J. Soil and Plant Interactions, Vol. 14, No. 3, Fall 2023, pp. 1-19. **Research Article**

https://jspi.iut.ac.ir EISSN: 2783-5286 https://doi.org/10.47176/jspi.14.3.21011

Phosphorus Efficiency of Sirvan and Sivand Wheat Cultivars Under Drought Stress Conditions in a Calcareous Soil

M. Moosavi[1], R. Khorassani[1*] and R. Tavakkol Afshari[2]

(Received: 9 May 2023; Accepted: 15 July 2023)

Abstract

Phosphorus deficiency and drought stress are limiting factors in wheat yield. Drought stress has different effects on the uptake, utilization and use efficiency of soil phosphorus in wheat cultivars. The purpose of this study is to investigate the response of growth and development, uptake and efficiency of phosphorus in Sirvan and Sivand wheat cultivars at three moisture stress levels of 50, 70 and 95% of soil field capacity (FC) and two phosphorus levels of 0 and 25 mg kg^{-1}. The results showed that addition of phosphorus increased shoot dry weight, phosphorus utilization efficiency, root length and area, and soluble sugars by 42, 61, 84, 47, and 66%, respectively, and decreased electrolyte leakage by 64% under stress conditions of 50%FC. Besides, the phosphorus application of 25 mg kg^{-1} under drought stress conditions of 50%FC increased the shoot dry weight of the Sirvan variety by 75% compared to the Sivand variety. This increase can be due to the effect of phosphorus on metabolic activities inside the plant, which has led to an increase in root growth, soluble sugar production and cell wall resistance, and a decrease in electrolyte leakage. Therefore, the positive changes observed in different traits and indices due to the use of phosphorus increased the resistance of the Sirvan cultivar compared to Sivand under drought stress conditions. According to the results of phosphorus efficiency and some root morphological and physiobiochemical characteristics, Sirvan cultivar showed a good response to phosphorus fertilizer in modulating the effect of drought stress.

Keywords: Moisture stress, Phosphorus uptake, Phosphorus use efficiency, Plant dry matter.

Background and Objective: Drought is one of the most widespread abiotic stresses which has a negative effect on the growth and yield of plants in most areas of the world. Drought stress reduces plant yield by decreasing the uptake of water and nutrients. The arid and semi-arid climate conditions of Iran have caused many problems in the production of plants, including wheat (*Triticum aesivum* L.). Phosphorus, as one of the essential nutritional elements for plants, can be effective in alleviating drought stress (Kang et al., 2014). In recent years, the use of plants and cultivars efficient in uptake nutrients, including phosphorus, as an appropriate strategy to increase crop yield in water-limited environments has been the focus of researchers. Phosphorous efficient cultivars are important due to their special physiological and morphological characteristics in drought stress conditions (Neji et al., 2019). Therefore, it is necessary to pay attention to

1- Department of Soil Science, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad.
2- Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad.
* Corresponding author, Email: khorasani@um.ac.ir

the mechanism of efficient cultivars against drought stress for accurate fertilizer recommendations.

Methods: To evaluate Sirvan and Sivand wheat cultivars, in phosphorus uptake and efficiency and growth and development at different levels of moisture stress and phosphorus, a factorial experiment was performed based on a completely randomized design with three factors and three replications during the vegetative growth period in the greenhouse. The factors included phosphorus from $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ (0, and 25 mg P kg $soil^{-1}$), three moisture regimes including 50, 70 and 95% of field capacity (FC) and two spring wheat varieties (*Triticum aesivum* L.) of Sivand as a drought-sensitive variety and Sirvan as a drought-resistant variety.

Results: According to the results, it was observed that the application of phosphorus (25 mg kg^{-1}) was effective on the growth and development of the studied wheat cultivars under non-stress and drought stress conditions. Application of phosphorus increased shoot dry weight, phosphorus utilization efficiency, root length and area, and soluble sugars by 42, 61, 84, 47, and 66%, respectively, and decreased electrolyte leakage by 64% under drought stress conditions of 50%FC. Also, the phosphorus application of 25 mg kg^{-1} under drought stress conditions of 50%FC increased the shoot dry weight of Sirvan variety by 75% compared to Sivand variety. This finding can be due to higher root growth and its characteristics (root area and cumulative length), uptake and utilization of soil phosphorus and physiobiochemical characteristics in Sirvan variety. The application of phosphorus with a positive effect on the growth and development of the Sirvan variety in the vegetative growth stage made it adapt to drought stress conditions.

Conclusions: The application of phosphorus at the level of 25 mg kg^{-1} under drought stress conditions increased the shoot dry weight, root area and length, phosphorus uptake and efficiency, and soluble sugars and decreased electrolyte leakage. These changes were more noticeable in Sirvan variety. The use efficiency of phosphorus in the stages of vegetative growth can play an important role in determining the resistance of cultivars to drought stress. It is considered a good feature for a suitable fertilizer recommendation in order to improve the yield of agricultural products. Also, using the appropriate level of phosphorus can play an effective role in the efficiency of drought-resistant cultivars.

References:

1. Kang, L.y., Yue, S.C., Li, S.Q., 2014. Effects of phosphorus application in different soil layers on root growth, yield, and water-use efficiency of winter wheat grown under semi-arid conditions. J. Integr. Agric. 13(9), 2028–2039. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60751-6.

2. Neji, M., Kouas, S., Gandour, M., Aydi, S., Abdelly, C., 2019. Genetic variability of morpho-physiological response to phosphorus deficiency in Tunisian populations of Brachypodium hybridum. Plant Physiol. Biochem. 143, 246–256. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.09.006.

روابط خاک و گیاه/ سال چهاردهم / شماره سوم / پاییز ۱۴۰۲ / صفحات ۱۹-۱
https://doi.org/10.47176/jspi.14.3.21011 EISSN: 2783-5286 https://jspi.iut.ac.ir
مقاله پژوهشی

کارایی فسفر ارقام گندم سیروان و سیوند در شرایط تنش خشکی در یک خاک آهکی

مریم موسوی[۱]، رضا خراسانی[۱*] و رضا توکل افشاری[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۲۴)

چکیده

کمبود فسفر و تنش خشکی از عوامل محدودکننده در عملکرد گندم است. تنش خشکی آثار متفاوتی بر کارایی‌های جذب، مصرف و استفاده فسفر خاک در ارقام گندم می‌گذارد. هدف از این پژوهش بررسی پاسخ رشد و نمو، جذب و کارایی فسفر در ارقام گندم سیروان و سیوند در سه سطح تنش رطوبتی ۵۰، ۷۰ و ۹۵ درصد گنجایش مزرعه خاک و دو سطح فسفر ۰ و ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود. نتایج نشان داد که کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد گنجایش مزرعه وزن خشک شاخساره، کارایی مصرف فسفر، طول و سطح ریشه و قندهای محلول کل را به‌ترتیب ۴۲، ۶۱، ۸۴، ۴۷ و ۶۶ درصد افزایش داده و نشت الکترولیت را به میزان ۶۴ درصد کاهش داد. هم‌چنین افزودن فسفر به مقدار ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در شرایط تنش خشکی (۵۰ درصد گنجایش مزرعه)، وزن خشک شاخساره را در رقم سیروان ۷۵ درصد نسبت به رقم سیوند افزایش داد. این افزایش می‌تواند به دلیل تأثیر فسفر در فعالیت‌های سوخت‌وساز درون گیاه باشد که منجر به افزایش رشد ریشه، تولید قندهای محلول و مقاومت دیواره سلولی و کاهش نشت الکترولیت شده است. بنابراین تغییرات مثبت مشاهده شده در اثر استفاده فسفر در شاخص‌های مختلف باعث افزایش مقاومت رقم سیروان نسبت به سیوند در شرایط تنش خشکی شد. با توجه به نتایج کارایی‌های فسفر و برخی ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه و فیزیوبیوشیمیایی، رقم سیروان توانست پاسخ خوبی نسبت به کود فسفر در تعدیل اثر تنش خشکی نشان دهد.

واژه‌های کلیدی: تنش رطوبتی، جذب فسفر، کارایی استفاده فسفر، ماده خشک گیاهی.

مقدمه

طی سال‌های اخیر در سرتاسر جهان، کاهش بارندگی میزان تولید گندم را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است. در شرایط تنش خشکی، جذب عناصر غذایی دچار تغییر و اختلال می‌شود. پژوهشگران عقیده دارند با مدیریت تغذیه‌ای مناسب می‌توان تا حد زیادی آثار منفی خشکی را تعدیل کرد (da Silva et al., 2011; Zahoor et al., 2017; Salim and Reza, 2020). فسفر یکی از عناصر غذایی است که برای جبران صدمات ناشی از تنش خشکی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Jun et al., 2017; Tariq et al., 2017; Zhang et al., 2018).

