Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Soil Management and Sustainable Production

Print ISSN: 2322-1267
Online ISSN: 2322-1275

Effect of phosphorus on iron, zinc and potassium uptake and the characteristics of root and shoot of wheat in different moisture regimes

Maryam Moosavi[1], Reza Khorassani[*2], Reza Tavakkol Afshari[3]

1. Ph.D. Student, Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: moosavi.mary91@yahoo.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: khorasani@um.ac.ir
3. Professor, Dept. of Agrotechnology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: tavakolafshari@um.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 06.25.2022
Revised: 11.08.2022
Accepted: 11.09.2022

Keywords:
Drought tolerant cultivar,
Moisture stress,
Phosphorus,
Plant dry matter

ABSTRACT

Background and Objectives: Drought is one of the most widespread abiotic stresses which has a negative effect on the growth and yield of plants in most parts of the world. Drought stress reduces plant yield by reducing the uptake of water and nutrients. The dry and semi-arid weather 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 wheat, can be effective in alleviating the effects of drought stress. In recent years, to deal with drought stress, the use of plants and cultivars efficient in uptake nutrients, including phosphorus, as an appropriate strategy to increase crop yield has been the focus of researchers. Therefore, it is necessary to pay attention to the mechanism of efficient cultivars against drought stress for accurate fertilizer recommendations.

Materials and Methods: To evaluate Sirvan wheat cultivar (resistant to drought stress), in the uptake of nutrients and its growth and development at different levels of moisture and phosphorus, a research in the greenhouse was performed as factorial based on a completely randomized design with two factors and three replications during the vegetative growth period. The factors included phosphorus from mono-calcium phosphate monohydrate source (0, 15 and 25 mg P kg soil^{-1}) and three moisture regimes including 50 and 70% of field capacity (T1, T2: stress conditions) and 95% of field capacity (T0: control).

Results: According to the results, it was observed that the interaction effect of drought stress and phosphorus levels on total dry weight, uptake of iron, zinc and potassium nutrients, total soluble sugar, root growth (cumulative length, diameter and root area) and chlorophyll index was significant at the 0.01 % and 0.05 % level of probability, respectively in Sirvan cultivar. The results showed that the increase of phosphorus (25 mg kg^{-1}) in the presence and absence of drought stress was effective on the growth and development of the studied wheat cultivar; So the addition of phosphorus in the amount of 25 mg kg^{-1} in the drought stress condition of 50% of the field capacity increased the total dry weight of Sirvan variety from 5.80 to 8.52 g pot^{-1} compared to the level without phosphorus application. The increase of phosphorus in the condition of drought stress (50%), increased the uptake of iron nutrients by about 2 times, zinc and potassium by 60 and 50%, respectively, compared to the control level that this increase in uptake can be due to the increase in root growth and its characteristics (cumulative

length, area and diameter); Also, according to the results of this experiment, it was observed that the resistance of Sirvan cultivar to drought stress was due to the increase in the amount of total soluble sugar, root growth and uptake of iron, zinc and potassium which led to an increase in total dry weight and its good growth and development under drought stress conditions.

Conclusion: The application of the appropriate amount of phosphorus at the level of 25 mg kg^{-1} under drought stress conditions increased the total dry weight, root area, root diameter and length, uptake of nutrients, chlorophyll index, height, number of tillers and the amount of total soluble sugar in the plant, this level of phosphorus with a positive effect on the growth and development of Sirvan variety in the vegetative growth stage made it adapt to drought stress conditions; Considering the importance of cultivar selection in adjusting drought stress, Sirvan cultivar was able to show a good response to phosphorus fertilizer to reduce drought stress.

Cite this article: Moosavi, Maryam, Khorassani, Reza, Tavakkol Afshari, Reza. 2023. Effect of phosphorus on iron, zinc and potassium uptake and the characteristics of root and shoot of wheat in different moisture regimes. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 12 (4), 77-98.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/EJSMS.2023.20359.2066
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار

شاپا چاپی: ۱۲۶۷-۲۳۲۲
شاپا آنلاین: ۱۲۷۵-۲۳۲۲

تأثیر فسفر بر جذب آهن، روی و پتاسیم و خصوصیات رشدی ریشه و اندام هوایی گندم در رژیم‌های رطوبتی مختلف

مریم موسوی[۱]، رضا خراسانی*[۲]، رضا توکل افشاری[۳]

۱. دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: moosavi.mary91@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: khorasani@um.ac.ir
۳. استاد گروه اگروتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: tavakolafshari@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۴
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸

واژه‌های کلیدی:
تنش رطوبتی،
رقم مقاوم به خشکی،
فسفر،
ماده خشک گیاهی

چکیده

سابقه و هدف: خشکی یکی از گسترده‌ترین تنش‌های غیرزنده است که در بخش‌های عمده جهان تأثیری منفی بر رشد و عملکرد گیاهان می‌گذارد. تنش خشکی با کاهش جذب آب و عناصر غذایی عملکرد گیاهان را کاهش می‌دهد. شرایط آب و هوای خشک و نیمه خشک ایران مشکلات بسیاری در تولید گیاهان از جمله گندم (*Triticum aesivum* L.) ایجاد کرده است. فسفر به‌عنوان یکی از عناصر غذایی ضروری برای گندم، می‌تواند در تعدیل اثرات تنش خشکی مؤثر باشد. در سال‌های اخیر برای مقابله با تنش خشکی استفاده از گیاهان و ارقام کارا در جذب عناصر غذایی از جمله فسفر به‌عنوان راه‌حل پایدار و مناسب برای افزایش عملکرد محصول مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است، بنابراین توجه به مکانیسم ارقام کارا در برابر تنش خشکی برای توصیه دقیق کود ضروری می‌باشد.

مواد و روش‌ها: به منظور ارزیابی رقم گندم سیروان (مقاوم به تنش خشکی)، در جذب عناصر غذایی و رشد و نمو آن در سطوح مختلف رطوبتی و فسفر، پژوهشی در گلخانه به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور و سه تکرار در طی دوره رشد رویشی انجام گرفت. فاکتورها شامل فسفر از منبع منو کلسیم فسفات منوهیدرات (۰، ۱۵ و ۲۵ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک) و سه رژیم رطوبتی شامل ۵۰ و ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه (شرایط تنش:T1, T2) و ۹۵ درصد ظرفیت مزرعه (شاهد:T0) بودند.

یافته‌ها: با توجه به نتایج مشاهده شد که اثر متقابل تنش خشکی و سطوح فسفر بر روی میزان وزن خشک کل، جذب عناصر غذایی آهن، روی و پتاسیم، قند محلول کل، رشد ریشه (طول تجمعی، قطر و سطح ریشه) و شاخص کلروفیل رقم سیروان به ترتیب در سطح احتمال یک

درصد و پنج درصد معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که افزایش فسفر (۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در حضور و عدم حضور تنش خشکی بر روی رشد و نمو رقم گندم مورد مطالعه مؤثر بوده است؛ به‌طوری‌که که افزودن فسفر به مقدار ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه، وزن خشک کل رقم سیروان را از ۵/۸۰ به ۸/۵۲ گرم در گلدان نسبت به سطح بدون کاربرد فسفر افزایش داد. افزایش فسفر در شرایط تنش خشکی (۵۰ درصد)، جذب عناصر غذایی آهن را به میزان حدود ۲ برابر، روی و پتاسیم را به ترتیب به میزان ٦۰ و ۵۰ درصد نسبت به شاهد افزایش داد که این افزایش جذب می‌تواند به‌دلیل افزایش رشد ریشه و خصوصیات آن (طول تجمعی، سطح و قطر ریشه) باشد؛ هم‌چنین با توجه به نتایج این آزمایش مشاهده شد که مقاومت رقم سیروان به تنش خشکی به دلیل افزایش در میزان قند محلول کل، رشد ریشه و جذب آهن، روی و پتاسیم بود که منجر به افزایش وزن خشک کل و رشد و نمو خوب آن در شرایط تنش خشکی شد.

نتیجه‌گیری: کاربرد میزان مناسب فسفر در سطح ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شرایط تنش خشکی باعث افزایش وزن خشک کل، سطح، قطر و طول ریشه، جذب عناصر غذایی، شاخص کلروفیل، ارتفاع، تعداد پنجه و میزان قند محلول کل در گیاه شد، این سطح فسفر با تأثیر مثبت بر روی رشد و نمو رقم سیروان در مرحله رشد رویشی باعث سازگاری آن در شرایط تنش خشکی شد؛ با توجه به اهمیت انتخاب رقم در تعدیل تنش خشکی، رقم سیروان توانست پاسخ خوبی نسبت به کود فسفر برای کاهش تنش خشکی نشان دهد.

استناد: موسوی، مریم، خراسانی، رضا، توکل افشاری، رضا (۱۴۰۱). تأثیر فسفر بر جذب آهن، روی و پتاسیم و خصوصیات رشدی ریشه و اندام هوایی گندم در رژیم‌های رطوبتی مختلف. *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۱۲ (۴)، ۹۸-۷۷.
DOI: 10.22069/EJSMS.2023.20359.2066

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
© نویسندگان.

