Research Article

Agricultural Engineering., 48(3) (2025) 387- 410 ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2025.49543.1777 ISSN (E): 2588-5944

Study of phosphorus uptake and utilization efficiency of safflower cultivars in Fars, Isfahan, Kerman and northern Khuzestan under phosphorus deficiency conditions

F. Nourgholipour[1*] L. Rezakhani[2], M. Rajai[3], K. Mirzashahi[4], H. Naghavi[5]and M. Yahyaabadi[6]

1. Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran
2. Ph.D Graduate of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
3. Associate Professor, Fars Province Agricultural and Natural Resources Research Center; Agricultural Research, Education and Extension Organization, Shiraz, Iran
4. Assistant Professor, Dezful Agricultural and Natural Resources Research Center; Agricultural Research, Education and Extension Organization, Dezful, Iran
5. Assistant Professor, Kerman Province Agricultural and Natural Resources Research Center; Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kerman, Iran
6. Assistant Professor, Isfahan Province Agricultural and Natural Resources Research Center; Agricultural Research, Education and Extension Organization, Isfahan, Iran

Received: 01 May 2025 Accepted: 10 September 2025 *Corresponding Author: nourfg@yahoo.com

Abstract

Introduction: Phosphorus (P) is an essential nutrient for plant growth that affects all biochemical and growth reactions. Compared to other essential elements, this element has low bioavailability for plants, which is due to the precipitation of phosphorus in the form of calcium phosphate in calcareous soils. The average of phosphorus available in 2.5 million hectares of Iranian arable land (70.2% of irrigated land) is less than 15 mg/kg. Due to the lack of phosphorus (P) in a large area of Iran's agricultural soils and the increasing price of phosphorus fertilizers, it is necessary to recommend phosphorus fertilizers more precisely. Identifying phosphorus-efficient safflower cultivars can help reduce the amount of phosphorus fertilizer consumption. Therefore, this study was conducted to investigate the growth, seed and oil yield and phosphorus efficiency indices in different safflower cultivars. Oilseeds after cereals, provide the most energy in the human diet, and are an important source of protein and vitamins. Safflower (*Carthamus tinctorius*) ranks eighth in the world in terms of oilseed production after soybean (*Glycine max* L.), peanut (*Arachis hypogaea* L.), rapeseed (*Brassica napus* L.), sunflower (*Helianthus annus* L.), sesame (*Sesamum indicum* L.), flax (*Linium usitatissimum* L.), and castor (*Ricinus communis* L.).

Materials and Methods: A factorial experiment was carried out in Darab, Isfahan, Dezful, and Kerman regions of Iran in a randomized complete block design with three replications (in 2018 and 2019). The factors included P rates of 0, 10, 20, 30, and 40 kg P ha^{-1} from Triple superphosphate and safflower cultivars Padideh and Goldasht for Isfahan and Darab and Goldasht and Soffeh for Kerman and Dezful regions. The available P in Isfahan, Darab, Kerman and Dezful soil was 10.2, 11, 7, and 7.18 mg kg^{-1}, respectively. After the end of the rosette period and before flowering (before the two-digit growth code 62), five whole plant samples were randomly prepared from each plot and the plant

© 2025 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

dry weight (DW), phosphorus concentration and plant phosphorus uptake (product of dry weight multiplied by plant phosphorus concentration) were determined at this stage of growth. Shoot dry weight (DW) and P concentration, grain yield and phosphorus efficiency (PE) of DW and grain, P acquisition efficiency (PACE) and P use efficiency (PUTE) of DW was measured too. Statistical analysis of the results, including analysis of variance and Duncan's multiple range test model (p<0.05), was performed using SAS 9.4 software.

Results and Discussion: Based on the results, the soil texture in Isfahan, Darab and Dezful regions was heavier than Kerman region. Organic carbon in all soils was low and calcium carbonate equivalent was high. The soils were non-saline (slightly saline in Isfahan region), with insufficient potassium in Isfahan, Kerman and Dezful regions, and phosphorus content was moderate in all regions. The experiment revealed significant differences in the response of safflower cultivars to soil and fertilizer phosphorus, particularly in biomass yield and phosphorus efficiency indices. Application of 10 kg P ha^{-1} in Darab, 20 kg in Dezful, 10 kg in Isfahan, and 30 kg in Kerman increased grain yield by 20%, 78%, 28%, and 237% compared to the control treatment, respectively. The results showed that the main effect of P rate was significant on PUTE of DW ($p<0.01$), PACE ($p<0.05$), PE of grain ($p<0.05$), PE of DW ($p<0.01$) in Darab, Dezful, Dezful, Isfahan regions, respectively. The main effect of cultivar was also significant on PE of DW ($p<0.01$) in Darab and PUTE of DW ($p<0.01$, $p<0.05$) in Isfahan and Kerman regions, respectively. The P efficiency of DW had a higher correlation with the PACE of DW ($R^2=0.45^{**}$, 0.19^{*}, 0.43^{**}, 0.57^{**}, respectively in Isfahan, Darab, Kerman and Dezful regions) compared to the correlation of PE with PUTE (in all four regions non-significant).

