدول ۴). در بین سیستم‌های خاک‌ورزی، بیشترین تنفس خاک به سیستم خاک‌ورزی مرسوم با میانگین ۰/۶۵ میلی گرم دی‌اکسیدکربن در سانتی‌مترمربع در روز اختصاص یافت که نسبت به سیستم کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی به ترتیب ۱۴ و ۲۱ درصد تنفس خاک را افزایش داد. در بین گیاهان علوفه‌ای نیز بیشترین کمترین تنفس خاک با میانگین‌های ۰/۶۸ و ۰/۴۷ میلی گرم دی‌اکسیدکربن در سانتی‌مترمربع در روز به ترتیب در گیاه ماشک و باقلا رقم برکت مشاهده شد. گیاه باقلا توده بروجد با باقلا رقم برکت و گیاه خلر با باقلا رقم فیض اختلاف معنی‌داری نداشتند (جدول ۵).

در این مطالعه در سیستم شخم مرسوم به دلیل زیرورو شدن خاک، اکسیژن بیشتری به ریزجانداران خاک رسیده و با در معرض هوا قرار گرفتن مواد آلی خاک، شرایط برای افزایش تجزیه مواد و در نتیجه افزایش تنفس فراهم می‌گردد و به همین دلیل، در سیستم شخم مرسوم میزان تنفس خاک بیشتر از دو سیستم دیگر می‌باشد. همچنین به نظر می‌رسد که خاک‌ورزی مرسوم با افزایش تجزیه‌پذیری بقایا سبب افزایش میزان تنفس در خاک نسبت به دو سیستم دیگر در منطقه مورد مطالعه شده و برخی از اثرات نامطلوب را تعدیل کرده است. صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2019) عنوان داشتند که سرعت بالای تجزیه در گیاهان در سیستم خاک‌ورزی مرسوم نسبت به سیستم کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی سبب افزایش تنفس میکروبی خاک شده است. در آزمایشی دیگر نائل و همکاران (Nael et al., 2023) در یک مطالعه، اثر خاک‌ورزی و گیاهان پوششی بر خصوصیات خاک در گیاه ذرت را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که خاک‌ورزی مرسوم در مقایسه با سیستم بدون خاک‌ورزی موجب بهبود اغلب خصوصیات خاک از جمله تنفس پایه شد. همچنین اظهار داشتند که دو گیاه پوششی ماشک و خلر باعث افزایش تنفس پایه به میزان ۳۰ درصد بیشتر از تیمار بدون گیاهان پوششی شد. آن‌ها عنوان داشتند که دلیل اصلی افزایش تنفس در سیستم خاک‌ورزی مرسوم، افزایش تجزیه کربن بوده که در هر منطقه بیشترین میزان تنفس در این سیستم مشاهده شد و سیستم‌های بدون شخم و حفاظتی به دلیل تجزیه کمتر کربن، میزان تنفس کمتری داشتند.

عناصر غذایی در اندام‌های هوایی

نیترژن

اثر اصلی خاک‌ورزی و کاشت بقولات علوفه‌ای بر مقدار نیترژن

باشند، به این دلیل که راندمان استخراج نیتروژن در دسترس در نظام‌های مذکور کمتر از خاک‌ورزی مرسوم می‌باشد. طی پژوهشی مشاهده شد که مقدار نیتروژن کل اندام هوایی و انباشتگی نیتروژن در دانه تحت تأثیر خاک‌ورزی قرار گرفت. بیشترین نیتروژن کل و نیتروژن محتوای دانه ذرت در خاک‌ورزی مرسوم و کمترین آن در بدون خاک‌ورزی گزارش شده است (Canisares et al., 2021). همچنین طی آزمایشی در بررسی تأثیر خاک‌ورزی بر غلظت عناصر و عملکرد گندم در ایلام گزارش شد که تیمار بدون خاک‌ورزی نسبت به دو تیمار دیگر باعث کاهش عناصر غذایی دانه از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم شد، به طوری که بیشترین میزان فسفر و پتاسیم در خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد که با کم‌خاک‌ورزی تفاوت معنی‌داری نداشت (Chaieb et al., 2020).

