



Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Biology<https://sbj.areeo.ac.ir/>

Research article

The Effect of Zinc, Phosphorus and Biofertilizers Application on Yield and Growth Indices in Pinto Bean

Akbar Hemmati^{1*}, Ahmad Asgharzadeh², and yaghouballi Karami¹

¹ Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran.

² Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Article Info

Extended Abstract

Received: 2025-12-15

Accepted: 2026-09-12

Keywords:

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF),
Azotobacter,
Growing degree days (GDD),
Nutrient use efficiency,
Rhizobium

Corresponding author's email:

a.hemati@areeo.ac.ir

Doi:

10.22092/SBJ.2026.371700.2
91

Background and Objectives: Beans are highly effective in fixing nitrogen and enhancing the fertility of agricultural soils due to their symbiosis with bacteria, contributing large amounts of nitrogen to the soil annually after harvest. Pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is one of the major pulse crops grown in Iran. It is widely cultivated in dry and semi-arid regions. Cold stress is a major challenge for global agriculture, especially in cold regions. In these areas, the sowing date is delayed due to low temperatures or high moisture in the soil. Consequently, the seed yield of pinto beans significantly decreases with delayed sowing. Previous studies suggest that the application of chemical fertilizers (particularly zinc and phosphorus) and bio-fertilizers can induce early maturity under such conditions. Biofertilizers are important for improving the qualitative and biochemical properties of plants by enhancing soil quality, which is directly related to producing high-quality and functional food. Their use is particularly valuable in the cultivation of common beans. Phosphorous and zinc are the major potential yield-limiting nutrients in Iran. The deficiency of these nutrients becomes even more serious in alkaline calcareous dry soils. Another important aspect of P and Zn nutrition is the interaction effect between them, especially in soils marginally deficient in both elements. When P and Zn are applied together to such soils, crop yields are reported to increase due to the positive interaction of P and Zn. Therefore, considering the importance of the above, this study was conducted to assess the effect of the combined application of different rates of P, Zn, and bio-fertilizers on the yield and yield components of dry bean plants grown in a soil deficient in P and Zn in the north of Fars province, Iran.

Materials and Methods: A factorial experiment was conducted based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications over two growing seasons (2022 and 2023) to evaluate the effects of biofertilizer application and different phosphorus and zinc fertilizer levels on the seed yield and growth indices of pinto beans. The experimental factors were: (1) phosphorus at three levels: the recommended rate based on soil test results (P1), 30% above the recommended rate (P2), and 30% below the recommended rate (P3); (2) zinc at three levels: the recommended rate based on soil test results (Zn1), 30% above the recommended rate (Zn2), and 30% below the recommended rate (Zn3); and (3) biofertilizer at two levels: seed inoculation with an inoculant containing *Rhizobium*, *Azotobacter*, and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) (B1), and no seed inoculation (B0). The

measured traits included seed yield, root colonization, growing degree days (GDD), crop growth rate (CGR), 100-seed weight, seed nutrient contents (N, P, K, and Zn), seed protein content, plant height, and number of pods per plant.

Results: The results of the analysis for some selected physical and chemical properties of the soil used are given in Table 1. The soil has a silty clay texture, an alkaline pH, and is calcareous with a calcium carbonate content of 25%. The soil is non-saline with a low organic matter content (<5%) and is deficient in total N content, which is typical for semi-arid soils. ANOVA revealed significant ($P < 0.01$) effects of phosphorus, zinc, and bio-fertilizers on yield, CGR, biomass (dry and fresh weight), and pod and seed counts per plant. The highest yield (2170 kg ha⁻¹) was recorded in the P1Zn2B0 treatment (30% more P, 30% less Zn, and no inoculation). GDD averaged 1056 and 1088 in the first and second years, respectively. The maximum CGR (5.5 g m⁻² day⁻¹) occurred in inoculated seeds under the P2Zn3B0 treatment. The highest pod (14.3) and seed counts per plant (48) were observed in the P3Zn3B0 treatment, while seeds per pod peaked at 1.4 in the P3Zn2B0 treatment. The maximum plant height (94 cm) was observed in the P2Zn1B1 and P2Zn3B1 treatments. Seed phosphorus was elevated by bio-fertilizer inoculation, and root colonization peaked at 72.7% in the P1Zn3B0 treatment. The highest 100-seed weights were 46.2 and 50.7 g in the two years of the experiment. The 100-seed weight was increased by zinc and bio-fertilizer treatments, whereas phosphorus did not affect the 100-seed weight. Economic analysis favored the P3Zn3B0 treatment with the highest gross return (1255.8 Rials).

Conclusion: Bean responses to P, Zn, and biofertilizers were strongly dependent on environmental conditions and nutrient interactions, with variations in grain yield primarily associated with the seed number per plant. The inconsistent effects of biofertilizers and year-dependent treatment responses highlight the need for balanced, site-specific nutrient management rather than fixed fertilizer rates. Seed nutritional quality was largely stable, while root colonization suggested a potential contribution from indigenous mycorrhizal populations. Overall, optimizing the P–Zn balance according to soil and environmental conditions appears more promising than increasing fertilizer inputs, although multi-year validation is required.

Cite this article: Hemmati, A., Asgharzadeh, A., Karami, Y., 2026. The Effect of Zinc, Phosphorus and Biofertilizers Application on Yield and Growth Indices in Pinto Bean. Research article *Journal of Soil Biology*, 14 (1),105-128 .



DOI: 10.22092/SBJ.2026.371700.291

Publisher: Soil Science Society of Iran



مقاله پژوهشی

پیامد کاربرد روی، فسفر و کودهای زیستی در عملکرد و شاخص‌های رشد لوبیا چیتی

اکبر همتی^{۱*} (id)، احمد اصغرزاده^۲ و یعقوب‌علی کرمی^۱

^۱ بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.

^۲ مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۴ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۱

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف فسفر، روی و کودهای زیستی بر عملکرد و سرعت رشد لوبیا چیتی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به‌مدت دو سال (۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی استان فارس اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل: ۱) فسفر در سه سطح: مقدار توصیه‌شده بر اساس آزمون خاک (P_1)، ۳۰ درصد بیشتر از P_1 (P_2) و ۳۰ درصد کمتر از P_1 (P_3)؛ ۲) روی در سه سطح: مقدار توصیه‌شده بر اساس آزمون خاک (Zn_1)، ۳۰ درصد بیشتر از Zn_1 (Zn_2) و ۳۰ درصد کمتر از Zn_1 (Zn_3)؛ ۳) کودهای زیستی: تلقیح بذور با مایه تلقیح حاوی باکتری ریزوبیوم، ازتوباکتر و قارچ میکوریز آربوسکولار (B_1) و عدم تلقیح بذور (B_0) بود. صفات مورد بررسی شامل عملکرد دانه، در صد کلونیزاسیون ریشه، روز درجه رشد، سرعت رشد، وزن صد دانه، مقادیر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و روی دانه، پروتئین دانه، ارتفاع گیاه و تعداد دانه در بوته بود. تجزیه واریانس مرکب نتایج نشان داد، اثرات فسفر، روی و کودهای زیستی بر عملکرد دانه و سرعت رشد در سطح احتمال یک در صد معنی‌دار بود. بیشترین عملکرد دانه برابر ۲۱۷۰ کیلوگرم در هکتار از تیمار $P_1Zn_2B_0$ بدست آمد. روز درجه رشد در سال اول ۱۰۵۶ و در سال دوم ۱۰۸۸ بود. بیشترین سرعت رشد برابر ۵/۵ گرم در تیمار $P_2Zn_3B_0$ و بیشترین مقدار کلونیزاسیون برابر ۷۲/۷ درصد در تیمار $P_1Zn_3B_0$ دیده شد. بر اساس ارزیابی‌های اقتصادی، تیمار $P_3Zn_3B_0$ با بازده ناخالص ۱۲۵۵/۸۰ ریال در هکتار دارای بیشترین بازده ناخالص اقتصادی در بین تیمارهای اعمالی بود.

واژه‌های کلیدی: ازتوباکتر، درجه روز رشد، ریزوبیوم، قارچ‌های میکوریز آربوسکولار، کارایی مصرف عناصر غذایی.

مقدمه

لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) پس از نخود، دومین گیاه مهم خانواده حبوبات از نظر سطح زیر کشت در جهان محسوب می‌شود (Beebe et al., 2013). بر اساس آمار سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲، سطح زیر کشت لوبیا در کشور ۱۰۱۳۶۷ هکتار، با متوسط عملکرد ۲۳۵۷ کیلوگرم در هکتار و تولید کل ۲۳۷۰۰۳ تن بوده است. در این سال، استان فارس با سطح زیر کشت ۲۶۱۵۹ هکتار و تولید ۶۳۴۴۰ تن، رتبه نخست تولید لوبیا در کشور را به خود اختصاص داد. پس از استان فارس، استان‌های لرستان و زنجان بیشترین سطح زیر کشت این محصول را دارا هستند. متوسط عملکرد لوبیا در استان فارس ۲۴۲۶ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است (Anonymous, 2024). لوبیا قادر است سالانه بین ۲۰ تا ۶۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار تثبیت کند، اما این مقدار برای تأمین کامل نیاز نیتروژنی گیاه کافی نبوده و مصرف تکمیلی نیتروژن ضروری است (Bliss, 1991; Henson and 1991). برای دستیابی به حداکثر عملکرد، وجود هر دو منبع نیتروژن معدنی خاک و نیتروژن تثبیت‌شده زیستی ضروری است (Barbosa, 2018). مصرف مقادیر زیاد نیتروژن، به‌ویژه در مراحل رشد رویشی، موجب افزایش طول دوره گل‌دهی و تأخیر در رسیدگی لوبیا است (Reinprecht et al., 2020). مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که مصرف محدود نیتروژن در ابتدای فصل رشد (Starter N)، با جبران کمبود نیتروژن پیش از آغاز تثبیت مؤثر نیتروژن اتمسفری، موجب بهبود رشد اولیه و استقرار گیاه شده و در صورت مدیریت صحیح، اثر منفی قابل‌توجهی بر هم‌زیستی ریزوبیوم ندارد (Zoffoli et al., 2021). همچنین، استفاده هم‌زمان از منابع آلی و شیمیایی نیتروژن، در مقایسه با مصرف صرف کودهای شیمیایی، نیاز گیاه را در مراحل مختلف رشد بهتر تأمین کرده و موجب تسریع در رسیدگی فیزیولوژیک گیاه می‌شود (Onyango, 2013; Ogutu, 2013). در یک مدیریت تلفیقی مبتنی بر مصرف

کودهای شیمیایی، آلی و زیستی، فرآیندهای فیزیولوژیک از جمله فتوسنتز، رشد و توسعه شاخص سطح برگ بهبود یافته و در نتیجه، رسیدگی فیزیولوژیک گیاه تسریع می‌شود (Sadeghi et al., 2015). فسفر یکی از عناصر کلیدی در تشکیل و عملکرد گره‌های ریشه است و کمبود فسفر قابل جذب، از طریق کاهش تشکیل گره، فعالیت آنزیم نیتروژناز و تأمین انرژی موردنیاز هم‌زیستی، تثبیت زیستی نیتروژن را در لوبیا و سایر لگوم‌ها به‌طور قابل‌توجهی محدود می‌کند (Nyoki and Ndakidemi, 2021; Jithesh et al., 2024). کمبود فسفر در لوبیا موجب تأخیر در رسیدگی دانه و در نهایت کاهش عملکرد می‌شود. بر اساس نتایج تحقیقات، در صورتی که فسفر قابل جذب خاک کمتر از ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم باشد، مصرف حداقل ۱۲۰ کیلوگرم P_2O_5 در هکتار توصیه می‌شود (Heinrich et al., 2013). نتایج پژوهشی بر روی لوبیا سفید نشان داد که بیشترین عملکرد دانه، معادل ۲۵۹۵ کیلوگرم در هکتار، با مصرف ۴۶ کیلوگرم P_2O_5 و ۵۰ کیلوگرم K_2O در هکتار حاصل شد (Hemmati and Nasrollahi, 2009). با این وجود پاسخ عملکرد لوبیا به مصرف فسفر به‌شدت تحت تأثیر وضعیت فسفر قابل جذب خاک، شرایط محیطی و ژنوتیپ گیاه قرار دارد. با این حال، مطالعات نشان داده‌اند که کاربرد متعادل فسفر، به‌ویژه در خاک‌های دارای کمبود این عنصر، موجب بهبود رشد، افزایش اجزای عملکرد و در نهایت افزایش عملکرد دانه می‌شود. از این‌رو، توصیه مقدار مصرف فسفر باید بر پایه آزمون خاک و شرایط مزرعه انجام گیرد (Silva et al., 2022; Zewdie and Hassen, 2021).

