Plant Production Technology/ Volume 26/ Issue 1/ Pages 15-27/ Spring and Summer 2026
https://doi.org/ 10.22084/ppt.2026.31731.2172

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Evaluation of Yield, Yield Components and Qualitative Traits of Nine Pinto Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Genotypes in Nano-Phosphorus Application

Dehdar[1*], B. Barmaki[2], M. and Hajmohammadi[3], A.

1. Assistant Professor, Department of Horticultural Crops Research, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Ardabil Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ardabil, Iran.
2. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
3. M.Sc. Graduate, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

*: Corresponding Author Email: b.dehdar@areeo.ac.ir

Received: 2025/10/17 Accepted: 2026/02/07

Introduction
Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.), particularly the pinto bean variety, is a vital legume crop in Iran, prized for its high protein content and significant role in ensuring food security and improving household nutrition. However, its productivity is severely limited by environmental stresses and poor soil fertility, especially phosphorus (P) deficiency. Phosphorus is an essential macronutrient critical for root development, energy transfer, photosynthesis, and flower and seed formation. In the calcareous soils, P becomes fixed and unavailable to plants, leading to low use efficiency from conventional fertilizers. Recent innovations in agricultural nanotechnology have introduced nano-phosphorus fertilizers as a promising solution. These fertilizers, characterized by their ultra-small particle size, high surface area, and controlled-release properties, enhance P availability, uptake, and utilization efficiency by plants. While the benefits of nano-P are recognized, a significant research gap exists regarding the field evaluation of genotypic responses of pinto bean to nano-P fertilization, particularly under the specific ecological conditions of Iran. This study was therefore designed to bridge this gap by comprehensively assessing the impact of nano-P fertilizer on the yield, its components, and the seed quality attributes of nine distinct pinto bean genotypes.

Materials and Methods
A field experiment was conducted during the 2020 growing season on a private farm in the Arallou region, Ardabil, Iran. The experiment was laid out as a factorial arrangement based on a Randomized Complete Block Design (RCBD) with three replications. The factors consisted of nine pinto bean genotypes (Koosha, Ghaffar, Saleh, Local Ardabil, Sadri, Talash, and Lines 80, 90, and 16) and three nano-P fertilizer treatments: foliar application at a concentration of two and one per thousand and an untreated control. The nano-P fertilizer (commercial name: Khazra, 17% P chelate) was applied at three critical growth stages: stem elongation, pre-flowering, and podding. At physiological maturity, yield components, including the number of pods per plant, number of seeds per pod, and hundred seed weight, were measured. Grain yield was calculated and extrapolated to kg per hectare. Collected data were subjected to analysis of variance (ANOVA) using SAS software, and mean comparisons were performed using Duncan's Multiple Range Test at a 5% probability level.

Results and Discussion
The results demonstrated significant main effects of both genotype and nano-P fertilizer on all measured parameters. Foliar application of nano-P fertilizer markedly enhanced overall crop performance. It increased grain yield by 26.4%, from 1706.7 kg ha^{-1} in the control to 2156.5 kg ha^{-1}in second level of fertilizer. Additionally, the number of pods per plant, number of seeds per pod, and 100-seed weight increased by 8%, 19%, and 8%, respectively, compared to the control. Seed nutritional quality significantly improved, with the nitrogen, protein, phosphorus, and potassium content of seeds in the nano-phosphorus treatment showing a significant increase compared to the control. Significant genotypic variation was observed. The genotype Talash recorded the highest grain yield (2313.8 kg ha^{-1}), primarily driven by a superior number of seeds per pod (4.68). In contrast, Line 16 presented a balanced and desirable profile with high yield (2181.2 kg ha^{-1}) coupled with exceptional seed quality, achieving the highest seed phosphorus (0.588%) and potassium (4.46%) content, along with high protein (25.55%). Nano-P application significantly boosted seed nutritional quality. Seed nitrogen content increased from 3.45% to 3.98%, protein from 21.57% to 24.88%, phosphorus from 0.441% to 0.599%, and potassium from 3.41% to 3.88%. Correlation analysis revealed a strong, positive, and highly significant relationship between seed nitrogen and protein content, which is biologically expected. A notable negative correlation between the number of pods per plant and the number of seeds per pod suggests a compensatory trade-off between these two components. The identification of high-performing and responsive genotypes like 'Talash' and 'Line 16' is crucial for future breeding programs.

Conclusion

In conclusion, this study unequivocally demonstrates that foliar application of nano-phosphorus fertilizer is a highly effective agronomic strategy for significantly enhancing the productivity and nutritional quality of pinto beans. It effectively mitigates the challenges of phosphorus fixation in calcareous soils. The significant genotypic differences highlight the importance of selecting appropriate varieties. Genotypes 'Talash' and 'Line 16' are highly recommended for cultivation under similar conditions due to their outstanding yield and quality characteristics, respectively. The trade-off between yield components underscores the need for a balanced breeding approach.

Keywords: Genotypic diversity, Nutritional value of seed, Phosphorus content of seed, Potassium content of seed, Seed protein

Citations: Dehdar, B., Barmaki, M. and Hajmohammadi, A.. (2026). Evaluation of Yield, Yield Components and Qualitative Traits of Nine Pinto Bean (*Phaseolus vulgaris* L.**)** Genotypes in Nano-Phosphorus **Application**. *Plant Production Technology*, 26(1), 15-27.
https://doi.org/ 10.22084/ppt.2026.31731.2172
© 2022 The Author(s). Bu- Ali Sina University Publication. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Online ISSN: 2476-5651 **Print ISSN:** 2476-6321

فنآوری تولیدات گیاهی/ جلد بیست و ششم/ شمارۀ اول/ صفحات ۱۵-۲۷/ بهار و تابستان ۱۴۰۵
https://doi.org/10.22084/ppt.2026.31948.2176

ارزیابی عملکرد، اجزای عملکرد و ویژگی‌های کیفی ۹ ژنوتیپ لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L.) تحت تأثیر کاربرد کود نانوفسفره

Evaluation of Yield, Yield Components and Qualitative Traits of Nine Pinto Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Genotypes in Nano-Phosphorus Application

بهرام دهدار[1*]، مرتضی برمکی[2] و علیرضا حاج‌محمدی[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸
(مقاله پژوهشی)

چکیده

لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حبوبات منبع اصلی پروتئین گیاهی است، اما عملکرد آن به دلایل مختلفی ازجمله محدودیت جذب فسفر در خاک‌ها محدود می‌شود. آزمایش در سال ۱۳۹۹ به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل ۹ ژنوتیپ لوبیا چیتی (کوشا، غفار، صالح، محلی اردبیل، صدری، تلاش و لاین‌های ۸۰، ۹۰ و ۱۶) و سه سطح کود نانوفسفره (شاهد و محلول‌پاشی یک و دو در هزار) بودند. یافته‌ها نشان داد کود نانوفسفره بر کلیه صفات اندازه‌گیری‌شده تأثیر معنادار داشت. کاربرد سطح دو در هزار نانوفسفر در مقایسه با تیمار شاهد، عملکرد دانه را ۲۶/۴ درصد افزایش داد. همچنین تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و وزن صد دانه به‌ترتیب ۸، ۱۹ و ۸ درصد نسبت به شاهد رشد کردند. کیفیت تغذیه‌ای دانه به‌طور قابل‌توجهی ارتقا یافت و محتوای نیتروژن، پروتئین، فسفر و پتاسیم دانه در تیمار نانوفسفر در مقایسه با شاهد افزایش معنی‌داری داشتند. همچنین تفاوت ژنتیکی بارزی در پاسخ ژنوتیپ‌ها مشاهده شد. ژنوتیپ تلاش با بیشترین عملکرد دانه (۲۳۱۳/۸ کیلوگرم در هکتار) به‌عنوان برترین ژنوتیپ از نظر عملکرد شناخته شد. در مقابل، ژنوتیپ لاین ۱۶ برترین کیفیت دانه را ارائه داد و بالاترین مقادیر پروتئین (۲۵/۵۵ درصد)، فسفر (۰/۵۸۸ درصد) و پتاسیم (۴/۴۶ درصد) را در بین تمامی ژنوتیپ‌ها به خود اختصاص داد. به‌طورکلی، نتایج این تحقیق نشان داد که کاربرد نانوفسفر همراه با انتخاب ژنوتیپ‌های برتر می‌تواند رویکردی مؤثر برای افزایش کمیت و کیفیت لوبیا چیتی باشد.