۱- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: khorasani@um.ac.ir

در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمبود آب به دلیل خشکسالی‌های به‌وجود آمده، باعث کاهش تحرک فسفر در خاک و در نتیجه رشد گیاه شده است که می‌توان با تغییر در میزان توصیه کودی فسفر در شرایط تنش خشکی تا حدی در رشد و نمو گیاه بهبود ایجاد کرد (Kang et al., 2014; Zhang et al., 2018). مصرف زیاد کودهای فسفردار باعث آلودگی خاک و آب می‌شود و افزایش بی‌رویه این کودها در تولید گازهای گلخانه‌ای نیز نقش مؤثری دارند. بنابراین به‌منظور کاهش آثار منفی بر عملکرد اکوسیستم باید در مصرف کودهای فسفردار دقت شود (Salim and Raza, 2020; Gebremichael et al., 2022). از آن‌جایی‌که نیاز به فسفر گیاه گندم نسبت به سایر غلات بیش‌تر است، کارایی استفاده از کودهای فسفردار در کشت گندم اهمیت قابل توجهی پیدا می‌کند (Zhu et al., 2012; de Souza Campos et al., 2019). پژوهش‌ها نشان دادند که مدیریت و اصلاح ارقام گندم باعث افزایش کارایی جذب و مصرف فسفر در گیاه گندم شده و مصرف کودهای فسفاته را نیز کاهش می‌دهد (Campos et al., 2018)، بنابراین شناسایی و استفاده از ارقام کارا و مقاوم به شرایط کمبود فسفر می‌تواند یک راه‌کار مؤثر و مقرون به صرفه در سیستم‌های کشاورزی پایدار باشد (Sidhu et al., 2018). کارایی گیاهان در جذب فسفر با توجه به سیستم محیط کشت و چگونگی مدیریت زراعی اعمال‌شده متفاوت است (Ozturk et al., 2005; Kang et al ., 2014; Korkmaz and Altıntaş, 2016; Deng et al., 2018; Tariq et al., 2018). گیاهان فسفرکارا[1] به دلیل داشتن ویژگی‌های فیزیوبیوشیمیایی و مورفولوژیک خاص در شرایط خشکی از جمله تولید متابولیت‌های ثانویه، سنتز فنل و قندهای محلول، افزایش رشد ریشه (طول و سطح ریشه)، و تولید تارهای کشنده مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. بنابراین افزایش کارایی استفاده فسفر و شناسایی راه‌کارها و مسیرهایی که به افزایش آن در ارقام منتج می‌شود بسیار مهم است (Korkmaz and Altıntaş, 2016; Tariq et al., 2017; Bilal et al., 2018; Deng et al., 2018; Neji et al., 2019). برخی از پژوهشگران نشان دادند که دو نکته در کاربرد میزان مناسب کودهای فسفردار در کشت گیاه گندم مورد اهمیت است که عبارتند از: ۱- افزایش فسفر قابل استفاده[2] و ۲- افزایش کارایی جذب، مصرف و استفاده فسفر (Ortiz-Monasterio et al., 2002; Zhu et al., 2012; Kang et al., 2014; Bilal et al., 2018; Zhang et al., 2018). ارقام فسفر کارا برای اهداف مختلف از جمله افزایش در جذب عناصر غذایی، کاهش آثار تنش خشکی، و تغییر در ویژگی‌های موفولوژیک ریشه، کارایی متفاوتی دارند و معیارهایی که در انتخاب این ارقام به‌کار می‌روند با توجه به اهداف ذکرشده، شرایط محیط رشد، نوع گیاه و رقم، نیاز آن‌ها به فسفر متفاوت می‌باشند (Korkmaz and Altıntaş, 2016; Ding et al., 2017; Bilal et al., 2018; Deng et al., 2018; Neji et al., 2019). تعاریف و مفاهیم متفاوتی برای کارایی فسفر وجود دارد. کارایی استفاده فسفر[3] ترکیبی از کارایی جذب[4] و کارایی مصرف فسفر[5] (مصرف بهینه از فسفر درون گیاه) است که باعث رشد و توسعه گیاه می‌شود (Gourley et al., 1993; Sandaña, 2016). بهبود در کارایی جذب و مصرف باعث افزایش کارایی استفاده فسفر در گیاهان می‌شود (Moll et al., 1982; Wang et al., 2010; Sandaña, 2016). کارایی جذب و مصرف در تولید ماده خشک اهمیت دارد و هم‌چنین ویژگی های فیزیوبیوشیمیایی و مورفولوژیک گیاه از جمله رشد ریشه نقش مؤثری در کارایی جذب و مصرف فسفر دارد (Wang et al., 2010). افزایش کارایی‌های جذب و مصرف فسفر می‌توانند در افزایش عملکرد گیاه نقش داشته باشند (Ortiz-Monasterio et al., 2002). تفاوت در توانایی‌های گیاهان فسفر کارا در جذب و استفاده از فسفر خاک حداقل به دلیل وجود سه مشخصه است: ۱- توانایی فیزیولوژیک برای جذب فسفر از خاک، ۲- فعالیت‌های سوخت و ساز گیاه که منجر به افزایش حلالیت فسفر می‌گردد و ۳- توانایی سیستم ریشه در توزیع

1. Phosphorus efficient plants

2. Available phosphorus
3. Phosphorus use efficiency (PUE)
4. Phosphorus uptake efficiency (PUpE)
5. Phosphorus utilization efficiency (PUtE)

گسترده در خاک (Hinsinger et al., 2011). معماری ریشه به‌عنوان یکی از ویژگی‌های مهم گیاه برای سازگاری با محیط خاک محسوب می‌شود که گیاهان را قادر می‌سازد با کمبود عناصرغذایی مقابله کنند. افزودن فسفر به خاک‌های با کمبود فسفر باعث گسترش سیستم ریشه گیاه می‌شود که این امر دسترسی گیاه به آب و عناصرغذایی به‌ویژه در شرایط آب و هوای خشک و نیمه‌خشک را بیش‌تر می‌کند (Kang et al., 2014; Razaq et al., 2017)؛ هم‌چنین پژوهش‌ها نشان دادند که پاسخ برخی گیاهان به کمبود فسفر ایجاد تغییرات مورفوفیزیولوژیک (از جمله افزایش و توسعه ریشه، تارهای کشنده، طول، سطح، و نسبت ریشه به شاخساره) است که باعث افزایش جذب و کارایی فسفر می‌شوند (Mori et al., 2016; Deng et al., 2018;de Souza Campos et al., 2019). میزان وزن خشک گیاه می‌تواند مبنایی برای تعیین پاسخ‌های فیزیولوژیک به شرایط محیطی و فرآیندهای رشدی مورد توجه قرار گیرد و شاخص خوبی برای عملکرد نهایی باشد. بنابراین اختلاف در وزن خشک شاخساره به‌عنوان معیار قابل قبول و مورد اعتماد برای ارقام مقاوم و کارا به کمبود فسفر اهمیت بسزایی دارد (Abbadi, 2017). از آن‌جایی که فراهمی فسفر برای گیاه با رطوبت خاک در ارتباط است، بنابراین تنش خشکی می‌تواند باعث افزایش کمبود فسفر در گیاه شود (Kang et al., 2014). هم‌چنین کمبود فسفر با کاهش رشد و توسعه برگ و هدایت روزنه‌ها منجر به کاهش میزان فتوسنتز در گیاه می‌شود و در نتیجه آثار نامطلوبی بر رشد و عملکرد گیاهان به ویژه گندم می‌گذارد. درصورتی‌که پژوهش‌ها نشان دادند که کاربرد فسفر در شرایط خشکی با بهبود در ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیوبیوشیمیایی باعث افزایش رشد گیاه می‌شود. هم‌چنین ویژگی‌های خاکی و گیاهی در مقاومت به کمبود فسفر و تنش خشکی در گیاهان نقش مؤثری دارند (Tariq et al., 2017, 2018). پژوهش‌ها نشان دادند که ویژگی-های خاک از جمله بافت، میزان رس و pH و شاخص‌های گیاهی از جمله طول و سطح ریشه باعث تغییر در میزان جذب فسفر توسط گیاه می‌شوند (Korkmaz and Altıntaş, 2016; Abbadi, 2017). با توجه به نتایج پژوهشگران مختلف در همین راستا، مشاهده شد که کاربرد کود فسفر در شرایط تنش خشکی غالباً از طریق افزایش طول و سطح ریشه باعث بهبود رشد و نمو در ارقام گندم می‌شود (Zhu et al., 2012; Kang et al., 2014; Deng et al., 2018).

سؤالی که در این پژوهش مورد کنکاش قرار می‌گیرد این است که آیا کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی می‌تواند آثار ناشی از خشکی را تعدیل کند و وضعیت گیاه را بهبود بخشید؟، هم‌چنین جذب و کارایی فسفر به چه میزان در کاهش تنش خشکی در ارقام گندم مؤثر است؟. در پژوهش‌های انجام شده بر روی ارقام سیروان (مقاوم به خشکی) و سیوند (حساس به خشکی) به ویژگی‌ها و عملکرد این ارقام در آخر فصل اشاره شده است (Seed and Plant Breeding Research Institute, 2015) و کم‌تر مکانیسم‌های مورفولوژیک و فیزیوبیوشیمیایی، جذب و کارایی فسفر در شرایط تنش خشکی و مرحله رشد رویشی بررسی شده است. به همین منظور این پژوهش با هدف بررسی پاسخ این دو رقم گندم به تنش خشکی در حضور فسفر و ارزیابی ویژگی‌های رشدی، جذب و کارایی فسفر و تأثیر آن‌ها بر تعدیل تنش خشکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در گلخانه پژوهشی واقع در دانشکده کشاورزی در دانشگاه فردوسی مشهد به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه فاکتور و سه تکرار در طی دوره رشد رویشی بر روی گیاه گندم انجام شد. فاکتورها شامل ارقام گندم بهاره[1] سیروان به‌عنوان رقم مقاوم به خشکی (C2) و سیوند به‌عنوان رقم حساس به خشکی (C1)، فسفر از منبع منو کلسیم فسفات منوهیدرات[2] به میزان ۰ (P0) و ۲۵ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک (P1) و سه رژیم رطوبتی شامل ۵۰، ۷۰ و ۹۵

1. *Triticum aesivum* L.
2. $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$

