Plant Prod., 2026, 49(2), 251-267
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.48406.2231
Received: 18 November 2024
Accepted: 1 January 2025

Plant Productions

Research Article

Effects of phosphorus fertilizer sources on nutrient uptake and phosphorus use efficiency in soybean (*Glycine max* L.)

Saeb Jalalpour[1], Alireza Yadavi[1*], Mohsen Movahhedi Dehnavi[1], Razieh Karami[1]

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran

Citation: Jalalpour, S., Yadavi, A., Mohvahhedi Dhanavi, M., & Karami, R. (2026). Effects of phosphorus fertilizer sources on nutrient uptake and phosphorus use efficiency in soybean (*Glycine max* L.). *Plant Productions*, 49(2), 251-267.

Abstract

Introduction

After cereals, oilseed crops are the second most important source of energy and edible vegetable oils for human populations worldwide. In many countries, including those that rely heavily on imported edible oils, increasing the production of oilseed crops such as soybean is of strategic importance for improving food security and reducing import dependency. Phosphorus is the second most limiting essential nutrient for plant growth after nitrogen. However, a substantial proportion of phosphorus applied as chemical fertilizer becomes fixed in the soil and unavailable for plant uptake, thereby reducing fertilizer use efficiency. One practical and environmentally sustainable approach to improving phosphorus availability is the application of phosphorus biofertilizers, such as phosphate-solubilizing microorganisms and arbuscular mycorrhizal fungi, which enhance phosphorus solubilization and uptake by plants.

Materials and Methods

This study was conducted to evaluate the effect of mycorrhizal fungus, inoculation of phosphate biofertilizer on growth and consumption of phosphorus chemical fertilizer in Parsa soybean in 2019 at the research farm of Yasouj University located in Dashtrom. This study was conducted to evaluate the effect of mycorrhizal fungus, inoculation of phosphate biofertilizer on growth and consumption of phosphorus chemical fertilizer in Parsa soybean in 2019 at the research farm of Yasouj University located in Dashtrom. The experiment was conducted as a factorial based on randomized complete blocks with three replications. The experimental treatments consisted of four levels of phosphorus chemical fertilizer (triple superphosphate): 0, 60, 120, and 180 kg. ha^{-1},

* **Corresponding Author:** Alireza Yadavi
E-mail: Yadavi@yu.ac.ir

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

and four levels of biological phosphorus fertilizer: no biofertilizer (control), phosphate biofertilizer containing Pseudomonas bacteria, mycorrhizal fungus (*Glomus mosseae*), and the combined application of phosphate biofertilizer and mycorrhizal fungus

Results and Discussion

The results showed that the interaction between chemical phosphorus fertilizer and phosphorus biofertilizer significantly affected the leaf area index (LAI). The application of 180 kg ha^{-1} of chemical phosphorus fertilizer combined with inoculation of phosphate-solubilizing bacteria and mycorrhizal fungi increased the LAI by 112.61% compared with the control. Inoculation with phosphorus biofertilizers significantly increased nutrient concentrations in both shoots and seeds. The greatest increases in nutrient concentrations were observed with the combined application of phosphate-solubilizing bacteria and mycorrhizal fungi, whereas the control treatment recorded the lowest values. The interaction between chemical phosphorus fertilizer and phosphorus biofertilizer also had a significant effect on seed yield. The highest seed yield (2,085 kg ha^{-1}) was achieved with the application of 180 kg ha^{-1} of triple superphosphate combined with inoculation of phosphate-solubilizing bacteria and mycorrhizal fungi, whereas the lowest seed yield (971 kg ha^{-1}) was recorded in the treatment without chemical phosphorus fertilizer or biofertilizer (control). Furthermore, phosphorus use efficiency decreased as the rate of chemical phosphorus fertilizer increased. At the application rate of 60 kg ha^{-1} of triple superphosphate, inoculation with phosphate-solubilizing bacteria and mycorrhizal fungi significantly improved phosphorus use efficiency compared with the other biofertilizer treatments, resulting in a 38.17% increase over the control.

Conclusion

Therefore, this study demonstrated that the application of phosphorus biofertilizers, including phosphate-solubilizing bacteria and mycorrhizal fungi, enhanced vegetative growth, seed yield, oil yield, and phosphorus use efficiency in soybean. However, as the application rate of chemical phosphorus fertilizer increased, the effectiveness of the biofertilizers declined significantly.

Key words: Bio-fertilizer, Seed yield, Leaf area index, Nitrogen, Phosphorus remobilization

تولیدات گیاهی، ۱٤۰۵، ٤۹(۲)، ۲۵۱ -۲٦۷
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.48406.2231
تاریخ دریافت: ۲۸ /۰۸/ ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۲ /۱۰/ ۱۴۰۳

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

تأثیر منابع کود فسفره بر بهبود جذب عناصرغذایی و کارایی مصرف فسفر در سویا (*Glycine max* L.)

صائب جلال‌پور[۱]، علیرضا یدوی[۱]*، محسن موحدی دهنوی[۱] و راضیه کرمی[۱]

۱-گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

چکیده

دانه‌های روغنی پس از غلات دومین منبع مهم تأمین انرژی لازم جوامع انسانی به شمار می‌روند. از آنجا که بخش زیادی از روغن مصرفی کشور از خارج وارد می‌شود، کشت دانه‌های روغنی از جمله سویا و مدیریت صحیح آن در جهت افزایش عملکرد، اهمیت بسیار زیادی دارد. فسفر، دومین عنصر محدودکنندهٔ رشد گیاهان پس از نیتروژن محسوب می‌شود و سالانه مقادیر زیادی از فسفر موجود در کودهای شیمیایی پس از ورود به خاک به فرم نامحلول درآمده و از دسترس گیاه خارج می‌شود. از جمله راه‌های عملی برای استفاده از فسفر تجمع یافته در اراضی، به کارگیری کودهای زیستی فسفره می‌باشد. این مطالعه جهت ارزیابی اثر قارچ مایکوریزا، تلقیح کود زیستی فسفاته به‌رشد و مصرف کود شیمیایی فسفره در سویا رقم پارسا، در سال ۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه یاسوج واقع در دشت‌روم اجرا گردید. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. عامل اول شامل کود شیمیایی فسفره (سوپرفسفات تریپل) در چهار سطح (صفر، ٦۰ ، ۱۲۰ و ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار) و عامل دوم شامل کود زیستی فسفره در چهار سطح (شاهد، کود زیستی فسفاته به‌رشد حاوی باکتری سودوموناس، قارچ مایکوریزا (*Glomus mosseae* L.) و کاربرد توأم کود زیستی فسفاته به‌رشد و قارچ مایکوریزا) می‌باشد. نتایج نشان داد برهمکنش تیمارهای اعمال شده بر شاخص سطح برگ معنی‌دار بود و مصرف ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی همراه تلقیح با کود زیستی فسفاته به‌رشد + قارچ مایکوریزا باعث افزایش ۱۱۲/٦ درصدی شاخص سطح برگ نسبت به شاهد شد. تلقیح با کود زیستی فسفره اثر افزایشی معنی‌داری بر غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی و دانه داشت. بیشترین غلظت عناصر غذایی اندام هوایی و دانه مربوط به تلقیح با کود زیستی فسفاته به‌رشد + قارچ مایکوریزا و کمترین نیز مربوط به شاهد بود. برهمکنش کود شیمیایی و زیستی فسفره بر عملکرد دانه معنی‌دار گردید. بالاترین عملکرد دانه (۲۰۸۵ کیلوگرم در هکتار) با مصرف ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل و تلقیح با کود زیستی فسفاته به‌رشد+ قارچ مایکوریزا به دست آمد و کمترین عملکرد دانه (۹۷۱/٦۷ کیلوگرم در هکتار) در سطح صفر کود شیمیایی و تیمار شاهد کود زیستی مشاهده شد. نتایج نشان داد که با افزایش مصرف کود شیمیایی کارآیی مصرف فسفر روند نزولی پیدا می‌کند. در سطح ٦۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات مصرفی، کاربرد کود زیستی فسفاته به‌رشد + مایکوریزا توانست افزایش معنی‌داری نسبت به سایر سطوح کود زیستی در این صفت ایجاد نماید و افزایش ۳۸/۱۷ درصدی نسبت به شاهد داشت. لذا در این پژوهش تلفیق

نویسنده مسئول: علیرضا یدوی
رایانامه: Yadavi@yu.ac.ir

کودهای زیستی فسفره شامل باکتری‌های حل‌کنندهٔ فسفات و قارچ مایکوریزا باعث افزایش رشد رویشی و بهبود عملکرد دانه و عملکرد روغن و بهبود کارایی مصرف فسفر در سویا گردید. در حالی که با افزایش سطوح مصرف کودهای شیمیایی فسفره، کارآیی مصرف کودهای زیستی کاهش معنی‌داری یافت.