کلمات کلیدی: ارزش غذایی دانه، پروتئین دانه، تنوع ژنوتیپی، محتوای پتاسیم دانه، محتوای فسفر دانه

ارجاع به مقاله: دهدار، ب.، برمکی، م.، حاج‌محمدی، ع. (۱۴۰۵). ارزیابی عملکرد، اجزای عملکرد و ویژگی‌های کیفی ۹ ژنوتیپ لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L.) تحت تأثیر کاربرد کود نانوفسفره، *مجله فنآوری تولیدات گیاهی*، ۲۶(۱)، ۱۵-۲۷.
https://doi.org/10.22084/ppt.2026.31731.2172/

حق نشر متعلق به نویسنده (گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) به مجله اجازه می‌دهد مقاله‌ی چاپ شده را در سامانه به اشتراک بگذارد، منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

شاپا الکترونیکی: ۲۴۷۶-۵۶۵۱ **شاپا چاپی:** ۲۴۷۶-۶۳۲۱

۱. استادیار بخش تحقیقات زراعی باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.
۲. استاد گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
*: نویسنده مسئول Email: b.dehdar@areeo.ac.ir

۱. مقدمه

لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L.) یکی از مهم‌ترین حبوبات مورد کشت در ایران است که به دلیل دارا بودن پروتئین بودن پروتئین بالا، نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی و بهبود تغذیه خانوار دارد. از سوی دیگر، رشد و عملکرد لوبیا چیتی به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی و وضعیت تغذیه‌ای خاک قرار دارد. فسفر به‌عنوان یکی از عناصر غذایی ضروری، نقش کلیدی در فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه همچون رشد ریشه و تشکیل گل و دانه ایفا می‌کند. اما به‌دلیل تثبیت این عنصر در خاک‌های آهکی مناطق مختلف کشور، کارایی آن اغلب پایین است (Pirzad,2024 and Hoseinzadeh).

کارایی مصرف فسفر و بهبود رشد و عملکرد گیاهان مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. ناکارایی جذب فسفر نه‌تنها هزینه‌های تولید را افزایش می‌دهد، بلکه پایداری سامانه‌های زراعی را نیز تهدید می‌کند (Bindraban *et al.* ; 2020Arora and Khosla, 2024). در دهه اخیر، نانوفسفر به‌عنوان راهکاری نوین برای افزایش کارایی مصرف فسفر مطرح شده است؛ نانوذرات فسفاته، به‌ویژه مشتقات کلسیم‌فسفات مانند نانوهیدروکسی‌آپاتیت، به دلیل نسبت سطح به حجم بالا و رهایش کند و امکان هدف‌گیری ریشه، می‌توانند جذب فسفررا بهبود داده و دفعات و مقدار مصرف کود را کاهش دهند (El-Ghany *et al.*, 2021؛ Carmona *et al.*, 2022). شواهد مزرعه‌ای نیز نشان داده‌اند که کاربرد نانوفسفر در شرایط تنش کم‌آبی، صفات رشدی و کارایی مصرف آب را در لگوم‌ها بهبود می‌دهد (Abou-Sreea *et al.*, 2022).

کشور ایران با اقلیم نیمه‌خشک و محدودیت‌های فزاینده آب و انرژی، به مدیریت نهاده‌ها و ارتقای بهره‌وری عناصر غذایی حساس است. ارزیابی‌های اخیرِ برهم‌کنش آب–انرژی–غذا نشان می‌دهد تصمیمات کشت و تغذیه باید با رویکرد کارایی محور و سازگار با سناریوهای تغییر اقلیم اتخاذ شوند (Javan *et al.*, 2023).

از سوی دیگر، پاسخ ژنتیپ‌های لوبیا چیتی به تنش‌ها و نهاده‌های تغذیه‌ای ناهمگن است؛ پژوهش‌های داخلی نشان داده‌اند که تفاوت معنی‌داری میان ژنوتیپ‌ها در عملکرد و اجزای عملکرد تحت محدودیت آب وجود دارد و انتخاب ژنوتیپ‌های کاراتر برای شرایط تنش‌زا ممکن است (Soheili movahhed *et al.*, 2017). علاوه‌براین، مدیریت کارامدتر فسفردر لوبیا می‌تواند کیفیت و عملکرد را بهبود بخشد (Nazeri *et al.*, 2010).

تحلیل‌ها نشان می‌دهند که کارایی مصرف فسفر در کودهای متداول کمتر از ۱۰٪ است واستفاده از نانوکودهای فسفره می‌تواند نه‌تنها بهره‌وری را بهبود دهد، بلکه هدررفت فسفر و اثرات مخرب زیست محیطی مانند شست‌وشوی بیش از حد یا انتقال به منابع آبی را کاهش دهد. در حوزه لوبیا چیتی، فسفر اهمیت بیشتری دارد، چرا که این عنصر به رشد ریشه، تثبیت نیتروژن توسط ریزجانداران ریزوسفر، فتوسنتز و توسعه باروری گیاه کمک می‌کند.

در بسیاری از مناطق دنیا، کمبود فسفر موجب کاهش عملکرد این گیاه تا ۴۰٪ شده است که ضرورت بهره‌گیری از راهکارهای مدیریتی نوین را برجسته می‌سازد (Simelane, 2024). مطالعات متعدد نشان داده است که ژنوتیپ‌های مختلف یک گیاه در شرایط اکولوژیکی متفاوت، واکنش‌های گوناگونی نسبت به مدیریت تغذیه‌ای نشان می‌دهند. از این‌رو، بررسی و شناسایی ژنوتیپ‌های برتر در شرایط خاص اقلیمی، می‌تواند منجر به معرفی ارقام مناسب با عملکرد مطلوب شود (Daemo, 2024).

با وجود شناخته شده بودن نانوفسفر، شکاف دانشی مهمی در ارزیابی میدانی پاسخ ژنوتیپی لوبیا چیتی به کود نانوفسفر در بوم‌اقلیم‌های ایران مشهود است. همچنین، شواهد اندکی درباره برهم‌کنش "ژنوتیپ × نانوکود" و پیامدهای آن بر اجزای عملکرد، کارایی مصرف فسفر و صفات فیزیولوژیک در این محصول وجود دارد (Arora and Khosla, 2024;El-Ghany *et al.*, 2021).