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از منابع غذایی مهم در بین غلات در سراسر جهان می‌باشد. کاهش بارندگی و محدودیت منابع آبی، تولید گندم را در طی سال‌های اخیر در سرتاسر جهان کاهش داده است (۱). تنش خشکی یکی از گسترده‌ترین تنش‌های غیرزنده می‌باشد که با کاهش توسعه برگ و هدایت روزنه‌ها منجر به کاهش فتوسنتز می‌شود و با افزایش تنش اکسیداتیو اثرات نامطلوبی بر روی رشد و عملکرد گیاهان به‌خصوص گندم می‌گذارد؛ بنابراین با توجه به افزایش جمعیت جهان و تامین منابع غذایی، استفاده از راه‌کارهای تغذیه‌ای مناسب می‌تواند سبب بهبود عملکرد ارقام گندم در شرایط تنش خشکی باشد. پاسخ گیاهان به تنش خشکی پیچیده است و شامل تغییرات فیزیولوژی، بیوشیمیایی و مورفولوژی می‌باشد؛ علاوه بر تنش خشکی، کمبود فسفر نیز به‌طور قابل‌توجهی باعث کاهش رشد و عملکرد در گیاه می‌شود (۲). میزان فسفر مورد نیاز در گیاه گندم نسبت به سایر غلات بیش‌تر می‌باشد، بنابراین دسترسی به این عنصر برای تولید و عملکرد این محصول مهم می‌باشد (۳). در دسترس بودن فسفر به شدت با رطوبت خاک در ارتباط است، وقتی میزان مناسب رطوبت خاک در اختیار گیاه قرار گیرد رشد ریشه و پخشیدگی این عنصر از خاک به سمت ریشه افزایش می‌یابد و در نتیجه میزان غلظت فسفر و کارایی استفاده آن افزایش می‌یابد (٤). فسفر به دلیل نقش مهمی که در فرآیندهای فیزیولوژیکی از جمله فتوسنتز دارد و هم‌چنین با افزایش تقسیم و طویل شدن سلول منجر به افزایش رشد گیاه می‌شود (٥، ٦). تنش خشکی با کاهش در جذب فسفر از متداول‌ترین فاکتورهای تنش در عملکرد گندم در جهان به شمار می‌آیند (۳)؛ بنابراین کاربرد میزان مناسب کود فسفر باعث افزایش مقاومت به خشکی در گندم (٤، ۷) و در نتیجه افزایش عملکرد می‌شود. نیاز ژنوتیپ‌های گندم به فسفر برای رشد متفاوت می‌باشد و هم‌چنین پاسخ‌های متفاوتی به کاربرد فسفر دارند (۸). به همین منظور شناسایی و استفاده از واریته‌ها، ارقام یا ژنوتیپ‌های کارا و مقاوم به شرایط کمبود فسفر می‌تواند یک استراتژی یا راه‌کار مقرون به صرفه و مورد توجه در سیستم‌های کشاورزی پایدار باشد (۹). ژنوتیپ‌های مقاوم و کارا در شرایط کمبود فسفر با افزایش خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی از جمله افزایش و توسعه ریشه، تارهای کشنده، طول، سطح، نسبت ریشه به اندام هوایی باعث افزایش جذب و کارایی فسفر در گیاه می‌شوند (۷، ۱۰، ۱۱) و در نتیجه مقاومت آن‌ها را در برابر تنش خشکی و کمبود فسفر افزایش می‌دهند (۱۲). ماده خشک یک ویژگی مهم گیاهی برای میزان رشد و تولید اولیه و مبنایی برای تعیین کمیت پاسخ‌های فیزیولوژیکی به شرایط محیطی و فرآیندهای رشدی آن‌ها است و شاخص خوبی برای عملکرد اقتصادی نهایی می‌باشد. اختلاف ارقام برای تولید ماده خشک در اندام هوایی می‌تواند به‌عنوان پارامتر قابل‌قبول و مورد اعتماد برای ارقام مقاوم و کارا باشد (۱۳). ژنوتیپ‌های فسفر کارا در شرایط کمبود فسفر با تغییرات مورفوفیزیولوژیکی از جمله با تغییر در رشد و خصوصیات ریشه منجر به افزایش جذب عناصر و رشد و نمو در گیاه می‌شوند (١٤)؛ بنابراین افزایش رشد ریشه در گیاهان و در نتیجه سطح تماس بیش‌تر با سطوح خاک، جذب عناصر غذایی به‌خصوص عناصر کم‌تحرک را افزایش و نیاز به مصرف کودهای شیمیایی را در خاک کاهش می‌دهد؛ بنابراین یکی از راه‌کارهای تعدیل تنش رطوبتی استفاده از ارقام مقاوم به خشکی می‌باشد؛ ارقام مختلفی با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه برای کشت وجود دارد که با توجه به ارقام پیشنهادی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، رقم

سیروان به عنوان یکی از ارقام مقاوم به خشکی معرفی شده است (۱۵)؛ از آن‌جایی که در مطالعاتی که بر روی این رقم انجام شده است بیش‌تر به خصوصیات و عملکرد در آخر فصل اشاره شده است و کم‌تر به مکانیسم‌های مقاومت رقم سیروان به تنش خشکی و جذب عناصر غذایی آن در مراحل رشد رویشی پرداخته شده است؛ این مطالعه با هدف بررسی رقم مقاوم سیروان در جذب عناصر غذایی، خصوصیات مورفولوژی و چگونگی مکانیسم مقاومت این رقم در سطوح مختلف فسفر و شرایط تنش خشکی انجام گردید.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به صورت کشت گلدانی، در گلخانه تحقیقاتی واقع در دانشکده کشاورزی در دانشگاه فردوسی مشهد به اجرا درآمد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور و سه تکرار در طی دوره رشد رویشی (دمای روز و شب به ترتیب ۳۲ و ۲۲ درجه سانتی‌گراد، میزان رطوبت نسبی ۳۱ تا ٦۱ درصد و طول مدت روز و شب به ترتیب ١٤ و ۱۰ ساعت) انجام گرفت. فاکتورها شامل فسفر از منبع منو کلسیم فسفات منوهیدرات (۰، ۱۵ و ۲۵ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک) و رژیم رطوبتی شامل سه سطح ۵۰ و ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه (شرایط تنش:T1, T2) و ۹۵ درصد ظرفیت مزرعه (شاهد:T0) بر روی رقم گندم بهاره (*Triticum aesivum* L.) (سیروان به عنوان رقم متحمل به خشکی) بودند. نمونه برداری خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری با خصوصیات زیر انجام گردید (جدول ۱). پارامترهای اندازه‌گیری شده در جدول ۱ مطابق با روش‌های تجزیه خاک پیچ و همکاران (۱۹۸۲) و بلک و همکاران (۱۹٦۵) انجام شد (۱٦، ۱۷). ظرفیت مزرعه ۱۹ درصد که به دو صورت وزنی و صفحه فشاری تعیین گردید. بذرهای گندم رقم موردنظر (سیروان) از مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان رضوی، بخش نهال و بذر تهیه شدند؛ پس از بررسی ویژگی‌های جوانه‌زنی بذرها در ژرمیناتور (درصد و سرعت جوانه‌زنی) بذرهای سالم و هم‌اندازه انتخاب شدند. بذرها با محلول هیپوکلریت سدیم ۵ درصد (v/v) ضدعفونی و پس از شستشو با آب مقطر به گلدان‌های پلاستیکی محتوی خاک به‌میزان 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) (٦ درصد آهن) به میزان ۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و روی از منبع سولفات روی به میزان ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم قبل از کشت با انجام محاسبات به خاک هر گلدان اضافه گردید. عناصر نیتروژن، پتاسیم، آهن و روی بر اساس آزمون خاک به مقدار ثابت به تمام گلدان‌ها داده شد (١٤، ۱۸، ۱۹، ۲۰). در هر گلدان، ۱۰ بذر در عمق ۲ سانتی‌متری خاک کاشته و تا زمان سبز شدن بذرها خاک گلدان‌ها با آب مقطر در حدود ظرفیت مزرعه به روش وزنی نگه‌داری شد، پس از ظهور گیاهچه‌ها برای حفظ تراکم مطلوب جمعیت گیاهان تعداد آن‌ها به ٤ گیاهچه کاهش یافت؛ بعد از حدود یک هفته پس از رشد گیاهچه‌ها با توزین روزانه گلدان‌ها با توجه به تبخیر و تعرق آن‌ها و ظرفیت مزرعه، سطوح تنش خشکی با آب مقطر به روش وزنی اعمال گردید (۲۱)؛ از اولین روز پس از اعمال تنش خشکی به عنوان روز اول آزمایش ثبت گردید و تنش خشکی به مدت حدود ۲ ماه در طی دوره رشد رویشی انجام شد، برای جلوگیری از خطای شرایط محیطی، گلدان‌ها هر ۵ روز در طول آزمایش جابجا می‌شدند. ظرفیت مزرعه (FC) به این صورت تعیین شد، در ابتدا یک گلدان با خاک مورد

آزمایش از کف اشباع شد و پس از خارج شدن آب ثقلی وزن خاک مرطوب بدست آمد. برای اطمینان از این‌که خروج آب تنها از طریق نیروی ثقلی انجام شود دهانه گلدان با پلاستیک پوشانده شد، سپس برای به‌دست آوردن وزن خاک خشک، خاک مرطوب را به‌مدت ٤٨ ساعت در آون با دمای ١٠٥ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. در نهایت با داشتن وزن خاک خشک و مرطوب، میزان ظرفیت مزرعه محاسبه شد.

جدول ١- برخی از ویژگی‌های خاک نمونه‌برداری شده در آزمایش.

Table 1. Some properties of the soil sampled in the experiment.