کلید واژه‌ها: کود زیستی، عملکرد دانه، شاخص سطح برگ، نیتروژن، انتقال مجدد فسفر

مقدمه

دانه‌های روغنی پس از غلات مهم‌ترین منبع تأمین کنندهٔ انرژی برای جوامع بشری محسوب می‌شوند. تأمین روغن خوراکی مورد نیاز جامعه یکی از مسائل مهمی است که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیار زیادی قرار گرفته لذا تولید و مدیریت صحیح آن‌ها جهت افزایش عملکرد کمی و کیفی از اهمیت بالایی برخوردار است. سویا با نام علمی (*Glycine max* L.) گیاهی است روزکوتاه، یکساله که متعلق به تیره لگومینوز می‌باشد. سویا یکی از مهم‌ترین گیاهان روغنی و پروتئینی به شمار می‌رود و بذر آن بر مبنای وزن خشک دارای ۴۰-۳۵ درصد پروتئین، ۲۰-۱۸ درصد روغن و حدوداً ۳۵ درصد کربوهیدرات می‌باشد و به عنوان یک رژیم اصلی در تغذیهٔ انسان و دام مورد استفاده قرار می‌گیرد (Amani Machiani *et al.*, 2021). کشت این گیاه به دلیل تثبیت بیولوژیکی نیتروژن، موجب تقویت خاک‌های زراعی شده و از نظر اکولوژیک نقش مهمی در پایداری اکوسیستم‌های زراعی ایفا می‌کند (Prasad, 2021).

فسفر، پس از نیتروژن مهم‌ترین عنصر مورد نیاز گیاهان برای افزایش تولید و عملکرد می‌باشد و فرآهمی این عنصر در خاک اغلب به عنوان یک فاکتور محدودکننده برای تولید محصولات کشاورزی در سراسر دنیا مطرح می‌باشد (Wei *et al.*, 2017). پیامدهای مصرف بی‌رویه کودهای فسفره علاوه بر تجمع بیش از حد فسفر، ایجاد رقابت با جذب عناصر ریزمغذی به ویژه روی (Zn) (Meenal *et al.*, 2018)، اتلاف سرمایه، کاهش کیفیت، هدر رفتن ارز کشور و از همه مهم‌تر تجمع آلاینده‌هایی نظیر کادمیوم در محصولات کشاورزی می‌باشد (Mirzashahi *et al.*, 2021). کودهای زیستی فسفره در واقع حاوی ریزجاندارانی هستند که از طریق فرآیندهای خاصی باعث افزایش حلالیت فسفر موجود در خاک شده و بدین گونه بخشی از فسفر مورد نیاز گیاه را تأمین می‌کنند (Yadav *et al.*, 2017). از جمله کودهای زیستی فسفره می‌توان به باکتری‌های حل کننده فسفات و قارچ مایکوریزا اشاره کرد. باکتری‌های حل کنندهٔ فسفات خاک از طریق تولید اسیدهای آلی (Aye *et al.*, 2021)، آنزیم فسفاتاز و تولید یون هیدروژن (Biswas *et al.*, 2018)، تولید مواد کلات‌کننده و اسیدهای معدنی (Etesami *et al.*, 2021) موجب افزایش حلالیت فسفر در خاک می‌شوند. جنس سودوموناس به عنوان یکی از شناخته شده‌ترین و پرکاربردترین باکتری‌های محرک رشد گیاه با توانایی انحلال فسفر محسوب می‌شود. محققین توانایی انحلال فسفر و افزایش شاخص‌های رشد گیاهان مختلف را توسط این جنس از باکتری‌ها گزارش کرده اند (Liu *et al.*, 2014). قارچ‌های مایکوریزا از اعضای گسترده و مهم اکوسیستم خاک هستند که با اکثر محصولات کشاورزی روابط همزیستی برقرار می‌کنند. این قارچ‌ها حدود ۵ تا ۵۰ درصد از زیست توده میکروبی خاک را تشکیل می‌دهند که حدود ۱۱ تا ۲۶ درصد از کربوهیدرات مورد نیاز خود را به شکل قند هگزوز ساده از گیاه میزبان دریافت می‌کنند (Paterson *et al.*, 2016) و مواد معدنی به ویژه فسفر، نیتروژن و برخی از عناصر ریزمغذی را در اختیار ریشه گیاهان قرار می‌دهند (Meena1 *et al.*, 2018). تحقیقات در

شرایط فسفر پایین خاک بیانگر بهبود تغذیه، رشد و پارامترهای فتوسنتزی سویاهای تلقیح شده با مایکوریزا در مقایسه با سویاهای دریافت کنندهٔ مقادیر بالای فسفر شیمیایی بود (Abdel-Fattah *et al.*, 2014). همچنین افزایش غلظت عناصر فسفر، پتاسیم و روی در اندام هوایی کتان و همچنین از افزایش ۲۶ درصدی عملکرد دانه کتان در پی کاربرد تلفیقی کود زیستی بارور ۲ و قارچ مایکوریزا گزارش گردیده است (Shojaeian kishi *et al.*, 2021). با بررسی استفاده از قارچ مایکوریزا و مقادیر مختلف کود فسفره بر عملکرد کمی و کیفی سویا در منطقه ساری بیان شده که کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و همچنین تلقیح با مایکوریزا باعث بهبود شاخص سطح برگ و عملکرد دانه و روعن سویا شده است (Alaeibakhsh and Ahmadi, 2018). نتایج حاصل از یک پژوهش از افزایش محتوای نیتروژن و فسفر در گیاهان سویای تیمار شده با قارچ مایکوریزا و باکتری محرک رشد برادی رایزوبیوم جاپونیکوم (*Bradyrhizobium japonicum*) نسبت به شاهد گزارش شده است (Prasad, 2021). با بررسی کاربرد کودهای NPK، قارچهای مایکوریزا و باکتریهای محرک رشد بر روی سویا گزارش شده که تلقیح با باکتریهای محرک رشد و قارچهای مایکوریزا به تنهایی تعداد گره های ریشه را به ترتیب ۶۷ و ۵۷ درصد افزایش داده است. کاربرد مشترک آن‌ها تعداد گره‌های ریشه را ۶۸ درصد افزایش داده و همچنین افزودن کودهای NPK تعداد گره‌های ریشه را ۶۶/۹-۶۸/۶ درصد نسبت به شاهد افزایش داده است (Ngosong *et al.*, 2022). این نتایج همچنین بیانگر افزایش بیشتر غلظت فسفر، آهن و روی در سویا با کاربرد توام قارچ و باکتری بود. در تحقیق دیگری نیز گزارش گردیده است که کاربرد باکتری‌های محرک رشد و قارچ مایکوریزا باعث افزایش تعداد برگ، توزیع سطح برگ و بهبود روعن سویا نسبت به شاهد شده است (Igiehon *et al.*, 2021). در پژوهشی روی گیاه آفتاب‌گردان نشان داده شده است که با افزایش مقدار کود شیمیایی مصرفی، کارآیی مصرف کود از ۲۲/۶۶ کیلوگرم بر کیلوگرم در تیمار مصرف ۵۰ کیلوگرم نیتروژن+۲۵ کیلوگرم فسفر در هکتار به ۱۰/۵۱ کیلوگرم بر کیلوگرم در تیمار مصرف ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن+ ۷۵ کیلوگرم فسفر در هکتار کاهش یافته است (Mirzakhani *et al.*, 2015). با توجه به نقش فسفر در تولید روغن دانه‌های روغنی و همچنین نقش کودهای زیستی در بهبود دسترسی گیاهان به فسفر این تحقیق در راستای قدم‌گذاری در مسیر توسعه و ترویج کشاورزی پایدار و استفاده از نهاده‌های زیستی به جای کودهای شیمیایی انجام شده است. هدف از این مطالعه، تعیین تاثیر مقادیر کود فسفره شیمیایی در تلفیق با کودهای زیستی بر غلظت عناصر غذایی در سویا بوده که تاکنون به این صورت مورد ارزیابی قرار نگرفته است و در نهایت پاسخ به این پرسش که آیا می‌توان با تلفیق کود شیمیایی و زیستی فسفره علاوه بر کاهش مصرف کود شیمیایی در راستای افزایش عملکرد سویا در منطقهٔ یاسوج گام نهاد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر مصرف کود فسفره بر جذب عناصر و کارایی مصرف فسفر در گیاه سویا، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه یاسوج واقع در دشت‌روم در سال ۱۳۹۹ اجرا گردید. فاکتور اول کود شیمیایی فسفره (سوپرفسفات تریپل) در چهار سطح: صفر، ۶۰ ، ۱۲۰ و ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار و فاکتور دوم کود زیستی نیز در چهار سطح: شاهد، کود زیستی فسفاته به‌رشد (شامل باکتری‌های سودوموناس با تراکم سلولی (۲×۱۰^{۷} CFU/ml)، قارچ مایکوریزا و کود زیستی فسفاته به‌رشد + قارچ مایکوریزا می‌باشد. قبل از شروع آزمایش برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری

