



Evaluation the effect of root morphological characteristics on phosphorus uptake in rice cultivars (*Oryza sativa* L.)

Sogand Shirinpour¹ | Masoud Esfahani² | Alieaza Fallah Nosratabad³ | Shahram Mahmoudsoltani⁴ | Ali Aalami⁵

1 Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran E-mail:

sogand.plant@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran E-mail: esfahani@guilan.ac.ir

3. Department of Soil Biology, Soil and Water Research Institute of Iran, Karaj, Iran: rezafayah@yahoo.com

4. Department of Soil and Water, Rice Research Institute of Iran, Rasht, Iran: shmsoltani@gmail.com

5. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran ali_aalami@guilan.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	To investigate the effect of root morphological characteristic on phosphorus uptake in rice cultivars, a factorial experiment was carried out using a completely randomized design in an open field at the Rice Research Institute of Iran, Rasht, during the spring of 2022. The experimental treatments included 10 rice cultivars (four local cultivars; Hashemi, Hassani, Ali-Kazemi and Domsiah and four improved cultivars; Gilaneh, Anam, Shiroudi and Khazar and two control cultivars; Ahlami Tarom and Neda) and two levels of soil phosphorus including four mg.kg-1 and 60 mg.kg-1. Results showed that there was a significant difference between rice cultivars in terms of the measured root morphological characteristics, and Ahlami Tarom and Shiroudi cultivars with extensive root structure in terms of volume and surface had higher phosphorus uptake efficiency. Ahlami Tarom and Shiroudi cultivars exhibited the highest values for root characteristics, while Gilaneh and Khazar cultivars showed the lowest. Significant differences were observed among rice cultivars in terms of shoot dry weight, total shoot phosphorus concentration and uptake, as well as phosphorus uptake and phosphorus use efficiency. the highest amount of total phosphorus concentration and phosphorus uptake and phosphorus use efficiency were 3.2 mg.g-1, 37.9% and 88% respectively and 2.9 mg.g-1, 32.5% and 64% respectively) in Ahlami Tarom and Shiroudi cultivars, respectively. Based on the results of the cluster analysis, rice cultivars were categorized into two groups, each exhibiting similar characteristics. Additionally, factor analysis identified two main factors, including morphological and functional root characteristics, which significantly explained the variations in root-related characteristics. Based on the results of this experiment, Ahlami Tarom and Shiroudi rice cultivars appear to be better adapted to conditions of soil phosphorus deficiency, and their cultivation in areas with such deficiencies may be recommended.
Article history:	
Received: Oct. 25, 2024	
Revised: Jan. 26, 2024	
Accepted: Feb. 3, 2024	
Published online: May. 2025	
Keywords: Constitutive Model, Unsaturated Soil, Numerical Simulation, Plasticity	

Cite this article: Shirinpour, S., Esfahani, M., Fallah Nosratabad, A., Mahmoudsoltani, S. & Aalami, A. (2025). Evaluation the effect of root morphological characteristics on phosphorus uptake in rice cultivars (*Oryza sativa* L.), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (3), 715-734. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.384338.669819>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.384338.669819>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

Phosphorus is one of the important nutritional nutrients needed for crops, which is in low availability in the soil. Identification of cultivars that are known as phosphorus efficient can be effective in better utilization of soil phosphorus.

Methods:

In order to evaluate the effect of root characteristic on phosphorus uptake in rice cultivars, a pot experiment was conducted using a completely randomized design in an open field at the Rice Research Institute of Iran, Rasht, during the spring of 2022. The experimental treatments included 10 rice cultivars (four local cultivars; Hashemi, Hassani, Ali-Kazemi and Domsiah and four improved cultivars; Gilaneh, Anam, Shiroudi and Khazar and two control cultivars; Ahlami Tarom and Neda) and two levels of soil phosphorus including 4 mg.kg⁻¹ and 60 mg.kg⁻¹.

Results:

Results showed that there was a significant difference between rice cultivars in terms of the measured root morphological characteristics, and Ahlami Tarom and Shiroudi cultivars with extensive root structure in terms of volume and surface had higher phosphorus uptake efficiency. Ahlami Tarom and Shiroudi cultivars had the highest amount and Gilaneh and Khazar cultivars had the lowest quantity of quantitative root characteristics. In Ahlami Tarom and Shiroudi cultivars, the total root length was 628.3 and 596.3 cm, respectively, the root surface was 384.5 and 348.9 cm², respectively, and the root volume was 175 and 155 cm³, respectively (in 10000 cm³ (pot volume unit)). In Khazar and Gilane cultivars, the total length of the root was 275.9 and 293.7 cm respectively, the root surface was 218.7 and 237.5 cm², respectively, and the root volume was 86.6 and 145 cm³, respectively in 10000 cm³ (pot volume unit). Rice cultivars had significant differences in shoot dry weight, total shoot phosphorus concentration and uptake, and phosphorus uptake and phosphorus use efficiency. Results showed that the highest amount of total phosphorus concentration and phosphorus uptake and phosphorus use efficiency were (3.2 mg.g⁻¹, 37.9% and 88% respectively) and (2.9 mg.g⁻¹, 32.5% and 64% respectively) in Ahlami Tarom and Shiroudi cultivars, respectively. According to the results of cluster analysis, rice cultivars were divided into two groups with similar characteristics within each group. Additionally, factor analysis identified two main factors, including morphological and functional root characteristics, which significantly explained the variations in root-related characteristics. Based on the results of this experiment, Ahlami Tarom and Shiroudi rice cultivars seems to be more adapted with soil phosphorus deficiency conditions and their use for cultivation in areas with soil phosphorus deficiency may be recommended.

Conclusion:

Overall, variations in root morphological traits and enhanced root development enable plants to access a larger soil volume, thereby improving phosphorus uptake absorption. The diversity in root biomass indicates that rice cultivars vary in their root system efficiency for phosphorus uptake, which supports plant growth. Identifying donor cultivars with efficient root systems can be used in rice breeding programs aimed at mitigating phosphorus deficiency in soils or reducing dependence on phosphorus fertilizers.

Author Contributions:

Conceptualization, Masoud Esfahani, Alireza Fallah Nosratabad and Shahram Mahmoudsoltani; Methodology, Masoud Esfahani, Sogand Shirinpour and Shahram Mahmoudsoltani; Software, Ali Aalami and Sogand Shirinpour; Validation, Masoud Esfahani and Shahram Mahmoudsoltani ; Formal analysis, Ali Aalami and Sogand Shirinpour; Investigation, Masoud Esfahani and Sogand Shirinpour ;Writing, Sogand Shirinpour and Masoud Esfahani; Original draft preparation, Sogand Shirinpour; Writing, review and editing, Masoud Esfahani; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement:

Data is available on reasonable requests from the authors

Acknowledgements:

The authors would like to Appreciate the university of guilan and rice research institute of Iran.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی اثر ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه بر جذب فسفر در ارقام برنج (*Oryza sativa* L.)سوگند شیرین پور^۱ | مسعود اصفهانی^۲ | علیرضا فلاح نصرت‌آباد^۳ | شهرام محمود سلطانی^۴ | علی اعلمی^۵^۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: sogand.plant@gmail.com^۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: esfahani@guilan.ac.ir^۳. بخش بیولوژی خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، کرج، ایران. رایانامه: rezafayah@yahoo.com^۴. بخش خاک و آب، موسسه تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران. رایانامه: shmsoltani@gmail.com^۵. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: ali_aalami@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	شناسایی ارقامی از گیاهان زراعی که به عنوان فسفرکارا شناخته می‌شوند، می‌تواند باعث استفاده بهتر گیاه از فسفر خاک شود. به منظور بررسی اثر شاخص‌های مرتبط با ویژگی‌های ریشه ارقام برنج با جذب فسفر، آزمایشی به صورت گلدانی در فضای باز در بهار سال ۱۴۰۱ در موسسه تحقیقات برنج کشور-رشت به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل ۱۰ رقم برنج (چهار رقم محلی هاشمی، حسنی، علی‌کاظمی و دمسپاه و چهار رقم اصلاح شده گیلانه، آنام، شیروودی و خزر و دو رقم اهلومی طارم و ندا) و دو سطح فسفر خاک (چهار و ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم) بودند. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین ارقام برنج از نظر ویژگی‌های مورفولوژیک اندازه‌گیری شده ریشه وجود داشت و ارقام اهلومی طارم و شیروودی با ساختار ریشه‌ای گسترده از نظر حجم و سطح، کارایی جذب فسفر بالاتری داشتند. ارقام اهلومی طارم و شیروودی بیشترین و ارقام گیلانه و خزر کمترین مقدار ویژگی‌های کمی ریشه را داشتند. بیشترین مقدار غلظت فسفر، کارایی جذب و مصرف فسفر (به ترتیب ۳/۲ میلی گرم بر گرم، ۳۷/۹ درصد و ۸۸ درصد) در رقم اهلومی طارم و (به ترتیب ۲/۹ میلی گرم بر گرم، ۳۲/۵ درصد و ۶۴ درصد) در رقم شیروودی مشاهده شدند. بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای، ارقام برنج به دو گروه با ویژگی‌های مشترک درون هر گروه تفکیک شدند. بر اساس تجزیه به عامل‌ها، دو عامل اصلی ویژگی‌های مورفولوژیکی و ویژگی‌های کارکردی ریشه شناسایی شدند که تغییرات ویژگی‌های مرتبط با ریشه را به طور قابل توجهی توجیه کردند. براساس نتایج این آزمایش، ارقام برنج اهلومی طارم و شیروودی سازگاری بیشتری با شرایط کمبود فسفر داشته و استفاده از آنها برای زراعت در مناطق مواجه با کمبود فسفر خاک قابل توصیه است.
واژه‌های کلیدی: برنج، تغذیه گیاهی، ریشه و کارایی مصرف فسفر.	
استناد: شیرین پور، سوگند؛ اصفهانی، مسعود؛ و فلاح نصرت‌آباد، علیرضا؛ محمود سلطانی، شهرام؛ اعلمی، علی. (۱۴۰۴). ارزیابی اثر ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه بر جذب فسفر در ارقام برنج (<i>Oryza sativa</i> L.)، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۲)، ۷۸۳-۷۱۵.	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.384338.669819	https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.384338.669819

مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) به عنوان دومین غله بعد از گندم، از جایگاه ویژه‌ای در تغذیه مردم دنیا برخوردار بوده و تأمین کننده ۲۱ درصد از انرژی و ۱۵ درصد از پروتئین مورد نیاز ساکنان مناطق برنج خیز جهان است. با رشد جمعیت و تغییر ذائقه مردم در گرایش به برنج، میزان مصرف آن همچنان در حال فزونی است و با این روند در سال های آینده به عنوان منبع اصلی تأمین کالری مردم مورد توجه بیشتری قرار خواهد گرفت. با توجه به روند رو به افزایش جمعیت جهان، استفاده کارآمدتر از زمین های زراعی موجود از طریق افزایش عملکرد در واحد سطح برای توسعه پایدار کشاورزی بسیار ضروری است (FAO, 2018).

فسفر پس از نیتروژن مهم ترین عنصر غذایی ضروری برای رشد و نمو برنج محسوب می شود. فسفر حدود ۰/۲ درصد از وزن خشک گیاه را تشکیل می دهد و برای تامین انرژی، تقسیم سلولی و فرایندهای مختلف متابولیکی گیاه ضرورت دارد. فرایندهای تحت تاثیر فسفر عبارتند از فتوسنتز، تنفس و متابولیسم کربوهیدرات ها از طریق تشکیل آدنوزین تری فسفات (ATP) و آدنوزین دی فسفات (ADP) (Ma et al., 2021; et al., 2022). کمبود فسفر بر رشد گیاه، تشکیل خوشه، گلدهی و کیفیت دانه در برنج تأثیر منفی زیادی دارد. قابلیت دسترسی گیاه به فسفر در اثر اتصال آن با ترکیبات خاک، کاهش می یابد (Yadav and Verma, 2012). متعادل کردن عرضه عناصر غذایی برای به حداکثر رساندن تولید برنج و در عین حال به حداقل رساندن اثرات منفی زیست محیطی آنها ضروری است (Sharma et al., 2017). از کودهای فسفاتی مصرفی در جهان تنها ۱۵ تا ۲۰ درصد فسفر در هر سال جذب گیاه می شود (پسندیده و همکاران، ۱۳۹۸). یکی از مهم ترین پیامدهای مصرف مداوم و طولانی مدت کودهای فسفاتی و در نتیجه افزایش محتوای فسفر کل خاک ها، کاهش کیفیت آب های سطحی و مشکلات زیست محیطی مربوط به آن است. با افزایش فسفر کل خاک، ممکن است عواملی مانند رواناب و فرسایش خاک فسفر را به شکل محلول و یا همراه با ذرات خاک به آب های سطحی انتقال دهند (ملکوتی و همکاران، ۱۳۹۸).