بافت خاک Texture	ظرفیت مزرعه FC (%)	pH (آب: خاک) (۱: ۲/۵)	کربن آلی Organic carbon (%)	نیتروژن N (mg kg^{-1})	فسفر قابل استفاده Available P (mg kg^{-1})	آهن قابل استخراج با DTPA Extractable Fe (mg kg^{-1})	روی قابل استخراج با DTPA Extractable Zn (mg kg^{-1})	پتاسیم قابل استفاده Available K (mg kg^{-1})	کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent (%)	هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})
لوم رسی Clay loam	19	8.13	0.35	707	8.57	2.8	0.4	147.51	13.75	1.46

اندازه‌گیری‌ها: برداشت گیاه گندم با سه تکرار و از تمام گلدان‌ها پس از اعمال تنش به مدت حدود ٢ ماه انجام شد؛ به این ترتیب که گلدان‌ها برای بررسی وزن خشک و تر، صفات مورفولوژیک، غلظت و جذب عناصر غذایی در اندام هوایی و ریشه، در پایان مرحله رشد رویشی به دو بخش اندام هوایی و ریشه جدا شدند؛ سپس مجموع سطح، قطر و طول ریشه‌ها با دستگاه اسکنر ریشه Delta-T و نرم‌افزار WinRHIZO (مدل: V5.0, Regent Instruments, Quebec Canada) بررسی شدند (٧، ٢٢، ٢٣). برای اندازه‌گیری وزن خشک، پس از تمیز کردن اندام هوایی و ریشه‌ها و ثابت شدن وزن آن‌ها پس از ٤٨ ساعت قرارگیری در دمای ٧٠ درجه سانتی‌گراد توزین شدند (٣، ٧، ٢٤، ٢٥). به منظور اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی در گیاه، ریشه‌ها و اندام هوایی رقم سیروان توسط آسیاب الکتریکی پودر گردید، از الک ٠/٥ میلی‌متر عبور و پس از عصاره‌گیری نمونه‌ها غلظت عناصر غذایی با دستگاه ICP-OES مدل (76004555-Spectro Arcos) تعیین شد (٢٦، ٢٧، ٢٨، ٢٩، ٣٠، ٣١). میزان عناصر بذر، مطابق روش انجام شده توسط زئو و همکاران (٢٠١٢)، پاراسکا- تاناکا و همکاران (٢٠١٥) و ال- مزلوزی و همکاران (٢٠٢٠) تعیین شد (٣، ٣٢، ٣٣). جذب عناصر غذایی (٧، ١٢، ٢٤) و فاکتور استرس فسفر (PSF: P stress factor) (٨، ٢٢) در گیاه با استفاده از معادله‌های زیر محاسبه گردید:

$$\text{جذب (mg)} = \text{غلظت } \left(\text{mg kg}^{-1}\right) \times \text{وزن خشک گیاه (kg)} \quad (۱)$$

$$\text{PSF}(\%) = \frac{\text{SDM (ad)} - \text{SDM (def)}}{\text{SDM (ad)}} \times 100 \quad (۲)$$

با توجه به معادله ۲، PSF[1] فاکتور استرس فسفر، SDM (ad)[2] وزن خشک اندام هوایی در شرایط میزان کافی فسفر و SDM (def)[3] وزن خشک اندام هوایی در شرایط کمبود فسفر می‌باشد.

برای اندازه‌گیری شاخص کلروفیل، از سطح مرکزی برگ پرچم تمام گیاهان در بین ساعات ۹ تا ۱۱ صبح در یک روز آفتابی و بدون ابری با استفاده از دستگاه اسپد (SPAD) انجام شد؛ برای این منظور پس از کالیبره کردن دستگاه از سه نقطه از هر برگ قرائت توسط دستگاه انجام گردید، سپس میانگین سه نقطه به عنوان میزان شاخص کلروفیل گزارش شد. برای اندازه‌گیری قند محلول کل در برگ به روش فنل- سولفوریک در طول موج ٤۸۰ نانومتر انجام شد (۳٤). تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با نرم‌افزار SAS انجام و برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد و نمودارهای مربوطه با نرم‌افزار EXCEL Microsoft رسم شدند.

نتایج و بحث

جدول تجزیه واریانس نشان داد که تیمارهای اعمال شده در بخش اثرات ساده برای همه پارامترهای مورد مطالعه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد، همین سطح معنی‌داری یک درصد برای اثرات متقابل هم برای همه پارامترها به‌جز شاخص کلروفیل به‌دست آمد (جدول ۲).

خصوصیات رشدی

ارتفاع بوته، تعداد پنجه و کلروفیل گیاه: نتایج نشان داد، که اثرات فسفر و تنش خشکی بر روی میزان ارتفاع، تعداد پنجه و کلروفیل گیاه در مرحله رشد رویشی معنی‌دار گردید (جدول ۲ و شکل‌های ۱ و ۲). افزایش فسفر (۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در شرایط تنش (۵۰ و ۷۰ درصد) و عدم تنش خشکی (۹۵ درصد) میزان ارتفاع، تعداد پنجه و کلروفیل گیاه را افزایش داده است، این احتمال وجود دارد که افزایش این صفات به دلیل افزایش در جذب فسفر، آهن، روی و پتاسیم باشد، بنابراین تأثیر مثبت این عناصر باعث بهبود خصوصیات رشدی گیاه شد؛ در صورتی‌که در شرایط تنش خشکی و کمبود فسفر کاهش ارتفاع، تعداد پنجه و کلروفیل گیاه مشاهده گردید. با توجه به نقش مهمی که فسفر در افزایش میزان فتوسنتز، تقسیم و طویل شدن سلول‌ها، رشد ریشه و میزان قند محلول در گیاه دارد، بنابراین افزایش فسفر به میزان ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بر روی این پارامترها در شرایط تنش مؤثر بوده است، همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد افزایش فسفر (۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در شرایط تنش خشکی (۵۰ درصد) تعداد پنجه و ارتفاع گیاه را در رقم سیروان به‌ترتیب حدود ۲/۵ برابر و ۱٦ درصد نسبت به شاهد افزایش داد؛ هم‌چنین این احتمال وجود دارد که افزایش این پارامترها به دلیل خصوصیات ژنتیکی و نیاز بیش‌تر گیاه به میزان فسفر در شرایط تنش خشکی باشد که مطابق با یافته‌های دینگ و همکاران (۲۰۱۸) و جون و همکاران (۲۰۱۷) می‌باشد (۱۲، ۲٦)؛ بنابراین نتایج نشان دادند که افزایش ارتفاع، تعداد پنجه و کلروفیل گیاه منجر به افزایش وزن خشک کل در این رقم شده است.

1- P stress factor
2- Shoot dry matter (adequate)
3- Shoot dry matter (deficit)

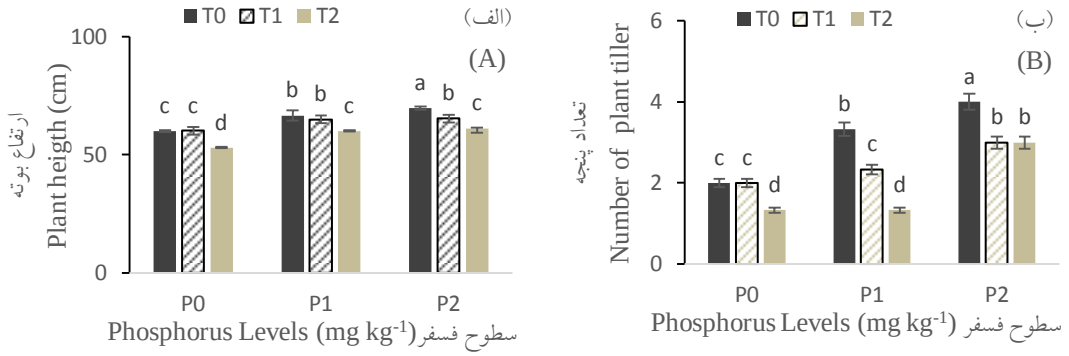
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس.

Table 2. Analysis of variance.

منبع تغییر Source of Variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square								
		شاخص کلروفیل گیاه Plant Chlorophyll Index	تعداد پنجه Number of Tillers	ارتفاع گیاه Plant Height	وزن خشک کل Total Dry weight	طول تجمعی ریشه Cumulative Root Length	سطح ریشه Root Area	قطر ریشه Root Diameter	جذب آهن Fe Uptake	جذب روی Zn Uptake	جذب پتاسیم K Uptake
تنش خشکی Drought Stress (DS)	1	2.49**	3.37**	226.7**	169**	311363.27**	0.04**	39490284503**	1.54**	0.036**	49822.2**
فسفر Phosphorus (P)	2	26.71**	5.59**	125**	40.8**	98647.95**	0.011**	11720983114**	2.91**	0.041**	9677.6**
تنش رطوبتی × فسفر (DS) × (P)	2	0.84*	0.53**	17.84**	3.63**	5856.34**	0.001**	1663187668**	0.27**	0.011**	939.1**
خطا Error	10	0.25	0.1	1.96	0.73	914.22	0.0003	2.62	0.06	11	81
ضریب تغییرات (درصد) CV%		1	12	2.27	7.90	6.30	9.15	9	17	0.0008	4.88

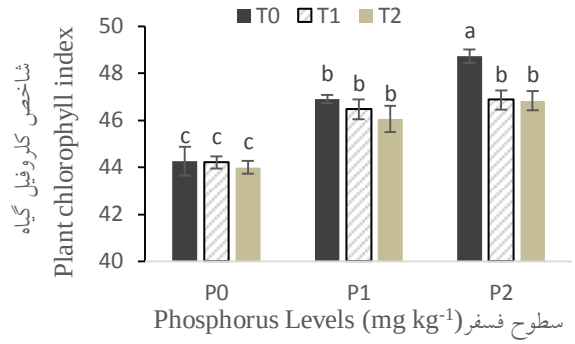
** و * به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد

**, * significant at the level of 1%, 5%, respectively



شکل ۱- تأثیر تنش خشکی و سطوح فسفر بر تعداد پنجه و ارتفاع گیاه.

