University of Tehran Press

Iranian Journal of Field Crop Science

Online ISSN: 2423-8082

Homepage:https://ijfcs.ut.ac.ir/

Evaluation of the Macronutrients Uptake and Phosphorus Efficiency Traits of Rapeseed (*Brassica napus*) under Phosphorus Fertilizer Management

Mozhgan Sadeghi[1]| Mohsen Movahhedi Dehnavi[2]✉| Alireza Yadavi[3] | Fatemeh Ebrahimi[4]

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran.
2. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran. E-mail: movahhedi1354@yu.ac.ir
3. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran. E-mail: yadavi@yu.ac.ir
4. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: October 31, 2023
Received in revised form: December 16, 2023
Accepted: January 02, 2024
Published online: June 21, 2024

Keywords:
Biofertilizer,
canola,
phosphorus fertilizer,
remobilization,
yield.

ABSTRACT

Uptake and use efficiencies of phosphorus and some other nutrients affected by rate of phosphorus fertilizer and bio-fertilizers application. This experiment carried out to evaluate the effect of chemical and biological phosphorus fertilizers on the phosphorus uptake and use efficiency in rapeseed in a factorial based on a randomized complete block design with three replications at the research station of the Faculty of Agriculture, Yasouj University, in 2019. The first factor included zero, 25, 50, 75, 100, and 125 kg ha^{-1} of phosphorus and the second factor included phosphorus biofertilizer containing *Pseudomonas* and its non-use. Phosphorous increased the uptake of nitrogen, phosphorus, and potassium. The highest yield was obtained from 125 kg of phosphorus and phosphorus biofertilizer. With the consumption of 125 kg of phosphorus and biofertilizer, the highest phosphorus use efficiency and remobilization was achieved. The highest phosphorus harvest index was obtained from the applying 50 kg of phosphorus and no biofertilizer, and the highest phosphorus utilization efficiency was obtained from the applying 50 kg of phosphorus along with biofertilizer. Generally, using biofertilizer with phosphorus increased nutrients uptake and seed yield. In traits such as grain yield, grain and shoot phosphorus content, there was no significant difference between the application of 50 kg of phosphorus + bacteria with the application of higher levels of phosphorus fertilizer alone, therefore, biological fertilizer can be substituted a significant part of chemical phosphorus fertilizer.

Cite this article: Sadeghi, M., Movahhedi Dehnavi, M., Yadavi, A., & Ebrahimi, F. (2024). Evaluation of the macronutrients uptake and phosphorus efficiency traits of rapeseed (*Brassica napus*) under phosphorus fertilizer management. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *55*(2), 123-139. DOI: 10.22059/ijfcs.2024.367378.655038.

© The Authors.
Publisher: University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/ijfcs.2024.367378.655038.

انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شاپا الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

Homepage:https://ijfcs.ut.ac.ir/

ارزیابی جذب عناصر غذایی پرمصرف و شاخص‌های کارایی فسفر در کلزا (*Brassica napus*) تحت تأثیر مدیریت کود فسفره

مژگان صادقی[۱] | محسن موحدی‌دهنوی[۲]✉ | علیرضا یدوی[۳] | فاطمه ابراهیمی[۴]

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

۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: movahhedi1354@yu.ac.ir

۳. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: yadavi@yu.ac.ir

۴. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:
انتقال مجدد،
عملکرد،
کلزا،
کود زیستی،
کود فسفر.

چکیده

کارایی جذب و مصرف فسفر و سایر عناصر غذایی تحت تأثیر میزان مصرف کود فسفره و کاربرد کودهای زیستی قرار می گیرد. این پژوهش با هدف ارزیابی اثر کودهای شیمیایی و زیستی فسفره بر جذب عناصر و شاخص‌های کارایی فسفر در کلزا، به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، در سال ۱۳۹۹ انجام شد. عامل اول شامل صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، و ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار فسفر خالص و عامل دوم شامل کود زیستی فسفره حاوی باکتری سودوموناس و عدم کاربرد آن بودند. کود فسفره موجب افزایش جذب نیتروژن، فسفر، و پتاسیم شد. بیشترین عملکرد دانه از ۱۲۵ کیلوگرم کود فسفره و زیستی فسفره به‌دست آمد. با مصرف ۱۲۵ کیلوگرم فسفر و کاربرد کود زیستی بیشترین کارایی جذب و انتقال مجدد فسفر حاصل شد. بیشترین شاخص برداشت فسفر از تیمار کاربرد ۵۰ کیلوگرم فسفر و عدم کاربرد کود زیستی و بیشترین شاخص کارایی مصرف فسفر از تیمار کاربرد ۵۰ کیلوگرم فسفر به‌همراه کود زیستی حاصل شد. به‌طور کلی، مصرف کود زیستی همراه کود شیمیایی فسفره موجب افزایش جذب عناصر و عملکرد دانه شد. نتایج نشان داد در صفاتی چون عملکرد دانه، درصد فسفر دانه و اندام هوایی تفاوت معنی‌داری بین کاربرد ۵۰ کیلوگرم کود فسفره+ باکتری با کاربرد سطوح بالاتر کود فسفره به‌تنهایی وجود نداشت، بنابراین کود زیستی می‌تواند جایگزین بخشی قابل توجهی از کود شیمیایی فسفره شود.

استناد: صادقی، م.، موحدی‌دهنوی، م.، یدوی، ع.، و ابراهیمی، ف. (۱۴۰۳). ارزیابی جذب عناصر غذایی پرمصرف و شاخص‌های کارایی فسفر در کلزا (*Brassica napus*) تحت تأثیر مدیریت کود فسفره. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۵(۲)، ۱۲۳-۱۳۹.
Doi: 10.22059/ijfcs.2024.367378.655038

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان

۱. مقدمه

کلزا (*Brassica napus* L.) یکی از گیاهان دانه روغنی یکساله مهم از خانواده Brassicaceae با محتوای روغن دانه زیاد (۴۰ تا ۴۵ درصد) است. روغن کلزا، به‌دلیل دارا بودن اسیدهای چرب اشباع پایین و اسیدهای چرب غیر اشباع بالا، مکمل غذایی بسیار باارزشی برای انسان به‌شمار می‌رود. کلزا از نظر پروتئین نیز گیاه باارزشی است و در تغذیه انسان اهمیت دارد (Chen *et al*., 2023). سطح زیر کشت این گیاه در جهان ۲۴ میلیون هکتار، در ایران ۱۱۱۲۳۵ هکتار (Fao, 2022) و براساس آمار غیر رسمی در استان کهگیلویه و بویراحمد ۵۳۰ هکتار می‌باشد. گیاه کلزا نسبت به عناصر معدنی خاک توقع بالایی دارد و وجود تعادل عناصر غذایی، برای به حداکثر رسیدن عملکرد دانه و روغن ضروری می‌باشد (Shaaban *et al*., 2023). از مؤلفه‌های اساسی افزایش عملکرد کلزا، مصرف بیشتر نهاده‌ها به‌ویژه کودهای شیمیایی است (Li *et al*., 2023).

فسفر پس از نیتروژن مهم‌ترین عنصر از نظر تغذیه گیاه بوده و غلظت آن در گیاه کلزا در مراحل شروع ساقه‌دهی تا قبل از گلدهی بین ۰/۳۵ تا ۰/۷ درصد متفاوت می‌باشد و نیاز کلزا به فسفر بیشتر از گیاه گندم است (Zhang *et al*., 2023). پایین‌بودن سطح حاصلخیزی خاک به‌ویژه کمبود فسفر، از عوامل محدودکننده عملکرد کلزا می‌باشد و کاربرد آن در مراحل اولیه رشد این محصول حیاتی است (Olama *et al*., 2014). پس از آنکه فسفر توسط گیاه جذب می‌شود، نقش بارزی در فرآیند تولید و انتقال انرژی ایفا می‌کند و برای ساختن ترکیبات مختلفی از جمله نوکلئوتیدها، فسفولیپیدها، قندهای فسفردار و سایر ترکیبات فسفردار جهت انجام فعالیت فیزیولوژیکی گیاه استفاده می‌شود (Taiz *et al*., 2015). در پژوهشی بیشترین مقادیر عنصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم گیاه کلزا در دانه در تیمار کودی کاربرد ۶۰ کیلوگرم فسفر در هکتار مشاهده شد (Shao *et al*., 2023). نتایج پژوهشی نشان داد که با مصرف کود شیمیایی سوپرفسفات تریپل به مقادیر ۳۰، ۶۰ و ۹۰ کیلوگرم در هکتار میزان کارایی جذب فسفر، شاخص برداشت فسفر و انتقال مجدد فسفر در گیاه کلزا در مقایسه با عدم مصرف کود فسفره افزایش یافت (Imran & Al Tawaha, 2022). در تحقیقی مشاهده شد کارایی زراعی و کارایی جذب فسفر در کاملینا در شرایط کاربرد کود فسفره افزایش یافت که بیشترین این صفات به‌ترتیب با میانگین ۱۹/۴۸ کیلوگرم بر کیلوگرم و ۴۲/۰۲ درصد از کاربرد کود شیمیایی فسفر به همراه کود زیستی حاصل شد (حسنی و همکاران، ۱۴۰۰). در یک پژوهش روی گیاه سیب‌زمینی مشخص شد غلظت فسفر گیاه با سطوح مختلف کود فسفره همبستگی مثبت و بالایی دارد و غلظت فسفر در گیاه در تمامی سطوح کاربرد فسفر نسبت به تیمار بدون استفاده از فسفر افزایش معنی‌داری داشت (Sattarzadeh *et al*., 2023).