خاک نمونه برداری و برای تجزیه به آزمایشگاه منتقل شد. نتایج آزمون خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۱) ارائه شده است. هر کرت آزمایش از چهار پشته به طول چهار متر و فاصله ردیف ۵۰ سانتی‌متر تشکیل شد. فاصله بین کرت‌ها ۵۰ سانتی‌متر، فاصله بین بوته‌ها روی ردیف پنج سانتی‌متر و عمق کاشت بذر دو تا سه سانتی‌متر بود. کوددهی نیتروژنه و پتاسه طبق آزمون خاک و در نظر گرفتن نیاز گیاه صورت گرفت (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره در سه مرحله داده شد. مرحله اول قبل از کاشت ۲۵ درصد کود به زمین داده شد و ۷۵ درصد بقیه کود طی دو مرتبه در زمان ۶ برگی و همچنین قبل از گل‌دهی به صورت سرک به زمین داده شد و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود پتاسه از منبع سولفات پتاسیم قبل از کشت به خاک اضافه گردید). کود شیمیایی فسفره متناسب هر تیمار به صورت نواری در طرفین بالای پشته به طوری که در زیر بذر قرار گیرد درون شیار قرار داده شد. کود زیستی فسفاته به‌رشد از شرکت فن‌آوری زیستی طبیعت‌گرا واقع در کرج، قارچ مایکوریزا از شرکت گیاهپزشکی همدان و بذور سویا (رقم پارسا) نیز از مرکز تحقیقات کشاورزی اردبیل تهیه شد. کود زیستی فسفاته به‌رشد به صورت بذرمال استفاده شد. برای این منظور قبل از کاشت، بذور مربوط به تیمار کود زیستی به‌رشد مطابق با دستورالعمل شرکت تولید کننده آماده و سپس روی بذرهایی که روی نایلون تمیز و در سایه قرار داده شده بود اسپری شد. قارچ مایکوریزا نیز به صورت نواری در مجاورت با بذر و زیر آن قرار داده شد و سپس عملیات کاشت در ۲۱ خرداد ماه انجام گرفت. کاشت در طرفین هر پشته صورت گرفت و درون هر چاله سه عدد بذر قرار گرفت. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت صورت گرفت و تا زمان خروج گیاهچه از خاک هر سه روز یک بار آبیاری انجام گرفت و پس از آن هر هشت روز یک بار آبیاری شد. در طول دوره رشدونمو عملیات وجین علف‌های هرز با دست انجام شد. در مرحله شروع غلاف‌دهی شاخص سطح برگ با انتخاب تصادفی چهار بوته از هر کرت اندازه‌گیری شد. برداشت سویا در تاریخ هشتم آبان ۱۳۹۹ انجام و برای تعیین عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم یک نمونه ۳۳ گرمی از هر کرت به طور تصادفی تهیه گردید. نمونه‌های فراهم شده را پس از خشک کردن در آون در دمای ۷۳ درجه سانتی گراد به مدت ۱۶ ساعت به وسیله آسیاب برقی پودر کرده و در نهایت به روش هضم توسط اسیدسولفوریک، اسیدسالیسیک، آب اکسیژنه و سلنیم، عصاره آن‌ها تهیه شد و برای اندازه‌گیری کلیه عناصر مورد نظر در بذر سویا از این عصاره استفاده شد. عناصر نیتروژن و فسفر با دستگاه اسپکتروفتومتری به‌ترتیب در طول موج ۶۶۰ نانو متر و ۴۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شدند. پتاسیم از طریق دستگاه فلیم فتومتر و عناصر آهن و روی نیز از روش جذب اتمی اندازه‌گیری شدند. برای عملکرد روغن نیز از حاصلضرب عملکرد دانه در درصد روغن محاسبه گردید. شاخص کارآیی فسفر نیز از روش زیر محاسبه شدند (Sheoran *et al*., 2016).

کارآیی مصرف فسفر: $PUE=Yg/Pf$

کارآیی مصرف فسفر (کیلوگرم بر کیلوگرم)، Yg عملکرد دانه برحسب کیلوگرم و Pf مقدار فسفر مصرفی به صورت کود برحسب کیلوگرم در هکتار می‌باشد.

میزان انتقال مجدد فسفر: $PR=P_{ant}- P_{mat}$

P_{ant} مقدار فسفر در ماده خشک در مرحله شروع پرشدن دانه (گرم در مترمربع) و P_{mat} مقدار فسفر در ماده خشک گیاهی در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک است.

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام گرفت. مقایسه میانگین اثرات تیمارها بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. برای صفاتی که برهمکنش تیمارها معنی‌دار گردید تجزیه واریانس برش‌دهی صورت گرفت و مقایسات میانگین نیز از طریق رویه L.S. Means انجام گرفت

نتایج و بحث

غلظت نیتروژن اندام هوایی و دانه

اثر سطوح کود شیمیایی و زیستی فسفره بر غلظت نیتروژن اندام هوایی و دانه معنی‌دار گردید اما برهمکنش آن‌ها معنی‌دار نشد (جدول ۲). مقایسه میانگین سطوح کود شیمیایی فسفره نشان داد که بیشترین غلظت نیتروژن اندام هوایی در تیمار ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل حاصل شد که تفاوت معنی‌داری با تیمار ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل نداشت (جدول۳). همچنین بیشترین غلظت نیتروژن دانه نیز از مصرف ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفره بدست آمد که تفاوت معنی‌داری با ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار نداشت (جدول ۳). مصرف کود شیمیایی فسفره با بهبود و افزایش رشد ریشه سویا باعث دسترسی بیشتر ریشه به عناصر غذایی به‌خصوص نیتروژن شده و سبب افزایش غلظت این عنصر در اندام هوایی سویا گردید. نتایج مقایسه میانگین سطوح کود زیستی فسفره نشان داد کاربرد تلفیقی کود زیستی فسفاته به‌رشد + مایکوریزا بیشترین غلظت نیتروژن اندام هوایی و دانه را داشت که تفاوت معنی‌داری با تیمارهای کود زیستی فسفاته به‌رشد و تیمار قارچ مایکوریزا نداشت و کمترین غلظت نیتروژن در تیمار شاهد مشاهده شد (جدول ۳). گزارش شده که باکتری‌های ریزوسفری، میزان هورمون سیتوکینین را در گیاه میزبان افزایش می‌دهند و باعث افزایش سرعت انتقال نیترات از ریشه به شاخساره می‌گردد (Flores *et al.*, 2005). در گزارش دیگری نیز آمده که قارچ‌های مایکوریزا تأثیر عمیقی بر فیزیولوژی ریشه گیاه گذاشته سبب فعال شدن ساخت گلوتامین سنتتاز، آرژیناز و اوره‌آز شده و از این طریق غلظت نیتروژن را در ریشه میزبان افزایش می‌دهد (Bago *et al.*, 2001). در همین راستا محققان بیان کردند که افزایش درصد نیتروژن در گیاه به واسطه افزایش فسفر محلول به دلیل نقش بسیار مهم این عنصر در گره‌زایی و تثبیت نیتروژن در گیاهان لگوم می‌باشد. دلیل احتمالی دوم نیز نقش بسیار مهم فسفر در تأمین انرژی در ساختار ATP می‌باشد. زیرا برای تثبیت نیتروژن انرژی فراوانی مورد نیاز است (Backer *et al.*, 2018). بنابراین نقش غیر قابل انکار کود بیولوژیک را در این عامل می‌توان دخیل دانست.

