

The effect of tillage systems on nutrient concentrations, root traits and forage yield and in forage legumes

Introduction: In recent years, the use 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tillage methods has been widely considered in the world, and the use of conventional tillage methods has become outdated in some parts of the world.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, an experiment was conducted on the effect of tillage systems on nutrient concentrations, root traits and forage yield in forage legumes at the research farm of the Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, 8 km southwest of Khorramabad city, during 2022-2023 and 2023-2024 in the October crop seasons.

Materials & 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 & 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 $\times$ 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 $\times$ forage legume planting showed that the highest forage dry weight (2820.9 kg h^{-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 $10581.19 \text{ kg h}^{-1}$), 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 Lamei variety vetch. Also low-tillage system and Lamei variety vetch had the highest zinc concentration (50.69 ppm) and root volume (11.74 cm^3). 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: In general, this research emphasizes the importance of selecting the appropriate tillage system and seed type to optimize forage production and improve its quality, indicating that vetch performed well under the conditions of this experiment. Also, conventional and minimum tillage methods, due to the changes they induce in the physical, chemical, and biological conditions of the soil, have a significant impact on yield, root characteristics, and nutrient concentrations 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, and Root volume

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

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، دانشکده زراعت، دانشگاه آزاد اسلامی کرج، ایران

نویسنده مسئول: rafieemasoud@yahoo.com

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 به عنوان یک منبع غنی و ارزان پروتئین، نقش حیاتی در تغذیه کشورهای در حال توسعه دارند. این گیاهان با ارزش، به ویژه در سیستم‌های کشاورزی کم‌نهاد و در تناوب زراعی مناطق خشک، از اهمیت بالایی برخوردارند و به امنیت غذایی این مناطق کمک می‌کنند. بنابراین به منظور ارزیابی اثر نظام‌های خاک‌ورزی بر غلظت عناصر غذایی، صفات ریشه و عملکرد علوفه در بقولات علوفه‌ای، آزمایشی به طور اسپلیت پلات با قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در شهر خرم‌آباد، در دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در آبان ماه اجرا شد. آب مورد نیاز گیاهان از بارندگی نرمال در طول فصل رشد تأمین شد و هیچ گونه آبیاری صورت نگرفت. عامل اصلی خاک‌ورزی (مرسوم، کم خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی) و عامل فرعی بقولات علوفه‌ای (باقلا توده بروجرد، ماشک رقم لامعی، خلر، باقلا رقم برکت و فیض) بود. خاک‌ورزی مرسوم شامل شخم با گاواهن برگردان دار و سپس دیسک، کم خاک‌ورزی شامل چینل پکر یا خاک‌ورز مرکب غلطک لوله‌ای دندانه‌دار و بی خاک‌ورزی فاقد هر گونه عملیات خاک‌ورزی بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی سیستم خاک‌ورزی و بقولات علوفه‌ای بر تمامی صفات اندازه‌گیری شده و اثر متقابل خاک‌ورزی $\times$ 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 $\times$ 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 کم خاک‌ورزی و گیاه ماشک به دست آمد. همچنین کم خاک‌ورزی 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، ۶ درصد آهن، ۸ درصد منگنز و ۲۲ درصد تنفس خاک را افزایش داد. به طور 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.