هدف اصلی این پژوهش بررسی اثرات کود نانوفسفر بر عملکرد، اجزای عملکرد و ویژگی‌های تغذیه‌ای ۹ ژنوتیپ لوبیا چیتی در شرایط اکولوژیکی اردبیل است. در این راستا تلاش می‌شود کارایی مصرف فسفر و نقش نانوفسفر در بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش محتوای پروتئین دانه ارزیابی گردد. همچنین، برهم‌کنش ژنوتیپ × نانوفسفر موردبررسی قرار می‌گیرد تا ژنوتیپ‌های کاراتر و سازگارتر شناسایی شوند. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی برای توصیه مدیریتی

و انتخاب ژنوتیپ‌های برتر در راستای افزایش بهره‌وری این محصول ارزشمند در منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سال ۱۳۹۹ در مزرعه ی شخصی واقع در منطقه آراللوی بزرگ در چهار کیلومتری جاده اردبیل به خلخال به منظور مقایسه ۹ ژنوتیپ لوبیا چیتی و همچنین تأثیر کود نانوفسفره بر روی آن‌ها اجرا شد. این منطقه در شمال‌غربی کشور، در مختصات جغرافیایی ٤٨ درجه و ٢٠ دقیقه طول جغرافیایی و ٣٨ درجه و ١٥ دقیقه عرض جغرافیایی و همچنین ارتفاع حدود ۱۳۵۰متر از سطح دریا قرار گرفته است.

این منطقه دارای شرایط آب‌وهوایی نیمه‌خشک و سرد می‌باشد. مجموع بارندگی سالانه در این منطقه در حدود ۲۰۰تا ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد و بارندگی‌ها عمدتاً در فصول پاییز و بهار رخ می‌دهند (Ardabil Climatic Yearbook, 2020). بذور مورد استفاده در این آزمایش از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل تهیه شد. عملیات زراعی انجام یافته در این آزمایش شامل عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم عمیق پاییزه و شخم و دیسک بهاره قبل از کشت انجام شد.

کشت به صورت ردیفی انجام یافت. فاصله هر بذر روی ردیف ۱۰سانتی‌متر و بین ردیف‌ها ۵۰ سانتی‌متر و عمق کاشت چهارسانتی‌متر درنظر گرفته شد. هر کرت شامل چهار ردیف کاشت به طول چهار متر برای هر ژنوتیپ در نظر گرفته شد. مساحت هر کرت ۸ مترمربع (٤×٢) بود. کاشت در تاریخ ۱۰ خرداد ۱۳۹۹ به‌صورت هیرم کاری و ۹ روز پس از آبیاری و گاورو شدن مزرعه انجام یافت.

عملیات کاشت به‌صورت دستی بود و بذرها قبل از کاشت با کاربوکسین- تیرام با نام تجاری ویتاواکس با نسبت دو در هزار ضدعفونی شدند. در طول فصل رشد مراقبت‌های زراعی لازم شامل آبیاری، مبارزه با علف‌های هرز و آفات وبیماری‌ها به طور یکنواخت برای همه تیمارها اعمال شد. در پایان فصل رشد، برداشت محصول با حذف دو ردیف کناری و نیم متر از ابتدا و انتها خطوط کاشت انجام شد.

این بررسی به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. فاکتورها عبارت از ۹ ژنوتیپ لوبیا چیتی (کوشا، غفار، صالح ، محلی اردبیل، صدری، تلاش و لاین‌های ۸۰، ۹۰ و ١٦) و ۳ سطح عامل نانوکود فسفره (شاهد، محلول‌پاشی برگی یک در هزار و دو در هزار) بودند (Medina-velo *et al.*, 2019; Ansari *et al.*, 2015). محلول‌پاشی با کود نانو فسفاته با نام تجاری نانوکود کلات فسفر خضرا ۱۷ درصد در سه مرحله (ساقه‌دهی، پیش از گلدهی و غلاف‌بندی) انجام شد. اطلاعات هواشناسی محل انجام پژوهش در (جدول۱) ارائه شده است.

Table 1: Meteorological information of the research site

month	TMaximum (°C)	TMinimum (°C)	Precipitation (mm)
October	19	7	25
November	11	1	33
December	5	-6	32
January	3	-12	36
February	2	-13	32
March	10	-6	23
April	12	-4	20
May	18	3	15
June	23	7	8
July	28	11	4
August	26	14	3
September	22	7	7

خصوصیات خاک محل انجام پژوهش در (جدول ۲) ارائه شده است. ۳۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص در قالب اوره در مرحله پیش‌کاشت و ۲۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت سرک در مرحله ظهور گل استفاده شد.

Table 2: Examination of the chemical properties of the farm soil

Soil Texture	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Fe	K	P	N (%)	EC ($dS.m^{-1}$)
				(ppm)				
Sandy loam	32	29	39	4.1	311	12	0.13	1.0

نحوه اندازه‌گیری صفات

عملکرد دانه

برای سنجش عملکرد دانه، پس از رسیدگی فیزیولوژیک، ردیف‌های میانی هر کرت برداشت شد و عملکرد دانه در سطح کرت محاسبه گردید و سپس به هکتار تعمیم داده شد. همچنین اجزای عملکرد شامل تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در هر غلاف و وزن صد دانه با شمارش و توزین ۱۰ بوته تصادفی از هر کرت اندازه‌گیری گردید. این روش مطابق با استانداردهای مطالعات زراعی روی لوبیا در ایران است.

محتوای نیتروژن دانه

برای تعیین نیتروژن کل از روش کجلدال بهره گرفته شد. به این منظور نمونه‌های دانه پس از خشک شدن در دمای ٦٥ درجه سانتی‌گراد و آسیاب شدن، با روش هضم اسید سولفوریک در دستگاه کجلدال تجزیه شدند. در این روش نیتروژن آلی موجود در نمونه به یون آمونیوم تبدیل می‌شود؛ سپس با تقطیر به صورت آمونیاک آزاد شده و نهایتاً با اسید بوریک جذب و با اسید کلریدریک یا سولفوریک تیتر می‌گردد. مقدار نیتروژن به‌صورت درصد وزن خشک دانه بیان شد (AOAC, 2005).

محتوای پروتئین دانه

برای محاسبه پروتئین خام، مقدار نیتروژن کل به‌دست‌آمده از روش کجلدال در ضریب ٦/٢٥ ضرب گردید. این ضریب بر اساس میانگین ترکیب اسیدهای آمینه دانه‌های گیاهی در نظر گرفته می‌شود و یکی از پرکاربردترین روش‌های گزارش پروتئین خام در حبوبات است. نتایج به‌صورت درصد وزن خشک دانه گزارش شدند (AACC, 1999).

محتوای فسفر دانه

برای تعیین فسفر دانه، نمونه‌ها پس از هضم با مخلوط اسید نیتریک و پرکلریک به روش تر آماده شدند. سپس مقدار فسفر کل به روش رنگ‌سنجی مولیبدن آبی‌اندازه‌گیری گردید. در این روش یون فسفات موجود در محلول با مولیبدات آمونیوم واکنش داده و کمپلکس فسفومولیبدات تشکیل می‌دهد که در حضور احیاکننده به رنگ آبی تبدیل می‌شود. شدت رنگ ایجادشده در طول موج ٨٨٠ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد و مقدار فسفر بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن خشک گزارش گردید (Worsfold *et al*., 2016).

محتوی پتاسیم دانه

برای سنجش پتاسیم دانه از روش فلیمفوتومتری استفاده شد. برای سنجش پتاسیم، از محلول حاصل از هضم نمونه‌ها استفاده شد. اندازه‌گیری با دستگاه فلیم فوتومترانجام گردید. در این روش اتم‌های پتاسیم در شعله تحریک شده و نور ویژه‌ای را منتشر می‌کنند که شدت آن متناسب با غلظت یون پتاسیم است. با استفاده از منحنی استاندارد، مقدار پتاسیم نمونه‌ها تعیین و بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن خشک گزارش شد(Page *et al*., 1982).