فسفر

تجزیه و تحلیل عنصر فسفر در تیمارهای مختلف اعمال شده، تأثیر معنی‌داری سال، خاک‌ورزی، کاشت بقولات علوفه‌ای و اثر متقابل خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای را در سطح احتمال خطای یک درصد نشان داد (جدول ۶). نتایج نشان داد که در بین دو سال زراعی، سال دوم با میانگین ۰/۸۶ درصد از فسفر بیشتری برخوردار بود که نسبت به سال اول ۱۳ درصد میزان فسفر را افزایش داد (جدول ۵). عناصر غذایی بالاتر در سال دوم می‌تواند به دلیل شرایط آب‌وهوایی مناسب و میزان بارندگی بیشتر باشد. نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر فسفر موجود در اندام‌های هوایی نشان داد که گیاه ماشک در نظام خاک‌ورزی مرسوم با میانگین ۰/۸۵ درصد و کم‌خاک‌ورزی با میانگین ۰/۸۴ درصد، بیشترین میزان فسفر را به خود اختصاص دادند. کمترین میزان فسفر با میانگین ۰/۶۳ درصد نیز در گیاه باقلا رقم برکت در نظام‌های بدون خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی مشاهده شد. بین گیاه باقلا توده بروجرد با گیاهان خمر و باقلا رقم فیض در نظام خاک‌ورزی مرسوم و گیاه باقلا توده بروجرد با گیاه باقلا رقم فیض در کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۴).

موجود در اندام‌های هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین اثر خاک‌ورزی بر عنصر غذایی نیتروژن در اندام‌های هوایی نشان داد که بیشترین و کمترین میزان نیتروژن با میانگین‌های ۴/۹۵ و ۳/۶۶ درصد به ترتیب در شرایط کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی مشاهده شد. براساس نتایج مقایسه میانگین تیمار بقولات علوفه‌ای، بیشترین میزان نیتروژن به گیاه ماشک با میانگین ۵/۲۸ درصد تعلق داشت که نسبت به کمترین میزان آن در گیاه باقلا رقم برکت به میزان ۴۰ درصد نیتروژن را در اندام‌های هوایی افزایش داد. گیاه باقلا توده بروجرد با رقم برکت و فیض اختلاف معنی‌داری نداشتند (جدول ۴).

استفاده از روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی مانند بی‌خاک‌ورزی می‌تواند کیفیت خاک را بهبود بخشد و از اختلال در ساختار آن جلوگیری کند. این روش‌ها به حفظ ساختار خاک کمک کرده و فرایندهای بیولوژیکی و تنوع زیستی میکروبی را افزایش می‌دهند. ریزوبیوم‌ها به عنوان شاخص کیفیت خاک شناخته می‌شوند و نقش مهمی در تثبیت نیتروژن دارند که می‌تواند به بهبود سیستم‌های کشاورزی کمک کند. همچنین روش‌های خاک‌ورزی بر ویژگی‌های مختلف خاک تأثیر می‌گذارند که بر ترکیب میکروبی و تثبیت نیتروژن اثرگذار است (Torabian et al., 2019). خاک‌ورزی تأثیر زیادی بر وضعیت نیتروژن خاک و دسترسی آن برای گیاهان دارد. نیتروژن موجود در بقایای گیاهی تنها از طریق فعالیت‌های میکروبی و فرایندهای معدنی قابل استفاده است. خاک‌ورزی شدید با زیر و رو کردن خاک، تهویه را افزایش داده و باعث تجزیه سریع بقایای گیاهی و دسترسی فوری نیتروژن می‌شود. در مقابل، کم‌خاک‌ورزی یا بی‌خاک‌ورزی در کشاورزی حفاظتی، تجزیه آهسته‌تری از بقایای گیاهی را به همراه دارد و نیتروژن به تدریج آزاد می‌شود (Wu et al., 2021). محققان بیان داشتند که دلیل کاهش نیتروژن در خاک‌ورزی متداول تهویه مطلوب، اکسید شدن و کاهش مواد آلی خاک می‌باشد (Ramroudi et al., 2011).

گیاهان مذکور در دو نظام خاک‌ورزی کاهشی و بدون خاک‌ورزی برای اینکه عملکردی مشابه خاک‌ورزی مرسوم داشته باشند، ممکن است به مقدار بیشتری از کودهای شیمیایی نیتروژن نیاز داشته