درصد گنجایش مزرعه (T0, T1 , T2) بود. در این آزمایش پس از جمع‌آوری خاک از لایه ۳۰-۰ سانتی‌متری محوطه دانشگاه فردوسی مشهد با مشخصات جغرافیایی 36°18'19"N, 59°31'41"E و هوا-خشک کردن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. سپس بافت و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش قرار گرفت (جدول ۱). اندازه‌گیری ویژگی-های خاک گزارش شده در جدول (۱) بر اساس روش‌های استاندارد تجزیه خاک انجام شد. گنجایش مزرعه (FC) نیز با استفاده از دستگاه صفحه فشار تعیین شد (Black et al., 1965; Page et al., 1982). بذرهای ارقام گندم مورد نظر (سیروان و سیوند) از مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان رضوی، بخش نهال و بذر تهیه شدند؛ میزان فسفر بذر ارقام سیروان و سیوند به ترتیب برابر ۰/۴۰ و ۰/۲۴ درصد بود. پس از بررسی درصد و سرعت جوانه‌زنی بذرها در ژرمیناتور بذرهای سالم و هم‌اندازه انتخاب شدند. بذرها با محلول هیپوکلریت سدیم ۵ درصد (v/v) به‌مدت ۴ دقیقه ضدعفونی شده و پس از شستشو با آب مقطر به گلدان‌های پلاستیکی محتوی خاک به میزان ۵ کیلوگرم منتقل شدند. عناصر غذایی شامل نیتروژن از منبع نیترات آمونیوم به میزان ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم به میزان ۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، آهن از منبع سکوسترین (Fe-EDDHA) (۶ درصد آهن) به میزان ۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و روی از منبع سولفات روی به میزان ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم (میزان اولیه روی و آهن قابل استخراج با DTPA در خاک به‌ترتیب ۰/۴ و ۲/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) پیش از کشت به خاک هر گلدان افزوده شد. عناصر نیتروژن، پتاسیم، روی و آهن بر اساس آزمون خاک به مقدار ثابت به تمام گلدان‌ها داده شد (Atarodi et al., 2018; Zandi Gouharrizi et al., 2021). در هر گلدان، ۱۰ بذر در عمق ۲ سانتی‌متری خاک کاشته شد. شرایط کنترل شده گلخانه شامل دامنه تغییرات دمای روز و شب به‌ترتیب ۳۲ و ۲۲ درجه سلسیوس، میزان رطوبت نسبی ۳۱ تا ۶۱ درصد و طول مدت روز و شب به‌ترتیب ۱۴ و ۱۰ ساعت بود. تا زمان سبز شدن بذرها، رطوبت خاک گلدان‌ها با آب مقطر در حدود FC نگه‌داری شد. پس از ظهور گیاهچه‌ها برای حفظ تراکم مطلوب تعداد گیاهان به ۴ گیاهچه کاهش یافت. حدود یک هفته پس از رشد گیاهچه‌ها با توزین روزانه گلدان‌ها با توجه به FC، سطوح تنش خشکی با آب مقطر به روش وزنی اعمال شد. برای جلوگیری از تاثیر نایکنواختی شرایط محیطی و آثار حاشیه‌ای، گلدان‌ها هر ۵ روز بر اساس یک الگوی مشخص در طی آزمایش جابجا شدند.

تعیین شاخص‌های گیاهی

گیاهان ۶۹ روز پس از زمان کشت و در پایان مرحله رشد رویشی برداشت شدند. سپس وزن خشک و تازه، صفات مورفولوژیک، غلظت، جذب و کارایی فسفر در شاخساره و ریشه گیاهان اندازه‌گیری شدند. پس از توزین ریشه‌ها، سطح و طول ریشه‌ها با دستگاه اسکنر ریشه Delta-T و نرم‌افزار WinRHIZO (مدل: V5.0, Regent Instruments, Quebec Canada) تعیین شدند (Deng et al., 2018; Neji et al., 2019). عصاره‌گیری نمونه‌ها به روش هضم خشک انجام شد (Shabani et al., 2018; Karimzadeh et al., 2021) و غلظت فسفر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر با روش وانادیوم مولیبدات اندازه‌گیری شد (Chapman and Pratt, 1961). هم‌چنین غلظت فسفر قابل استفاده در عصاره‌های محلول خاک نیز به روش اولسن اندازه‌گیری شد (Olsen, 1954). جذب فسفر (Jun et al., 2017; Deng et al., 2018; Karimzadeh et al., 2021)، کارایی‌های مصرف (Osborne and Rengel, 2002; Bilal et al., 2018; Deng et al., 2018; Neji et al., 2019)، جذب و استفاده فسفر در شاخساره (Moll et al., 1982) با استفاده از روابط زیر محاسبه گردید:

$$\mathrm{Uptake}\left(\mathrm{mg}\right)=\mathrm{CP}\left(\mathrm{mg\,kg^{-1}}\right)\times\mathrm{SDW}\left(\mathrm{kg}\right) \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، Uptake، جذب، SDW، وزن خشک شاخساره و CP، غلظت فسفر شاخساره است.

$$\mathrm{PUtE}\left(\mathrm{kg}\right)=\frac{\mathrm{SDW}\left(\mathrm{mg}\right)}{\mathrm{CP}\left(\mathrm{mg\,kg^{-1}}\right)} \qquad (۲)$$

جدول۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده.

Table 1. Some physical and chemical properties of the studied soil.

بافت	گنجایش مزرعه	شن	رس	سیلت		کربن آلی	نیتروژن	فسفر قابل استفاده	پتاسیم قابل استفاده	کربنات کلسیم معادل	رسانایی الکتریکی عصاره اشباع
Texture	Field capacity (%w/w)	Sand (%)	Clay (%)	Silt (%)	pH (soil:water, 1:2.5)	Organic carbon (%)	Nitrogen (%)	Available phosphorus (mg kg^{-1})	Available potassium (mg kg^{-1})	Calcium carbonate equivalent (%)	Electrical conductivity of saturated extract (dS m^{-1})
لوم رسی Clay loam	19.0	25.4	25.3	49.3	8.13	0.35	0.07	8.57	147.5	13.8	1.46

در رابطه (۲)، PUtE، کارایی مصرف فسفر است.

$$\mathrm{PUpE}=\frac{\mathrm{CP}\left(\mathrm{mg\ kg^{-1}}\right)}{\mathrm{Nt}\left(\mathrm{mg\ kg^{-1}}\right)} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، PUpE، کارایی جذب فسفر و Nt، غلظت فسفر خاک است.

$$\mathrm{PUE\ (kg)} = \mathrm{P\ uptake\ efficiency\ (PUpE)} \times \mathrm{P\ utilization\ efficiency\ (PUtE)(kg)} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، کارایی استفاده فسفر (PUE) از حاصل‌ضرب کارایی‌های مصرف (PUtE) و جذب (PUpE) فسفر محاسبه شد.

غلظت قند محلول کل در برگ به روش فنل- سولفوریک در طول موج ۴۸۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Dubois et al., 1956). برای اندازه‌گیری نشت الکترولیت (EL) از برگ‌های پرچمی استفاده شد و EL بر اساس رابطه زیر محاسبه شد (Jambunathan et al., 2010):

$$\mathrm{EL\ \%}=\frac{\mathrm{R1:\ EC\left(before\ autoclaving\right)}}{\mathrm{R2:\ EC\left(after\ autoclaving\right)}}\times 100 \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، R1، میزان رسانایی الکتریکی نمونه‌ها پیش از اتوکلاو و R2، میزان رسانایی الکتریکی نمونه‌ها پس از اتوکلاو است.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با نرم‌افزار SAS انجام شده و برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. نمودارهای مربوطه با نرم‌افزار MS Excel رسم شدند.

نتایج

جدول تجزیه واریانس نشان داد که آثار رقم، فسفر و تنش خشکی در تمام ویژگی‌ها و شاخص‌های مورد بررسی به‌جزء کارایی جذب و کارایی استفاده فسفر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲).

۱- تأثیر فسفر و تنش خشکی بر وزن خشک شاخساره ارقام گندم

با توجه به نتایج این آزمایش برهم‌کنش فسفر و تنش خشکی، فسفر و رقم و رقم و تنش خشکی تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک شاخساره داشتند (جدول ۲). همان‌طور که در شکل (۱-الف) مشاهده می‌شود وزن خشک شاخساره تحت تأثیر کمبود فسفر و تنش خشکی کاهش یافت. درصورتی‌که کاربرد فسفر در سطح ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شرایط بدون تنش خشکی (سطح ۹۵ درصد) وزن خشک شاخساره را به میزان ۱۳/۱۵ گرم در گلدان افزایش داد. هم‌چنین کاربرد فسفر نیز در سطح تنش خشکی ۵۰ درصد باعث افزایش در وزن خشک شاخساره به میزان ۵/۳۰ گرم در گلدان در مقایسه با سطح بدون فسفر شد. با توجه به برهم‌کنش‌های فسفر و تنش خشکی، کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد، وزن خشک در شاخساره را ۴۲ درصد نسبت به سطح بدون فسفر در همین سطح تنش افزایش داد (شکل ۱-الف). هم‌چنین نتایج نشان داد که در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد، رقم سیروان نسبت به رقم سیوند وزن خشک بیش‌تری داشت (شکل۱-ب).

۲- تأثیر فسفر و تنش خشکی بر ویژگی‌های ریشه ارقام گندم

تغییرات سطح ریشه تحت تأثیر رقم و برهم‌کنش فسفر و تنش خشکی معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج آثار ساده نشان داد که میزان سطح ریشه در رقم سیروان ۲۲/۲۹ درصد در مقایسه با رقم سیوند بیش‌تر بود (میزان سطح ریشه رقم سیروان ۰/۱۸۱ و رقم سیوند ۰/۱۴۸ متر مربع) هم‌چنین بیش‌ترین میزان سطح ریشه در شرایط بدون تنش خشکی و کاربرد فسفر به میزان ۰/۲۸۹ متر مربع بود (شکل ۲-الف). کمبود فسفر و تشدید تنش خشکی (۵۰ درصد FC) باعث کاهش سطح ریشه به میزان ۰/۰۹۱ متر مربع شد، درصورتی‌که کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد FC، سطح ریشه را به میزان ۴۶/۱۵ درصد نسبت به سطح بدون کاربرد فسفر افزایش داد (شکل ۲-الف).