برای تجزیه واریانس داده‌ها از نرم‌افزارهای SAS نسخه ٩/١ و SPSS نسخه ٢٤ استفاده شد. برای بررسی روابط بین صفات موردمطالعه، از تحلیل همبستگی پیرسون استفاده شد. همچنین برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

٣. نتایج و بحث

تعداد غلاف در بوته

طبق جدول تجزیه واریانس (جدول ٣) اثر ژنوتیپ و کود نانوفسفر بر تعداد غلاف در بوته در سطح یک درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین (جدول ٤) نشان داد که از نظر ژنوتیپ، رقم لاین ٨٠ با ٢١/٥١ غلاف در بوته در بین ارقام دارای بیشترین غلاف در بوته بود. میانگین تعداد غلاف از ١٩/٤ عدد در بوته در شرایط شاهد به ٢٠/٩ عدد در بوته در تیمار

نانوفسفر رسید که نشان‌دهنده افزایشی معادل ۷/۷ درصد است. همچنین برهمکنش ژنوتیپ و کود در صفت تعداد غلاف در بوته معنی‌دار نبود. تعداد غلاف شاخصی حساس به وضعیت تغذیه‌ای و هم‌زمان به توانایی ژنتیکی در شاخه‌دهی و نگهداشت گل و غلاف است. افزایش معنی‌دار غلاف با استفاده از کود نانوفسفر ناشی از بهبود تغذیه فسفر در مراحل زایشی و کاهش ریزش گل و غلاف است. این سازوکار در بررسی‌های جدید نانوفسفر و نانومواد فسفری نیز گزارش شده است (Dapkekar *et al.*, 2023). افزایش تعداد غلاف در اثر نانوفسفر را می‌توان به نقش فسفر در بهبود تقسیم سلولی و تشکیل گل‌ها نسبت داد (Rayate *et al.*, 2025). در مطالعه‌ای نشان دادند که محلول‌پاشی نانوفسفر بر سویا تعداد غلاف و عملکرد را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد (Vahdat Masoud and Aboutalebian, 2023).در مروری بر تحقیقات لوبیا گزارش شد که حتی مصرف مقادیر نسبتا پایین فسفر (۲۰ کیلوگرم در هکتار) باعث بهبود اجزای عملکرد به‌ویژه تعداد غلاف می‌شود (Zewdie and Hessen, 2020).

تعداد دانه در غلاف

مطابق نتایج (جدول ۳)، اثر ژنوتیپ و کود نانوفسفر بر تعداد دانه در غلاف در سطح یک درصد معنی‌دار بود.با توجه به (جدول ٤) از نظر ژنوتیپی، رقم تلاش (٤/٦٨) و رقم محلی اردبیل (٤/٢٣) دارای بیشترین تعداد دانه در غلاف بودند. در حالی‌که رقم لاین ۸۰ (۲/۹۸) و رقم صالح (۳/۱٦) پایین‌ترین تعداد دانه در غلاف در بین ارقام مورد بررسی را داشتند. مقایسه میانگین اثر اصلی کود نیز نشان داد میانگین تعداد دانه در تیمار دو در هزار کود نانوفسفره نسبت به شاهد به ۱۸/۸ درصد افزایش یافته‌است. تعداد دانه در غلاف تابعی از لقاح موفق، پایداری گرده‌افشانی و تغذیه فسفر در پنجره‌های بحرانی تشکیل دانه است؛ فسفر در دسترس می‌تواند به بهبود زنده‌مانی گلچه‌ها و کاهش پوکی غلاف کمک کند، بنابراین معنی‌دار شدن اثر کود قابل انتظار بود (Rose and Wissuwa, 2023). گزارش شده که مصرف فسفر بالاتر موجب افزایش معنی‌دار تعداد دانه در غلاف شد و این اثر در ژنوتیپ‌های مختلف شدت متفاوتی داشت (Gutema *et al.*, 2024).

وزن صددانه

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) حاکی از تاثیر معنی‌دار اثر اصلی ژنوتیپ و کود نانوفسفر بر وزن صد دانه در سطح احتمال یک درصد بود، درحالی‌که برهم‌کنش ژنوتیپ و کود فاقد معناداری آماری بود. مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها (جدول ٤) نشان داد ژنوتیپ رقم لاین ۹۰، در بین ارقام دارای بیشترین وزن صددانه است. (٤۳/۳ گرم). همچنین با بررسی مقایسه میانگین اثر کود مشاهده شد استفاده از نانو کود فسفره، وزن صد دانه را در تیمار دو در هزار حدود ۸ درصد نسبت به شاهد افزایش داده‌است. وزن صد دانه نمایه‌ای از توان پرشدن دانه و کارایی انتقال مواد فتوسنتزی است که نسبت به تغذیه فسفر و سلامت منبع – مخزن حساس است. نانوفسفر با بهبود دسترسی فسفر و پایداری تغذیه در دوره پرشدن، می‌تواند وزن دانه را افزایش دهد (Firouzkouhi *et al.*, 2024). این نتیجه با یافته‌های ناصری (Naseri , 2025) مطابقت دارد که گزارش کردند فسفر کافی منجر به بهبود پر شدن دانه و افزایش وزن آن می‌شود. فسفر نقش اساسی در انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها و بهبود کیفیت محصول ایفا می‌کند. نتایج مطالعه اینیز در سویا حاکی از آن بود که نانوفسفر از طریق افزایش جذب عناصر غذایی موجب افزایش معنی‌دار وزن دانه می‌شود(Rayate *et al.*, 2025).

عملکرد دانه

مطابق جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) اثر ژنوتیپ و کود نانوفسفر بر صفت عملکرد دانه در سطح یک درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین (جدول ٤) نشان داد بیشترین عملکرد دانه به ژنوتیپ تلاش با ۲۳۱۳/۸ کیلوگرم در هکتار بود. از نظر اثر تیمارهای کودی، تیمار دو در هزار کود نانوفسفره نسبت به شاهد، عملکرد را حدود ۲۷ درصد (از ۱۷۰٦/۷ به ۲۱٥٦/٥ کیلوگرم در هکتار) افزایش داد. نانوفرمولاسیون‌های فسفاته با افزایش فراهمی فسفر در ریزوسفر و کاهش تثبیت، شاخص‌های رشد و نهایتا عملکرد را ارتقا می‌دهند (Ruau *et al.*, 2023). افزون بر این، در شرایط کمبود فسفر یا تنش‌های هم‌زمان، برخی ژنوتیپ‌ها کارایی بالاتری در حفظ رشد و تخصیص به غلاف/دانه دارند که با برتری ژنوتیپ‌های تلاش و لاین ١٦ در این پژوهش همخوانی دارد. نانومواد فسفردار به