غلظت فسفر اندام هوایی و دانه

اثر کودهای شیمیایی و زیستی فسفره بر غلظت فسفر اندام هوایی و دانه معنی‌دار شد ولی برهمکنش آن‌ها بر این صفات معنی‌دار نگردید (جدول ۲). مقایسه میانگین سطوح کود شیمیایی فسفره نشان داد که تیمار ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل بیشترین میزان غلظت فسفر اندام هوایی را داشت و کمترین غلظت فسفر در تیمار صفر مشاهده شد. همچنین مقایسه میانگین سطوح کود شیمیایی نشان داد که تیمار ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل بیشترین میزان غلظت فسفر دانه را داشت که تفاوت معنی‌داری با تیمار ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل نداشت (جدول ۳). مصرف کود شیمیایی فسفره، موجب شد که دسترسی ریشه به فسفر افزایش یابد و جذب فسفر بیشتری توسط ریشه گیاه انجام گیرد و غلظت این عنصر در اندام هوایی گیاه افزایش یابد (Feng *et al.*, 2021). مقایسه میانگین سطوح کود زیستی فسفره نیز نشان داد که کاربرد تلفیقی فسفاته به‌رشد + مایکوریزا توانست غلظت فسفر اندام هوایی را ۲۰/۸۷ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش دهد و از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با تیمار فسفاته به‌رشد و تیمار مایکوریزا نداشت (جدول ۳). همچنین بیشترین غلظت فسفر دانه نیز در تیمار فسفاته به‌رشد + مایکوریزا مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با تیمار مایکوریزا نداشت (جدول ۳). غلظت بالاتر فسفر در تیمار ترکیبی فسفاته به رشد+ مایکوریزا می تواند به توانایی تولید اسید فسفاتاز توسط قارچ مایکوریزا و باکتری های محرک رشد در محیط ریشه سویا باشد که به جذب فسفر بیشتر ختم می‌گردد

(Ngosong *et al.*, 2022). در تحقیقی دیگر نتایج بیانگر تأثیر مثبت تیمار تلفیقی کاربرد ۵۰ درصد کود نیتروژنه + ۷۵ درصد کود فسفاته به همراه باکتری محلول‌کننده فسفر و باکتری تثبیت نیتروژن بر محتوای فسفر سویا بود (Shome *et al.*, 2022). آن‌ها گزارش دادند که در تیمار تلفیقی مذکور محتوای فسفر در اندام هوایی و دانه سویا به ترتیب ۴۰ و ۴۸ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد. حضور شبکه گسترده هیف‌های قارچ مایکوریزا در اطراف ریشه باعث می‌شود که فسفر با سرعتی بیشتر از سرعت انتشار خود در خاک به ریشه-های گیاه میزبان انتقال یابد (Soltanian *et al.*, 2015). پژوهشگران بیان کردند که باکتری‌های جنس سودوموناس با تولید اسیدهای آلی و معدنی و آنزیم فسفاتاز موجب انحلال فسفر معدنی و آلی شده و غلظت فسفر قابل جذب را افزایش می‌دهند. از طرفی با تولید هورمون‌های محرک رشد گیاه موجب بهبود سیستم ریشه‌ای گیاه شده که نقش به سزایی در افزایش جذب فسفر گیاه دارد (Ngosong *et al.*, 2021). نتایج این پژوهش با نتایج دیگر محققان (Razavi *et al.*, 2011) روی سویا مطابقت داشت.

غلظت پتاسیم اندام هوایی و دانه

تلقیح با کود زیستی فسفره تأثیر معنی‌داری بر غلظت پتاسیم اندام هوایی در گیاه داشت اما اثر کود شیمیایی فسفره و برهمکنش کود شیمیایی و کود زیستی فسفره بر این صفت معنی‌دار نگردید (جدول ۲). همچنین اثر کود شیمیایی و زیستی فسفره بر غلظت پتاسیم دانه معنی‌دار شد ولی برهمکنش آن‌ها نتوانست تأثیر معنی‌داری داشته باشد. بیشترین غلظت پتاسیم دانه در تیمار ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل حاصل شد و توانست غلظت پتاسیم دانه را ۹/۴۵ درصد نسبت به سطح صفر افزایش دهد (جدول ۳).در تحقیق دیگر نیز گزارش شده که اثر کود شیمیایی فسفره بر غلظت پتاسیم شاخساره ذرت معنی‌دار نشد (Azimzadeh *et al.*, 2019). آن‌ها علت عدم تأثیر معنی‌دار کود شیمیایی فسفره بر جذب پتاسیم شاخساره ذرت را به اثر رقت نسبت دادند. بدین معنی که با کاربرد فسفر، پتاسیم جذب شده توسط گیاه با افزایش رشد و توسعه اندام‌ها، در کل پیکره گیاه توزیع می‌شود و بنابراین به صورت افزایش غلظت پتاسیم نمود پیدا نمی‌کند. مقایسه میانگین سطوح کود زیستی فسفره نشان داد که بیشترین غلظت پتاسیم اندام هوایی و دانه را کاربرد تلفیقی کود زیستی فسفاته به‌رشد + مایکوریزا (۹/۱۸ میلی‌گرم بر گرم) داشت که تفاوت معنی‌داری با تیمار قارچ مایکوریزا (۸/۵۸ میلی‌گرم بر گرم) نداشت (جدول ۳). در تحقیقی از افزایش محتوای پتاسیم برگ سویا در پی تلقیح با باکتری حل کننده فسفات و قارچ مایکوریزا گزارش گردیده است و بیان شده که افزایش جذب فسفر خاک توسط قارچ مایکوریزا و باکتری های محرک رشد ریزوسفری از طریق تولید پروتون و سیدروفورها احتمالاً در رهاسازی K^+ از کانی‌ها مؤثر می‌باشد (Costa leite *et al.*, 2022).

غلظت آهن اندام هوایی و دانه

نتایج نشان داد که کاربرد کود شیمیایی فسفره و تلقیح کود زیستی فسفره بر غلظت آهن اندام هوایی اثر معنی‌داری داشت اما برهمکنش آن‌ها معنی‌دار نشد (جدول ۲). مقایسه میانگین سطوح کود شیمیایی فسفره نشان داد که بیشترین غلظت آهن اندام هوایی در تیمار ۶۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با تیمار ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل نداشت و کمترین غلظت از تیمار شاهد به دست آمد (جدول ۳). کود شیمیایی فسفره نتوانست اثر معنی‌داری بر غلظت آهن در دانه بگذارد. در همین راستا در تحقیقی با بررسی پاسخ سویا به کاربرد آهن و فسفر در یک خاک آهکی گزارش شده است که غلظت آهن اندام هوایی سویا با کاربرد کود فسفره نسبت به شاهد کاهش یافت (Chakerolhosseini *et al.*, 2003). ایشان دلیل این کاهش را به کاهش قابلیت استفاده از آهن در خاک در

اثر فسفر و کاهش جذب آهن یا تاثیر منفی فسفر در انتقال آهن از ریشه به اندام هوایی نسبت دادند. در سطوح مختلف کود زیستی فسفره نیز تیمار کود زیستی فسفاته به‌رشد توانست غلظت فسفر آهن اندام هوایی را ۳۲/۵ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد و از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با تیمار فسفاته به‌رشد + مایکوریزا نداشت (جدول ۳). اثر کود زیستی فسفره بر غلظت آهن دانه معنی‌دار گردید اما اثر اصلی کود شیمیایی فسفره و برهمکنش کود زیستی و شیمیایی فسفره بر این صفت معنی‌دار نگردید (جدول ۲). نگوسونگ و همکاران (Ngosong *et al.*, 2022) از افزایش جذب عناصر کم‌مصرف آهن و روی در دانه سویا، در پی مصرف کود زیستی مایکوریزا و باکتری‌های محرک رشد گزارش دادند. جذب عناصر کم مصرف ممکن است مربوط به توانایی تولید سیدروفور توسط باکتری‌ها باشد که گیاهان از آن به عنوان عاملی برای تأمین آهن مورد نیاز خود استفاده می‌کنند (Nogueira *et al.*, 2007). توانایی تولید سیدروفور در باکتری‌های حل کننده فسفات از جمله سودوموناس و باسیلوس به اثبات رسیده است. نتایج این پژوهش با نتایج حاصل از پژوهش شجاعیان کیش و همکاران (Shojaeian Kishi *et al.*, 2021) در گیاه کتان روغنی مطابقت دارد.

