J. Crop Prod. Process. 2026, 16(2), 19-36; DOI: 10.47176/jcpp.16.2.38591

Journal of Crop Production and Processing

Journal homepage: https://jcpp.iut.ac.ir/

Original Article

Effects of Golden Bio-Phosphate Fertilizer and Mineral Phosphorus on Quantitative and Qualitative Performance and Energy Efficiency Indices of Two Pinto Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Cultivars

Fereshteh Shahbazian, Shahrokh Jahanbin, Alireza Khoshroo*, Hojatollah Latifmanesh, Hamid Alahdadi

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

Extended Abstract:

Introduction: Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is one of the most important grain legumes in human nutrition and agricultural systems of Iran, owing to its high protein and carbohydrate content as well as its ability to symbiotically fix atmospheric nitrogen. This crop plays a significant role in cropping patterns of semi-arid and temperate regions. However, achieving high yield and desirable grain quality in common bean is strongly dependent on appropriate nutrient management. Phosphorus is a vital macronutrient involved in key physiological processes such as energy transfer (ATP), root development, photosynthesis, and reproductive growth. In the calcareous soils of Iran, a considerable proportion of applied phosphorus becomes chemically fixed by calcium, iron, and aluminum compounds, thereby reducing its availability to plants and decreasing the efficiency of chemical phosphorus fertilizers such as triple superphosphate. Although chemical phosphorus fertilizers can partially alleviate phosphorus deficiency, their long-term application may lead to reduced fertilizer use efficiency, increased production costs, soil degradation, and environmental pollution. In this context, the use of bio-phosphorus fertilizers such as Bio-Phosphate Gold, containing sulfur-oxidizing bacteria of the genus *Thiobacillus*, has gained attention as a sustainable alternative. These microorganisms enhance phosphorus solubility and availability through rhizosphere acidification and the production of organic and mineral acids. Integrating bio-phosphorus fertilizers with mineral phosphorus sources may improve phosphorus uptake, crop performance, grain quality, and energy-use efficiency. Therefore, the present study aimed to evaluate the effects of integrated chemical and biological phosphorus nutrition on yield, yield components, grain quality, and energy efficiency indices of two common bean cultivars.

Materials and Methods: This experiment was conducted at the research farm of Yasouj University, Yasuj, southwest of iran, using a split-plot arrangement within a randomized complete block design with three replications. Phosphorus fertilization treatments were assigned to main plots and consisted of seven levels: control without phosphorus fertilizer (T1); application of 100 and 200 kg ha^{-1} triple superphosphate (T2 and T3); application of 300 kg ha^{-1} Bio-Phosphate Gold combined with 3,600 and 7,200 g ha^{-1} *Thiobacillus* bacteria (T4 and T5); and two integrated treatments, T2+T4 and T2+T5. Two common bean cultivars (namely, Sadri and E10) were allocated to subplots. Measured traits included soil pH, leaf and grain phosphorus content, plant length, pods/plant, grains/plant, 100-seed weight, grain yield, plant aboveground dry mass, and harvest index. Grain quality parameters including grain starch, sugars, and protein concentrations were also determined. Energy indices—energy use efficiency, energy productivity, and net energy—were calculated based on total energy inputs and outputs. Data were statistically analyzed using SAS software (version 9.1), and mean comparisons were performed using the LSD test at the 5% probability level.

Results and Discussion: The results indicated that integrated chemical and biological phosphorus fertilization significantly affected all measured traits. The lowest soil pH was observed in the combined treatment T2+T5, showing a 26.5% reduction compared with the control. This decrease in soil pH can be attributed to the activity of *Thiobacillus*

Received: Feb. 08, 2026; Revised: Apr. 21, 2026; Accepted: Apr. 27, 2026; Published Online: July. 18, 2026.
* Corresponding Author: khoshroo@yu.ac.ir

Journal of Crop Production and Processing

Journal homepage: https://jcpp.iut.ac.ir/

bacteria and the production of organic and mineral acids, which improved rhizosphere chemical conditions and enhanced phosphorus availability. The highest leaf and grain phosphorus contents were recorded in treatments T2+T5 and T2+T4, respectively, representing increases of 200% and 143% compared with the control. Improved phosphorus nutrition was directly reflected in enhanced yield components, as the T2+T5 treatment resulted in the highest pods/plant, grains/plant, and 100-seed weight. These improvements ultimately led to significant increases in grain yield (87.62%) and harvest index (36.47%) relative to the control. From a quality perspective, grain starch and sugars concentrations were also positively influenced by integrated phosphorus fertilization, indicating enhanced synthesis and accumulation of photosynthates in the grain. Energy indices were significantly affected by fertilization treatments, with the highest energy use efficiency, energy productivity, and net energy obtained under the T2+T5 treatment. These findings demonstrate that integrated phosphorus nutrition not only enhances yield performance but also improves the efficiency of energy-intensive agricultural inputs. Furthermore, cultivar comparisons revealed that the Sadri cultivar outperformed E10 in most yield-related, quality, and energy traits, which may be attributed to its superior genetic capacity for phosphorus uptake and utilization.

Conclusions: Overall, the results of this study demonstrate that integrating chemical phosphorus fertilizer (triple superphosphate) with biological phosphorus fertilizer (Bio-Phosphate Gold containing *Thiobacillus* bacteria) is an effective strategy for improving phosphorus nutrition, enhancing grain yield and quality, and optimizing energy efficiency in common bean cultivation. The combined treatment T2+T5 proved to be the most effective, as it reduced soil pH, increased phosphorus uptake, and achieved the highest yield and energy productivity. Moreover, selecting an appropriate cultivar, particularly the Sadri cultivar, in conjunction with integrated phosphorus management can serve as a sustainable approach to improving productivity, reducing reliance on chemical fertilizers, and minimizing environmental impacts in common bean production systems.

Keywords: Energy productivity, Integrated phosphorus nutrition, Energy use efficiency, Grain carbohydrate, Grain starch

How to Cite: Shahbazian F., Jahanbin S., Khoshroo A., Latifmanesh H., Alahdadi Hamid., Effects of golden bio-phosphate fertilizer and mineral phosphorus on quantitative and qualitative performance and energy efficiency indices of two pinto bean cultivars (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Crop Prod. Process*. 2026, 16(2), 19-36 (*In Persian*). DOI: 10.47176/jcpp.16.2.38591.

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by Isfahan University of Technology press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی، ۱۴۰۵، دوره ۱۶، شماره ۲، صص. ۳۶-۱۹، DOI: 10.47176/jcpp.16.2.38591

نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی

صفحه خانگی نشریه: https://jcpp.iut.ac.ir/

مقاله پژوهشی

تأثیر کودهای بیوفسفات طلایی و فسفر معدنی بر عملکرد کمی و کیفی و شاخص‌های کارایی انرژی دو رقم لوبیا چیتی

فرشته شهبازیان، شاهرخ جهانبین، علیرضا خوشرو*، حجت‌اله لطیف‌منش و حمید اله‌دادی

چکیده– به‌منظور ارزیابی تغذیه تلفیقی کودهای فسفره بر عملکرد، کیفیت دانه و شاخص‌های کارایی انرژی دو رقم لوبیا چیتی، آزمایشی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه یاسوج به‌صورت کرت‌های یک‌بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، در سه تکرار اجرا شد. تغذیه کودی به‌عنوان عامل اصلی شامل شاهد (T1)، ۱۰۰ یا ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل (T2, T3)، ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار بیوفسفات طلایی به‌همراه ۳۶۰۰ یا ۷۲۰۰ گرم تیوباسیلوس (T4, T5) و ترکیب‌های T2+T4 و T2+T5 بود. ارقام صدری و E10 نیز به‌عنوان عامل فرعی انتخاب شدند. نتایج نشان داد تیمار T2+T5 با کاهش ۵/۲۶ درصد نسبت به شاهد کمترین اسیدیته خاک را سبب شد. بیشترین محتوای فسفر برگ و دانه به‌ترتیب از تیمارهای T2+T5 و T2+T4 حاصل شد که نسبت به شاهد افزایش ۲ برابر و ۱/۴۳ برابر را به‌همراه داشت. همچنین تیمار T2+T5 تعداد غلاف در بوته (۳۶/۱ درصد)، تعداد دانه در بوته (۴۳/۵ درصد)، وزن صد دانه (۱۵ درصد)، عملکرد دانه (۶۲/۹ درصد) و شاخص برداشت (۴۷/۳ درصد) را در مقایسه با شاهد بهبود بخشید. درصد نشاسته و کربوهیدرات نیز متاثر از همین تیمار به میزان ۶۴/۳ درصد و ۴۶/۱ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. بیشترین کارایی مصرف انرژی، بالاترین بهره‌وری انرژی و بیشترین انرژی خالص نیز مربوط به تغذیه ترکیبی T2+T5 بود. از سوی دیگر رقم صدری در اغلب صفات نسبت به E10برتری داشت. بر اساس نتایج مدیریت تلفیقی فسفر زیستی و معدنی (T2+T5) همراه با انتخاب رقم صدری، راهبردی کارآمد برای افزایش بهره‌وری زراعی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در کشت لوبیا چیتی و کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری انرژی، تغذیه تلفیقی فسفر، کارایی مصرف انرژی، کربوهیدرات دانه، نشاسته دانه

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹، بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۷، اولین انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷

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

*: نویسنده مسئول، رایانامه: khoshroo@yu.ac.ir

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۳ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

محتوای پروتئینی حبوبات (۳۲–۱۸ درصد) و لزوم تامین آن در زنجیره غذایی بشری، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است (۵۱). لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) از حبوبات مهم در سامانه‌های زراعی کشور است که در سطح زیر کشت ۸۱/۲ هزار هکتار، تولیدی معادل ۱۵۱ هزار تن را در پی دارد (۱۳). با این وجود به‌دلیل حساسیت این گیاه به تنش‌های محیطی (۹)، تلاش در جهت تامین فقر تغذیه‌ای خاک ضرورتی دوچندان می‌یابد.