Figure 1. Effect of drought stress and phosphorus levels on plant heigth (A) and number of tillers (B). T0:95%FC, T1: 70%FC, T2:50%FC, P1:0. P2:15 mg kg^{-1}, P3:25 mg kg^{-1}.

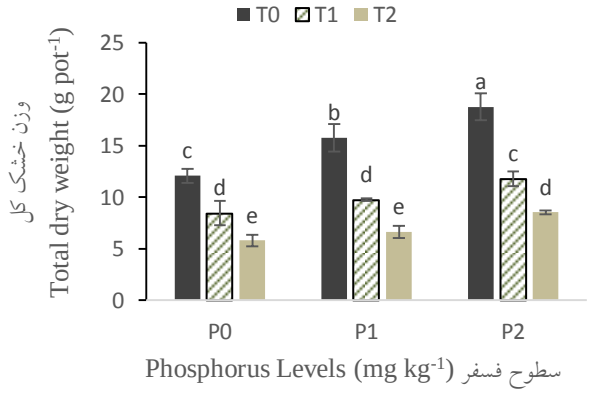


شکل ۲- تأثیر تنش خشکی و سطوح فسفر بر شاخص کلروفیل گیاه.

Figure 2. The effect of drought stress and phosphorus levels on plant chlorophyll index. T0:95%FC, T1: 70%FC, T2:50%FC, P1:0. P2:15 mg kg^{-1}, P3:25 mg kg^{-1}.

وزن خشک کل و فاکتور استرس فسفر: با توجه به نتایج این آزمایش، سطوح مختلف فسفر، تنش خشکی و اثر متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک کل داشتند (جدول ۲ و شکل ۳). همان‌طور که در جدول ۱ و شکل ۲ مشاهده می‌شود وزن خشک کل تحت‌تأثیر کمبود فسفر و خشکی کاهش یافت؛ در صورتی‌که با افزایش سطح فسفر در سطح ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کاهش تنش خشکی در سطح ۹۵ درصد بیش‌ترین تأثیر را بر وزن خشک کل بر روی این رقم مشاهده گردید، هم‌چنین نتایج نشان داد که افزایش فسفر در شرایط تنش خشکی (۵۰ و ۷۰ درصد) بر روی این پارامتر تأثیر به‌سزایی داشت؛ کاربرد فسفر به میزان ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در سطح رطوبت ۵۰ درصد، وزن خشک رقم سیروان را از ۵/۸۰ به ۸/۵۲ گرم در گلدان افزایش داده است، با توجه به نتایج به‌دست آمده از این پژوهش مشاهده می‌شود که افزایش وزن خشک کل در رقم سیروان می‌تواند به‌دلیل افزایش تعداد پنجه، ارتفاع و میزان کلروفیل گیاه، رشد ریشه و جذب عناصر غذایی باشد؛ هم‌چنین نتایج فاکتور استرس فسفر نشان داد که در شرایط کمبود فسفر و تش خشکی میزان وزن خشک در حدود ۷۰ درصد کاهش یافت، در صورتی

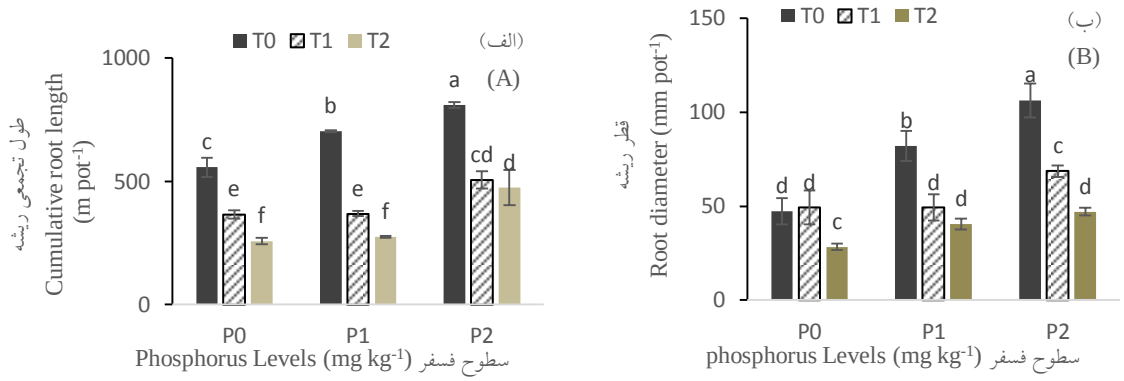
که با افزایش فسفر به میزان ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد، وزن خشک افزایش یافت و اثرات نامطلوب خشکی را به میزان ۳۵ درصد کاهش داد و این نتایج بیانگر تأثیر مثبت میزان مناسب فسفر در شرایط تنش خشکی می‌باشد که مطابق با یافته‌های بلال (۲۰۱۸) و نجی (۲۰۱۹) می‌باشد (۸، ۲۲).



شکل ۳- تأثیر تنش خشکی و سطوح فسفر بر وزن خشک کل.

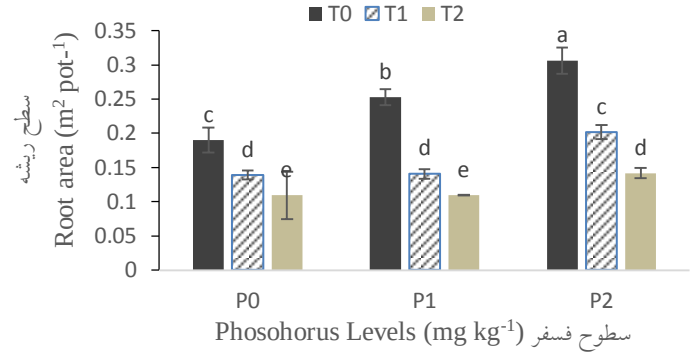
Figure 3. The effect of drought stress and phosphorus levels on total dry weight. T0:95%FC, T1: 70%FC, T2:50%FC, P1:0. P2:15 mg kg^{-1}, P3:25 mg kg^{-1}.

رشد و توسعه ریشه (طول تجمعی، سطح ریشه و قطر ریشه): رشد ریشه و ویژگی‌های مرتبط با آن از جمله طول، سطح و قطر ریشه تحت‌تأثیر سطوح فسفر و تنش خشکی قرار گرفت (جدول ۲، شکل‌های ٤ و ٥)؛ کمبود فسفر و تنش خشکی باعث کاهش ویژگی‌های رشد (طول، سطح و قطر) ریشه شدند، در صورتی‌که با کاربرد فسفر در سطح ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شرایط بدون تنش رطوبتی، افزایش رشد ریشه و پارامترهای آن را به همراه داشت، هم‌چنین مشاهده گردید که با افزایش تنش خشکی، کاربرد فسفر در سطح ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بر روی رشد ریشه و خصوصیات آن (طول، سطح و قطر ریشه) در این رقم مؤثر بوده است، به‌طوری‌که افزایش طول تجمعی، سطح و قطر ریشه به میزان ۸٤ ۳۰ و ٦۲ درصد نسبت به سطح شاهد با کاربرد فسفر به میزان ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد بدست آمد. افزایش فسفر در این سطح به دلیل نقش مهمی که در رشد ریشه (طول، سطح و قطر ریشه) و جذب عناصر غذایی داشت، رشد و نمو را در شرایط تنش خشکی افزایش داده است.



شکل ٤- تأثیر تنش خشکی و سطوح فسفر بر طول تجمعی ریشه و قطر ریشه.

Figure 4. The effect of drought stress and phosphorus levels on cumulative root length (A) and root diameter (B). T0:95%FC, T1: 70% FC, T2:50%FC, P1:0. P2:15 mg kg^{-1}, P3:25 mg kg^{-1}.



شکل ٥- تأثیر تنش خشکی و سطوح فسفر بر سطح ریشه.

Figure 5. The effect of drought stress and phosphorus levels on root area. T0:95%FC, T1: 70% FC, T2:50%FC, P1:0. P2:15 mg kg^{-1}, P3:25 mg kg^{-1}.