تأثیر برهم‌کنش‌های فسفر و تنش خشکی، رقم و تنش

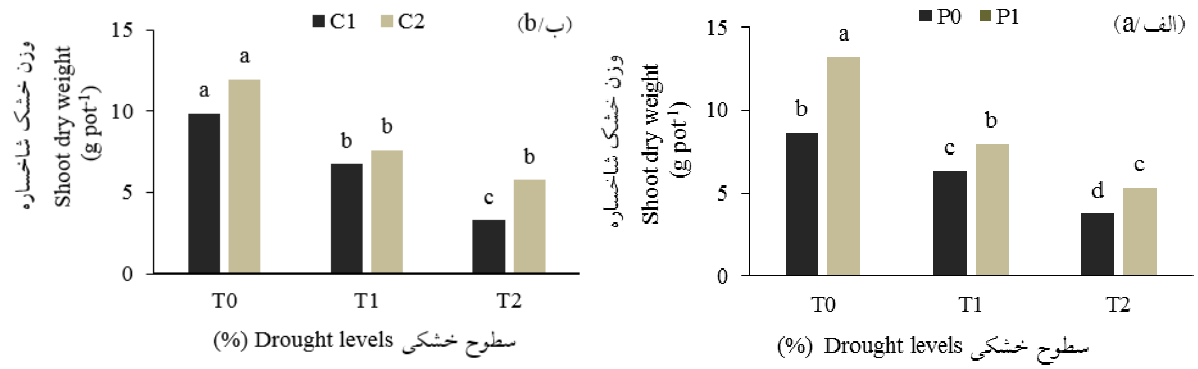
جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس تأثیر رقم، تنش خشکی، فسفر و برهمکنش آنها بر ویژگی‌های مورفولوژیک، جذب و کارایی فسفر در ارقام گندم

Table 2. The results of variance analysis of the effect of cultivar, drought stress, phosphorus and their interactions on morphological characteristics, uptake and efficiency of phosphorus in wheat cultivars..

منبع تغییرات	درجه آزدی	وزن خشک شاخساره	کارایی مصرف فسفر	کارایی جذب فسفر	کارایی استفاده فسفر	جذب فسفر شاخساره	طول تجمعی ریشه	سطح ریشه
Source of variation	df	Shoot dry weight	P Utilization efficiency	P Uptake efficiency	P Use efficiency	P Shoot uptake	Root cumulative length	Root area
رقم (C) Cultivar	1	29.46^{**}	5.15^{**}	65.72^{ns}	137039.9^{**}	126.76^{**}	252005.67^{**}	0.0098^{**}
تنش خشکی (T) Drought Stress	2	123.01^{**}	7.36^{**}	5813.81^{**}	373680.8^{**}	1308.3^{**}	255248.85^{**}	0.0405^{**}
فسفر (P) Phosphorus	1	60.19^{**}	18.03^{**}	44368.85^{**}	4408.46^{ns}	196.38^{**}	424276.97^{**}	0.0381^{**}
P ×C	1	1.98^{*}	0.27^{ns}	641.46^{ns}	9666.95^{ns}	11.19^{ns}	1871.81^{ns}	0.0002^{ns}
T × C	2	2.18^{*}	0.04^{ns}	1925.32^{**}	2550.97^{ns}	43.46^{ns}	7861.02^{*}	0.0001^{ns}
T × P	2	8.59^{**}	0.58^{*}	1113.30^{*}	30461.6^{**}	$^{**}87.41$	40425.17^{**}	0.0076^{**}
P × T × C	2	0.30^{ns}	0.07^{ns}	279.87^{ns}	933.31^{ns}	0.06^{ns}	13162.71^{**}	0.0016^{ns}
Error		0.44	0.16	254.68	4786.28	12.88	2035.04	0.0005
٪CV		8.90	12.50	9.84	13.68	19.60	10.90	13.50

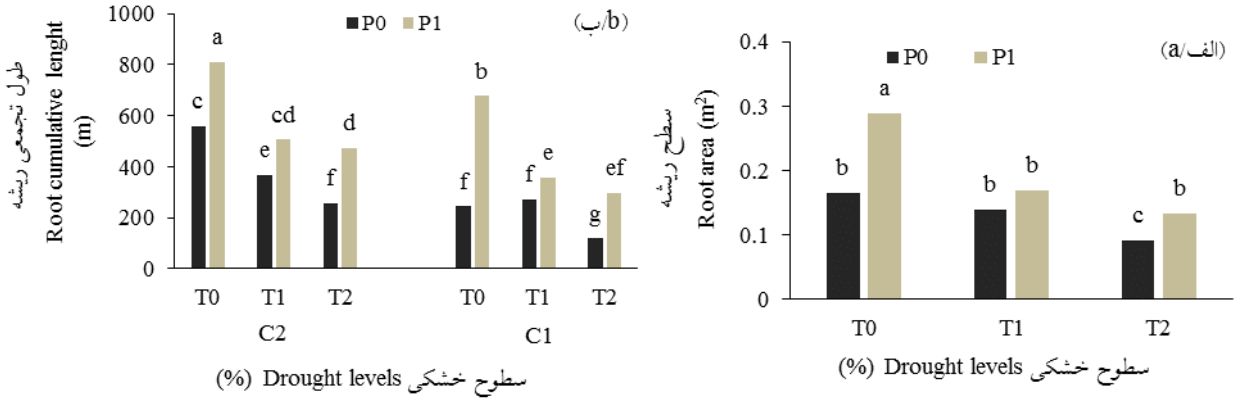
** و * به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال یک و پنج درصد

* and ** Significant at the 0.05 and 0.01 levels of probability, respectively



شکل ۱. تأثیر سطوح خشکی و فسفر (الف) و سطوح خشکی و رقم (ب) بر وزن خشک شاخساره

Fig. 1. Effect of drought levels and phosphorus (a) and drought level and cultivar (b) on shoot dry weight.
T0: 95%FC, T1: 70%FC, T2: 50%FC, P0: 0, P1: 25 mg kg^{-1}, C1: Sivand, C2: Sirvan.



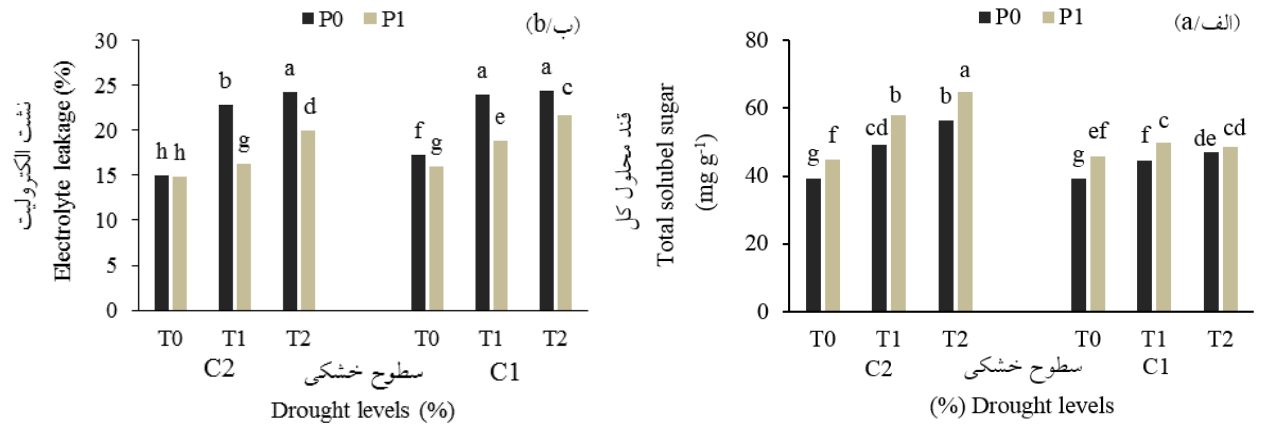
شکل ۲. تأثیر فسفر، رقم و تنش خشکی بر روی سطح ریشه (الف) و طول تجمعی ریشه (ب).

Fig. 2. Effect of phosphorus, cultivar and drought stress on root area (a) and cumulative root length (b).
T0: 95%FC, T1: 70%FC, T2: 50%FC, P0: 0, P1: 25 mg kg^{-1}, C1: Sivand, C2: Sirvan.

خشکی و فسفر، رقم و تنش خشکی بر طول تجمعی ریشه معنی‌دار بود (جدول ۲). همان‌طور که نتایج در شکل (۲–ب) نشان می‌دهد، کمبود فسفر و افزایش تنش خشکی (۵۰ و ۷۰ درصد FC)، طول ریشه را در رقم سیوند در مقایسه با رقم سیروان به‌ترتیب حدود ۱/۵ برابر و ۳۴ درصد کاهش داد. هم‌چنین بیش‌ترین طول تجمعی ریشه به میزان ۸۰۸/۲ میلی‌متر در سطح ۹۵ درصد FC به همراه کاربرد فسفر در رقم سیروان مشاهده شد. نتایج نشان داد که کاربرد فسفر در سطح تنش خشکی ۵۰ درصد FC، طول تجمعی ریشه رقم سیروان را به میزان ۸۴ درصد نسبت به بدون کاربرد فسفر در همین سطح تنش افزایش داده است (شکل ۲–ب). با توجه به نتایج مشاهده شد که کمبود فسفر و افزایش تنش خشکی تأثیر بیش‌تری در کاهش رشد (طول و سطح) ریشه رقم سیوند داشته است و هم‌چنین افزایش رشد ریشه در رقم سیروان می‌تواند از دلایل مقاومت آن در مقایسه با رقم سیوند باشد.

۳- تأثیر فسفر و تنش خشکی بر برخی از ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ارقام گندم

برهم‌کنش‌های دوگانه رقم و تنش و رقم و فسفر و برهم‌کنش سه گانه رقم، تنش و فسفر تأثیر معنی‌داری بر میزان قند محلول



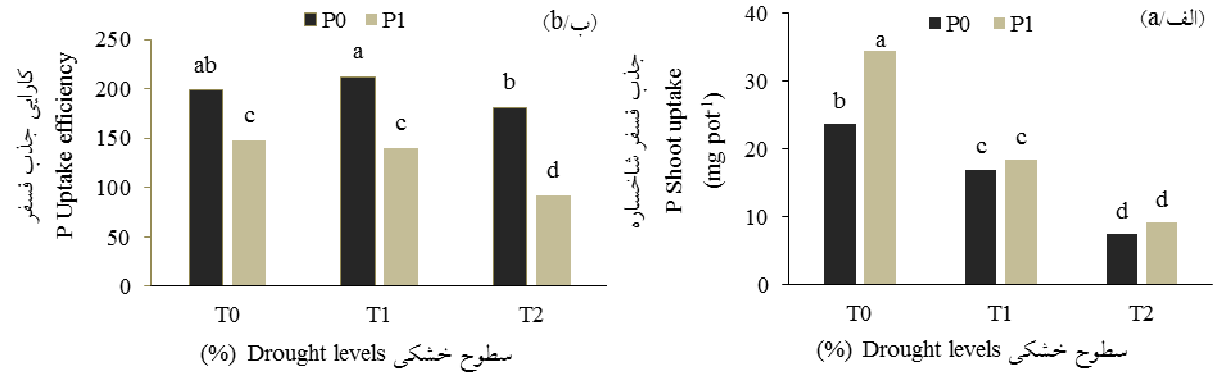
شکل ۳. تأثیر فسفر، رقم و تنش خشکی بر قند محلول کل (الف) و نشت الکترولیت (ب).