فسفر به‌عنوان یکی از عناصر پرمصرف، حضور موثری در سوخت‌وساز پایه درشت‌مولکول‌های کربوهیدراتی و سامانه انتقال انرژی دارد. این مشارکت ناشی از نقش ساختاری فسفر در ATP، DNA، RNA و فسفولیپیدهای غشایی است که توجیه‌گر تاثیر بالقوه آن در فرآیندهای متابولیک نظیر تقسیم، توسعه و گسترش سلولی و همچنین در تنفس و فتوسنتز می‌باشد (۱۷). از این‌رو منابع فسفر شیمیایی، از جمله سوپر فسفات تریپل، به‌جهت حلالیت بالا و قابلیت تأمین سریع فسفر، به‌طور گسترده در کشت حبوبات مصرف می‌شود. اما امروزه با ظهور کشاورزی پایدار و نیاز به حفظ بوم‌نظام زراعی در چشم‌اندازی وسیع‌تر به‌جای بازخوردهای زودگذر، تلاش پژوهشگران معطوف به ارائه راه‌حل‌های زیست‌سازگارتر شده است. در این زمینه استفاده از کودهای زیستی که حاوی یک یا چند میکروارگانیسم خاک‌زی بوده (۵) و قابلیت رهاسازی یون‌های پرمصرف از ترکیبات نامحلول را دارند (۲۶)، گسترش یافته است. بیوفسفات طلایی ترکیبی از منبع معدنی فسفر همراه با حل‌کننده‌های فسفات (مایه تلقیح تیوباسیلوس) است که تاکنون تحقیقات اندکی را منحصرا به خود اختصاص داده است. شواهد پژوهشگران حاکی از افزایش قابلیت دسترسی فسفر و بهبود خصوصیات زیستی خاک، به‌دنبال مصرف این کود است (۲). تاثیر مثبت و معنی‌دار بیوفسفات طلایی به‌همراه باکتری‌های حل‌کننده فسفات بر محتوای فسفر و وزن خشک در ریشه و اندام هوایی کلزا (٦)، بهبود pH خاک (۱۸) و عملکرد و اجزای عملکرد (۱۹) در سیب‌زمینی و افزایش عملکرد دانه، علوفه و ماده خشک در ذرت (۵۲) گزارش شده است. از سوی دیگر در دیدگاهی جامع‌نگر نقش موثر تغذیه تلفیقی فسفره بر حبوبات نیز مورد توجه بوده است. در همین راستا حسین‌زاده و پیرزاد (٢٤) مطرح نموده‌اند که مصرف نصف کود شیمیایی فسفاته + فسفات بارور ۲ + اسید هیومیک بیشترین میزان اجزای عملکرد و عملکرد لوبیا چیتی را نشان داده است. همچنین تاثیر باکتری‌های باسیلوس و سودوموناس بر صفات فیزیولوژیک لوبیا سفید (۳۰) و کودهای بیوسوپرفسفات و فسفات بارور ۲ بر صفات عملکردی لوبیا قرمز (۵۳) نیز بیان شده است.

علاوه بر تامین نیازهای تغذیه‌ای، فرآیند رشد و نمو گیاهان متاثر از عوامل دیگری نیز می‌باشد که حداکثر رشد و عملکرد مطلوب را در پیوند با مجموعه‌ای از شرایط محیطی به ظهور می‌رساند. بنابراین ارقام متفاوت یک گونه نیز اختلافات زیادی را در مواجهه با محیط‌های گوناگون بروز می‌دهند (۱۵). به همین دلیل برهم‌کنش بین ژنوتیپ و محیط موضوعی است که می‌تواند پتانسیل ارزش ژنتیکی ارقام را در توصیه‌های به‌زراعی پنهان سازد (۱۰). یکی از راهکارها بررسی خصوصیات زراعی است که رابطه هدفمندی با عملکرد ایجاد نموده‌اند؛ از این‌رو چرخه گزینش و حذف برای تجمع ژن‌های مطلوب در معرفی ارقام اصلاحی اجرا می‌شود (٤). در بررسی ٥٦ ژنوتیپ لوبیا چشم‌بلبلی مشاهده شد که زیست‌توده، اجزای عملکرد و طول غلاف دارای بیشترین ضریب تغییرات فنوتیپی هستند (٤٠). نتایج تحقیقات رحیمی و همکاران (٤١) در لوبیا چیتی، هاشمی جزی (۲۱) در لوبیا سفید و رحمانی و همکاران (٤٢) در لوبیا قرمز نیز تنوع قابل‌توجهی را در بین ژنوتیپ‌ها و ارقام مربوطه عنوان کرده‌اند که می‌توان از این تنوع در برنامه‌های اصلاحی استفاده کرد.

ارزیابی کارایی مصرف انرژی و توازن میان انرژی ورودی و خروجی راهبرد اساسی نظام‌های زراعی است. به‌طور کلی، سامانه‌هایی که قادر به تولید محصول بیشتر در برابر مصرف

انرژی کمتر باشند، نقش ارزشمندی در ارتقای پایداری اکولوژیک و کاهش آثار منفی زیست‌محیطی خواهند داشت (۳۷). با استفاده از ابزارهای نوین ارزیابی انرژی، می‌توان سهم هر نهاده را در فرآیند تولید مشخص و جایگاه آن را در راندمان کلی سامانه بررسی کرد. پژوهش‌های مشابه در نظام‌های تولید محصولات باغی و زراعی کشور بیانگر آن است که انتخاب گونه و شیوه مدیریت نهاده‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش وابستگی به نهاده‌های غیرتجدیدپذیر داشته است (۲۷).

با در نظر گرفتن احتیاجات تغذیه‌ای لوبیا چیتی و همچنین توجه به واکنش متفاوت ارقام در شرایط محیطی، این پژوهش به ارزیابی اثر منابع زیستی و معدنی فسفره بر عملکرد کمی و کیفی دو رقم لوبیا چیتی می‌پردازد. برآورد نهایی آزمایش بر مبنای شاخص‌های انرژی جمع‌بندی می‌شود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۳۹۱ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه یاسوج و در ارتفاع ۱۸۷۰ متر از سطح دریا اجرا شد. آزمایش به صورت کرت‌های یک‌بار خرد شده (Split-plot) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. فاکتور اصلی شامل هفت تیمار تغذیه‌ای بود: ۱- تغذیه کودی به‌عنوان عامل اصلی شامل شاهد (T1)، ۲- ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل (T2)، ۳- ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل (T3)، ٤- ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار بیوفوسفات طلایی همراه با ۳٦۰۰ گرم باکتری تیوباسیلوس (T4)، ٥- ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار بیوفسفات طلایی با ۷۲۰۰ گرم تیوباسیلوس (T5)، ٦- ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل به همراه ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار بیوفسفات طلایی با ۳٦۰۰ گرم باکتری تیوباسیلوس (ترکیب‌های T2+T4) و ۷- ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل به‌همراه ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار بیوفسفات طلایی با ۷۲۰۰ گرم باکتری تیوباسیلوس (ترکیب‌های T2+T5). فاکتور فرعی نیز شامل دو رقم لوبیا چیتی (صدری و E10) بود.

رقم صدری لوبیا چیتی دارای عادت رشد نامعین (رونده) بوده و در پژوهش‌های به‌نژادی کاربرد گسترده‌ای دارد. این رقم نسبت به ویروس پیچیدگی برگ لوبیا (BCMNV) حساس بوده، اما در مقابل ویروس موزاییک معمولی لوبیا (BCMV) و ویروس موزاییک خیار (CMV) متحمل است. لاین امیدبخش E10 پتانسیل عملکردی قابل رقابت با رقم صدری داشته و برای مناطق معتدل- سرد مطلوب است، اما اطلاعات جامع و کافی از واکنش آن به تنش‌ها و بیماری‌ها در منابع موجود در دسترس نیست. بیوفسفات طلایی مورد استفاده، حاوی ۲۵ درصد ماده آلی، ۲۰ درصد گوگرد، ۱۵ درصد سولفات روی، ٤۰ درصد خاک فسفات و مقادیر مشخصی پودر باکتری تیوباسیلوس بود. بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی شهر یاسوج، حداکثر مطلق درجه حرارت در ماه‌های تیر، شهریور و مرداد به‌ترتیب ۳٥/۲، ۳٥/٤ و ۳٦/٤ درجه سانتی‌گراد و حداقل مطلق درجه حرارت در ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند به‌ترتیب ۱/٤-، ٥/٦-، ۷/٤- و ٤/۰- درجه سانتی‌گراد بود. حداکثر میزان بارندگی نیز در فروردین ماه ۲۰۳ میلی‌متر و حداقل میزان بارندگی در ماه‌های مرداد، شهریور و بهمن به‌ترتیب ۰/۳، ۰/۱ و ۰/٤ میلی‌متر گزارش شد.

عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم، دیسک و تسطیح در اوایل خرداد انجام شد. جهت رعایت اصول طراحی، فاصله کرت‌های اصلی دو متر و کرت‌های فرعی یک متر در نظر گرفته شد و برای جلوگیری از اختلاط آب، اطراف هر کرت پشته ایجاد شد. نمونه‌برداری از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک مزرعه جهت تعیین نیازهای کودی انجام گرفت. براساس آزمون خاک (جدول ۱)، ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار به‌عنوان منبع نیتروژن استفاده شد که نیمی در زمان آماده‌سازی زمین و نیمی دیگر پس از استقرار گیاهچه‌ها به‌صورت سرک مصرف شد. کاشت در اول تیرماه انجام شد. هر کرت با ابعاد ۳/٥ × ۳ متر شامل پنج ردیف به فاصله ٥۰ سانتی‌متر بود. فاصله بوته‌ها روی

جدول ۱. خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل اجرای آزمایش.