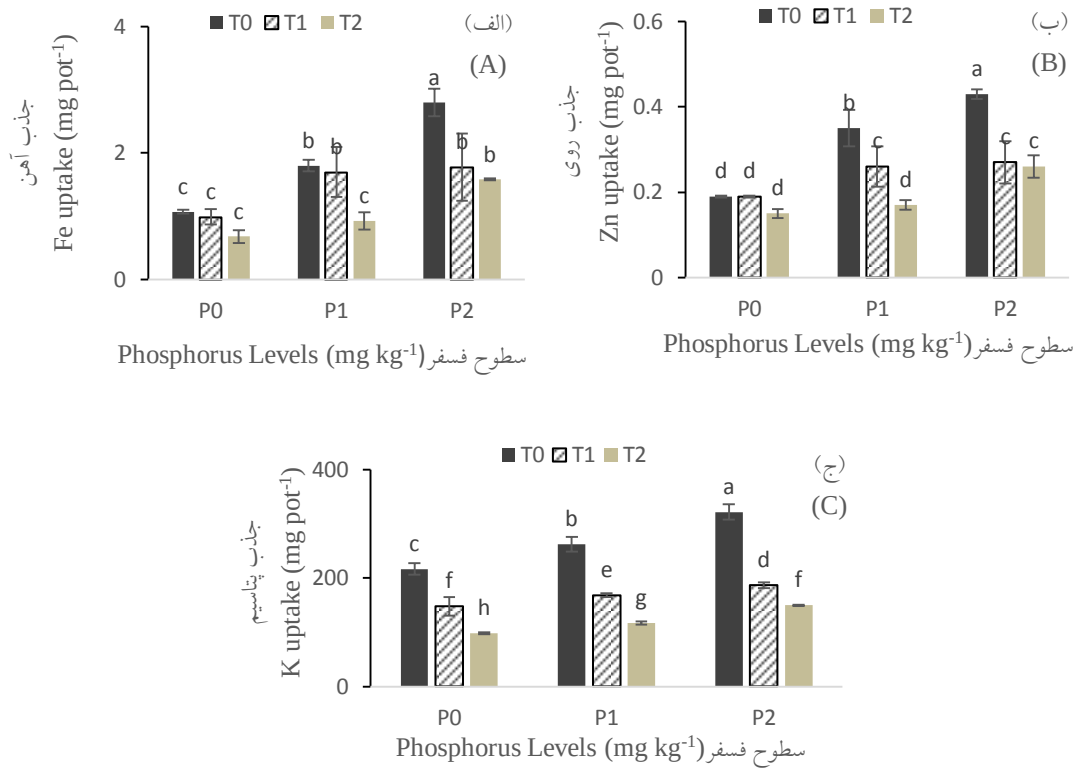
با توجه به نتایج این آزمایش، تنش خشکی و سطوح مختلف فسفر (جدول ۲) تأثیر معنی‌داری بر تعداد پنجه، ارتفاع گیاه، شاخص کلروفیل، وزن خشک کل و رشد ریشه داشت؛ همان‌طور که مشاهده می‌شود این پارامترها تحت‌تأثیر کمبود فسفر و افزایش خشکی کاهش یافتند؛ در صورتی‌که با افزایش سطح فسفر به میزان ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در شرایط عدم تنش خشکی (سطح ۹۵ درصد) بیش‌ترین تأثیر را بر روی این پارامترها مشاهده گردید؛ هم‌چنین با افزایش این سطح فسفر در شرایط تنش خشکی (۵۰ و ۷۰ درصد) تعداد پنجه، ارتفاع گیاه، میزان شاخص کلروفیل، وزن خشک کل و رشد ریشه افزایش یافتند. کاهش مقدار این صفات در شرایط تنش خشکی و بدون کاربرد فسفر ممکن است به‌دلیل کاهش سطح فسفر، میزان رشد ریشه و جذب عناصر غذایی باشد.

با توجه به این‌که فسفر در توسعه برگ، رنگدانه‌های کلروپلاست و فتوسنتز نقش به‌سزایی دارد؛ بنابراین کاهش این عنصر و افزایش تنش خشکی باعث بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز و

در نتیجه کاهش رشد و نمو گیاه شده است؛ بنابراین این احتمال وجود دارد که کاربرد فسفر و تأثیر آن در افزایش رشد ریشه منجر به افزایش جذب عناصر غذایی و آب قابل‌دسترس و افزایش میزان فتوسنتز شده است و بدین طریق باعث افزایش صفاتی از جمله شاخص کلروفیل، ارتفاع گیاه و تعداد پنجه شده است و نتیجتاً افزایش رشد را به همراه داشته است که مطابق با یافته های جان و همکاران (۲۰۱۷) و دینگ و همکاران (۲۰۱۷) می‌باشد (۱۲، ۲٦)؛ بنابراین خشکی با کاهش میزان فتوسنتز و آب سلولی باعث کاهش رشد در گیاه می‌شود (۳۵)، کاربرد فسفر منجر به افزایش رشد ریشه، هدایت هیدرولیکی سیستم ریشه، افزایش سرعت رشد و تجمع بایومس می‌شود (۳٦) و در نتیجه توانایی ریشه‌ها به استخراج آب خاک را افزایش و مقاومت به خشکی را زیاد می‌کند (۳۷). فسفر عنصر ضروری برای رشد و توسعه گیاهان از جمله گندم می‌باشد و دسترسی به این عنصر برای تولید و عملکرد محصول مهم می‌باشد (۳، ۵)، بنابراین با توجه به نتایجی که از این پژوهش به‌دست آمد، مشاهده گردید که با کاربرد میزان مناسب فسفر به خاک (قبل از کشت) در شرایط تنش خشکی به‌دلیل تأثیر مثبت آن بر روی زیست توده ریشه و گسترش آن در رقم مقاوم سیروان منجر به افزایش جذب آب و عناصر غذایی از خاک گردید و تحمل به تنش خشکی را در این رقم افزایش داد، ارقام مقاوم به‌دلیل نیاز بیش‌تر به عناصر غذایی برای افزایش رشد خود، رشد ریشه (طول تجمعی، قطر و سطح ریشه) را به عنوان راه‌کار خود برای مقاومتشان در برابر تنش خشکی بیش‌تر کرده و سطح مناسب کوددهی تأثیر بیش‌تری را بر روی آن‌ها در این شرایط می‌گذارد که با نتایج تاریق و همکاران (۲۰۱۷) و نجی و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد (٦، ۲۲). با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که در سطح تنش خشکی ۵۰ درصد و کاربرد فسفر ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم رشد طول تجمعی، قطر و سطح ریشه افزایش زیادی نداشته است (شکل‌های ٤ و ۵). مطالعات نشان می‌دهند که وقتی ریشه گیاه در معرض کمبود آب و فسفر در خاک قرار می‌گیرد، میزان رشد ریشه تغییر می‌کند. معماری سیستم ریشه با توجه به شدت تنش خشکی و کمبود فسفر، خصوصیات خاک، نوع گیاه و رقم متفاوت می‌باشد (۹، ۲۲)؛ هم‌چنین رشد ریشه تحت‌تأثیر میزان کربوهیدرات‌های تولید شده در گیاه است، بدین صورت که وقتی گیاه در شرایط کمبود فسفر و تنش خشکی قرار می‌گیرد در اوایل، رشد ریشه خود را افزایش می‌دهد ولی با افزایش کمبود فسفر در طولانی‌مدت به‌دلیل کاهش رشد اندام هوایی و کاهش محصولات فتوسنتز در گیاه رشد ریشه نیز کاهش خواهد یافت (۱، ۱۱، ۳۸، ۳۹). در صورتی‌که گیاهان کارا در شرایط تنش خشکی زیاد برای صرفه جویی انرژی، از میزان عناصر جذب شده از جمله فسفر در داخل گیاه بهترین استفاده را خواهند داشت، بنابراین خود را با شرایط تنش سازگار می‌کنند (۷). موری و همکاران (۲۰۱٦) در مطالعات خود نشان دادند که میزان جذب فسفر با توجه به خصوصیات ریشه و کارایی آن در گیاهان متفاوت می‌باشد (۱۱)، بنابراین گیاهان فسفر کارا وقتی در معرض کمبود فسفر قرار می‌گیرند طیف وسیعی از مکانیسم‌ها را فعال می‌کنند از جمله این که با افزایش کسب فسفر از خاک و یا استفاده کارآمدتر از فسفر داخلی کارایی فسفر را در گیاه افزایش می‌دهند (۷، ٤۰، ٤۱)، نتایج این پژوهش‌گران منطبق با یافته‌های ما در این پژوهش می‌باشد، بنابراین رقم سیروان با توجه به خصوصیات

فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه (جدول ۱)، با جذب و استفاده بهینه از عناصر غذایی به‌خصوص فسفر داخل گیاه مانع کاهش شدید رشد در شرایط تنش بیش‌تر (۵۰ درصد) شده است.

جذب عناصر غذایی (آهن، روی و پتاسیم): جذب آهن، روی و پتاسیم تحت‌تأثیر سطوح فسفر و تنش خشکی و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفتند (جدول ۲) و (شکل ٦). افزایش تنش خشکی (۵۰ و ۷۰ درصد) و کمبود فسفر منجر به کاهش جذب عناصر غذایی شدند؛ در صورتی‌که افزایش سطح فسفر ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در شرایط تنش (۵۰ و ۷۰ درصد) و عدم تنش خشکی (۹۵ درصد) جذب عناصر غذایی را افزایش داد؛ نتایج نشان داد که افزایش فسفر (۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد، جذب عناصر غذایی آهن را به میزان حدود ۲ برابر، روی ٦۰ درصد و پتاسیم را ۵۰ درصد نسبت به سطح شاهد افزایش داد که این افزایش جذب در رقم سیروان می‌تواند به‌دلیل خصوصیات ژنتیکی خوب این رقم، افزایش رشد ریشه و خصوصیات آن (طول، قطر و سطح ریشه) و نیاز بیش‌تر رقم سیروان برای افزایش ماده خشک خود باشد؛ بنابراین رقم سیروان از میزان جذب عناصر غذایی در شرایط تنش توانسته است بیش‌ترین استفاده را در بهبود رشد خود داشته باشد. همان‌طور که در نتایج اشاره شد، افزایش فسفر و تأثیر آن بر روی رشد ریشه بخصوص در شرایط تنش خشکی منجر به افزایش جذب عناصر غذایی پتاسیم، آهن و روی گردید. کمبود عناصر غذایی از جمله پتاسیم، آهن، روی و فسفر در بسیاری اراضی زیر کشت گندم جهان به ویژه در خاک‌های آهکی رایج است. میزان مناسب فسفر، پتاسیم، روی و آهن در گیاه با تأثیر مثبت بر فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی، باعث بهبود جذب و نگهداری آب در گیاه می‌شوند و مقاومت به خشکی را افزایش می‌دهند (٤۲، ٤۳، ٤٤، ٤۵، ٤٦). همان‌طور که اشاره شد، سیستم ریشه‌ای عمیق برای استخراج آب و عناصر غذایی کافی در شرایط استرس بسیار با اهمیت است. از آن‌جایی که فسفر نقش مهمی در افزایش رشد ریشه و استقرار خوب ارقام گندم و ایجاد مقاومت در برابر تنش‌های رطوبتی دارد (۷)، این عنصر باعث افزایش ظرفیت تبادلی ریشه گندم نیز می‌شود و در نتیجه جذب عناصر غذایی را افزایش می‌دهد (٤۷)؛ بنابراین تماس بیش‌تر ریشه با خاک، از فاکتورهای مهم برای جذب عناصر کم‌تحرک در خاک توسط گیاهان زراعی می‌باشد؛ البته میزان جذب آب و عناصر غذایی از خاک توسط گیاه با توجه به ظرفیت رشدی ریشه و نوع گیاه متفاوت می‌باشد.