لوبیا نسبت به کمبود روی حساس بوده و علائم این کمبود را به‌سرعت بروز می‌دهد (Ozbahce and Zengin, 2014). برای تأمین این عنصر، مصرف خاکی سولفات روی توصیه شده است. کاربرد ۱۰ تا ۵۰ کیلوگرم در هکتار کودهای حاوی عناصر کم‌مصرف به‌صورت خاکی یا محلول‌پاشی با غلظت سه در هزار، موجب رفع علائم

اهمیت کودهای زیستی شامل ریزوبیوم، ازتوباکتر و قارچ میکوریزا آریسکولار در بهبود جذب عناصر غذایی، رشد و عملکرد لوبیا، این پژوهش با هدف بررسی اثر سطوح مختلف فسفر، روی و کودهای زیستی بر عملکرد و شاخص‌های رشد لوبیا چیتی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی دو سال زراعی (۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل: (۱) فسفر در سه سطح: مقدار توصیه شده بر اساس آزمون خاک (P1)، ۳۰ درصد بیشتر از P1 (P2) و ۳۰ درصد کمتر از P1 (P3)؛ (۲) روی در سه سطح: مقدار توصیه شده بر اساس آزمون خاک (Zn1)، ۳۰ درصد بیشتر از Zn1 (Zn2) و ۳۰ درصد کمتر از Zn1 (Zn3)؛ (۳) کودهای زیستی: تلقیح بذور با مایه تلقیح حاوی باکتری *Rhizobium leguminosarum* bv. *phaseoli* (CCSM-B00141)، *Azotobacter chroococcum* (CCSM-A00482) و قارچ میکوریزا آریسکولار (B1) و عدم تلقیح بذور (B0) بود. فسفر و روی به ترتیب از منابع سوپرفسفات تریپل و سولفات روی تأمین شدند. مایه تلقیح ریزوبیوم و ازتوباکتر به صورت جامد (4×10^7 CFU) و هر یک به میزان دو کیلوگرم در ۱۰۰ کیلوگرم بذر مصرف شدند. قارچ میکوریزا آریسکولار (مایکوروت) به صورت مایع با حدود ۲۰ هزار اندام فعال در هر میلی‌لیتر و به میزان دو لیتر در ۱۰۰ کیلوگرم بذر استفاده شد (Jarak et al., 2012). جمعیت باکتری‌های خاک نیز با روش رقت متوالی تعیین گردید. در تیمارهای تلقیح شده، ۳۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار هنگام کاشت و در تیمارهای فاقد کود زیستی، بر اساس آزمون خاک (جدول ۱)، ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار در سه نوبت کاشت، گل‌دهی و پر شدن غلاف‌ها

کامبود روی در لوبیا می‌شود (Hemmati, 2004). همچنین، گزارش شده است که مصرف روی با افزایش فعالیت فتوسنتزی، رشد گیاه را تسریع کرده و موجب کوتاه‌تر شدن دوره رشد تا رسیدگی فیزیولوژیک می‌شود.

کودهای زیستی، به ویژه قارچ‌های میکوریزا، از طریق افزایش فراهمی عناصر غذایی، تولید ترکیبات شبه‌هورمونی و کاهش تولید اتیلن، موجب افزایش پایداری گیاه در برابر تنش‌های محیطی می‌شوند (Amiri, 2021). نتایج بررسی ۲۱ ژنوتیپ لوبیا تلقیح شده با چهار گونه قارچ میکوریز نشان داد که گیاهان تلقیح شده، در مقایسه با شاهد، از رشد بهتر ریشه، اندام هوایی و نیز درصد کلونیزاسیون بیشتری برخوردار بودند (Erdinc, 2017). مطالعات انجام شده در کشور نیز نشان داده است که کاربرد قارچ میکوریز آریسکولار موجب افزایش عملکرد لوبیا می‌شود (Hemmati et al., 2017b; 2020a). همچنین، گزارش شده است که پاسخ گیاه به تلقیح به نوع ریزجاندار، مرحله رشد گیاه و برهم‌کنش بین ریزجاندارهای مصرفی بستگی دارد؛ به طوری که تعداد غلاف در بوته و ارتفاع بوته بیشتر تحت تأثیر باکتری ازتوباکتر و عملکرد دانه عمدتاً تحت تأثیر باکتری ریزوبیوم قرار گرفته است (Jarak et al., 2012). استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR)، به ویژه سویه‌های دارای آنزیم ACC deaminase، موجب بهبود رشد، افزایش جذب عناصر غذایی و افزایش عملکرد گیاهان زراعی می‌شود (Shaharoon et al., 2006 a, b). در برخی مطالعات مشاهده شده است که حتی در شرایط تأمین کافی نیتروژن معدنی، تلقیح گیاهان با باکتری‌های دیازوتروف، از جمله ازتوباکتر، موجب افزایش رشد، نمو و زودرسی گیاهان شده است. در چنین شرایطی، به نظر می‌رسد مکانیسم‌هایی غیر از تثبیت زیستی نیتروژن، از جمله تولید تنظیم‌کننده‌های رشد مانند اکسین، در بهبود رشد گیاه نقش داشته باشند (Kader et al., 2002). با توجه به نقش مؤثر عناصر فسفر و روی در تغذیه گیاه و همچنین

تهیه و در الکل ۵۰ درصد نگهداری شد تا درصد کلونیزاسیون میکوریزایی تعیین شود. ارزیابی اقتصادی تیمارها با استفاده از روش بودجه‌بندی جزئی و شاخص بازده ناخالص (GM) انجام گرفت. داده‌ها با نرم‌افزار SAS تجزیه و تحلیل و میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح ۵ درصد مقایسه شدند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه نمونه خاک محل انجام آزمایش در جدول یک ارائه شده است. خاک محل آزمایش غیرشور، آهکی و از نظر مواد آلی فقیر است. مقادیر فسفر و پتاسیم آن کمتر از حد بحرانی است. تمامی مقادیر عناصر کم مصرف به غیر از منگنز در خاک محل آزمایش کمتر از حد بحرانی آنها می‌باشد. حد بحرانی عناصر غذایی قابل استفاده در خاک برای لوبیا برابر ۳۰۰، ۱۵، ۱، ۸، ۶، ۲ و ۱ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب برای پتاسیم، فسفر، مس، منگنز، آهن، روی و بر گزارش شده است. بافت خاک نیز رسی است. جمعیت کل باکتری‌ها در خاک محل آزمایش برابر ۹۶۰۰ باکتری در یک گرم خاک بود (جدول ۱).

مصرف شد. با توجه به کفایت پتاسیم خاک، کود پتاسیمی مصرف نشد و سایر عناصر غذایی بر اساس نتایج آزمون خاک تأمین شدند. بذور لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L.) رقم «کوشا» با تراکم ۴۰ بوته در مترمربع، در تاریخ ۲۵ خرداد در کرت‌هایی شامل چهار ردیف پنج‌متری با فاصله ۵۰ سانتی‌متر بین ردیف‌ها کشت شدند. آبیاری به روش قطره‌ای نواری انجام گرفت. کنترل علف‌های هرز با ترفلان پیش از کاشت و وجین دستی طی فصل رشد و کنترل کنه با پروفنفسوس (۲/۵ لیتر در هکتار) انجام شد. صفات اندازه‌گیری شده شامل عملکرد و اجزای عملکرد، طول دوره رشد، درصد نیتروژن، فسفر و روی دانه (Bremner, 1996; Reed and Martens, 1996; Snyder, 1985) سرعت رشد محصول (Campbell and Kondra, 1978)، درصد پروتئین دانه (نیتروژن $\times 6/25$) و درصد کلونیزاسیون ریشه بود (لازم به توضیح است که نتایج درصد نیتروژن، فسفر، پتاسیم، روی و پروتئین دانه و درصد کلونیزاسیون ریشه در سال اول قابل تجزیه آماری نبود و در این صفات فقط از نتایج سال دوم آزمایش استفاده شده است). عملکرد دانه از دو ردیف میانی هر کرت اندازه‌گیری شد و سرعت رشد بر اساس وزن خشک بوته‌های برداشت‌شده از یک مترمربع محاسبه گردید. درصد کلونیزاسیون میکوریزایی نیز مطابق روش (Phillips and Hayman, 1970) تعیین شد. به‌منظور تعیین طول دوره رویش، مراحل فنولوژیک لوبیا در طول فصل رشد ثبت شد و درجه‌روز رشد تجمعی (GDD ; Growing Degree Days) از زمان کاشت تا هر مرحله فنولوژیک، با در نظر گرفتن دمای پایه ۱۰ درجه سانتی‌گراد (Snyder, 1985) محاسبه شد. سرعت رشد محصول (CGR ; Crop Growth Rate) در سه مرحله ساقه‌دهی، قبل از گل‌دهی و پس از گل‌دهی (Campbell and Kondra, 1978) و با استفاده از اختلاف وزن خشک گیاه در دو نمونه‌برداری متوالی محاسبه شد. پیش از برداشت، از تمامی کرت‌ها نمونه ریشه

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک قبل از اجرای آزمایش.

Table 1. Some physical, chemical, and biological properties of the soil before conducting the experiment.

عمق Depth (cm)	هدایت الکتریکی EC (dSm ⁻¹)	اسیدیته pH	مواد خنثی شونده TNV	نیتروژن N	کربن آلی OC	فسفر P	پتاسیم K	روی Zn	آهن Fe	منگنز Mn	مس Cu	شن Sand	لای Silt	رس Clay	جمعیت کل باکتری Total Bacteria
			%	%				(ppm)				%	%	%	cfug ⁻¹
0-30	0.96	7.7	25	0.06	0.55	6.6	254	0.58	5.5	13.5	0.72	30.6	26.4	43	9.6×10 ³

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثرات ساده سال، فسفر، روی و کودهای زیستی و همچنین برهم‌کنش‌های دوگانه به‌جز برهم‌کنش کود زیستی × سال، سه‌گانه و چهارگانه آن‌ها بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند (جدول ۲).

در سال اول، بیشترین عملکرد دانه در تیمار P1Zn2B0 با ۲۱۷۰ کیلوگرم در هکتار و کمترین عملکرد در تیمار P3Zn3B0 با ۱۶۴۶ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد؛ این دو تیمار به‌ترتیب در گروه‌های آماری a و c قرار گرفتند (جدول ۳). بیشترین عملکرد در سال اول از تیمار مصرف فسفر مطابق با توصیه آزمون خاک، مصرف روی به میزان ۳۰ درصد بیشتر از مقدار توصیه‌شده و بدون تلقیح بذور با کود زیستی حاصل شد. این پاسخ را با احتیاط می‌توان نشان‌دهنده مناسب بودن ترکیب این سطوح تغذیه‌ای در شرایط سال اول دانست؛ با این حال، با توجه به معنی‌دار بودن برهم‌کنش سه‌گانه فسفر × روی × کود زیستی، نمی‌توان برتری این تیمار را صرفاً به افزایش مصرف روی یا عدم استفاده از کود زیستی نسبت داد. از نظر فیزیولوژیک، تعامل فسفر و روی می‌تواند پاسخ گیاه به تغذیه معدنی را تغییر دهد، زیرا جذب، انتقال و هم‌ایستایی این دو عنصر در گیاه به‌صورت مستقل عمل نمی‌کنند و وضعیت یکی از آن‌ها می‌تواند بر دسترسی و استفاده از دیگری اثرگذار باشد (Bouain et al., 2014; Xie et al., 2019). همچنین، افزایش عملکرد در اثر تأمین روی در شرایط مناسب تغذیه‌ای با نتایج Merkeb and Yoseph

(2024) همخوانی دارد؛ آنان نشان دادند که کاربرد روی

همراه با آهن در لوبیا موجب بهبود برخی صفات زراعی و افزایش بهره‌وری گیاه شد.