پیشینه پژوهش

به گزارش (Wang, 2020) نگرانی های مربوط به استفاده از کودهای فسفوری محلول در آب مانند سوپرفسفات تریپل، افزایش هدررفت فسفر و ورود برخی از فلزات سنگین مانند کادمیوم به محیط زیست است. محدود بودن منابع کودهای فسفاتی در جهان و هزینه بر بودن تولید آنها نیز از موارد قابل توجه هستند. یکی از گزینه های اصلی مورد توجه در مدیریت فسفر در اراضی زراعی، استفاده از راهکارهایی برای به حداکثر رساندن کارایی استفاده از فسفر توسط گیاه است. مفهوم کارایی در تغذیه گیاه بر اساس فرایندهای جذب عنصر غذایی توسط گیاه، استفاده از آن جهت تولید ماده خشک یا دانه در شرایط کم بودن فراهمی آن عنصر غذایی در خاک تعریف می شود. گیاهان فسفر خاک را از طریق ریشه جذب می کنند و توانایی ریشه در جذب عناصر غذایی از خاک به ویژگی های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی آن بستگی دارد. بنابراین شناخت رابطه بین ویژگی های ریشه و شاخص های جذب فسفر، اطلاعات مهمی برای بهبود کارایی جذب این عنصر فراهم خواهد نمود. رشد ریشه های نابجا، طول، سطح و حجم ریشه، به عنوان شاخص های مناسب برای شناسایی ژنوتیپ های متحمل به کمبود فسفر خاک گزارش شده اند که می توان از آنها در غربالگری ارقام برای تولید ارقام فسفر کارا استفاده کرد (Jiang et al., 2010). گونه ها و ژنوتیپ هایی که در شرایط کمبود یک عنصر معین رشد می کنند و کاهش عملکرد کمتری در مقایسه با سایر گونه ها و ژنوتیپ ها نشان می دهند، در جذب و انتقال آن کارآتر محسوب می شوند. کارایی به دو بخش کارایی جذب و کارایی بهره وری تقسیم می شود. کارایی جذب نشان دهنده توان بهره وری از فسفر جذب شده در بافت های گیاهی بوده و کارایی بهره وری نشان دهنده اختصاص یافتن بیشتر فسفر به فعالیت های متابولیکی به جای ذخیره، تخصیص بیشتر فسفر در شرایط کمبود به اندام های فتوسنتزی به جای اندام های ذخیره ای و نیز بازچرخش فسفر از برگ های مسن به برگ های در حال رشد می باشد (حاجی بلند و همکاران ۱۳۹۱). (Kant et al., 2016) گزارش کردند که ژنوتیپ های فسفر کارا در برنج دارای سیستم ریشه ای گسترده تر و ظرفیت بالا برای حل کردن فسفر خاک توسط ترشحات ریشه هستند. کارایی ریشه جهت نفوذ در خاک به نوع ریشه، بیشتر بودن تعداد ریشه های طوقه ای در خاک سطحی و ریشه های طویل تر در عمق خاک و فراوانی ریشه های موین بستگی دارد. کارایی ریشه شامل ویژگی هایی هستند که باعث می شوند ریشه های کوچک تر در صورت قرار گرفتن در شرایط اندک بودن فراهمی فسفر، بازدهی جذب فسفر بالایی داشته باشند. (Wissuwa et al., 2016) با مقایسه جذب فسفر از فسفر تثبیت شده در گیاهان بقولاتی و غلاتی گزارش دادند که جذب فسفات آهن و آلومینیوم برای برنج قابل دسترسی تر بوده و از این لحاظ نسبت به سایر غلات برتری دارد. آنها در آزمایشی که روی ۳۰ ژنوتیپ متنوع برنج انجام دادند، کارایی ریشه را به عنوان عامل جذب فسفر در واحد اندازه ریشه در نظر گرفته و گزارش دادند که جذب فسفر در خاک های کم فسفر متناسب با وزن و سطح ریشه است. آنها

گزارش کردند که وزن ریشه ضمن اینکه در ژنوتیپ‌های برنج مورد آزمایش تنوع زیادی داشت، با عملکرد دانه نیز دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری بود و بر این اساس می‌توان با شناسایی ارقام مناسب اهدا کننده^۱، نسبت به افزایش کارایی ریشه در جذب فسفر اقدام کرد. گزارش شده است که توانایی تحمل به کمبود فسفر و افزایش جذب آن تحت تاثیر تفاوت ژنوتیپی گونه‌های گیاهی است و ساختار ریشه با نسبت بالاتر سطح به حجم، برای جذب حداکثر فسفر بسیار مهم است (چمنی محصل و همکاران، ۱۳۹۶). (Yang et al., 2019) در یک آزمایش درباره ارتباط صفات زراعی و فیزیولوژیکی ارقام متحمل برنج با کارایی مصرف فسفر در دو ژنوتیپ برنج متحمل به فسفر کم و غیرمتحمل در غلظت‌های پایین و متعادل فسفر خاک گزارش دادند که ژنوتیپ متحمل در شرایط فسفر کم افزایش قابل توجهی در کارایی انتقال فسفر، بازده داخلی فسفر و شاخص برداشت فسفر داشت. این برتری به بیشتر بودن طول کل ریشه، فعالیت بالای اکسیداسیونی ریشه و بیشتر بودن سطح جذب کل ریشه در ژنوتیپ متحمل در شرایط فسفر پایین بود. طول کل ریشه و سرعت ریشه‌دهی ارتباط معنی‌داری با عملکرد دانه، کارایی انتقال فسفر و بازده داخلی فسفر داشت. نتایج این آزمایش نشان داد که میزان تحمل به کمبود فسفر همبستگی بالایی با زیست توده و رشد ریشه داشته و این تحمل در اثر تنظیم رشد ریشه ایجاد می‌شود. در آزمایش دیگری درباره ارزیابی کارایی جذب فسفر در دو ژنوتیپ برنج دلار^۲ (سنتی) و PBI (پرمحصول) که با تجزیه و تحلیل عوامل رونویسی مربوط به ساختار مورفولوژیک ریشه انجام شد، نشان داده شد که برنج رقم دلار در شرایط کمبود فسفر رشد ریشه بیشتری داشته و سطح ریشه، طول و تراکم تارهای کشنده ریشه در این رقم بیشتر بود. بیشتر بودن ذخایر فسفولیپیدها و تجمع بیشتر گالاکتولیپیدها در شرایط کمبود فسفر در رقم دلار با بیشتر بودن کارایی مصرف فسفر ارتباط داشت. در همین رابطه پیشنهاد شد که از با استفاده از ژن‌هایی مربوط به افزایش تحمل گیاه در شرایط کمبود فسفر در ژنوتیپ‌های سنتی، می‌توان تحمل به کمبود فسفر در ارقام پرمحصول را بهبود داد (Mehra et al., 2016). در نتیجه ارقامی که دارای کارایی جذب فسفر بیشتر، کارایی مصرف فسفر بالاتر و فاکتور تنش پایین‌تر فسفر هستند، کارآمدتر بوده و بنابراین برای خاک‌های کم‌فسفر و یا با قابلیت تثبیت بیشتر فسفر، مطلوب‌تر هستند.

اگرچه آزمایش‌های زیادی درباره نقش ساختار ریشه در جذب فسفر و عملکرد دانه ارقام برنج در دنیا انجام شده است، پژوهش‌های مربوط به ارقام محلی و اصلاح شده برنج داخلی بسیار کم است. این پژوهش با هدف ارزیابی ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه ارقام فسفرکارا و فسفرناکارای برنج و ارتباط آن‌ها با شاخص‌های جذب و کارایی فسفر انجام شده است.

روش‌شناسی پژوهش

در آزمایش حاضر ابتدا براساس اطلاعات موجود در بانک اطلاعات خاک آزمایشگاه شیمی بخش تحقیقات خاک و آب موسسه تحقیقات برنج کشور یک نمونه خاک با حداقل میزان فسفر قابل دسترس (چهار میلی‌گرم بر کیلوگرم) انتخاب و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اندازه‌گیری (جدول ۱) و برای اجرای آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

پتاسیم قابل دسترس	فسفر قابل دسترس	مس	روی	آهن	منگنز	اسیدیته	EC (دسی زیمنس بر متر)	نیترژن	کربن آلی	ظرفیت تبادل کاتیونی	شن	سیلت	رس	بافت
۱۹۰	۴	۱/۳	۲/۶۹	۲/۹	۶/۰۴	۷/۵	۰/۶	۰/۰۵	۰/۶	۱۹	۲۸	۵۶	۱۶	سیلت
(میلی‌گرم بر کیلوگرم)														
(درصد)														

آزمایش در بهار سال ۱۴۰۱ به صورت گلدانی در فضای باز به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۲۰ تیمار و سه تکرار در موسسه تحقیقات برنج کشور- رشت اجرا شد. تعداد کل گلدان‌ها ۱۲۰ عدد (۴۰ گلدان در هر تکرار، دو گلدان برای هر تیمار) بود. تیمارهای آزمایشی شامل ۱۰ رقم برنج (چهار رقم محلی هاشمی، علی‌کاظمی، حسنی و دمسیاه و چهار رقم اصلاح شده گیلاسه، آنام، شیروودی و خزر همراه با دو رقم شاهد برتر فسفرکارا (اهلمی طارم) و فسفرناکارا (ندا) (صبوری و همکاران ۱۳۹۷) و دو سطح فسفر خاک شامل فسفر بومی خاک (چهار میلی‌گرم بر کیلوگرم معادل سطح کودی صفر) (P0) (شاهد) و کود فسفر مصرف شده برای رساندن محتوای فسفر خاک به حد بهینه (Pe) (تیمار) بودند. سطح فسفر بهینه ۶۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک در نظر گرفته شد (Irfan et al., 2019). در گلدان‌های شاهد کود فسفر مصرف نشد و در گلدان‌های تیمار، مقدار ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم پنتاکسید فسفر (P2O5) از منبع

^۱. Donor

^۲. Dular

کود سوپرفسفات تریپل (حاوی ۴۸ درصد فسفر) به خاک داده شد. برای کلیه گلدان‌ها نیتروژن (از منبع کود اوره) (برای ارقام محلی ۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک و برای ارقام اصلاح شده ۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) و اکسید پتاسیم (K_2O) (از منبع سولفات پتاسیم) به مقدار ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک، قبل از نشاکاری به خاک داده شد. گلدان‌های مورد استفاده لوله‌های پلی اتیلنی دو سر باز با ارتفاع ۶۰ سانتی متر و قطر ۱۶ سانتی متر (حجم تقریبی ۱۲۰۰۰ سانتی متر مکعب) بودند. در داخل گلدان‌ها کیسه‌های پلاستیکی برای اندود کردن داخل گلدان (برای اینکه بتوان ریشه‌ها را بدون آسیب و پارگی از گلدان خارج کرد) کار گذاشته شده و سپس با ۱۲ کیلوگرم خاک حاوی فسفر پایین (بر اساس نتایج آزمون خاک) پر شدند. گیاهچه‌های ارقام برنج در مرحله ۳ تا ۴ برگی به تعداد یک گیاهچه در هر گلدان نشاکاری شده و گلدان‌ها در فضای آزاد قرار داده شدند. کود نیتروژن در سه نوبت (۵۰ درصد بصورت پایه، ۲۵ درصد در مرحله حداکثر پنجه‌زنی و ۲۵ درصد در مرحله ظهور خوشه) به خاک داده شد. از روز دوم پس از نشاکاری تا مرحله پنجه‌زنی فعال، سطح آب به ارتفاع حدود سه سانتی متر روی سطح خاک حفظ شده و سپس خاک دو تا سه بار (تا حد مشاهده ترک‌های مویی) خشکانده شد. به منظور اندازه‌گیری محتوی فسفر و شناسایی ویژگی‌های ریشه‌ای مؤثر در فسفر کارایی مرتبط با نوع رقم، تعدادی از ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه شامل وزن تر ریشه، وزن خشک ریشه و وزن خشک شاخساره در دو مرحله؛ مرحله اول (بعد از استقرار گیاهچه‌ها و مرحله حداکثر پنجه‌زنی) و مرحله دوم (زمان رسیدگی) انجام شد. برای این منظور تعداد دو گلدان از هر تیمار (شاهد و تیمار) برای نمونه‌برداری اول و دو گلدان باقی‌مانده از هر تیمار برای نمونه‌برداری دوم در نظر گرفته شدند. در هر دو مرحله نمونه‌برداری ابتدا اندام‌های هوایی از محل طوقه جدا شد و سپس کل ریشه‌ها پس از خارج کردن از گلدان‌ها در محلول کالگون با غلظت یک گرم در لیتر (به منظور پخشیدگی خاک و جدا شدن بهتر ریشه‌ها از خاک) غوطه‌ور شده و سپس در زیر آب جاری با دقت شستشو داده شدند. ویژگی‌های ریشه‌ای مرتبط با جذب فسفر شامل وزن تر ریشه، وزن خشک ریشه، عمق نفوذ ریشه (طول ریشه از طوقه تا نوک ریشه یا فاصله بین طوقه تا نوک ریشه نیز با استفاده از خط‌کش مدرج) و حجم ریشه (با استفاده از استوانه مدرج و با قرار دادن ریشه‌ها در حجم مشخصی از آب) اندازه‌گیری شدند. طول کل ریشه و سطح ریشه با استفاده از روش‌های محاسباتی تخمین زده شدند. طول کل ریشه به دو روش؛ الف- کاغذ میلی‌متری و ب- بر اساس وزن خشک ریشه با استفاده از رابطه ۱ تعیین شد (Bohm, 1979). با داشتن اطلاعات وزن تر ریشه و طول کل ریشه (به روش ب)، قطر ریشه و ظرافت ریشه محاسبه شدند.

$$(رابطه ۱) \quad 0.89 \times \text{وزن خشک ریشه (میلی گرم)} = \text{طول کل ریشه (سانتی متر)}$$

برای محاسبه سطح ریشه از روش نیومن استفاده شد (Newman, 1966).

$$(رابطه ۲) \quad 0.5 \times (\text{طول کل ریشه} \times \pi \times \text{حجم ریشه}) = \text{سطح ریشه (سانتی متر مربع)}$$

با داشتن اطلاعات وزن تر ریشه (RFW)، وزن خشک ریشه (RDW)، سطح ریشه (RA) و حجم ریشه (RV)، چگالی سطح ریشه محاسبه شد.

$$(رابطه ۳) \quad \text{قطر ریشه} = \left(\frac{\text{وزن تر ریشه} \times 4}{\pi \times \text{طول ریشه}} \right)^{0.5}$$

$$(رابطه ۴) \quad \text{ظرافت ریشه} = \left(\frac{\text{طول ریشه}}{\text{وزن تر ریشه}} \right)$$

$$(رابطه ۵) \quad \text{چگالی سطح ریشه} = (\pi \times \text{قطر ریشه} \times \text{طول ریشه})$$

رابطه بین ویژگی‌های ریشه‌ای و غلظت فسفر در گیاه به روش رنگ‌سنجی اندازه‌گیری شده و سپس کارایی جذب فسفر، کارایی ریشه، کارایی مصرف فسفر (PUE) (ماده خشک گیاهی به ازای واحد فسفر جذب شده) و ویژگی‌های فسفر کارایی با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه شدند. مقدار جذب کل فسفر شاخساره از حاصل ضرب غلظت فسفر شاخساره در ماده خشک آن محاسبه شد (Zhang et al., 2007). در پایان دوره رشد، عملکرد دانه در هر گلدان (بر مبنای رطوبت ۱۴ درصد) اندازه‌گیری شد.