Fig. 3. Effect of phosphorus, cultivars and drought stress on total soluble sugar (a) and electrolyte leakage (b)
T0: 95%FC, T1: 70%FC, T2: 50%FC, P0: 0, P1: 25 mg kg^{-1}, C1: Sivand, C2: Sirvan.

کل داشتند. نتایج نشان داد که میزان قند محلول در رقم سیروان در شرایط تنش و بدون تنش خشکی به همراه کاربرد فسفر بیش‌تر از رقم سیوند بود. کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد FC، میزان قند محلول را در رقم سیروان به میزان ۳۳/۲۷ درصد نسبت به رقم سیوند افزایش داد. هم‌چنین نتایج نشان داد که کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد FC تأثیر بیش‌تری در افزایش میزان قند محلول رقم سیروان داشت (۶۴/۶۸ درصد نسبت به بدون کاربرد فسفر در شرایط بدون تنش خشکی) (شکل ۳-الف). تغییرات در میزان نشت الکترولیت تحت تأثیر برهم‌کنش‌های دوگانه تنش خشکی و فسفر و برهم‌کنش سه گانه رقم، تنش و فسفر معنی‌دار بود. با توجه به نتایج پژوهش حاضر مشاهده شد که کمبود فسفر و افزایش تنش خشکی ۵۰ درصد FC باعث افزایش نشت الکترولیت در رقم سیروان و سیوند به میزان ۲۴/۲ و ۲۴/۴ درصد شد. درصورتی‌که کاربرد فسفر بر روی ارقام سیروان و سیوند در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد FC، نشت الکترولیت را به میزان ۲۱ و ۱۲/۴۴ درصد نسبت به بدون کاربرد فسفر در همین سطح تنش کاهش داد (شکل ۳-ب). همان‌طور که نتایج نشان داد کاربرد فسفر در افزایش میزان قند محلول و کاهش نشت الکترولیت در رقم سیروان در مقایسه با رقم سیوند بیش‌تر بود که می‌تواند در افزایش مقاومت رقم سیروان در شرایط تنش خشکی نقش مؤثری داشته باشند.

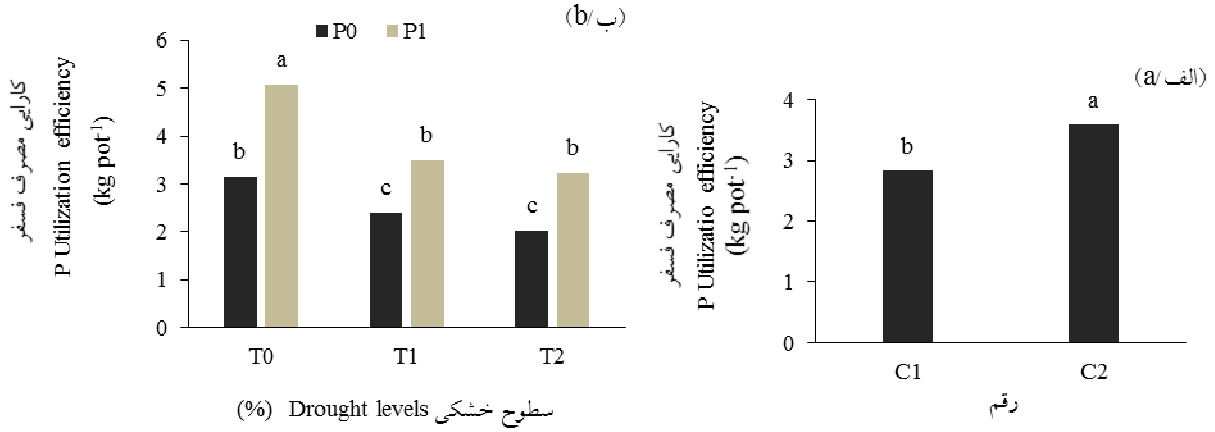
۴- تأثیر فسفر و تنش خشکی بر جذب و کارایی فسفر در ارقام گندم (کارایی جذب، مصرف و استفاده فسفر)

نتایج نشان داد که رقم و برهم‌کنش دوگانه تنش خشکی و فسفر تأثیر معنی‌داری بر میزان جذب فسفر شاخساره داشتند (جدول ۲). همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود جذب فسفر در شاخساره تحت تأثیر کمبود فسفر و تنش خشکی کاهش یافت (شکل ۴-الف). درصورتی‌که با افزایش سطح فسفر و کاهش تنش خشکی بیش‌ترین میزان جذب فسفر مشاهده گردید ولی کاربرد فسفر با افزایش تنش خشکی در سطح ۵۰ و ۷۰ درصد FC تأثیر معنی‌داری بر میزان جذب فسفر نداشت. کاربرد فسفر در شرایط بدون تنش خشکی (سطح ۹۵ درصد FC)، میزان جذب این عنصر در شاخساره را نسبت به سطح بدون کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد FC حدود چهار برابر افزایش داد (شکل ۴-الف). نتایج کارایی جذب فسفر نشان داد که این شاخص تحت تأثیر برهم‌کنش تنش خشکی و فسفر و برهم‌کنش تنش خشکی و رقم قرار گرفت (جدول ۲). نتایج در شکل (۴-ب) نشان داد که



شکل ۴. تأثیر فسفر و تنش خشکی بر جذب فسفر شاخساره (الف) و کارایی جذب فسفر (ب).

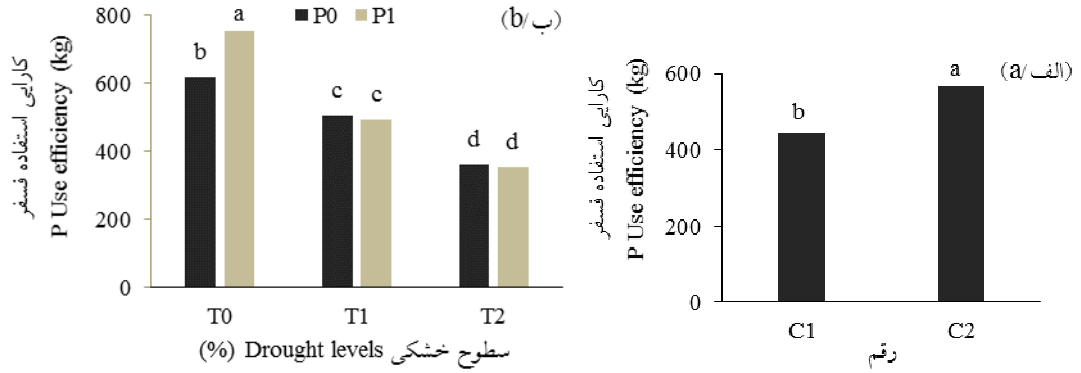
Fig. 4. Effect of phosphorus and drought stress on P shoot uptake (a) and uptake efficiency (b) T0: 95%FC, T1: 70%FC, T2: 50%FC, P0: 0, P1: 25 mg kg^{-1}.



شکل ۵. تأثیر رقم (الف) فسفر و تنش خشکی (ب) بر کارایی مصرف فسفر.

Fig. 5. Effect of cultivars (a) and phosphorus and drought stress (b) on P utilization efficiency. T0: 95%FC, T1: 70%FC, T2: 50%FC, P0: 0, P1: 25 mg kg^{-1}, C1: Sivand, C2: Sirvan.

بیش‌ترین کارایی جذب فسفر در سطح بدون تنش خشکی و بدون کاربرد فسفر مشاهده شد. با افزایش تنش خشکی (سطح ۵۰ درصد FC) و سطح فسفر، کارایی جذب فسفر به میزان ۶۰/۲۶ درصد در مقایسه با سطح کاربرد فسفر و بدون تنش خشکی کاهش یافت (شکل ۴- ب). کارایی مصرف فسفر تحت تأثیر رقم و برهم‌کنش تنش خشکی و فسفر قرار گرفت (جدول ۲). همان‌طور که نتایج مربوط به آثار ساده رقم نشان می‌دهد، بیش‌ترین کارایی مصرف در رقم سیروان مشاهده شده است (شکل ۵-الف). هم‌چنین مشاهده شد که بیش‌ترین کارایی مصرف در شرایط بدون تنش بود و کاربرد فسفر در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد FC، کارایی مصرف فسفر را ۶۰/۱۹ درصد نسبت به سطح بدون کاربرد فسفر در همین سطح تنش افزایش داد (شکل ۵-ب). همان‌طور که نتایج نشان داد جذب و کارایی مصرف فسفر در شرایط تنش خشکی بیش‌تر، کاهش یافت ولی این روند کاهشی در شاخص کارایی مصرف فسفر با شیب کم‌تری بود، این نتایج بیان‌گر اهمیت رطوبت در افزایش جذب و کارایی فسفر است ولی ارقام گندم مورد بررسی توانسته‌اند از میزان فسفر جذب شده بیش‌ترین استفاده را داشته باشند. نتایج مربوط به کارایی استفاده فسفر نشان داد که این شاخص تحت تأثیر رقم و برهم‌کنش فسفر و تنش



شکل ۶. تأثیر رقم (الف) فسفر و تنش خشکی (ب) بر کارایی استفاده فسفر.

Fig. 6. Effect of cultivars (a) and phosphorus and drought stress (b) on P use efficiency.
T0: 95%FC, T1: 70%FC, T2: 50%FC, P0: 0, P1: 25 mg kg^{-1}, C1: Sivand, C2: Sirvan.