در سال دوم، بیشترین عملکرد دانه (۲۱۳۵ کیلوگرم در هکتار) در تیمار P3Zn3B0، یعنی در شرایط مصرف فسفر و روی به میزان ۳۰ درصد کمتر از مقادیر توصیه‌شده بر اساس آزمون خاک و بدون تلقیح بذور با کودهای زیستی، به‌دست آمد (جدول ۴). این نتیجه نشان می‌دهد که پاسخ عملکرد به‌میزان مصرف عناصر غذایی ثابت و مستقل از شرایط محیطی نیست؛ بنابراین، مشاهده بیشترین عملکرد در سطح پایین‌تر فسفر و روی در سال دوم را نباید به‌عنوان شواهدی مبنی بر مطلوبیت ذاتی کاهش مصرف این عناصر تفسیر کرد؛ بلکه احتمالاً بیانگر تغییر نیاز واقعی گیاه و کارایی استفاده از عناصر غذایی تحت شرایط متفاوت محیطی و تغذیه‌ای سال دوم است. در چنین شرایطی، وضعیت اولیه حاصلخیزی خاک، میزان عناصر قابل جذب، رطوبت خاک و شرایط رشد می‌توانند تعیین کنند که چه مقدار از کود افزوده‌شده واقعاً به نیاز گیاه پاسخ می‌دهد. مطالعات انجام‌شده روی حبوبات نیز بر ضرورت تطبیق میزان مصرف کود با ویژگی‌های خاک و شرایط محلی تأکید کرده‌اند؛ پاسخ عملکرد به کود فسفاته و کودهای مرکب تابع شرایط منطقه و حاصلخیزی خاک بوده و تعیین نرخ مناسب کود باید به‌صورت منطقه‌ای انجام شود (Daemo et al., 2024). افزون بر این، مطالعات اخیر در لوبیا نشان داده است که پاسخ عملکرد به مدیریت تغذیه‌ای به‌شدت به ترکیب منابع غذایی و شرایط خاک وابسته است؛ به‌طوری‌که

کاربرد تلفیقی کودهای معدنی و آلی/زیستی در برخی شرایط موجب افزایش عملکرد شده، اما میزان این پاسخ بین مکان‌ها و فصل‌های مختلف متفاوت بوده است (Wabela et al., 2024). بنابراین، تفاوت تیمار برتر بین سال‌های اول و دوم در پژوهش حاضر را می‌توان بیشتر به تغییر شرایط محیطی و تغذیه‌ای و پاسخ متقابل فسفر، روی و کود زیستی نسبت داد تا یک رابطه خطی بین مقدار مصرف کود و عملکرد. این یافته از نظر کاربردی نیز اهمیت دارد، زیرا نشان می‌دهد توصیه ثابت و یکسان برای مصرف فسفر و روی ممکن است در همه شرایط سالانه بهینه نباشد و تفسیر و توصیه کودی باید بر پایه آزمون خاک و شرایط واقعی تولید انجام شود.

ارتفاع گیاه

نتایج تجزیه واریانس مرکب (جدول ۲) نشان داد که به جز اثر اصلی ساده کودهای زیستی که در سطح احتمال یک درصد و برهم‌کنش فسفر $\times$ روی که در سطح پنج درصد بر این صفت معنی‌دار شدند، هیچ اثر اصلی ساده و

برهم‌کنش دو، سه و یا چهارگانه^۳ی بر صفت ارتفاع گیاه تأثیر معنی‌داری نداشت. در سال اول، بیشترین ارتفاع در تیمار P2Zn3B1 با ۹۱/۷ سانتی‌متر و کمترین آن در تیمار P3Zn3B0 با ۵۷/۷ سانتی‌متر مشاهده شد که به ترتیب در گروه‌های آماری a و c قرار گرفتند (جدول ۳). در سال دوم نیز بیشترین ارتفاع گیاه (۹۶/۳ سانتی‌متر) در تیمار P2Zn3B1 ثبت شد (جدول ۴). بررسی ترکیب تیمارها نشان داد که پاسخ ارتفاع به سطوح فسفر و روی روند خطی مشخصی نداشت. همچنین، اثر متقابل فسفر و روی در پژوهش حاضر با گزارش‌هایی مبنی بر وابستگی پاسخ رشد لوبیا به تعامل این دو عنصر سازگار است (Gianquinto et al., 2000). با توجه به اینکه اثر اصلی فسفر و روی معنی‌دار نبود، اما برهم‌کنش آنها معنی‌دار شد، به نظر می‌رسد ارتفاع گیاه بیش از پاسخ مستقل به مقدار هر یک از عناصر، به ترکیب سطوح فسفر و روی و وضعیت زیستی ریزوسفر وابسته بوده است؛ بنابراین، برتری P2Zn3B1 را نمی‌توان به اثر مستقل فسفر، روی یا کود زیستی نسبت داد؛ بلکه احتمالاً حاصل پاسخ گیاه به ترکیب این عوامل در شرایط آزمایش بوده است.

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه، سرعت رشد نسبی، وزن صد دانه، ارتفاع گیاه و تعداد دانه در بوته.

Table 2. Combined analysis of variance the grain yield, relative growth rate, 100S eed weight, plant height and noubmer of seeds per plant.

میانگین مربعات Mean Squares					درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییر Sources of changes
تعداد دانه در بوته Noumber of seeds per plant	ارتفاع گیاه Plant height	وزن صد دانه 100 seed weight	سرعت رشد نسبی Relative growth rate	عملکرد دانه Grain yield		
21329.24**	127.36 ^{ns}	581.82**	0.94 ^{ns}	9429421**	1	سال Year
221.96	892.75	18.95	0.55	24514.04	4	تکرار Replication
39.9 ^{ns}	85.3 ^{ns}	6.49 ^{ns}	5.59**	280515.43**	2	فسفر Phosphorus
1189.07**	25.38 ^{ns}	15.11 ^{ns}	2.74**	6436.72**	2	سال×فسفر Phosphorus × Year
343.37**	27.33 ^{ns}	26.75*	9.45**	863807.18**	2	روی Zinc
111.79 ^{ns}	23.19 ^{ns}	15.76 ^{ns}	0.17 ^{ns}	962374.46**	2	سال×روی Zinc ×Year
338.70**	517.25*	5.35 ^{ns}	24.59**	233854.77**	2	روی×فسفر Phosphorus × Zinc
743.40 ^{ns}	27.05 ^{ns}	16.65 ^{ns}	2.97**	437469.26*	4	روی×فسفر×سال year× phosphorus× zinc
169.55 ^{ns}	2969.66**	2.22 ^{ns}	5.51 ^{ns}	555293.26**	1	کود زیستی biofertilizer
22.52 ^{ns}	1.20 ^{ns}	9.53 ^{ns}	0.10**	76309.64 ^{ns}	1	کود زیستی×سال Year ×Biofertilizer
124.3 ^{ns}	572.65 ^{ns}	0.27 ^{ns}	14.06**	412296.71**	2	کود زیستی×فسفر Phosphorus× Biofertilizer
47.12 ^{ns}	11.04 ^{ns}	8.36 ^{ns}	9.49**	108915.60**	2	کودزیستی×فسفر×سال year×Phosphorus× Biofertilizer
156.27 ^{ns}	452.06 ^{ns}	2.13 ^{ns}	3.08**	40078.10 ^{ns}	2	کود زیستی×روی Zinc ×Biofertilizer
410.71**	18.82 ^{ns}	12.72 ^{ns}	1.96**	227267.29**	2	کودزیستی×روی×سال Year×Zinc ×Biofertilizer
514.11**	124.21 ^{ns}	7.37 ^{ns}	8.64**	359397.75**	4	کودزیستی×روی×فسفر Phosphorus ×Zinc ×Biofertilizer
300.37**	4.37 ^{ns}	2.60 ^{ns}	3.70**	835505.78**	44	روی×فسفر×کود زیستی × سال Year× Phosphorus ×Zinc×Biofertilizer
50.26	201.77	8.27	0.15	30420.93	68	خطا Error
17.79	18.57	3.26	19.40	10.74		ضریب تغییرات (درصد٪) Coefficient of Variation (%)

*و** به ترتیب معنی‌دار در سطح ۵ درصد٪ و ۱ درصد٪ احتمال آماری و ns معنی دار نیست.

*, ** Indicates that the effect of the experimental factors is significant at the 5% and 1% probability level and ns isn't significant.

جدول ۳- مقایسه میانگین عملکرد، تعداد دانه در بوته، ارتفاع گیاه، وزن صد دانه و سرعت رشد در سال اول.

Table 3. Mean comparison of grain yield, number of seeds per plant, plant height, 100-seed weight, and growth rate in the first year.

ردیف Row	تیمار Treatment	عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)	تعداد دانه در بوته Number of seeds per plant	ارتفاع گیاه Plant height (cm)	وزن صد دانه 100 seed weight (g)	سرعت رشد Growth rate (g day ⁻¹)
1	P ₁ Zn ₁ B ₀	1913 [*]	46.7 ^a	79.3 ^{abc}	41.3 ^{ab}	0.7 ^b
2	P ₁ Zn ₁ B ₁	2000 [*]	56.7 ^a	73.3 ^{abc}	43.1 ^{ab}	1.3 ^{ab}
3	P ₁ Zn ₂ B ₀	2170 [*]	55 ^a	79.3 ^{abc}	45.7 ^a	3.3 ^{ab}
4	P ₁ Zn ₂ B ₁	1956 ^{ab}	55.3 ^a	85 ^{ab}	42.5 ^{ab}	0.9 ^b
5	P ₁ Zn ₃ B ₀	1716 ^c	50 ^a	76.7 ^{abc}	43.1 ^{ab}	3.6 ^{ab}
6	P ₁ Zn ₃ B ₁	1890 ^{ac}	48 ^a	85.7 ^{ab}	43.4 ^{ab}	4.7 ^{ab}
7	P ₂ Zn ₁ B ₀	2106 ^a	61.7 ^a	76 ^{abc}	42.1 ^{ab}	2.2 ^{ab}
8	P ₂ Zn ₁ B ₁	1910 ^{ab}	50.3 ^a	86 ^{ab}	40.8 ^{ab}	3.0 ^{ab}
9	P ₂ Zn ₂ B ₀	1813 ^{ab}	57 ^a	64.3 ^{bc}	42.1 ^{ab}	1.9 ^{ab}
10	P ₂ Zn ₂ B ₁	1983 ^{ab}	62.3 ^a	70.7 ^{abc}	44.1 ^{ab}	2.3 ^{ab}
11	P ₂ Zn ₃ B ₀	2140 ^a	64.3 ^a	72 ^{abc}	40.1 ^b	5.5 ^a
12	P ₂ Zn ₃ B ₁	2003 ^{ab}	62.7 ^a	91.7 ^a	41.9 ^{ab}	2.5 ^{ab}
13	P ₃ Zn ₁ B ₀	1970 ^{ab}	41.7 ^a	69.3 ^{abc}	43.6 ^{ab}	1.9 ^{ab}
14	P ₃ Zn ₁ B ₁	1906 ^{ab}	62 ^a	79.3 ^{abc}	41.5 ^{ab}	3.9 ^{ab}
15	P ₃ Zn ₂ B ₀	1853 ^{ab}	56.7 ^a	71 ^{abc}	45.0 ^{ab}	2.6 ^{ab}
16	P ₃ Zn ₂ B ₁	1823 ^{ab}	38 ^a	88.3 ^{ab}	46.2 ^a	1.4 ^{ab}
17	P ₃ Zn ₃ B ₀	1646 ^c	62.7 ^a	57.7 ^c	40.0 ^b	4.7 ^{ab}
18	P ₃ Zn ₃ B ₁	1973 ^{ab}	55 ^a	79.7 ^{ab}	43.9 ^{ab}	1.8 ^{ab}
	LSD	432.22	28	26.27	5.39	4.40

میانگین‌های با حروف مشابه اختلاف معنی‌داری ندارند. P₁: فسفر بر اساس آزمون خاک، P₂: فسفر ۳۰ درصد بیشتر از آزمون خاک، P₃: فسفر ۳۰ درصد کمتر از آزمون خاک، Zn₁: روی بر اساس آزمون خاک، Zn₂: روی ۳۰ درصد بیشتر از آزمون خاک، Zn₃: روی ۳۰ درصد کمتر از آزمون خاک، B₀ و B₁: به ترتیب مایه‌زنی بذر با کودهای زیستی و عدم مایه‌زنی. (در هر ستون میانگین‌های با حروف یکسان ناهمبندی چشمگیری ندارند).