کلمات کلیدی: حجم ریشه، طول ریشه، فسفر، منگنز و نیتروژن

مقدمه

کشاورزی مدرن به استفاده از کودها و آفت‌کش‌ها متکی است که مشکلاتی برای سلامت خاک، گیاه، انسان و محیط‌زیست ایجاد کرده است. بنابراین، مدیریت پایدار کشاورزی اهمیت بیشتری پیدا کرده و به بهبود بهره‌وری، حفظ منابع زیست‌محیطی، افزایش رفاه انسان و تقویت تاب‌آوری اکوسیستم و جامعه کمک می‌کند (Howard & Lincoln, 2023; Ramesh *et al.*, 2024; Selvan *et al.*, 2023). کشاورزی پایدار به معنای بهره‌برداری مداوم و سودآور از منابع طبیعی، بدون کاهش کیفیت خاک و محیط زیست است. این نوع کشاورزی با روش‌های "کم‌نهاد" 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. خاک‌ورزی و آماده‌سازی بستر بذر نقش مهمی در مصرف انرژی دارند و انتخاب نوع مناسب خاک‌ورزی به عوامل مختلفی مانند بافت، ساختار و ذخایر آب و مواد مغذی بستگی دارد (Wang *et al.*, 2024). کشاورزی پایدار بر تغییر روش‌های استفاده از کودها، مدیریت تلفیقی آفات، تناوب زراعی، آبیاری دقیق، کشت پوششی و خاک‌ورزی حفاظتی تمرکز دارد. هدف این روش‌ها افزایش بهره‌وری و کارایی کشاورزی است. خاک‌ورزی حفاظتی با کاهش اختلال در خاک، سلامت آن را بهبود می‌بخشد و مزایایی چون بهبود رطوبت، افزایش تخلخل، افزایش محتوای کربن آلی و کاهش جرم مخصوص ظاهری را ارائه می‌دهد. در مقابل، خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند به تخریب ساختار خاک منجر شود (Wang *et al.*, 2019). هدف از خاک‌ورزی در کشاورزی ایجاد شرایط مناسب برای جوانه‌زنی بذر و استقرار گیاهچه است. تأثیر روش‌های خاک‌ورزی به شدت به نوع نظام، ویژگی‌های خاک و شرایط محیطی وابسته است.

در مناطق خشک مدیترانه‌ای، کشاورزان معمولاً از خاک‌ورزی مرسوم برای جلوگیری از فشردگی خاک استفاده می‌کنند که مزایایی مانند کاهش خروج گاز، افزایش کربن آلی و کاهش فرسایش دارد. همچنین، روندی جهانی به سمت کم‌خاک‌ورزی وجود دارد که در آن شخم‌زدن انجام نمی‌شود و بقایای محصولات قبلی روی سطح خاک باقی می‌مانند. بدون خاک‌ورزی نیز به بهبود برخی خواص شیمیایی خاک کمک می‌کند (López-Garrido *et al.*, 2014). در روش‌های بدون خاک‌ورزی به‌دلیل بازگشت بقایای گیاهی به افق‌های سطحی خاک، افزایش میزان مواد آلی مشاهده می‌شود درحالی‌که در روش‌های خاک‌ورزی مرسوم به‌هم خوردن خاک باعث تجزیه بیشتر و زودتر بقایای گیاهی شده که در نتیجه کاهش میزان مواد آلی را به همراه دارد (Chegini *et al.*, 2014). مطالعات نشان می‌دهند که انباشت کربن آلی در بدون خاک‌ورزی تا عمق ۱۰ سانتی‌متری بیشتر از خاک‌ورزی معمولی است و کانی‌سازی کربن آلی در بدون خاک‌ورزی کمتر است که بر دسترسی مواد مغذی تأثیر می‌گذارد. در اقلیم‌های نیمه‌خشک،

کانی‌سازی کربن آلی و دسترسی به نیتروژن، فسفر و گوگرد در خاک‌ورزی معمولی و کم‌خاک‌ورزی کمتر از بدون خاک‌ورزی است. همچنین، شدت کانی‌سازی نیتروژن با افزایش شدت خاک‌ورزی بیشتر می‌شود، اما نتایج متناقضی نیز در این زمینه وجود دارد (Soane et al., 2012). این تغییرات در نهایت می‌تواند بر جذب عناصر در گیاه موثر باشد و میزان عناصر را در برگ و دانه دستخوش تغییر نماید. برخی محققین طی آزمایشی طولانی مدت به‌منظور بررسی اثر خاک‌ورزی بر کربن آلی خاک و مواد مغذی خاک گزارش دادند که مقدار کربن آلی خاک و پتاسیم خاک در خاک‌ورزی حداقل بیشتر از خاک‌ورزی مرسوم است (Spiegel et al., 2007).