غلظت روی اندام هوایی و دانه

اثر کود شیمیایی و کود زیستی فسفره بر غلظت روی اندام هوایی و دانه معنی‌دار شد اما برهمکنش آن‌ها بر صفت‌های مذکور معنی‌دار نگردید (جدول ۲). مقایسه میانگین سطوح کود شیمیایی فسفره نشان داد که بالاترین غلظت روی اندام هوایی با کاربرد ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارهای کود شیمیایی فسفره نداشت و کمترین میزان در تیمار شاهد ثبت گردید (جدول ۳). مقایسه میانگین سطوح کود زیستی فسفره نشان داد که بیشترین غلظت روی اندام هوایی و دانه در تیمار تلفیقی کود زیستی فسفاته به‌رشد + مایکوریزا به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارهای اعمال شده نداشت و کمترین غلظت در تیمار شاهد حاصل شد (جدول ۳). نتایج تحقیقات صبور و همکاران (Saboor *et al.*, 2021) در گیاه ذرت نشان داد که کاربرد کود شیمیایی فسفره و کود زیستی قارچ مایکوریزا اثر معنی‌دار افزایشی بر غلظت عنصر روی ساقه گیاه داشت. آنها بیان داشتند که کودهای زیستی با تولید سیدروفور و اسیدهای آلی و همچنین با نفوذ ریسه‌های نازک قارچ مایکوریزا به حفرات ریز خاک و افزایش طول و سطح جذب ریشه سویا باعث انتقال بیشتر عناصر غذایی ریزمغذی از خاک به‌ویژه عنصر روی می‌گردد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک محل انجام آزمایش

Table 1. Physicochemical properties of the soil at the experimental site

Soil texture	pH	EC ($ds.m^{-1}$)	Organic carbon (٪)	Total nitrogen (٪)	P	K	Fe	Zn
					($mg.\ kg^{-1}$)			
loamy clay	7.9	0.6	0.9	0.09	7	99	10.4	0.6

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) عناصر نیتروژن، فسفر،پتاسیم، آهن و روی در اندام هوایی و دانه سویا تحت تاثیر کودهای شیمیایی و زیستی فسفر

Table 2. Analysis of variance results (mean squares) for nitrogen, phosphorus, potassium, iron, and zinc in soybean shoots and seeds under the influence of chemical and bio-phosphorus fertilizers

S.O. V	df	Shoot N	Seed N	Seed P	Seed P	Shoot K	Seed K	Shoot Fe	Seed Fe	Shoot Zn	Seed Zn
Replication	2	0.15^{ns}	0.24^{ns}	1.02^{ns}	0.88^{ns}	1.94^{ns}	0.5^{ns}	0.0002^{ns}	0.006^{ns}	0.00006^{ns}	0.00001^{ns}
Phosphorus chemical (PC)	3	6.77^{**}	43.33^{**}	52.38^{**}	145.19^{**}	1.37^{ns}	2.8^{**}	0.0313^{*}	0.008^{ns}	0.00022^{*}	0.00025^{ns}
Phosphorous bio-fertilizer (PB)	3	12.35^{**}	11.61^{*}	5.13^{*}	26.48^{**}	5.82^{**}	1.19^{*}	0.0409^{**}	0.051^{**}	0.00020^{*}	0.00019^{**}
P C×P B	9	1.39^{ns}	1.47^{ns}	0.94^{ns}	2.05^{ns}	1.57^{ns}	0.45^{ns}	0.0046^{ns}	0.003^{ns}	0.00003^{ns}	0.000009^{ns}
Error	30	1.1	4.83	1.14	3.36	0.87	0.36	0.0076	0.003	0.00006	0.00002
C.V (%)		10.84	12.71	12.77	12.35	11.09	4.68	18.15	13.09	19.16	1.17

**و * به ترتیب بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد و ns نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشد

** and * indicate the existence of a significant difference at the level of 1% and 5%, respectively, and ns indicates the absence of a significant difference.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر کودهای شیمیایی و زیستی فسفر بر غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و روی در اندام هوایی و دانهٔ سویا

Table 3. Mean comparison for the effect of chemical and biological phosphorus fertilizers on the concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, iron and zinc elements in soybean shoots and seeds

Treatment		Shoot N	Seed N	Shoot P	Seed P	Shoot K	Seed K	Shoot Fe	Seed Fe	Shoot Zn	Seed Zn
		$mg.\ g^{-1}$									
Chemical phosphorus fertilizer ($kg.h^{-1}$)	0	8.76^{c}	31.26^{b}	5.89^{d}	10.08^{c}	-	12.38^{c}	0.41^{c}	-	0.035^{b}	0.063^{c}
	60	9.31^{bc}	34.67^{b}	7.71^{c}	14.42^{b}	-	12.86^{bc}	0.52^{c}	-	0.039^{ab}	0.066^{bc}
	120	10.36^{a}	39.40^{a}	9.12^{b}	17.18^{a}	-	13^{b}	0.5^{ab}	-	0.042^{a}	0.070^{ab}
	180	10.17^{ab}	39.82^{a}	10.81^{a}	17.67^{a}	-	13.55^{a}	0.44^{bc}	-	0.045^{a}	0.073^{a}
Phosphorous bio-fertilizer	Control	8.16^{b}	33.91^{c}	7.57^{b}	12.89^{c}	7.5^{c}	12.53^{c}	0.4^{c}	0.35^{c}	0.035^{b}	0.062^{b}
	BP	9.92^{a}	35.99^{ab}	8.25^{ab}	14.87^{b}	8.36^{b}	12.89^{ab}	0.53^{a}	0.41^{b}	0.040^{ab}	0.069^{a}
	MF	10.12^{a}	36.30^{ab}	8.53^{a}	15.09^{ab}	8.58^{ab}	13.15^{a}	0.43^{b}	0.48^{a}	0.042^{a}	0.069^{a}
	BP + MF	10.4^{a}	38.94^{a}	9.15^{a}	16.50^{a}	9.18^{a}	13.23^{a}	0.49^{ab}	0.49^{a}	0.045^{a}	0.072^{a}

BP=فسفات به رشد، MF=قارچ مایکوریزا، BP+MF= فسفات به رشد+قارچ مایکوریزا. در هر ستون میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی داری بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد ندارند

BP= Behroshd Phosphate. MF= Mycorrhiza fungi, BP + MF= Behroshd Phosphate+ Mycorrhiza fungi. In each column, the averages with at least one common letter have no significant difference at the 5% probability level based on the LSD test.

شاخص سطح برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر کودهای شیمیایی و زیستی فسفره و برهمکنش آن‌ها بر شاخص سطح برگ گیاه معنی‌دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین برهمکنش کود زیستی و کود شیمیایی فسفره نشان داد که در سطح صفر و ۶۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل کود شیمیایی، بیشترین میزان شاخص سطح برگ در تیمار فسفاته به‌رشد + مایکوریزا به‌دست آمد که از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با تیمار مایکوریزا نداشت. در سطح ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل نیز بیشترین میزان سطح برگ در تیمار کود زیستی فسفاته به‌رشد مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با تیمار فسفاته به‌رشد + مایکوریزا و تیمار مایکوریزا نداشت. همچنین در سطح ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل بیشترین میزان سطح برگ در تیمار کود زیستی فسفاته به‌رشد + مایکوریزا به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارها نداشت (شکل ۱). گزارش شده که میکروارگانیسم‌های موجود در کودهای زیستی با سنتز هورمون‌های رشد و همچنین بهبود جذب آب و عناصر غذایی به‌خصوص فسفر در گیاه و با دسترسی بیشتر به این عناصر، شاخص سطح برگ سویا را افزایش داده اند و در نهایت سبب بهبود فتوسنتز و افزایش عملکرد دانه شده است (Shome *et al*., 2022).