جدول ۶- تجزیه واریانس مرکب اثر خاک‌ورزی بر برخی عناصر غذایی بقولات علوفه‌ای

Table 7- Combined analysis of variance of tillage on forage crops some nutrients

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean of squares						
		نیترژن N	فسفر P	پتاسیم K	مس Cu	آهن Fe	منگنز Mn	روی Zn
سال Year (Y)	1	8.41 ^{ns}	0.0008 ^{**}	2.38 ^{ns}	48.11 ^{**}	48.10 ^{ns}	118.08 ^{ns}	225.84 ^{ns}
تکرار در سال R/Y	4	12.45	0.0001	5.50	5.31	1110.79	798.33	523.14
خاک‌ورزی Tillage (T)	2	13.32 ^{**}	0.05 ^{**}	0.69 [*]	415.21 ^{**}	828.01 ^{**}	663.29 ^{**}	320.07 [*]
سال × خاک‌ورزی Y × T	2	9.74 ^{ns}	2.15 ^{ns}	4.92 ^{ns}	2.42 ^{ns}	2.20 ^{ns}	1.38 ^{ns}	8.35 ^{ns}
خطای a a	8	0.05	0.0003	0.01	0.86	3.40	7.32	24.38
بقولات علوفه‌ای Forage crops (FC)	4	9.29 ^{**}	0.05 ^{**}	1.69 ^{**}	448.99 ^{**}	1023.17 ^{**}	543.83 ^{**}	145.09 ^{**}
سال × بقولات علوفه‌ای Y × FC	4	1.05 ^{ns}	1.85 ^{ns}	1.89 ^{ns}	3.93 ^{ns}	1.52 ^{ns}	2.43 ^{ns}	7.61 ^{ns}
خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای T × FC	8	0.37 ^{ns}	0.005 ^{**}	0.07 ^{ns}	3.93 ^{**}	9.65 ^{ns}	33.77 ^{ns}	19.35 [*]
سال × خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای Y × T × FC	8	3.67 ^{ns}	1.45 ^{ns}	5.87 ^{ns}	3.66 ^{ns}	1.83 ^{ns}	7.97 ^{ns}	5.45 ^{ns}
خطای b Error b	48	0.24	0.0004	0.17	0.71	28.30	23.08	9.78
ضریب تغییرات C.V (%)	-	12.0	2.6	4.9	2.2	2.8	4.8	6.8

ns, * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطوح احتمال خطای پنج و یک درصد.

ns, * and **: are non-significant and significant in probability levels of 5 and 1 %, respectively.

کم‌خاک‌ورزی توانست میزان انتقال فسفر به گیاه را بهبود ببخشد. در ارتباط با چرای این پدیده گزارش شده است که افزایش سرعت جذب فسفر توسط گیاه میزبان به دلیل حضور انشعابات فراوان هیف‌های میکوریزا در داخل سلول‌های پوست ریشه گیاه است که سطح وسیعی را برای انتقال عناصر غذایی به خصوص فسفر به گیاه میزبان و دانه فراهم می‌نماید (Rahimzadeh & Pirzad, 2017). محققان بیان داشتند که علت افزایش فسفر گیاه در شرایط کم‌خاک‌ورزی به دلیل قابلیت دسترسی بیشتر به فسفر و نیترات در سطح خاک بود (Wright et al., 2009).

پتاسیم

نتایج تجزیه واریانس مرکب (جدول ۶)، نشان داد که اثر خاک‌ورزی و کاشت بقولات علوفه‌ای بر مقدار پتاسیم در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین میزان پتاسیم با میانگین ۲/۹۰ درصد در خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد که نسبت به بدون خاک‌ورزی به میزان ۲۷ درصد

تفاوت درصد فسفر بین روش‌های مختلف خاک‌ورزی ناشی از بهبود دسترسی به فسفر با توجه به رشد مناسب ریشه و فشردگی کمتر خاک، در شرایط کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی متداول نسبت به بی‌خاک‌ورزی است. شرایط خاک در سامانه بی‌خاک‌ورزی برای رشد ریشه نامناسب بوده که سبب ایجاد محدودیت در جذب آب و عناصر غذایی برای گیاه می‌شود. به نظر می‌رسد که به هم‌خوردگی و آشفستگی خاک در سامانه خاک‌ورزی مرسوم، فسفر قابل جذب در محلول خاک و به دنبال آن قابلیت دسترسی ریشه به این عنصر پرمصرف را در یک بازه زمانی کوتاه افزایش می‌دهد. صرف نظر از نوع مدیریت خاک، فرآیند معدنی شدن عناصر موجود در ساختار بقایای آلی تحت شرایط تهویه‌ای مطلوب توسط آنزیم‌های فسفومونواستراز به آسانی انجام می‌گیرد (Xiaozhu et al., 2016). استانکوفسکی و همکاران (Stankowski et al., 2022) اشاره کردند که در کشت معمولی، توزیع فسفر در نیم‌رخ خاک یکنواخت‌تر از کشت حفاظتی است. این تفاوت ناشی از اختلاط و چرخش مکرر خاک در سیستم شخم است، درحالی که در کشت حفاظتی، به دلیل تحرک کمتر، فسفر در لایه‌های کم‌عمق خاک تجمع می‌یابد. عدم به هم‌خوردگی خاک در

پتاسیم را افزایش داد. بیشترین و کمترین میزان پتاسیم با میانگین‌های ۲/۹۱ و ۲/۱۰ درصد به‌ترتیب از گیاه ماشک و گیاه باقلا رقم برکت به دست آمد. گیاه باقلا رقم برکت با رقم فیض و توده بروجرد و گیاه خلر در یک گروه آماری قرار داشتند (جدول ۵).