شکل ٦- تأثیر تنش خشکی و سطوح فسفر بر جذب آهن، روی و پتاسیم.

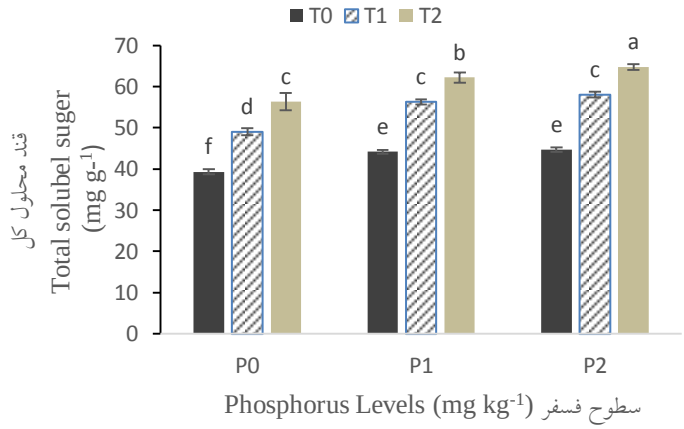
Figure 6. Effect of drought stress and phosphorus levels on Fe uptake (A), Zn uptake (B) and K uptake (C). T0:95%FC, T1: 70%FC, T2:50%FC, P1:0. P2:15 mg kg^{-1}, P3:25 mg kg^{-1}.

تأثیر میزان عناصر غذایی بذر کشت شده بر رشد و نمو: با توجه به نتایج غلظت عناصر غذایی، میزان فسفر، آهن، روی، کلسیم و پتاسیم در بذر رقم سیروان کشت شده به ترتیب ۰/٤۰ درصد، ۵۱ و ٤۵/۳۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ۰/۰۸٤ و ۰/۳٤ درصد بود. میزان غلظت عناصر غذایی در بذر رقم سیروان کشت شده در این مطالعه منطبق با غلظت مطلوب عناصر غذایی در بذرهای گندم می‌باشد (٤۸). نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که در رقم سیروان با داشتن میزان غلظت مناسب عناصر غذایی از جمله فسفر در بذر (رقم سیروان ۰/٤۰ درصد)، منجر به افزایش سرعت و درصد جوانه‌زنی بذر گردید، بنابراین رقم سیروان با افزایش رشد ریشه و استفاده بیش‌تر از فسفر و دیگر عناصر خاک، توانسته است با ایجاد نهال‌های قوی در مراحل رشد رویشی بیش‌ترین وزن خشک را به‌دست آورد. افزایش فسفر بذر محرکی برای رشد اولیه نهال و به عنوان پتانسیلی برای افزایش عملکرد به‌خصوص در شرایط کمبود فسفر می‌باشد، بنابراین با ذخیره عناصر بذر به‌خصوص میزان فسفر در خاک‌های آهکی به عنوان نیروی خوبی در مراحل اولیه رشد در تولید ریشه بیش‌تر و افزایش جذب فسفر و عناصر دیگر از خاک می‌باشد که منجر به افزایش بایومس ریشه و اندام هوایی و در نهایت افزایش وزن خشک می‌شود (٤۹) این پژوهش‌گران اشاره کردند که، گسترش سیستم ریشه در ایجاد مقاومت گندم در مرحله رشد رویشی مهم می‌باشد. ژنوتیپ‌های مقاوم و فسفر کارا در شرایط کمبود فسفر با داشتن ویژگی‌های عالی در

خصوصیات مورفولوژیکی ریشه به‌عنوان فاکتور مناسب برای ارزیابی آن‌ها در افزایش کارایی کسب و استفاده فسفر از خاک، بیش‌تر مورد توجه قرار می‌گیرند، بنابراین این ژنوتیپ‌ها با داشتن طول، سطح و قطر زیاد و با افزایش جذب فسفر منجر به افزایش عملکرد در آن‌ها می‌شود؛ البته خصوصیات ژنتیکی، میزان فسفر و شرایط محیط در فعالیت آن‌ها مؤثر می‌باشد و تفاوت در پاسخ ژنوتیپ‌ها به دلیل میزان جذب و استفاده‌های متفاوت آن‌ها می‌باشد (۹)، سطح بحرانی عناصر بذر برای رشد نهال تحت‌تأثیر منطقه، رقم و میزان فسفر محیط متفاوت می‌باشد (۵۰). بنابراین با توجه به میزان غلظت عناصر بذر گندم، بذر کشت شده در این پژوهش بالقوه قوی می‌باشد (۱۵). از آن‌جایی که افزایش در جذب عناصر، می‌تواند به‌دلیل استقرار خوب گیاه و توسعه ریشه در مراحل رشد اولیه باشد، بنابراین بذرهایی که تقریباً عناصر غذایی کافی را داشته باشند؛ به خوبی این تغییرات را بر روی گیاه و ریشه آن نشان می‌دهند.

قند محلول کل: میزان قند محلول کل تحت‌تأثیر سطوح فسفر، تنش خشکی و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفت. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود (شکل ۷) که افزودن فسفر به میزان ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در شرایط تنش و عدم تنش خشکی باعث افزایش قند محول گردید، که این میزان فسفر در شرایط تنش تأثیر بیش‌تری داشت؛ به‌طوری‌که قند محلول کل به میزان ٦٦ درصد نسبت به سطح شاهد در شرایط تنش خشکی ۵۰ درصد بیش‌تر بود. میزان قندهای محلول به عنوان محافظت‌کننده‌های اسمزی، نقش مهمی در افزایش مقاومت گیاهان در شرایط تنش رطوبتی به‌خصوص در ارقام مقاوم محسوب می‌شوند و تعیین این پارامتر از صفات بیوشیمیایی خوبی در شناسایی مقاومت ارقام می‌باشد؛ این احتمال وجود دارد که یکی از دلایل مقاومت رقم سیروان در شرایط تنش خشکی تأثیر میزان مناسب کود فسفر در افزایش رشد ریشه و جذب عناصر پتاسیم و فسفر باشد؛ از آن‌جایی که عنصر پتاسیم نقش مهمی در تنظیم اسمزی گیاه در شرایط تنش خشکی دارد (۵۱) و هم‌چنین تأثیر مثبت فسفر از طریق افزایش خصوصیات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی باعث افزایش قندهای محلول در گیاه می‌شوند (٦، ٢٦)، بنابراین این عناصر در کاهش اثرات تنش خشکی می‌توانند مؤثر باشند؛ هم‌چنین قندهای محلول در شرایط تنش خشکی با تنظیم اسمزی درون برگ برای جلوگیری از تعرق بیش‌تر و افزایش جذب آب مؤثر می‌باشند و در نتیجه این ترکیبات در رشد و توسعه گیاه نقش مهمی دارند (۵۲) و خصوصیات ژنتیکی ارقام می‌تواند در میزان این پارامتر مؤثر باشند و تفاوت در میزان قندهای محلول در گیاهان احتمالاً به دلیل شدت کمبود فسفر، زمان قرار گرفتن گیاه در برابر تنش و نوع رقم می‌تواند باشد (٢٦)، بنابراین رقم سیروان با توجه به خصوصیات ژنتیکی خوب و نیاز خود برای افزایش رشد و نمو در شرایط تنش خشکی با افزایش جذب عناصر به‌خصوص فسفر و پتاسیم و در نتیجه تولید قند محلول بیش‌تر مقاومت بیش‌تری را در این شرایط داشته است. با توجه به این‌که استرس خشکی مانع سنتز محصولات فتوسنتز و اختلال در تعادل کربن و فرآیندهای فیزیولوژیکی و در نتیجه باعث کاهش رشد گیاه می‌شود؛ از این رو در شرایط تنش رطوبتی، قندهای محلول در برگ گیاه افزایش می‌یابد و این افزایش قندهای محلول به عنوان منبع انرژی در برگ‌ها و انتقال آن‌ها به ریشه ممکن است یک استراتژی برای مقاومت گیاهان به خشکی باشد؛ بنابراین افزایش نسبت ریشه به اندام هوایی ارتباط مثبت با قندهای محلول در برگ‌ها دارد؛ بنابراین سنتز و متابولیسم قند برای رشد و توسعه ریشه تحت استرس خشکی مهم می‌باشد. سنتز قند در برگ‌ها و انتقال آن‌ها به ریشه منجر به افزایش رشد

ریشه، جذب آب و عناصر غذایی از خاک می‌شود، به‌عبارتی تنش رطوبتی به نوعی باعث تنظیم متابولیسم قند، کربوهیدرات و انتقال قند در گیاه می‌شود (۵۳). تنش رطوبتی از دلایل کاهش عملکرد گیاهان می‌باشد، بنابراین افزایش میزان قند به عنوان یکی از راه‌کارهای سازگاری گیاهان برای بهبود مقاومت در برابر تنش به‌خصوص در مراحل رشدی گیاه بسیار مهم می‌باشد (۳۸، ٥٤)، که این نتایج منطبق با یافته‌های ما در این پژوهش می‌باشد.