به علت شیمی پیچیده عنصر فسفر در خاک، حدوداً ۱۵ تا ۳۰ درصد از فسفر استفاده‌شده در خاک مورد استفاده گیاه قرار می‌گیرد و بقیه آن در خاک تثبیت شده و به شکل غیر قابل دسترس گیاه تجمع می‌یابد (Rashidi *et al*., 2017). از این رو مدیریت مناسب کودهای فسفره برای رسیدن به محصول بهینه بسیار مهم می‌باشد (Safari Arabi *et al*., 2017). کمبود غلظت فسفات‌های قابل جذب خاک‌های زراعی معمولاً باعث می‌شود تا به‌رغم وجود فسفر نامحلول فراوان در خاک مجدداً برای رفع کمبود فسفر مورد نیاز گیاهان، این عنصر به صورت کودهای شیمیایی فسفردار به خاک اضافه شود (Iqbal *et al*., 2023). تعدادی از باکتری‌های خاکزی که عمدتاً از انواع باسیلوس و سودوموناس‌ها می‌باشند قادر هستند به کمک تغییر میزان اسیدیته اطراف خود و نیز به کمک فرآیندهای آنزیمی و فسفاتاز، فسفر نامحلول را به صورت اسیدهای آلی فسفردار و فسفر سبک و محلول درآورند و تحرک این عنصر را در خاک افزایش دهند (Sattarzadeh *et al*., 2023).

Beaicknejad Daroonkolaei *et al*. (2022) اظهار داشتند که تلقیح گیاه کلزا با باکتری فسفات بارور ۲ می‌تواند با تبدیل فسفر نامحلول در خاک به فرم فسفر قابل مصرف، درصد فسفر در اندام هوایی و دانه را افزایش دهد. در تحقیقی Safari *et al*. (2023) نشان دادند می‌توان با کاربرد تلفیقی کودهای زیستی نیتروکسین و فسفاته بارور۱ از طریق افزایش درصد عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجب افزایش عملکرد دانه گیاه کلزا نسبت به شاهد شد. محققان گزارش کردند استفاده از کودهای زیستی فسفره به‌دلیل افزایش توسعه ریشه و افزایش جذب فسفر سبب افزایش انتقال مجدد فسفر و کارایی جذب فسفر می‌شود (Daneshvar & Khojajnejad, 2014). Mamnabi *et al*. (2020) مشاهده کردند بیشترین درصد نیتروژن در گیاه کلزا در تیمار کاربرد PGPR حاصل شد. در پژوهشی با مقایسه تأثیر کود زیستی و سطوح مختلف فسفر بر غلظت پتاسیم در مراحل مختلف گیاه

معلوم شد که بیشترین غلظت پتاسیم مربوط به تیمارهایی با بالاترین پتانسیل انحلال فسفر بود و در واقع این نتایج نشان از تأثیر مثبت حل‌کننده‌های فسفات بر جذب پتاسیم است (Shao *et al*., 2023). میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات می‌توانند با تولید پروتون، سیدروفورها و تشکیل کمپلکس با کاتیون‌های فلزی در رهاسازی پتاسیم از کانی‌ها مؤثر باشند. کودهای زیستی علاوه‌بر در دسترس قراردادن نیتروژن و فسفر مورد نیاز گیاه، از طریق افزایش رشد رویشی گیاه و به دنبال آن توسعه ریشه باعث بهبود جذب و افزایش فراهمی پتاسیم می‌شوند (Safari *et al*., 2023).

با توجه به موارد اشاره‌شده، به‌نظر می‌رسد جهت افزایش کارآیی جذب فسفر در زراعت کلزا، لازم است تا مدیریت تغذیه به شکلی باشد تا در استفاده از فسفر جذب‌شده مؤثرتر عمل کنند. به‌علاوه در سال‌های اخیر مشکلات و نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی در اراضی کشاورزی در سطح جهانی نیز شناخته شده است. کاربرد کودهای زیستی فسفره در کشت کلزا شاید بتواند جایگزین مناسبی برای بخشی از کود شیمیایی فسفره مصرفی باشد و بتواند اثرات منفی کاربرد بی‌رویه کود شیمیایی را کاهش دهد. یکی از مهم‌ترین اهداف این پژوهش تعیین کارایی کود زیستی فسفره در توانایی تبدیل فسفر غیر محلول به محلول و افزایش شاخص‌های کارایی فسفر در زراعت کلزا می‌باشد. بنابراین تحقیق حاضر، جهت ارزیابی جذب عناصر غذایی پرمصرف و شاخص‌های کارایی فسفر کلزا تحت تأثیر مدیریت کود فسفره انجام گرفت.

۲. روش‌شناسی پژوهش

تحقیق حاضر در سال زراعی ۴۰۰-۱۳۹۹ در منطقه دشتروم واقع در۱۰ کیلومتری شهرستان بویراحمد از استان کهگیلویه و بویراحمد با مختصات جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۴ دقیقه عرض شمالی، ۵۱ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی با ارتفاع ۲۰۹۵ متر از سطح دریا انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اول کود فسفره در شش سطح (صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، و ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار فسفر خالص از منبع سوپرفسفات تریپل) و عامل دوم شامل کود زیستی فسفره حاوی باکتری سودوموناس در دو سطح (کاربرد و عدم کاربرد) بودند. رقم مورد استفاده در این پژوهش رقم نپتون، از ارقام زمستانه و قابل کشت در مناطق معتدل سرد و سرد می‌باشد. در مرحله آماده‌سازی زمین پیش از کاشت، نمونه‌های مرکب از خاک مزرعه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری به‌صورت تصادفی تهیه شد. طبق نتایج آزمون خاک، میزان فسفر ۱۲ و پتاسیم ۱۳۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ماده آلی ۰/۹ درصد و اسیدیته ۷/۲۳ بود.

هر کرت آزمایش دارای طول سه و عرض ۱/۸ متر و شامل سه پشته و به فاصله ۶۰ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف پنج سانتی‌متر بود. روی هر پشته دو ردیف کشت صورت گرفت. بین هر دو کرت یک پشته نکاشت در نظر گرفته شد. میزان کود سوپرفسفات تریپل بر اساس سطوح مشخص‌شده در تیمارها توزیع شد. کود فسفره با ایجاد یک شیار در وسط ردیف در عمق ۱۰ سانتی‌متری اعمال شد. همچنین کود سولفات پتاسیم (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) همراه با کود فسفره در شیار ایجادشده اعمال شد. کود نیتروژنه (۴۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره) در سه مرحله به صورت سرک همراه با آب آبیاری اعمال شد. یک‌سوم آن در هنگام آبیاری سوم و یک‌سوم آن در هنگام شروع ساقه‌دهی و یک‌سوم دیگر در هنگام شروع غلاف‌دهی اعمال شد. برای استفاده از باکتری، بذرها به مایه تلقیح باکتری سودوموناس با جمعیت $10^{7}\times$ CFU/ml، تهیه‌شده از شرکت فن‌آوری زیستی طبیعت‌گرا، آغشته و کشت انجام شد. اولین آبیاری بعد از کاشت صورت گرفت. دومین آبیاری جهت تسریع در سبز شدن دو روز بعد از کاشت انجام شد. پس از آن آبیاری بر اساس نیاز گیاه، درجه حرارت و شرایط جوی انجام شد. عملیات دفع علف‌های هرز به صورت وجین دستی سه مرتبه در طی مراحل مختلف رشد گیاه انجام گرفت.

اندازه‌گیری عناصر غذایی پرمصرف (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) در دو مرحله غلاف‌بندی و رسیدگی فیزیولوژیک (در این مرحله به‌صورت نمونه‌برداری جداگانه از کاه و کلش و دانه) انجام شد. برای اندازه‌گیری نیتروژن از روش Novozamsky *et al*. (1974) استفاده شد. درصد فسفر با استفاده از روش Emami (1996) اندازه‌گیری شد. سنجش درصد پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر انجام شد. برای تعیین عملکرد دانه دو متر مربع از هر واحد آزمایشی با رعایت اثر حاشیه‌ای برداشت

شد. محاسبه شاخص‌های مختلف کارآیی فسفر از جمله کارآیی مصرف فسفر، کارآیی جذب فسفر، شاخص برداشت فسفر و انتقال مجدد فسفر به صورت ذیل انجام شد (Seyyedi *et al*. 2015):

$$PHI = \frac{Wg}{Pt} \times 100$$

در این رابطه PHI شاخص برداشت فسفر بر حسب درصد، Wg: مقدار فسفر جذب‌شده در دانه و Pt: مقدار فسفر جذب‌شده توسط گیاه بر حسب کیلوگرم در هکتار می‌باشد.

$$P_{uPt}E = \frac{Pt}{Pf} \times 100$$

P_{UpE} کارآیی جذب فسفر (کیلوگرم بر کیلوگرم)؛ Pt: کل فسفر جذب‌شده توسط دانه (کیلوگرم) و Pf: مقدار فسفر مصرف‌شده به صورت کود (کیلوگرم) می‌باشد.

$$PUE = \frac{Yg}{Pf}$$

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

$$PR = P_{ant} - P_{mat}$$

P_{ant} مقدار فسفر در ماده خشک در مرحله شروع پر شدن دانه (گرم در متر مربع)، P_{mat} مقدار فسفر در ماده خشک گیاهی در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک است. در نهایت تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS انجام شد. مقایسه میانگین‌ها به‌روش LSD در سطح پنج درصد انجام شد. جهت رسم شکل‌های مربوطه از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

۳. نتایج پژوهش و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد تیمارهای کود فسفره و کود زیستی و برهمکنش آن‌ها در سطح احتمال خطای یک درصد بر درصد نیتروژن در مرحله غلاف‌بندی، درصد نیتروژن دانه، درصد فسفر در مرحله غلاف‌بندی، درصد فسفر کاه و کلش، درصد فسفر دانه، درصد پتاسیم کاه و کلش، درصد پتاسیم دانه، عملکرد دانه، کارآیی جذب فسفر، کارآیی مصرف فسفر، شاخص برداشت فسفر و انتقال مجدد فسفر در کلزا معنی‌دار شد و بر درصد نیتروژن کاه و کلش در سطح احتمال خطای پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۱).

۳-۱. محتوای نیتروژن اندام هوایی در مرحله غلاف‌بندی

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد در هر دو سطح کاربرد و عدم کاربرد کود زیستی، کود فسفره موجب افزایش درصد نیتروژن در گیاه کلزا شد که این افزایش در شرایط کاربرد کود زیستی معنی‌دار بود. بیشترین درصد نیتروژن (۲/۸۱ درصد) از سطح کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفره به‌همراه کود زیستی حاصل شد و کم‌ترین آن (۰/۲۴ درصد) نیز در سطح عدم کاربرد کود فسفره و کود زیستی حاصل شد (شکل ۱-الف).