برای پاسخ به این سؤال که آیا تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی در کشاورزی ارگانیک در واقع حاصلخیزی طولانی‌مدت خاک، ریشه‌زایی و عملکرد را بهبود می‌بخشد یا خیر، یک آزمایش مزرعه‌ای طولانی مدت طی ۱۰ سال (۲۰۰۴-۲۰۱۵) در خاک لومی شنی در فرانسه انجام شد. پژوهشگران مشاهده نمودند تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی اثرات مثبتی بر اجزای شیمیایی خاک در لایه فوقانی خاک داشت و به افزایش زیست‌توده گندم تا مرحله پنجه‌زنی کمک کرد. با این حال، تفاوت عملکرد گندم بین تیمارها مشاهده نشد. خواص فیزیکی و زیستی خاک پس از ۱۰ سال خاک‌ورزی حفاظتی به‌طور معنی‌داری بهبود نیافته است. 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 علوفه‌ای مواجه‌اند که در تابستان به دلیل رقابت بین تولید غذای انسان و خوراک دام تشدید می‌شود. تلاش‌ها برای بهبود عملکرد و کیفیت محصولات علوفه‌ای متمرکز است. توالی کشت علف‌ها و حبوبات به بهبود خواص خاک و حفظ منابع طبیعی کمک می‌کند. حبوبات خواص شیمیایی و بیولوژیکی خاک را بهبود بخشیده و حاصلخیزی آن را افزایش می‌دهند که به کاهش نیاز به کودهای مصنوعی و افزایش عملکرد محصولات بعدی کمک می‌کند. همچنین، ادغام این محصولات در تناوب‌های کشاورزی، پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی را افزایش می‌دهد (Mansour et al., 2021). بهترین راه حفاظت خاک در راستای کشاورزی محافظتی، استفاده از پوشش گیاهی است. نقش پوشش گیاهی در کاهش فرسایش و رسوب فقط به قسمت بالا و بیرونی گیاهان محدود نمی‌شود، بلکه ریشه‌های گیاهان نیز در این زمینه نقش حساسی دارند، زیرا آنها با نفوذ در اعماق خاک، زمینه‌ی چسبندگی خاکدانه‌ها به خود را فراهم کرده و مانع از متلاشی شدن خاکدانه‌ها به هنگام ریزش‌های جوی می‌شوند (Khosropour, 2018).

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 ببخشد 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 and 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 ۳ برابر میانگین کشوری و ۳ تا ۵ 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. درواقع به‌منظور حفظ منابع آب و خاک و دستیابی به کشاورزی پایدار، باید عملیات تهیه بستر را از طریق خاک‌ورزی حفاظتی کاهش داد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه به‌منظور 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 ۸ کیلومتری جنوب غربی شهر خرم‌آباد، با موقعیت جغرافیایی $48^{\circ} 18' N$, $33^{\circ} 29' E$ 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 ۱۶/۲ درجه سانتی‌گراد بود. تغییرات میزان دما و بارندگی در بازه‌ی زمانی ابتدای آبان تا پایان خرداد هر دو سال زراعی این منطقه جغرافیایی در جدول ۱ آمده است. این آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. 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 گردید. نتایج مربوط به آنالیز خاک در جدول ۲ آمده است.

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

جدول ۲- آنالیز خاک مزرعه

Table 2- Farm soil analysis

سال Year	بافت خاک Soil 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)
2021-2022	Loam	7.6	1.27	0.74	0.25	6.2	7.1	0.92	0.31	12.1	332
2022-2023	Loam	7.5	1.25	0.81	0.32	6.9	6.8	0.94	0.42	13.5	361