دلیل سطح ویژه بالا و رهایش تدریجی فسفر می‌توانند جذب فسفر را در گیاه بهبود بخشند و عملکرد را افزایش دهند (Liu and Lal, 2015). مدیریت مناسب فسفر نقش کلیدی در بهبود فتوسنتز، تثبیت نیتروژن و رشد ریشه لوبیا دارد.نانوذرات فسفر به‌دلیل اندازه کوچک و سطح ویژه بالا، قابلیت حل‌شدگی و جذب بهتر توسط ریشه لوبیا را دارند (Raza *et al*., 2023). مطالعه‌ای نشان داد که کاربرد نانوهیدروکسی‌آپاتیت که نوعی نانوکود فسفره است در مقایسه با کودهای فسفره معمولی، افزایش ۳۰–۲۵ درصدی در جذب فسفر و ۲۰ درصد افزایش عملکرد دانه لوبیا را به‌دنبال داشت. این امر ناشی از رهایش تدریجی و هدفمند فسفر در مراحل بحرانی رشد بود (González-García *et al*., 2023). نقش کلیدی نانوکود فسفره در تامین بهینه و پایدار فسفر، موجب تقویت فرآیندهای فیزیولوژیک مرتبط با سازوکارهای موثر بر عملکرد شده است. ازجمله این سازوکارها می‌توان به پایداری بیشتر گل و غلاف، موفقیت در لقاح و تشکیل دانچه، و نهایتا انتقال و ذخیره‌سازی کارآمد مواد فتوسنتزی در دانه‌ها اشاره کرد. همچنین، بهبود معنادار شاخص‌های کیفی دانه تحت تاثیر نانوکود، ازجمله افزایش محتوای نیتروژن و پروتئین، گویای بهبود کلی وضعیت تغذیه‌ای گیاه است که به‌طور غیرمستقیم با فراهم کردن پیش‌سازهای لازم برای رشد و توسعه، زمینه‌ساز افزایش عملکرد کمی نیز بوده است. در سطح ژنوتیپی نیز، برتری ژنوتیپ‌هایی مانند تلاش با بیشترین تعداد دانه در غلاف و لاین ۱۶ با وزن صد دانه بالا و محتوای کیفی برتر، همسو با عملکرد بالای آن‌ها، مجددا بر ارتباط تنگاتنگ صفات موثر بر عملکرد با نتیجه نهایی تاکید دارد؛ بنابراین، افزایش عملکرد دانه در این تحقیق نه یک اتفاق مستقل، بلکه نتیجه‌ی یک بهبود سیستماتیک در شبکه‌ای از صفات بهم‌پیوسته فیزیولوژیک و مورفولوژیک است که همگی تحت تاثیر کاربرد نانوکود فسفره قرار گرفته‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که نانوکود فسفره با بهینه‌سازی فرآیندهای فیزیولوژیکی مرتبط با رشد زایشی و انتقال مواد فتوسنتزی، راهکار موثری برای غلبه بر محدودیت فسفر در خاک و دستیابی به پتانسیل عملکرد بالاتر در لوبیا چیتی است.

Table 3: Analysis of variance of the effects of genotype and nano-phosphorus fertilizer on yield, yield components, and qualitative traits of pinto bean

s.o.v	d.f	Mean squares							
		Seed potassium	Seed phosphorus	Seed Protein	Seed nitrogen	Grain yield	Hundred seed weight	Number of seeds per pod	Number of pods per plant
replication	2	3.227	0.018	206.56	5.288	256778.7	2.898	2.534	2.521
Genotype (A)	8	2.744**	0.016**	88.62**	2.27**	239973**	16.96**	1.598**	7.166**
phosphorus fertilizer (B)	2	1.138**	0.339**	57.66**	1.46**	2734110**	124.8**	5.479**	33.292**
B × A	16	0.107^{ns}	0.0009^{ns}	2.55^{ns}	0.06^{ns}	39388.3^{ns}	3.594^{ns}	0.098**	0.962^{ns}
Experimental error	52	0.093	0.0011	3.716	0.095	32209.1	5.907	0.313	1.478
CV (%)	-	8.21	7.12	8.11	8.17	9.3	5.9	12.5	6.03

ns, * and **: non-significant, significant at the probability level of p≤0.05 and p≤0.01, respectively

محتوای نیتروژن و درصد پروتئین دانه

کاربرد کود نانوفسفره و همچنین تفاوت ژنوتیپی، تاثیر معنی‌داری در سطح یک درصد در محتوای نیتروژن و پروتئین دانه لوبیا چیتی داشت. با توجه به نتایج جدول مقایسه میانگین (جدول ٤) به‌طور خاص، ژنوتیپ‌های لاین ۱۶، لاین ۹۰، لاین ۸۰، صالح و تلاش بالاترین میزان نیتروژن و پروتئین دانه را نشان دادند. همچنین مقایسه میانگین اثرهای اصلی کود نانوفسفره نیز نشان داد، استفاده از کود نانوفسفره موجب افزایش معنی‌دار محتوای نیتروژن و درصد پروتئین دانه لوبیا چیتی می‌شود. در تیمار شاهد، میانگین نیتروژن دانه ۳/٤٥ درصد بود که با محلول‌پاشی نانوفسفر در سطح دو در هزار، به ۳/۹۸ درصد افزایش یافت. این افزایش معادل حدود ۱۵/٤ درصد رشد نسبت به تیمار شاهد بود. این افزایش ناشی از نقش فسفر در بهبود فرآیندهای متابولیکی ازجمله سنتز

پروتئین است. فسفر به‌عنوان جزئی کلیدی در مولکول ATP و NADPH، انرژی لازم برای سنتز آمینواسیدها و پروتئین را فراهم می‌کند(Hajiniya and Zaree, 2015). همچنین مطالعاتی نشان داده‌اند که نانوکودهای فسفره می‌توانند راندمان جذب نیتروژن را افزایش داده و در نتیجه محتوای پروتئین دانه را بهبود بخشند (Liu *et al.*, 2020). افزایش فراهمی فسفر باعث توسعه بهتر ریشه، ارتقاء فراهمی انرژیو بهبود همزیستی ریزوبیومی می‌شود؛ در نتیجه تثبیت زیستی نیتروژن و جذب نیتروژن معدنی کاراتر می‌گردد (Ghamari *et al.*, 2018). پروتئین خام تابع مستقیمی از نیتروژن کل دانه است؛ بنابراین هر عاملی که جذب/تثبیت نیتروژن را بهبود دهد، معمولاً پروتئین دانه را نیز افزایش می‌دهد. نانوفسفر با تسهیل تأمین فسفر در پنجره‌های بحرانی رشد و بهبود همزیستی ریزوبیومی، بستر لازم را برای تجمیع نیتروژن در دانه فراهم می‌کند (Beebe, 2022).

محتوای فسفر دانه

با بررسی (جدول ۳) مشخص شد اثر اصلی ژنوتیپ و کود نانوفسفر بر وزن صد دانه در سطح یک درصد معنی‌دار بود ولی برهم‌کنش ژنوتیپ×کود معنی‌دار نشد. مقایسه میانگین (جدول ٤) نشان داد در بین ارقام کمترین مقدار محتوای فسفر دانه در رقم غفار با ۰/٤٥٥ درصد و سپس کوشا با میزان ۰/٤٧٧ درصد ثبت شد. همچنین بیشترین مقدار در رقم لاین ١٦ با میزان ۰/٥٨٨دیده می‌شود. در مقایسه میانگین‌های اثرهای اصلی کود نانوفسفره، تیمار دو در هزار نسبت به شاهد مقدار فسفر دانه را حدود ٣٦ درصد افزایش داده است.

محتوای فسفر دانه نمایانگر توانایی گیاه در جذب و تخصیص فسفر به دانه است. نانوفسفر با رهایش تدریجی و سطح جذب بالا توانسته است تجمع فسفر را در دانه بهبود دهد (Zhu *et al.*, 2023). مصرف فسفر بیشتر به‌ویژه در ژنوتیپ‌های پرمحصول موجب افزایش فسفر دانه می‌شود (Gutema *et al.*, 2024).