۳-۲. محتوای نیتروژن کاه و کلش

مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف کود فسفره و کود زیستی بر میزان نیتروژن کاه و کلش کلزا نشان داد که با افزایش میزان کود فسفره، میزان نیتروژن کاه و کلش نیز افزایش یافت و کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم کود فسفره در هکتار به‌همراه کود زیستی دارای بیشترین درصد نیتروژن (۳/۹۳ درصد) بود. همچنین کمترین درصد نیتروژن (۰/۴۶ درصد) نیز مربوط به تیمار عدم کاربرد کود زیستی و کود فسفره بود که با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری نشان داد (شکل ۱-ب).

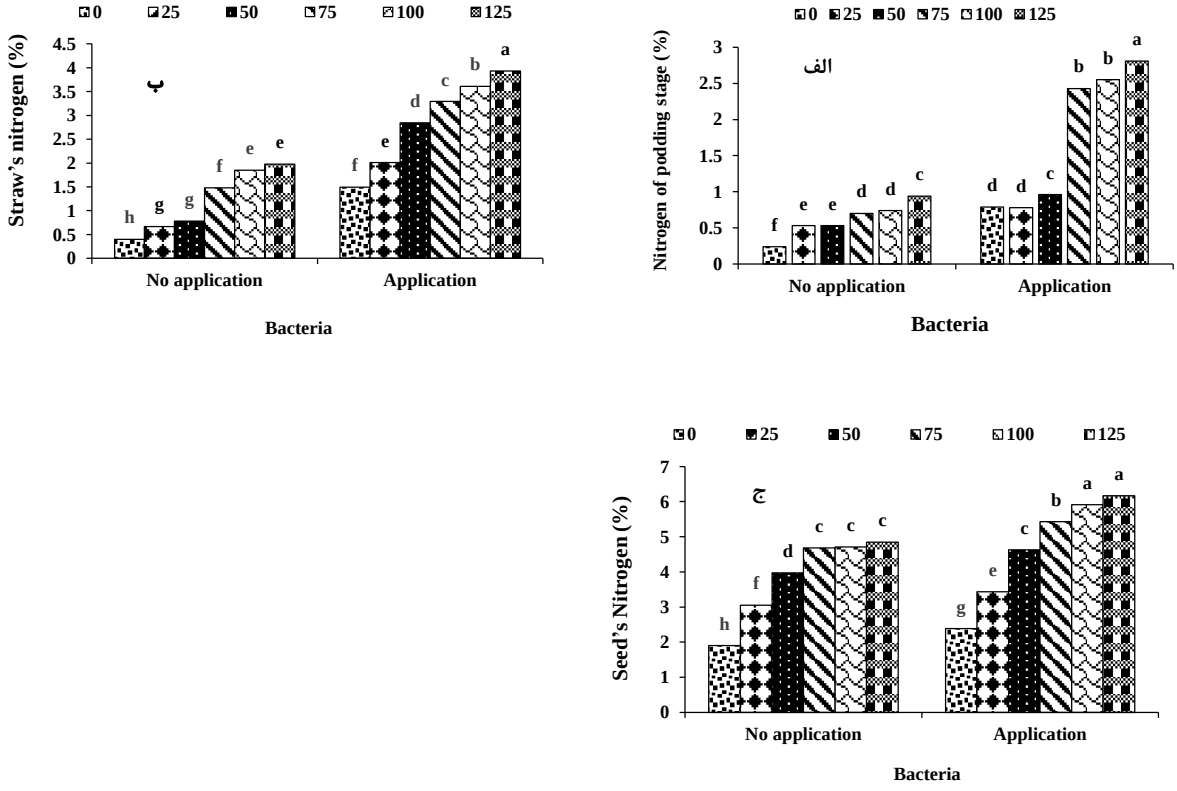
۳-۳. محتوای نیتروژن دانه

مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیشترین درصد نیتروژن دانه (۶/۱۷ درصد) متعلق به تیمار ۱۲۵ کیلوگرم کود فسفره در هکتار به‌همراه کاربرد کود زیستی بود که با تیمار ۱۰۰ کیلوگرم کود فسفره به‌همراه کاربرد کود زیستی اختلاف معنی‌داری نشان نداد. همچنین کمترین درصد نیتروژن دانه کلزا (۱/۹ درصد) متعلق به تیمار عدم کاربرد کود فسفره و کود زیستی بود که با تیمار ۱۲۵ کیلوگرم کود فسفره در هکتار به‌همراه کاربرد کود زیستی اختلاف ۶۹/۲۰ درصدی نشان دادند. نتایج حاکی از آن بود که بین تیمارهای ۵۰ کیلوگرم کود فسفره به‌همراه کاربرد کود زیستی و سطوح ۱۲۵، ۱۰۰ و ۷۵ کیلوگرم کود فسفر در هکتار در شرایط عدم کاربرد کود

زیستی از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. بنابراین می‌توان بیان کرد که با کاربرد ۵۰ کیلوگرم کود فسفره در هکتار به‌همراه کود زیستی می‌توان به نتایجی برابر و یا نزدیک به کاربرد ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ کیلوگرم کود فسفره در هکتار دست یافت (شکل ۱–ج).

Chen *et al.* (2023) بیان کردند افزایش میزان نیتروژن در گیاهان می‌تواند به‌دلیل تأثیر مثبت میزان دسترسی به فسفر در جذب و انتقال نیتروژن به گیاه باشد و هرچه گیاه دسترسی بیشتری به فسفر داشته باشد نیتروژن بیشتری نیز به گیاه منتقل می‌شود. همچنین بیان شده است که با افزایش مصرف کود شیمیایی فسفره، نیتروژن اندام هوایی گیاه آفتابگردان افزایش یافته که از طریق بهبود فتوسنتز، ترکیبات نیتروژنه بیشتری به بذر منتقل شده و همچنین بخشی از این نیتروژن افزوده‌شده به برگ از طریق انتقال مجدد می‌تواند به بذر منتقل شده و باعث افزایش درصد نیتروژن در بذر شود (Yadavi & Yuosepur, 2015). نتایج این پژوهش با تحقیق Rashidi *et al.* (2017) روی گیاه ماش همسو بود. آن‌ها بیان کردند که افزایش میزان نیتروژن دانه می‌تواند به‌دلیل تأثیر مثبت میزان دسترسی به فسفر در جذب و انتقال نیتروژن به گیاه باشد. می‌توان اظهار داشت که مصرف کود فسفره از طریق بهبود وضعیت رشد ریشه و افزایش فراهم‌کردن سطح جذب، موجب جذب کارآمد عناصر غذایی نظیر نیتروژن در کلزا شده است.

PGPRها می‌توانند فعالیت برخی از آنزیم‌های مهم متابولیسم نیتروژن مانند نیترات‌ردوکتاز در اندام‌های گیاهی را تقویت کرده و از این طریق میزان نیتروژن را بهبود بخشند (Ansari & Ahmad, 2019). Ansari *et al.* (2015) بیان کردند کود زیستی حل‌کننده فسفات از طریق افزایش فعالیت باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و بهبود دسترسی به این عنصر در ریزوسفر، منجر به تأمین مطلوب نیتروژن مورد نیاز گیاه و در نتیجه افزایش غلظت آن در گیاهان می‌شود. Mamnabi *et al.* (2020) مشاهده کردند بیشترین درصد نیتروژن در گیاه کلزا در تیمار کاربرد PGPR حاصل شد.



شکل ۱. مقایسه میانگین برهمکنش کود فسفره و کود زیستی برای الف) درصد نیتروژن مرحله غلاف‌بندی، ب) درصد نیتروژن کاه و کلش، و ج) درصد نیتروژن دانه. ستون‌های با حداقل یک حرف مشترک تفاوت آماری معنی‌داری بر اساس روش LSD ندارند.

جدول ۱. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر کود فسفره و باکتری بر برخی صفات کلزا.

Source of variation	df	Nitrogen of podding stage	Straw's nitrogen	Seed's nitrogen	Phosphorus of podding stage	Straw's phosphorus	Seed's phosphorus	Potassium of podding stage	Straw's potassium	Seed's potassium	Grain yield
Replication	2	0.004^{ns}	0.07^{*}	0.005^{ns}	0.004^{ns}	0.02^{ns}	0.0001^{ns}	0.009^{ns}	0.04^{*}	0.01^{ns}	1360^{ns}
Phosphorus (A)	5	2.09^{**}	3.80^{**}	10.58^{**}	2.92^{**}	3.88^{**}	4.43^{**}	$0/48^{**}$	1.41^{**}	1.70^{**}	14949515^{**}
Bacteria (B)	1	11.00^{**}	25.06^{**}	5.75^{**}	0.74^{**}	5.27^{**}	6.86^{**}	$0/13^{**}$	0.85^{**}	1.04^{**}	21554771^{**}
B×A	5	0.88^{**}	0.21^{*}	0.22^{**}	0.04^{**}	0.20^{**}	0.09^{**}	$0/006^{ns}$	0.05^{**}	0.04^{**}	1063170^{**}
Error	24	0.005	0.01	0.03	0.004	0.009	0.008	0/009	0.005	0.008	16333
C.V. (%)		6.16	6.01	4.34	3.88	4.33	3.59	8/64	4.56	5.23	4.69

*و ** و ^{ns} به‌ترتیب نشانگر اختلاف آماری معنی‌داری در سطوح احتمال پنج، یک درصد و عدم اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشد.