بافت خاک	pH	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	کربن آلی (درصد)	نیتروژن (درصد)	فسفر (میلی‌گرم بر گرم)	پتاسیم (میلی‌گرم بر گرم)
لومی رسی	۷/٦	۰/٦	۱/۰	۰/۱۰	۳۲/۸	۳۷٤

ردیف ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (تراکم ٤۰ بوته در مترمربع). کودهای شیمیایی و زیستی فسفردار به‌صورت نواری و در ناحیه ریزوسفر اولیه، کمی پایین‌تر از بذر استفاده شدند (جهت اجرا، باکتری قبل از کاشت با کود بیوفسفات مخلوط شد). آبیاری به روش غرقابی و با مدیریت یکنواخت در تمام تیمارها انجام شد؛ بدین صورت که تا یک ماه پس از کاشت هر چهار روز یک‌بار و پس از آن هر هفت روز یک‌بار صورت گرفت و ده روز پیش از برداشت آبیاری قطع شد. تمام عملیات داشت شامل وجین دستی علف‌های هرز برای همه کرت‌ها به‌طور یکنواخت انجام گرفت.

اندازه‌گیری اسیدیته خاک: به‌منظور بررسی اثر تیمارهای کودهای زیستی و شیمیایی فسفر بر تغییرات اسیدیته خاک، در مرحله گلدهی از هر کرت نمونه مرکب خاک تهیه شد. نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، در شرایط هوا خشک شده و پس از عبور از الک ۲ میلی‌متری برای اندازه‌گیری pH آماده شدند. عصاره خمیر اشباع خاک با استفاده از روش عصاره‌گیری تحت مکش تهیه شد. پس از صاف کردن عصاره با کاغذ صافی Whatman No.42، مقدار pH عصاره خمیر اشباع با استفاده از دستگاه pH متر (مدل ٦۲۰) اندازه‌گیری و ثبت شد (٤٤).

اندازه‌گیری فسفر برگ و دانه: نمونه‌گیری برای فسفر برگ در مرحله اواسط پر شدن دانه و برای فسفر دانه در مرحله رسیدگی برداشت انجام گرفت. پس از تهیه عصاره اولیه به روش هضم خشک، محتوای فسفر به روش کالریمتری (رنگ زرد مولیبدات- وانادات) و به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر (Lambda EZ 210) در طول موج ٤۲۰ نانومتر یادداشت شد (۱۱).

اندازه‌گیری صفات زراعی: طول بوته‌ها از سطح زمین تا انتهای شاخه اصلی، با در نظر گرفتن اثر حاشیه‌ای و با متوسط ۱۰ بوته تصادفی از هر کرت در مرحله اواسط پر شدن دانه اندازه‌گیری شد. در مرحله رسیدگی برداشت نیز تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف (که در این آزمایش اثر معنی‌داری درپی نداشت) و تعداد دانه در بوته از ۱۰ بوته تصادفی هر کرت ثبت شد. در همین مرحله با حذف ۰/۵ متر از دو طرف هر کرت، سطح یک مترمربع از سه ردیف میانی به‌صورت کف‌بر برداشت شد. پس از خشک شدن کامل نمونه‌های برداشت‌شده در هوای آزاد، وزن کل بوته‌ها به‌عنوان عملکرد زیستی تعیین شدند و سپس با جداسازی دانه‌ها، وزن صد دانه و عملکرد دانه اندازه‌گیری شد. در نهایت شاخص برداشت از طریق نسبت عملکرد دانه به عملکرد زیستی محاسبه شد.

اندازه‌گیری پروتئین دانه: پروتئین‌های ذخیره‌ای شامل آلبومین، گلوبولین، پرولامین و گلوتلین بر اساس روش سامور (٤٤) تعیین شدند. ابتدا ۲۰۰ میلی‌گرم نمونه با ۱ میلی‌لیتر آب دو بار تقطیر شده شیکر و سانتریفیوژ شد و سوپرناتانت به‌دست آمده برای آلبومین جمع‌آوری شد، سپس به همان نمونه محلول NaCl ۵ مولار اضافه و مراحل استخراج برای گلوبولین تکرار شد. به نمونه باقی‌مانده اتانول خالص برای پرولامین و در نهایت بافر فسفات ۰/۲ مولار (pH 7) برای گلوتلین اضافه شد و مراحل شیکر و سانتریفیوژ مجدداً انجام شد. مقدار پروتئین کل هر نمونه از جمع پروتئین‌های استخراج شده در چهار گروه محاسبه شد.

جدول ۲. مقدار انرژی عوامل و نهاده‌های مصرفی در مزرعه لوبیاچیتی

منابع انرژی	واحد	مقدار مصرف در هکتار	میزان انرژی هر واحد (مگاژول)	میزان انرژی در هکتار (مگاژول بر هکتار)
کارگر	ساعت	۱۳۲	۱/۹۶	۲۶۰
ماشین‌آلات	ساعت	۳	۶۲/۷	۱۸۸
دیزل	لیتر	۴۸	۵۶/۳۱	۲۷۰۲
آب	مترمکعب	۷۷۶۴	۱/۰۲	۷۹۱۹
الکتریسیته	کیلووات ساعت	۴۱۶	۱۱/۸	۴۹۰۸
بذر	کیلوگرم	۱۱۳	۲۵	۲۸۳۵
نیتروژن	کیلوگرم	۴۶	۲۰/۱۰	۹۲۴
بیوفسفات طلایی	کیلوگرم	۳۰۰	۵/۰۳۴	۱۵۱۰
باکتری تیوباسیلوس	کیلوگرم	۳/۶ ، ۷/۲	۶/۶۷	۲۴/۰ ، ۴۸/۱
سوپرفسفات تریپل	کیلوگرم	۱۰۰ ، ۲۰۰	۱۳/۳	۱۳۳۵ ، ۲۶۷۰
خاک فسفات	کیلوگرم	–	۴	–
ماده آلی	کیلوگرم	–	۰/۵	–
سولفات روی	کیلوگرم	–	۲۰/۹	–
گوگرد	کیلوگرم	–	۱/۱۲	–

اندازه‌گیری کربوهیدرات کل دانه: ۱۰۰ میلی‌گرم نمونه پودر شده با ۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲/۵ نرمال به‌مدت ۳ ساعت در حمام آب جوش هیدرولیز شد. پس از رساندن حجم به ۱۰۰ میلی‌لیتر و سانتریفیوژ، ۱ میلی‌لیتر از سوپرناتانت برداشته شد و با ٤ میلی‌لیتر محلول آنترون (۲۰۰ میلی‌گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۹۵ درصد) واکنش داده و ۸ دقیقه در حمام آب جوش قرار گرفت. جذب نوری در طول موج ٦۳۰ نانومتر به‌وسیله اسپکتروفتومتر ثبت شد (۳۵).

اندازه‌گیری نشاسته دانه: ۰/۵ گرم نمونه پودر شده با اتانول ۸۰ درصد برای حذف قندهای آزاد، سانتریفیوژ شد. ته‌نشین با اتانول شستشو و سپس با ٤ میلی‌لیتر محلول آنترون (۲۰۰ میلی‌گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۹۵ درصد) به‌مدت ۲۰ دقیقه در حمام آب جوش واکنش داده شد. پس از افزودن آب و اسید پرکلریک، نمونه‌ها سانتریفیوژ و سوپرناتانت به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. ۰/۲ میلی‌لیتر از هر نمونه با آب مقطر به ۱ میلی‌لیتر رسانده و با ٤ میلی‌لیتر معرف آنترون واکنش داده شد، سپس ۸ دقیقه در حمام آب جوش قرار گرفت و جذب نوری به کمک اسپکتروفتومتر در طول موج ٦۳۰ نانومتر ثبت شد (۳۵).

اندازه‌گیری شاخص‌های انرژی: ابتدا میزان انرژی ورودی از طریق نهاده‌های مصرفی بر اساس ضرایب انرژی استاندارد محاسبه شد. در گام بعدی، برای هر نهاده مقدار انرژی معادل با استفاده از ضرایب انرژی مرجع به‌دست آمد (انرژی‌معادل = مقدار مصرف × ضریب انرژی مربوطه). ضرایب مورد استفاده در این پژوهش بر پایه منابع استاندارد انرژی در کشاورزی (۱۲) تعیین شد (جدول ۲). مجموع انرژی ورودی هر تیمار از جمع انرژی‌های معادل همه نهاده‌ها حاصل شد. انرژی خروجی نیز بر اساس عملکرد دانه و ضریب انرژی

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اسیدیته خاک، فسفر برگ و دانه و طول بوته تحت تأثیر کودهای فسفره و رقم در لوبیا چیتی

منابع تغییرات	درجه آزادی	اسیدیته خاک	فسفر برگ	فسفر دانه	طول بوته
تکرار	۲	۰/۰۳^{ns}	۰/۰۲^{ns}	۰/۰۰۰٤^{ns}	۷۲/۱^{ns}
کود فسفر	٦	۰/۰۵*	۰/۱٦**	۰/۱٦**	۵۹۸**
خطای اصلی	۱۲	۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۰۰٤	۸۹/۱
رقم	۱	۰/۰۰۳^{ns}	۰/۰۳^{ns}	۰/۰۵٦**	۱۹۳۳**
کود × رقم	٦	۰/۰۲^{ns}	۰/۰۰۷^{ns}	۰/۰۰۲^{ns}	۸/۱۲^{ns}
خطای فرعی	۱٤	/۰۱۰	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	٦٤/۰
ضریب تغییرات (درصد)		۲/۵	۲۱/۳	۱۲/۲	۸/۳٦

ns، * و **: به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد را نشان می‌دهد.

معادل لوبیاچیتی محاسبه شد. سپس شاخص‌های اصلی انرژی به شرح زیر به‌دست آمدند:

کارایی مصرف انرژی: از تقسیم انرژی خروجی (انرژی حاصل از عملکرد دانه) بر انرژی ورودی (کل انرژی نهاده‌ها) محاسبه شد (رابطه ۱). این شاخص نشان‌دهنده میزان انرژی تولیدی به‌ازای هر واحد انرژی مصرفی است (۱۲).