در مطالعه‌ای ثابت شد که بکارگیری زیست‌کودهای فسفره همراه با فسفر معدنی باعث افزایش معنی‌دار فسفر دانه در لوبیا شد (Afrasiabi *et al.*, 2023). نانوکودها به دلیل اندازه کوچک و سطح ویژه بالا، قابلیت جذب و انتقال کارآمدتری در گیاه دارند که منجر به افزایش غلظت فسفر در بافت‌های مختلف ازجمله دانه می‌شود (Dapkekar *et al.*, 2023). ژنوتیپ لاین ١٦ نیز بیشترین پاسخ را به کود نانوفسفره نشان داد که حاکی از وجود پتانسیل ژنتیکی برایبهره‌وری بیشتر از کود است.

Table 4: Comparison of the main effect means of genotype and nano-phosphate fertilizer on yield, yield components, and qualitative traits of pinto bean

Experimental treatments	Seed potassium content (%)	Seed phosphorus content (%)	Seed Protein (%)	Seednitrogen content (%)	Grain yield (Kg.ha^{-1})	Hundred seed weight (g)	Number of seeds per pod	Number of pods per plant
Koosha	3.01 c	0.477 c	20.31 b	3.25 b	1805.5 d	39.2 c	3.47 bc	20.6 ab
Ghaffar	2.92 c	0.455 c	20.5 b	3.28 b	1769.7 d	42.4 a	3.21 cd	20.41 ab
Saleh	4.32 ab	0.554 b	25.75 a	4.12 a	1726 d	42.9 a	3.16 cd	19.44 bc
Local of ardabil	2.86 c	0.473 c	20.62 b	3.3 b	1949.1 c	40.4 b	4.23 ab	18.4 c
Talash	4.05 b	0.57 ab	26.12 a	4.18 a	2313.8 a	38.5 c	4.68 a	21 a
Line 80	4.27 ab	0.558 b	24.88 a	3.98 a	1798.3 d	43.3 a	2.98 d	21.51 a
Line 90	4.29 ab	0.582 ab	25.07 a	4.01 a	1770.9 d	40.65 b	3.57 bc	18.6 c
Line 16	4.46 a	0.588 a	25.55 a	4.07 a	2181.2 b	42.4 a	3.68 bc	20.55 ab
Sadri	2.96 c	0.464 c	20.68 b	3.31 b	1983.4 c	40.8 b	3.62 bc	20.63
Control	3.41 c	0.441 b	21.57 c	3.45 c	1706.7 b	39.7 b	3.4 b	19.4 b
1 per thousand	3.6 b	0.508 ab	22.87 b	3.66 b	1796 b	40.5 b	3.56 b	19.8 b
2 per thousand	3.88 a	0.599 a	24.88 a	3.98 a	2156.5 a	42.7 a	4.04 a	20.9 a

* Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level using Duncan

محتوای پتاسیم دانه

مطابق نتایج (جدول ۳)، اثر اصلی ژنوتیپ و کود نانوفسفر بر محتوای پتاسیم دانه در سطح یک درصد معنی‌دار بود. با توجه به نتایج جدول مقایسه میانگین (جدول ٤) کمترین مقدار پتاسیم دانه در ارقام غفار (۲/۹۲ درصد)، صدری (۲/۹٦ درصد)و کوشا (۳/۰۱ درصد) مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار در رقم لاین ١٦ با میزان ٤/٤٦ درصد ثبت شد. در بررسی تیمارهای کودی نیز مشاهده شد کاربرد کود نانوفسفره

به مقدار دو در هزار توانسته است میزان محتوای پتاسیم دانه لوبیا چیتی را نسبت به تیمار شاهد حدود ١٤ درصد افزایش دهد.

گرچه پتاسیم مستقیما از نانوفسفر تامین نمی‌شود، اما بهبود وضعیت فسفر به توسعه ریشه، افزایش سطح جذب مؤثر خاک و ارتقای وضعیت منبع–مخزن کمکمی‌کند؛ درنتیجه جذب همزمان کاتیون‌ها ازجمله K^+تقویت و انتقال آن به دانه تسهیل می‌شود(Li *et al.*, 2022).

مرورهای کارکرد پتاسیم در گیاه نشان می‌دهند. پتاسیم نقش تنظیم‌کننده در انتقال قندها، تعادل اسمزی و پرشدن دانه دارد و هر مدیریتی که وضعیت عمومی رشد و منبع انرژی را ارتقا دهد (ازجمله تأمین فسفر)، می‌تواند به انباشت بیشتر پتاسیم در دانه بینجامد(Nabati *et al.*, 2024). مطالعات مزرعه‌ای نیز نشان داده‌اند که مدیریت توأمان فسفر و پتاسیم یا ارتقای کارایی فسفر می‌تواند به پاسخ بهتر ارقام لوبیا در تجمع عناصر دانه کمک کند(Dey *et al.*, 2021). حتی در شرایطی که خاک از حیث پتاسیم، مناسب گزارش می‌شود، پاسخ به بهبود کارایی فسفردر عملکرد و کیفیت دانه از نظر سایر عناصر غذایی مشاهده شده است (Borges *et al.*, 2022). با بررسی (جدول ٤)، تفاوت‌های معناداری بین تیمارهای مختلف لوبیا چیتی از نظر صفات عملکردی و کیفی مشـــاهده می‌شـــود. به‌طورکلی، رقم تلاش با بالاترین عملکرد دانه (٢٣١٣/٨ کیلوگرم در هکتار) و بیشترین تعداد دانه در غلاف (٤/٦٨) برجسته شد، اگرچه وزن صد دانه آن نسبتاً پایین (٣٨/٥ گرم) بود. این الگو نشان می‌دهد که عملکرد بالا در این رقم بیشتر متکی بر افزایش تعداد دانه است تا افزایش وزن دانه. در مقابل، ارقامی مانند لاین ٨٠ و لاین ٩٠ با وجود دارا بودن وزن صد دانه بسیار بالا (به‌ترتیب ٤٣/٣ و ٤٠/٦٥ گرم) و محتوای کیفی برتر (پروتئین، نیتروژن، فسفر و پتاسیم بالا)، عملکرد کمتری نشان دادند که حاکی از یک رابطه تبادلی (Trade-off) بین کیفیت دانه و عملکرد بالا است. رقم لاین ١٦ نقطه تعادل مطلوبی را نشان داد که با عملکرد بسیار خوب (٢١٨١/٢ کیلوگرم در هکتار)، وزن دانه مناسب (٢٤/٤ گرم) و همچنین محتوای کیفی بسیار بالا (پروتئین: ٢٥/٥٥ درصد، پتاسیم: ٤/٤٦ درصد) همراه بود و می‌تواند به‌عنوان یک ژنوتیپ امیدبخش برای اهداف به‌نژادی در نظر گرفته شود. همچنین، ارقام محلی مانند اردبیل و صدری با وجود داشتن تعداد غلاف قابل‌قبول، به‌دلیل پایین بودن تعداد دانه در غلاف و محتوای کیفی پایین‌تر، عملکرد و کیفیت کمتری داشتند. این یافته‌ها به وضوح نشان می‌دهد که انتخاب رقم باید با توجه به هدف نهایی (عمکرد بالا، کیفیت برتر یا ترکیبی از هر دو) و درنظرگیری این روابط تبادلی صورت پذیرد.