۳–۴. درصد فسفر در مرحله غلاف‌بندی

کاربرد کود فسفره سبب افزایش درصد فسفر در مرحله غلاف‌بندی کلزا شد. با کاربرد کود زیستی این افزایش قابل توجه بود. بیشترین درصد فسفر مرحله غلاف‌بندی (۲/۵۸ درصد) مربوط به تیمار کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم فسفر به‌همراه کود زیستی بود که با تیمار کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم فسفره و عدم کاربرد کود زیستی اختلاف ۶/۹۷ درصدی نشان داد (شکل ۲–الف). کمترین درصد فسفر مرحله غلاف‌بندی (۰/۴۵ درصد) مربوط به تیمار عدم کاربرد کود فسفره و عدم کاربرد کود زیستی بود که با تیمار عدم کاربرد کود فسفره به‌همراه کاربرد کود زیستی اختلاف ۴۷/۰۵ درصدی نشان داد. همچنین نتایج نشان داد بین تیمار کاربرد ۷۵ کیلوگرم کود فسفره در هکتار به‌همراه کاربرد کود زیستی با تیمار کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم کود فسفره در هکتار و عدم کاربرد کود زیستی، همچنین بین کاربرد ۵۰ کیلوگرم کود فسفره در هکتار به همراه کاربرد کود زیستی با کاربرد ۷۵ کیلوگرم کود فسفره در هکتار و عدم کاربرد کود زیستی، همینطور بین کاربرد ۲۵ کیلوگرم کود فسفره در هکتار به‌همراه کاربرد کود زیستی و کاربرد ۵۰ کیلوگرم کود فسفره در هکتار و عدم کاربرد کود زیستی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد و این نتیجه نشان‌دهنده آن است که کاربرد کود زیستی به‌اندازه کاربرد ۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفره تأثیر مثبت داشته است (شکل ۲–الف).

۳–۵. درصد فسفر کاه و کلش

مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف کود فسفره و کود زیستی بر میزان فسفر کاه و کلش کلزا نشان داد که با افزایش میزان کود فسفره، درصد فسفر موجود در کاه و کلش نیز افزایش یافت و کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم کود فسفره در هکتار به‌همراه کود زیستی دارای بیشترین درصد فسفر (۳/۵۵ درصد) بود. همچنین کمترین درصد فسفر (۰/۶۳ درصد) نیز مربوط به تیمار عدم کاربرد کود فسفره و کود زیستی بود که با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری نشان داد. همچنین طبق نتایج، کاربرد کود زیستی در تمام سطوح کود فسفره، فسفر موجود در کاه و کلش را نسبت به بدون کاربرد کود زیستی به‌طور معنی‌داری افزایش داد. بین تیمارهای کاربرد ۵۰ کیلوگرم کود فسفره+ کاربرد کود زیستی و کاربرد ۱۰۰ و ۱۲۵ کیلوگرم کود فسفره+عدم کاربرد کود زیستی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۲–ب).

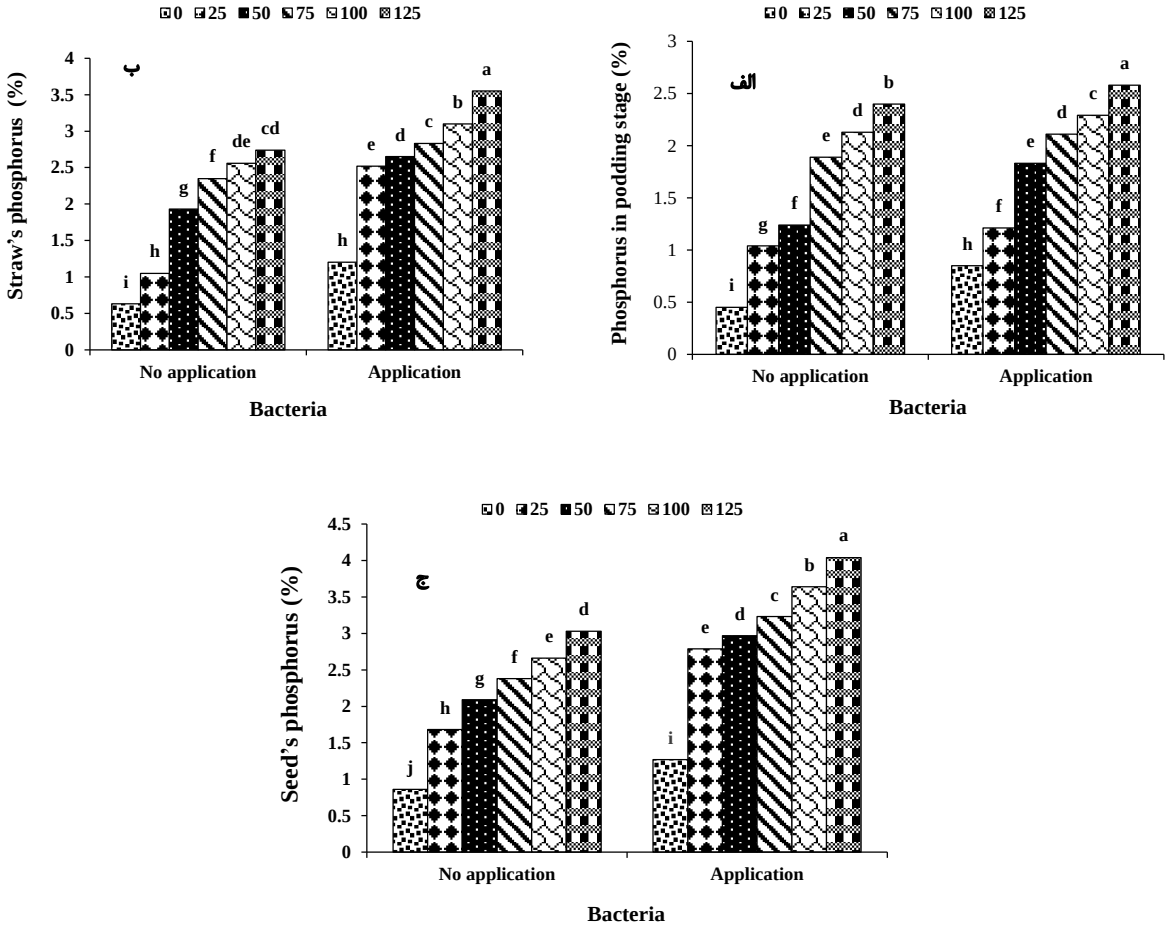
۳–۶. درصد فسفر دانه

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد در شرایط عدم کاربرد کود زیستی با افزایش سطوح فسفر، درصد فسفر دانه نیز افزایش یافت به‌گونه‌ای‌که بیشترین درصد فسفر دانه (۳/۰۳ درصد) در سطح کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم فسفره در هکتار به‌دست آمد که با سطح عدم کاربرد کود فسفره اختلاف ۲/۵ برابری نشان داد (شکل ۲–ج). نتایج مقایسه میانگین حاکی از آن بود که در شرایط کاربرد کود زیستی بیشترین درصد فسفر دانه (۴/۰۴ درصد) از کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم کود فسفره در هکتار حاصل شد که با سطح عدم کاربرد کود فسفره اختلاف ۲/۱ برابری مشاهده شد (شکل ۲–ج). طبق نتایج به‌دست‌آمده بین تیمارهای کاربرد ۵۰ کیلوگرم فسفر به‌همراه کاربرد کود زیستی و کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم فسفر در هکتار و عدم کاربرد کود زیستی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد.

فسفر عنصر غیر متحرک در خاک است و معمولاً سطح فسفر آزاد بسیار پایین است. دلیل این امر پیوند شدید یون‌های فسفات غیر آلی با کلوئیدهای خاک می‌باشد. همچنین تثبیت آن به فرم فسفات آهن یا فسفات آلومینیوم موجب عدم تحرک این عنصر می‌شود که انتقال فسفر به بخش‌های هوایی گیاه کاهش می‌یابد (Shaaban *et al*., 2023). نتایج پژوهش نشان داد که افزایش کوددهی فسفر باعث افزایش خطی درصد فسفر در مرحله غلاف‌بندی، فسفر کاه و کلش و فسفر دانه شد. در یک پژوهش بر گیاه سیب‌زمینی در همین راستا مشخص شد غلظت فسفر با سطوح مختلف کود فسفر همبستگی مثبت و بالایی دارد و غلظت فسفر در گیاه در تمامی سطوح کاربرد فسفر نسبت به تیمار بدون استفاده از فسفر اختلاف معنی‌داری داشت (Sattarzadeh *et al*., 2023).

افزایش جذب فسفر در گیاهان تلقیح‌شده با باکتری‌های حل‌کننده فسفات، به‌واسطه افزایش در تعداد مناطق جذب در واحد سطح ریشه و توانائی بیشتر این ریشه‌ها برای جذب فسفر می‌باشد؛ همچنین ذکر شده است که افزایش جذب فسفر در گیاهان همزیست می‌تواند به سبب افزایش ترشح متابولیت‌ها و اسیدهای آلی از این ریزجانداران باشد که در قابلیت انحلال فسفر غیر قابل جذب و افزایش جذب آن توسط گیاه میزبان بسیار مؤثر است (Caravaca *et al*., 2005). Kohler *et al*. (2008) گزارش دادند که تلقیح ریشه کاهو با PGPR باعث بهبود معنی‌دار فعالیت فسفاتاز در ریشه و تجمع فسفر در برگ‌ها می‌شود. بنابراین، افزایش فعالیت

فسفاتاز یکی از اصلی‌ترین سازوکارهای PGPR ها از جمله باکتری سودوموناس می‌باشد. همچنین افزایش مقدار فسفر توسط برخی ازPGPR ها مربوط به محلول‌سازی فسفر و افزایش جذب آن است (Yang *et al.*, 2009).



شکل ۲. مقایسه میانگین برهمکنش کود فسفره و کود زیستی برای الف) درصد فسفر در مرحله غلاف‌بندی، ب) درصد فسفر کاه و کلش، و ج) درصد فسفر دانه در کلزا. ستون‌های با حداقل یک حرف مشترک تفاوت آماری معنی‌داری بر اساس روش LSD ندارند.