در سیستم کشاورزی حفاظتی، عناصری مانند پتاسیم تحت تأثیر مدیریت کم‌خاک‌ورزی قرار می‌گیرند و تمایل به انباشته شدن در سطح خاک را دارند. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده مداوم از نظام بدون شخم باعث توزیع لایه‌ای پتاسیم در نیم‌رخ خاک می‌شود. در این توزیع، غلظت‌های نسبتاً زیاد پتاسیم در نزدیکی سطح و غلظت‌های نسبتاً کم در عمق‌های پایین‌تر نسبت به سیستم کشاورزی مرسوم مشاهده می‌شود (Kumar et al., 2022). خاک‌ورزی مرسوم، با روش‌هایی مانند شخم زدن و چنگک زدن، ساختار خاک را مختل می‌کند و مواد آلی را در معرض تجزیه سریع‌تر قرار می‌دهد. این می‌تواند منجر به آزاد شدن پتاسیم شود و آن را به‌ویژه در خاک‌های شنی، مستعد آب‌شویی کند. از طرفی، ساختار سست خاک ناشی از خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند احتمال شسته شدن پتاسیم توسط آب را افزایش دهد، به‌ویژه در مناطقی که بارندگی یا آبیاری وجود دارد (Hosseini et al., 2015). محققان طی آزمایشی طولانی‌مدت به‌منظور بررسی اثر نظام‌های خاک‌ورزی بر کربن آلی خاک و مواد مغذی خاک در سورگوم گزارش دادند که پتاسیم خاک در بدون خاک‌ورزی بیشتر از خاک‌ورزی مرسوم است (Malobane et al., 2020)، که با نتایج این تحقیق متفاوت بود. لیبیک و همکاران (Lipiec et al., 2003) گزارش کردند که متراکم شدن خاک به‌دلیل کاهش سطح ریشه، جذب پتاسیم توسط ذرت را کاهش داد. آن‌ها بیان کردند که در خاک‌های فشرده بدون استفاده از کود پتاسیم، جذب پتاسیم در واحد سطح ریشه نمی‌تواند کمبود پتاسیم ناشی از محدودیت رشد ریشه را جبران کند. چگنی و همکاران (Chegeni et al., 2014) اظهار کردند که در روش‌های بدون خاک‌ورزی به‌دلیل بازگشت بقایای گیاه‌های به افق‌های سطحی خاک، افزایش میزان مواد آلی مشاهده شد، درحالی که در روش‌های خاک‌ورزی مرسوم به هم خوردن خاک باعث تجزیه بیشتر و زودتر بقایای گیاهی شده که در نتیجه کاهش میزان پتاسیم را به همراه داشت.

عناصر میکرو (مس، آهن، منگنز و روی)

از نظر آماری اثر اصلی سال بر عنصر مس، خاک‌ورزی و کاشت بقولات علوفه‌ای بر عناصر آهن، روی، مس و منگنز و اثر متقابل خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر عنصر مس و روی در اندام‌های هوایی تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال خطای یک و پنج درصد داشتند (جدول ۶). براساس نتایج مقایسه میانگین، سال دوم نسبت به سال اول هشت درصد از میزان مس بیشتری برخوردار بود (جدول

۴). برهم‌کنش خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر میزان مس در اندام هوایی گویای این مطلب بود که بیشترین میزان مس به گیاه ماشک در خاک‌ورزی مرسوم با میانگین ۵۰/۱۷ پی‌پی‌ام تعلق یافت و نسبت به کمترین میزان آن در گیاه باقلا رقم برکت در بدون خاک‌ورزی به‌میزان ۴۴ درصد عنصر مس را افزایش داد. گیاه باقلا رقم برکت در خاک‌ورزی مرسوم با گیاه خلر در دو نظام دیگر، گیاه خلر با گیاه باقلا رقم فیض در خاک‌ورزی مرسوم، گیاه باقلا رقم برکت در کم‌خاک‌ورزی با گیاه باقلا توده بروجرد در بدون خاک‌ورزی و گیاه باقلا در رقم فیض در کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. همچنین نتایج برهم‌کنش خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر عنصر روی نشان داد که بیشترین میزان این عنصر در گیاه ماشک در کم‌خاک‌ورزی با میانگین ۵۰/۶۹ پی‌پی‌ام مشاهده شد که با همین رقم در دو نظام دیگر اختلاف معنی‌داری نداشت و از طرفی نسبت به کمترین میزان روی در گیاه باقلا رقم برکت در بدون خاک‌ورزی به‌میزان ۲۴ درصد روی را افزایش داد. بین گیاه خلر با گیاه باقلا رقم برکت و فیض در خاک‌ورزی مرسوم با گیاه خلر و باقلا رقم فیض در کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۴).