رابطه (۱)

$$\text{کارایی مصرف انرژی} = \frac{\text{انرژی خروجی}}{\text{انرژی ورودی}} = \sum_{\text{نهاده مصرفی}}^{i} \frac{\text{مقدار محصول تولیدی} \times \text{انرژی معادل لوبیاچیتی}}{\text{انرژی معادل آن} \times \text{مقدار مصرف هر نهاده}}$$

بهره‌وری انرژی: با تقسیم عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) هر یک از کرت‌ها بر کل انرژی مصرفی (مگاژول در هکتار) در به‌کارگیری نهاده‌ها محاسبه شد (رابطه ۲) و نشان‌دهنده میزان محصول تولیدی به ازای یک واحد انرژی مصرفی است (۱۲).

رابطه (۲)

$$\text{بهره‌وری مصرف انرژی} = \frac{\text{عملکرد خروجی}}{\text{انرژی ورودی}} = \sum_{\text{نهاده مصرفی}}^{i} \frac{\text{مقدار محصول تولیدی}}{\text{انرژی معادل آن} \times \text{مقدار مصرف هر نهاده}}$$

انرژی خالص: از تفاضل انرژی خروجی و انرژی ورودی به‌دست آمد. مقادیر مثبت انرژی خالص بیانگر کارا بودن مصرف انرژی در تیمار مربوطه است (۱۲).

در پایان محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 انجام گرفت و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

نتایج

اسیدیته خاک، فسفر برگ و دانه و طول بوته

نتایج تجزیه آماری نشان داد که اثر ساده کود فسفر بر اسیدیته خاک در سطح احتمال ۵ درصد و بر غلظت فسفر برگ و دانه و همچنین طول بوته در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. اثر ساده رقم نیز برای فسفر دانه و طول بوته در سطح احتمال ۱ درصد اختلاف معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). بر اساس مقایسه میانگین‌ها در سطوح مختلف تغذیه کودی، کم‌ترین اسیدیته خاک در تیمار ترکیبی T2+T5 مشاهده شد که در مقایسه با شاهد (عدم مصرف کود) کاهش ۵/۲٦ درصدی را بروز داد. بیشترین غلظت فسفر برگ و دانه به‌ترتیب در تیمارهای T2+T5 و T2+T4 حاصل شد که نسبت به شاهد به‌ترتیب افزایش ۲ و ۱/٤۳ برابری را به‌همراه داشتند. همچنین، بیشترین و کم‌ترین طول بوته به‌ترتیب به تیمار T2+T5 و تیمار شاهد اختصاص یافت که اختلافی معادل ۲٦/۱ درصد را نشان داد (جدول ٤). مقایسه میانگین‌های مربوط به ارقام نیز بیانگر برتری معنی‌دار رقم صدری نسبت به رقم E10 بود، به‌طوری‌که

جدول ٤. مقایسه میانگین اسیدیته خاک، فسفر برگ و دانه و طول بوته برای هر سطح کودهای فسفره در لوبیا چیتی

کودهای فسفره	اسیدیته خاک	فسفر برگ (درصد)	فسفر دانه (درصد)	طول بوته (سانتی‌متر)
T1	۷/۶۰^{a}	۰/۲۱^{e}	۰/۲۹^{d}	۸۸/۳^{cd}
T2	۷/۵۲^{ab}	۰/۳۳^{de}	۰/۳۷^{c}	۸۸/۳^{cd}
T3	۷/٤٤^{abc}	۰/۳۷^{cd}	۰/۵۳^{b}	۹۷/٦^{bc}
T4	۷/٤۱^{bcd}	۰/٤۸^{bc}	۰/۵٤^{b}	۹۷/۳^{bcd}
T5	۷/٤۰^{cd}	۰/۵٦^{ab}	۰/٦۷^{a}	۹۹/۵^{abc}
T2+T4	۷/۳۷^{cd}	۰/٦۳^{a}	۰/۷۱^{a}	۱۰۲^{abc}
T2+T5	۷/۲۰^{e}	۰/٦۵^{a}	۰/٦۹^{a}	۱۱۱^{a}

T1: شاهد، T2: ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل، T3: ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل، T4: ۳۰۰ کیلوگرم بیوفوسفات طلایی همراه با ۳٦۰۰ گرم پودر باکتری تیوباسیلوس در هکتار ، T5: ۳۰۰ کیلوگرم بیوفوسفات طلایی با ۷۲۰۰ گرم تیوباسیلوس، ، T2+T4: ۱۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل به همراه ۳۰۰ کیلوگرم بیوفوسفات طلایی و ۳٦۰۰ گرم تیوباسیلوس در هکتار و T2+T5: ۱۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل به همراه ۳۰۰ کیلوگرم بیوفوسفات طلایی با ۷۲۰۰ گرم تیوباسیلوس.

در هر ستون هر حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

جدول ۵. مقایسه میانگین اسیدیته خاک، فسفر برگ و دانه و طول بوته برای هر رقم در لوبیا چیتی

ارقام لوبیاچیتی	اسیدیته خاک	فسفر برگ (درصد)	فسفر دانه (درصد)	طول بوته (سانتی‌متر)
صدری	۷/۳۱^{a}	۰/٤۸^{a}	۰/۵۸^{a}	۱۰۲^{a}
E10	۷/٤^{a}	۰/٤۳^{a}	۰/۵۰^{b}	۸۹/۳^{b}

در هر ستون هر حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

فسفر دانه و طول بوته به‌ترتیب ۱٦ و ۱۵/۲ درصد در رقم صدری بیشتر از رقم E10 بود (جدول ۵).

اجزای عملکرد و عملکرد دانه

نتایج جدول ٦ نشان داد که اثر کود فسفر بر تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف، وزن صد دانه و عملکرد دانه در سطح احتمال ۱ درصد و بر عملکرد زیستی و شاخص برداشت در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. همچنین، اثر ساده رقم بر تعداد غلاف در بوته، عملکرد زیستی و شاخص برداشت در سطح احتمال ۵ درصد و بر تعداد دانه در بوته، وزن صد دانه و عملکرد دانه در سطح احتمال ۱ درصد تاثیر معنی‌داری داشت (جدول ٦). بر مبنای مقایسه میانگین‌ها، تیمار ترکیبی T2+T5 حداکثر میزان اکثر صفات زراعی را درپی داشت. از این رو این سطح تیماری در مقایسه با شاهد سبب افزایش ۳٦/۱ درصدی تعداد غلاف در بوته، ٤۳/٤ درصدی تعداد دانه در بوته، ۱۵ درصد وزن صد دانه، ٦۲/۸ درصدی عملکرد دانه و ٤۷/۳ درصدی شاخص برداشت شد. تنها برای عملکرد زیستی تیمار T2+T4 بیشترین میزان را به‌دنبال داشت و نسبت به شاهد افزایش ۱۳/۹ درصدی را به ثبت رساند. همچنین در خصوص صفت تعداد دانه در بوته بین تیمارهای ترکیبی و برای صفات تعداد غلاف در بوته و عملکرد دانه و زیستی، بین سطوح تیمارهای ترکیبی با تیمار صرفا زیستی T5 تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. برای شاخص برداشت نیز تیمارهای ترکیبی با تیمارهای T3, T4, T5 تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۷). از سوی دیگر، مقایسه میانگین ارقام نیز نشان‌دهنده برتری رقم صدری در تمام این صفات زراعی نسبت به رقم E10 بود.

جدول ٦. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات زراعی و عملکردی تحت تأثیر کودهای فسفره و رقم در لوبیا چیتی

منابع تغییرات	درجه آزادی	تعداد غلاف در بوته	تعداد دانه در بوته	وزن صد دانه	عملکرد دانه	عملکرد زیستی	شاخص برداشت
تکرار	٢	٠/٨٥^{ns}	٢٠/٥^{ns}	١/٥٠^{ns}	١٣٩٤٣*	١٠٨٨٣٠٥*	٠/٠٠٠٨^{ns}
کود فسفر	٦	٢٠/٩**	٤٧٥**	٣٠/٢**	٣٦٧٠٦٤**	٧١٣٤٣٣*	٠/٠٠٤٢*
خطای اصلی	١٢	١/٥٠	٣٣/٦	١/٦٩	١٦٣٧٧	١٥٥٤٨٠	٠/٠٠٠
رقم	١	٨/٥٩*	٢٧٥**	٣٨/١**	٢٧٣٦٢١**	١٧٥٢٧٧١*	٠/٠٣٤**
کود فسفر × رقم	٦	١/١٥^{ns}	٢٠/٨^{ns}	١/١٥^{ns}	١٤٥٦٦^{ns}	٨٧١٩٣^{ns}	٠/٠٠٠٣^{ns}
خطای فرعی	١٤	١/٤٤	٢٨/٠	١/٦١	١٦٠٨٨	١٥٤٨٦٣	٠/٠٠٠٦
ضریب تغییرات (درصد)		٧/٣٥	٩/٠٣	٢/٤٢	١١/٣٤	٩/٢٦	٧/٤٦

ns، * و **: به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ٥ درصد و ١ درصد را نشان می‌دهد.