خشکی قرار گرفته است (جدول ۲). نتایج آثار ساده تیمارها نشان داد که کارایی استفاده در رقم سیروان نسبت به رقم سیوند به میزان ۲۷/۸۰ درصد بیش‌تر بود (شکل ۶-الف). هم‌چنین همان‌طور که در نتایج شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود افزایش تنش خشکی باعث کاهش میزان کارایی استفاده فسفر شد.

بحث

تأثیر فسفر بر ارقام گندم در شرایط تنش خشکی و کمبود فسفر بستگی به زمان کاربرد، منبع و میزان فسفر، شدت تنش خشکی و نیاز گیاهان به فسفر دارد (Ozturk et al., 2005; Zhu et al., 2012; Kang et al., 2014; Deng et al., 2018; Zhang et al., 2018). در این پژوهش مشاهده شد که وزن خشک ارقام گندم در شرایط کمبود فسفر و تنش خشکی کاهش یافت. درحالی‌که کاربرد فسفر در شرایط ۵۰ درصد FC و بدون تنش خشکی در مقایسه با سطح بدون فسفر در همین سطوح رطوبتی به‌ترتیب به میزان ۴۲ و ۵۲ درصد باعث افزایش وزن خشک در ارقام گندم شد (شکل ۱-الف). نتایج بیان‌گر این مطلب است که فراهمی فسفر به‌شدت با رطوبت خاک در ارتباط است، بنابراین هنگامی که میزان مناسب رطوبت خاک در اختیار گیاه قرار گیرد رشد ریشه و پخشیدگی این عنصر از خاک به‌سمت ریشه افزایش می‌یابد که در نتیجه باعث افزایش وزن خشک می‌شود.

هم‌چنین با توجه به نقش مهمی که فسفر در افزایش میزان فتوسنتز، تقسیم و طویل شدن سلول‌ها و رشد ریشه دارد منجر به افزایش وزن خشک شده است. همان‌طور که در شکل (۱-ب) مشاهده می‌شود، وزن خشک رقم سیروان نسبت به رقم سیوند افزایش یافت که احتمالاً افزایش وزن خشک در رقم سیروان در شرایط تنش خشکی می‌تواند به دلیل افزایش رشد ریشه و سطح تماس بیش‌تر با ذرات خاک و جذب عناصر غذایی از جمله فسفر و در نتیجه استفاده بهینه این رقم از فسفر جذب شده باشد که با یافته‌های Razaq et al. (2017)، Tariq et al. (2018) و Neji et al. (2019) همخوانی دارد.

معماری سیستم ریشه یک ویژگی تکاملی است که نقش اساسی در سازگاری گیاه در بهروری جذب عناصر در شرایط تنش خشکی دارد. سیستم ریشه‌ای گسترده و عمیق یکی از ویژگی‌های ضروری برای تحمل به خشکی به‌منظور دسترسی به رطوبت خاک است (Duangpan et al., 2018; Ye et al., 2018; Neji et al., 2019). نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد فسفر باعث افزایش سطح و طول ریشه شد (شکل ۲). از آن‌جایی که فسفر در افزایش گنجایش کاتیون تبادلی[1] (CEC) ریشه و جذب عناصر غذایی نقش مؤثری دارد (Sharma et al., 2008) می‌تواند از دلایل افزایش رشد ریشه در ارقام گندم مورد

1. Cation exchange capacity

بررسی در این پژوهش باشد. هم‌چنین میزان طول ریشه در رقم سیروان در شرایط تنش خشکی نسبت به رقم سیوند بیش‌تر بود، درصورتی‌که با افزایش تنش خشکی به سطح ۵۰ درصد FC، رشد ریشه کاهش یافت ولی کاهش رشد ریشه در رقم سیروان کم‌تر بود. Mollier and Pellerin (1999) و Tariq et al. (2018) اشاره کردند که رشد ریشه در شرایط تنش خشکی تحت تأثیر میزان کربن گیاه است. کمبود فسفر در شرایط خشکی به دلیل تثبیت فسفر توسط ذرات خاک تأثیر منفی بر توسعه برگ و میزان فتوسنتز دارد، و در نتیجه میزان آن را کاهش می‌دهد. رشد ریشه گیاه در شرایط تنش خشکی و کمبود فسفر ابتدا افزایش جزئی دارد ولی در شرایط کمبود فسفر و تنش خشکی زیاد، پس از چند روز به دلیل کاهش میزان فتوسنتز و تولید کربوهیدرات‌ها رشد ریشه نیز کاهش می‌یابد که با یافته‌های پژوهش حاضر هماهنگی دارد. بنابراین ارقام مورد بررسی در این پژوهش برای کاهش صرف هزینه انرژی در شرایط تنش خشکی زیاد، افزایشی در رشد ریشه نشان ندادند. هم‌چنین یکی از سازوکارهای ارقام مقاوم به خشکی، تولید قند در برگ‌ها و انتقال آن به ریشه است که باعث افزایش رشد ریشه می‌شود (Du et al., 2020) که با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد. همان‌طور که در شکل (۳-الف) مشاهده شد افزایش میزان قند محلول در برگ و احتمالاً انتقال آن به ریشه می‌تواند از دلایل افزایش رشد ریشه در رقم سیروان به‌عنوان رقم مقاوم به خشکی باشد.

در این پژوهش مشاهده شد که کاربرد فسفر باعث افزایش میزان قند محلول کل و کاهش نشت الکترولیت در ارقام گندم شد (شکل ۳). پژوهش‌ها نشان دادند که فسفر نقش مؤثری در افزایش ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیک از جمله تولید قند محلول در گیاه دارد (Ding et al., 2017; Tariq et al., 2018). میزان قندهای محلول به‌عنوان محافظت‌کننده‌های اسمزی، نقش مهمی در افزایش مقاومت گیاهان در شرایط تنش خشکی داشته و تعیین این شاخص از صفات بیوشیمیایی خوبی در شناسایی مقاومت ارقام است (Du et al., 2020). همان‌طور که نتایج نشان داد رقم سیروان بیش‌ترین استفاده را از فسفر جذب شده در شرایط تنش خشکی داشته، بنابراین از فسفر در ویژگی‌های فیزیوبیوشیمیایی خود از جمله سنتز قند و کاهش نشت الکترولیت استفاده کرده و مقاومت خود را در این شرایط افزایش داده است. قندهای محلول در شرایط تنش خشکی با تنظیم اسمزی درون برگ از تعرق گیاه کاسته و با افزایش رشد ریشه و جذب آب باعث بهبود در رشد گیاه می‌شود (Serraj et al., 2002) که با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد. پژوهش‌ها نشان دادند که برخی عناصر غذایی از جمله فسفر منجر به کاهش نشت الکترولیت و افزایش پایداری غشاء در شرایط تنش خشکی می‌شوند؛ بنابراین کاربرد فسفر باعث افزایش مقاومت به خشکی در گیاه می‌شود (Tariq et al., 2017; Tariq et al., 2018) که با یافته‌های پژوهش حاضر همسو است.

با توجه به نتایج اثر برهم‌کنش فسفر و تنش خشکی بر جذب فسفر مشاهده شد که کاربرد فسفر در سطح بدون تنش خشکی منجر به بیش‌ترین مقدار این شاخص شد که این افزایش می‌تواند به دلیل افزایش رشد ریشه و سطح تماس بیش‌تر ریشه با خاک باشد. درصورتی‌که با افزایش تنش خشکی به سطوح ۵۰ و ۷۰ درصد FC، میزان جذب فسفر کاهش یافت (شکل ۴-الف). پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان دادند که کارا بودن ارقام گندم در شرایط تنش خشکی مرتبط با افزایش رشد ریشه و تولید یک سیستم ریشه‌ای کارآمد نسبت به ارقام حساس بوده و کاربرد کود فسفر باعث افزایش طول، تراکم و وزن ریشه و در نتیجه جذب فسفر می‌شود (Kang et al., 2014; Du et al., 2020). کاهش جذب فسفر در ارقام مورد بررسی در سطوح تنش زیاد می‌تواند به دلیل صرفه‌جویی انرژی گیاه در شرایط تنش باشد. بنابراین گیاه از میزان فسفر جذب شده در درون سلول‌های خود بهترین استفاده را داشته و مانع کاهش بیش‌تر رشد در شرایط تنش‌های بیش‌تر شده است که به‌عنوان یکی از راه‌کارهای مؤثر خود را با تنش سازگار می‌کنند این نتیجه با یافته‌های Ding et al. (2017) هماهنگی دارد.