شکل ۷- تأثیر تنش خشکی و سطوح فسفر بر قند محلول کل.

Figure 7. The effect of drought stress and phosphorus levels on total soluble sugar.
T0:95%FC, T1: 70% FC, T2:50%FC, P1:0. P2:15 mg kg^{-1}, P3:25 mg kg^{-1}.

در این پژوهش از رقم سیروان به عنوان رقم مقاوم به خشکی استفاده شد و ویژگی‌هایی که باعث مقاومت این رقم در مرحله رشد رویشی به عنوان مرحله‌ای مهم برای گندم قبل از مرحله زایشی مورد بررسی قرار دادیم. از فاکتورهای مؤثر در ارزیابی کارایی ارقام مقاوم و کارامد می‌توان به علایم ظاهری گیاه، میزان رشد ریشه و اندام هوایی، میزان جذب و انتقال عناصر از ریشه به اندام هوایی، بهبود و یا افزایش کارایی مصرف بیوشیمیایی عنصر در سلول‌های گیاهی و غلظت عنصر در بافت‌های گیاهی اشاره کرد. ارقام کارامد با استقرار خوب از لحاظ رشد ریشه، اندام هوایی، جذب و انتقال عناصر غذایی در مرحله رشد رویشی می‌توانند افزایش عملکرد در گیاه را به همراه داشته باشند، بنابراین مرحله رشد رویشی می‌تواند مرحله مهمی برای افزایش تولید باشد و در توسعه ژنوتیپ‌های گیاهی کارآمد از لحاظ تغذیه‌ای در کنار کوددهی برای مقابله با محدودیت‌های ناشی از کمبود کمی و کیفی عناصر و جلوگیری از کاهش تولید محصول مورد اهمیت باشد. با ارزیابی رقم سیروان در مرحله رشد رویشی، همه این مشخصات ذکر شده، مشاهده گردید و این احتمال وجود دارد که به‌دلیل داشتن استقرار خوب در این مرحله باعث ایجاد مقاومت آن به خشکی شده است. در طی آزمایش انجام شده، نتایج نشان داد که رقم سیروان با افزایش جذب و استفاده بهینه فسفر و دیگر عناصر غذایی که منجر به افزایش رشد و نمو آن گردید و هم‌چنین فسفر با تأثیر مثبت بر افزایش میزان قند محلول کل و در نتیجه افزایش در رشد و توسعه ریشه در مرحله رشد رویشی باعث افزایش استقرار خوب این رقم در شرایط تنش شده است که با افزایش جذب عناصر و ذخیره آن‌ها در گیاه می‌تواند در انتقال به فاز زایشی و عملکرد دانه مؤثر باشد؛ بنابراین نتایج

ما دلالت بر این دارند که افزایش ماده خشک با توجه به کاربرد فسفر به عنوان معیاری معتبر در ارزیابی این رقم برای کارایی فسفر در مراحل رشد رویشی مورد اهمیت می‌باشد، که با نتایج ازترک (۲۰۰۵) و کورکمز و آلتیناس (۲۰۱٦) مطابقت دارد (۱٤، ۵۵)، به طوری که با افزایش فسفر خاک در سطح ۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم باعث افزایش ماده خشک گردید، این میزان فسفر به عنوان مقدار مناسب و متعادل در افزایش عملکرد در شرایط این آزمایش می‌باشد؛ از آن‌جایی که قدرت گیاه برای جذب فسفر با گذشت زمان به سرعت کاهش پیدا می‌کند و تنزل فسفر در طول فصل رشد به‌دلیل تثبیت در خاک و کاهش میزان رطوبت خاک منجر به کاهش عملکرد می‌شود، بنابراین با تغذیه مناسب فسفر در طول فصل رویشی این امکان را برای گیاه فراهم می‌کند که علاوه بر دوره رشد رویشی، مرحله رشد زایشی و توسعه فازهای بحرانی هم به خوبی انجام خواهد شد.

نتیجه‌گیری

کاربرد میزان مناسب فسفر باعث افزایش وزن خشک کل، سطح، قطر و طول ریشه، جذب عناصر غذایی، شاخص کلروفیل، ارتفاع، تعداد پنجه و میزان قند محلول کل در گیاه شد، به‌طوری که در سطح سوم فسفر (۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) این افزایش بیش‌تر از سطح دوم (۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود؛ هم‌چنین مشاهده شد که کاربرد سطح مناسب کود فسفر (۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) علاوه بر تأثیر مثبت در شرایط عدم تنش خشکی، نقش بسیار مؤثری بر روی رشد و نمو رقم سیروان در شرایط تنش خشکی نیز داشت. مطالعه رقم مقاوم سیروان در شرایط تنش خشکی از دیدگاه تغذیه نشان داد که این رقم به‌دلیل میزان نیاز خود به عناصر غذایی در افزایش رشد و نمو، با تغییر در رشد ریشه و خصوصیات آن، خود را با شرایط تنش سازگار کرده و هم‌چنین تغذیه مناسب عناصر بر روی کارایی این رقم در افزایش مقاومتش مؤثر بوده است؛ بنابراین علاوه بر انتخاب ارقام مقاوم و کارا برای مقابله با تنش خشکی می‌توان با مدیریت تغذیه مناسب این کارایی و توانایی را افزایش داد، در این پژوهش با بررسی میزان جذب عناصر غذایی آهن، روی و پتاسیم و افزایش میزان قند محلول کل در رابطه با رشد و نمو رقم سیروان مشخص شد که فسفر بر روی این رقم تأثیر مثبت داشته است و مقاومت به تنش خشکی را افزایش داده است.

سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد برای حمایت مالی از این طرح پژوهشی (کد ۳/٤۸٦۹٦) تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Sharma, S., Chen, C., Khatri, K., Rathore, M., and Pandey, S. 2019. *Gracilaria dura* extract confers drought tolerance in wheat by modulating abscisic acid homeostasis. Plant Physiology and Biochemistry. 136: 143-154.
2. Zhang, B., Zhang, H., Wang, H., Wang, P., Wu, Y., and 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. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 49: 7. 862-874.
3. Zhu, X.K., Li, C.Y., Jiang, Z.Q., Huang, L.L., Feng, C.N., Guo, W.S., and Peng, Y.X. 2012. Responses of phosphorus use efficiency, grain yield, and quality to phosphorus application amount of weak-gluten wheat. Journal of Integrative Agriculture. 11: 7. 1103-1110.

4.Kang, L.Y., Yue, S.C., and 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. Journal of Integrative Agriculture. 13: 9. 2028-2039.
5.Pang, J., Zhao, H., Bansal, R., Bohuon, E., Lambers, H., Ryan, M.H., and Siddique, K.H.M. 2018. Leaf transpiration plays a role in phosphorus acquisition among a large set of chickpea genotypes: leaf transpiration and P acquisition in chickpea. Plant, Cell & Environment. 41: 9. 2069-2079.
6.Tariq, A., Pan, K., Olatunji, O.A., Graciano, C., Li, Z ., Sun, F., Zhang, L., Wu, X., Wenkai Chen, W., Song, D., Huang, D., Xue, T., and Zhang, A. 2018. Phosphorous fertilization alleviates drought effects on alnus cremastogyne by regulating its antioxidant and osmotic potential. Scientific Reports. 8: 1. 1-11.
7.Deng, Y., Teng, W, Tong, Y, Chen, X., and Zou, C. 2018. Phosphorus efficiency mechanisms of two wheat cultivars as affected by a range of phosphorus levels in the field. Frontiers in Plant Science. 9:1614.
8.Bilal, H.M., Aziz, T., Maqsood, M.A., Farooq, M., and Yan., G. 2018. Categorization of wheat genotypes for phosphorus efficiency. PLOS ONE. 13: 11. e0205471.
9.Sidhu, S.K., Kaur, J., Singh, S., Grewal, S.K., and Singh, M. 2018. Variation of morpho-physiological traits in geographically diverse pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) *Millsp*] germplasm under different phosphorus conditions. Journal of Plant Nutrition. 41: 10. 1321-1332.
10.Campos, P., Borie, F., Cornejo, P., López-Ráez, J.A, López-García, A., and Seguel, A. 2018. Phosphorus acquisition efficiency related to root traits: Is mycorrhizal symbiosis a key factor to wheat and barley cropping?. Frontiers in Plant Science. 9: 752.
11.Mori, A., Fukuda, T., Vejchasarn, P., Nestler, J., Pariasca-Tanaka, J., and Wissuwa, M. 2016. The role of root size versus root efficiency in phosphorus acquisition in rice. Journal of Experimental Botany. 67: 4. 1179-1189.
12.Jun, W., Ping, L., Zhiyong, L., Zhansheng, W, Yongshen, L., and Xinyuan, G. 2017. Dry matter accumulation and phosphorus efficiency response of cotton cultivars to phosphorus and drought. Journal of Plant Nutrition. 40: 16. 2349-2357.
13.Abbadi, J. 2017. Evaluation of mechanisms of phosphorus use efficiency in traditional wheat cultivars for sustainable cropping. Journal of Food Security. 5: 197-211.
14.Ozturk, L., Eker, S., Torun, B., and Cakmak, I. 2005. Variation in phosphorus efficiency among 73 bread and durum wheat genotypes grown in a phosphorus-deficient calcareous soil. Plant and Soil. 269: 1. 69-80.
15.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. 235p. (In Persian)
16.Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R. 1982. Methods of soil analysis. Part 2. chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy: Soil Science So, Madison, Wisconsin, USA. 1142p.
17.Black, C.A. 1965. Methods of soil analysis: part I. physical and mineralogical properties. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA. 1122p.
18.Zandi, Z., Khorasani, R., and Halaj Nia, A. 2021. Investigating the effect of silicon on phosphorus absorption and wheat plant growth under moisture stress in a calcareous soil. Environmental Stresses in Agricultural Sciences. 14: 3. 665-673. (In Persian)
19.Moshiri, F., Tehrani, M.M., Shahabi, A.A., Keshavarz, P., Khoger, Z., Faizi Asl, W., Asadi Rahmani, H., Samawat, S., Sadari, M.H., Rashidi, N., Saadat, S., and Khademi, Z. Recipe for integrated management of soil fertility and wheat nutrition. 2013. Soil and Water Research Institute. Karaj, Iran. 88p. (In Persian)