نتایج مقایسه میانگین خاک‌ورزی بر عنصر آهن و منگنز اندام هوایی نشان داد که بیشترین و کمترین میزان آهن با میانگین‌های ۱۹۲/۰۸ و ۱۸۲/۵۶ پی‌پی‌ام و منگنز با میانگین‌های ۱۰۵/۹۲ و ۹۷/۵۶ پی‌پی‌ام به‌ترتیب در خاک‌ورزی مرسوم و بدون خاک‌ورزی مشاهده شد. در بین بقولات علوفه‌ای نیز گیاه ماشک با میانگین ۱۹۸/۴۳ و ۱۷۸/۶۴ پی‌پی‌ام به‌ترتیب از بیشترین میزان آهن و منگنز برخوردار بود که نسبت به کمترین میزان آن در گیاه باقلا رقم برکت به‌میزان ۱۱ درصد آهن و ۴۷ درصد منگنز را افزایش داد. گیاه باقلا رقم فیض با گیاه باقلا توده بروجرد در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۵). خاک‌ورزی مرسوم گاهی اوقات می‌تواند به‌دلیل افزایش معدنی شدن و کاهش اختلاط خاک منجر به غلظت بیشتر این ریزمغذی‌ها در خاک سطحی شود، اما می‌تواند باعث شسته شدن یا کاهش دسترسی این مواد مغذی به گیاهان نیز شود. عوامل دیگری مانند نوع خاک، pH و محتوای مواد آلی نیز نقش مهمی در دسترسی به ریزمغذی‌ها دارند (Shiwakoti et al., 2019; Stankowski et al., 2022). با توجه به محدودیت عناصر غذایی به‌ویژه عناصر کم‌مصرف که در مناطق جنوبی کشور تحت عملیات خاک‌ورزی رایج و کاهش ماده آلی خاک تشدید شده است، استفاده از کودهای شیمیایی را جهت حفظ پتانسیل عملکرد گیاه زراعی اجتناب‌ناپذیر می‌کند. بنابراین، تلفیق مدیریت خاک‌ورزی و کوددهی می‌تواند تأثیر به‌سزایی در تولید محصول، بهره‌وری پایدار و بهبود کارایی عناصر غذایی داشته باشد (Sarikhani et al., 2018). محققان در بررسی اثر تراکم خاک بر جذب مواد معدنی و فعالیت آنزیم‌های تنفسی کلیدی

برخوردار بود، به دست آمد. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی $\times$ کاشت بقولات علوفه‌ای نشان داد که بیشترین پتانسیل عملکرد خشک و تر علوفه، طول ریشه، غلظت عنصر فسفر و تنفس خاک در خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی و کاشت گیاه ماشک بدون تفاوت معنی‌دار با یکدیگر مشاهده شد. همچنین بیشترین میزان حجم ریشه و غلظت عنصر روی از کم‌خاک‌ورزی و گیاه ماشک به دست آمد. مقایسه میانگین اثرات کاشت بقولات علوفه‌ای مختلف بر صفات اندازه‌گیری نیز نشان داد که بیشترین میزان عملکرد، صفات ریشه و عناصر غذایی در گیاه ماشک مشاهده شد. در مجموع، گیاه ماشک مناسب‌ترین بقولات علوفه‌ای برای روش‌های مختلف خاک‌ورزی تحت شرایط آب‌وهوایی خرم‌آباد قابل توصیه است. در بین روش‌های مختلف خاک‌ورزی، اگرچه تفاوتی بین خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی در گیاه ماشک مشاهده نشد، اما خاک‌ورزی حداقل به‌منظور حفاظت از منبع تولید خاک و بهره‌مندی از مزایای کشاورزی حفاظتی و کاهش هزینه تهیه بستر، مناسب‌تر از خاک‌ورزی مرسوم است.

سپاسگزاری

بدینوسیله از اساتید محترم و کارکنان آزمایشگاه مرکز تحقیقات خرم‌آباد بابت راهنمایی و کمک‌هایشان در طول پروژه تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