Means with the same letters are not significantly different. P₁: phosphorus based on the soil test; P₂: phosphorus at 30% above the soil-test recommendation; P₃: phosphorus at 30% below the soil-test recommendation; Zn₁: zinc based on the soil test; Zn₂: zinc at 30% above the soil-test recommendation; Zn₃: zinc at 30% below the soil-test recommendation; B₁ and B₀: seed inoculation with biofertilizers and no seed inoculation, respectively. (Within each column, means followed by the same letter are not significantly different).

جدول ۴- مقایسه میانگین عملکرد، تعداد دانه در بوته، ارتفاع گیاه، وزن صد دانه و سرعت رشد در سال دوم آزمایش.

Table 4. Mean comparison of grain yield, number of seeds per plant, plant height, 100 seed weight and growth rate in the second year.

ردیف Row	تیمار Treatment	عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)	تعداد دانه در بوته Number of seeds per plant	ارتفاع گیاه Plant height (cm)	وزن صد دانه 100 seed weight (g)	سرعت رشد Growth rate (g day ⁻¹)
1	P ₁ Zn ₁ B ₀	1537 ^{bcd}	51.6 ^a	76.3 ^{abc}	49.1 ^{abc}	0.83 ^{defg}
2	P ₁ Zn ₁ B ₁	1555 ^{bcd}	25.6 ^{efg}	68 ^{bc}	50.76 ^a	1.51 ^d
3	P ₁ Zn ₂ B ₀	810 ^{fg}	29.3 ^{def}	75 ^{abc}	48.26 ^{abc}	3.78 ^b
4	P ₁ Zn ₂ B ₁	735 ^{fg}	12.3 ^{ij}	78 ^{abc}	49.53 ^{ab}	1.06 ^{def}
5	P ₁ Zn ₃ B ₀	1482 ^{bcd}	18 ^{ghi}	73 ^{abc}	46.23 ^{bcd}	4.12 ^b
6	P ₁ Zn ₃ B ₁	1625 ^{bcd}	42.3 ^{bc}	85.7 ^{ab}	43.43 ^d	5.48 ^a
7	P ₂ Zn ₁ B ₀	1435 ^{de}	24.3 ^{fgh}	73.3 ^{abc}	47 ^{abcd}	2.52 ^c
8	P ₂ Zn ₁ B ₁	1815 ^{abc}	11.3 ^{ij}	82 ^{ab}	46.66 ^{bcd}	3.49 ^b
9	P ₂ Zn ₂ B ₀	1650 ^{bcd}	8.6 ^j	65 ^{bc}	49.06 ^{abc}	2.29 ^c
10	P ₂ Zn ₂ B ₁	675 ^g	14.3 ^{ij}	70 ^{bc}	48.1 ^{abc}	2.7 ^c
11	P ₂ Zn ₃ B ₀	1825 ^{ab}	29.6 ^{def}	70.7 ^{bc}	48.9 ^{abc}	1.06 ^{def}
12	P ₂ Zn ₃ B ₁	1075 ^{ef}	26.3 ^{def}	96.3 ^a	46.7 ^{bcd}	0.2 ^g
13	P ₃ Zn ₁ B ₀	1417 ^{de}	8.6 ^j	72 ^{bc}	49.26 ^{abc}	1.18 ^{de}
14	P ₃ Zn ₁ B ₁	655 ^g	17 ^{hij}	80 ^{abc}	47 ^{bcd}	0.25 ^g
15	P ₃ Zn ₂ B ₀	535 ^g	34.6 ^{cd}	69.3 ^{bc}	46.06 ^{cd}	4.18 ^b
16	P ₃ Zn ₂ B ₁	1470 ^{bcd}	44 ^{ab}	86 ^{ab}	45.33 ^{cd}	2.29 ^c
17	P ₃ Zn ₃ B ₀	2135 ^a	33.3 ^{de}	57.7 ^c	47.23 ^{bcd}	0.76 ^{fg}
18	P ₃ Zn ₃ B ₁	1460 ^{cd}	31 ^{def}	79.3 ^{abc}	46.54 ^{bcd}	0.37 ^{fg}
	LSD	147.9	3.57	9.79	1.65	0.28

میانگین‌های با حروف مشابه اختلاف معنی‌داری ندارند. P₁: فسفر بر اساس آزمون خاک، P₂: فسفر ۳۰ درصد بیشتر از آزمون خاک، P₃: فسفر ۳۰ درصد کمتر از آزمون خاک، Zn₁: روی بر اساس آزمون خاک، Zn₂: روی ۳۰ درصد بیشتر از آزمون خاک، Zn₃: روی ۳۰ درصد کمتر از آزمون خاک، B₀ و B₁: به ترتیب مایه‌زنی بذر با کودهای زیستی و عدم مایه‌زنی. (در هر ستون میانگین‌های با حروف یکسان ناهمبندی چشمگیری ندارند).

Means with the same letters are not significantly different. P₁: phosphorus based on the soil test; P₂: phosphorus at 30% above the soil-test recommendation; P₃: phosphorus at 30% below the soil-test recommendation; Zn₁: zinc based on the soil test; Zn₂: zinc at 30% above the soil-test recommendation; Zn₃: zinc at 30% below the soil-test recommendation; B₁ and B₀: seed inoculation with biofertilizers and no seed inoculation, respectively. (Within each column, means followed by the same letter are not significantly different).

وزن صد دانه

وزن صد دانه، اگرچه تحت کنترل ژنتیکی قابل توجهی قرار دارد، از شرایط محیطی و تغذیه‌ای، به‌ویژه در مرحله پر شدن دانه، نیز تأثیر می‌پذیرد (Qodsevali et al., 2015). در پژوهش حاضر، فقط اثر سال و روی به‌ترتیب در سطوح احتمال یک و پنج درصد بر وزن صد دانه معنی‌دار بود و هیچ اثر اصلی ساده دیگر و برهم‌کنش دو، سه و یا چهارگانه‌ای بر صفت وزن صد دانه تأثیر معنی‌داری نداشتند (جدول ۲). بیشترین وزن صد دانه در سال اول و دوم به‌ترتیب با مقادیر $46/2$ و $50/76$ گرم از تیمارهای $P1Zn1B1$ و $P3Zn2B1$ ثبت شد و مقایسه میانگین‌ها نشان داد که پاسخ این صفت در تیمارهای مختلف بین دو سال الگوی یکنواختی نداشت (جدول ۳ و ۴). معنی‌دار شدن اثر سال نشان می‌دهد که شرایط محیطی حاکم بر دوره تشکیل و پر شدن دانه می‌تواند در تعیین وزن نهایی دانه نقش داشته باشد؛ در مقابل، معنی‌دار شدن اثر روی نشان‌دهنده حساسیت این صفت به وضعیت تغذیه‌ای روی است. روی با مشارکت در فعالیت آنزیم‌های مختلف، متابولیسم کربوهیدرات و پروتئین و حفظ عملکرد فتوسنتزی، می‌تواند در تأمین و انتقال مواد پرورده طی پر شدن دانه نقش داشته باشد (Hafeez et al., 2013). در مطالعات انجام‌شده روی لوبیا نیز کاربرد روی، به‌ویژه در مراحل زایشی، با بهبود وزن دانه و برخی اجزای عملکرد همراه بوده است (Jalal et al., 2023; Merkeb and Yoseph, 2024). با این حال، در پژوهش حاضر، عدم معنی‌داری اثر فسفر و کودهای زیستی نشان داد که پاسخ وزن صد دانه به این دو عامل، در دامنه تیمارهای مورد بررسی، محدودتر از پاسخ آن به روی بوده است؛ بنابراین، برخلاف صفاتی که عمدتاً از طریق تغییرات تعداد دانه تحت تأثیر مدیریت تغذیه قرار می‌گیرند، وزن صد دانه در این آزمایش بیشتر تحت تأثیر سال و وضعیت روی قرار

گرفت و تغییرات آن را نمی‌توان به اثر مستقل فسفر یا کودهای زیستی نسبت داد.

تعداد دانه در بوته

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که تعداد دانه در بوته تحت تأثیر معنی‌دار با احتمال سطح یک درصد اثرات ساده سال، روی، برهم‌کنش فسفر $\times$ روی، سال $\times$ فسفر، سال $\times$ روی $\times$ کودزیستی، فسفر $\times$ روی $\times$ کودزیستی و سال $\times$ فسفر $\times$ روی $\times$ کودزیستی قرار گرفت (جدول ۲). این نتایج نشان می‌دهد که تعداد دانه در بوته، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای عملکرد، بیش از اثر مستقل هر عامل، به مدیریت تلفیقی عناصر غذایی و شرایط محیطی وابسته است. همان‌طور که در جداول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۳ و ۴) مشاهده می‌شود در سال اول تیمارها از نظر تعداد دانه در بوته اختلاف معنی‌داری نداشتند، در عین حال بیشترین مقدار دانه در بوته برابر $64/3$ عدد بود که در تیمار $P2Zn3B0$ مشاهده شد. هرچند در سال اول تیمارها از نظر تعداد دانه در بوته اختلاف معنی‌داری نداشتند، اما در سال دوم دامنه تغییرات افزایش یافت و بیشترین تعداد دانه در بوته برابر $51/6$ عدد بود که در تیمار $P1Zn1B0$ مشاهده شد؛ که بیانگر تأثیر شرایط محیطی، به‌ویژه در مراحل گل‌دهی و تشکیل غلاف، بر تشکیل دانه است. اثر مثبت روی را می‌توان به نقش آن در سنتز اکسین، تشکیل و زنده‌مانی دانه گرده، رشد لوله گرده، لقاح و افزایش انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی نسبت داد که در نهایت موجب افزایش تشکیل غلاف و کاهش ریزش گل می‌شود. در آزمایشی دلیل افزایش تعداد غلاف، تعداد دانه و عملکرد لوبیا را، استفاده از روی گزارش کردند (Yousefi et al., 2023). معنی‌دار بودن برهم‌کنش فسفر و روی نیز نشان داد که پاسخ گیاه به هر یک از این عناصر به فراهمی عنصر دیگر وابسته است؛ به‌طوری‌که تأمین متعادل آن‌ها با بهبود رشد ریشه و جذب عناصر غذایی، تشکیل غلاف و دانه را

افزایش می‌دهد. این یافته با نتایج (Jalal et al., 2023) مبنی بر اثر هم‌افزایی نانوروی و باکتری‌های محرک رشد بر اجزای عملکرد لوبیا مطابقت دارد. همچنین، اگرچه اثر اصلی کودهای زیستی معنی‌دار نبود، معنی‌دار شدن برخی برهم‌کنش‌ها نشان داد که کارایی آن‌ها به وضعیت تغذیه‌ای و شرایط محیطی وابسته است؛ موضوعی که با گزارش (Yarnia et al., 2024) نیز همخوانی دارد. در مجموع، افزایش عملکرد دانه در این پژوهش عمدتاً از طریق افزایش تعداد دانه در بوته حاصل شد، در حالی که وزن صد دانه تغییر اندکی داشت. بنابراین، مدیریت تلفیقی فسفر، روی و کودهای زیستی بیش از آنکه بر پر شدن دانه مؤثر باشد، بر تشکیل گل، غلاف و بقای دانه‌ها اثر گذاشت و تعداد دانه در بوته مهم‌ترین جزء تبیین‌کننده تغییرات عملکرد دانه بود.