تجزیه خوشه‌ای صفات مرتبط با خصوصیات ریشه در دو سطح فسفر و در دو مرحله رشدی (رویشی و زایشی) ارقام برنج، با استفاده از روش گروه‌بندی Ward و ضریب فاصله اقلیدسی و تجزیه به عامل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. تجزیه داده‌ها با استفاده از

نرم افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش توکی در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.



شکل ۱- وضعیت رویش بوته‌های ارقام برنج در گلدان‌ها، خارج کردن ریشه‌ها و اندازه‌گیری ویژگی‌های ریشه

$$\text{(رابطه ۶)} \quad \pi \times \text{قطر ریشه} \times \text{طول ریشه} = \text{چگالی سطح ریشه}$$

$$\text{(رابطه ۷)} \quad 100 \times \frac{\text{جذب فسفر در شرایط فسفر کافی} - \text{جذب فسفر در شرایط کمبود}}{\text{مقدار فسفر مصرف شده}} = \text{کارایی جذب فسفر (درصد)}$$

$$\text{(رابطه ۸)} \quad 100 \times \frac{\text{عملکرد دانه در فسفر کافی} - \text{عملکرد دانه در شرایط فسفر کم}}{\text{عملکرد دانه در شرایط فسفر کافی}} = \text{فاکتور تنش فسفر (درصد)}$$

$$\text{(رابطه ۹)} \quad 1000 \times \frac{\text{فسفر جذب شده در شاخساره (میلی گرم)}}{\text{ماده خشک ریشه (گرم)}} = \text{کارایی ریشه (میلی گرم فسفر در گرم ماده خشک شاخساره)}$$

یافته‌های پژوهش

ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی نوع رقم برنج و سطوح کودی بر وزن تر و خشک ریشه، سطح، حجم و طول کل ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارها بر ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه در جدول ۳ نشان داده شده است. ارقام (اهلمی طارم و شیروودی) به عنوان ارقام فسفرکارا و ارقام (گیلانه و خزر) به عنوان ارقام فسفرناکارا به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار ویژگی‌های ریشه‌ای بودند. ارقام اهلمی طارم و شیروودی به ترتیب با ۶۲۸/۳ و ۵۹۶/۳ سانتی متر و ارقام خزر و گیلانه به ترتیب با ۲۷۵/۹ و ۲۹۳/۷ سانتی متر، به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار طول کل ریشه را داشتند. ارقام اهلمی طارم و شیروودی به ترتیب با سطح ریشه ۳۸۴/۵ و ۳۴۸/۹ سانتی متر مربع و حجم ریشه ۱۷۵ و ۱۵۵ سانتی متر مکعب، با سایر ارقام تفاوت معنی‌داری داشتند.

جدول ۲- تجزیه واریانس ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه ارقام برنج در تیمارهای کود فسفر (مرحله حداکثر پنجه‌زنی)

منابع تغییر	درجه آزادی	طول کل ریشه	حجم ریشه	سطح ریشه	قطر ریشه	ظرافت ریشه	چگالی سطح ریشه	وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه	وزن خشک شاخساره
فسفر	۱	۱۰۴۹۳/۷**	۵۴۱۵**	۳۶۹۹۸/۶**	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۸ ^{ns}	۶۳۶۰/۶*	۴۶۷/۸*	۱۳/۸**	۱۵/۶ ^{ns}
رقم برنج	۹	۱۰۷۵/۶**	۶۴۳۸/۷**	۲۱۹۴۹/۷**	۰/۰۸**	۰/۷**	۹۶۱۲/۰۳**	۹۴۲/۰۳**	۱۳/۵**	۹۷/۱**
فسفر × رقم	۹	۱۷۵/۶ ^{ns}	۸۲۲/۴ ^{ns}	۶۷۰۹/۳ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۴ ^{ns}	۱۶۹۹/۱ ^{ns}	۱۶۹/۵ ^{ns}	۲/۳ ^{ns}	۲۶/۱ ^{ns}
خطا	۴۰	۲۵۲/۳	۷۲۳/۳	۵۲۹۹/۴	۰/۰۰۹	۰/۰۵	۱۳۰۴/۱	۹۲/۶	۳/۰۷	۲۲/۱
ضریب تغییرات (درصد)		۲۸/۷	۲۳/۴	۲۶/۴	۱۰/۵	۱۷/۰۰۷	۲۲/۸	۲۲/۹	۲۸/۱	۱۸/۵۲

ns، ** و * : به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال یک و پنج درصد

نتایج نشان داد که مصرف کود فسفر اثر معنی‌داری بر افزایش وزن تر ریشه، وزن خشک ریشه و سایر ویژگی‌های ریشه‌ای داشت و در مورد وزن تر ریشه به طور متوسط از ۳۹/۰۹ به ۴۴/۶ گرم در گلدان رسید (جدول ۳). برخی از ویژگی‌های ریشه‌ای اندازه‌گیری شده در برهمکنش تیمارهای فسفر و رقم در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در شرایط کمبود فسفر ارقام اهلومی طارم و شیروودی وزن خشک ریشه بیش‌تری نسبت به سایر ارقام داشتند که این تفاوت را می‌توان به تفاوت ژنتیکی بین ارقام برنج نسبت داد. تغییر در مورفولوژی و وزن خشک ریشه یکی از راهکارهای گیاهان فسفرکارا برای دسترسی بیش‌تر به فسفر خاک در شرایط کمبود فسفر معرفی شده است. توانایی تحمل به کمبود فسفر و افزایش جذب آن به طور عمده تحت تاثیر تفاوت ژنوتیپی گونه‌های گیاهی است و مورفولوژی ریشه با نسبت بالاتر سطح به حجم برای جذب حداکثر فسفر بسیار مهم است (چمنی محمص و همکاران، ۱۳۹۶). براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها در آزمایش حاضر دو رقم فسفرکارا (اهلومی طارم) و فسفرناکارا (ندا) از نظر ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه و صفات گیاهی در شرایط کمبود فسفر در مقایسه با شرایط کفایت فسفر تفاوت داشتند. اگرچه در جدول‌های تجزیه واریانس میانگین مربعات ویژگی‌های ریشه ارقام برنج در برهمکنش تیمارهای کود فسفر و رقم معنی‌دار نبود، لیکن مقایسه میانگین‌ها با هدف مقایسه رتبه‌ای آنها انجام شد (جدول ۴). این نتایج با گزارش نتایج آزمایش صبوری و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت داشت. در شرایط کمبود فسفر در ارقام برنج اهلومی طارم و ندا وزن تر ریشه به‌ترتیب ۵۵/۳ و ۳۸/۳ گرم در گلدان، وزن خشک ریشه ۷/۹ و ۶/۸ گرم در گلدان، حجم ریشه ۲۰۳/۳ و ۱۴۳/۳ سانتی‌متر مکعب در گلدان، سطح ریشه ۴۸۳/۱ و ۲۳۹/۶ سانتی‌متر مربع در گلدان بود که از نظر صفات یاد شده، رقم اهلومی طارم نسبت به رقم ندا برتر بود. نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها (جدول ۳) در ارتباط با صفات ریشه‌ای رقم ندا به عنوان رقم فسفر ناکارا نشان داد که این رقم در مقایسه با سایر ارقام اصلاح شده دارای برتری بود. به نظر می‌رسد که بالا بودن قدرت پنجه‌زایی در رقم ندا باعث افزایش حجم ریشه آن شده باشد. با توجه به نتایج آزمایش، رقم شیروودی و سپس به ترتیب ارقام علی کاظمی، دمسیاه، حسنی و هاشمی از این نظر به رقم اهلومی طارم شباهت بیشتری داشته و ارقام آنام و سپس خزر و گیلانه به رقم ندا مشابهت داشتند. رقم اهلومی طارم از نظر سطح ریشه نسبت به سایر ارقام محلی ۳۷/۵ درصد و نسبت به ارقام اصلاح شده ۶۲/۵ درصد برتری داشت که نشان دهنده نقش موثر ریشه در بهبود جذب فسفر است. بالاتر بودن غلظت فسفر در شاخساره نشان‌دهنده توانایی بالاتر سیستم ریشه‌ای ارقام فسفرکارا در جذب فسفر از خاک است. بطور کلی میانگین غلظت فسفر شاخساره ارقام برنج در شرایط کمبود فسفر ۱/۹۲ میلی‌گرم بر گلدان بود که با مصرف کود فسفر به ۳/۴۵ میلی‌گرم بر گلدان رسید. سازوکار اصلی مرتبط با افزایش جذب، نوع مورفولوژی و معماری ریشه است که بر اساس حجم و سطح ریشه، افزایش طول تارهای کشنده و توانایی ژنوتیپی برای تشکیل ریشه کارآمد است که باعث تسهیل جذب فسفر می‌شود. بنابراین گیاهان دارای سیستم ریشه‌ای قوی‌تر و گسترده‌تر در جذب فسفر از خاک و انتقال آن به اندام هوایی کارا تر هستند و توجه به ویژگی‌های ژنتیکی ارقام در این زمینه می‌تواند توصیه کودی موثرتری را به دنبال داشته باشد و باعث کاهش مصرف کودهای شیمیایی شود. بر این اساس ویژگی‌های غلظت فسفر در گیاه و وزن خشک شاخساره در حالت فسفر ناکافی نیز می‌تواند شاخص‌های مناسبی برای ارزیابی فسفرکارایی یک رقم باشند.

نتایج نشان داد که برهمکنش تیمارهای فسفر و رقم بر ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه شامل وزن تر ریشه، سطح و حجم ریشه معنی‌دار بود و بین ارقام برنج از این نظر در هر دو نوع خاک تفاوت معنی‌داری وجود داشت (جدول ۴). در شرایط کمبود فسفر، ارقام برنج مورد مطالعه از نظر وزن خشک ریشه تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای داشتند. مقایسه ارقام اهلومی طارم و ندا نشان داد که صفات وزن تر ریشه، وزن خشک ریشه، حجم ریشه و سطح ریشه در شرایط کمبود فسفر و شرایط فسفر کافی در رقم اهلومی طارم نسبت به رقم ندا بیشتر بود. این نتایج با یافته‌های آزمایش صبوری و همکاران (۱۳۹۷) که با هدف شناسایی جایگاه ژنی صفات مذکور در ارزیابی ارقام برنج در تحمل به کمبود فسفر انجام شد، مطابقت دارد. در آزمایش نامبردگان در شرایط کمبود فسفر دو جایگاه ژنی برای افزایش وزن خشک ریشه و حجم ریشه و یک جایگاه ژنی برای افزایش وزن تر ریشه و سطح ریشه در رقم اهلومی طارم وجود داشت که باعث تنوع فنوتیپی این صفات در رقم اهلومی طارم شد. در آزمایش حاضر در شرایط فسفر کافی، حجم ریشه از ۱۰۵/۳ به ۱۲۴/۳ سانتی‌متر مکعب و سطح ریشه از ۲۵۰/۹ به ۳۰۰/۵ سانتی‌متر مربع رسید (جدول ۳). برهمکنش تیمارهای فسفر و رقم نیز نشان دهنده افزایش این صفات در رقم اهلومی طارم در شرایط کفایت فسفر بود (جدول ۴). نتایج آزمایش صبوری و همکاران (۱۳۹۷) نیز نشان داد که تعداد جایگاه‌های ژنی در شرایط کفایت فسفر افزایش داشت، به‌طوریکه جایگاه ژنی وزن تر ریشه رقم اهلومی طارم به ۱۰ جایگاه ژنی رسید و در این صفت، ۲۶ درصد تنوع فنوتیپی مشاهده شد. ارقام محلی علی کاظمی و دمسیاه در هر دو شرایط کفایت و کمبود فسفر از نظر وزن تر و خشک ریشه، حجم و سطح ریشه بیشترین مشابهت را با رقم اهلومی طارم داشتند. تغییر در مورفولوژی و زیست توده ریشه یکی از سازوکارهای ارقام متحمل برای دسترسی بیشتر به فسفر خاک در شرایط کمبود فسفر محسوب می‌شود. این نتایج با یافته‌های آزمایش (Irfan et al., 2020) روی دو رقم برنج فسفرکارا و فسفرناکارا در شرایط کمبود و کفایت فسفر نشان داد که ویژگی‌های ریشه رقم فسفرکارا در هر دو شرایط برتری داشت. خیلی‌راد

و میرسید حسینی (۱۳۹۵) خصوصیات مورفولوژیکی ریشه دو رقم گندم فسفرکارا (آزادی و یاواروس) و دو رقم فسفرناکارا (کرج (و مروداشت) و ارتباط آن‌ها با شاخص‌های کارایی فسفر را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش به مدت شش هفته در چهار سطح (ارقام فسفرکارا و فسفرناکارا) و دو سطح فسفر (سطح فسفر طبیعی خاک و سطح کودی فسفر ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم) انجام شد. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین ارقام از نظر ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه وجود داشت و ارقام با کارایی بالاتر سیستم‌های ریشه‌ای گسترده‌تری داشتند. ارقام گندم آزادی و مروداشت به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار ویژگی‌های ریشه (وزن تر به ترتیب ۲/۲۷ و ۱/۲۸ گرم) و وزن خشک ریشه (به ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۲۰ گرم)، طول کل ریشه (۲۷۸/۴ و ۱۷۹/۰۴ سانتی‌متر)، سطح ریشه (به ترتیب ۹۰/۲ و ۵۶/۰۶ سانتی‌متر مربع در گلدان) و حجم ریشه (به ترتیب ۲/۳ و ۱/۴ میلی‌لیتر در گلدان) را داشتند.