جدول ٧. مقایسه میانگین صفات زراعی و عملکردی برای هر سطح کودهای فسفره در لوبیا چیتی

صفات	غلاف در بوته (عدد)	دانه در بوته (عدد)	وزن صد دانه (گرم)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	عملکرد زیستی (کیلوگرم در هکتار)	شاخص برداشت (درصد)
T1	١٣/٨^{c}	٥٥/٩^{d}	٥٠/٠^{e}	١١٣٤^{f}	٥٨٤٠^{c}	١٩^{c}
T2	١٤/٦^{c}	٦٠/٥^{d}	٥٢/٦^{cd}	١٢٧٥^{ef}	٥٨٩٥^{c}	٢١^{b}
T3	١٦/٨^{b}	٧٠/٩^{c}	٥٣/٨^{bc}	١٥٢٧^{bc}	٦٦٧٢^{a}	٢٢^{ab}
T4	١٦/٣^{b}	٦٧/٤^{c}	٥٢/٢^{d}	١٤٠٨^{cd}	٦١٢٣^{bc}	٢٣^{ab}
T5	١٧/٥^{ab}	٧٣/٥^{bc}	٥٥/٠^{b}	١٦١٨^{ab}	٦٢٦٠^{abc}	٢٦^{ab}
T2+T4	١٨/٥^{a}	٧٨/٩^{ab}	٥٤/٣^{b}	١٦٩٨^{a}	٦٦٥٢^{a}	٢٥^{ab}
T2+T5	١٨/٨^{a}	٨٠/٣^{a}	٥٧/٥^{a}	١٨٤٧^{a}	٦٥١٥^{ab}	٢٨^{a}

T1: شاهد، T2: ١٠٠ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل، T3: ٢٠٠ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل، T4: ٣٠٠ کیلوگرم بیوفوسفات طلایی همراه با ٣٦٠٠ گرم پودر باکتری تیوباسیلوس در هکتار ، T5: ٣٠٠ کیلوگرم بیوفوسفات طلایی با ٧٢٠٠ گرم تیوباسیلوس، ، T2+T4: ١٠٠ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل به همراه ٣٠٠ کیلوگرم بیوفوسفات طلایی و ٣٦٠٠ گرم تیوباسیلوس در هکتار و T2+T5: ١٠٠ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل به همراه ٣٠٠ کیلوگرم بیوفوسفات طلایی با ٧٢٠٠ گرم تیوباسیلوس.

در هر ستون هر حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ٥ درصد است.

به‌طور خاص رقم صدری موجب افزایش ٥/٥٨ درصدی تعداد غلاف در بوته، ٧/٦٤ درصدی تعداد دانه در بوته، ٥/٤٩ درصدی وزن صد دانه، ١١/٤٠ درصدی عملکرد دانه، ٦/٧٣ درصدی عملکرد زیستی و ١٣/٦ درصدی شاخص برداشت شد (جداول ٨ و ٩).

صفات کیفی دانه و شاخص‌های کارایی انرژی

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده تغذیه فسفری بر درصد نشاسته و کربوهیدرات دانه در سطح احتمال ١ درصد و بر پروتئین دانه، کارایی مصرف انرژی، بهره‌وری مصرف انرژی و انرژی خالص در سطح احتمال ٥ درصد معنی‌دار بود. اثر ساده رقم نیز برای نشاسته دانه و هر سه شاخص کارایی انرژی

جدول ۸. مقایسه میانگین صفات زراعی و عملکردی برای هر رقم در لوبیا چیتی

ارقام لوبیاچیتی	غلاف در بوته (عدد)	دانه در بوته (عدد)	وزن صد دانه (گرم)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	عملکرد زیستی (کیلوگرم در هکتار)	شاخص برداشت (درصد)
صدری	۱۷/۱[a]	۷۲/۱[a]	۵۵/۶[a]	۱۵۸۲[a]	۶۴۸۴[a]	۲۵[a]
E10	۱۶/۲[b]	۶۶/۹[b]	۵۲/۷[b]	۱۴۲۰[b]	۶۰۷۵[b]	۲۲[b]

در هر ستون هر حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

جدول ۹. همبستگی بین صفات زراعی مهم در لوبیا چیتی تحت تاثیر تیمارهای کودی فسفر و ارقام

	عملکرد دانه (۱)	وزن صد دانه (۲)	تعداد غلاف در بوته (۳)	شاخص برداشت (۴)	عملکرد زیستی (۵)
(۱)	۱				
(۲)	۰/۶۶	۱			
(۳)	۰/۶۳	۰/۷۳	۱		
(۴)	۰/۸۸	۰/۶۶	۰/۵۷	۱	
(۵)	۰/۷۸	۰/۴۴	۰/۵۰	۰/۷۵	۱

جدول ۱۰. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات کیفی و شاخص‌های کارایی انرژی تحت تأثیر کودهای فسفره و رقم در لوبیا چیتی

منابع تغییرات	درجه آزادی	نشاسته دانه	پروتئین دانه	کربوهیدرات دانه	کارایی مصرف انرژی	بهره‌وری مصرف انرژی	انرژی خالص
تکرار	۲	۱۲/۶[ns]	۰/۰۷[ns]	۴/۳۰[ns]	۰/۰۰۵[ns]	۰/۰۰۰۰۴[ns]	۲۴۲۹۸۹۲[ns]
کود فسفر	۶	۳۳۳[**]	۲/۲۱[*]	۳۴۴[**]	۰/۱۲۵[*]	۰/۰۰۰۷[*]	۶۳۹۵۸۴۹۲[*]
خطای اصلی	۱۲	۱۹/۶	۰/۳۸	۲۲/۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۴	۲۸۵۰۵۸
رقم	۱	۲۰۵[**]	۰/۱۹[ns]	۹/۵۲[ns]	۰/۰۹۶[**]	۰/۰۰۰۴[**]	۴۷۶۶۷۲۷۴[**]
کود فسفر × رقم	۶	۳/۲۶[ns]	۰/۱۹[ns]	۳/۸۰[ns]	۰/۰۰۴[ns]	۰/۰۰۰۰۵[ns]	۲۵۳۷۱۴۴[ns]
خطای فرعی	۱۴	۶/۷۸	۰/۲۳	۶/۸۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۰۳	۲۸۰۱۴۲۷
ضریب تغییرات (درصد)		۷/۳۴	۵/۱۵	۹/۳	۷/۹۴	۸/۱۶	۱۶/۹

ns، * و **: به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد را نشان می‌دهد.

در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱۰). بر مبنای مقایسه میانگین سطوح مختلف کودهای فسفره، تیمار ترکیبی T2+T5 بیشترین مقادیر صفات کیفی دانه شامل نشاسته و کربوهیدرات را به خود اختصاص داد. در مقابل درصد پروتئین دانه، هم‌زمان با افزایش سطوح فسفر کاهش یافت؛ به‌گونه‌ای که تیمار T2+T5 نسبت به شاهد با کاهش ۷/۵۸ درصدی مواجه شد. بیشترین میزان کارایی مصرف انرژی (۱/۱۴)، بهره‌وری مصرف انرژی (۰/۰۸۰ کیلوگرم بر مگاژول) و انرژی خالص (۳۲۳۳ مگاژول بر هکتار) نیز از تیمار T2+T5 حاصل شد (جدول ۱۱). نتایج مقایسه میانگین ارقام بیانگر آن بود که رقم E10 از نظر نشاسته دانه با افزایش ۷/۳۱ درصدی نسبت به رقم صدری برتری داشت؛ در حالی‌که رقم صدری در شاخص‌های

جدول ۱۱. مقایسه میانگین صفات کیفی و شاخص‌های کارایی انرژی برای هر سطح کودهای فسفره در لوبیا چیتی

کودهای فسفره	نشاسته دانه (درصد)	پروتئین دانه (درصد)	کربوهیدرات دانه (درصد)	کارایی مصرف انرژی	بهره‌وری انرژی (کیلوگرم بر مگاژول)	انرژی خالص (مگاژول بر هکتار)
T1	۲۳/۳^{c}	۲۱/۸^{a}	۳۱/۵^{c}	۰/۷۲^{f}	۰/۰۵^{f}	−٦١٧٦^{f}
T2	۲۸/٦^{c}	۲۱/۷^{ab}	۳۷/۰^{c}	۰/۸۰^{ef}	۰/۰۵^{ef}	−٤٣١٧^{ef}
T3	۳۵/۳^{b}	۲۰/۷^{cd}	٤٥/۳^{b}	۰/۹٥^{cd}	۰/۰٦^{cd}	−۹۹۳^{cd}
T4	۳۵/۳^{b}	۲۱/۰^{c}	٤۳/٦^{b}	۰/۸۸^{de}	۰/۰٦^{d}	−۲٥٦٦^{de}
T5	۳۸/۱^{a}	۲۱/۲^{bc}	٤٥/۸^{a}	۱/۰۱^{bc}	۰/۰۷^{bc}	۲۰۸^{bc}
T2+T4	۳۸/۰^{a}	۲۰/٤^{d}	٤٥/۷^{a}	۱/۰٥^{ab}	۰/۰۷^{ab}	۱۲٦۱^{ab}
T2+T5	۳۸/۳^{a}	۲۰/۲^{d}	٤٦/۰^{a}	۱/۱٤^{a}	۰/۰۸^{a}	۳۲۳۳^{a}

T1: شاهد، T2: ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل، T3: ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل، T4: ۳۰۰ کیلوگرم بیوفوسفات طلایی همراه با ۳٦۰۰ گرم پودر باکتری تیوباسیلوس در هکتار ، T5: ۳۰۰ کیلوگرم بیوفوسفات طلایی با ۷۲۰۰ گرم تیوباسیلوس، ، T2+T4: ۱۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل به همراه ۳۰۰ کیلوگرم بیوفوسفات طلایی و ۳٦۰۰ گرم تیوباسیلوس در هکتار و T2+T5: ۱۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل به همراه ۳۰۰ کیلوگرم بیوفوسفات طلایی با ۷۲۰۰ گرم تیوباسیلوس.