سرعت رشد

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که سرعت رشد تحت تأثیر فسفر، روی و طیف گسترده‌ای از برهم‌کنش‌های این عوامل با یکدیگر، سال و کودهای زیستی قرار گرفت، در حالی که اثر اصلی سال و کودهای زیستی و برهم‌کنش سال $\times$ روی بر این صفت معنی‌دار نبودند (جدول ۲). این الگو بیانگر آن است که سرعت رشد تابع پاسخ یک عامل منفرد نبوده، بلکه تنظیم رشد در نتیجه تعامل وضعیت فسفر و روی با شرایط محیطی و وضعیت زیستی ریزوسفر شکل گرفته است. فسفر از طریق مشارکت در انتقال انرژی، متابولیسم و توسعه ریشه و روی از طریق نقش در فعالیت آنزیم‌ها، تنظیم متابولیسم و عملکرد فتوسنتزی، هر دو در تشکیل ماده خشک نقش دارند؛ از این رو، تغییر نسبت این دو عنصر می‌تواند پاسخ رشد را تغییر دهد. در لوبیا نیز نشان داده شده است که کمبود روی می‌تواند طول میان‌گره، کارایی استفاده از نور و حداکثر فتوسنتز را کاهش دهد و اثر فسفر بر وضعیت روی برگ نیز به سطح عرضه روی وابسته است؛ بنابراین، رابطه فسفر و روی الزاماً خطی و مستقل نیست (Gianquinto et al., 2000).

نتایج این آزمایش نشان داد که در سال اول بیشترین سرعت رشد برابر ۵/۵ گرم در روز در تیمار $P_2Zn_3B_0$ حاصل شد. در این تیمار بذر با کودهای زیستی تلقیح و فسفر ۳۰ درصد بیشتر از آزمون خاک و روی ۳۰ درصد کمتر از آزمون خاک مصرف شده بود. در حالی که در سال دوم بیشترین مقدار، ۵/۴۸ گرم در روز، در تیمار $P_1Zn_3B_1$ مشاهده شد؛ یعنی فسفر در سطح آزمون خاک، روی ۳۰ درصد کمتر از آزمون خاک و همراه با تلقیح زیستی (جدول ۳ و ۴). از نظر فیزیولوژیک، این وابستگی قابل توجیه است. فسفر کافی می‌تواند رشد ریشه و تأمین انرژی فرایندهای متابولیکی را پشتیبانی کند، در حالی که وضعیت مناسب روی برای حفظ عملکرد فتوسنتزی و فعالیت آنزیمی اهمیت دارد. مطالعه (Gianquinto et al., 2000) در لوبیا نشان داد که در شرایط عرضه پایین روی، افزایش فسفر می‌تواند غلظت روی برگ را کاهش دهد و کاهش وضعیت روی با افت فتوسنتز و برخی شاخص‌های رشد همراه شود؛ بنابراین، افزایش فسفر لزوماً به معنای افزایش رشد نیست و باید در ارتباط با وضعیت روی تفسیر شود. کودهای زیستی نیز احتمالاً از طریق تغییر فراهمی عناصر غذایی، توسعه ریشه و تنظیم فرایندهای رشد می‌توانند این روابط را تعدیل کنند. در لوبیا، سویه‌های دارای توانایی حل‌کنندگی فسفات و کاربرد آنها می‌تواند رشد، جذب فسفر و رنگیزه‌های فتوسنتزی را بهبود دهند (Bedine et al., 2022). همچنین گزارش کرده‌اند که کاربرد روی همراه با تلقیح باکتری‌های محرک رشد در لوبیا می‌تواند ارتفاع، ماده خشک و برخی شاخص‌های کارایی مصرف روی را افزایش دهد (Jalal et al., 2023). با این حال، پاسخ این عوامل در سال‌های مختلف یکسان نبود. این یافته‌ها با نتایج حاضر همخوانی دارد، زیرا در این آزمایش نیز اثر اصلی کود زیستی معنی‌دار نبود، اما برهم‌کنش‌های آن با فسفر، روی و سال معنی‌دار بودند؛ بنابراین، نقش کود زیستی را نباید به‌عنوان یک عامل مستقل، بلکه به‌عنوان عاملی تعدیل‌کننده پاسخ گیاه به شرایط تغذیه‌ای تفسیر کرد. در مجموع، نتایج نشان داد که

خشک، عملکرد نهایی را تحت تأثیر قرار دهد (Prasad et al., 2002; Dapaah et al., 2000). ازسوی دیگر، تأمین متعادل فسفر و روی با بهبود انتقال انرژی، توسعه ریشه، فعالیت آنزیمی و تنظیم رشد، می‌تواند روند تکمیل مراحل فنولوژیک را تسریع کند، در حالی که کمبود این عناصر معمولاً موجب تأخیر در نمو گیاه می‌شود (Vance et al., 2003; Cakmak, 2008). همچنین، کودهای زیستی از طریق افزایش جذب عناصر غذایی، توسعه سیستم ریشه و بهبود همزیستی میکوریزی، کارایی تغذیه‌ای گیاه را افزایش داده و می‌توانند زمان لازم برای رسیدن به مراحل مختلف رشد را کاهش دهند (Begum et al., 2019). از دیدگاه کاربردی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت متعادل تغذیه، علاوه بر افزایش کارایی رشد، می‌تواند با تسریع تکمیل مراحل فنولوژیک، احتمال مواجه شدن مراحل حساس رشد با تنش‌های دمایی پایان فصل را کاهش دهد؛ بنابراین، استفاده تلفیقی از کودهای شیمیایی و زیستی می‌تواند راهبردی مناسب برای افزایش سازگاری لوبیا در مناطق با فصل رشد محدود باشد.

سرعت رشد در لوبیا به تعامل فسفر، روی و کود زیستی حساس بود و افزایش مقدار مصرف یک عنصر به‌تنهایی الزاماً رشد را افزایش نداد. جالب آنکه بیشترین سرعت رشد در هر دو سال در سطح ۳۰ درصد کمتر از آزمون خاک برای روی مشاهده شد، اما ترکیب فسفر و کود زیستی در دو سال متفاوت بود؛ بنابراین، یافته‌های حاضر بیشتر از «افزایش مصرف نهاده‌ها»، بر تناسب بین سطوح مصرف عناصر و استفاده هدفمند از کودهای زیستی تأکید دارد.

درجه‌روز رشد (Growing Degree Days; GDD)

درجه‌روز رشد (GDD) شاخصی کارآمد برای توصیف سرعت نمو گیاه است، زیرا تجمع انرژی حرارتی مورد نیاز برای تکمیل مراحل فنولوژیک را نشان می‌دهد و نسبت به طول دوره تقویمی، معیار دقیق‌تری برای مقایسه رشد در شرایط محیطی مختلف محسوب می‌شود (McMaster and Wilhelm, 1997). در این پژوهش، طول دوره رشد لوبیا در سال‌های اول و دوم به‌ترتیب ۱۰۴ و ۱۰۵ روز بود و درجه‌روز رشد تجمعی به‌ترتیب ۱۰۵۶/۵ و ۱۰۸۸/۵ درجه‌روز (جدول ۵ و ۶) محاسبه شد. این مقادیر کمتر از دامنه ۱۲۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه‌روز گزارش شده برای لوبیا هستند (White and Izquierdo, 1991) که احتمالاً ناشی از تفاوت رقم، شرایط اقلیمی، تاریخ کاشت و مدیریت زراعی است. از آنجا که نیاز حرارتی گیاه، حاصل برهم‌کنش ژنوتیپ و محیط است، تغییرات دمایی منطقه و افزایش دما در اواخر فصل رشد می‌تواند با تسریع فرآیندهای متابولیکی، طول دوره رشد را کاهش دهد (Wang et al., 2017; Summerfield et al., 1991). بیشترین تجمع درجه‌روز رشد در مراحل آغاز گل‌دهی (R5) و پر شدن دانه (R8) مشاهده شد که بیانگر حساسیت بالای این مراحل به‌شرایط حرارتی است. هرگونه تنش دمایی در این مراحل می‌تواند از طریق کاهش تشکیل گل، محدود شدن انتقال مواد فتوسنتزی و کاهش تجمع ماده

جدول ۵- درجه روز رشد (GDD) تجمعی دوره رشد لوبیا در شهرستان اقلید در سال اول آزمایش.

Table 5. Growth degree days of Bean in Eqlid city in first year of the experiment.

روز	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر
Day	June	July	August	September	October
1	-	10.5	12	9.5	9
2	-	10	12.5	9.5	9
3	-	10.5	11	7.5	9
4	-	10	10	8	9
5	-	10	13	7	-
6	-	10	13	7.5	-
7	-	10	12.5	8	-
8	-	10.5	۱۲	8.5	-
9	-	10	12.5	8.5	-
10	-	10.5	10.5	9	-
11	-	10.5	11.5	8.5	-
12	-	12	10.5	8.5	-
13	-	11.5	11.5	9	-
14	-	12	11	9	-
15	-	11	11	9.5	-
16	-	14	11	10	-
17	-	13	11	10	-
18	-	12.5	12	9.5	-
19	-	12	12.5	9.5	-
20	-	12.5	11	10	-
21	-	12.5	13	9.5	-
22	-	10	8.5	9	-
23	-	9.5	10	9	-
24	-	10	10	9	-
25	10	9.5	10	9	-
26	10	9.5	10	8.5	-
27	10	10	8.5	8.5	-
28	10.5	10	10	10	-
29	10	10	9	8.5	-
30	11	10	9.5	8.5	-
31	10.5	10.5	9.5	8	-
مجموع	72	334.5	340	274	36
Total					1056.5

جدول ۶- درجه روز رشد (GDD) تجمعی دوره رشد لوبیا در شهرستان اقلید در سال دوم آزمایش .

Table 6. Growth degree days of Bean in Eqlid city in second year of the experiment.