جدول ۳- مقایسه میانگین ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه ارقام برنج در تیمارهای کود فسفر (مرحله حداکثر پنجه‌زنی)

تیمارهای آزمایشی	وزن تر ریشه (گرم در گلدان)	وزن خشک ریشه (گرم در گلدان)	وزن خشک شاخساره (گرم در گلدان)	قطر ریشه (میلی‌متر)	ظرافت ریشه (سانتی‌متر بر گرم)	طول کل ریشه (سانتی‌متر)	سطح ریشه (سانتی‌متر مربع در گلدان)	حجم ریشه (سانتی‌متر مربع در گلدان)	چگالی سطح
ارقام برنج	(گرم در گلدان)	(گرم در گلدان)	(گرم در گلدان)	(میلی‌متر)	(گرم)	(سانتی‌متر)	(سانتی‌متر مربع در گلدان)	(مکعب در گلدان)	(مربع در گلدان)
هاشمی	۱۸/۳ ^{bc}	۵/۱ ^{bc}	۸ ^{bc}	۰.۸ ^{cd}	۱/۳ ^{bc}	۳۶۴/۹ ^{bc}	۲۰۱/۰۱ ^c	۸۰/۰ ^c	۱۲۶/۴ ^c
علی کاظمی	۲۷/۹ ^b	۶/۱ ^{ab}	۸/۸ ^{ab}	۱/۰۵ ^a	۱/۴ ^{bc}	۴۵۳/۹ ^{ab}	۲۴۷/۳ ^{abc}	۱۰۸/۳ ^{bc}	۱۱۸/۹ ^c
حسینی	۱۷/۷ ^c	۵/۱ ^{bc}	۷/۲ ^{bc}	۰.۷ ^d	۱/۶ ^b	۳۷۳/۸ ^{bc}	۲۵۸/۹ ^{abc}	۸۰/۰ ^c	۱۵۶/۶ ^{bc}
دمسیاه	۲۷/۱ ^b	۵/۹ ^b	۸/۳ ^b	۱/۰۵ ^a	۱/۱ ^c	۴۴۷/۶ ^b	۲۷۴/۵ ^{abc}	۱۱۰/۰ ^{bc}	۱۸۰/۸ ^b
ندا	۲۵/۴ ^{bc}	۵/۴ ^{bc}	۶/۷ ^{bc}	۱/۰۱ ^{ab}	۱/۱ ^c	۴۲۷/۲ ^b	۲۳۱/۷ ^{bc}	۱۰۳/۳ ^{bc}	۱۶۶/۳ ^{bc}
اهلمی طارم	۳۲/۱ ^a	۷/۱ ^a	۱۰/۶ ^a	۱/۰۵ ^a	۱/۲ ^{bc}	۶۲۸/۳ ^a	۳۸۴/۵ ^a	۱۷۵/۰ ^a	۲۳۶/۸ ^a
خزر	۱۲/۳ ^d	۳/۱ ^d	۴/۷ ^c	۰.۹ ^c	۱/۲ ^{bc}	۲۷۵/۹ ^d	۲۱۸/۷ ^{bc}	۸۶/۶ ^c	۱۳۴/۹ ^c
شیرودی	۳۰/۴ ^{ab}	۶/۹ ^{ab}	۹/۶ ^a	۱/۰۴ ^a	۱/۲ ^{bc}	۵۹۶/۳ ^a	۳۳۸/۹ ^a	۱۵۵/۰ ^{ab}	۲۰۶/۴ ^{ab}
گیلانه	۱۵/۱ ^d	۴/۸ ^c	۴/۹ ^c	۰.۹ ^c	-/۹ ^c	۲۹۳/۷ ^d	۲۳۷/۵ ^{bc}	۱۴۵/۰ ^{ab}	۱۳۵/۲ ^c
آنام	۱۹/۵ ^{bc}	۵/۱ ^{bc}	۵/۸ ^{bc}	۰.۷ ^d	۲/۱ ^a	۳۷۳/۸ ^{bc}	۲۲۸/۱ ^{bc}	۱۰۵/۰ ^{bc}	۱۱۶/۸ ^c
کود فسفر									
چهار میلی گرم بر کیلوگرم	۳۹/۱ ^b	۵/۶ ^b	۶/۹ ^a	۰/۹ ^{۳a}	۱/۳۰ ^a	۴۵۰/۲ ^b	۲۵۰/۹ ^b	۱۰۵/۳ ^b	۱۴۷/۶ ^b
فسفر بومی خاک (صفر)									
۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک	۴۴/۶ ^a	۸/۶ ^a	۸/۰۷ ^a	۰/۹۰ ^a	۱/۳۸ ^a	۶۰۲/۳ ^a	۳۰۰/۵ ^a	۱۲۴/۳ ^a	۱۶۸/۲ ^a

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند

جدول ۴- مقایسه میانگین ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه ارقام برنج در برهمکنش تیمارهای کود فسفر و رقم

کود فسفر	ارقام برنج	سطح ریشه (سانتی‌متر مربع در گلدان)	حجم ریشه (سانتی‌متر مکعب در گلدان)	وزن تر ریشه (گرم در گلدان)	وزن خشک ریشه (گرم در گلدان)
هاشمی	۲۱۶/۲ ^{bc}	۹۰ ^a	۳۵/۱ ^d	۴/۶ ^{cd}	
علی کاظمی	۲۴۰/۳ ^{bc}	۹۶/۶ ^{bc}	۴۲/۴ ^{ab}	۶/۳ ^{bc}	
حسینی	۲۲۶/۱ ^{bc}	۹۰ ^{bc}	۳۷/۴ ^d	۵/۱ ^c	
دمسیاه	۲۳۵/۸ ^{bc}	۹۳/۳ ^{bc}	۳۹/۹ ^{cd}	۵/۳ ^{ab}	
چهار میلی گرم بر کیلوگرم	۲۳۹/۶ ^{bc}	۱۴۳/۳ ^{ab}	۳۸/۳ ^{cd}	۶/۸ ^{bc}	
فسفر بومی خاک (صفر)	۴۸۳/۱ ^a	۲۰۳/۳ ^a	۵۵/۳ ^a	۷/۹ ^{ab}	
ندا	۲۰۱ ^c	۸۶/۶ ^c	۲۸/۷ ^d	۴/۰ ^{۳c}	
اهلمی طارم	۳۷۵/۹ ^{ab}	۱۷۳/۳ ^{ab}	۵۳/۳ ^{ab}	۷/۲ ^b	
خزر	۲۱۱/۶ ^c	۹۶/۶ ^{bc}	۲۹/۹ ^d	۴/۶ ^c	
شیرودی	۲۳۰/۳ ^{bcd}	۹۶/۶ ^{bc}	۳۰/۱ ^{bc}	۵/۱ ^{bc}	
گیلانه					
آنام					
هاشمی	۲۳۶/۸ ^{bcd}	۱۰۷/۲ ^{bc}	۳۸ ^c	۴/۵ ^c	
علی کاظمی	۲۶۰/۹ ^{bc}	۱۲۳/۳ ^{ab}	۴۳/۰۳ ^{ab}	۶/۶ ^{bc}	
حسینی	۲۴۶/۸ ^{abc}	۱۰۹/۱ ^b	۳۹/۳ ^{bc}	۴/۹ ^c	
دمسیاه	۲۵۶/۴ ^{bc}	۱۱۲/۳ ^b	۴۰/۶ ^b	۵/۱ ^{bc}	
ندا	۲۴۰/۲ ^{bc}	۱۴۶/۶ ^{ab}	۵۷/۸ ^{ab}	۷/۳ ^{ab}	
اهلمی طارم	۵۰۳/۷ ^a	۲۴۱/۶ ^a	۷۳/۷ ^a	۱۰/۳ ^a	
خزر	۲۳۲/۲ ^{bc}	۱۲۰ ^{bc}	۴۱/۱ ^{bc}	۴/۹ ^c	
شیرودی	۳۹۶/۵ ^{ab}	۱۹۲/۶ ^{ab}	۶۶/۲ ^{ab}	۸/۹ ^{ab}	
گیلانه	۲۲۱/۶ ^c	۱۱۶/۶ ^b	۳۴/۰۳ ^{bc}	۴/۸ ^c	
آنام	۲۵۰/۸ ^{bcd}	۱۲۳/۳ ^{ab}	۵۳/۶ ^{ab}	۶/۹ ^{bc}	

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

وزن خشک شاخساره

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که وزن خشک شاخساره در ارقام برنج تفاوت معنی‌داری داشت. تیمار کود فسفر باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک شاخساره کلیه ارقام برنج شد و به‌طور متوسط از ۶/۹ به ۸/۰۷ گرم در گلدان افزایش یافت (جدول ۳). (Irfan et al., 2019) نیز در آزمایشی روی ارقام برنج نتایج مشابهی را گزارش کردند. آزمایش آنها با هدف ارزیابی کارایی جذب فسفر در ارقام برنج (Basmati-2000، KSK-282، KSK-434، IR-6) در دو سطح فسفر پنج میکروگرم بر کیلوگرم یا فسفر طبیعی خاک و ۵۰ میکروگرم بر کیلوگرم اجرا شد. نتایج نشان داد که ارقام برنج و سطوح فسفر اثرات قابل توجهی روی وزن خشک ریشه، وزن خشک اندام هوایی و نسبت وزن ریشه به ساقه داشتند. میانگین وزن خشک ریشه در کلیه ارقام در تیمار کمبود فسفر افزایش یافت که بیشترین میزان وزن خشک ریشه در Basmati-2000 در شرایط فسفر کافی (۴/۳۶ گرم) و در شرایط کمبود فسفر (۵/۵۸ گرم) بود. وزن خشک اندام هوایی در شرایط فسفر کافی ۱۰/۵۴ گرم و در شرایط کمبود فسفر ۶/۰۵ گرم بود. نسبت وزن ریشه به ساقه در تیمار فسفر کافی ۰/۴۵ و در شرایط کمبود فسفر ۰/۶۳ گرم گزارش شد. آنها نتیجه‌گیری کردند که در شرایط کمبود فسفر، میزان کاهش رشد و وزن ریشه نسبتاً کمتر از وزن شاخساره است.

جدول ۵- تجزیه واریانس محتوای فسفر اندام‌های ارقام برنج در تیمارهای کود فسفر (مرحله رویشی)

منابع تغییر	درجه آزادی	محتوای فسفر شاخساره	محتوای فسفر ریشه	کارایی جذب فسفر
فسفر	۱	۰/۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۲ ^{ns}	۳۷/۸ ^{ns}
رقم برنج	۹	۰/۹۴ ^{**}	۰/۴۳ ^{**}	۷۵/۳ ^{**}
فسفر × رقم	۹	۰/۱۵ ^{ns}	۰/۶۶ ^{**}	۴۹/۸ ^{ns}
خطا	۴۰	۰/۰۹	۰/۰۸	۲۴/۹
ضریب تغییرات (درصد)		۳۲/۳	۱۴/۴	۱۴/۶

جدول ۶- تجزیه واریانس غلظت و شاخص‌های کارایی جذب و مصرف فسفر ارقام برنج در تیمارهای کود فسفر (مرحله زایشی)

منابع تغییر	درجه آزادی	فسفر شاخساره	فسفر ریشه	فسفر دانه	کارایی ریشه	کارایی مصرف فسفر	فسفر خاک
فسفر	۱	۰/۶ ^{**}	۰/۰۰۹ ^{ns}	۱/۱ ^{**}	۴۲۰/۳ ^{ns}	۱۶۲۳/۷ ^{**}	۳۲/۶ ^{**}
رقم برنج	۹	۱/۱ ^{**}	۰/۳۹ ^{**}	۰/۶ ^{**}	۱۲۹۶۲/۹ ^{**}	۱۵۴۰۰/۳ ^{**}	۲۴۳/۱ ^{**}
فسفر × رقم	۹	۰/۵ ^{**}	۰/۴۶ ^{**}	۰/۵ ^{**}	۲۸۶/۶ ^{ns}	۹۷۳/۷ ^{**}	۲۳۵/۳ ^{**}
خطا	۴۰	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۳	۳۶۰/۶	۱۱۰/۱	۴/۳
ضریب تغییرات (درصد)		۱۰/۴	۱۲/۷	۱۰/۴	۱۸/۳	۱۵/۲	۶/۷