در هر ستون هر حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

جدول ۱۲. مقایسه میانگین صفات کیفی و شاخص‌های کارایی انرژی برای هر رقم در لوبیا چیتی

ارقام لوبیاچیتی	نشاسته دانه (درصد)	پروتئین دانه (درصد)	کربوهیدرات دانه (درصد)	کارایی مصرف انرژی	بهره‌وری انرژی (کیلوگرم بر مگاژول)	انرژی خالص (مگاژول بر هکتار)
صدری	۳۳/۲^{b}	۲۱/۱^{a}	٤۲/٦^{a}	۰/۹۸^{a}	۰/۰۷^{a}	−۲۷۰^{a}
E10	۳٥/٦^{a}	۲۰/۹^{a}	٤۲/٥^{a}	۰/۸۹^{b}	۰/۰٦^{b}	−۲٤۰۱^{b}

در هر ستون هر حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

کارایی مصرف انرژی، بهره‌وری انرژی و انرژی خالص مقادیر بیشتری را در مقایسه با رقم E10 به ثبت رساند (جدول ۱۲).

بحث

نتایج حاصل به‌روشنی نشان می‌دهد کاربرد بیوفسفات طلایی تلقیح‌شده با باکتری‌های تیوباسیلوس، در کنار منبع شیمیایی سوپرفسفات تریپل، موجب ایجاد یک برهم‌کنش فعال و هدفمند در ریزوسفر لوبیا چیتی شده است؛ برهم‌کنشی که پیامد آن اصلاح محیط شیمیایی خاک، افزایش فراهمی فسفر و در نهایت بهبود پاسخ‌های فیزیولوژیک و رشدی گیاه بوده است. کاهش معنی‌دار pH خاک در تیمارهای زیستی، بیانگر نقش کلیدی تیوباسیلوس در فعال‌سازی ذخایر تثبیت‌شده فسفر خاک است. این باکتری‌ها از طریق ترشح اسیدهای آلی و معدنی، به‌ویژه اسید سولفوریک، موجب آزادسازی یون‌های هیدروژن شده و با کاهش موضعی pH در ناحیه ریزوسفر، تعادل شیمی خاک را به نفع افزایش حلالیت ترکیبات کلسیمی و فسفاتی تغییر می‌دهند (۳٤). چنین تغییری در خاک‌های آهکی و نیمه‌آهکی (pH بالاتر از ٦/٥ برای جذب فسفر)، از مؤثرترین سازوکارها در افزایش فراهمی زیستی فسفر محسوب می‌شود

(۳۳) و می‌تواند توجیه‌کننده پاسخ مثبت گیاه به تیمارهای تلفیقی باشد.

فعالیت تیوباسیلوس‌ها نه‌تنها از طریق کاهش pH بلکه با تولید اسیدهای آلی نظیر گلوکونیک اسید و دیگر ترکیبات کلات‌کننده، جریان فسفر از خاک به ریشه و سپس به اندام‌های هوایی را تقویت کرده و در نهایت به تجمع بیشتر این عنصر در برگ‌ها، به‌عنوان کانون فتوسنتز، و دانه‌ها، به‌عنوان مخزن نهایی مواد غذایی، منجر شده است. این نتایج با یافته‌های حیدرزاده و همکاران (۲۲) در ماشک همسو است. از منظر اکوفیزیولوژیک، تفاوت معنی‌دار میان دو رقم مورد بررسی نشان داد که رقم صدری از کارایی بالاتری در جذب و بهره‌برداری از فسفر برخوردار است. این برتری را می‌توان به تفاوت‌های ژنتیکی و فیزیولوژیکی در معماری سامانه ریشه، ظرفیت ترشح اسیدهای ریشه‌ای و یا سطح تماس ریشه با خاک نسبت داد. در همین راستا محمودی و همکاران (۲۹) تفاوت در جذب عناصر کم‌مصرف ۱۲ رقم مختلف لوبیا را ناشی از توان ژنتیکی رقم در انتقال عنصر از ریشه به اندام‌های هوایی دانستند.

بهبود وضعیت فسفر گیاه، به‌ویژه در خاک‌های دارای محدودیت فراهمی این عنصر، به‌طور مستقیم با افزایش ظرفیت فتوسنتزی، تسریع تقسیم و طویل‌شدن سلولی و در نهایت رشد رویشی بیشتر همراه است (۲۸). افزون بر این، تیوباسیلوس‌ها نیز به‌عنوان محرک‌های زیستی در تولید فیتوهورمون‌های اکسین که خود عامل طویل‌شدن سلولی در مریستم‌ها و توسعه اندام‌های هوایی هستند، نقش فعالی دارند (۳۸). مطابق با این یافته‌ها، تاثیر معنی‌دار کودهای زیستی فسفره در افزایش ارتفاع لوبیا قرمز نیز بیان شده است (۵۳). در نهایت، رقم صدری احتمالاً با برخورداری از سامانه ریشه کارآمدتر و توان بالاتر در هم‌افزایی با ریزجانداران ریزوسفری، قادر بوده از مزایای کودهای زیستی و شیمیایی فسفره بهره‌برداری مؤثرتری داشته باشد.

بهبود رشد رویشی و فتوسنتز بهتر می‌تواند عاملی بر تولید تعداد غلاف بیشتر در بوته شود. گزارش شده است که کاهش رقابت درون بوته‌ای همراه با بهبود ساختار مجموعه فتوسنتزی که درپی کاهش ریزش گل‌ها نمایان می‌شود، تعداد غلاف در بوته لوبیا را افزایش داده است (۲۳). همچنین تفاوت میزان این صفت در واکنش ارقام مختلف لوبیا نیز عنوان شده است (۸). فسفر و باکتری‌های حل‌کننده آن به‌دلیل اینکه در تشکیل ریشه‌های زودرس و گره‌زایی لوبیا (۲۵) و همچنین تحریک تولید هورمونی (۷) نقش موثری دارند؛ می‌تواند باردهی و تشکیل دانه را به‌نحو موثری تحت تاثیر قرار دهند (۳۲). این نتیجه با یافته‌های دیگر پژوهشگران مطابقت دارد که گزارش کرده‌اند تعداد دانه لوبیا به نسبت مثبتی از مصرف کود فسفر افزایش یافته است (۴۷). اوبسی و همکاران (۳۹) در پژوهش خود بر لوبیا مشاهده نمودند که بیشترین تعداد دانه در غلاف از مصرف ٤٦ کیلوگرم بر هکتار فسفر خالص حاصل شد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد مصرف تلفیقی منابع فسفری با ایجاد شرایط ریزوسفری مناسب و جذب عناصر غذایی، علاوه بر تامین مواد ذخیره‌ای مورد نیاز گیاه، در تقسیم ماده خشک بیشتر از منبع به مخزن نیز واکنش مطلوبی را بروز داده است؛ از این‌رو وزن صد دانه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. همسو با نتایج ما، وردیوم و تانا (۵۰) نیز به تاثیر فسفر بر اجزای عملکرد لوبیا اشاره نموده‌اند.

در مجموع برآیند حضور فسفر در پیکره گیاهی که هم در ذخیره آسیمیلات‌ها و هم در فرآیندهای انتقالی آن‌ها مثبت بوده است، منجر به افزایش عملکرد به‌عنوان مقصد نهایی می‌شود. این موضوع توسط محققان متعددی در لوبیا ابراز شده است (۱، ٤۳ و ٤۸). با این وجود، تفاوت‌ها در پتانسیل ژنتیکی ارقام لوبیا جهت جذب عناصر و ساخت و انتقال مواد پرورد، میزان تجمع ماده خشک را متغیر می‌سازد (۲۳). چنانچه در مطالعه حاضر نیز رقم صدری عملکرد دانه و عملکرد زیستی بیشتری را در مقایسه با رقم E10 نشان داد. گارسیا کاپاروس و همکاران (١٤) عنوان داشته‌اند افزایش وزن خشک اندام هوایی لوبیا در شرایط تامین فسفر مشاهده شد. از سوی دیگر ایشان همچنین به اثرات منفی بیش‌بود فسفر بر عملکرد دانه و غلاف لوبیا اشاره کرده‌اند.

شاخص برداشت عاملی است که میزان تخصیص مواد فتوسنتزی به دانه را نشان می‌دهد. بنابراین تمایل بیشتر ذخایر گیاهی به سمت عملکرد دانه نسبت به وزن خشک کل گیاه، موجب افزایش شاخص برداشت خواهد شد. افزایش این شاخص با استفاده از کودهای زیستی فسفر توسط رضاپور کویشاهی و همکاران (٤٣) در لوبیا نیز گزارش شده است. علاوه بر این باید اظهار داشت که وابستگی ژنتیکی اجزای عملکرد لوبیا نظیر تعداد دانه در غلاف (١٦) و وزن صد دانه (١٥) توجیه‌گر ظهور تفاوت پاسخ ارقام صدری و E10 نسبت به عملکردهای دانه و زیستی و همین‌طور شاخص برداشت در نتایج گزارش شده می‌باشد.

در این پژوهش، تغییرات صفات کیفی دانه را می‌توان به‌صورت یک پیوست فیزیولوژیک واحد، ناشی از بهبود وضعیت تغذیه فسفر و پیامدهای آن بر جریان کربن و نیتروژن در گیاه تفسیر کرد. نقش محوری فسفر در فرآیندهای پایه، زمینه را برای افزایش تولید و انتقال فتوسنتات‌ها به اندام‌های زایشی فراهم ساخت. پیامد تقویت منبع فتوسنتزی در تیمارهای تلفیقی، تجمع بیشتر نشاسته در دانه بود (١٧)؛ امری که بیانگر بهبود کارایی ذخیره کربن در مرحله پرشدن دانه است. توانایی بالاتر رقم E10 در ذخیره نشاسته به ویژگی‌های ژنتیکی آن نظیر فعالیت آنزیم‌های نشاسته‌ساز و قدرت مخزن دانه نسبت داده می‌شود. پژوهشگران تنوع ژنتیکی ١٨ رقم و لاین امید بخش لوبیا را در مورد صفات دانه ازجمله نشاسته مطرح نموده‌اند (٢٠).