همان‌طور که نتایج در شکل‌های (۴-ب) و (۵-ب) نشان می‌دهد کارایی جذب با کمبود فسفر در شرایط بدون تنش افزایش یافت و کارایی مصرف با کاربرد فسفر در شرایط بدون تنش افزایش یافت و در هر دو شاخص با افزایش تنش خشکی روند کاهشی مشاهده شد، درصورتی‌که که این روند کاهشی در کارایی مصرف شدت کمتری داشت. نتایج پژوهش حاضر نشان داد یک ارتباط منفی بین کارایی جذب و مصرف فسفر وجود دارد. کارایی جذب فسفر در شرایط کمبود فسفر خاک و کارایی مصرف فسفر در شرایط عرضه کافی فسفر خاک افزایش می‌یابد که این نتایج هماهنگ با یافته‌های Campos et al. (2018) است. کاهش کم‌تر کارایی مصرف نسبت به کارایی جذب می‌تواند در ارتباط با میزان متفاوت توزیع و مصرف فسفر در فعالیت‌های متابولیکی درون گیاه از جمله سنتز قند برای مقاومت گیاه به تنش‌های بیش‌تر باشد. هم‌چنین میزان نیاز گیاه به فسفر و انرژی که گیاه صرف تولید ماده خشک می‌کند باعث تغییر در میزان کارایی مصرف می‌شود. تفاوت در کارایی جذب بین ارقام در این پژوهش را می‌توان مرتبط به ویژگی‌های ریشه از جمله سطح و طول ریشه در محیط ریزوسفر دانست. افزایش این شاخص در شرایط کمبود فسفر به دلیل افزایش میزان فسفر گیاه در اثر رقت فسفر و کاهش مقدار فسفر محلول خاک در اثر تثبیت فسفر توسط ذرات خاک و آهکی بودن خاک مورد بررسی است که این نتایج با یافته‌های Sandaña (2016) همخوانی دارد. کارایی استفاده فسفر در گیاه ممکن است ناشی از توانایی در جذب بیش‌تر فسفر از خاک تحت شرایط کمبود فسفر یا توانایی در تولید بیش‌تر وزن خشک در ازای واحد فسفر در درون بافت گیاه یا متاثر از هر دو باشد (Korkmaz and Altıntaş, 2016). نتایج مربوط به کارایی استفاده فسفر نیز نشان داد (شکل ۶-الف) که رقم سیروان در شرایط تنش خشکی در مقایسه با رقم سیوند کارایی استفاده بیش‌تری داشت که ناشی از ویژگی‌های خوب رشد ریشه (طول تجمعی و سطح ریشه) و افزایش تولید ماده خشک آن در شرایط تنش و بدون تنش خشکی است. تأثیر فسفر بر وزن خشک شاخساره ارقام کارا به‌عنوان معیاری معتبر در ارزیابی کارایی فسفر برای این ارقام در مراحل رشد رویشی است که این نتایج بر روی رقم سیروان به‌خوبی مشاهده شد. افزایش فسفر خاک در سطح ۲۵ میلی‌گرم برکیلوگرم، به‌عنوان مقدار مناسب و متعادل در افزایش رشد و نمو، کارایی فسفر و ویژگی‌های فیزیوبیوشیمیایی این رقم مؤثر بوده است که با یافته‌های Korkmaz and Altıntaş (2016) بر روی ارقام کارا هماهنگی دارد. بنابراین از نظر اقتصادی در شرایط تنش خشکی رقم سیروان مناسب‌تر بوده و کارا بودن این رقم به دلیل کارایی استفاده از میزان فسفر خاک است.

میزان و استاندارد مشخصی برای کاربرد فسفر در مقاومت به خشکی هنوز قابل دسترس نیست ولی وجود برخی شاخص‌ها با توجه به شرایط منطقه، می‌تواند میزان کارایی فسفر و تأثیر این عنصر را در کاهش آثار خشکی نشان دهد. هم‌چنین جذب فسفر توسط گیاه در طول فصل رشدبه دلیل تثبیت فسفر در خاک و میزان رطوبت خاک کاهش پیدا می‌کند؛ بنابراین تغذیه مناسب فسفر در طول فصل رشد، این امکان را برای گیاه فراهم می‌کند که علاوه بر دوره رشد رویشی، مرحله رشد زایشی هم به‌خوبی انجام شود. از آن‌جایی‌که فسفر در مراحل مختلف رشدی گندم تأثیر گذار است، بنابراین بررسی جذب و کارایی این عنصر در مرحله رشد رویشی اهمیت بسزایی دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش بیان می‌کند که افزایش میزان فسفر و سطوح رطوبت مناسب باعث افزایش وزن خشک شاخساره، سطح و طول ریشه، جذب، کارایی مصرف و استفاده فسفر و ویژگی‌های فیزیوبیوشیمیایی (قند محلول کل و نشت الکترولیت) در ارقام گندم شد که در رقم سیروان مقدار این شاخص‌ها افزایش بیش‌تری داشت. در سطح بدون تنش خشکی، نتایج نشان‌دهنده نقش مثبت فسفر در اکثر شاخص‌های مورد بررسی بود. حرکت، جذب و استفاده فسفر به‌وسیله گیاه در خاک تحت تأثیر رطوبت و ویژگی‌های خاک است.

همان‌طور که مشاهده شد با افزایش سطوح تنش خشکی به دلیل کاهش جذب فسفر در خاک آهکی، همه ویژگی‌ها و شاخص‌ها به‌جز قند محلول روند کاهشی داشتند. نتایج هم‌چنین نشان داد که تفاوت رشد و نمو ارقام گندم در شرایط تنش خشکی به دلیل میزان متفاوت کارایی استفاده فسفر، ویژگی‌های ریشه، ویژگی‌های ژنوتیپی در جذب و مصرف فسفر، ویژگی‌های فیزیوبیوشیمیایی (قند محلول کل و نشت الکترولیت) و تولید ماده خشک است. رقم سیروان در مقایسه با رقم سیوند با رشد بیش‌تر ریشه و افزایش وزن خشک، جذب و کارایی فسفر (جذب، مصرف و استفاده)، مقاومت بیش‌تری در برابر شرایط تنش خشکی داشت و از میزان فسفر جذب شده بهترین استفاده را در رشد و نمو خود داشت؛ بنابراین به‌عنوان رقم فسفر کارا شناخته شد. با توجه به نتایج این پژوهش تعیین کارایی استفاده فسفر در مراحل رشد رویشی می‌تواند نقش مهمی در میزان مقاومت ارقام گندم در برابر تنش خشکی داشته باشد و برای یک توصیه کودی مناسب به‌منظور بهبود عملکرد گندم شاخص خوبی محسوب شود.

تشکر و سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد برای حمایت مالی از این طرح پژوهشی (کد ۳/۴۸۶۹۶) تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

1. Abbadi, J., 2017. Evaluation of mechanisms of phosphorus use efficiency in traditional wheat cultivars for sustainable cropping. J. Food Secur. 5, 197–211. https://doi.org/10.12691/jfs-5-6-1
2. Atarodi, B., Fotovat, A., Khorassani, R., Keshavarz, P., Hammami, H., 2018. Interaction of selenium and cadmium in wheat at different salinities. Toxicol. Environ. Chem. 100(3), 348–360. https://doi.org/10.1080/02772248.2018.1524472.
3. Bajji, M., Kinet, J.M., Lutts, S., 2002. The use of the electrolyte leakage method for assessing cell membrane stability as a water stress tolerance test in durum wheat. Plant Growth Regul. 36(1), 61–70. https://doi.org/10.1023/A:1014732714549.
4. Black, C.A., 1965. Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Properties. ASA/SSSA, Madison, WI, USA, 1122 p.
5. Bilal, H.M., Aziz, T., Maqsood, M.A., Farooq, M., Yan, G., 2018. Categorization of wheat genotypes for phosphorus efficiency. PloS. One 13(10), e0205471. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205471.
6. Bohnert, H.J., Jensen, R.G., 1996. Strategies for engineering water-stress tolerance in plants. Trends Biotechnol. 14(3), 89–97. https://doi.org/10.1016/0167-7799(96)80929-2.
7. Campos, P., Borie, F., Cornejo, P., López-Ráez, J.A., López-García, Á., Seguel, A., 2018. Phosphorus acquisition efficiency related to root traits: is mycorrhizal symbiosis a key factor to wheat and barley cropping?. Front. Plant Sci. 9, 752. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00752.
8. Chapman, H.D., Pratt, P.F., 1961. Methods of Analysis for Soils, Plants and Waters. Division of Agricultural Sciences, University of California, USA.
9. Christopher, J., Christopher, M., Jennings, R., Jones, S., Fletcher, S., Borrell, A., Manschadi, A.M., Jordan, D., Mace, E., Hammer, G., 2013. QTL for root angle and number in a population developed from bread wheats (*Triticum aestivum*) with contrasting adaptation to water-limited environments. Theor. Appl. Genet. 126(6), 1563–1574. https://doi.org/10.1007/s00122-013-2074-0.
10. da Silva, E. C., Nogueira, R.J.M.C., da Silva, M.A., de Albuquerque, M.B., 2011. Drought stress and plant nutrition. Plant Stress 5(1), 32–41.
11. de Souza Campos, P.M., Cornejo, P., Rial, C., Borie, F., Varela, R.M., Seguel, A., López-Ráez, J.A., 2019. Phosphate acquisition efficiency in wheat is related to root: shoot ratio, strigolactone levels, and PHO2 regulation. J. Exp. Bot. 70(20), 5631–5642. https://doi.org/10.1093/jxb/erz349.
12. Deng, Y., Teng, W., Tong, Y.P., Chen, X.P., Zou, C.Q., 2018. Phosphorus efficiency mechanisms of two wheat cultivars as affected by a range of phosphorus levels in the field. Front. Plant Sci. 9, 1614. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01614.
13. Ding, Z., Jia, S., Wang, Y., Xiao, J., Zhang., Y., 2017. Phosphate stresses affect ionome and metabolome in tea plants. Plant Physiol. Biochem. 120, 30–39. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.09.007.