عملکرد دانه

جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمارها و برهمکنش کود شیمیایی و کود زیستی فسفره بر عملکرد دانه معنی‌دار گردید (جدول ۴). نمودار مقایسه میانگین اثر کود زیستی در هر سطح کود شیمیایی فسفره نشان داد که تنها در سطح کود شیمیایی ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار اختلاف معنی‌دار بین سطوح کود زیستی از لحاظ عملکرد دانه وجود ندارد. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در سطوح صفر و کاربرد کود شیمیایی ۶۰ و ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل کاربرد فسفاته به‌رشد + مایکوریزا نسبت به عدم کاربرد کود زیستی (شاهد) عملکرد دانه به ترتیب ۶۵، ۳۸ و ۲۱/۵ درصد افزایش یافت. در سطح ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی نیز تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای کود زیستی فسفره وجود نداشت (شکل ۲). علت عدم تفاوت بین تیمارهای کود زیستی و عدم کاربرد کود زیستی در مقادیر بالای کود شیمیایی (۱۸۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل) می‌تواند به کاهش توانایی فعالیت این میکروارگانیسم‌ها در حضور مقادیر بالای فسفات محلول در خاک باشد که به کاهش همزیستی با گیاه ختم می‌گردد (Shome *et al*., 2022). افزایش معنی‌دار عملکرد دانه با کاربرد کودهای شیمیایی و زیستی فسفره و نیتروژنه در گیاه سویا توسط دیگر محققین گزارش شده است (Suryantini and Rahmiana, 2021). افزایش محتوای عناصر (Nogueira *et al*., 2007)، افزایش شاخص سطح برگ و تولید تنظیم کننده‌های رشد نظیر اکسین، جیبرلین و سیتوکنین (Shome *et al*., 2022) همچنین اثرات هم افزایی باکتری ریزوبیوم و قارچ مایکوریزا به دلیل نقش فسفر در تشکیل گره و تثبیت نیتروژن (Salehi *et al*., 2015) از عوامل مؤثر در افزایش عملکرد سویا در پی مصرف کودهای زیستی به شمار می‌رود.

عملکرد روغن

اثر کود زیستی و شیمیایی فسفره بر عملکرد روغن معنی‌دار گردید اما برهمکنش آن‌ها بر صفت مذکور معنی‌دار نشد (جدول ۴). مقایسه میانگین سطوح کود شیمیایی نشان داد که تیمار ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار توانست بیشترین عملکرد روغن (۴۱۷/۲ کیلوگرم در هکتار) را داشته باشد و نسبت به تیمار شاهد، ۵۷/۳۵ درصد عملکرد روغن را افزایش داد (جدول ۵). به نظر می‌رسد به دلیل نقش فسفر در گل‌دهی، جذب بیشتر آن سبب افزایش گرده‌افشانی در گیاه شده و از طریق افزایش اجزای عملکرد موجب افزایش عملکرد روغن گردید. میرزاشاهی و همکاران (Mirzashahi *et al*., 2021) بیشترین عملکرد روغن در گلرنگ را از مصرف ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل بدست آوردند و بیان کردند به دلیل اینکه عملکرد روغن بیشتر

تابع عملکرد دانه است تا درصد روغن دانه، بنابراین روند افزایش عملکرد روغن مشابه افزایش عملکرد دانه می‌باشد. مقایسه میانگین سطوح کود زیستی نیز نشان داد که کود فسفاته به‌رشد + مایکوریزا بیشترین عملکرد روغن را داشت و افزایش ۲۵ درصدی را نسبت به تیمار شاهد ایجاد کرد (جدول ۵). محققین بیان کردند که میکروارگانیسم های حل کننده فسفات با انحلال فسفات نامحلول و افزایش مقدار فسفر در دسترس برای باکتری همزیست، باعث تثبیت نیتروژن در ریشه و در نتیجه افزایش رشد گیاه بخصوص اندام هوایی می شوند که از طریق بهبود فتوسنتز بر عملکرد، اجزا عملکرد و نیز درصد روغن سویا تأثیر می‌گذارد (Shiri Janqrd and Raei, 2014).

کارایی مصرف فسفر

جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی و برهمکنش کود شیمیایی و کود زیستی فسفره بر کارآیی مصرف فسفر معنی‌دار گردید (جدول ۶). نمودار مقایسه میانگین اثر برهمکنش کود شیمیایی و کود زیستی فسفره بر کارآیی مصرف فسفر نشان داد که با افزایش مصرف کود شیمیایی کارآیی مصرف فسفر روند نزولی پیدا می‌کند. در سطح ۶۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات مصرفی، کاربرد کود زیستی فسفاته به‌رشد + مایکوریزا توانست افزایش معنی‌داری نسبت به سایر سطوح کود زیستی در این صفت ایجاد نماید و افزایش ۳۸/۱۷ درصدی نسبت به شاهد داشت (شکل ۳). این نتایج نشان داد که اثر کاربرد میکروارگانیسم‌هایی نظیر باکتری‌های محلول‌ساز فسفر و قارچ مایکوریزا بر کارآیی مصرف فسفر در مقادیر پایین کود شیمیایی معنی‌دار و چشمگیر می‌باشد ولی در مقادیر بالای کود شیمیایی از کارآیی این میکروارگانیسم‌ها در این زمینه کم می‌شود. به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقادیر فسفر مصرفی، نقش ریزجاندارن کاهش می‌یابد، بنابراین توصیه به مصرف مقادیر بالای کود شیمیایی به‌صرفه نمی‌باشد و با کاربرد مقادیر پایین‌تر کود شیمیایی می‌توان با استفاده از کودهای زیستی عملکرد مطلوب‌تری بدست آورد در پژوهشی دیگر نیز افزایش کارایی مصرف فسفر در پی کاربرد باکتری‌های حل کننده فسفات گزارش شده است (Laharia *et al*., 2019). نتایج در گلرنگ حاکی از کاهش معنی‌دار کارآیی جذب فسفر با افزایش کاربرد کود شیمیایی فسفره بوده است (Mirzashahi *et al*., 2021). این محققین کاهش شاخص کارآیی را به قانون عوامل محدود کننده ربط دادند. بدین صورت که بالاترین کارآیی معمولاً با جذب اولین واحد عنصر غذایی به‌دست می‌آید و واحدهای بعدی مصرف عنصر غذایی، افزایش کمتری را ایجاد می‌نمایند.

انتقال مجدد فسفر

جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اصلی کود زیستی فسفره بر میزان انتقال مجدد فسفر معنی‌دار شد ولی اثر اصلی کود شیمیایی فسفره و برهمکنش کود شیمیایی و کود زیستی فسفره معنی‌دار نگردید (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین کود زیستی نشان داد که بیشترین انتقال مجدد فسفر مربوط به شاهد و کمترین مربوط به کود زیستی فسفاته به‌رشد + مایکوریزا بود (شکل ۴). میکروارگانیسم‌ها از طریق بهبود جذب فسفر ریشه به تأمین نیاز فسفره گیاه کمک کرده و گیاه برای مدت بیشتری فسفر مورد نیاز خود را از طریق جذب از خاک تأمین می‌کند. لذا برای افزایش غلظت فسفر در دانه نیاز کمتری به انتقال فسفر ساختمانی موجود در بافت‌های گیاهی داشته و بر این اساس میزان انتقال مجدد فسفر کاهش می یابد. این در حالی است که در تحقیقاتی دیگر از افزایش انتقال مجدد فسفر در پی کاربرد باکتری‌های محلول کننده فسفر گزارش شده است (Laharia *et al*., 2019).

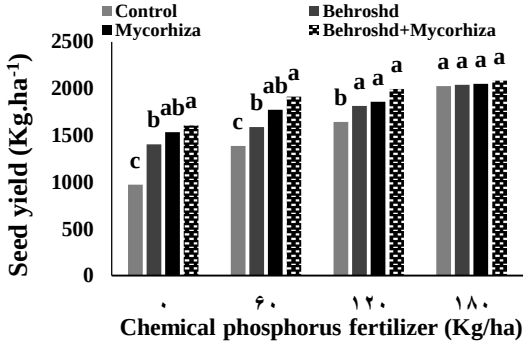
جدول ٤- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) شاخص سطح برگ، عملکرد و روغن دانه سویا تحت تاثیر کودهای شیمیایی و زیستی فسفر

Table 4. Analysis of variance (mean squares) for leaf area index, yield, and seed oil content of soybean under the influence of chemical and bio-phosphorus fertilizers

S.O.V	df	LAI	Seed yield	Oil yield
Replication	2	2.38**	26433.33^{ns}	1585.29^{ns}
Phosphorus chemical (PC)	3	5.56**	960184.72**	49381.13**
Phosphorous bio-fertilizer (PB)	3	2.22**	339265.5**	19579.83**
P C×P B	9	0.26**	42117.59*	2202.88^{ns}
Error	30	0.08	14828.33	1371.62
C.V (%)		10.84	7.03	10.84

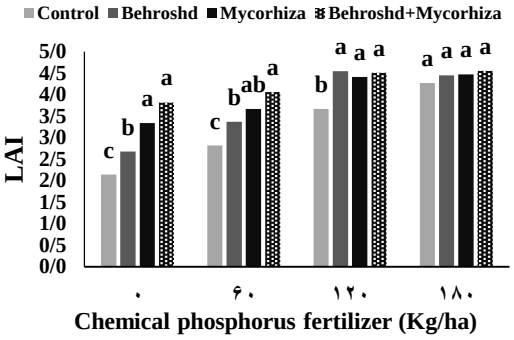
**و * به ترتیب بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد و ns نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشد

** and * indicate the existence of a significant difference at the level of 1% and 5%, respectively, and ns indicates the absence of a significant difference.