کاهش پروتئین دانه در تیمارهای با فسفر بالا را نه به‌عنوان یک پاسخ منفی، بلکه باید به‌عنوان پیامد فیزیولوژیک افزایش عملکرد و تغییر الگوی تخصیص مواد تحلیل کرد. با وجود ثابت بودن مصرف نیتروژن، افزایش فسفر به‌ویژه در تیمارهای تلفیقی، منجر به افزایش رشد رویشی و عملکرد دانه شد. نتیجه این رخداد، غالب‌شدن مسیرهای مصرف کربن و انرژی به سمت سنتز کربوهیدرات و افزایش وزن دانه بود؛ به‌گونه‌ای که سهم نسبی نیتروژن در ترکیب شیمیایی دانه کاهش یافته است. شاهسونی و همکاران (٤٦) نتیجه گرفتند که مصرف مجزای کود شیمیایی (NPK) محتوای پروتئین لوبیا چشم‌بلبلی را کاهش داد اما در ترکیب با کود زیستی فسفره محتوای این صفت افزایش یافت. در رابطه با افزایش درصد کربوهیدرات دانه می‌توان بیان داشت که فسفر با تقویت فتوسنتز، افزایش بازده انتقال انرژی و تسهیل واکنش‌های فسفریلاسیون، شرایط را برای تولید بیشتر قندهای فتوسنتزی و انتقال مؤثر آن‌ها به دانه فراهم نمود (٣). حضور تیوباسیلوس با بهبود فراهمی فسفر و احتمالاً ترشح تنظیم‌کننده‌های رشد (٣٨)، کارایی منبع فتوسنتزی و قدرت مخزن دانه را هم‌زمان ارتقا داد و بدین‌ترتیب تجمع کربوهیدرات‌ها در دانه افزایش یافت.

افزایش کارایی مصرف انرژی در تیمارهای تلفیقی و رقم برتر، بازتاب بهبود هم‌زمان کارایی زیستی سامانه و تخصیص مؤثر انرژی به اجزای مولد عملکرد است. تأمین متعادل فسفر از منابع شیمیایی و زیستی با ارتقای فعالیت فتوسنتزی و کاهش اتلاف انرژی، نسبت انرژی خروجی به ورودی را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (جدول ١٠). هرچند مقدار این شاخص در لوبیا چیتی کمتر از گیاهانی مانند گندم (با کارایی مصرف انرژی ٤/٢٤) گزارش شده است (٣١)، اما پاسخ مثبت به تغذیه تلفیقی فسفر نشان می‌دهد که محدودیت انرژی به‌جای کمبودهای فیزیولوژیک بیشتر ناشی از مدیریت منابع است. شاه‌قلی و همکاران (٤٥) در سامانه کشت پرنهاده لوبیا چیتی بیان داشته‌اند که رقم صدری نسبت به ارقام درسا و Ks-31169 کارایی انرژی بیشتری را نشان داد.

پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که بهره‌وری انرژی نخود ٠/١٣ کیلوگرم بر مگاژول بوده است (٣٦). به‌نظر می‌رسد در این آزمایش بهبود تغذیه فسفری از طریق افزایش کارایی جذب عناصر، تسریع رشد زایشی و افزایش وزن دانه، موجب افزایش تولید به‌ازای واحد انرژی مصرفی شد. رعایت دقیق دستورالعمل‌های زراعی شامل مصرف بهینه و به‌موقع نهاده‌ها، کاهش مصرف سوخت و منابع شیمیایی و به‌کارگیری روش‌های کم‌خاک‌ورزی، می‌تواند سبب افزایش عملکرد و

بهبود بهره‌وری انرژی شود (۴۹)، اقداماتی که موجب کاهش انرژی ورودی (مخرج کسر) و افزایش عملکرد (صورت کسر) می‌شوند. افزایش انرژی خالص در تیمارهای تلفیقی حاصل برتری مطلق انرژی خروجی نسبت به مجموع انرژی مصرفی است که نشان‌دهنده بهبود پایداری انرژی سامانه زراعی است. نقش کودهای زیستی در افزایش کارایی متابولیکی گیاه، موجب تقویت تولید زیست‌توده و عملکرد دانه بدون افزایش متناسب انرژی ورودی شد. همسویی این نتایج با مطالعات پیشین در نخود (۳۶) بیانگر آن است که راهبردهای تغذیه تلفیقی می‌توانند ابزار مؤثری برای افزایش بازده انرژی و کاهش وابستگی سامانه‌های زراعی به نهاده‌های پرانرژی باشند. از سوی دیگر انتخاب رقم مناسبی که پتانسیل ژنتیکی لازم جهت استفاده کاراتر از منابع موجود را داشته باشد نیز عامل مهمی است؛ در همین راستا نتایج پژوهشی بر لوبیا چیتی برتری رقم صدری نسبت به دیگر ارقام را مشخص نمود (۴۵).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کارایی کودهای زیستی فسفره در سامانه کشت لوبیا چیتی به‌شدت وابسته به وضعیت اولیه فراهمی فسفر و شرایط شیمیایی ریزوسفر است؛ به‌گونه‌ای که کاربرد تلفیقی سوپرفسفات تریپل با بیوفسفات طلایی حاوی باکتری تیوباسیلوس، با تعدیل اسیدیته خاک و افزایش تدریجی فسفر قابل جذب، بستر مناسبی برای فعالیت میکروبی و جذب مؤثر عناصر غذایی فراهم نمود. این بهبود در محیط ریشه، ابتدا خود را در ارتقای وضعیت تغذیه‌ای گیاه و افزایش فسفر برگ و دانه نشان داد و در ادامه، از طریق تقویت فرایندهای فیزیولوژیکی و انتقال مواد فتوسنتزی، موجب بهبود رشد رویشی و افزایش ظرفیت زایشی گیاه شد. پیامد این زنجیره اثرگذار، افزایش کارآمد تشکیل غلاف و دانه، بهبود کیفیت ترکیبات ذخیره‌ای دانه و در نهایت ارتقای عملکرد دانه بود. هم‌زمان، استفاده متعادل از منابع شیمیایی و زیستی فسفر سبب شد انرژی ورودی به سامانه زراعی با بازده بالاتری به تولید ماده خشک و دانه تبدیل شود، به‌طوری‌که تیمارهای تلفیقی بیشترین کارایی مصرف انرژی، بهره‌وری انرژی و انرژی خالص را به خود اختصاص دادند. این موضوع بیانگر آن است که بهبود فرآیندهای خاک- گیاه نه‌تنها عملکرد کمی و کیفی را افزایش می‌دهد، بلکه ساختار مصرف انرژی در سامانه کشت لوبیا چیتی را نیز به‌سوی پایداری بیشتر هدایت می‌کند. افزون بر این، پاسخ قوی‌تر رقم صدری به این راهبرد تغذیه‌ای نسبت به رقم E10 نشان داد که کارایی مدیریت تلفیقی فسفر تا حد زیادی به ظرفیت ژنتیکی رقم در بهره‌برداری از بهبود شرایط ریزوسفر وابسته است.

منابع

1. Abdzad Gohari, A., A. Ghadiri and S. A. Ghaffari Nejad. 2025. The effect of irrigation intervals and foliar application of phosphorus fertilizer on yield and water use productivity in bean plant. *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 14: 57-73. (In Farsi).
2. Adesemoye, A. O. and J. W. Kloepper. 2009. Plant–microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency. *Applied Microbiology and Biotechnology* 85: 1-12.
3. Amiryousefi, M., M. R. Tadayon and R. Ebrahimi. 2020. Effect of biological and chemical fertilizers on some biochemical and yield traits of two quinoa cultivars. *Plant Process and Function* 9: 299-314. (In Farsi).
4. Asadi, B., S. H. Vaeazi and A. Fathi Haftshjani. 2015. Genetic diversity and classification of chitti bean genotypes using multivariate analysis methods. *Seed and Plant Improvement Journal* 4: 641-652. (In Farsi).
5. Atieno, M., L. Herrmann, H. T. Nguyen, H. T. Phan, N. K. Nguyen, P. Srean, M. M. Than, Z. Ren, P. Tittabutr, A. Shutsrirung, L. Bräu and D. Lesueur. 2020. Assessment of biofertilizer use for sustainable agriculture in the Great Mekong region. *Journal of Environmental Management* 275: 111300.
6. Azarmi, F., M. J. Malakouti and K. Khavazi. 2014. Effects of inoculation of phosphate solubilizing microorganisms on increasing the efficiency and recovery percent of phosphate fertilizers in canola. *Iranian Journal of Soil Research* 27: 499-507. (In Farsi).