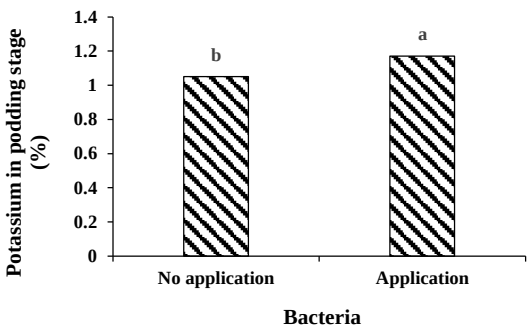
۳-۷. درصد پتاسیم در مرحله غلاف‌بندی

نتایج مقایسه میانگین نشان داد با کاربرد کود فسفره درصد پتاسیم در مرحله غلاف‌بندی افزایش یافت؛ به‌طوری‌که بیشترین درصد پتاسیم (۱/۶۰ درصد) از کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم فسفر در هکتار و کمترین آن (۰/۸۳ درصد) نیز از تیمار عدم کاربرد کود فسفره حاصل شد (شکل ۳). نتایج اثر کود زیستی بر درصد پتاسیم مرحله غلاف‌بندی نشان داد با کاربرد کود زیستی درصد پتاسیم نسبت به عدم کاربرد ۱۰/۲۵ درصد افزایش یافت (شکل ۴).

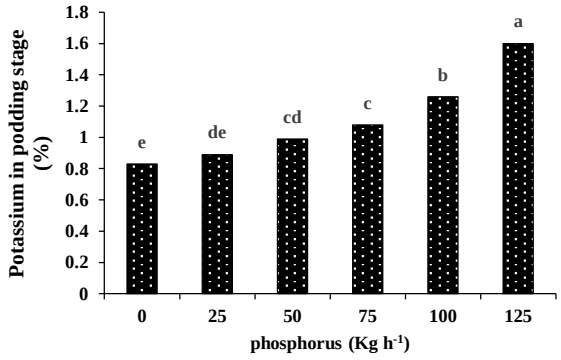
۳-۸. درصد پتاسیم کاه و کلش

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد در شرایط عدم کاربرد کود زیستی با افزایش سطوح فسفر، درصد پتاسیم کاه و کلش نیز افزایش یافت؛ به‌گونه‌ای‌که بیشترین درصد پتاسیم کاه و کلش (۱/۹۴ درصد) در سطح کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم فسفر در هکتار به‌دست آمد که با سطوح ۱۰۰، ۷۵، ۵۰، ۲۵ و صفر به‌ترتیب اختلاف ۷/۷۷، ۶/۲۵، ۵۳/۹۶، ۸۳/۰۱ درصدی و ۱/۱ برابری نشان داد (شکل ۵). همچنین نتایج مقایسه میانگین نشان داد در شرایط کاربرد کود زیستی بیشترین درصد پتاسیم کاه و کلش (۲/۵۹ درصد) از کاربرد

۱۲۵ کیلوگرم کود فسفره در هکتار حاصل شد که با سایر سطوح کاربرد کود فسفره اختلاف معنی‌داری نشان داد؛ به‌طوری‌که با سطوح ۱۰۰، ۷۵، ۵۰، ۲۵ و صفر به‌ترتیب اختلاف ۲۳/۹۲، ۴۸/۸۵، ۶۸/۱۸، ۱۰۸/۸۷ درصدی و ۱/۴ برابری مشاهده شد (شکل ۵).



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر کود زیستی برای درصد پتاسیم مرحله غلاف‌بندی در کلزا.

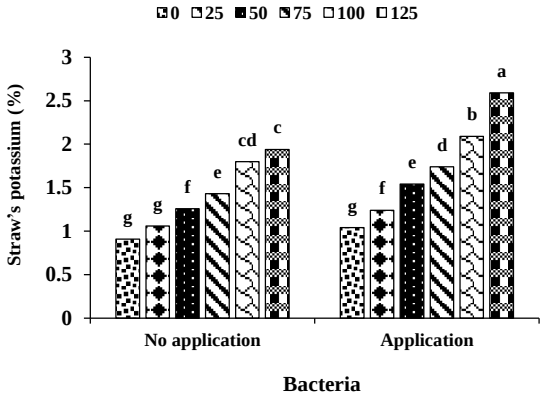


شکل ٤. مقایسه میانگین اثر کود فسفره برای درصد پتاسیم مرحله غلاف‌بندی در کلزا.

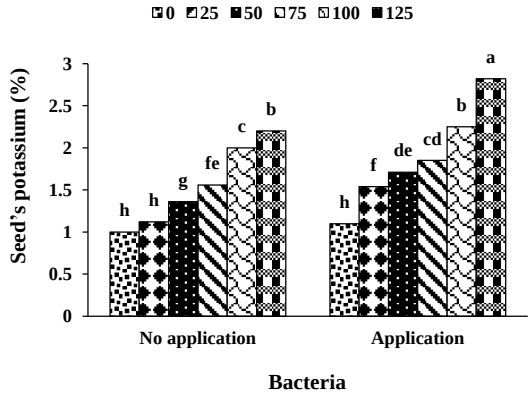
میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD با یکدیگر ندارند.

۳-۹. درصد پتاسیم دانه

مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف کود فسفره و کود زیستی بر میزان پتاسیم دانه کلزا نشان داد که با افزایش میزان کود فسفره، درصد پتاسیم موجود در دانه نیز افزایش یافت و کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم کود فسفره در هکتار به‌همراه کود زیستی دارای بیشترین درصد پتاسیم (۲/۸۲ درصد) بود. همچنین کمترین درصد پتاسیم (یک درصد) نیز مربوط به تیمار عدم کاربرد کود فسفره و کود زیستی بود (شکل ۶). افزایش مصرف فسفر با اثرگذاری روی رشد ریشه می‌تواند منجر به افزایش جذب عناصر غذایی همچون پتاسیم شود. سامانه ریشه‌ای عمیق برای استخراج آب و عناصر غذایی کافی بسیار حائز اهمیت است. ازآنجایی‌که فسفر نقش مهمی در افزایش رشد ریشه و استقرار خوب کلزا و ایجاد مقاومت در برابر تنش‌های محیطی دارد، این عنصر باعث افزایش ظرفیت تبادلی ریشه کلزا نیز شده و در نتیجه جذب پتاسیم را افزایش می‌دهد؛ بنابراین تماس بیشتر ریشه با خاک، از عامل‌های مهم برای جذب عناصر غذایی در خاک توسط گیاهان زراعی می‌باشد (Moosavi *et al*., 2022).



شکل ۵. مقایسه میانگین برهمکنش کود فسفره و کود زیستی برای درصد پتاسیم کاه و کلش در کلزا.



شکل ٦. مقایسه میانگین برهمکنش کود فسفره و کود زیستی برای درصد پتاسیم دانه در کلزا.

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD ندارند.

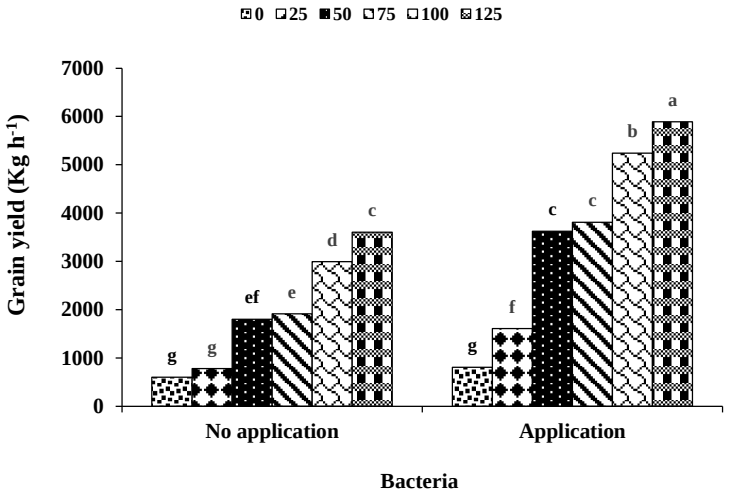
افزایش غلظت پتاسیم در تیمارهایی با بالاترین پتانسیل انحلال فسفر نشان از تأثیر مثبت حل‌کننده‌های فسفات بر جذب پتاسیم است (Shao *et al*., 2023). ظاهرا میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات توانسته‌اند در رهاسازی پتاسیم از کانی‌ها مؤثر باشند.

به‌علاوه کودهای زیستی از طریق افزایش رشد رویشی گیاه و به دنبال آن توسعه ریشه نیز باعث بهبود جذب و افزایش فراهمی پتاسیم می‌شوند (Safari *et al*., 2023). نتایج این آزمایش با نتایج تحقیقات Rashidi *et al*. (2017) روی گیاه ماش همسو بود.

۳-۱۰. عملکرد دانه

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد در شرایط کاربرد کود زیستی با افزایش سطوح فسفر، عملکرد دانه نیز افزایش یافت؛ به‌گونه‌ای‌که بیشترین عملکرد دانه (۵۸۸۷ کیلوگرم در هکتار) در تیمار کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم فسفر در هکتار به‌دست آمد که با تیمار عدم کاربرد کود فسفره اختلاف ۶/۲ برابری نشان داد (شکل ۷). نتایج مقایسه میانگین حاکی از آن بود که در شرایط عدم کاربرد کود زیستی بیشترین عملکرد دانه (۳۶۰۳/۱ کیلوگرم در هکتار) از تیمار کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم کود فسفره در هکتار حاصل شد که با سطح عدم کاربرد کود فسفره اختلاف ۴/۹ برابری مشاهده شد (شکل ۷).