روز	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر
Day	June	July	August	September	October
1	-	10.5	17.5	10	7.5
2	-	10.5	16.5	11	6.5
3	-	9.5	17	11.5	5.5
4	-	10	14	11.5	6.5
5	-	11.5	13.5	11	5
6	-	11.5	13	10	-
7	-	11.5	12.5	9	-
8	-	13	12.5	10.5	-
9	-	9.5	13	10.5	-
10	-	10	12.5	10	-
11	-	10	11	10.5	-
12	-	11.5	12	11.5	-
13	-	10.5	12.5	13	-
14	-	12.5	11	10	-
15	-	12	10.5	9.5	-
16	-	11	10	11.5	-
17	-	11.5	11	11	-
18	-	11.5	14	10.5	-
19	-	12	10	10	-
20	-	11	8.5	8.5	-
21	-	11	8.5	10.5	-
22	-	12	8	10	-
23	-	12	7	9.5	-
24	-	11.5	7.5	8.5	-
25	10	11	5	8	-
26	9	12.5	5.5	7	-
27	8	11.5	5.5	6.5	-
28	7	11.5	6	6	-
29	8.5	13	8	7	-
30	10	13.5	11	7.5	-
31	10	14	10.5	8	-
مجموع	1088.5				
Total					

عناصر غذایی دانه، پروتئین و کلونیزاسیون ریشه

عناصر غذایی دانه

همانگونه که در بخش مواد و روش‌ها ذکر گردید، نتایج درصد نیتروژن، فسفر، پتاسیم، روی، پروتئین دانه و درصد کلونیزاسیون ریشه در سال اول قابل تجزیه آماری نبود و در این صفات فقط از نتایج سال دوم استفاده شده است. یکی از شاخص‌های مهم پایداری گیاه در برابر تنش‌های محیطی، جذب و تجمع عناصر غذایی است. گیاهانی که قادر به جذب و تجمع بیشتر عناصر غذایی در طول دوره رشد در اندام خود باشند، در مقابل تنش‌های محیطی مقاومت بیشتری خواهند داشت. نتایج تجزیه

واریانس مرکب نشان داد که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری بین تیمارها در مقدار نیتروژن، روی، فسفر، پتاسیم و پروتئین دانه وجود نداشت (جدول ۷). ولی آزمون مقایسه میانگین‌ها (LSD) نشان داد که در مقدار فسفر و پتاسیم دانه بین تیمارها اختلاف معنی‌دار بود (جدول ۸). بطوریکه تیمار P1Zn2B1 (مصرف فسفر بر اساس آزمون خاک و روی ۳۰ درصد کمتر از آزمون خاک همراه با تلقیح بذر با کودهای زیستی) منجر به حصول بیشترین مقدار فسفر در دانه به میزان ۰/۳۹ درصد شده است. بیشترین مقدار پتاسیم دانه برابر ۱/۹ درصد نیز در تیمار P2Zn3B0 (مصرف ۳۰ درصد فسفر بیشتر از آزمون خاک و روی ۳۰ درصد کمتر

پروتئین دانه منجر نمی‌شود (Ben Mrid et al., 2022; Sharma et al., 2023).

از آزمون خاک و بدون تلقیح بذر) مشاهده شد (جدول ۸). این نتایج نشان می‌دهد که مدیریت تلفیقی عناصر غذایی، در شرایط این پژوهش، بیشتر فرآیندهای جذب، انتقال و باز توزیع عناصر را طی رشد تحت تأثیر قرار داده تا تجمع نهایی آن‌ها در دانه. در گیاهان لگومی، انتقال مجدد عناصر از اندام‌های رویشی به دانه تحت کنترل سازوکارهای فیزیولوژیکی پیچیده است؛ بنابراین افزایش جذب عناصر الزاماً به افزایش غلظت آن‌ها در دانه منجر نمی‌شود (Begum et al., 2019; Smith and Smith, 2011). در این مورد می‌توان به این نکته هم اشاره نمود که اگرچه قارچ‌های میکوریز آربوسکولار با افزایش جذب عناصر غذایی، به‌ویژه فسفر، نقش مهمی در بهبود تغذیه و رشد گیاه دارند، اما افزایش جذب عناصر الزاماً به افزایش غلظت آن‌ها در دانه یا سایر اندام‌های گیاه منجر نمی‌شود و این پاسخ به عواملی مانند افزایش زیست‌توده، الگوی تخصیص عناصر و شرایط رشد بستگی دارد (Smith et al., 2011; Smith and Smith, 2011a, b). نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۸) نیز اختلاف معنی‌داری در غلظت عناصر و پروتئین دانه بین تیمارها نشان نداد که احتمالاً ناشی از حاصلخیزی مناسب خاک و سازوکارهای تنظیمی گیاه در حفظ تعادل تغذیه‌ای دانه بوده است. در چنین شرایطی، بخشی از عناصر جذب‌شده صرف رشد رویشی و فعالیت‌های متابولیکی شده و تغییری در غلظت نهایی عناصر دانه ایجاد نمی‌کند؛ الگویی که در سایر مطالعات نیز گزارش شده است (Begum et al., 2019; Ben Mrid et al., 2022). عدم تغییر معنی‌دار پروتئین دانه (جدول ۷) نیز با ثابت ماندن غلظت نیتروژن قابل انتظار بود، زیرا تجمع پروتئین به نیتروژن ذخیره‌شده در مراحل پایانی رشد وابسته است. اگرچه کودهای زیستی می‌توانند از طریق بهبود رشد ریشه، تثبیت زیستی نیتروژن و جذب عناصر غذایی وضعیت تغذیه‌ای گیاه را ارتقا دهند، در خاک‌های فاقد محدودیت شدید تغذیه‌ای این اثرات لزوماً به افزایش

جدول ۷- تجزیه واریانس تأثیر تیمارها بر غلظت عناصر غذایی و پروتئین دانه و کلونیزاسیون ریشه.

Table 7. Analysis of variance of the effects of treatments on seed nutrient concentrations, seed protein content and root colonization.

میانگین مربعات Mean Squares						درجه آزادی Degree of Freedom	منابع تغییر Sources of change
کلونیزاسیون ریشه Root colonization	پروتئین دانه Seed Protein	روی Zinc	پتاسیم Potassium	فسفر Phosphorus	نیتروژن Nitrogen		
105.12	7.91	0.89	0.010 ^{ns}	0.0003	0.20	2	تکرار Replication
937.71 ^{**}	6.88 ^{ns}	1.37 ^{ns}	0.006 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.17 ^{ns}	2	فسفر Phosphorus
2.65 ^{ns}	5.99 ^{ns}	4.91 ^{ns}	0.011 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.15 ^{ns}	2	روی Zinc
284.86 ^{**}	3.16 ^{ns}	2.83 ^{ns}	0.010 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.07 ^{ns}	4	فسفر×روی Phosphorus × Zinc
1608.00 ^{**}	1.01 ^{ns}	1.44 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	0.02 ^{ns}	1	کود زیستی Biofertilizer
449.26 ^{**}	0.42 ^{ns}	0.40 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.01 ^{ns}	2	فسفر×کود زیستی Phosphorus× Biofertilizer
18.84 ^{ns}	4.48 ^{ns}	0.36 ^{ns}	0.006 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.11 ^{ns}	2	کود زیستی×روی Biofertilizer × Zinc
672.51 ^{**}	1.64 ^{ns}	0.92 ^{ns}	0.013 ^{ns}	0.0002 ^{ns}	0.04 ^{ns}	4	کود زیستی × فسفر × روی Phosphorus×Zinc ×Biofertilizer
44.54	9.25	0.12	0.005	0.0003	0.236	34	خطا Error
13.1	15.9	5.9	4.2	4.8	15.9		ضریب تغییرات Coefficient of Variation

*** و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح ۵ درصد و ۱ درصد احتمال آماری و ns معنی دار نیست.

***, ** Indicates that the effect of the experimental factors is significant at the 5% and 1% probability level and ns isn't significant.

جدول ۸- مقایسه میانگین غلظت عناصر غذایی و پروتئین دانه و درصد کلونیزاسیون ریشه.

Table 8. Mean comparison of the seed nutrient elements, Protein and root colonization.

ردیف Row	تیمار Treatment	نیتروژن Nitrogen (%)	فسفر Phosphorus (%)	پتاسیم Potassium (%)	روی Zinc (ppm)	پروتئین دانه Seed Protein (%)	کلونیزاسیون ریشه Root colonization (%)
1	P ₁ Zn ₁ B ₀	3.1 ^a	0.37 ^{ab}	1.7 ^{bcd}	31 ^a	19.4 ^a	55.5 ^{cde}
2	P ₁ Zn ₁ B ₁	3.1 ^a	0.38 ^{ab}	1.7 ^d	30.6 ^a	19.5 ^a	51.3 ^{cde}
3	P ₁ Zn ₂ B ₀	2.8 ^a	0.38 ^{ab}	1.7 ^{bcd}	30.6 ^a	17.8 ^a	60.4 ^{bcd}
4	P ₁ Zn ₂ B ₁	2.9 ^a	0.39 ^a	1.7 ^{bcd}	30.3 ^a	18.3 ^a	70 ^{ab}
5	P ₁ Zn ₃ B ₀	3.2 ^a	0.38 ^{ab}	1.7 ^{bcd}	29 ^a	20 ^a	72.7 ^a
6	P ₁ Zn ₃ B ₁	3.4 ^a	0.37 ^{ab}	1.8 ^{ab}	29 ^a	21.2 ^a	40 ^{fg}
7	P ₂ Zn ₁ B ₀	3.1 ^a	0.38 ^{ab}	1.7 ^{bcd}	30 ^a	19.5 ^a	61.2 ^{bc}
8	P ₂ Zn ₁ B ₁	2.9 ^a	0.37 ^{ab}	1.7 ^{bcd}	29 ^a	18.1 ^a	49.7 ^{def}
9	P ₂ Zn ₂ B ₀	3 ^a	0.37 ^{ab}	1.7 ^{bcd}	29.6 ^a	18.8 ^a	47.2 ^{ef}
10	P ₂ Zn ₂ B ₁	3.3 ^a	0.37 ^{ab}	1.8 ^{ab}	29.3 ^a	20.6 ^a	52.3 ^{cde}
11	P ₂ Zn ₃ B ₀	3.1 ^a	0.37 ^{ab}	1.9 ^a	29.3 ^a	19.4 ^a	46.3 ^{efg}
12	P ₂ Zn ₃ B ₁	3.2 ^a	0.38 ^{ab}	1.7 ^{bcd}	30.3 ^a	19.9 ^a	46.6 ^{efg}
13	P ₃ Zn ₁ B ₀	2.9 ^a	0.36 ^b	1.7 ^{bcd}	31 ^a	18.2 ^a	49.5 ^{def}
14	P ₃ Zn ₁ B ₁	2.7 ^a	0.38 ^{ab}	1.7 ^{bcd}	30.3 ^a	17.4 ^a	35.7 ^g
15	P ₃ Zn ₂ B ₀	2.9 ^a	0.38 ^{ab}	1.8 ^{ab}	29.3 ^a	18.5 ^a	60.4 ^{bcd}
16	P ₃ Zn ₂ B ₁	2.8 ^a	0.38 ^{ab}	1.8 ^{ab}	29.3 ^a	18 ^a	16.7 ^h
17	P ₃ Zn ₃ B ₀	2.9 ^a	0.37 ^{ab}	1.7 ^{bcd}	29.6 ^a	18.2 ^a	54.4 ^{cde}
18	P ₃ Zn ₃ B ₁	3.1 ^a	0.37 ^{ab}	1.7 ^{bcd}	28.3 ^a	19.6 ^a	46.8 ^{ef}
	LSD	0.32	0.1	0.55	1.95	2.06	4.2

میانگین‌های با حروف مشابه اختلاف معنی‌داری ندارند. P₁: فسفر بر اساس آزمون خاک، P: فسفر ۳۰ درصد بیشتر از آزمون خاک، P₃: فسفر ۳۰ درصد کمتر از آزمون خاک، Zn₁: روی بر اساس آزمون خاک، Zn₂: روی ۳۰ درصد بیشتر از آزمون خاک، Zn₃: روی ۳۰ درصد کمتر از آزمون خاک، B₀ و B₁: به ترتیب مایه زنی بذر با کودهای زیستی و عدم مایه‌زنی. (در هر ستون میانگین‌های با حروف یکسان ناهمبندی چشمگیری ندارند).