عوامل‌های مورد مطالعه شامل خاک‌ورزی به‌عنوان کرت اصلی با سه سطح (مرسوم، کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی) و بقولات علوفه‌ای به‌عنوان کرت فرعی با پنج سطح (باقلا توده بروجرد، ماشک رقم لامعی، خلر، باقلا رقم برکت و فیض) بود. در تجزیه واریانس مرکب، عامل خاک‌ورزی در حکم محیط در نظر گرفته شد. خاک‌ورزی هر سال در بقایای حداقل ۳۰ درصدی گندم (درصد پوشش بقایا روی سطح زمین) اجرا شد که هر خاک‌ورزی به عرض ۶/۷۵ متر (سه برابر عرض دنباله‌بند) و طول ۷۶ متر با فاصله دو متر از یکدیگر بود. خاک‌ورزی مرسوم شامل شخم با گاواهن برگردان‌دار و سپس دیسک، کم‌خاک‌ورزی شامل چپزل‌پکر یا خاک‌ورز مرکب غلطک لوله‌ای دندانه‌دار و بی‌خاک‌ورزی فاقد هر گونه عملیات خاک‌ورزی بود. هر قطعه خاک‌ورزی به سه تکرار با فواصل دو متر تقسیم و در هر تکرار پنج بقولات علوفه‌ای در ۹ خط کاشت با فاصله بین خطوط ۵۰ سانتی‌متری و عرض سه متر (در جهت خاک‌ورزی) به مساحت کرت ۱۳/۵ مترمربع کشت گردید. تأمین نیاز کودی گیاه با توجه به آزمایش خاک، کود فسفر به‌میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع سوپرفسفات‌تریپل در هنگام کاشت و بصورت نواری در کف شیارها و پنج سانتی‌متر از طرفین بذر قرار گرفت. همچنین کود نیتروژن به‌میزان ۵۰ کیلوگرم در هکتار از منبع اوره به‌صورت سرک و تقسیط در دو مرحله یک‌دوم در مرحله روزت و یک‌دوم آن در زمان به ساقه‌رفتن (رشد سریع در اسفند ماه) مورد استفاده قرار گرفت. جهت کاشت ابتدا خطوط کاشت به‌وسیله فوکا با عرض ۵۰ و به عمق حداکثر ۵ سانتی‌متر (مشابه دستگاه کشت مستقیم) ایجاد و کاشت در اواسط آبان در هر دو سال زراعی انجام شد. میزان بذر مصرفی برای بقولات علوفه‌ای شامل ماشک، باقلا (رقم برکت، رقم فیض، توده محلی بروجرد) و خلر به‌ترتیب ۸۰، ۱۵۰، 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 مراقبت‌های لازم شامل مبارزه با علف‌های‌هرز به‌صورت وجین دستی در یک مرحله و در اواسط اسفندماه انجام شد. همچنین در طی فصل رشد، آسیب قابل توجهی از نظر هجوم آفات یا بیماری‌های گیاهی مشاهده نشد. برداشت بقولات به‌صورت همزمان صورت نگرفت. بدین صورت که برداشت ماشک همزمان با مرحله ۵۰ درصد گلدهی در تاریخ ۲۰ فروردین و برداشت ارقام باقلا و خلر در مرحله شروع خمیری و در تاریخ ۲۵ فروردین انجام شد. صفات اندازه‌گیری شامل عملکرد علوفه تر و خشک، طول ریشه، حجم ریشه، قطر ریشه، وزن تر و خشک ریشه، تنفس خاک، عناصر غذایی اندام هوایی (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز) بود.

زمان نمونه‌برداری‌ها و بررسی عملکرد همزمان با برداشت بقولات علوفه‌ای با رعایت ۲۰ سانتی‌متر 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 نمونه‌های جمع‌آوری شده توزین شدند و عملکرد علوفه

تازه آن اندازه‌گیری شد، همچنین برای اندازه‌گیری عملکرد علوفه خشک سطح برداشت علوفه‌تر از هر تیمار به‌طور تصادفی انتخاب و نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دستگاه آون در دمای ۷۵ درجه سانتیگراد خشک و توزین شد.

به‌منظور اندازه‌گیری عناصر غذایی، پس از اتمام دوره آزمایش، اندام‌های هوایی (برگ و ساقه) جدا شدند و پس از شستشوی دقیق، به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. پس از خشک شدن، نمونه‌ها با آسیاب برقی به‌صورت پودر شدند. پس از تهیه خاکستر از مواد گیاهی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، عصاره‌گیری با استفاده از ۱۰ میلی‌لیتر انجام شد. از این عصاره برای اندازه‌گیری عناصر غذایی استفاده شد. میزان عناصر نیتروژن به‌صورت تیتراسیون با دستگاه تمام اتوماتیک کج‌دال، 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 فلیم‌فتومتر (model: PFP7, UK) اندازه‌گیری شدند (Walling *et al.*, 1989). غلظت عناصر آهن، روی، مس و منگنز در عصاره‌ی حاصل از هضم خشک با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Perkin Elmer, USA make Analyst 400) اندازه‌گیری شد.

برای جمع‌آوری نمونه‌های ریشه، خاک اطراف ریشه با حفر گودال کنار زده شد و نمونه‌ها به‌صورت پنج‌تایی و به‌صورت تصادفی انتخاب شدند، ریشه‌ها بدون آسیب خارج شدند. از جمله صفات مورد بررسی طول ریشه بود که با خط‌کش و بر حسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد، حجم ریشه با قراردادن ریشه‌ها در استوانه‌های مدرج و تعیین میزان تغییر سطح آب، اندازه‌گیری شد، قطر ریشه نیز با کولیس محاسبه شد. وزن تر ریشه‌ها با ترازوی دقیق دیجیتالی اندازه‌گیری شدند. 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 الک شده به ظروف منتقل شد، سپس با اضافه کردن ۲۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۵ نرمال سود به صورت جداگانه در ظروف حاوی خاک، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در انکوباتور نگهداری شدند. در پایان مقدار CO_2 آزاد شده به روش تیتراسیون سود باقی مانده با اسید ۰/۲۵ نرمال اندازه‌گیری و میزان C-CO_2 بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم خاک خشک محاسبه گردید (Anderson, 1982).