افزایش مصرف کود فسفره به واسطه افزایش قدرت رویشی و زایشی گیاه، اجزای عملکرد و تولید بذر بیشتر موجب افزایش عملکرد دانه در کلزا می‌شود. همچنین می‌توان گفت که فسفر از عناصر ضروری غذایی است که باعث ذخیره و انتقال انرژی شیمیایی در گیاه، تسریع در رشد و رسیدگی محصول و افزایش گلدهی می‌شود، به‌همین دلیل تأثیر مستقیمی بر عملکرد دانه گیاه داشته و وجود آن به مقدار کافی و در حد نیاز جهت بالا بردن عملکرد دانه، ضروری است (Lafond *et al*., 2008). Heshmati *et al*. (2016) در بررسی تاثیر کود شیمیایی فسفره بر گلرنگ بهاره گزارش کردند کاربرد کود فسفره در سطح ۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل در هکتار باعث افزایش عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد شد. افزایش عملکرد دانه به‌واسطه افزایش مصرف فسفر در کلزا (Zhang *et al*., 2023) و ذرت (Tavajjoh *et al*., 2014) نیز گزارش شده است. قابلیت حل‌شدن فسفات‌های غیر قابل حل توسط ریزجانداران از طریق تولید اسیدهای آلی، کلات‌کردن اگزواسیدها از قندها و تبادل واکنش‌هایی در محیط رشد ریشه، از دیگر سازوکارهای این میکروارگانیزم‌ها در افزایش جذب عناصر غذایی و در نتیجه افزایش عملکرد دانه می‌باشد (Mirvat *et al*., 2015). همانند نتایج تحقیق حاضر Rezapour Koishahi *et al*. (2014) گزارش دادند بیشترین عملکرد دانه لوبیا قرمز محلی با کاربرد سویه ۱۶۸ باکتری حل‌کننده فسفات سودوموناس پوتیدا به‌دست آمد. کاربرد تیمارهای باکتری سودوموناس با افزایش جذب عناصر غذایی، افزایش ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی، تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در غلاف در نهایت موجب افزایش عملکرد دانه گیاه کلزا شد.



شکل ۷. مقایسه میانگین برهمکنش کود فسفره و کود زیستی برای عملکرد دانه در کلزا. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD با یکدیگر ندارند.

۳-۱۱. کارآیی جذب فسفر

برهم‌کنش کود فسفره و کود زیستی بر کارایی جذب فسفر معنی‌دار شد (جدول ۲). طبق نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها کمترین کارآیی جذب فسفر در سطح عدم مصرف فسفر و کود زیستی با ۰/۸۱ کیلوگرم در هکتار به دست آمد و با مصرف فسفر در سطح

۱۲۵ کیلوگرم در هکتار به‌همراه کاربرد کود زیستی بیشترین کارآیی جذب فسفر (۵/۰۷ درصد) به‌دست آمد. همچنین، نتایج حاکی از آن بود که در شرایط عدم کاربرد کود زیستی کارآیی جذب فسفر به‌صورت روند صعودی افزایش یافت؛ اما در شرایط کاربرد کود زیستی روند ابتدا تا سطح کاربرد ۵۰ کیلوگرم فسفر در هکتار صعودی بود و سپس در سطوح کاربرد ۷۵ و ۱۰۰ کیلوگرم فسفر در هکتار به صورت نزولی کاهش یافت و در نهایت در سطح کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم فسفر در هکتار افزایش یافت (شکل ۸).

به‌طور کلی، کارآیی جذب نشان‌دهنده توان گیاه در استفاده از فسفر پراکنده شده در محیط است (Mirzashahi & Noorgholipour, 2016). به‌عبارت دیگر کارآیی جذب فسفر، مقدار فسفر جذب‌شده توسط گیاه از واحد فسفر مصرفی است که از تقسیم کل فسفر جذب‌شده توسط دانه به مقدار فسفر مصرف‌شده به صورت کود به‌دست می‌آید. Hassani *et al.* (2020) بیان کردند که علت کارآیی متفاوت در جذب فسفر در شرایط کاربرد کود زیاد فسفره، تا حد زیادی ناشی از تفاوت در عملکرد دانه تولیدی تحت تأثیر مقادیر مختلف کود فسفر مصرفی می‌باشد که مستقیماً در جذب فسفر از خاک تأثیرگذار است. در نتیجه در این پژوهش اگرچه با افزایش کاربرد کود فسفره، عملکرد افزایش یافت؛ ولی توانایی گیاه در جذب فسفر هم راستا با افزایش در میزان مصرف کود نمی‌باشد. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند صفت کارایی جذب فسفر دانه نشان‌دهنده توانایی گیاه در جذب کودی است که در اختیار آن قرار می‌گیرد. بنابراین، علاوه‌بر اینکه کود مورد نظر به چه میزان در معرض آبشویی و هدرروی قرار گرفته است و یا اینکه به چه میزان با ذرات خاک تشکیل کمپلکس دهد، عواملی مثل نحوه گسترش سیستم ریشه‌ای گیاه در خاک، میزان فعالیت تارهای کشنده، رطوبت موجود در خاک، دمای خاک و pH آن می‌تواند از مهم‌ترین عوامل مؤثر در مقدار جذب فسفر باشند. به‌همین دلیل به‌نظر می‌رسد در شرایط عدم کاربرد باکتری سودوموناس با افزایش سطوح مصرفی کود فسفر، هم‌راستا با افزایش عملکرد دانه، گیاه توانسته است جذب فسفر را نیز افزایش دهد و در نهایت کارآیی جذب فسفر دانه افزایش یابد. Akhtar *et al.* (2009) نشان دادند که گیاه کلزا، تغییرات مورفولوژی (افزایش انشعابات‌ریشه، نسبت ریشه به شاخساره، طول مؤثر ریشه و تارهای کشنده) و فیزیولوژی ریشه (ترشح پروتون، آنیون‌های اسیدهای آلی و فسفاتازها) را برای جذب بیشتر فسفر و تولید زیست‌توده به‌کار بردند. در مطالعه Aziz *et al.* (2011) در شرایط کاربرد کود فسفره، کارآیی در جذب فسفر و تغییرات مورفولوژی ریشه و ترشحات ریشه دلیل افزایش کارآیی جذب فسفر دانه در ارقام کلزای مورد بررسی آن‌ها بود. باکتری‌های حل‌کننده فسفر نیز با اثرات مثبت خود و همچنین افزایش فعالیت‌های مختلف، کارآیی جذب فسفر دانه را افزایش می‌دهند (Shata *et al.*, 2007). Hynes *et al.* (2008) افزایش کارایی جذب فسفر در نخود و نخودفرنگی را تحت تأثیر مایه‌زنی با چند سویه از سودوموناس گزارش کردند.

جدول ۲. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر کود فسفره و زیستی بر کارایی جذب و کارایی مصرف در کلزا.

Source of variation	df	Phosphorus uptake efficiency	Phosphorus use efficiency
Replication	2	0.04	0.03
Phosphorus fertilizer (A)	4	4.20**	278.62**
Bacteria (B)	1	39.49**	5223.50**
B×A	4	1.33*	72.41*
Error	20	0.04	4.94
C.V. (%)		8.15	5.11

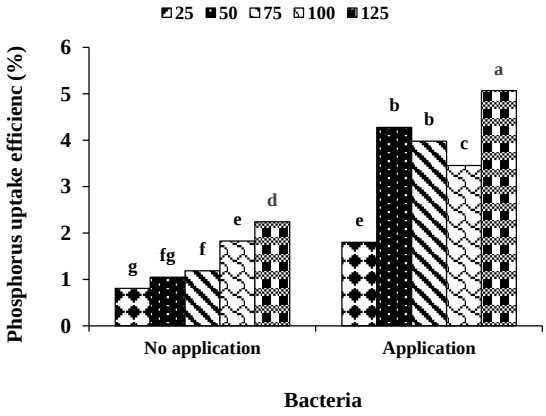
* و ** به‌ترتیب معنی‌داری در سطوح پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.

۱۲-۳. کارآیی مصرف فسفر

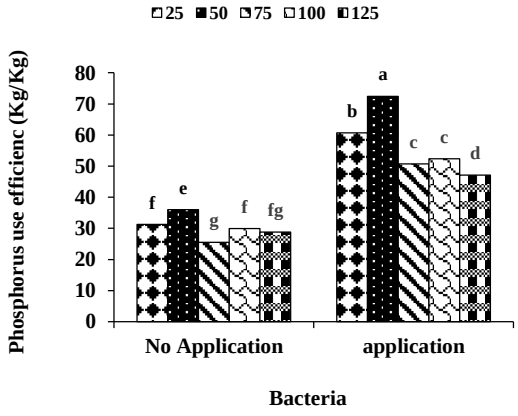
برهم‌کنش کود فسفره و کود زیستی بر کارایی مصرف فسفر معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد بیشترین کارآیی مصرف فسفر (۷۲/۴۷ کیلوگرم بر کیلوگرم) از تیمار کاربرد ۵۰ کیلوگرم فسفر در هکتار به‌همراه کود زیستی به‌دست آمد و کمترین آن نیز (۲۵/۴۹ کیلوگرم بر کیلوگرم) از تیمار کاربرد ۷۵ کیلوگرم فسفر در هکتار و عدم کاربرد زیستی به‌دست آمد (شکل

۹). این شاخص نشان می‌دهد گیاهانی که در غلظت‌های پایین فسفر بتوانند فعالیت‌های متابولیکی را در بافت‌ها و اندام‌های خود طوری تنظیم کنند که وزن خشک بالایی را به‌ازای واحد فسفر جذب‌شده تولید کنند، کارایی مصرف فسفر بالایی دارند. کاهش در کارآیی مصرف فسفر با افزایش مصرف آن در گیاهان زراعی مختلف مشاهده شده است. این واکنش گیاه بر اساس قانون بازده نزولی قابل توضیح است، ضمن اینکه به نظر می‌رسد یکی از دلایل کاهش کارآیی مصرف فسفر، فزونی سرعت ازدست‌رفتن عنصر مذکور در مقادیر بالای مصرف باشد. این کاهش می‌تواند تأکیدی بر این مسأله باشد که رابطه مصرف کود فسفر و افزایش عملکرد گیاه خطی نیست. عکس‌العمل گیاهان زراعی به فسفر اضافه‌شده متأثر از فاکتورهای خاکی از جمله اسیدیته، هدایت الکتریکی و میزان کربنات کلسیم می‌باشد. پایین‌بودن کارایی مصرف فسفر ممکن است تا اندازه‌ای مربوط به خاصیت قلیایی یا آهک طبیعی خاک باشد که منجر به تثبیت فسفر و غیر قابل استفاده‌شدن آن برای گیاه می‌شود (Hussein, 2009). نتایج پژوهش Hamzaei & Salimi (2013) نشان داد که بیشترین کارایی مصرف فسفر (۱۹/۷۲ گرم دانه بر گرم فسفر مصرفی) به تیمار ۶۰ کیلوگرم کود فسفر بر هکتار اختصاص یافت. کمترین کارایی مصرف فسفر نیز (۷/۰۲ گرم دانه بر گرم فسفر مصرفی) در تیمار ۱۲۰ کیلوگرم کود فسفر بر هکتار مشاهده شد. Akhtar *et al.* (2009) در ارزیابی‌کارآیی مصرف فسفر ارقام گیاهی‌کلزا بیان کردند که کارآیی مصرف فسفر به رقم و سطوح فسفر وابسته است؛ به‌طوری‌که با مصرف فسفر، کارآیی مصرف فسفر ارقام دو برابر کاهش نشان داد.