Means with the same letters are not significantly different. P₁: phosphorus based on the soil test; P₂: phosphorus at 30% above the soil-test recommendation; P₃: phosphorus at 30% below the soil-test recommendation; Zn₁: zinc based on the soil test; Zn₂: zinc at 30% above the soil-test recommendation; Zn₃: zinc at 30% below the soil-test recommendation; B₁ and B₀: seed inoculation with biofertilizers and no seed inoculation, respectively. (Within each column, means followed by the same letter are not significantly different.)

درصد پروتئین دانه

جدول تجزیه واریانس آزمایش نشان داد که اثر

تیمارها در پروتئین دانه معنی‌دار نبود (جدول ۷). در آزمون مقایسه میانگین‌ها، بیشترین درصد پروتئین برابر ۲۱/۲ درصد در تیمار P₁Zn₃B₁ بود. در این تیمار فسفر بر اساس آزمون خاک و روی ۳۰ درصد کمتر از میزان توصیه بر اساس آزمون خاک مصرف شده و بذر با کودهای زیستی نیز تلقیح شده بود (جدول ۸). عدم تغییر معنی‌دار پروتئین دانه بین تیمارها نیز با ثابت ماندن غلظت نیتروژن قابل انتظار بود، زیرا تجمع پروتئین به نیتروژن ذخیره‌شده در مراحل پایانی رشد وابسته است. اگرچه کودهای زیستی می‌توانند از طریق بهبود رشد ریشه، تثبیت زیستی نیتروژن و جذب عناصر غذایی و وضعیت تغذیه‌ای گیاه را ارتقا دهند، در خاک‌های فاقد محدودیت شدید تغذیه‌ای

این اثرات لزوماً به افزایش پروتئین دانه منجر نمی‌شود

(Ben Mrid et al., 2022; Sharma et al., 2023).

درصد کلونیزاسیون ریشه

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۷)،

درصد کلونیزاسیون ریشه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر فسفر، کودهای زیستی و برهم‌کنش‌های فسفر × روی، فسفر × کود زیستی و برهم‌کنش سه‌گانه قرار گرفت. این نتایج نشان داد که استقرار همزیستی میکوریزایی در شرایط این آزمایش تابع یک عامل تغذیه‌ای منفرد نبوده و تحت تأثیر تعامل وضعیت تغذیه‌ای گیاه و عوامل زیستی ریزوسفر قرار داشته است. بر اساس آزمون مقایسه میانگین‌ها (جدول ۸)، بیشترین مقدار کلونیزاسیون ریشه برابر ۷۲/۷ درصد در تیمار P₁Zn₃B₀ بود که از نظر آماری با تیمار P₁Zn₂B₁ با

ارزیابی اقتصادی تیمارهای آزمایش

از بعد اقتصادی توجه به این نکته ضروری است که در این مطالعه از میان نهاده‌های تولید، صرفاً مقدار کود مصرفی در بین تیمارها متغیر بوده و این امر موجب گردیده که هزینه متغیر بین تیمارها صرفاً هزینه کودهای مصرفی و هزینه عملیات کودپاشی باشد و هزینه سایر عملیات‌ها با تغییر در تیمارها، ثابت بوده و تغییر نکند. بدین ترتیب، مجموع هزینه‌های غیرمشترک بین تیمارها فقط دربرگیرنده هزینه خرید کود و هزینه عملیات کودپاشی است. لذا به دلیل این که کل هزینه‌های تولید احصا نشده است، بلکه صرفاً داده‌های مربوط به هزینه کود موجود است، بر این اساس، در این پروژه امکان محاسبه شاخص نسبت منفعت به هزینه وجود ندارد. بر اساس نتایج آزمایش، از نظر درآمدی، تیمار $P3Zn3B0$ با درآمدی معادل $1494/50$ میلیون ریال در هکتار، دارای بیشترین درآمد و تیمار $P3Zn2B0$ با درآمد $374/50$ میلیون ریال در هکتار، کمترین درآمد را به خود اختصاص داده‌اند. سایر تیمارها از لحاظ درآمدی در بین این دو تیمار قرار گرفته‌اند. از بعد هزینه، کمترین هزینه مربوط به تیمار $P3Zn3B1$ با هزینه‌ای معادل $171/35$ میلیون ریال در هکتار و بیشترین هزینه مربوط به تیمار $P2Zn2B0$ با هزینه‌ای معادل $345/50$ میلیون ریال در هکتار است. بدین ترتیب، از بعد درآمدی بهترین تیمار، تیمار $P3Zn3B0$ و از بعد هزینه، بهترین تیمار $P3Zn3B1$ هستند. تیمار $P3Zn3B0$ با بازده ناخالص $1255/80$ ریال در هکتار دارای بیشترین و تیمار $P3Zn2B0$ با بازده ناخالص 119 میلیون ریال در هکتار دارای کمترین بازده ناخالص اقتصادی هستند. همچنین از نظر تغییرات بازده ناخالص نسبت به تیمار اول (به عنوان تیمار شاهد)، تیمار و نرخ این تغییرات تیمار $P3Zn3B0$ بهترین تیمار اقتصادی است. در این تیمار مقدار 175 کیلوگرم سوپر فسفات تریپل، 28 کیلوگرم سولفات روی و 50 کیلوگرم کود اوره مصرف شده و عملکردی معادل 2135 کیلوگرم دانه لوبیا داشت.

70 درصد کلونیزاسیون تفاوت معنی‌داری نداشت؛ بنابراین، با وجود اختلاف عددی، نمی‌توان برتری یکی از این دو تیمار را از نظر کلونیزاسیون ریشه مطرح کرد. میزان کلونیزاسیون 70 تا 73 درصدی مشاهده‌شده در برخی تیمارها از مقادیر 30 تا 40 درصد گزارش‌شده برای لوبیا در برخی مطالعات (Hemmati et al., 2017; Mohammadi, 2014) بیشتر بود. با این حال، مقایسه مستقیم این مقادیر باید با احتیاط انجام شود، زیرا کلونیزاسیون به ویژگی‌های گیاه و قارچ، شرایط خاک، رطوبت و وضعیت تغذیه‌ای وابسته است (Choi et al., 2018; Begum et al., 2019). کلونیزاسیون بالای تیمار $P1Zn3B0$ ، با وجود عدم مصرف کود زیستی، نیز می‌تواند بدلیل طبیعی بودن خاک (عدم استریل خاک)، ناشی از حضور و فعالیت جمعیت‌های بومی قارچ‌های میکوریزایی باشد. وضعیت فسفر یکی از عوامل مهم تنظیم‌کننده همزیستی میکوریزایی است؛ محدودیت فسفر می‌تواند از طریق تغییر سیگنال‌های ریشه‌ای، از جمله استریگولاکتون‌ها، بر برقراری ارتباط گیاه و قارچ و توسعه کلونیزاسیون اثر بگذارد (Akiyama et al., 2005)؛ بنابراین، تغییرات کلونیزاسیون در تیمارهای فسفوری ممکن است ناشی از تغییر در وضعیت تغذیه‌ای و پاسخ همزیستی گیاه باشد؛ با این حال، از آنجا که ترکیبات سیگنال‌دهنده و شاخص‌های مستقیم این فرایند در آزمایش حاضر اندازه‌گیری نشده‌اند، نسبت دادن تغییرات کلونیزاسیون به افزایش استریگولاکتون‌ها قطعی نیست. معنی‌دار شدن برهم‌کنش فسفر $\times$ روی و برهم‌کنش سه‌گانه نیز نشان می‌دهد که پاسخ کلونیزاسیون به یک عنصر غذایی به سطح سایر عوامل تغذیه‌ای و زیستی وابسته است. همچنین، کاهش کلونیزاسیون در برخی تیمارهای تلقیح‌شده را نمی‌توان صرفاً به رقابت میان میکروارگانیسم‌های ریزوسفر نسبت داد، زیرا جمعیت و فعالیت آنها اندازه‌گیری نشده است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که کلونیزاسیون ریشه حاصل تعامل وضعیت تغذیه‌ای گیاه، جمعیت‌های میکوریزایی بومی و تلقیحی و شرایط ریزوسفر بوده است.

لازم به ذکر است که این تیمار با هزینه‌ای معادل ۱۷۹/۷۵ میلیون ریال در هکتار، پس از تیمار P3Zn3B1، در زمره کم هزینه‌ترین تیمارهای مطالعه، قرار دارد. در تیمار P3Zn3B0 مقدار مصرف کودهای فسفر و روی ۳۰ درصد کمتر از آزمون خاک بود. همچنین بذر با کودهای زیستی در هنگام کاشت تلقیح نشده است. از نظر اقتصادی بعد از تیمار P3Zn3B0 تیمار P2Zn1B1 قرار دارد. در این تیمار مصرف فسفر ۳۰ درصد بیشتر از آزمون خاک و مصرف روی بر اساس آزمون خاک بود و بذر با کودهای زیستی شامل باکتری ریزوبیوم، باکتری ازتوباکتر و قارچ میکوریزا تلقیح شده بود.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که پاسخ لوبیا به مدیریت تغذیه حاصل برهم‌کنش پیچیده میان فسفر، روی، کودهای زیستی و شرایط محیطی است و بررسی هر یک از این عوامل به صورت مستقل نمی‌تواند رفتار واقعی گیاه را تبیین کند. معنی‌دار بودن اغلب اثرات متقابل نیز بیانگر آن بود که کارایی عناصر غذایی و کودهای زیستی به وضعیت تغذیه‌ای گیاه و شرایط محیطی وابسته است. در میان عوامل مورد بررسی، فسفر مهم‌ترین عامل محدودکننده تولید در خاک مورد مطالعه بود و مدیریت متعادل آن نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش عملکرد دانه داشت، در حالی که روی عمدتاً از طریق بهبود اجزای عملکرد، به‌ویژه وزن صد دانه و تنظیم رشد، موجب افزایش بهره‌وری گیاه شد. افزایش عملکرد دانه نیز بیشتر ناشی از افزایش تعداد دانه در بوته بود تا افزایش وزن صد دانه که اهمیت بیشتر اجزای زایشی در پاسخ به مدیریت تغذیه را نشان می‌دهد. اگرچه کودهای زیستی موجب بهبود برخی صفات رویشی و افزایش کلونیزاسیون ریشه شدند، اما اثر آن‌ها بر عملکرد و

غلظت عناصر غذایی دانه پایدار نبود و به شرایط محیطی، ویژگی‌های خاک و جمعیت میکروبی بومی وابسته بود. همچنین، عدم انطباق تیمارهای دارای بیشترین سرعت رشد با تیمارهای دارای بیشترین عملکرد نشان داد که افزایش رشد رویشی به‌تنهایی تضمین‌کننده افزایش عملکرد نیست و کارایی انتقال ماده خشک به اندام‌های زایشی نقش مهم‌تری در تولید نهایی دارد. افزون بر این، مدیریت متعادل تغذیه با تنظیم روند فنولوژیک، احتمال مواجهه مراحل حساس رشد با تنش‌های دمایی پایان فصل را کاهش داده و سازگاری گیاه را در شرایط اقلیمی مشابه بهبود می‌بخشد. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که موفقیت برنامه‌های تغذیه‌ای در چنین خاک‌هایی بیش از افزایش مقدار نهاده‌ها، به ایجاد تعادل تغذیه‌ای، بهره‌گیری از برهم‌کنش‌های مثبت میان عناصر غذایی و فرآیندهای زیستی ریزوسفر و هماهنگی آن‌ها با شرایط محیطی وابسته است.

تشکر و قدردانی

اندازه‌گیری درصد کلونیزاسیون ریشه و تهیه‌ی مایه‌های تلقیح توسط بخش تحقیقات بیولوژی و بیوتکنولوژی مؤسسه تحقیقات خاک و آب انجام شده است که مراتب تشکر و سپاسگزاری به‌عمل می‌آید.