پس از دو سال آزمایش، نتایج جمع‌آوری شده 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 با نرم‌افزار SAS Ver. 9 انجام شد و مقایسات میانگین با روش LSD در سطح احتمال پنج درصد محاسبه شد. همچنین، برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

عملکرد علوفه

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 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 کم خاک‌ورزی 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 به‌میزان ۱۲ و ۱۴ درصد عملکرد علوفه تر را افزایش داد. همچنین تیمار کاشت ماشک در خاک‌ورزی مرسوم با میانگین 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 بروچرد و گیاه خلر در خاک‌ورزی مرسوم با کاشت گیاه ماشک و باقلا رقم فیض در کم خاک‌ورزی و گیاه ماشک در بدون خاک‌ورزی در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۴).

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 df	میانگین مربعات (MS)							
		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	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	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	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	48	889652.13	36620.44	1.21	0.13	0.09	0.05	0.36	0.0008
ضریب تغییرات (C.V %)	-	9.43	8.74	4.27	4.04	6.37	10.69	10.15	16.62

ns, * and ** به‌ترتیب 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 Treatmeents		عملکرد علوفه تر Fresh forage yield	عملکرد علوفه خشک Dry forage yield	طول ریشه Root length	حجم ریشه Root volume	فسفر P	مس Cu	روی Zn
		(kg h ⁻¹)		(cm)	(cm ³)	(%)	(ppm)	
Conventional مرسوم	باقلا توده بروجرد (Faba bean (Borujerd landrace)	10131.21 ^{abc}	2370.99 ^{bcde}	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 ^{rfg}	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}
Reduced tillage کم خاک‌ورزی	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}
No tillage بدون خاک‌ورزی	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 ⁱ	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 ($p \leq 0.05$).

در تولید علوفه، خاک‌ورزی مرسوم که شامل بهم‌خوردگی 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 بهم‌خوردگی 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 بهم‌خورده 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 فشرده‌گی، 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 تاخیر 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 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 آب و هوایی گرگان گزارش کرد که بیشترین و کمترین علوفه خشک به ترتیب از ماشک و خلر با ۸۱۴۰ و ۵۹۰۳ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. همچنین به‌نظر می‌رسد که دلیل 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 اعمال شده، 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 ۵ درصد از طول ریشه بیشتری برخوردار بود (جدول ۵). 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 کم خاک‌ورزی 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. با این حال، اثرات خاص می‌تواند بسته به نوع خاک، محصول و سایر عوامل محیطی متفاوت باشد. سیستم‌هایی مانند خاک‌ورزی کاهش‌یافته یا حداقل خاک‌ورزی می‌توانند ترکیبی از

جدول ۵- 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

Years	طول ریشه Root length (cm)	حجم ریشه Root volume (cm ³)	قطر ریشه Root diameter (mm)	وزن خشک ریشه Root dry weight (gr)	وزن تر ریشه Root fresh weight (%)	فسفر P	مس Cu	تنفس خاک soil respiration
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
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 ($p \leq 0.05$).

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. ب‌افت و ساختار خاک نقش مهمی ایفا می‌کنند. 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).

در این آزمایش عملیات خاک‌ورزی با ایجاد تغییر در ساختمان خاک، شکستن لایه‌های خاک و سست نمودن آن باعث کاهش مقاومت خاک گردیده و در نتیجه ریشه‌های بقولات علوفه‌ای توانستند از عمق نفوذ بیشتری برخوردار باشند. در پژوهشی، در بررسی روش‌های خاک‌ورزی (حفاظتی، بدون خاک‌ورزی و شخم مرسوم) بر طول ریشه، نتایج نشان داد که روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و فعالیت‌های ریشه محصول، پارامترهای فیزیکیوشیمیایی 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 محققین نیز بیانگر آن بود که در خاک‌هایی که خاک‌ورزی انجام می‌گیرد، به‌علت 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 منحصر به فرد 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 در سال‌های زراعی مختلف نشان داد که بیشترین میزان حجم ریشه با میانگین ۹/۷۹ سانتی‌مترمکعب متعلق به سال دوم بود (جدول ۵). نتایج برهمکنش خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر حجم ریشه نشان داد که