شکل ۲- مقایسه میانگین برهمکنش کودهای شیمیایی و زیستی فسفر بر عملکرد دانه سویا

Figure 2. Mean comparison for the interaction effects of chemical and biological phosphorus fertilizers on soybean seed yield



شکل۱- مقایسه میانگین برهمکنش کودهای شیمیایی و زیستی فسفر بر شاخص سطح برگ سویا

Figure 1. Mean comparison for the interaction effects of chemical and biological phosphorus fertilizers on soybean leaf area index

جدول ٥- مقایسه میانگین اثر کودهای شیمیایی و زیستی فسفر بر عملکرد روغن سویا

Table 5. Mean comparison for the effect of different levels of chemical and biological phosphorus fertilizers on soybean oil yield

Treatment	Treatment levels	Oil yield (Kg.ha^{-1})
Phosphorus chemical fertilizer (Kg.h^{-1})	0	265.15^{d}
	60	321.87^{b}
	120	361.42^{b}
	180	417.22^{a}
Phosphorous biofertilizer	Control	289.33^{c}
	BP	338.18^{b}
	MF	351.16^{b}
	BP + MF	386.99^{a}

BP=فسفات به رشد، MF=قارچ مایکوریزا، BP+MF= فسفات به رشد+قارچ مایکوریزا. در هر ستون میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح پنج درصد ندارند

BP= Behroshd Phosphate. MF= Mycorrhiza fungi, BP + MF= Behroshd Phosphate+ Mycorrhiza fungi, In each column, the averages with at least one common letter have no significant difference at the 5% probability level based on the LSD test

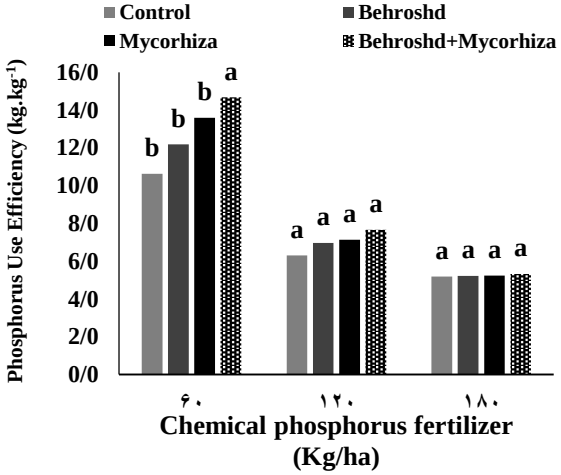
جدول ٦- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) کارایی مصرف و انتقال مجدد فسفر در سویا تحت تاثیر کودهای شیمیایی و زیستی فسفر

Table 6- Analysis of variance (mean squares) of phosphorus use efficiency and phosphorus remobilization in soybean under the influence of chemical and bio-fertilizers

S.O.V	df	Phosphorus use efficiency	Phosphorus Remobilization
Replication	2	0.88^{ns}	12.79^{**}
Phosphorus chemical (PC)	2	6211.88^{**}	0.48^{ns}
Phosphorous bio-fertilizer (PB)	3	1221.08^{**}	7.86^{**}
P C×P B	6	432.26^{**}	0.39
Error	22	77.58	0.73
C.V (%)		13.95	26.49

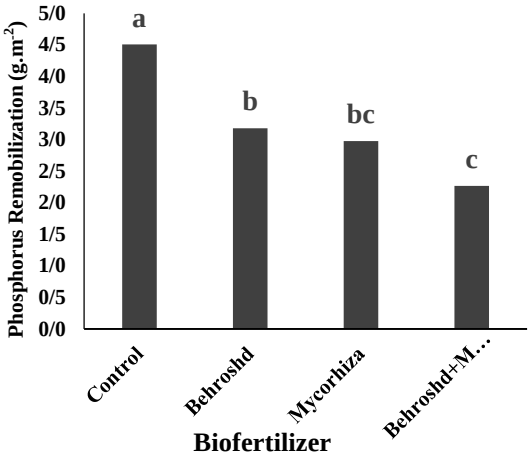
**و * به ترتیب بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۱ و ۵ درصد و ns نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار می باشد

** and * indicate the existence of a significant difference at the level of 1% and 5%, respectively, and ns indicates the absence of a significant difference.



شکل ۳- مقایسه میانگین برهمکنش کودهای شیمیایی و زیستی فسفر بر کارایی مصرف فسفر در سویا

Figure 3. Mean comparison for the interaction effects of chemical and biological phosphorus fertilizers on phosphorus use efficiency in soybean



شکل ٤- مقایسه میانگین برهمکنش کودهای شیمیایی و زیستی فسفر بر انتقال مجدد فسفر در سویا

4. Mean comparison for the effect of biological phosphorus on phosphorus remobilization in soybeans

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که اگرچه برای تأمین نیاز غذایی گیاهان همواره استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی متداول است اما با استفاده از کودهای زیستی به عنوان مکمل یا جایگزین علاوه بر افزایش فراهمی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه می‌توان در کاهش آلودگی خاک و ارتقای سلامت محیط‌زیست گام مؤثری برداشت. لذا در این پژوهش با تلفیق کودهای زیستی فسفره شامل باکتری‌های حل کننده فسفات و قارچ مایکوریزا باعث افزایش رشد رویشی و بهبود عملکرد دانه و عملکرد روغن گیاه و بهبود کارایی مصرف فسفر در سویا گردید به طوریکه با مصرف مقادیر کم تر کود سوپر فسفات تریپل (۱۲۰ کیلوگرم در هکتار) و کاربرد کود زیستی به رشد+قارچ مایکوریزا عملکرد دانه ای نزدیک به عملکرد دانه با کاربرد ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل می توان تولید نمود. ولی با افزایش سطوح مصرف کودهای شیمیایی فسفره، کارآیی مصرف کودهای زیستی کاهش معنی‌داری پیدا کرده و تولید پایدار با مخاطره روبرو خواهد شد.

References

Abdel-Fattah, G.M., Asrar, A.A., Al-Amri, S.M., & Abdel-Salam, E.M. (2014). Influence of arbuscular mycorrhiza and phosphorus fertilization on the gas exchange, growth and phosphatase activity of soybean (*Glycine max* L.) plants. *Photosynthetica*, 52(4), 581-588. https://doi.org/10.1007/s11099-014-0067-0

Alaeibakhsh, S. & Ahmadi, M. (2018) Effect of mycorrhiza application in different phosphorus rates on quality and quantity and yield of soybean at Sari weather condition. *Journal of Plant Cellular and Molecular Biology*, 13(1), 43-53. [In Persian].

Amani Machiani, M., Javanmard, A., Ostadi, A., & Morshedloo, M.R. (2021). Evaluation of essential oil yield and ecological indices in the intercropping of thyme (*Thymus vulgaris* L.) and soybean (*Glycine max* L.) with application of Arbuscular Mycorrhizal Fungus. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(3), 31-50. https://doi.org/10.22034/saps.2021.13687 [In Persian].

Aye, P.P., Pinjai, P., & Tawornprukek, S. (2021). Effect of phosphorus solubilizing bacteria on soil available phosphorus and growth and yield of sugarcane. *Walailak Journal of Science and Technology*, 18(12), 10754. https://orcid.org/0000-0002-1654-8981

Azimzadeh, Y., Najafi, N., Rihani Tabar, N., Ostan, S.H., & Khatai, A. (2019). Effect of phosphorus fertilizer and double layered hydroxide compounds based on biochar and hydrochar on dry matter and total nitrogen, phosphorus and potassium of corn plants. *Agricultural Engineering*, 42(1), 127-146. https://doi.org/10.22055/agen.2019.26602.1441 [In Persian].

Bago, B., Pfeffer, P., & Shachar-Hill, Y. (2001). Could the urea cycle be translocating nitrogen in the arbuscular mycorrhizal symbiosis? *The New Phytologist*, 149, 4-8.