Chen *et al.* (2023) گزارش کردند که کاربرد باکتری‌های حل‌کننده فسفر کارایی مصرف فسفر را نسبت به عدم کاربرد در کلزا به شدت افزایش داد؛ همچنین Sattarzadeh *et al.* (2023) بیان داشتند که اضافه‌کردن کود زیستی به‌همراه کود شیمیایی بیشترین تأثیر را در جذب هرچه بیشتر عناصر غذایی و افزایش کارایی مصرف فسفر توسط گیاه داشته است. نتایج نشان داد در صورت کاربرد باکتری سودوموناس کارآیی مصرف فسفر نسبت به عدم کاربرد باکتری به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر بود؛ اما با افزایش سطوح کود فسفر به‌کار برده‌شده این شاخص روند نزولی از خود نشان داد. تلقیح میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات در سطوح بالای کود فسفر منجر به افزایش کارایی مصرف فسفر گیاه می‌شود؛ این مطلب را می‌توان به توانایی این میکروارگانیسم‌ها در انحلال فسفات و افزایش فراهمی و جذب فسفر برای گیاهان و متعاقباً کاهش کارایی مصرف فسفر نسبت داد.



شکل ۸. مقایسه میانگین برهمکنش کود فسفره و کود زیستی برای کارایی جذب فسفر در کلزا.



شکل ۹. مقایسه میانگین برهمکنش کود فسفره و کود زیستی برای کارایی مصرف در کلزا.

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD با یکدیگر ندارند.

۱۳-۳. شاخص برداشت فسفر

برهم‌کنش کود فسفره و کود زیستی بر شاخص برداشت فسفر معنی‌دار شد (جدول ۳). بیشترین شاخص برداشت فسفر (۳۹/۶۳ درصد) از تیمار کاربرد ۵۰ کیلوگرم فسفر در هکتار و عدم کاربرد کود زیستی حاصل شد که با دیگر سطوح کاربرد فسفر در شرایط کاربرد و عدم کاربرد کود زیستی تفاوت معنی‌داری را ایجاد کرد و تیمار کاربرد ۲۵ کیلوگرم فسفر همراه با کود زیستی، کمترین

شاخص برداشت فسفر (۲۰/۹۱ درصد) را به وجود آورد؛ اما در سطوح بالای کود فسفر به‌همراه کود زیستی شاخص برداشت نسبت به عدم کاربرد باکتری بیشتر بود (شکل ۱۰).

افزایش جذب فسفر می‌تواند در نهایت به بهبود شاخص برداشت فسفر در گیاه منجر شود که خود عامل مهمی در بهبود عملکرد گیاه به‌شمار می‌رود (Singh *et al*., 2005). در تحقیق Seyyedi *et al*. (2015) بر گیاه سیاهدانه، افزایش سطوح کاربرد فسفر (۳۰ و ۶۰ کیلوگرم در هکتار) تأثیر معنی‌داری در بهبود شاخص برداشت فسفر داشت. آن‌ها اظهار کردند علت افزایش شاخص برداشت در سیاهدانه در نتیجه کاهش معنی‌دار کارآیی مصرف فسفر بوده است. قلمباز و همکاران (۱۳۹۲) گزارش کردند که کاربرد کودهای زیستی با فراهمی تدریجی و مطلوب عناصر غذایی در طی زمان، شرایط جذب بهتر مواد غذایی را برای گندم فراهم می‌کند که در نهایت موجب بهبود شاخص برداشت فسفر می‌شود.

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر کود فسفره و زیستی بر کارایی جذب و کارایی مصرف در کلزا.

Source of variation	df	Phosphorus harvest index	Phosphorus remobilization
Replication	2	3.53^{ns}	171.94^{ns}
Phosphorus fertilizer (A)	5	185.53**	61308.56**
Bacteria (B)	1	20.37**	967.93**
B×A	5	44.71**	8365.49**
Error	24	3.52	69.04
C. V (%)		6.12	5.11

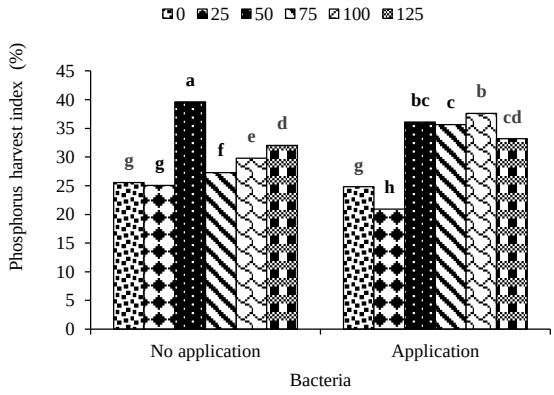
^{ns} و ** به‌ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار و معنی‌داری در سطح احتمال خطای یک درصد را نشان می‌دهد.

۱۴-۳. انتقال مجدد فسفر

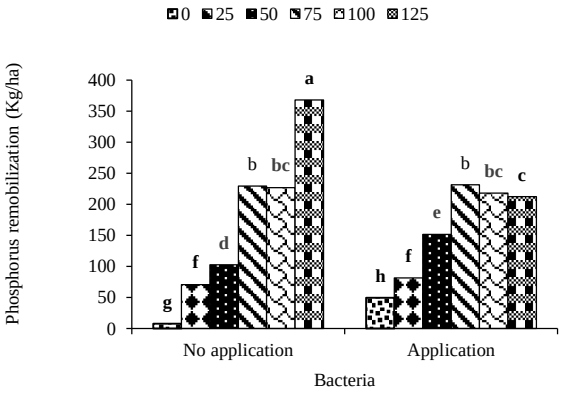
برهم‌کنش کود فسفره و کود زیستی بر انتقال مجدد فسفر معنی‌دار شد (جدول ۳). با تیمار کاربرد ۱۲۵ کیلوگرم فسفر در هکتار در شرایط عدم کاربرد کود زیستی، بیشترین انتقال مجدد فسفر (۳۶۷/۹۵ کیلوگرم بر هکتار) و در تیمار عدم کاربرد فسفر و عدم کاربرد کود زیستی، کمترین انتقال مجدد فسفر (۸/۰۱ کیلوگرم بر هکتار) مشاهده شد. در سطوح ۱۰۰ و ۱۲۵ کیلوگرم فسفر در هکتار در شرایط عدم کاربرد کود زیستی نسبت به شرایط کاربرد باکتری میزان انتقال مجدد بیشتر بود (شکل ۱۱). اگر تقاضای فسفر توسط گیاه بیشتر از مقدار فسفر جذب‌شده توسط ریشه باشد، ذخایر قبلی فسفر در بافت‌های رویشی به‌سرعت به‌سمت دانه انتقال می‌یابد (Sattarzadeh *et al*., 2023). پس از مرحله گرده‌افشانی، غلظت فسفر در برگ‌ها و همچنین فعالیت متابولیکی به‌دلیل پیشرفت پیری کاهش می‌یابد، در این زمان انتقال مجدد موجب انتقال فسفر از برگ‌های پیرتر به سمت برگ‌های جوان و دانه‌ها می‌شود (Shao *et al*., 2023). با افزایش جذب عناصر غذایی به کمک باکتری محرک رشد، مقدار کل عناصر جذب‌شده توسط گیاه افزایش یافته، بنابراین انتقال مواد به دانه بیشتر می‌شود که نشان‌دهنده کارایی انتقال و استفاده فسفر جذب‌شده برای تشکیل دانه و افزایش عملکرد می‌باشد (Chen *et al*., 2023).

۴. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد افزایش مصرف کود فسفره، درصد عناصر پر مصرف، عملکرد دانه و کارایی جذب و انتقال مجدد فسفر گیاه کلزا را افزایش می‌دهد؛ همچنین با توجه به یافته‌های این پژوهش می‌توان گفت مصرف ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفره به همراه کود زیستی، در شرایط آزمایش باعث بهبود صفات اقتصادی در کلزا می‌شود و بیشترین عملکرد دانه از این سطح تیماری حاصل می‌شود؛ به‌علاوه، نتایج اکثر صفات مورد بررسی نشان می‌دهد می‌توان با کاربرد ۵۰ تا ۷۵ کیلوگرم کود فسفره به‌همراه کود زیستی از کود شیمیایی کمتری با بازده اقتصادی بالا استفاده کرد.



شکل ۱۰. مقایسه میانگین برهم‌کنش کود فسفره و کود زیستی برای شاخص برداشت فسفر در کلزا.



شکل ۱۱. مقایسه میانگین برهم‌کنش کود فسفره و کود زیستی برای انتقال مجدد فسفر در کلزا.

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری با یکدیگر در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD ندارند.

۵. منابع

Akhtar, M.S., Oki, Y., & Adachi, T. (2009). Mobilization and acquisition of sparingly soluble p sources by *Brassica* cultivars under p starved environment: I. Differential growth response, p efficiency characteristics and p remobilization. *Journal of Integrative Plant Biology, 51*, 1008-1023. (In Persian).

Ansari, F.A., & Ahmad, I. (2019). Alleviating drought stress of crops. Through PGPR: Mechanism. Microbial interventions in agriculture and environment: 2: Rhizosphere. *Microbiome and Agro-ecology, 9*, 341-358.