بیشترین میزان حجم ریشه با میانگین ۱۱/۷ سانتی مترمکعب در گیاه ماشک در کم خاک‌ورزی مشاهده شد و نسبت به کمترین حجم ریشه در گیاه باقلا رقم برکت 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، لیکن خاک‌ورزی متداول بر دمای خاک، مقاومت مکانیکی، پیوستگی حفرات درشت، رطوبت قابل دسترس و عمق توزیع ریشه اثر می‌گذارند. در یک مطالعه بر روی گیاه ذرت علوفه‌ای بدون خاک‌ورزی موجب کاهش ۴۳ درصدی حجم ریشه نسبت به خاک‌ورزی مرسوم شد (Afshoon *et al.*, 2020). برهرسی و همکاران (Burr-Hersey *et al.*, 2017) اثر کاشت گیاهان پوششی مختلف بر حجم ریشه را بررسی کردند، اظهار داشتند که گیاه یولاف و ماشک به ترتیب از بیشترین حجم ریشه برخوردار هستند.

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 ۵). 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 کم خاک‌ورزی 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 بروجرد با گیاه خلر و باقلا رقم فیض اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۶). 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 ریشه‌ها به جای نفوذ عمیق، به صورت 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. اما در سیستم‌های شخم حفاظتی، عموماً ساختار خاک مطلوب‌تری را با منافذ بزرگ‌تر و فشرده‌گی کمتر ایجاد می‌کنند. این می‌تواند منجر به نفوذ عمیق‌تر ریشه و توزیع یکنواخت‌تر ریشه‌ها شود، که به دلیل 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 ۶- 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

تیمارها Treatments	قطر ریشه Root diameter	وزن تر ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	نیتروژن N	پتاسیم K	آهن Fe	منگنز Mn	تنفس خاک Soil respiration
	(mm)	(gr)		(%)		(ppm)		(mgCO ₂ g ⁻¹ dm ⁻¹ .24 ⁻¹)
خاک‌ورزی 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
کم خاک‌ورزی 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 طولانی‌تری 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، پارامترهای 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.*, 2021).

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 ۵) نشان داد که سال دوم نسبت به سال اول ۲۹ درصد وزن خشک ریشه و ۲۳ درصد از 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 به‌ترتیب بیشترین میزان وزن خشک و تر ریشه را به خود اختصاص داد و نسبت به کمترین میزان آن‌ها در بدون خاک‌ورزی به‌میزان ۲۰ درصد وزن خشک و ۲۶ درصد وزن تر ریشه را افزایش داد. تغییرات وزن تر و خشک ریشه در بین بقولات علوفه‌ای مختلف کاشت شده نشان داد که گیاه ماشک با میانگین‌های ۲/۷۴ و ۸/۰۵ گرم به‌ترتیب از بیشترین وزن خشک و تر ریشه برخوردار بود که نسبت به کمترین میزان آن‌ها در گیاه باقلا رقم برکت به‌میزان 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 ۶).

در این آزمایش به‌دلیل 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 گردیده و در نتیجه اکسیژن که به‌عنوان فعال کننده تغذیه گیاه محسوب می‌شود، به اندازه کافی برای تهویه در دسترس ریشه قرار نخواهد گرفت. ربیعی و همکاران (Rabiee et al., 2020) در بررسی اثر خاک‌ورزی بر وزن ریشه اظهار داشتند که بیشترین وزن ریشه در خاک‌ورزی مرسوم حاصل شد که نسبت به بدون خاک‌ورزی به‌میزان ۱۲ درصد وزن ریشه را افزایش داد.

تنفس خاک

تنفس خاک نقش مهمی در تولید کربن اکوسیستم‌های 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 ۵). 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 کم خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی به‌ترتیب ۱۴ و ۲۱ درصد تنفس خاک را افزایش داد. در بین گیاهان علوفه‌ای نیز بیشترین و کمترین تنفس خاک با میانگین‌های ۰/۶۸ و ۰/۴۷ میلی گرم دی‌اکسیدکربن در سانتی‌مترمربع در روز به‌ترتیب 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 ۶).

در این مطالعه در سیستم شخم مرسوم به‌دلیل زیرورو شدن خاک، اکسیژن بیشتری به میکروارگانیسم‌های 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 (۱۳۹۸) 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 (۱۴۰۱) 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 بود. 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

نیتروژن

عنصر نیتروژن موجود در اندام‌های هوایی تحت اثر اصلی خاک‌ورزی، کاشت بقولات علوفه‌ای در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۷). 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 کم خاک‌ورزی 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 بروجد با رقم برکت و فیض اختلاف معنی‌داری نداشتند (جدول ۵).