7. Banerjee, M., R. L. Yesmin and J. K. Vessey. 2006. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers and biopesticides. pp. 137-181, In: M. K. Rai (ed.), Handbook of Microbial Biofertilizers. Food Production Press, USA.
8. Bayat, A. A., A. Sepehri, G. Ahmadvand and H. R. Dorri. 2010. Effect of water deficit stress on yield and yield components of pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Iranian Journal of Crop Sciences* 12: 42-54. (In Farsi).
9. Bayati, K., N. Majnoon Hosseini, H. Moghadam and R. Basiri. 2018. Effects of drought stress and nitrogen on grain yield and some agronomic traits of red kidney bean cultivars. *Iranian Journal of Field Crop Science* 48: 1069-1081. (In Farsi).
10. Cruz, C. D., A. J. Regazzi and P. C. S. Carneiro. 2014. Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético. Viçosa, Brazil.
11. Emami, A. 1996. Plant analysis methods. *Journal of the Soil and Water Research Institute* 1: 45-46. (In Farsi).
12. Faraji, Y. 2007. Assessment of the current status of mechanization and energy indices in agriculture. MSc thesis. Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad, Iran. (In Farsi).
13. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2023. FAOSTAT: Crops and livestock products (QCL). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available online at: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL.
14. Garcia-Caparros, P., T. Lao, P. Preciado-Rangel and E. Sanchez. 2021. Phosphorus and carbohydrate metabolism in green bean plants subjected to increasing phosphorus concentration in the nutrient solution. *Agronomy* 11: 245.
15. Ghanbari, A. A. and M. Taheri Mazandarani. 2003. Effects of planting arrangement and weed control on yield and yield components of red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Akhtar. *Seed and Plant Journal* 19: 37-47. (In Farsi).
16. Ghanbari, A. A., H. Naghdi Badi, A. A. Ghanbari and A. M. Naji. 2025. Effect of iron nano-fertilizer on grain yield and genotypic and environmental indices of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) genotypes. *Iranian Journal of Field Crops Research* 23: 439-460. (In Farsi).
17. Gharehbaghli, N. and A. Sepehri. 2025. The effect of microtuber size and phosphate biofertilizer on growth and tuber yield of Sante potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivar. *Iranian Journal of Field Crops Research* 23: 497-509. (In Farsi).
18. Ghobadi, M., S. Jahanbin, H. Owliaie, R. Motalebifard and K. Parvizi. 2013. The effect of phosphorus biofertilizers on yield and phosphorus uptake in potato. *Water and Soil Science* 23: 125-138. (In Farsi).
19. Ghobady, M., S. Jahanbin, R. Motalebifard and K. Parvizi. 2011. Effect of phosphorus biofertilizers on yield and yield components of potato. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production* 21: 117-130. (In Farsi).
20. Ghorbani, M., K. Cheghamirza and Z. Aziziaram. 2023. Evaluation of genetic diversity and identifying relationships of seed characteristics with SSR and SCoT markers in common bean. *Journal of Plant Genetic Research* 10: 155-174. (In Farsi).
21. Hashemi Jezi, S. M. 2014. Investigation and comparison of performance and determination of compatibility of white bean cultivars in Chaharmahal and Bakhtiari Province. In: Proceeding of 1th National Legume Conference, Mashhad, Iran. (In Farsi).
22. Heydarzadeh, S., J. Jalilian, A. R. Pirzad and R. Jamei. 2018. The effect of biofertilizers on some quantitative and qualitative characteristics of vetch Maragheh (*Vicia* sp.) under rainfed and supplementary irrigation. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production* 28: 187-208.
23. Hosseini Cici, Z. 2018. Effects of irrigation cut-off time in reproductive stages on yield and yield components of two bean cultivars in Mallard, Iran climate condition. *Agroecology Journal* 1: 1-8. (In Farsi).
24. Hossinzadeh, N. and A. Pirzad. 2025. Interaction of humic acid and biological phosphorus on the yield of pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in deficit irrigation conditions. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production* 35: 43-61. (In Farsi).
25. Idikut, L. and D. Uskutoglu. 2023. The effect of different phosphorus and nitrogen doses on bean's (*Phaseolus vulgaris* L.) grain quality. *International Journal of Anatolia Agricultural Engineering Sciences* 5: 76-82.
26. Igiehon, B. C., O. O. Babalola and H. I. Hassen. 2024. Rhizosphere competence and applications of plant growth-promoting rhizobacteria in food production – A review. *Scientific African* 23: e02081.
27. Jalilian, A., M. R. Jahansouz, H. Ghasemi Mobtaker, M. Oveisi and H. Moghadam. 2023. Evaluation of energy indicators in monoculture, intercropping, and agroforestry systems of okra (*Abelmoschus esculentus* L.) production in Khuzestan Province. *Iranian Journal of Field Crop Science* 54: 141-154. (In Farsi).
28. Ma, J., T. Chen, C. Jie, W. Fu, B. Feng, G. Li, H. Li, J. Li, Z. Wu, L. Tao and G. Fu. 2022. Functions of nitrogen, phosphorus and potassium in energy status and their influences on rice growth and development. *Rice Science* 29: 166-178.
29. Mahmoodi, S., G. Savaghebi and B. Motesharezadeh. 2014. Uptake and transport of micronutrients (iron, copper, zinc and manganese) in different cultivars of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under iron-deficient and non-deficient conditions in soil. *Environmental Stresses in Crop Sciences* 7: 105-117. (In Farsi).

30. Mehrasa, H., A. Farnia, M. I. Jafarzadeh Kenarsari and S. Nakhjavan. 2022. Study of the effect of salicylic acid foliar application and application of biofertilizers on yield, physiological characteristics and antioxidant defense system of bean under drought stress. *Crop Physiology Journal* 13: 2. (In Farsi).
31. Miguel, M. A. 2004. Genotypic variation in root hairs and phosphorus efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Ph.D. thesis. Pennsylvania State University. Pennsylvania, USA.
32. Mirzaei Heydari, M., A. Fathi and R. Atashpikar. 2023. The effect of chemical and biofertilizer on the nutrient concentration of root, shoot and seed of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under drought stress. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions* 5: 539-554. (In Farsi).
33. Mohammady-Aria, M., A. Lakzzin, G. H. Haghnia and A. R. Berengi. 2010. The use of phosphate rock for direct application to soils. *Journal of Soil Science* 101: 551-554.
34. Mortazavi, A. and A. Kochaki. 2021. An Introduction to Industrial Microbiology. Publications of Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad. (In Farsi).
35. Mostofi, Y. and F. Najafi. 2005. Laboratory Methods of Analysis in Horticultural Sciences. University of Tehran Press, Tehran. (In Farsi).
36. Nabati, J., A. Yousefi, A. Hasanfard, Z. Nemati, N. Kahrom and A. Malakshahi Kurdestani. 2025. Enhancing chickpea yield through the application of sulfur and sulfur-oxidizing bacteria. *Scientific Reports* 15: 1169.
37. Nabavi-Pelesaraei, A., Z. Saber, F. Mostashari-Rad, H. Ghasemi-Mobtaker and K. Chau. 2021. Coupled life cycle assessment and data envelopment analysis to optimize energy consumption and mitigate environmental impacts in agricultural production. pp. 227-264, In: J. Ren (ed.), Methods in Sustainability Science. Elsevier.
38. NoorBakhsh, F., M. A. Behdani, M. Jami Al-Ahmadi and S. Mahmodi. 2014. Evaluation of integrated impact of sulfur and Thiobacillus on qualitative and morphological characteristics of safflower (*Carthamus tinctorius* L.*). Journal of Agroecology* 6: 51-59. (In Farsi).
39. Obssi, A., J. Abdulahi and T. Tana. 2022. Effect of phosphorus fertilizer rates and plant density on yield and yield-related traits of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Dangur district, northwestern Ethiopia. *World Rural Observations* 14: 58-85.
40. Pouresmael, M., A. A. Saneinejad, A. A. Ghanbari and R. Sekhavat. 2021. Assessment of agro-morphological traits diversity in local cowpea accessions. *Journal of Crop Breeding* 13: 95-106. (In Farsi).
41. Rahimi, H., H. R. Eshghizadeh, J. Razmjoo, M. Zahedi, A. Ghadiri and M. Asadi. 2023. Evaluation of yield and some morpho-physiological characteristics of pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes under different irrigation regimes. *Iranian Journal of Pulses Research* 14: 19-33. (In Farsi).
42. Rahmani, T., M. Daneshvar, O. Akbarpour and M. Sharifipour. 2024. The yield and physiological traits of two red bean cultivars (*Phaseolus vulgaris*) under the influence of management and genotypic factors. *Iranian Journal of Pulses Research* 15: 159-177. (In Farsi).
43. Rezapour Kavishahi, T., M. H. Ansari and M. Mostafavi Rad. 2015. Effects of some phosphorus solubilizing bacteria strains on yield and agronomic traits in local bean of Guilan under different phosphate fertilizer rates. *Journal of Crops Improvement* 17: 801-814. (In Farsi).
44. Rhoades, J. D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. pp. 417-435, In: D. L. Sparks (ed.), Methods of Soil Analysis. Chemical methods Soil Science Society of America. America.
45. Sammour, R. H. 1999. Protein of linseed (*Linum usitatissimum* L.) extraction and characterization by electrophoresis. *Botanical Bulletin of Academia Sinica* 40: 121-126.
46. Shahgholi, H., M. R. Asgharipour, I. Khamari and A. Ghadiri. 2019. Evaluation of energy budget of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) production in different cropping systems. *Iranian Journal of Pulses Research* 10: 126-140. (In Farsi).
47. Shahsavani, S., A. Abaspour, M. Parsaeeyan and Z. Yonesi. 2017. Effect of fish waste, chemical fertilizer and biofertilizer on yield and yield components of bean (*Vigna sinensis*) and some soil properties. *Iranian Journal of Pulses Research* 8: 45-59. (In Farsi).
48. Tanhaie, R., A. Yadavi, M. Movahhedi Dehnavi, A. Salehi, S. Rafiee and M. Hamidian. 2022. The effect of mycorrhizal fungi and phosphorus solubilizing bacteria on physiological traits and grain yield of red bean *(Phaseolus vulgaris* L.) in different irrigation regimes. *Journal of Crop Production* 15: 39-60. (In Farsi).
49. Vahabipoor, M., G. R. Sabzghabaei and S. Dashti. 2021. Determining the environmental effects of bean and lentil production by life cycle assessment method: Case study Yasuj City. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production* 31: 303-316. (In Farsi).
50. Wondimu, W. and T. Tana. 2017. Yield response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties to combined application of nitrogen and phosphorus fertilizers at Mechara, Eastern Ethiopia. *Journal of Plant Biology and Soil Health* 4: 1-7.
51. Zendedel Sabet, M., P. Sharifi and M. Gholami. 2018. Effect of plant density on seed yield and morphological characteristics of some Guilan local bean lines. *Plant Productions* 41: 1-12. (In Farsi).

52. Ziaeyan, A. 2012. The possibility of biological phosphate fertilizers application in corn cultivation of Fars Province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 2: 111-126. (In Farsi).
53. Zivardar, M., A. Farnia and A. Khorgami. 2022. Investigating the effects of nitrogen and phosphorus biofertilizers on morphological and physiological traits of red beans in Borujerd region. *Journal of Crop Production Research* 14: 239-254. (In Farsi).