جذب و غلظت فسفر در اندام‌های ارقام برنج

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که غلظت فسفر در ارقام برنج در اندام‌های مختلف در دو مرحله رشدی تفاوت معنی‌داری داشت. همچنین مصرف کود فسفر تاثیر مثبت و معنی‌داری بر غلظت فسفر داشت. در شرایط کمبود فسفر، میانگین غلظت فسفر شاخساره ارقام برنج ۱/۹۲ میلی‌گرم بر گرم ماده خشک بود که با مصرف کود فسفر به ۳/۴۵ میلی‌گرم بر گرم ماده خشک افزایش یافت (جدول ۷). ارقام اهلمی‌طارم (فسفرناکارا) و ندا (فسفرناکارا) در شرایط کمبود فسفر و شرایط کفایت فسفر به ترتیب با بالاتر بودن غلظت فسفر در شاخساره نشان دهنده توانایی ساختار ریشه‌ای این ارقام در جذب فسفر از خاک است. به نظر می‌رسد که رقم اهلمی‌طارم به دلیل داشتن بالاترین طول کل ریشه، حجم و سطح ریشه، فسفر خاک را بیشتر جذب کرده و از این حیث ارقام شیروودی، علی‌کازمی و دمسیاه، حسنی و هاشمی به رقم اهلمی‌طارم نزدیک‌تر بودند و ارقام آنام، خزر و گیلانه به رقم ندا مشابهت داشتند. با توجه به اینکه تراکم و طول کل ریشه مهم‌تر از توزیع وزن ریشه در خاک بوده و تعیین کننده وضعیت جذب عناصر غذایی از لایه زیرین نیم‌رخ خاک است، این ویژگی در شرایط تنش حائز اهمیت است (فیضی‌اصل و همکاران ۱۳۹۳). به نظر می‌رسد که تغییر در ساختار ریشه در شرایط کمبود فسفر، مواد فتوسنتزی تولید شده از شاخساره به ریشه انتقال می‌یابد (Irfan et al., 2019). مقایسه ارقام اهلمی‌طارم (فسفرناکارا) و ندا (فسفرناکارا) در تیمارهای کود فسفر نشان داد که رقم اهلمی‌طارم توانایی بالاتری در جذب و مصرف فسفر دارد. این رقم با تولید بیشتر ماده خشک در شاخساره و کارایی بالای مصرف فسفر (وزن خشک اندام هوایی به ازای واحد فسفر جذب شده)، عملکرد بهتری نسبت به رقم ندا داشت. در مقابل رقم ندا در شرایط کفایت فسفر دارای پتانسیل بالاتر در جذب فسفر خاک بود. از این نظر ارقام خزر، آنام و گیلانه به رقم ندا مشابهت داشتند. این ارقام در شرایط کمبود فسفر و در شرایط کفایت فسفر (۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) کارآمد نیستند در نتیجه دارای ویژگی کودپذیری بالا محسوب

می‌شوند. بر اساس نتایج آزمایش حاضر در مرحله رویشی، غلظت فسفر در اندام‌های هوایی ارقام برنج نسبت به ریشه بیشتر بوده و در مرحله رشد زایشی ترتیب غلظت فسفر به صورت دانه <ساقه> ریشه بود. ریشه‌ها در مرحله رویشی گیاه دارای غلظت بالاتری از فسفر بودند، اما در مرحله زایشی، دانه‌ها دارای غلظت بالاتری از فسفر بودند. معمولاً در مرحله رسیدگی، دانه‌ها دارای بالاترین غلظت فسفر هستند که این موضوع می‌تواند در جلوگیری از پوکی دانه موثر واقع شود. غلظت فسفر در بافت‌های رویشی با افزایش سن گیاه کاهش می‌یابد. Irfan et al., 2019) نیز نتایج مشابهی را گزارش نمودند. بر اساس نتایج آزمایش (Irfan et al., 2019) میانگین جذب فسفر ریشه و اندام هوایی در ارقام مورد آزمایش در شرایط کمبود فسفر به طور متوسط ۲ و ۳ برابر کمتر از ارقامی بود که در شرایط عرضه فسفر کافی رشد کرده بودند. جذب فسفر ریشه در شرایط فسفر کافی ۳/۷۷ میلی‌گرم در بوته و در شرایط کمبود فسفر ۱/۳۸ میلی‌گرم در بوته و محدوده جذب فسفر اندام هوایی در شرایط فسفر کافی ۶/۹۶ میلی‌گرم در بوته و در شرایط کمبود فسفر ۰/۷۳ میلی‌گرم در بوته بود. (Julia et al., 2016) گزارش دادند که جذب و تجمع فسفر در اندام‌های گیاه برنج در دو سطح فسفر کم و فسفر مطلوب، از طریق جذب ریشه پس از گلدهی و یا از طریق انتقال مجدد صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه خوشه‌ها مخزن اصلی فسفر می‌باشند، سازوکار تجمع فسفر در دانه‌ها شامل انتقال پس از گلدهی به دانه، جذب از ریشه و انتقال مجدد فسفر ذخیره شده از بافت‌های رویشی (برگ و ساقه) می‌باشد. غلظت فسفر کل گیاه در طول دوره پر شدن دانه ۳۵ تا ۴۰ درصد بود. در شرایطی که غلظت فسفر در برگ و ساقه گیاه کم باشد، غلظت فسفر دانه در زمان پر شدن کاهش می‌یابد.

جدول ۷- مقایسه میانگین محتوای فسفر ارقام برنج در تیمارهای کود فسفر

تیمارهای آزمایشی			مرحله رویشی			مرحله زایشی		
ارقام برنج	فسفر شاخساره (میلی‌گرم بر گرم)	فسفر ریشه (میلی‌گرم بر گرم)	فسفر شاخساره (میلی‌گرم بر گرم)	فسفر ریشه (میلی‌گرم بر گرم)	فسفر شاخساره (میلی‌گرم بر گرم)	فسفر ریشه (میلی‌گرم بر گرم)	فسفر شاخساره (میلی‌گرم بر گرم)	فسفر ریشه (میلی‌گرم بر گرم)
هاشمی	۰/۹ ^{bc}	۲/۰۳ ^{bc}	۲/۱ ^{ab}	۰/۶ ^{abc}	۱/۵ ^{cd}	۰/۹ ^{ab}	۱/۹ ^{ab}	۱/۵ ^{cd}
علی کاظمی	۰/۹ ^{bc}	۲/۰۹ ^{bc}	۲/۰۵ ^{ab}	۰/۷ ^{abc}	۱/۹ ^{ab}	۰/۹ ^{ab}	۱/۹ ^{ab}	۱/۹ ^{ab}
حسنی	۰/۸ ^c	۲/۰۱ ^{bc}	۱/۷ ^{bc}	۰/۳ ^d	۱/۴ ^{cd}	۰/۹ ^{ab}	۱/۹ ^{ab}	۱/۴ ^{cd}
دمسیاه	۰/۹ ^{bc}	۲/۰۹ ^{bc}	۲/۰۴ ^{ab}	۰/۶ ^{abc}	۱/۹ ^{ab}	۰/۹ ^{ab}	۱/۹ ^{ab}	۱/۹ ^{ab}
ندا	۱/۰۲ ^{bc}	۲/۸۰ ^{ab}	۳ ^{abc}	۰/۵ ^{bcd}	۱/۸ ^{bc}	۰/۹ ^{ab}	۱/۸ ^{bc}	۱/۸ ^{bc}
اهلمی طارم	۲/۵ ^a	۳/۷۰ ^a	۲/۳ ^a	۰/۹ ^a	۲/۴ ^a	۰/۹ ^{ab}	۱/۶ ^{bc}	۲/۴ ^a
خزر	۱/۱ ^{bc}	۲/۳۰ ^{ab}	۲/۰۳ ^{ab}	۰/۴ ^d	۱/۶ ^{bc}	۰/۸ ^a	۲/۱ ^a	۱/۶ ^{bc}
شیرودی	۲/۱ ^{ab}	۳/۵۰ ^a	۲/۲ ^a	۰/۸ ^a	۲/۱ ^a	۰/۴ ^d	۱/۴ ^{cd}	۲/۱ ^a
گیلانه	۰/۹ ^{bc}	۲/۰۷ ^{bc}	۱/۸ ^{bc}	۰/۴ ^d	۱/۴ ^{cd}	۰/۴ ^d	۱/۴ ^{cd}	۱/۴ ^{cd}
آنام	۰/۸ ^c	۱/۹۰ ^c	۱/۵ ^c	۰/۴ ^d	۱/۳ ^d	۰/۴ ^d	۱/۳ ^d	۱/۳ ^d
کود فسفر								
چهار میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر بومی خاک (صفر)	۱/۹ ^b	۱/۹ ^b	—	—	۱/۶ ^b	—	۱/۶ ^b	۱/۶ ^b
۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک	۳/۴۵ ^a	۳/۳ ^a	—	—	۱/۸ ^a	—	۱/۸ ^a	۱/۸ ^a

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند

جدول ۸- مقایسه میانگین محتوای فسفر شاخساره و شاخص‌های کارایی مصرف فسفر ارقام برنج (مرحله رسیدگی)

ارقام برنج	فسفر شاخساره (میلی‌گرم بر گرم)	کارایی مصرف فسفر (درصد)	کارایی جذب فسفر (درصد)	کارایی ریشه (میلی‌گرم بر گرم)
هاشمی	۲/۲ ^{ab}	۳۷ ^{bc}	۳۰/۵ ^{ab}	۱۷۱/۸ ^{ab}
علی کاظمی	۲/۳ ^{ab}	۵۷ ^{ab}	۳۱/۳ ^{ab}	۱۹۵/۶ ^{ab}
حسنی	۲/۲ ^{ab}	۳۹ ^{bc}	۲۹/۲ ^b	۱۶۷/۵ ^{bc}
دمسیاه	۲/۱ ^{ab}	۵۵ ^{ab}	۳۲/۵ ^{ab}	۱۸۸/۶ ^{ab}
ندا	۱/۹ ^b	۴۷ ^b	۲۸/۶ ^{bc}	۸۹/۰ ^c
اهلمی طارم	۳/۳ ^a	۸۸ ^a	۳۷/۹ ^a	۲۴۶/۷ ^a
خزر	۱/۵ ^{bcd}	۳۶ ^{bc}	۲۵/۵ ^{bc}	۳۵/۳ ^d
شیرودی	۲/۹ ^{ab}	۶۴ ^{ab}	۳۲/۵ ^{ab}	۱۹۷/۷ ^{ab}
گیلانه	۱/۷ ^{bcd}	۲۹ ^c	۲۳/۶ ^c	۵۳/۰ ^c
آنام	۱/۸ ^{bc}	۳۹ ^{bc}	۲۳/۰ ^c	۹۲/۵ ^{bc}
کود فسفر				
چهار میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر بومی خاک (صفر)	۱/۹ ^b	۱۰۱ ^a	—	۳۳۳ ^a
۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک	۳/۴۵ ^a	۸۲ ^b	—	۹۲/۵ ^b

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند

جدول ۹- مقایسه میانگین محتوای فسفر خاک و گیاه ارقام برنج در برهمکنش تیمارهای کود فسفر و رقم

کود فسفر	ارقام برنج	فسفر خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)	کارایی مصرف فسفر (درصد)	فسفر دانه (میلی گرم بر گرم)	فسفر شاخساره (میلی گرم بر گرم)
هاشمی	۲/۷ ^{ab}	۷۷/۶ ^c	۱ ^{cd}	۰/۶ ^d	
علی کاظمی	۲/۵ ^{ab}	۱۳۷ ^{ab}	۱/۵ ^{bc}	۱/۰۸ ^{bc}	
حسنی	۲/۷ ^c	۱۱۰ ^{bc}	۱/۰۳ ^{bc}	۰/۸ ^{cd}	
دمسیاه	۲/۵ ^c	۱۱۴/۶ ^{ab}	۱/۱ ^{bc}	۱/۰۰۳ ^{bc}	
ندا	۲/۴ ^c	۷۷ ^b	۱/۰۶ ^{cd}	۱/۵ ^{ab}	
اهلمی طارم	۱/۸ ^c	۱۷۵/۳ ^a	۲/۳ ^a	۱/۳ ^b	چهار میلی گرم بر کیلوگرم فسفر بومی خاک (صفر)
خزر	۲/۸ ^c	۵۷/۶ ^{bc}	۱/۰۸ ^{cd}	۰/۸ ^{cd}	
شیرودی	۲/۰۹ ^c	۱۳۷/۶ ^{ab}	۲/۰۶ ^{ab}	۱/۳ ^{ab}	
گیلانه	۳/۳ ^c	۷۱/۳ ^{bc}	۰/۸ ^d	۰/۴ ^d	
آنام	۳/۱ ^c	۷۳ ^{bc}	۰/۸ ^d	۰/۵ ^d	
هاشمی	۴۷/۲ ^a	۳۶/۲ ^d	۱/۸ ^{bc}	۲/۱ ^{ab}	
علی کاظمی	۳۲/۸ ^{ab}	۶۰/۵ ^{bc}	۲/۳ ^a	۲/۶ ^{ab}	
حسنی	۳۳/۷ ^{ab}	۵۲/۴ ^{cd}	۱/۸ ^{bc}	۲/۳ ^{ab}	
دمسیاه	۳۲/۵ ^{ab}	۵۶/۳ ^{cd}	۱/۹ ^{ab}	۲/۵ ^{ab}	
ندا	۲۳/۰۵ ^b	۳۸/۵ ^d	۲/۴ ^a	۳/۰۳ ^a	۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک
اهلمی طارم	۳۰/۴ ^{ab}	۸۲/۶ ^{bc}	۲/۳ ^a	۲/۸ ^a	
خزر	۲۳/۲ ^b	۲۸/۸ ^d	۲/۵ ^a	۲/۳ ^{ab}	
شیرودی	۲۸/۹ ^{ab}	۶۱/۸ ^{cd}	۲/۴ ^a	۲/۷ ^a	
گیلانه	۲۶/۷ ^b	۳۵/۶ ^d	۱/۸ ^{bc}	۱/۹ ^{bcd}	
آنام	۲۳/۸ ^b	۳۶/۵ ^d	۱/۸ ^{bc}	۲/۰۳ ^{bc}	