Backer, R., Rokem, J.S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., &, Smith, D.L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and road map to commercialization of bio stimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1465-1473. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473

Biswas, J.K., Banerjee, A., Rai, M., Naidu, R., Biswas, B., Vithanage, M., Dash, M.C., Sarkar, S.K., & Meers, E. (2018). Potential application of selected metal resistant phosphate solubilizing bacteria isolated from the gut of earthworm (*Metaphire posthuma*) in plant growth promotion. *Eoderma*, 330, 117-124. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.034

Chakerolhosseini, M.R., Ronaghi, A., Maftoun, M., & Karimian N. (2003). Response of Soybean to Phosphorus and Iron in a Calcareous Soil. *Journal of Water and Soil Science*, 6 (4), 91-102. http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-139-fa.html [In Persian].

Costa Leite, R., Pereira, Y.C., Abreu de Oliviera-Paiva, C.H., Guedes de Maraes, A.G., & Barata de Silva, G. (2022). Increase in yield, leaf nutrient, and profitability of soybean co-inoculated with Bacillus strains and Arbuscular mycorrhizal fungi. *Revista brasileira de ciencia do solo*, 46, 1-20. https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220007

Etesami, H., B.R. Jeong, & B.R. Glick. (2021). Contribution of Arbuscular mycorrhizal fungi, phosphate–solubilizing bacteria, and silicon to P uptake by plant. *Frontiers in Plant Science*, 12, 1-29. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.699618

Feng, Y.Y., He, J., Turner, N.C., Siddique, H.M.K., & Feng, M.L. (2021). Phosphorus supply increases internode length and leaf characteristics, and increases dry matter accumulation and seed yield in soybean under water deficit. *Agronomy*, 11(5), 1-15. https://doi.org/10.3390/agronomy11050930

Flores, E., Frias, J.M., & Herrero, A. (2005). Photosynthetic nitrate assimilation in cyanobacteria. *Photosynthesis Research*, 83, 117-133. https://doi.org/10.1007/s11120-004-5830-9

Igiehon, N.O., Olubukola O. Babalola, O.O., Xavier Cheseto, X., & Baldwyn Torto, B. (2021). Effects of rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi on yield, size distribution and fatty acid of soybean seeds grown under drought stress. *Microbiological Research*, 242, 12640. https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126640

Laharia, G.S, Varsha Apotikar, A.B., Age, P.A., Gite, P.A., & Deshmukh, D.P. (2019). Effect of phosphorus levels with PSB on yield, nutrient use efficiency and uptake of nutrients by chickpea. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(3), 3182-3185.

Liu, W., Xu, X., Wu, X., Yang, Q., Luo, Y., & Christie, P. (2006). Decomposition of silicate minerals by Bacillus mucilaginosus in liquid culture. Environ. *Geochemistry and Health*, 28, 133-140. https://doi.org/10.1007/s10653-005-9022-0

Meena, R.S., Vijayakumar, V., Yadav, G.S., & Mitran, T. (2018). Response and interaction of *Bradyrhizobium japonicum* and arbuscular mycorrhizal fungi in the soybean rhizosphere. *Plant Growth Regulation*, 84, 207–223. https://doi.org/10.1007/s10725-017-0334-8

Mirzashahi, K., Moayeri, M., & Nourgholipour, F. 2021. Yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars in response to phosphorus application and its efficiency indices. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 18(4), 48-77. https://doi.org/10.22067/jcesc.2021.37185.0 [In Persian].

Mirzakhani, M., & Sajdi, N.A. (2015). Evaluation of the application of biological and chemical fertilizers on the efficiency of fertilizer use, yield and yield components of sunflower. *Journal of agricultural knowledge and sustainable production*, 25(1), 139-153. [In Persian].

Ngosong, C., Tatah, B.N., Olougou, M.N.E., Suh, C., Nkongho, R.N., Ngone, M.A., Achiri, D.T., Tchakounté, G.V.T., & Ruppel, S. (2022) Inoculating plant growth-promoting bacteria and arbuscular mycorrhiza fungi modulates rhizosphere acid phosphatase and nodulation activities and enhance the productivity of soybean (*Glycine max*). *Frontiers in Plant Science*, 13, 934339. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.934339

Nogueira, M.A., Nehls, U., Hampp, R., Poralla, K., & Cardoso, E.J.B.N. (2007). Mycorrhiza and soil bacteria influence extractable iron and manganese in soil and uptake by soybean. *Plant and Soil*, 298, 273–284. https://doi.org/10.1007/s11104-007-9379-1

Paterson, E., Sim, A., Davidson, J., & Daniell, T.J. (2016). Arbuscular mycorrhizal hyphae promote priming of native soil organic matter mineralization. *Plant and Soil*, 408(1-2), 243-254. https://doi.org/10.1007/s11104-016-2928-8

Prasad, K. (2021). Effect of dual Inoculation of Arbuscular Mycorrhiza fungus and cultivar specific *Bradyrhizobium Japonnicum* on the growth, yield, chlorophyll, nitrogen and phosphorus contents of soybean (*Glycine Max* (L.) Merrill.) grown on Alluvial soil. *Journal of Innovation in Applied Research*, 4(2), 7-16.

Rezvani M., Afshang, B., Gholizadeh, A. & Zaefarian, F. (2011). Evaluation of mycorrhizal fungus and phosphate rock effectiveness on growth and uptake of phosphorous in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 1(2), 97-118. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23221267.1390.1.2.6.1 [In Persian].

Saboor, A., Ali, M.A., Husain, Sh., Tahir, M.S., Irfan, M., Bilal, M., Baig, K., Datta, R., Ahmed, N., Danish, S., & Glick, B.R. (2021). Regulation of phosphorus and zinc uptake in relation to arbuscular mycorrhizal fungi for better maize growth. *Agronomy*, 11(11), 1-15. https://doi.org/10.3390/agronomy11112322

Saleih, S.H., Hamd, S.A.M., & Dagash, Y.M.I. (2015). The Effects of Rhizobium, Mycorrhizal Inoculations and Diammonium Phosphate (DAP) on Nodulation, Growth, and Yield of Soybean. *Universal Journal of Agricultural Research*, 3(1), 11-14. https://doi.org/10.13189/ujar.2015.030103

Sheoran, P., Sardana, N., Kumar, A., Mann, A., & Sharma, P. (2016). Agronomic and physiological assessment of nitrogen use, uptake and acquisition in sunflower. *International Journal of Plant Production*, 10(2), 109-122. https://doi.org/10.22069/ijpp.2016.2783 [In Persian].

Shiri Janqrd, M., & Raei, Y. (2014). Effect of growth-promoting bacteria on soybean nodulation and its oil and protein yields. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 24(1), 69-84. [In Persian]

Shojaeian kish, F., Yadavi, A., Movahhedi Dehnavi, M., Salehi, A., & Hamidian, M. (2021). Improvement of physiological characteristics and nutrient uptake of linseed (*Linum usitatissimum*) with biofertilizers application under irrigation withholding at different growth stages. *Plant process and function*, 1(44), 265-282. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1400.10.44.9.5 [In Persian].

Shome, S., Barman, A., & Solaiman, M. (2022). Rhizobium and phosphate solubilizing bacteria influence the soil nutrient availability, growth, yield, and quality of soybean. *Agriculture*, 12, 1-18. https://doi.org/10.3390/agriculture12081136

Soltanian, M., Tadayyon, A., & Falah, S. (2015). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on some vegetative traits and yield of linseed under water deficit stress conditions. *Journal of Crops Improvement (Journal of Agriculture*), 17, 621-634. https://doi.org/10.22059/jci.2015.54374 [In Persian].

Suryantini. S., & Rahmiana, A.A. (2021). Effectiveness of plant growth promoting microrganism as biofertilizer for soybeans under oil palm plantations on tidal land. *IOP conf. series: earth and environmental science*, 743, 1-10. https://doi.org/10.1088/1755-1315/743/1/012022

Wei, Y., Zhao, Y., Fan, Y., Lu, Q., Li, T., & Wei, T. (2017). Impact of phosphate solubilizing bacteria inoculation methods on phosphorus transformation and long-term utilization in composting. *Bioresource Technology*, 241, 134-41. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.099

Yadav, A.N., Verma, P., Kaushik, R., Dhaliwal, S.H., & Saxena, S.K. (2017). Archaea endowed with plant growth promoting attributes. *EC Microbiology journal*, 8, 294–298.