در گیاه سویا (*Glycine max* L.) به این نتیجه دست یافتند که تراکم بالای خاک منجر به تجمع پتاسیم، فسفر، منیزیم، منگنز، آهن، مس، روی و کلسیم در خاک شده و کاهش فعالیت آنزیم‌های ایزوسیسترات دهیدروژناز و سیتوکروم c اکسیداز را به دنبال دارد که در ادامه منجر به کاهش اندازه سلول‌های ریشه در گیاه سویا می‌گردد (Wang et al., 2019). فشردگی خاک باعث کاهش انتشار اکسیژن و ایجاد شرایط بی‌هوازی در اطراف ریشه گیاه می‌شود که این امر منجر به کاهش رشد ریشه و مختل شدن جذب فعال عناصر آهن، روی و مس می‌شود. همچنین تحقیقات محمودی و همکاران (Mahmoudi et al., 2015) نشان داد که به‌طور کلی، تأثیر فشردگی خاک بر جذب عناصر غذایی به وضعیت سیستم ریشه بستگی دارد. ریشه‌های گیاهی برای تأمین مواد مغذی از طریق خاک رشد می‌کنند. از آنجاکه ریشه در خاک رشد می‌کند، به‌طور کلی فقط با حدود یک درصد حجم خاک در تماس می‌باشد. ساختار خوب خاک در فرآیند رهگیری ریشه ضروری است. فشردگی خاک می‌تواند به‌طور قابل توجهی رشد ریشه و رهگیری با مواد مغذی در سراسر خاک را محدود کند. برخی از عناصر ماکرو و ریزمغذی مهم مانند کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز و روی توسط ریشه جذب می‌شوند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که طول ریشه، حجم ریشه، قطر ریشه، وزن خشک و تر ریشه، غلظت عناصر مس، فسفر و تنفس خاک بالاتر در سال دوم آزمایش که از میزان و توزیع بارش بهتری

References

- Acikbas, S., Ozyazici, M. A., & Bektas, H. (2021). Root system architecture and seed weight relations in forage pea (*Pisum sativum* ssp. arvense L.). *Ciência Rural*, 52(6), e20210032. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210032>
- Afshon, E., Moghadam, H., Jahansooz, M. R., Soufizadeh, S., & Oveisi, M. (2020). Effect of tillage, water stress and nitrogen fertilizer on forage quality of maize in Karaj. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 52(3), 25-40. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJFCS.2020.295521.654681>
- Ahmadi, H., Mirseyed Hosseini, H., Moshiri, F., Alikhani, H. A., & Etesami, H. (2024). Impact of varied tillage practices and phosphorus fertilization regimes on wheat yield and grain quality parameters in a five-year corn-wheat rotation system. *Scientific Reports*, 14(1), 14717. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65784-w>
- Ahmadi, S. H., Seidel, S. J., Lopez, G., Kamali, B., Gaiser, T., Hadir, S., & Ochoa, I. H. (2025). Root: Shoot ratio of field crops under conventional and conservation tillage: A Meta analysis. *Soil Use and Management*, 41(1), e70026. <https://doi.org/10.1111/sum.70026>
- Anderson, J. P. (1982). Soil respiration. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9, 831-871. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c41>
- Burr-Hersey, J. E., Mooney, S. J., Bengough, A. G., Mairhofer, S., & Ritz, K. (2017). Developmental morphology of cover crop species exhibits contrasting behaviour to changes in soil bulk density, revealed by X-ray computed tomography. *Plos One*, 12(7), e0181872. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181872>
- Canisares, L. P., 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>
- Chaieb, N., Rezguia, M., Ayedeb, S., Bahria, H., Cheikh, H., M'hameda, M. R., & Annabia, M. (2020). Effects of