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 فرآیندهای 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 فرآیندهای 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، کم خاک‌ورزی 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، اکسیدشدن 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 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 محتوی 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 به‌طوری که بیشترین میزان فسفر و پتاسیم در خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد که با کم‌خاک‌ورزی تفاوت معنی‌داری نداشت (Chaieb et al., 2020).

جدول ۷- 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 df	میانگین مربعات (MS)						
		نیتروژن N	فسفر P	پتاسیم K	مس Cu	آهن Fe	منگنز Mn	روی Zn
سال Year	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	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	8	0.05	0.0003	0.01	0.86	3.40	7.32	24.38
بقولات علوفه‌ای Forage Crops	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	48	0.24	0.0004	0.17	0.71	28.30	23.08	9.78
ضریب تغییرات C.V (%)	-	11.99	2.64	4.87	2.22	2.85	4.76	6.78

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.

فسفر

تجزیه و تحلیل عنصر فسفر در تیمارهای مختلف اعمال شده، تأثیر معنی‌داری سال، خاک‌ورزی، کاشت بقولات علوفه‌ای و اثر متقابل خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای در سطح احتمال خطای یک درصد نشان داد (جدول ۷). 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 ۶). عناصر غذایی بالاتر در سال دوم می‌تواند به دلیل شرایط آب و هوایی 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 خلر 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).

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. به‌نظر می‌رسد که به هم خوردگی و آشفته‌گی 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. صرف‌نظر از نوع مدیریت خاک، فرآیند معدنی شدن عناصر موجود در ساختار بقایای آلی تحت شرایط تهویه‌ای مطلوب توسط آنزیم‌های فسفومونوآستراز به آسانی انجام می‌گیرد (Xiaozhu et al., 2016). استانکوفسکی و همکاران (Stankowski et al., 2022)، اشاره می‌کنند 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، به‌دلیل تحرک کمتر، فسفر در لایه‌های کم‌عمق خاک تجمع می‌یابد. عدم برهم‌خوردگی خاک در کم‌خاک‌ورزی توانسته میزان انتقال فسفر به گیاه را بهبود ببخشد. در ارتباط با چرایی این پدیده گزارش شده است که افزایش سرعت جذب فسفر توسط گیاه میزبان به‌دلیل حضور انشعابات فراوان هیف‌های میکوریزا در داخل سلول‌های پوست ریشه گیاه است که سطح وسیعی را برای انتقال عناصر غذایی به‌خصوص فسفر به گیاه میزبان و دانه را فراهم می‌نماید (Rahimzadeh & Pirzad, 2017). محققان بیان داشتند که علت افزایش فسفر گیاه در شرایط کم‌خاک‌ورزی به‌دلیل قابلیت دسترسی بیشتر به فسفر و نترات در سطح خاک می‌باشد (Wright et al., 2007).

پتاسیم

جدول تجزیه واریانس مرکب (جدول ۷) معنی‌داری عنصر پتاسیم تحت تأثیر خاک‌ورزی و کاشت بقولات علوفه‌ای در سطح احتمال خطای یک درصد را نشان داد. براساس نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین میزان پتاسیم با میانگین ۲/۹۰ درصد در خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد که نسبت به بدون خاک‌ورزی به‌میزان ۲۷ درصد 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 ۶).

در سیستم کشاورزی حفاظتی، عناصری مانند پتاسیم تحت تأثیر مدیریت کم‌خاک‌ورزی قرار می‌گیرند و تمایل به انباشته شدن در سطح خاک 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. ازطرفی 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. لیپیک و همکاران (Lipiec *et al.*, 2003)، گزارش کردند که متراکم شدن خاک به دلیل کاهش سطح ریشه، جذب پتاسیم توسط ذرت را کاهش می‌دهد. 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 به دلیل بازگشت بقایای گیاه‌های به افق‌های سطحی خاک، افزایش میزان مواد آلی مشاهده می‌شود 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 دارد.