14. Du, Y., Zhao, Q., Chen, L., Yao,X., Zhang, W., Zhang, B., Xie, F., 2020. Effect of drought stress on sugar metabolism in leaves and roots of soybean seedlings. Plant Physiol. Biochem. 146, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.11.003.
15. Duangpan, S., Buapet, P., Sujitto, S., Eksomtramage, T., 2018. Early assessment of drought tolerance in oil palm D× P progenies using growth and physiological characters in seedling stage. Plant Genet. Resour. 16(6), 544–554. https://doi.org/10.1017/S1479262118000151.
16. Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.T., Smith, F., 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Anal. Chem. 28(3), 350–356. https://doi.org/10.1021/ac60111a017.
17. Forster, B., Thomas, W., Chloupek., O., 2005. Genetic controls of barley root systems and their associations with plant performance. Asp. Appl. Biol. 73, 199–204.
18. Gebremichael, A.W., Wall, D.P., O'Neill, R.M., Krol, D.J., Brennan, F., Lanigan, G., Richards, K.G., 2022. Effect of contrasting phosphorus levels on nitrous oxide and carbon dioxide emissions from temperate grassland soils. Sci. Rep. 12(1), 2602. https://doi.org/10.1038/s41598-022-06661-2.
19. Gourley, C.J.P., Allan, D.L., Russelle, M.P., 1993. Defining phosphorus efficiency in plants. Plant Soil 155(1), 289–292. https://doi.org/10.1007/BF00025039.
20. Hinsinger, P., Brauman, A., Devau, N., Gérard, F., Jourdan, C., Laclau, J.P., Le Cadre, E., Jaillard, B., Plassard, C., 2011. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? Plant Soil 348(1), 29–61. https://doi.org/10.1007/s11104-011-0903-y.
21. Jambunathan, N., 2010. Determination and detection of reactive oxygen species (ROS), lipid peroxidation, and electrolyte leakage in plants. In: Sunkar, R. (Ed.), Plant Stress Tolerance. Methods in Molecular Biology, Humana Press, USA, pp. 291–297.
22. Jun, W., Ping, L., Zhiyong, L., Zhansheng, W., Yongshen, L., Xinyuan, G., 2017. Dry matter accumulation and phosphorus efficiency response of cotton cultivars to phosphorus and drought. J. Plant Nutr. 40(16), 2349–2357. https://doi.org/10.1080/01904167.2017.1346123.
23. Karimzadeh, J., Alikhani, H.A., Etesami, H., Pourbabaei, A.A., 2021. Improved phosphorus uptake by wheat plant (*Triticum aestivum* L.) with rhizosphere fluorescent *Pseudomonads* strains under water-deficit stress. J. Plant Growth Regul. 40, 1. 162–178. https://doi.org/10.1007/s00344-020-10087-3.
24. Kang, L.Y., Yue, S.C., Li, S.Q., 2014. Effects of phosphorus application in different soil layers on root growth, yield, and water-use efficiency of winter wheat grown under semi-arid conditions. J. Integr. Agric. 13(9), 2028–2039. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60751-6.
25. Korkmaz, K., Altıntaş, C., 2016. Phosphorus use efficiency in canola genotypes. Turkish J. Agri. Food Sci. Tech. 4(6), 424–430. https://doi.org/10.24925/turjaf.v4i6.424-430.726.
26. Manske, G., Ortiz-Monasterio, J., Van Ginkel, M., González, R., Fischer, R., Rajaram, S., Vlek, P., 2001. Importance of uptake efficiency versus P utilization for wheat yield in acid and calcareous soils in Mexico. Eur. J. Agron. 14, 261–274. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00099-X.
27. Moll, R.H., Kamprath, E.J., Jackson, W.A., 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. Agron. J. 74, 562–564. https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400030037x.
28. Mollier, A., Pellerin, S., 1999. Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. J. Exp. Bot. 50, 487–497. https://doi.org/10.1093/jxb/50.333.487.
29. Mori, A., Fukuda, T., Vejchasarn, P., Nestler, J., Pariasca-Tanaka, J., Wissuwa, M., 2016. The role of root size versus root efficiency in phosphorus acquisition in rice. J. Exp. Bot. 67(4), 1179–1189. https://doi.org/10.1093/jxb/erv557.
30. Neji, M., Kouas, S., Gandour, M., Aydi, S., Abdelly, C., 2019. Genetic variability of morpho-physiological response to phosphorus deficiency in Tunisian populations of *Brachypodium hybridum*. Plant Physiol. Biochem. 143, 246–256. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.09.006.
31. Olsen, S.R., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate: USDA Circular, US Government Printing Office, Washington DC.
32. Ortiz-Monasterio, J.I., Pena, R.J., Pfeiffer, W.H., Hede, A.H., 2002. Phosphorus use efficiency, grain yield, and quality of triticale and durum wheat under irrigated conditions. In: Proceedings of the 5th International Triticale Symposium June 30, 1–6, Radzików, Poland.
33. Osborne, L., Rengel., Z., 2002. Genotypic differences in wheat for uptake and utilisation of P from iron phosphate. Aust. J. Agric. Res. 53(7), 837–844. https://doi.org/10.1071/AR01101.
34. Ozturk, L., Eker, S., Torun, B., Cakmak, I., 2005. Variation in phosphorus efficiency among 73 bread and durum wheat genotypes grown in a phosphorus-deficient calcareous soil. Plant Soil 269(1), 69–80. https://doi.org/10.1007/s11104-004-0469-z.
35. Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R., 1982. Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. ASA/SSSA, Madison, WI, USA, 1142 p.
36. Poiré, R., Chochois, V., Sirault, X.R.J., Vogel, P., Watt, M., Furbank, R.T., 2014. Digital imaging approaches for

phenotyping whole plant nitrogen and phosphorus response in *Brachypodium distachyon*. J. Integr. Plant Biol. 56(8), 781–796. https://doi.org/10.1111/jipb.12198.
37. Ramaekers, L., Remans, R., Rao, I.M., Blair, M.W., Vanderleyden,. J., 2010. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. Field Crops Res. 117, 169–176. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.03.001.
38. Razaq, M., Zhang, P., Shen, H.L., 2017. Influence of nitrogen and phosphorous on the growth and root morphology of Acer mono. PloS One 12(2), e0171321. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171321.
39. Rose, T.J., Wissuwa, M., 2012. Rethinking internal phosphorus utilization efficiency: a new approach is needed to improve PUE in grain crops. Adv. Agron. 116, 185–217.
40. Ruark, M.D., Kelling, K.A., Ward Good, L., 2014. Environmental concern of phosphorus management in potato production. Amer. J. Potato Res. 91, 132–144. https://doi.org/10.1007/s12230-014-9372-1.
41. Salim, N., Raza, A., 2020. Nutrient use efficiency (NUE) for sustainable wheat production: a review. J. Plant Nutr. 43(2), 297–315. https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1676907.
42. Sandaña, P., 2016. Phosphorus uptake and utilization efficiency in response to potato genotype and phosphorus availability. Eur. J. Agron. 76, 95–106. https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.02.003.
43. Seed and Plant Breeding Research Institute. 2015. Introduction of Crop Cultivars (Food Safety and Health, Volume 1). Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran, 235 p. (In Persian)
44. Serraj, R.A.C. H.I.D., Sinclair, T.R. 2002., Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions? Plant, Cell Environ. 25(2), 333–341. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00754.x.
45. Shabani, E., Bolandnazar, S., Tabatabaei, S.J., Najafi, N., Alizadeh-Salteh, S., Rouphael, Y., 2018. Stimulation in the movement and uptake of phosphorus in response to magnetic P solution and arbuscular mycorrhizal fungi in *Ocimum basilicum*. J. Plant Nutr. 41(13), 1662–1673. https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1458872.
46. Sharma, K., Neelaveni, K., Katyal, J., Srinivasa Raju, A., Srinivas, K., Kusuma Grace, J., Madhavi, M., 2008. Effect of combined use of organic and inorganic sources of nutrients on sunflower yield, soil fertility, and overall soil quality in rainfed Alfisol. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 39(11-12), 1791–1831. https://doi.org/10.1080/00103620802073784.
47. Sharma, S., Chen, C., Khatri, K., Rathore, M.S., Pandey, S.P., 2019. *Gracilaria dura* extract confers drought tolerance in wheat by modulating abscisic acid homeostasis. Plant Physiol. Biochem. 136, 143–154. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.01.015.
48. Sidhu, S.K., Kaur, J., Singh, S., Grewal, S.K., Singh, M., 2018. Variation of morpho-physiological traits in geographically diverse pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp] germplasm under different phosphorus conditions. J. Plant Nutr. 41(10), 1321–1332. https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1450423.
49. Singh, S.K., Badgujar, G., Reddy, V.R., Fleisher, D. H., Bunce, J.A., 2013. Carbon dioxide diffusion across stomata and mesophyll and photo-biochemical processes as affected by growth CO_2 and phosphorus nutrition in cotton. J. Plant Physiol. 170(9), 801–813. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.01.001.
50. Tariq, A., Pan, K., Olatunji, O.A., Graciano, C., Li, Z., Sun, F., Sun, X., Song, D., Chen, W., Zhang, A., Wu, X., 2017. Phosphorous application improves drought tolerance of *Phoebe zhennan*. Front. Plant Sci. 8, 1561. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01561.
51. Tariq, A., Pan, K., Olatunji, O.A., Graciano, C., Li, Z., Sun, F., Zhang, L., Wu, X., Chen, W., Song, D., Huang, D., 2018. Phosphorous fertilization alleviates drought effects on *Alnus cremastogyne* by regulating its antioxidant and osmotic potential. Sci. Rep. 8(1), 1–11. https://doi.org/10.1038/s41598-018-24038-2.
52. Wang, X., Shen, J., Liao, H., 2010. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? Plant Sci. 179, 302–306. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.06.007.
53. Xu, W., Cui, K., Xu, A., Nie, L., Huang, J., Peng, S., 2015. Drought stress condition increases root to shoot ratio via alteration of carbohydrate partitioning and enzymatic activity in rice seedlings. Acta Physiol. Plant. 37(2), 9. https://doi.org/10.1007/s11738-014-1760-0.
54. Ye, H., Roorkiwal, M., Valliyodan, B., Zhou, L., Chen, P., Varshney, R.K., Nguyen, H.T., 2018. Genetic diversity of root system architecture in response to drought stress in grain legumes. J. Exp. Bot. 69(13), 3267–3277. https://doi.org/10.1093/jxb/ery082.
55. Zahoor, R., Zhao, W., Abid, M., Dong, H., Zhou, Z., 2017. Potassium application regulates nitrogen metabolism and osmotic adjustment in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) functional leaf under drought stress. J. Plant Physiol. 215, 30–38. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.05.001.
56. Zandi Gouharrizi, Z., Khorassani, R., Halajnia, A. 2021. Investigating the effect of silicon on phosphorus absorption and wheat plant growth under moisture stress in a calcareous soil. Environ. Stress. Agri. Sci. 14, 3. 665–673. https://doi.org/10.22077/escs.2020.2805.1728. (In Persian with English abstract)
57. Zhang, B., Zhang, H., Wang, H., Wang, P., Wu, Y., Wang, M., 2018. Effect of phosphorus additions and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on the growth, physiology, and phosphorus uptake of wheat under two water regimes. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 49(7), 862–874. https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1435798.

58. Zhu, X. k., Li, C.Y., Jiang, Z.Q., Huang, L.L., Feng, C.N., Guo, W.S., Peng., Y.X., 2012. Responses of phosphorus use efficiency, grain yield, and quality to phosphorus application amount of weak-gluten wheat. J. Integr. Agri. 11(7), 1103–1110. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(12)60103-8.