- tillage and crop rotation on yield and quality parameters of durum wheat in Tunisia. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 44(2), 7654-7676. <https://doi.org/10.35759/JANmPLSci.v44-2.7>
9. Chegeni, M., Ansari-Dust, S. H., & Eskandari, H. (2014). Effect of tillage methods and residuals management on some physical properties of soil to achieve sustainable agriculture. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 24(2), 31-40. (in Persian with English abstract).
10. Feyzbakhsh, M. (2023). Comparison of quantitative and qualitative forage yield of forage plants vetch, khollar and faba bean in the climatic conditions of Gorgan. *Forage and Animal Feed*, 4(1), 48-55. (in Persian).
11. Gomez-Munoz, B., Hatch, D. J., Bol, R., & García-Ruiz, R. (2014). Nutrient dynamics during decomposition of the residues from a sown legume or ruderal plant cover in an olive oil orchard. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 184, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.020>
12. Holder, A. J., Robson, P., & McCalmont, J. P. (2025). Effect of tillage method on early root growth of *Miscanthus*. *Annals of Applied Biology*, 1-13. <https://doi.org/10.1111/aab.70006>
13. Hosseini, M., Movahedi Naeini, S. A. R., & Bameri, A. (2015). The Effects of different tillage methods on available soil potassium measured by various extractors in a soil with high specific surface area. *Water and Soil*, 29(4), 966-979. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.21882>
14. Howard, J., & Lincoln, J. M. (2023). Future of work in agriculture. *Journal of Agromedicine*, 28(1), 14. <https://doi.org/10.1080/1059924X.2022.2137615>
15. Kebede, E. (2021). Contribution, utilization, and improvement of legumes-driven biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 767998. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.767998>
16. Kumar, G., Kumari, R., Shambhavi, S., Kumar, S., Kumari, P., & Padbhushan, R. (2022). Eight-year continuous tillage practice impacts soil properties and forms of potassium under maize-based cropping systems in inceptisols of Eastern India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(5), 602-621. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.2017961>
17. Khosropour, E., Attarod, P., Shirvany, A., Pypker, T. G., Bayramzadeh, V., Hakimi, L., & Abbasian, P. (2018). Management of pomegranate orchards influences the decomposition of soil organic matter and soil aggregate stability under drought conditions. *Journal of Arid Land*, 10(3), 391-402.
18. Lipiec, J., Medvedev, V. V., Birkas, M., Dumitru, E., Lyndina, T. E., Rousseva, S., & Fulajtar, E. (2003). Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. *International Agrophysics*, 17(2), 61-69. <https://www.international-agrophysics.org/pdf-106728-37570?filename=Effect-of-soil-compaction.pdf>
19. López-Garrido, R., Madejón, E., León-Camacho, M., Girón, I., Moreno, F., & Murillo, J. M. (2014). Reduced tillage as an alternative to no-tillage under Mediterranean conditions: A case study. *Soil and Tillage Research*, 140, 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.008>
20. Mahmoudi, S., Najafi, N., & Reyhanitabar, A. (2015). Effect of soil moisture and sewage- sludge compost on some soil chemical properties and alfalfa forage macronutrients concentrations in greenhouse conditions. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 6(22), 37-55. (in Persian with English abstract).
21. Malobane, M. E., Nciizah, A. D., Mudau, F. N., & Wakindiki, I. I. (2020). Tillage, crop rotation and crop residue management effects on nutrient availability in a sweet sorghum-based cropping system in marginal soils of South Africa. *Agronomy*, 10(6), 776. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060776>
22. Mansour, E., Mahgoub, H. A., Mahgoub, S. A., El-Sobky, E. S. E., Abdul-Hamid, M. I., Kamara, M. M., & Desoky, E. S. M. (2021). Enhancement of drought tolerance in diverse *Vicia faba* cultivars by inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria under newly reclaimed soil conditions. *Scientific Reports*, 11(1), 24142. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02847-2>
23. Nael, M., Salehi, S. S., Hamzei, J., & Zandi Baghche-Maryam, M. (2023). Three-year effects of conservation tillage and cover on selected soil quality indicators and corn yield components. *Journal of Water and Soil*, 36(6), 773-785. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.78321.1195>
24. Peigné, J., Vian, J. F., Payet, V., & Saby, N. P. (2018). Soil fertility after 10 years of conservation tillage in organic farming. *Soil and Tillage Research*, 175, 194-204. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.008>
25. Rabiee, M., Majedian, M., & Kavooosi, M. (2021). Effects of tillage systems, planting method and nitrogen amounts on the yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) and some properties of soil in paddy field conditions. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(1), 221-237. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/SAPS.2021.12809>
26. Rahimzadeh, S., & Pirzad, A. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi and *Pseudomonas* in reduce drought stress damage in flax (*Linum usitatissimum* L.): A field study. *Mycorrhiza*, 27(6), 537-552. <https://doi.org/10.1007/s00572-017-0775-y>
27. Ramadhan, M., & Muhsin, S. (2021). Evaluation of the response of sorghum to tillage systems and nitrogen fertilization. *International Journal of Agronomy*, 2021(1), 6614962. <https://doi.org/10.1155/2021/6614962>
28. Ramesh, J. V. N., Khandekar, S. D., Baburao, D., Singh, M., Biban, L., Muniyandy, E., & Desingurajan, N.