References

1. Akiyama, K., Matsuzaki, K. and Hayashi, H. 2005. Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi, *Nature*, 435(7043), pp. 824–827. <https://doi.org/10.1038/nature03608>
2. Amiri, S., 2021. Application of bio-fertilizers for enhancing growth and yield of common bean plants grown under water stress conditions, *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28, pp. 3901–3908. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.03.044>
3. Barbosa, N., Portilla, E., Buendía, F., Raatz, B., Beebe, S. and Rao, I., 2018. Genotypic differences in symbiotic nitrogen fixation ability and seed yield of climbing bean', *Plant and Soil*, 428, pp. 223–239. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3668-6>
4. Bedine, M. A. B., Iacomini, B., Tchameni, S. N., Sameza, M. L., & Fekam, F. B. (2022). Harnessing the phosphate-solubilizing ability of *Trichoderma* strains to improve plant growth, phosphorus uptake and photosynthetic pigment contents in common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 45, 102510.
5. Beebe, S., Rao, I.M., Blair, M.W. and Acosta-Gallegos, J.A., 2013. Phenotyping common beans for adaptation to drought, *Frontiers in Physiology*, 4, Article 35. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00035>
6. Begum, N., Qin, C., Ahanger, M.A., Raza, S., Khan, M.I., Ashraf, M., Ahmed, N. and Zhang, L., 2019. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance', *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 1068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
7. Ben Mrid, R., El Omari, N., Balahbib, A., Bakrim, S., Abdelouahid, D.E., Zengin, G., Bouyahya, A. and Bnouham, M., 2022. Biofertilizers as a sustainable tool for improving soil fertility and crop productivity: Current status and future perspectives', *Sustainability*, 14(23), Article 15849.
8. Bouain, N., Shahzad, Z., Rouached, A., Khan, G. A., Berthomieu, P., Abdelly, C., ... & Rouached, H. (2014). Phosphate and zinc transport and signalling in plants: toward a better understanding of their homeostasis interaction. *Journal of experimental botany*, 65(20), 5725–5741.
9. Bremner, J.M., 1996. Nitrogen-total, in Sparks, D.L. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, pp. 1085–1122. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37>
10. Cakmak, I., 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification, *Plant and Soil*, 302, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3>
11. Campbell, D.C. and Kondra, Z.P., 1978. Relationships among growth patterns, yield components and yield of rapeseed', *Canadian Journal of Plant Science*, 58, pp. 87–93. <https://doi.org/10.4141/cjps78-013>
12. Choi, J., Summers, W. and Paszkowski, U., 2018. Mechanisms underlying establishment of arbuscular mycorrhizal symbioses, *Annual Review of Phytopathology*, 56, pp. 135–160.
13. Daemo, B.B., Wolancho, G.B. and Wakalto, D.D., 2024. Determination of the appropriate blended inorganic fertilizer rate recommendation for the optimal common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grain yield and profitability in the Dawuro Zone, Ethiopia. *International Journal of Agronomy*, 2024, 7169608. <https://doi.org/10.1155/2024/7169608>
14. Dapaah, H.K., McKenzie, B.A. and Hill, G.D., 2000. Influence of sowing date on phenological development and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Canterbury, New Zealand *Journal of Crop and Horticultural Science*, 28, pp. 1–9.
15. Gianquinto, G., Abu-Rayyan, A., Di Tola, L., Piccotino, D., & Pezzarossa, B. (2000). Interaction effects of phosphorus and zinc on photosynthesis, growth and yield of dwarf bean grown in two environments. *Plant and Soil*, 220(1), 219–228.
16. Heinrich, A., Sullivan, D. and Peachey, E., 2013. Improving fertilizer P and N

- use efficiency in sweet corn. Research Report to the Oregon Processed Vegetable Commission.
17. Hemmati, A., 2004. Study the application of micronutrients in yield and quality of pinto bean. Final Research Report No. 1192. Tehran: Soil and Water Research Institute. (In Persian).
 18. Hemmati, A. and Nasrollahi, Kh., 2009. Determination of phosphorus and potassium requirement for Prosper white bean line of Jules. Final Research Report No. 88/638. Tehran: Soil and Water Research Institute. (In Persian).
 19. Hemmati, A., Feizian, M., Asadi Rahmani, H. and Azizi, Kh., 2017. The effects of rhizobium bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on water use efficiency and yield of common bean under drought stress conditions. PhD dissertation. Khorramabad: Lorestan University, Iran.
 20. Hemmati, A., Barkhordar, M. and Hemmati, S., 2020. Effect of Rhizobium (*R. leguminosarum* bv. *phaseoli*) and arbuscular mycorrhizal fungi on yield and decreasing nitrogen application of pinto bean in Fars Province. Final Research Report No. 57885. Tehran: Soil and Water Research Institute. (In Persian).
 21. Henson, R.A. and Bliss, F.A., 1991. Effects of N fertilizer application timing on common bean production, *Fertilizer Research*, 29, pp. 133–138. <https://doi.org/10.1007/BF01048989>
 22. Jalal, A., Mortinho, E.S., Oliveira, C.E.S., Fernandes, G.C., Furlani Junior, E., Lima, B.H., Moreira, A., Nogueira, T.A.R., Galindo, F.S. and Teixeira Filho, M.C.M., 2023. Nano-zinc and plant growth-promoting bacteria is a sustainable alternative for improving productivity and agronomic biofortification of common bean', *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(77).
 23. Jarak, M., Jafari, T.H. and Djuric, S., 2012. Plant growth-promoting rhizobacteria in bean production, *Acta Horticulturae*, 960, pp. 409–415. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.960.58>
 24. Jarak, M., Mrkovacki, N., Bjelic, D., Josic, D., Hajnal-Jafari, T. and Stamenov, D., 2012. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on growth and yield of bean', *African Journal of Microbiology Research*, 6(11), pp. 2784–2788. <https://doi.org/10.5897/AJMR11.1406>
 25. Jithesh, T., James, E.K., Iannetta, P.P.M., Howard, B., Dickin, E. and Monaghan, J.M., 2024. Recent progress and potential future directions to enhance biological nitrogen fixation in faba bean (*Vicia faba* L.), *Plant-Environment Interactions*, 5(3), e10145. <https://doi.org/10.1002/pei3.10145>
 26. Kader, M.A., Mian, M.H. and Hoque, M.S., 2002. Effects of Azotobacter inoculant on the yield and nitrogen uptake by wheat, *Journal of Biological Sciences*, 2(4), pp. 259–261.
 27. McMaster, G.S. and Wilhelm, W.W., 1997. Growing degree-days: One equation, two interpretations, *Agricultural and Forest Meteorology*, 87, pp. 291–300. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0)
 28. Merkeb, F. and Yoseph, T., 2024. Improving nutritional values and yield in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars via foliar application of zinc and iron fertilizers. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 10(2), e70004. <https://doi.org/10.1002/cft2.70004>
 29. Nyoki, D. and Ndakidemi, P.A., 2021. Will phosphate bio-solubilization stimulate biological nitrogen fixation in grain legumes, *Frontiers in Agronomy*, 3, 637196. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.637196>
 30. Onyango Ogutu, P., 2013. Effect of integrated nutrient management on growth and yield of navy bean (*Phaseolus vulgaris* L.). MSc thesis. Nairobi: University of Nairobi, Kenya.
 31. Ozbahce, A. and Zengin, M., 2014. Effects of foliar and soil applications of different manganese fertilizers on yield and net return of bean, *Journal of Plant Nutrition*, 37(2), pp. 161–171.
 32. Phillips, J.M. and Hayman, D.S., 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection, *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), pp. 158–161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
 33. Prasad, P.V.V., Boote, K.J., Allen Jr, L.H. and Thomas, J.M., 2002. Effects of elevated temperature and carbon

- dioxide on seed-set and yield of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.), *Global Change Biology*, 8(8), pp. 710–721. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00518.x>
34. Qodsevali, A. R. M., Mokhtarian, H., Bakhsh Abadi, M. & Nematshahi, M., 2015. Investigation of engineering properties and optimization of 1000 kernel mass of chickpea by genetic algorithm. *Journal of Research and Innovation in Food Science and Technology*, 7, 1-13.
37. Reed, S.T. and Martens, D.C., 1996. Copper and zinc, in Sparks, D.L. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, pp. 703–722. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c23>
38. Reinprecht, Y., Schram, L., Marsolais, F., Smith, T.H., Hill, B. and Pauls, K.P., 2020. Effects of nitrogen application on nitrogen fixation in common bean production', *Frontiers in Plant Science*, 11, Article 1172. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01172>
39. Sadeghi, S., Heidari, G. and Sohrabi, Y., 2015. Effect of biological fertilizer and fertilization management on some growth indices of two maize varieties', *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 25(3), pp. 43–60.
40. Shaharoona, B., Arshad, M. and Zahir, Z.A., 2006. Effect of plant growth promoting rhizobacteria containing ACC-deaminase on maize (*Zea mays* L.) growth under axenic conditions and on nodulation in mung bean (*Vigna radiata* L.), *Letters in Applied Microbiology*, 42(2), pp. 155–159.
41. Shaharoona, B., Arshad, M., Zahir, Z.A. and Khalid, A., 2006. Performance of *Pseudomonas* spp. containing ACC-deaminase for improving growth and yield of maize (*Zea mays* L.) in the presence of nitrogenous fertilizer, *Soil Biology and Biochemistry*, 38(9), pp. 2971–2975.
42. Sharma, S., Compant, S., Reddy, M.S. and Kaushal, R., 2023. Microbial consortia for sustainable agriculture: Current status and future perspectives, *Frontiers in Microbiology*, 14, Article 1184562. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1184562>
43. Silva, E.M., Lacerda, J.J.J., Silva, L.H.C., 2022. Agronomic practices to increase the yield and quality of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.): A systematic review, *Agronomy*, 12(2) <https://doi.org/10.3390/agronomy12020271>
44. Smith, S.E., Jakobsen, I., Grønlund, M. and Smith, F.A., 2011. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition, *Plant Physiology*, 156, pp. 1050–1057. <https://doi.org/10.1104/pp.111.174581>
45. Smith, S.E. and Smith, F.A., 2011. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales, *Annual Review of Plant Biology*, 62, pp. 227–250.
46. Smith, S.E. and Smith, F.A., 2011. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth, *Plant and Soil*, 348, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0985-6>
47. Summerfield, R.J., Huxley, P.A. and Minchin, F.R., 1991. Plant and crop modelling: The need for improved crop weather relationships, *Agricultural and Forest Meteorology*, 56, pp. 1–15.
48. Snyder, R.L., 1985. Hand calculating degree days, *Agricultural and Forest Meteorology*, 35(1–4), pp. 353–358. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(85\)90095-9](https://doi.org/10.1016/0168-1923(85)90095-9)
49. Vance, C.P., Uhde-Stone, C. and Allan, D.L., 2003. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource, *New Phytologist*, 157, pp. 423–447.
50. Wang, E., Martre, P., Zhao, Z., Ewert, F., Maiorano, A., Rötter, R.P. and Asseng, S., 2017. The uncertainty of crop yield projections is reduced by improved temperature response functions, *Nature Plants*, 3, Article 17102. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.102>
51. Yarnia, M., Soltani Bouljak, M., Bolouri, P. and Tolay, İ., 2024. Zinc and manganese effect seed quality and germination in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 50(1), pp.154–168.

- <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3170>.
52. Yousefi, Z., Sharifi, P. and Rabiee, M., 2023. Effect of foliar application of zinc and iron on seed yield and yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Iranian Journal of Seed Research. AGRIS
53. Zewdie, T. and Hassen, E., 2021. Review on effects of phosphorus fertilizer rates on growth, yield components and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.), Journal of Current Research in Food Science, 2(1), pp. 34–39.
54. Zoffoli, B.C., Brito, L.F., Stralio, R. and Araújo, A.P., 2021. Early nitrogen supplementation stimulates the nodulation and growth of common bean plants inoculated with rhizobium', Acta Scientiarum. Agronomy, 43, e55105. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v43i1.55105>