20. Atarodi, B., Fotovat, A., Khorassani, R., Keshavarz, P., and Hammami, H. 2018. Interaction of selenium and cadmium in wheat at different salinities. Toxicological & Environmental Chemistry. 100: 3. 348-360.
21. Pourmeidani, A., Jafari, A.A., and Mirza, M. 2017. Studying drought tolerance in Thymus kotschyanus accessions for cultivation in dryland farming and low efficient grassland. Journal of Rangeland Science. 7: 4. 331-340. (In Persian)
22. Nejia, M ., Kouasa, S., Gandoura, M., Aydib, S., and Abdellya, C. 2019. Genetic variability of morpho-physiological response to phosphorus deficiency in tunisian populations of *Brachypodium hybridum*. Plant Physiology and Biochemistry. 143: 246-256.
23. Sun, Y., Mu, C., Chen, Y., Kong, X., Xu, Y., Zheng, H., Zhang, H., Wang, Q., Xue, Y., Li, Z., and Ding, Z. 2016. Comparative transcript profiling of maize inbreds in response to long-term phosphorus deficiency stress. Plant Physiology and Biochemistry. 109: 467-481.
24. Karimzadeh, J., Alikhani, H.A., Etesami, H., and Pourbabaei, A.A. 2021. Improved phosphorus uptake by wheat plant (*Triticum aestivum* L.) with rhizosphere fluorescent pseudomonads strains under water-deficit stress. Journal of Plant Growth Regulation. 40: 1. 162-178.
25. Shabani, E., Bolandnazar, S., Tabatabaei, S.J., Najafi, N., Alizadeh-Salteh, S., and Rouphael, Y. 2018. Stimulation in the movement and uptake of phosphorus in response to magnetic P solution and arbuscular mycorrhizal fungi in ocimum basilicum. Journal of Plant Nutrition. 41: 13. 1662-1673.
26. Ding, Z., Jia, S., Wang, Y., Xiao, J., and Zhang, Y. 2017. Phosphate stresses affect ionome and metabolome in tea plants. Plant Physiology and Biochemistry. 120: 30-39.
27. Kalra, Y. 1997. Handbook of reference methods for plant analysis. Soil and plant analysis council Inc. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor and Francis Group. 291p.
28. Krishnasamy, K., Bell, R., and Ma, Q. 2014. Wheat responses to sodium vary with potassium use efficiency of cultivars. Frontiers in Plant Science. 5: 631.
29. Senila, M., Drolc, A., Pintar, A., Senila, L., and Levei, E. 2014. Validation and measurement uncertainty evaluation of the ICP-OES method for the multi-elemental determination of essential and nonessential elements from medicinal plants and their aqueous extracts. Journal of Analytical Science and Technology. 5: 1. 1-9.
30. Series, S.C. 1992. Plant analysis reference procedures for the southern region of the United States. Southern Cooperative Series Bulletin 368. 68p.
31. Wieczorek, D., Żyszka-Haberecht, B., Kafka, A., and Lipok, J. 2022. Determination of phosphorus compounds in plant tissues: from colourimetry to advanced instrumental analytical chemistry. Plant Methods. 18: 1. 1-17.
32. El Mazlouzi, M., Morel, C., Chesseron, C., Robert, T., and Mollier, A. 2020. Contribution of external and internal phosphorus sources to grain P loading in durum wheat (*Triticum durum* L.) grown under contrasting P levels. Frontiers in Plant Science. 11: 870.
33. Pariasca-Tanaka, J., Vandamme, E., Mori, A., Segda, Z., Saito, K., Rose, T. J., and Wissuwa, M. 2015. Does reducing seed-P concentrations affect seedling vigor and grain yield of rice?. Plant and Soil. 392: 1. 253-266.
34. Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.T., and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Analytical Chemistry. 28: 3. 350-356.
35. Wang, X., Shen, J., and Liao., H. 2010. Acquisition orutilization,which is more critical for enhancing phosphorus efficiency inmoderncrops?. Plant Science. 179: 4. 302-306.
36. Razaq, M., Zhang, P., Shen., and Salahuddin, H.L. 2017. Influence of nitrogen and phosphorous on the growth and root morphology of acer mono. PLOS ONE. 12: 2. e0171321.

37.Meng, L.S., and Yao, S.Q. 2015. Transcription co-activator arabidopsis angustifolla3 (AN3) regulates water-use efficiency and drought tolerance by modulating stomatal density and improving root architecture by the transrepression of yoda (YDA). Plant Biotechnology Journal. 13: 7. 893-902.
38.Du, Y., Zhao, Q., Chen, L., Yao, X., Zhang, W., Zhang, B., and Xie, F. 2020. Effect of drought stress on sugar metabolism in leaves and roots of soybean seedlings. Plant Physiology and Biochemistry. 146: 1-12.
39.Mollier, A., and Pellerin, S. 1999. Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. Journal of Experimental Botany. 50: 333. 487-497.
40.Vance, C.P., Uhde-Stone, C., and Allan, D.L. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. New Phytologist. 157: 3. 423-447.
41.McDonald, G., Bovill, W., Taylor, J., and Wheeler, R. 2015. Responses to phosphorus among wheat genotypes. Crop and Pasture Science. 66: 5. 430-444.
42.Hafeez, B., Khanif, Y.M., and Saleem, M. 2013. Role of zinc in plant nutrition-a review. American Journal of Experimental Agriculture. 3: 2. 374-391.
43.Pavia, I., Roque, J., Rocha, L., Ferreira, H., Castro, C., Carvalho, A., Silva, E., Brito, C., Goncalves, A., Lima-Brito, J., and Correia, C. 2019. Zinc priming and foliar application enhances photoprotection mechanisms in drought-stressed wheat plants during anthesis. Plant Physiology and Biochemistry. 140: 27-42.
44.Singh, G., Sarvanan, S., Rajwat, K.S., Rathore, J.S., and Singh, G. 2017. Effect of different micronutrient on plant growth, yield and flower bud quality of broccoli (*Brassica oleracea*). Current Agriculture Research Journal. 5: 1. 108-115.
45.Zahoor, R., Zhao, W., Abid, M., Dong, H., and Zhou, Z. 2017. Potassium application regulates nitrogen metabolism and osmotic adjustment in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) functional leaf under drought stress. Journal of Plant Physiology. 215: 30-38.
46.Zhang, X., Zhang, D., Sun, W., and Wang, T. 2019. The adaptive mechanism of plants to iron deficiency via iron uptake, transport, and homeostasis. International Journal of Molecular Sciences. 20: 10. 2424.
47.Ahmed, M., Khan, S., Irfan, M., Aslam, M.A., Shabbir, G., Ahmad, S., Fahad, S., Basir, A., and Adnan, M. 2018. Effect of phosphorus on root signaling of wheat under different water regimes. P 1-29. In: S. Fahad, A. Basir, and M. Adnan (eds), Global Wheat Production. London: Intech Open.
48.Ghaibi, M.N., and Malkuti, M.J. 2014. Optimum wheat nutrition guide, second edition. Publication of agricultural education. Karaj, Iran. 119p. (In Persian)
49.Ros, C., Bell, R.W., and White, P.F. 1997. Effect of seed phosphorus and soil phosphorus applications on early growth of rice (*Oryza sativa* L.) cv. IR66. Soil Science and Plant Nutrition. 43: 3. 499-509.
50.Bolland, M.D.A., and Baker, M. J. 1988. High phosphorus concentrations in seed of wheat and annual medic are related to higher rates of dry matter production of seedlings and plants. Australian Journal of Experimental Agriculture. 28: 6. 765-770.
51.Yokoi, S., Bressan, R.A., and Hasegawa, P.M. 2002. Salt stress tolerance of plants. Japan International Research Center for Agricultural Sciences Working Report. 23: 1. 25-33.
52.Serraj, R.A.C. H.I.D., and Sinclair, T.R. 2002. Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions?. Plant, Cell & Environment. 25: 2. 333-341.
53.Xu, W., Cui, K., Xu, A., Nie, L., Huang, J., and Peng, S. 2015. Drought stress condition increases root to shoot ratio via alteration of carbohydrate partitioning and enzymatic activity in rice seedlings. Acta Physiologiae Plantarum. 37: 2. 9.

54.Deryng, D., Conway, D., Ramankutty, N., Price, J., and Warren, R. 2014. Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures. Environmental Research Letters. 9: 3. 034011.

55.Korkmaz, K., and Altıntaş, C. 2016. Phosphorus use efficiency in canola genotypes. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology. 4: 6. 424-430.