Ansari, M.F., Tipre, D.R., & Dave, S.R. (2015). Efficiency evaluation of commercial liquid bio-fertilizers for growth of *Cicer aeritinum* (chickpea) input and field study. *Journal of Agriculture Science and Technology, 4*, 17-24.

Aziz, T., Ahmed, I., Farooq, M., Maqsood, M.A., & Sabir, M. (2011). Variation in phosphorus efficiency among *Brassica* cultivars I: Internal utilization and phosphorus remobilization. *Journal of Plant Nutrition, 34*, 2006-2017.

Beaicknejad Daroonkolaei, S., Amerian, M.R., Pirdashti, H., Bakhshandeh, E., & Gholami, A. (2023). Evaluation of the impact of potassium solubilizing bacteria on potassium efficiency and yield of canola under saline and non-saline soil conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *69*(9), 1437-1453. (In Persian).

Caravaca, F., Alguacil, M.M., Azcon, R., Parlade, J., Torres, P., & Roldan, A. (2009). Establishment of two ectomycorrhizal shrub species in a semiarid site after in situ amendment with sugar beet, rock phosphate and *Aspergillus niger*. *Microbial Ecology, 29*, 21–28.

Chen, H., Gao, L., Li, M., Liao, Y., & Liao, Q. (2023). Fertilization depth effect on mechanized direct-seeded winter rapeseed yield and fertilizer use efficiency. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *103*(5), 2574-2584.

Daneshvar, F., & Khojajnejad, G. (2014). Effect of application of biological fertilizers on yield potential and yield components of safflower (*Cartahamus tinctorius* L.) under different irrigation regimes. *Scientific Journal of Irrigation and Water Engineering*, *16*, 59-69.

Emami, A. (1996). Plant analysis methods. Publication of Research Organization, Agricultural Extension Training, No. 982. Publications of Soil and Water Research Institute, *1*, 126 p. (In Persian).

FAO (2022). Food outlook, Biannual report on global food markets.

Hamzaei, J., & Salimi, F. (2013). Root colonization percentage, yield and yield components of maritigal seed (*Silybum marianum*) affected by mycorrhizal inoculation and phosphorus fertilizer. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 24,* 85-96. (In Persian).

Hassani, M., Tadayon, M.R., & Fadaei Tehrani, A.A. (2020). The effect of chemical and biological fertilizers on leaf characteristics, yield and nutrient uptake and consumption efficiency, phosphorus and sulfur in *Camelina sativa* (L.). *Journal of Plant Process and Function, 10,* 123-140.

Heshmati, S., Amini Dehaghi, M., & Fathi Amirkhiz, K. (2016). The effect of phosphorus and chemical fertilizers application on grain yield, oil yield and fatty acids of spring safflower (ILL 111) under water shortage conditions. *Iranian Journal of Agricultural Sciences, 48*, 159-169. (In Persian).

Hussein, A.H.A. (2009). Phosphorus use efficiency by two varieties of corn at different phosphorus fertilizer application rates. *Research Journal of Applied Sciences, 4*, 85-93.

Hynes, R.K., Leung, G.C., Hirkala, D.L., & Nelson, L.M. (2008). Isolation, selection, and characterization of beneficial rhizobacteria from pea, lentil, and chickpea grown in western Canada. *Canadian Journal of Microbiology, 54*, 248-258.

Imran, A., & Al Tawaha, A.R. (2023). Regenerating potential of dual purpose rapeseed (*Brassica napus* L.) as influenced by decapitation stress and variable rates of phosphorous. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 54*, 534-543.

Iqbal, M., Naveed, M., Sanaullah, M., Brtnicky, M., Hussain, M.I., Kucerik, J., & Mustafa, A. (2023). Plant microbe mediated enhancement in growth and yield of canola (*Brassica napus* L.) plant through auxin production and increased nutrient acquisition. *Journal of Soils and Sediments*, *23*, 1233-1249.

Kohler, J., Hernández, J.A., Caravaca, F., & Roldán, A. (2008). Plant-growth-promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi modify alleviation biochemical mechanisms in water-stressed plants. *Functional Plant Biology*, *35*, 141–151.

Lafond, G.P., Irvine, B., Johnston, A.M., May, W.E., McAndrew, D.W., Shirtliffe, S.J., & Stevenson, F.C. (2008). Impact of agronomic factors on seed yield formation and quality in flax. *Canadian Journal of Plant Science. 88*, 485–500.

Li, B., Tian, X., Zhang, S., Duan, M., & Wang, L. (2023). Effects of combined application of biochar and different types of nitrogen Fertilizers on rapeseed root growth and properties of purple soil in southwest China. *Agronomy*, *13*, 2209.

Mamnabi, S., Nasrollahzadeh, S., Ghassemi-Golezani, K., & Raei, Y. (2020). Physiological traits, grain and oil yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) affected by drought stress and chemical and bio-fertilizers. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *30*, 359-377. (In Persian).

Mirvat, E., Aggag, M., Tawfik, M.M., & Amal, G.A. (2015). Effect of Zn, Mn, and organic manures applications on yield, yield components and chemical constituents of barley (*Hordeum vulgare* L.) grown in newly sandy soil. *Internatunal Journal of ChemTech Research, 8*, 2120-2130.

Mirzashahi, K., & Noorgholipour, F. (2016). Yield response of rapeseed cultivars to phosphorus fertilization and its efficiency in North Khuzestan. *Iranian Journal of Soil Research*, *31*, 352-339. (In Persian).

Moosavi, M., Khorassani, R., & Tavakkol Afshari, R. (2022). Effect of phosphorus on iron, zinc and potassium uptake and the characteristics of root and shoot of wheat in different moisture regimes. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, *12*, 77-98.

Novozamsky, I., Van Eck, R., Van Schouwenburg, J.C.H., & Walinga, I. (1974). Total nitrogen determination in plant material by means of the indophenol blue method. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, *22*, 3-5.

Olama, V., Ronaghi, A., Karimian, N., Yasrebi, J., Hamidi, R., Tavajjoh, M., & Kazemi, M.R. (2014). Seed quality and micronutrient contents and translocations in rapeseed (*Brassica napus* L.) as affected by nitrogen and zinc fertilizers. *Archives of Agronomy Soil Science*, *60*, 423–435. https:// doi.org/10.1080/03650340.2013.796588.

Rashidi, M., Abbasi, N.A., & Zare, M.J. (2017). Effect of chemical and biological phosphorus fertilizers on accumulation of elements, chlorophyll content, seed yield and root growth of three local populations of mung bean. *Journal of Crop Ecophysiology*, *12*, 650-631. (In Persian).

Rezapour Koishahi, T., Ansari, M.H., & Mustafavirad, M. (2014). The effect of some strains of phosphate solubilizing bacteria on the yield and important agronomic characteristics of local beans of Gilan in different amounts of phosphorus fertilizer. *Journal of Crops Improvement, 17*, 801-714. (In Persian).

Safari Arabi, M., Lak, Sh., Madhaj, A., Ramzanpour, M.R., & Mobaser, H.R. (2017). Investigating the effect of phosphate solubilizing bacteria on the yield and phosphorus content of leaves and seeds of rapeseed cultivars. *Crop Physiology Journal*, *10*, 133-144. (In Persian).

Safari, M.R., Dadashi, M.R., Faraji, A., & Armin, M. (2023). Effect of biofertilizer and drought stress on quantitative and qualitative traits in some winter rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivar. *Romanian Agricultural Research*, *40*, 25-36.

Sattarzadeh, E., Yarnia, M., Khalilvand Behrooznia, E., Mirshekari, B., & Rashidi, V. (2023). Investigation of the possibility of reducing the effects of low irrigation of lavender (*Lavandula officinalis* L.) using biofertilizers and phosphorus through changes in some morphological and biochemical characteristics. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *22*, 44-52. (In Persian).

Seyyedi, S.M., Khajeh-Hosseini, M., Rezvani Moghaddam, P., & Shahandeh, H. (2015). Relation between the increasing soluble phosphorus and nitrogen uptake and its effects on phosphorus harvest index of black seed. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *46(1)*, 25-36. (In Persian).

Shaaban, A., El-Mageed, T.A.A., El-Momen, W.R.A., Saudy, H.S., & Al-Elwany, O.A. (2023). The integrated application of phosphorous and zinc affects the physiological status, yield and quality of canola grown in phosphorus-suffered deficiency saline soil. *Gesunde Pflanzen*, 1-9.

Shao, M., Patrick, M., Fatteicher, C., & Schoenau, J. (2023). Effect of phosphorus fertilizer form, opener spread and rate of application on biomass yield, P uptake and recovery in a canola-wheat-pea rotation under controlled environment conditions. *Journal of Plant Nutrition*, *46*, 685-696.

Shata, S.M., Mahmoud, A., & Siam, S. (2007). Improving calcareous soil productivity by integrated effect of intercropping and fertilizer. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences, 3*, 733-739.

Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I.M., & Murphy, A. (2015). Plant physiology and development, Sunderland, MA: Sinauer Associates.

Tavajjoh, M., Karimian, N.A., Rounaghi, A.M., Yatharbi, J., Hamidi, R., & Olama, V. (2014). Effect of phosphorus and boron levels on yield, yield components and seed quality of two canola cultivars under greenhouse conditions. *Science and Technology of Greenhouse Crops, 6*, 112-99. (In Persian).

Wang, Y., Hou, Y., Chen, C., & Zhou, M.G. (2014). Detection of resistance in *Sclerotinia sclerotiorum* to carbendazim and dimethachlon in Jiangsu province of China. *Australasian Plant Pathology, 43*, 307–312.

Yadavi, A., & Yuosefpour, Z. (2015). Effect of nitrogen and phosphorus sources on soil chemical properties and elements concentration in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Water and Soil, 29*, 210-224.

Yang, J., Kloepper, J.W., & Ryu, C.M. (2009). Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. *Trends in Plant Science, 14*, 1-4.

Zhang, R.P., Huang, Z., Ashen, R., Zhou, N.N., Zhou, L., Feng, T.Y., & Ma, P. (2023). Phosphorus application during rapeseed season combined with straw return improves crop productivity and soil bacterial diversity in rape-rice.