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند

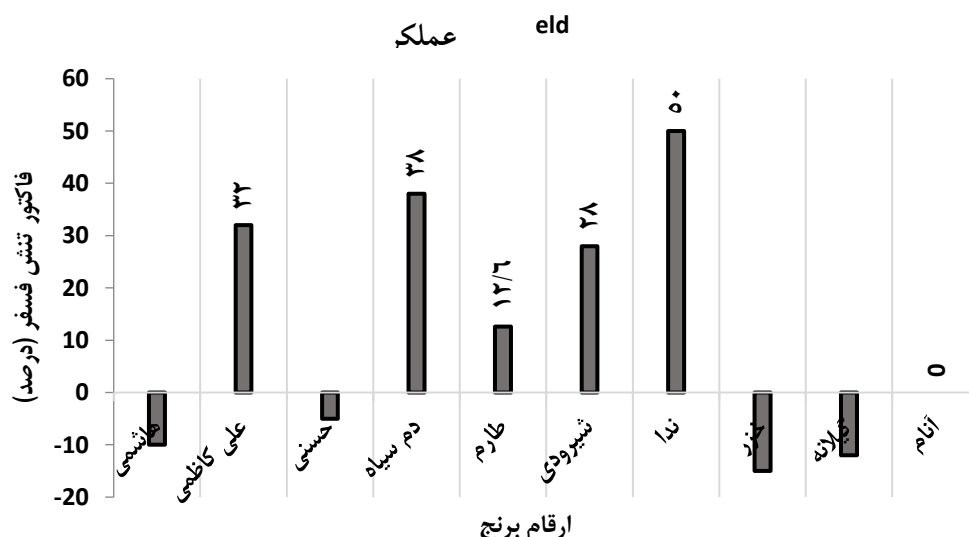
کارایی جذب فسفر

کارایی جذب فسفر به معنی توانایی بیش‌تر گیاه در جذب این عنصر از خاک دارای محدودیت فسفر است. میزان کل فسفر جذب شده از حاصل ضرب غلظت فسفر در ماده خشک محاسبه می‌شود، با توجه به اینکه در محاسبه میزان فسفر جذب شده پتانسیل ژنتیکی ارقام نقش موثری دارد، برای حذف اثر این عامل از نسبت جذب کل فسفر در شرایط بدون مصرف کود به جذب کل آن در شرایط مصرف کود به عنوان شاخص کارایی جذب استفاده شده و مقدار آن به طور متوسط ۲۸/۵ درصد به دست آمد که از این جهت ارقام اهلمی طارم، شیرودی، علی کاظمی و دمسیاه بالای میانگین و ارقام گیلانه، خزر و ندا با وجود تولید مقدار زیادی ماده خشک، جذب فسفر کمتری داشتند. به نظر می‌رسد که این ارقام در مصرف فسفر کارا بوده و در جذب آن کارایی کمتری دارند و این موضوع را می‌توان به تفاوت‌های ژنتیکی بین آنها نسبت داد. از لحاظ کارایی جذب فسفر ارقام اهلمی طارم و شیرودی به ترتیب با ۳۷/۹ و ۳۲/۵ درصد نسبت به سایر ارقام کارا تر و ارقام خزر و گیلانه به ترتیب با ۲۵/۵ و ۲۳/۶ درصد، ناکاراترین ارقام در جذب فسفر بودند. نتایج آزمایش (Irfan et al., 2019) در رابطه با کارایی جذب فسفر نشان داد که جذب و تجمع فسفر در ساقه برنج باعث بهبود رشد ریشه برای جذب بهتر فسفر در شرایط کمبود فسفر شد. سازوکار اصلی افزایش کارایی جذب، با افزایش حجم و سطح ریشه گیاه مرتبط است. تفاوت‌های ژنوتیپی زیادی در بین ارقام گیاهی از نظر جذب فسفر گزارش شده و بسیاری از پژوهشگران علت این تفاوت‌ها را نوع مورفولوژی و ویژگی‌های ریشه گزارش کرده‌اند. (Lynch et al., 2015) گزارش کردند که با افزایش طول ریشه‌های کم‌عمق و افزایش طول تارهای کشنده، کارایی جذب فسفر در برنج افزایش می‌یابد. در خاک‌های کم‌فسفر، هم‌افزایی این دو شاخص و اثر ترکیبی آنها، باعث افزایش تجمع فسفر در گیاه، افزایش وزن خشک ساقه و سطح برگ‌های گیاه می‌شود. نتایج آزمایش‌ها در تعدادی از گیاهان زراعی در شرایط محدودیت فسفر خاک نشان داده است که اثر هم‌افزایی طول ریشه و طول تارهای کشنده، باعث افزایش وزن خشک ساقه (۸۹/۳ درصد) و محتوای فسفر گیاه (۹۰ درصد) شد. نتایج آزمایش (Irfan et al., 2019) درباره کارایی جذب فسفر در ارقام برنج (Basmati-2000, KSK-282, KSK-434, IR-6) نشان داد که تفاوت‌های ژنتیکی بین ارقام از نظر ویژگی‌های کارایی فسفر وجود داشت. جذب فسفر در ساقه و دانه در شرایط کمبود فسفر در رقم Basmati-2000 بیشترین مقدار را داشته و باعث افزایش وزن خشک ساقه و عملکرد دانه شد. در شرایط کمبود فسفر انتقال مواد فتوسنتزی از ساقه به ریشه افزایش یافته و باعث افزایش طول تارهای کشنده برای کاوش حجم بیشتری از خاک

برای جذب بیشتر فسفر شد.

کارایی مصرف فسفر

کارایی مصرف فسفر نشان دهنده توانایی گیاه برای تولید بیشتر به ازای هر واحد از فسفر جذب شده و اختصاص یافتن بیشتر فسفر به فعالیت‌های متابولیسمی به جای ذخیره، تخصیص بیشتر فسفر در شرایط کمبود به اندام‌های فتوسنتزی به جای اندام‌های ذخیره‌ای و نیز بازچرخش فسفر از برگ‌های مسن به برگ‌های در حال رشد می‌باشد (حاجی‌بلند و همکاران، ۱۳۹۱). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در میان ارقام برنج مورد بررسی، کارایی مصرف فسفر از ۸۸/۱ درصد در رقم اهلومی طارم تا ۳۶ درصد در رقم خزر تغییر داشت. از این نظر ارقام اهلومی طارم، شیرودی، علی‌کاظمی و دم‌سیاه کارتر بودند و ارقام آنام، حسنی، خزر و گیلانه پایین‌ترین کارایی را داشتند (جدول ۸). به طور کلی در کلیه ارقام با مصرف فسفر این شاخص به طور چشمگیری کاهش یافت و به طور میانگین از ۱۰۱ به ۸۲ درصد رسید (جدول ۸). این موضوع نشان می‌دهد که گیاه در حالت محدودیت، مسیر سازگاری را برمی‌گزیند. این یافته‌ها با نتیجه آزمایش (Irfan et al., 2020) مطابقت می‌نماید که با مصرف فسفر، کارایی مصرف آن در ارقام برنج به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. تقابل نتایج، نشان دهنده تنوع ارقام از لحاظ فسفر کارایی، حتی در داخل یک گونه گیاهی است. به طور کلی در ارقامی که فعالیت‌های متابولیسمی آنها در غلظت پایین فسفر تنظیم شده و ماده خشک بیشتری نسبت به واحد فسفر جذب شده تولید شود، رقم کارا در مصرف فسفر شناخته می‌شود. نتایج یک آزمایش در پاکستان جهت شناسایی ارقام برنج فسفرکارا و ارزیابی سازوکارهای کارایی مصرف فسفر در ارقام Basmati-2000, KSK-282, KSK-434, IR-6 در شرایط محدودیت فسفر نشان داد که که تنوع ژنتیکی قابل توجهی در بین ارقام مورد آزمایش از نظر کارایی مصرف فسفر وجود داشت. ارقامی که دارای کارایی جذب فسفر بالا بودند، کارایی مصرف فسفر بالایی داشته و فاکتور تنش فسفر (که ارقام فسفرکارا و فسفرناکارا از هم متمایز می‌کند) در آنها پایین بود و به همین لحاظ فسفرکارا محسوب شده و برای خاک‌های کم‌فسفر مطلوب‌تر شناخته شدند (Irfan et al., 2020). در آزمایش حاضر فاکتور تنش فسفر برای عملکرد دانه ارقام برنج کشت شده در سطوح کفایت و کمبود فسفر، بیشترین مقدار این شاخص برای رقم ندا (۵۰ درصد) و کمترین مقدار آن (۱۲/۶ درصد) برای رقم اهلومی طارم ثبت شد و میانگین این شاخص ۳۱/۳ درصد بود (شکل ۲). (Irfan et al., 2019) نیز نتایج مشابهی را در مورد ارقام مختلف برنج گزارش نمودند.



شکل ۲- فاکتور تنش فسفر برای عملکرد دانه ارقام برنج در تیمارهای کود فسفر

کارایی ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی ارقام بر کارایی ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که ارقام اهلومی طارم و شیرودی به ترتیب با ۲۴۶/۷ و ۱۹۷/۷ میلی گرم بر گرم، دارای بیشترین و ارقام گیلانه و خزر به ترتیب با ۵۳/۰ و ۳۵/۲ میلی گرم بر گرم، کمترین مقدار کارایی ریشه را داشتند (جدول ۸). کارایی ریشه به معنی توانایی گیاه در جذب فسفر بیشتر در واحد اندازه ریشه است. نحوه توزیع ریشه در عمق خاک یکی از عوامل مهم در کارآمد بودن ریشه می‌باشد. با توجه به اینکه

فسفر در سطوح بالایی خاک تثبیت می‌شود (کاوسی و همکاران ۱۳۹۱)، در صورتی که عمق نفوذ ریشه به صفر تا ۲۵، ۲۵ تا ۵۰ و ۵۰ تا ۷۵ سانتی‌متر تقسیم شود، باید بیشترین زیست توده و وزن تر ریشه در عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متری باشد تا ریشه کارایی کافی برای جذب فسفر از خاک داشته باشد، زیرا یک ارتباط تنگاتنگ بین زیست توده ریشه و جذب فسفر وجود دارد. هر چه زیست توده ریشه در اعماق پایین‌تر خاک بیشتر شود، تأثیر چندانی بر جذب فسفر و بر کارایی ریشه ندارد (Wissuwa et al., 2016). بخش بزرگی از تغییرات زیست توده ریشه ترکیب کارایی ریشه (RE) و سطح ریشه (RSA) می‌باشد. سطح ریشه و محتوی فسفر اندام‌های هوایی دو عامل مهم در ارزیابی کارایی ریشه در ارقام برنج هستند. با توجه به اینکه اثر کمبود فسفر در ۳۰ روز پس از کاشت، بیشترین تأثیر را در کاهش زیست توده ۵۲ درصد دارد، کارآمد بودن ریشه می‌تواند ۷۵ درصد فسفر را در شرایط خاک کم فسفر جذب نماید که این موضوع می‌تواند موجب افزایش ماده خشک گیاه و افزایش عملکرد دانه در برنج شود (Wissuwa et al., 2015). در آزمایش حاضر ارقام فسفرکارا (اهلمی طارم و شیرودی) در مقایسه با سایر ارقام، تفاوت معنی‌داری از نظر سطح ریشه و محتوی فسفر شاخساره داشتند (جدول‌های ۳ و ۴). (Kant et al., 2016) گزارش کردند که ریشه کارآمد در گیاه برنج جهت نفوذ در خاک به نوع ریشه، بیشتر بودن تعداد ریشه‌های پایه کم‌عمق در خاک سطحی و ریشه‌های عمقی طویل‌تر و همچنین ریشه‌های مویین بزرگ‌تر بستگی دارد. ویسوا و همکاران (Wissuwa et al., 2016) در آزمایشی روی ۳۰ ژنوتیپ متنوع برنج، کارایی ریشه را به‌صورت جذب فسفر در واحد اندازه ریشه گزارش کردند. گزارش شده است که در گیاه برنج تفاوت‌های ژنوتیپی در جذب فسفر در خاک‌های کم‌فسفر متناسب با وزن و سطح ریشه وجود دارد. نتایج آزمایش (Wissuwa et al., 2015) جهت ارزیابی نقش اندازه و کارایی ریشه ارقام برنج در جذب فسفر کم نشان داد که افزایش زیست توده ریشه گیاه برنج در بالای عمق ۲۵ سانتی‌متری سطح خاک، کارایی ریشه در جذب فسفر بیشتر بود. در این آزمایش که مجموعه‌ای از ۱۹۶ ژنوتیپ شامل سه زیرمجموعه برنج (Aus, Indica, Japonica) مورد مطالعه قرار گرفت و فسفر خاک در سه سطح (۴/۵، ۷/۸ و ۱۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در نظر گرفته شد، ارقام نوع Aus (برنج‌های تابستانه دیم) با داشتن توزیع بیشتر ریشه در عمق ۵۰ تا ۷۵ سانتی‌متر و تحمل بالاتر به کمبود آب، دارای کمترین کارایی ریشه و گروه ژاپونیکا دارای بیشترین سطح ریشه و بیشترین کارایی ریشه برای جذب فسفر بودند.

تجزیه خوشه‌ای

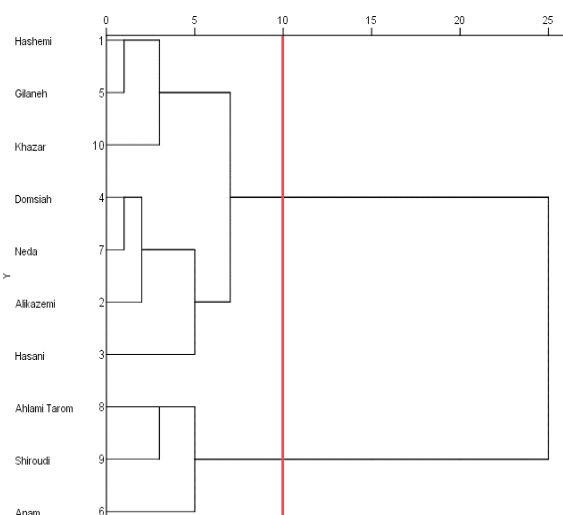
مرحله رویشی (فسفر چهار میلی‌گرم بر کیلوگرم)

بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای ویژگی‌های ریشه در سطح فسفر چهار میلی‌گرم بر کیلوگرم و در مرحله رویشی، ارقام برنج به دو گروه با مشخصات درون گروهی مشابه و برون گروهی متفاوت تفکیک شدند (شکل ۲). در گروه اول، هفت رقم (هاشمی، گیلانه، خزر، دمسیاه، ندا، علی‌کاظمی و حسنی) و در گروه دوم سه رقم (اهلمی طارم، شیرودی و آنام) قرار گرفتند. بررسی مقادیر میانگین هر خوشه و درصد انحراف از میانگین کل نشان داد که گروه دوم از نظر کلیه صفات، به استثنای قطر ریشه، مقادیر بالاتری نسبت به میانگین کل داده‌ها داشت. بیشترین درصد انحراف از میانگین کل (۳۵ درصد) مربوط به حجم ریشه بود. ارقام گروه دوم در شرایط کمبود فسفر، در مرحله رویشی، عملکرد بهتری از نظر صفات ریشه‌ای داشتند. با توجه به اینکه رقم شاهد اهلمی طارم (فسفرکارا) نیز در این گروه قرار دارد، می‌توان گفت که ویژگی‌های ارقام این گروه از نظر صفات مورد ارزیابی با این رقم مشابهت دارند. درصد انحراف از میانگین کل برای ارقام گروه اول، از نظر کلیه ویژگی‌ها به استثنای قطر ریشه که با اختلاف ناچیزی از میانگین کل داده‌ها بالاتر بود، منفی بود. رقم شاهد ندا (فسفرناکارا) در این گروه واقع شد که نشان دهنده تشابه ارقام این گروه با رقم شاهد است. این نتایج نشان‌دهنده قابلیت بهتر جذب منابع آب و عناصر غذایی برای ارقام گروه دوم است.