Table 5- Correlation analysis among yield and qualitative traits of pinto bean

Studied traits	Number of pods per plant	Number of seeds per pod	Hundred seed weight	Grain yield	Seed nitrogen	Seed Protein	Seed phosphorus
Seed potassium	0.158^{ns}	0.073^{ns}	0.286*	0.213^{ns}	0.942**	0.941**	0.704**
Seed phosphorus	0.291*	0.241^{ns}	0.409**	0.455**	0.697**	0.698**	
Seed Protein	0.157^{ns}	0.169^{ns}	0.229*	0.265^{ns}	0.999**		
Seed nitrogen	0.157^{ns}	0.167^{ns}	0.229*	0.264^{ns}			
Grain yield	0.272*	0.721**	0.664**				
Hundred seed weight	0.386**	0.122^{ns}					
Number of seeds per pod	-0.367**						

ns, * and **: non-significant, significant at the probability level of p≤0.05 and p≤0.01, respectively

در (جدول ٥) همبستگی بین صفات بررسی شده است. بر اساس نتایج حاصل از تجزیه همبستگی، روابط معناداری بین برخی صفات عملکردی و کیفی در لوبیا چیتی مشاهده گردید. عملکرد دانه با دو جزء اصلی خود یعنی تعداد دانه در غلاف و وزن صد دانه دارای همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار (در سطح ١٪) است، که نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده این دو صفت در افزایش عملکرد نهایی می‌باشد. همچنین همبستگی مثبت بسیار معناداری بین پتاسیم دانه با هر دو صفت نیتروژن و

پروتئین دانه مشاهده شد که می‌تواند نشان‌دهنده نقش مهم پتاسیم در فرآیندهای متابولیکی مرتبط با جذب و تثبیت نیتروژن و سنتز پروتئین باشد. از سوی دیگر، بین تعداد دانه در غلاف و تعداد غلاف در بوته یک همبستگی منفی و معنادار مشاهده شد. این رابطه معکوس می‌تواند نشان‌دهنده یک نوع اثر جبرانی یا تبادل (Trade-off) بین این دو جزء اصلی عملکرد باشد، به طوری که با افزایش تعداد غلاف، منابع گیاه (مانند مواد فتوسنتزی و مواد معدنی) بین تعداد بیشتری غلاف توزیع شده و در نتیجه تعداد دانه در هر غلاف کاهش می‌یابد، یا برعکس. افزون بر این، همبستگی مثبت و معنادار میزان فسفر دانه با عملکرد گواه آن است که بهبود تغذیه و جذب بهتر عناصر نه تنها بر کمیت محصول، که بر غنای غذایی آن نیز اثر چشمگیری می‌گذارد. این شبکه پیوسته از پیوندها میان صفات، دیدگاه جامعی فراهم می‌آورد که می‌توان در گزینش ژنوتیپ‌های برتر و مدیریت بهینه کوددهی برای دستیابی همزمان به عملکرد بالا و کیفیت برتر از آن بهره جست. در مجموع، این یافته‌ها می‌تواند در برنامه‌های به‌نژادی برای بهبود همزمان عملکرد و کیفیت دانه لوبیا چیتی از طریق انتخاب غیرمستقیم صفات همبسته، مورد استفاده قرار گیرد.

٤. نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که ژنوتیپ‌های لوبیا چیتی از نظر عملکرد، اجزای عملکرد و صفات کیفی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر دارند و این امر اهمیت انتخاب ژنوتیپ مناسب را برجسته می‌سازد. مصرف کود نانوفسفره به‌طور کلی موجب بهبود عملکرد دانه، افزایش تعداد غلاف و دانه در غلاف، وزن صد دانه و نیز ارتقای محتوای نیتروژن، پروتئین، فسفر و پتاسیم دانه شد. کود نانوفسفره به‌طور میانگین عملکرد دانه را به میزان قابل‌توجهی (حدود ۲٦ درصد) افزایش داد. در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، رقم تلاش با بیشترین عملکرد دانه و رقم لاین ١٦ با ترکیب مطلوبی از عملکرد بالا و کیفیت برتر دانه به‌عنوان ژنوتیپ‌های برتر و پاسخ‌دهنده به نانوفسفر شناسایی شدند. وجود همبستگی مثبت و بسیار معنادار بین محتوای نیتروژن و پروتئین دانه و همچنین رابطه تبادلی منفی بین تعداد غلاف و تعداد دانه در غلاف، یافته‌های کلیدی این تحقیق بودند. به‌طورکلی، استفاده از نانوفسفر به‌عنوان یک راهکار مدیریتی نوین، با بهبود کارایی مصرف فسفر، می‌تواند سهم بسزایی در دستیابی به پایداری تولید و افزایش بهره‌وری لوبیا چیتی در شرایط مختلف داشته باشد.

٥. منابع

AACC International. (1999). Method 46-10.01: Crude protein—Improved Kjeldahl method. AACC Methods.

Abou-Sreea, A. I. B., Kamal, M., Sowfy, D. M. E., Rady, M. M., Mohamed, G. F., Al-Dhumri, S. A., Al-Harbi, M. S. and Abdou, N. M. (2022). Small-Sized Nanophosphorus Has a Positive Impact on the Performance of Fenugreek Plants under Soil–Water Deficit Stress: A Case Study under Field Conditions. *Biology*, 11(1), 115. https://doi.org/10.3390/biology11010115

Afrasiabi, M., Ghasemi, S. and Mohammadian, F. (2021). Effect of phosphate solubilizing bacteria and mycorrhizal fungi along with phosphorus chemical fertilizer on yield and nutrient uptake in common bean (Phaseolus vulgaris L.). *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23(2), 425-437.(in Persian with English abstract).https://doi.org/10.52547/jast.23.2.425

Ansari, S. , Sarikhani, M. R. and Najafi, N. (2015). Inoculation Effect of Common Biofertilizers on Growth and Uptake of Some Elements by Bean (Phaseolus vulgaris L.) in Presence of Soil Indigenous Microflora. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *25*(1), 85-98.

AOAC International. (2005). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (18th ed.). AOAC International. Ardabil Province Climatic Yearbook 2020, Iran Meteorological Organization.

Arora, V. and Khosla, B. (2024). Synthesis of phosphorus nano-fertilisers: their strategic applications and effect on plant growth. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(2025), 6161–6180. https://doi.org/10.1007/s13762-024-06110-9

Beebe, S. (2022). Effect of drought and low phosphorus availability on physiological and yield responses in common bean. Frontiers in Plant Science, 13, 814325. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.814325

Bindraban, P. S., Dimkpa, C. O. and Pandey, R. (2020). Exploring phosphorus fertilizers and fertilization strategies for improved human and environmental health. *Biology and Fertility of Soils*, 56, 299–317. https://doi.org/10.1007/s00374-019-01430-2

Borges, B. M. M. N., Alovisi, A. M. T., Silva, J. A. M., Nascimento, V. L. and Silva, D. A. (2022). Phosphorus fertilization improves nitrogen and potassium nutrition in common bean plants under non-limiting conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 45(7), 1015-1027.https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1998523

Carmona, F. J., Guagliardi, A. and Masciocchi, N. (2022). Nanosized Calcium Phosphates as Novel Macronutrient Nano-Fertilizers. *Nanomaterials*, 12(15), 2709. https://doi.org/10.3390/nano12152709

Daemo, B. B. (2024). Genotype by environment interaction and performance stability of common bean (Phaseolus vulgaris L.) cultivars grown in Dawuro zone, *Southwestern Ethiopia. Open Agriculture*, 9(1),20220288.https://doi.org/10.1515/opag-2022-0288