- (2024). Harnessing remote sensing and geographic information systems to address soil degradation and water scarcity in climate change era. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 7(2), 139-147. <https://doi.org/10.1007/s41976-024-00108-0>
29. Ramroudi, M., Majnoon Hosseini, N., Hossien Zadeh, A., Mazaheri, D., & Hossieni, M. (2011). Effects of cover crops, tillage systems and nitrogen fertilizer on soil characteristics and forage yield of sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Journal of Agriculture*, 92, 1-23. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20084811.1389.41.4.12.7>
 30. Renard, D., & Tilman, D. (2019). National food production stabilized by crop diversity. *Nature*, 571(7764), 257-260. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1316-y>
 31. Sadeghi, S., Kiani, F., Kamkar, B., & Ebrahimi, S. (2019). Effect of different tillage systems on the biological and enzymatic activity of soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 9(2), 151-164. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/EJSMS.2019.15917.1850>
 32. Salih, A. A., Babiker, H. M., & Ali, S. A. M. (1998). Preliminary observations on effects of tillage systems on soil physical properties, cotton root growth and yield in Gezira Scheme, Sudan. *Soil and Tillage Research*, 46, 187-191. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00032-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00032-4)
 33. Sarikhani, Sh. K., Kazemeini, S. A., Afzalnia, S., & Gathala, M. K. (2018). Changes in soil properties and productivity under different tillage practices and wheat genotypes: A short-term study in Iran. *Sustainability*, 10, 2-17. <https://doi.org/10.3390/su10093273>
 34. Selvan, T., Panmei, L., Murasing, K. K., Guleria, V., Ramesh, K. R., Bhardwaj, D. R., & Deshmukh, H. K. (2023). Circular economy in agriculture: Unleashing the potential of integrated organic farming for food security and sustainable development. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1170380. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1170380>
 35. Sha, Y., Liu, Z., Hao, Z., Huang, Y., Shao, H., Feng, G., & Mi, G. (2024). Root growth, root senescence and root system architecture in maize under conservative strip tillage system. *Plant and Soil*, 495(1), 253-269. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2675962/v1>
 36. Shiwakoti, S., Zheljaskov, V. D., Gollany, H. T., Kleber, M., & Xing, B. (2019). Micronutrients decline under long-term tillage and nitrogen fertilization. *Scientific Reports*, 9(1), 12020. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48408-6>
 37. Soane, B. D., Ball, B. C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., & Roger-Estrade, J. (2012). No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research*, 118, 66-87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>
 38. Spiegel, H., Dersch, G., Hosch, J., & Baumgarten, A. (2007). Tillage effects on soil organic carbon and nutrient availability in a long-term field experiment in Austria. *Auswirkungen Unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf Organische Substanz und Verfügbare Nährstoffe in Boden in Einem Langzeitversuch in*, 47-58.
 39. Stankowski, S., Jaroszewska, A., Osińska, B., Tomaszewicz, T., & Gibczyńska, M. (2022). Analysis of long-term effect of tillage systems and pre-crop on physicochemical properties and chemical composition of soil. *Agronomy*, 12, 2072. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092072>
 40. Szczepanek, M., Piekarczyk, M., & Błaszczuk, K. (2024). Spatial distribution of soil macroelements, their uptake by plants, and green pea yield under strip-till technology. *Agronomy*, 14(4), 711. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040711>
 41. Torabi, M., & Heidarisoltanabadi, M. (2020). Effect of different seed rates on yield and some agronomic traits of alfalfa Mohageran ecotype in no-till and conventional tillage methods in Semirom region. *Plant Productions*, 43(3), 375-386. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/ppd.2019.27979.1690>
 42. Torabian, S., Farhangi-Abriz, S., & Denton, M. D. (2019). Do tillage systems influence nitrogen fixation in legumes? A review. *Soil and Tillage Research*, 185, 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.006>
 43. Waling, I., Van Vark, W., Houba, V. J. G., & Van Der Lee, J. J. (1989). Soil and Plant Analysis, a Series of Syllabi part 7. Plant Analysis Procedures. Wageningen Agriculture University.
 44. Wang, H., Wang, S., Yu, Q., Zhang, Y., Wang, R., Li, J., & Wang, X. (2020). No tillage increases soil organic carbon storage and decreases carbon dioxide emission in the crop residue-returned farming system. *Journal of Environmental Management*, 261, 110261. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110261>
 45. Wang, M. H. E., Shen, F., & Huang, G. (2019). Effects of soil compactions on plant growth, nutrient absorption, and root respiration in soyabean seedling. *Enviornmental Science and Pollution*, 1, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05606-z>
 46. Wang, X., Qi, J. Y., Zhang, X. Z., Li, S. S., Virk, A. L., Zhao, X., Xiao, X. P., & Zhang, H. L. (2019). Effects of tillage and residue management on soil aggregates and associated carbon storage in a double paddy cropping system. *Soil and Tillage Research*, 194, 104339. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104339>
 47. Wang, X., Qi, J., & Kan, Z. (2024). Sustainable management and tillage practice in agriculture. *Agronomy*, 14(12), 2891. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122891>
 48. Wasaya, A., Yasir, T. A., Ijaz, M., & Ahmad, S. (2019). Tillage effects on agronomic crop production. *Agronomic Crops: Management Practices*, 73-99. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9783-8_5

49. Wright, A. L., Hanlon, E. A., Sui, D., & Rice, R. (2009). Soil pH Effects on Nutrient Availability in the Everglades Agricultural Area. Document SL287, Institute of Food and Agricultural Sciences. Gainesville (FL): University of Florida, p. 1-5.
50. Wu, G., Chen, Z., Jiang, N., Jiang, H., & Chen, L. (2021). Effects of long-term no-tillage with different residue application rates on soil nitrogen cycling. *Soil and Tillage Research*, 212, 105044. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105044>
51. Xiaozhu, Y. A. N. G., Zhuang, L. I., & Cheng, C. (2016). Effect of conservation tillage practices on soil phosphorus nutrition in an apple orchard. *Horticultural Plant Journal*, 2(6), 331-337. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2016.11.005>