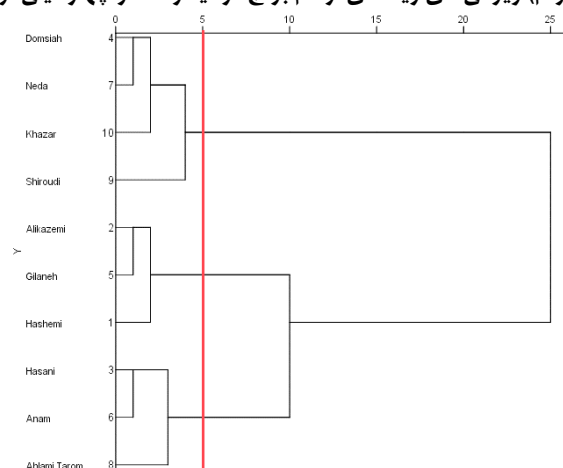
مرحله زایشی (فسفر چهار میلی‌گرم بر کیلوگرم)

بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای در مرحله زایشی، ارقام برنج به سه گروه با مشخصات درون گروهی مشابه و برون گروهی متفاوت تفکیک شدند. گروه اول شامل ارقام دمسیاه، ندا، خزر و شیرودی و گروه دوم شامل ارقام علی‌کاظمی، گیلانه، هاشمی و گروه سوم شامل ارقام حسنی، آنام و اهلمی طارم بودند (شکل ۳). میانگین ارقام گروه اول از نظر کلیه صفات به استثنای قطر و کارایی ریشه، دارای انحراف مثبت نسبت به میانگین کل بودند. این نتایج می‌تواند به دلیل تأثیر مثبت شرایط رویشی قبلی بر رشد ریشه‌ها و افزایش قابلیت‌های جذب ریشه‌ای باشد. ارقام گروه دوم در طبقه متوسط از نظر ویژگی‌های ریشه و کارایی جذب فسفر طبقه‌بندی شدند. این موضوع ممکن است به تفاوت‌های ژنتیکی بین ارقام مرتبط باشد. ارقام گروه سوم، اگرچه از نظر خصوصیات ریشه، میانگین پایین‌تری در مقایسه با میانگین کل داشتند، اما کارایی جذب فسفر در آنها بالاتر بود. به نظر می‌رسد که ارقام گروه اول، علی‌رغم دارا بودن ویژگی‌های برتر ریشه‌ای، احتمالاً در رقابت با

سایر ارقام ضعیف‌تر بوده باشند. عملکرد نامناسب در متابولیسم سلولی و فرآورده‌های فیزیولوژیکی گیاه نیز می‌تواند بر کارایی ریشه‌ها اثرگذار باشد. از سوی دیگر عدم تناسب بین حجم و وزن ریشه با اندام‌های هوایی گیاه و عدم توازن در آلودگی آن‌ها که در گیاهان غلاتی در مرحله رشد زایشی دیده می‌شود، ممکن است باعث پایین‌تر بودن کارایی ریشه بوده باشد.



شکل ۲- تجزیه خوشه‌ای (دندروگرام) ویژگی‌های ریشه‌ای ارقام برنج در تیمار فسفر چهار میلی گرم بر کیلوگرم (مرحله رویشی)



شکل ۳- تجزیه خوشه‌ای (دندروگرام) ویژگی‌های ریشه‌ای ارقام برنج در تیمار فسفر چهار میلی گرم بر کیلوگرم (مرحله زایشی)

مرحله رویشی (فسفر ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم)

بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای در مرحله رویشی در سطح فسفر ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم، ارقام برنج را به دو گروه با مشخصات درون گروهی مشابه و برون گروهی متفاوت تفکیک شدند. گروه اول شامل ارقام دمسیاه، گیلانه، شیروودی، اهلومی طارم، حسنی و آنام و گروه دوم شامل ارقام علی کاظمی، خزر، هاشمی و ندا بودند (شکل ۴). بررسی مقادیر میانگین هر خوشه و درصد انحراف از میانگین کل خوشه‌ها نشان داد که گروه اول از نظر کلیه صفات مورد مطالعه مقادیر بالاتری نسبت به میانگین کل داشتند. بیشترین درصد انحراف از میانگین کل (۱۸ درصد) مربوط به چگالی سطح ریشه و طول کل ریشه بود. ارقام گروه اول در تیمار ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم کود فسفر در مرحله رویشی عملکرد بهتری از نظر ویژگی‌های ریشه‌ای داشتند. این نتایج نشان‌دهنده ظرفیت بالای جذب آب و عناصر غذایی برای ارقام گروه اول در شرایط کفایت فسفر است. رقم شاهد اهلومی طارم (فسفرکارا) نیز در این گروه قرار داشت که نشان‌دهنده تشابه ارقام گروه اول با این رقم بود.

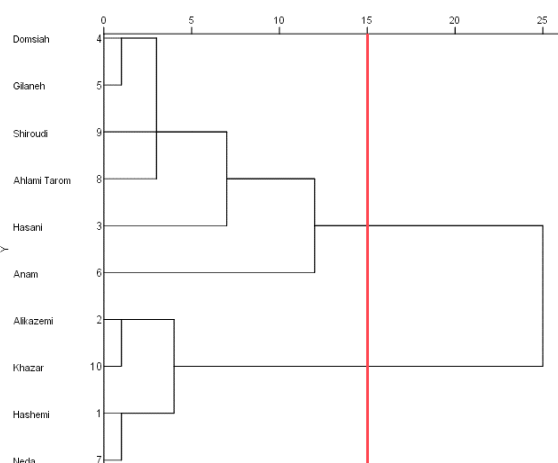
مرحله زایشی (فسفر ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم)

در مرحله زایشی و در سطح فسفر ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم، دندروگرام به سه گروه با مشخصات درون گروهی مشابه و برون گروهی متفاوت تفکیک شد. گروه اول شامل ارقام دمسیاه، خزر، آنام و ندا و گروه دوم شامل ارقام علی کاظمی، اهلومی طارم و حسنی و گروه سوم

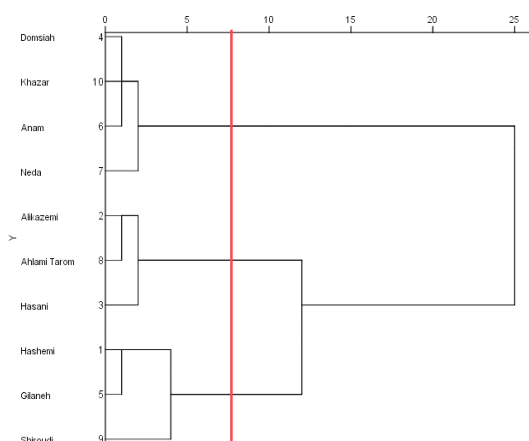
شامل ارقام هاشمی، گیلانه و شیرودی بودند (شکل ۵). گروه اول از نظر کلیه صفات، به استثنای ظرافت و کارایی ریشه، میانگین بالاتری نسبت به میانگین کل داشتند. کمترین مقادیر میانگین از نظر اکثر صفات به گروه سوم تعلق داشت. لازم به ذکر است که علی‌رغم مقادیر کم میانگین از نظر طول کل، حجم، سطح، قطر و چگالی سطح ریشه، ارقام این گروه از نظر ظرافت و کارایی ریشه، میانگین بالاتری در مقایسه با سایر گروه‌ها و میانگین کل داشتند. این موضوع ممکن است به تطابق بهتر آن‌ها با شرایط محیطی مربوط باشد. این موضوع نشان می‌دهد که لازم است ارقام برنج علاوه بر ارزیابی بر اساس ویژگی‌های مورفولوژیکی، از نظر کارایی شیمیایی جذب فسفر نیز مورد ارزیابی قرار گیرند.

بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای و تحلیل‌های دندروگرام‌های مربوطه، سطوح فسفر و مرحله رشدی گیاه تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های ریشه‌ای ارقام برنج دارند. در شرایط کمبود فسفر (چهار میلی گرم بر کیلوگرم)، رقم شیرودی در هر دو مرحله رویشی و زایشی، عملکرد بهتری از نظر ویژگی‌های ساختاری ریشه و کارایی جذب فسفر داشت، بنابراین در شرایط کمبود فسفر، استفاده از این رقم مناسب‌تر است. در سطح فسفر ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم، ارقام دمسیاه و آنام در هر دو مرحله رویشی و زایشی در گروه برتر قرار داشتند، هرچند کارایی ریشه آن‌ها در جذب فسفر کمتر بود. رقم شاهد اهلمی طارم (فسفرکارا) نیز وضعیت مشابهی داشت، به گونه‌ای که در شرایط کمبود فسفر، علی‌رغم کارایی بالا در جذب فسفر، اما ساختار ریشه‌ای ضعیف‌تری داشت. در شرایط کفایت فسفر نیز، این رقم چه از نظر ساختار ریشه و چه از نظر کارایی جذب فسفر در گروه متوسط قرار داشت، بنابراین به نظر می‌رسد که در شرایط مطلوب خاک از نظر فسفر، ملاک قرار دادن ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه کافی نبوده و انتخاب ارقام با کارایی بالاتر در جذب عناصر غذایی اهمیت ویژه‌ای دارد.

متغیر بودن کارایی جذب فسفر در ارقام برنج در سطوح کود فسفر و مراحل رشدی گیاه، نشان دهنده تعاملات پیچیده بین ویژگی‌های ریشه رقم گیاهی در پاسخ به سطوح فسفر است و لازم است برای شناسایی و اصلاح ارقام برنج با کارایی بالا در جذب عناصر غذایی، این موضوع در نظر گرفته شود.



شکل ۴- تجزیه خوشه‌ای (دندروگرام) ویژگی‌های ریشه‌ای ارقام برنج در تیمار فسفر ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم (مرحله رویشی)



شکل ۵- نتایج تجزیه خوشه‌ای (دندروگرام) ویژگی‌های ریشه ارقام برنج در تیمار فسفر ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم (مرحله زایشی)

تجزیه به عامل‌ها

نتایج تجزیه به عامل‌ها برای ویژگی‌های مرتبط با ریشه ارقام برنج در دو مرحله رویشی و زایشی و در دو تیمار کمبود و کفایت فسفر با استفاده از روش چرخش واریماکس نشان داد که دو عامل اصلی (ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه و ویژگی‌های کارکردی ریشه)، با درصد توجیه ۸۳/۴۲ درصد از تغییرات کل داده‌ها، در تحلیل صفات مرتبط با ریشه گیاه برنج نقش داشتند. بارهای عاملی نشان دهنده ارتباط هر یک از ویژگی‌ها با این دو عامل بود (جدول ۱۰). عامل اول (ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه) با بارهای مثبت قوی برای طول کل ریشه (۰/۹۵۷)، حجم ریشه (۰/۹۰۷)، سطح ریشه (۰/۹۷۵) و چگالی سطح ریشه (۰/۹۱۵) مشخص شد. این موضوع نشان می‌دهد که این ویژگی‌ها به‌طور قابل توجهی در تشکیل و توسعه ساختار ریشه تأثیر دارند. طول کل ریشه نشان‌دهنده قابلیت ریشه برای نفوذ در خاک و جذب آب و عناصر غذایی و چگالی بالاتر نشان‌دهنده سطح بیشتر ریشه‌ها و بهبود کارایی جذب عناصر غذایی است. ارقام با طول کل ریشه بیشتر (گسترش بیشتر) و سطح تماس بیشتر ریشه با خاک، از نظر ساختاری برتر هستند و بر این اساس، این عامل به عنوان ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه نامگذاری شد. عامل دوم (ویژگی‌های کارکردی ریشه) با بارهای قوی برای صفات قطر ریشه (۰/۹۳۲) و ظرافت ریشه (۰/۹۱۴-) مشخص شد. بار مثبت برای قطر ریشه نشان دهنده اهمیت این صفت در تعیین ظرفیت ریشه برای تحمل تنش‌ها و بهبود کارایی جذب عناصر از خاک است. ریشه‌های با قطر بیشتر معمولاً دارای ساختار قوی‌تری هستند و می‌توانند در شرایط مختلف محیطی بهتر عمل کنند. از سوی دیگر، بار منفی برای ظرافت ریشه به این معنی است که ریشه‌های ظریف‌تر ممکن است به‌طور مؤثرتری در جذب مواد غذایی و آب عمل کنند، اما در عین حال ممکن است تحت تنش‌های فیزیکی و محیطی آسیب‌پذیرتر باشند (Lynch et al., 2013). این ویژگی‌ها به‌طور مشترک بر کارکرد ریشه تأثیر می‌گذارند و نشان می‌دهند که یک تعادل بین ساختار و عملکرد ریشه ضروری است. در مجموع، عامل دوم به‌روشنی نشان دهنده تعاملات بین ساختار و کارکرد ریشه در پاسخ به محتوای فسفر خاک است. ارقام با قطر ریشه مناسب و ظرافت بهینه می‌توانند عملکرد بهتری در جذب منابع و تحمل شرایط نامساعد محیطی داشته باشند.