Dapkekar, A., Deshpande, P. and Oak, M. D. (2023). Nano-enabled phosphorus delivery systems for mitigating abiotic stress and improving reproductive development in legumes. *Plant Stress*, 9, 100187. https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100187

Dey, G., Banerjee, P. and Sharma, R. K. (2021). Integrated nutrient management for improving yield and nutrient use efficiency in French bean (Phaseolus vulgaris L.) under subtropical conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 44(5), 669-682.https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1849285

El-Ghany, M. F. A., El-Kherbawy, M. I., Abdel-Aal, Y. A., El-Dek, S. I. and Abd El-Baky, T. (2021). Comparative Study between Traditional and Nano Calcium Phosphate Fertilizers on Growth and Production of Snap Bean (Phaseolus vulgaris L.) Plants. *Nanomaterials*, 11(11), 2913.https://doi.org/10.3390/nano11112913

Firouzkouhi, F., Darvishzadeh, R., Bernousi, I. and Ghasemzadeh, R. (2024). Development of Selection Index to Improve Grain Yield in Maize under Normal and Phosphorus Deficit Conditions. *Journal of Crop Breeding*, *16*(1), 116-128. (in Persian with English abstract).10.61186/jcb.16.49.116

Ghamari, T. , Souri, M. K. , Arab, M. and Azadegan, B. (2017). Effect of Different Levels and Methods of Phosphorus Fertilizer Application on Growth and Development of Two Stock (Matthiola incana L.) Cultivars. , 9(2), 1-13. doi: 10.22084/ppt.2017.2229

González-García, Y., Cárdenas-Álvarez, C. O. and Benavides-Mendoza, A. (2023). Nanophosphorus and conventional phosphorus fertilizers: Effects on plant growth, phosphorus use efficiency, and soil microbial activity. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1), 1234-1248.10.1007/s42729-023-01110-z

Gutema, I. O., Demisachew, T. and Alemu, N. D. (2024). Phosphorus fertilizer effects on common bean yield components. Agricultural Research and Development Journal, 9(1), 55–70.

Hajiniya, S. and Zaree, M. (2015). Effect of Co-inoculation of Endophytic Fungus Piriformospora Indica and Azospirillum Strains on Some Physiological Traits, Nutrient Absorption and Grain Yield of Wheat (Triticum aestivum cv. Sardari) Under, *6*(2), 149-161.

Hoseinzadeh, N., and Pirzad, A. (2024). Biochemical response and nutrient uptake of common bean (Phaseolus vulgaris L., Pinto bean) to humic acid and phosphorus sources (biological and chemical) under deficit irrigation. *Agricultural Journal of Crop Research Quarterlies*, 26(4), 143–164.(in Persian with English abstract).https://doi.org/10.22059/jci.2024.365576.2856

Javan, K., Altaee, A., Darestani, M., Mirabi, M., Azadmanesh, F., Zhou, J. L. and Hosseini, H. (2023). Assessing the Water–Energy–Food Nexus and Resource Sustainability in the Ardabil Plain: A System Dynamics and HWA Approach. *Water*, 15(20), 3673. https://doi.org/10.3390/w15203673

Li, Y., Wang, X. and Zhang, H. (2022). The interactions between potassium and phosphorus in soil-plant system: A review. *Rhizosphere*, 23, 100556.https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100556

Liu, R. and Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of The Total Environment*, 514, 131-139.https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.104

Liu, R. and Lal, R. (2015). Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of The Total Environment*, 514, 131–139. 10.1016/j.scitotenv.2015.01.104

Medina-Velo, I. A., Barrios, A. C., Zuverza-Mena, N., Hernandez-Viezcas, J. A., Chang, C. H., Ji, Z. and Gardea-Torresdey, J. L. (2017). Comparison of the effects of commercial coated and uncoated ZnO nanomaterials and Zn compounds in kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) plants. *Journal of Hazardous Materials*, *332*, 214-222.

Nabati, J. , Yousefi, A. , Hasanfard, A. and Nemati, Z. (2024). Investigating the effect of potassium silicate as a messenger in retransmission in Bitter vetch(Vicia ervilia L.). , 16(1), 103-112. doi: 10.22084/ppt.2024.28853.2122

Naseri, R. (2025). Yield, Yield Components, and Gas Exchange in Barley (Hordeum vulgare L.) Cultivars Affected by the Applications of Different Sources of Fertilizer under Dryland Farming. *Journal Of Agroecology*, *17*(2), 219-238. (in Persian with English abstract). 10.22067/agry.2023.80366.1138

Nazeri, P., Kashani, A. , Khavazi, K., Ardakani, M. R., Mirakhori, M. and Pour Siah Bidi, M. M. (2010). The effect of biofertilizer and phosphorus fertilizer banding with Zinc on white bean (Phaseolus vulgaris L.). *Journal Of Agroecology*, *2*(1), 175-185. (in Persian with English abstract).https://doi.org/10.22067/jag.v2i1.7617

Page, A. L., Miller, R. H. and Keeney, D. R. (Eds.). (1982). *Methods of Soil Analysis: Part 2—Chemical and Microbiological Properties* (2nd ed.). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.

Rayate, A. S., Todmal, S. M., Kamble, B. M., Durgude, A. G. and Jadhav, A. B. (2025). Effect of foliar application of nano phosphorus on yield and nutrient uptake of soybean. International Journal of Research in Agronomy, 8(8), 45–52. https://doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i8f.3557

Raza, Q., Riaz, A., Sabar, M. and Atif, R. M. (2023). Phosphorus nutrition improves drought tolerance in grain legumes through enhanced flower production, pollen viability, and pod set. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(5), 2871-2886. https://doi.org/10.1007/s00344-022-10753-8

Rose, T. J. and Wissuwa, M. (2023). Rethinking phosphorus nutrition in plants: From acquisition to utilization and seed set. *Plant and Soil*, 487(1-2), 1-20. https://doi.org/10.1007/s11104-023-05959-y

Ruau, C., Naipal, V., Gagnaire, N., Cantero-Martinez, C., Guenet, B. and Gabrielle, B. (2024). Soil erosion has mixed effects on the environmental impacts of wheat production in a large, semi-arid Mediterranean agricultural basin. *Agronomy for Sustainable Development*, *44*(1), 6.10.1007/s13593-023-00942-4

Soheili movahhed, S., Esmaeili, M. A., jabbari, F. and fouladi, A. (2017). Evaluation of Yield and Yield Components of Some Pinto bean (Phaseolus vulgaris L.) Genotypes under Late Season Water Deficit Conditions. *Journal Of Agroecology*, *9*(2), 433-444. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jag.v9i2.45184

Vahdat Masoud, S. and Aboutalebian, M. A. (2023). Improving the Quantitative, Qualitative and Agronomic Phosphorus Efficiency of Soybean (Glycine max L.). *Journal Of Agroecology*, *15*(4), 769-787. (in Persian with English abstract). 10.22067/agry.2022.75382.1097

Worsfold, P., Gimbert, L. J. and Mankasingh, U. (2016). The molybdenum blue reaction for the determination of orthophosphate. *Analytica Chimica Acta*, 890, 60–82. https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.06.006

Zewdie, T. and Hassen, E . (2020). Review on effects of phosphorus fertilizer rates on growth, yield components and yield of common bean. Journal of Current Research in Food Science, 1(2), 34–39.

Zhu, J., Li, Y. and Zhang, X. (2023). Advances in nano-phosphorus fertilizers for sustainable agriculture. Journal of Nanomaterials and Agriculture, 5(1), 101–115. https://doi.org/10.1016/j.jna.2023.101115