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 ۷). براساس نتایج مقایسه میانگین، سال دوم نسبت به سال اول ۸ درصد از میزان مس بیشتری برخوردار بود (جدول ۵). برهمکنش خاک‌ورزی × بقولات علوفه‌ای بر میزان مس در اندام هوایی گویای این مطلب بود که 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 به میزان 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 کم خاک‌ورزی با گیاه باقلا توده بروجرد در بدون خاک‌ورزی و گیاه باقلا در رقم فیض در کم خاک‌ورزی 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 کم خاک‌ورزی 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 به میزان 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 کم خاک‌ورزی 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 به ترتیب در خاک‌ورزی مرسوم و بدون خاک‌ورزی مشاهده شد. در بین بقولات علوفه‌ای نیز گیاه ماشک با میانگین ۱۹۸/۴۳ و ۱۷۸/۶۴ پی‌پی‌ام به ترتیب از بیشترین میزان آهن و منگنز برخوردار بود که نسبت به کمترین میزان آن در گیاه باقلا رقم برکت به میزان 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 ۶). خاک‌ورزی مرسوم گاهی اوقات می‌تواند به دلیل افزایش معدنی‌شدن و کاهش اختلاط خاک، منجر به غلظت بیشتر این ریزمغذی‌ها در خاک سطحی شود، اما می‌تواند باعث شسته‌شدن 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 در گیاه سویا 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 ایزوسیترات 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 آنجا که ریشه در خاک رشد می‌کند، به‌طور کلی فقط با حدود ۱ درصد حجم خاک در تماس است. 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 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 برخوردار بود، بدست 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 کم خاک‌ورزی و کاشت گیاه ماشک بدون تفاوت معنی‌دار با یکدیگر مشاهده شد. همچنین بیشترین میزان حجم ریشه و غلظت عنصر روی از کم خاک‌ورزی 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 آب و هوایی خرم‌آباد قابل توصیه است. در میان روش‌های مختلف خاک‌ورزی، اگرچه تفاوتی میان خاک‌ورزی مرسوم و کم خاک‌ورزی 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.

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. <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://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198721001501>
- Chaieb, N., Rezguia, M., Ayedeb, S., Bahria, H., Cheikh, H., M'hamed, 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>
- 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. <https://doi.org/10.22055/agen.2022.41147.1635>
- 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.
- Gómez-Muñoz, 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>
- Holder, A. J., Robson, P., & McCalmont, J. P. (2025). Effect of tillage method on early root growth of Miscanthus. *Annals of Applied Biology*. *Annals of Applied Biology*, 1-13 <https://doi.org/10.1111/aab.70006>
- Hosl, R., & Strauss, P. (2016). Conservation tillage practices in the alpine forelands of Austria—Are they effective? *Catena*, 137, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.009>
- 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>

- Howard, J., & Lincoln, J. M. (2023). Future of work in agriculture. *Journal of Agromedicine*, 28(1), 14. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.016>
- 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>
- 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>
- 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.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.02.008>
- Mafakheri, A., Siosemardeh, A., Bahramnejad, B., Struik, P. C., & Sohrabi, Y. (2011). Effect of drought stress and subsequent recovery on protein, carbohydrate contents, catalase and peroxidase activities in three chickpeas (*Cicer arietinum*) cultivars. *Australian Journal of Crop Science*, 5(10), 1255-1260.
- 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. <https://doi.org/10.18869/ACADPUB.EJGCST.6.2.37>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>

- 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>
- 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>
- 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).
- 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>
- 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>
- 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 & Till. Res*, 46, 187-191. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00032-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00032-4)
- 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>
- 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>
- 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://orcid.org/0000-0001-5249-4362>
- Shiwakoti, S., Zheljazkov, 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://orcid.org/10.1038/s41598-019-48408-6>
- 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>
- 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 and verfügbare Nährstoffe in Boden in einem Langzeitversuch in*, 47-58.
- 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>
- 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>

- 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 Semirrom region. *Plant Productions*, 43(3), 375-386. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/ppd.2019.27979.1690>
- Torabian, S., Farhangi-Abri, 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>
- 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*.
- 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-retained farming system. *Journal of Environmental Management*, 261, 110261. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110261>
- Wang, M. H. E., Shen, F., & Huang, G. (2019). Effects of soil compactions on plant growth, nutrient absorption, and root respiration in soyabean seedling. *Environmental science and pollution*, 1, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05606-z>
- Wang, X., Qi, J. Y., Zhang, X. Z., Li, S. S., Virk, A. L., Zhao, X., ... & 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>
- Wang, X., Qi, J., & Kan, Z. (2024). Sustainable management and tillage practice in agriculture. *Agronomy*, 14(12), 2891. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122891>
- 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
- 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*, 1-5. <https://doi.org/10.32473/edis-ss500-2009>
- 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>
- 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>