کارایی ریشه یک ویژگی مهم در جذب فسفر، با بار منفی برای هر دو عامل نشان دهنده این است که ارقام دارای ساختارهای ریشه‌ای قوی و پایدار (عامل اول) و یا ارقام با قطر ریشه بیشتر (عامل دوم) ممکن است لزوماً در جذب فسفر به‌طور مؤثری عمل نکنند. این احتمال وجود دارد که این ارقام به دلایل خاصی در متابولیسم یا تعاملات ریشه‌ای نتوانند کارایی خوبی در جذب فسفر داشته باشند، اما ممکن است در جذب سایر عناصر غذایی و یا آب کارایی بهتری داشته باشند. این تحلیل می‌تواند به انتخاب ارقام برنج با ویژگی‌های ریشه‌ای مطلوب که توانایی بیشتری در بهره‌برداری از عناصر غذایی خاک دارند، کمک کند.

جدول ۱۰- نتایج تجزیه به عامل‌ها برای ویژگی‌های ریشه ارقام برنج در تیمارهای کود فسفر

ویژگی‌های ریشه	بار عاملی		واریانس مشترک
	عامل اول	عامل دوم	
طول کل ریشه	۰/۹۵۷	-۰/۰۶۴	۹۲/۰
حجم ریشه	۰/۹۰۷	۰/۲۰۸	۸۶/۵
سطح ریشه	۰/۹۷۵	-۰/۰۱۷	۹۵/۱
قطر ریشه	۰/۱۱۹	۰/۹۳۲	۸۸/۳
ظرافت ریشه	-۰/۱۰۵	-۰/۹۱۴	۸۴/۶
چگالی سطح ریشه	۰/۹۱۵	۰/۳۲۲	۹۴/۱
کارایی ریشه	-۰/۵۸۶	-۰/۳۰۱	۴۳/۴
واریانس	۵۹/۶۳۲	۲۳/۷۹۷	
واریانس تجمعی	۵۹/۶۳۲	۸۳/۴۲۹	

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه در ارقام برنج فسفرکارا به‌طور معنی‌داری نسبت به ارقام فسفرناکارا برتری داشتند. به نظر می‌رسد که در میان ارقام برنج مورد بررسی، ارقام محلی درحالت محدودیت فسفر بیشتر از سازوکارهای افزایش جذب فسفر از خاک (مورفولوژی ریشه، طول کل و تراکم ریشه) استفاده کرده و برای افزایش مصرف بهینه فسفر از سازوکارهای داخلی (در سطح سلولی) استفاده کرده و فعالیت‌های متابولیکی آن‌ها طوری تنظیم می‌شود که از فسفر کم جذب شده، استفاده بیشتری را داشته باشند.

بر اساس نتایج تجزیه خوشه‌ای ارقام اهلمی طارم و شیرودی در شرایط کمبود فسفر، به‌ویژه در مرحله رویشی، از نظر ویژگی‌های ریشه‌ای برتر بود و در شرایط کفایت فسفر، ارقام دمسیاه و آنام به عنوان ارقام برتر شناسایی شدند. بر اساس نتایج تجزیه به عامل‌ها نیز دو عامل اصلی (ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه و ویژگی‌های کارکردی ریشه) شناسایی شدند که ۸۳/۴۲ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توجیه کردند. بارهای مثبت قوی برای طول کل ریشه، حجم ریشه و چگالی سطح ریشه در عامل اول، اهمیت این ویژگی‌ها در توسعه ساختار ریشه را نشان می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که در انتخاب ارقام برنج برای جذب فسفر باید علاوه بر ویژگی‌های مورفولوژیکی، کارایی جذب فسفر نیز مورد توجه قرار داده شود. ارقام با ساختار ریشه‌ای قوی، در شرایط خاص ممکن است نتوانند کارایی بالایی در جذب فسفر داشته باشند. این موضوع نشان دهنده ضرورت آزمایش‌های تکمیلی در زمینه تعاملات متابولیکی و عملکرد ریشه‌ها در ارقام برنج است. به طور کلی تفاوت در ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه از یک سو و توسعه بیش‌تر ریشه‌ها از سوی دیگر دسترسی گیاه را به حجم بیش‌تری از خاک میسر نموده که در جذب بیشتر فسفر مؤثر بوده است. وجود تنوع در زیست توده ریشه نشان داد که ارقام برنج از نظر کارایی سیستم ریشه‌ای در جذب فسفر برای کمک به رشد گیاه تفاوت دارند. بر این اساس می‌توان با شناسایی ارقام اهدا کننده، از شاخص‌های کارایی ریشه برای جذب فسفر در برنامه‌های اصلاحی برنج استفاده کرد. ارقام اصلاح شده با کارایی جذب بالا در خاک‌هایی که با کمبود فسفر مواجه هستند و یا برای صرفه‌جویی در مصرف کودهای فسفر قابل استفاده هستند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- پسندیده، محمد، ملکوتی، محمدجعفر، شهبازی، کریم و محمداسماعیل، زهرا. (۱۳۹۸). لحاظ آزمون خاک و شاخص محیط‌زیستی در مدیریت مصرف کودهای فسفاتی. نشریه علمی ترویجی مدیریت اراضی. جلد ۷. شماره ۱. صفحه ۹۶ - ۸۷.
- حاجی بلند، رقیه، آقازاده، شیوا و رادپور، الناز. (۱۳۹۳). تفاوت در جذب و بهره‌وری فسفر در دو رقم گیاه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* Mill.). علوم زیستی گیاهی، ۶(۲۱)، ۵۳-۷۰.
- خلیلی‌راد، راضیه و میرسید حسینی، حسین (۱۳۹۵). بررسی برخی از ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه و شاخص‌های کارایی در تعدادی از ارقام فسفرکارا و ناکارای گندم. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار. ۶(۳)، ۸۲ - ۶۵.
- فیضی اصل، ولی، فتوت، امیر، آستارایی، علیرضا و لکزیان، امیر. (۱۳۹۳). تاثیر مقادیر و زمان مصرف نیتروژن بر برخی ویژگی‌های ریشه ژنوتیپ‌های مختلف گندم دیم. زراعت دیم ایران، ۳(۱)، ۴۰-۶۰.
- چمنی محمص، فاطمه، سلوکی محمود، قره یاضی بهزاد، فرشاد فاطمه، فهمیده لیلا، غفاری اکرم و همکاران (۱۳۹۶). جداسازی و آنالیز عملکرد ژن افزایش جذب فسفر (*PSTOL1*) از گونه وحشی برنج. مهندسی ژنتیک و ایمنی زیستی. ۶(۱): ۱-۱۰.
- کاوسی. مسعود، شهیدی، عباس. و رضوی‌پور، تیمور. (۱۳۹۱). عناصر غذایی خاک و تغذیه گیاه برنج. دفتر خدمات تکنولوژی آموزش سازمان جهاد کشاورزی. ۹۰ صفحه.

REFERENCES

- Böhm, W. (2012). Methods of studying root systems (Vol. 33). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-67282-8>
- Chamani Mohasses F, Soluki M, Ghareyazie B, Farshad F, Fahmideh L, Ghafari A et al. (2017) Isolation and functional analysis of PSTOL1 from wild species of rice. *Genetic Engineering and Biosafety Journal*; 6 (1): 1-10. (In Persian). https://gebsj.ir/index.php?slc_lang=en&sid=1
- FAO. (2018). Rice market monitor (Vol. XVI). Trade and Markets Division. Rome, Italy. <https://www.fao.org/markets-and-trade/commodities/rice/rmm/en/>
- Feiziasl, V., Fotovat, A., Astaraeiand, A., & Lakzyan, A. (2014). Effects of nitrogen fertilizer rates and application time on root characteristics of dryland wheat genotypes. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 3(1), 40-60. (In Persian) doi: 10.22092/idaj.2014.100555
- Hajiboland, R., Aghazadeh, S., & Radpour, E. (2014). Differences in phosphorus absorption and utilization in two tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivars. *Journal of Plant Biological Sciences*, 6(21), 53-70. (In Persian) DOI: 20.1001.1.20088264.1393.6.21.6.1
- Irfan, M., Aziz, T., Maqsood, M. A., Bilal, H. M., Khan, W. U. D., & Rasheed, N. (2019). Differential performance of lowland rice cultivars for phosphorus uptake and utilization efficiency under hydroponic

- and soil conditions. *International Journal of Agriculture and Biology*, 21(3), 703-710. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20203430308>
- Irfan, M., Aziz, T., Maqsood, M. A., Bilal, H. M., Siddique, K. H., & Xu, M. (2020). Phosphorus (P) use efficiency in rice is linked to tissue-specific biomass and P allocation patterns. *Scientific Reports*, 10(1), <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61147-3>
- Jiang HuiMin, J. H., Yang JunCheng, Y. J., Zhang JianFeng, Z. J., & Hou YanNan, H. Y. (2010). Screening of tolerant maize genotypes in the low phosphorus field soil. Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world, Brisbane, Australia. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20113314666>
- Julia, C., Wissuwa, M., Kretschmar, T., Jeong, K., & Rose, T. (2016). Phosphorus uptake, partitioning and redistribution during grain filling in rice. *Annals of botany*, 118(6), 1151-1162. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw164>
- Kant, J., Ishizaki, T., Pariasca-Tanaka, J., Rose, T., Wissuwa, M., Watt, M., Shah, F., Khan, H., & Iqbal, A. (2016). Phosphorus efficient phenotype of rice. *Rice Crop-Current Developments*, 8, 131-148. <https://juser.fz-juelich.de/record/844134/>
- Kavousi, M., Shahdi, A and Razavipour, T. (2012). Soil nutrients and rice plant nutrition. *Agricultural Jihad Organization Technology Education Services Office*. 90 pages. (InPersian). https://agrilib.areeo.ac.ir/book_1032.pdf
- Khalilirad, R and Mirseyedhossein, H. (2017). Study of some root morphological characteristics and efficiency indices in a number of phosphorus-efficient and phosphorus-inefficient wheat cultivars. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 6(3), 65-82. (In Persian). <https://ejsms.gau.ac.ir/>
- Lynch, J. P. (2013). Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Annals of Botany*, 112(2), 347-357. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs293>
- Lynch, J. P., Miguel, M. A., Postma, J. A., & Miguel, M. A. (2015). Phene synergism between root hair length and basal root growth angle for phosphorus acquisition. *Plant Physiology*, 167(4), 1430-1439. <https://doi.org/10.1104/pp.15.00145>
- Ma, J., Chen, T., Lin, J., Fu, W., Feng, B., Li, G., Li, H., Li, J., Wu, Z., Tao, L., and Fu, G. (2021). Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Influence Rice Growth and Development by Regulating the Efficiency of Energy Production. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-316216/v1>
- Ma, J., Chen, T., C., Jie, L., Fu, W., Feng, B., Li, G., Li, H., Li, J., Wu, Z., Tao, L., and Fu, G. (2022). Functions of nitrogen, phosphorus and potassium in energy status and their influences on rice growth and development. *Rice Science*, 29(2), 166-178. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2022.01.005>
- Mehra, P., Pandey, B. K., & Giri, J. (2016). Comparative morphophysiological analyses and molecular profiling reveal Pi-efficient strategies of a traditional rice genotype. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1-16. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26779218/>
- Newman, E. I. (1966). A method of estimating the total length of root in a sample. *Journal of Applied Ecology*, 3, 139-145. <https://www.jstor.org/stable/2401670?origin=crossref>
- Passandideh, M. , M, M. , SH, K. and M, Z. (2019). Management of Phosphate Fertilizer Application based on Soil Test Analysis Results and Environmental Indicators. *Land Management Journal*, 7(1), 87-96. doi: 10.22092/lmj.2019.119504
- Sharma, L. K., Zaeen, A. A., Bali, S. K., & Dwyer, J. D. (2017). Improving nitrogen and phosphorus efficiency for optimal plant growth and yield. *New Visions in Plant Science*, 13-40. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.72214>
- Wang, X., Jibing, X., & Zhenli, H. (2020). Activated dolomite phosphate rock fertilizers to reduce leaching of phosphorus and trace metals as compared to superphosphate. *Journal of Environmental Management*, 255, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109872>
- Wissuwa, M., Mori, A., Fukuda, T., Vejchasarn, P., Nestler, J., & Pariasca-Tanaka, J. (2016). The role of root size versus root efficiency in phosphorus acquisition in rice. *Journal of Experimental Botany*, 67(4), 1179-1189. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv557>
- Wissuwa, M., Pariasca-Tanaka, J., Vandamme, E., Mori, A., Segda, Z., Saito, K., & Rose, T. J. (2015). Does reducing seed-P concentrations affect seedling vigor and grain yield of rice. *Plant and Soil*, 392(1), 253-266. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2460-2>
- Yadav, B. K., & Verma, A. (2012). Phosphate solubilization and mobilization in soil through soil microorganisms under arid ecosystems, the functioning of ecosystems. In: Ali, M. (Ed.), In Tech Open. ISBN: 978-953-51-0573-2. https://scholar.google.com/scholar?cluster=12041889509509771654&hl=fa&as_sdt=0,5



- Yang, J., Deng, Y., Men, C., Qiao, S., Wang, W., Gu, J., Liu, L., Zhang, Z., Zhang, H., & Wang, Z. (2019). Tolerance to low phosphorus in rice varieties is conferred by regulation of root growth. *The Crop Journal*, 8(4), 534-547. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.01.002>
- Zhang, S., Ibrahim, K., Wang, Q., Wang, L., Zhang, W., & Peng, C. (2007). Determining the optimum level of soil Olsen phosphorus and phosphorus fertilizer application for high phosphorus-use efficiency in rice in Black Soil. *Sustainability*, 13(11), 59-83. <https://doi.org/10.3390/su13115983>