Conclusion: The results of the present study showed that the studied cultivars have different responses to phosphorus application. For safflower crop in warm regions with average of 10 mg P kg-1 soil, application of 10 kg P ha-1 is recommended, while for soils with average of 7 mg P kg-1, application of 30 kg P ha-1 is suggested. It seems that safflower can uptake further amounts of P if we use further amounts of fertilizer but can still produce optimum yields with lower phosphorus percentages in aerial parts. A phosphorus concentration of 0.18% is deficient, while 0.23% is sufficient in safflower aerial parts during the stem elongation growth stage.

Keywords: ***Concentration, Cultivars, Phosphorus Uptake Efficiency, Phosphorus Utilization, Safflower, Sufficiency,***

مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی) جلد ۴۸. شماره ۳، ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی

بررسی میزان کارایی جذب و مصرف فسفر ارقام گلرنگ در فارس، اصفهان، کرمان و شمال خوزستان در شرایط کمبود فسفر

فریدون نورقلی پور[1*]، لیلا رضاخانی[2]، مجید رجایی[3]،کامران میرزاشاهی[4]، هرمزد نقوی[5] و مجتبی یحیی آبادی[6]

۱- استادیار موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۲- دانش آموخته دکتری خاکشناسی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳- دانشیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
٤- استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی دزفول؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران
٥- استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران
٦- استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۱

پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۶/۱۹

کلمات کلیدی:
کارایی جذب فسفر،
کفایت،
غلظت،
گلرنگ،
ارقام،
مصرف فسفر

* عهده دار مکاتبات

Email: nourfg@yahoo.com

چکیده

به‌منظور بررسی واکنش ارقام مختلف گلرنگ به‌میزان فسفر، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مناطق داراب، اصفهان، دزفول و کرمان (سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸) اجرا شد. فاکتور اول عبارت بود از: ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ٤۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار از منبع سوپر فسفات تریپل و فاکتور دوم ارقام گلرنگ گلدشت و پدیده برای مناطق اصفهان و داراب و ارقام گلدشت و صفه برای مناطق کرمان و دزفول. فسفر قابل‌دسترس در خاک اصفهان، داراب، کرمان و دزفول به ترتیب ۱۰/۲، ۱۱، ۷ و ۷/۱۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. صفات وزن خشک اندام هوایی، غلظت فسفر، عملکرد دانه، فسفر کارایی، کارایی جذب و مصرف فسفر در این آزمایش اندازه‌گیری شد. نتایج تجزیه مرکب دوساله نشان داد که کاربرد ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار در داراب، ۲۰ کیلوگرم در دزفول، ۱۰ کیلوگرم در اصفهان و ۳۰ کیلوگرم در کرمان به ترتیب ۲۰، ۷۸، ۲۸ و ۲۳۷ درصد عملکرد دانه را نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. فسفر کارایی با کارایی جذب فسفر دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری بود (اصفهان **۰/٤٥، داراب *۰/۱۹، کرمان**۰/٤۳ و دزفول **۰/٥۷). با توجه به نتایج به دست آمده در مناطق گرم با ۱۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک، کاربرد ۱۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار و در مناطق با ۷ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک، کاربرد ۳۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار توصیه می‌گردد. همچنین می‌توان غلظت ۰/۱۸ درصد فسفر در اندام هوایی گلرنگ در مرحله رشد ساقه‌دهی را به‌صورت کمبود و ۰/۲۳ درصد را به‌صورت کفایت در نظر گرفت.

مقدمه

فسفر (P) یکی از عناصر غذایی ضروری برای رشد گیاهان است که بر تمام واکنش‌های بیوشیمیایی و رشدی آنها تأثیر می‌گذارد (۶ و ۷). این عنصر در مقایسه با سایر عناصر پرمصرف، فراهمی زیستی پایینی برای گیاهان دارد (۴۰) و این به دلیل رسوب فسفر به شکل فسفات کلسیم در خاک‌های آهکی است (۳۲). خواص شیمیایی خاک‌های آهکی به دلیل وجود کربنات کلسیم می‌تواند بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی گیاهی مانند فسفر تأثیر بگذارد (Taalab *et al*., 2019). بیش از ۸۷ درصد خاک‌های کشاورزی ایران حاوی بیش از ۵ درصد کربنات کلسیم و حدود ۵۸ درصد از این خاک‌ها دارای ۱۰ تا ۴۰ درصد کربنات کلسیم هستند (۴۶). مقدار فسفر قابل‌دسترس در ۵/۲ میلیون هکتار از اراضی زراعی ایران (۷۰/۲ درصد اراضی آبی) کمتر از ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم است (۵۴). نمونه‌برداری‌های انجام‌شده از خاک مزارع پایلوت کلزا (از سال ۱۳۹۶تا ۱۳۹۹) در سراسر کشور نشان داد که مقدار فسفر قابل‌دسترس در ۸۱ درصد از مزارع کشور به محدوده کمتر از ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسیده است (۳۶).

دانه‌های روغنی منابع مهمی جهت تأمین پروتئین و ویتامین‌های موردنیاز انسان هستند. همچنین مشخص‌شده است این گیاهان، بعد از غلات، بیشترین نقش را در تأمین انرژی غذایی موردنیاز انسان ایفا می‌کنند. گلرنگ (*Carthamus tinctorius*) ازنظر تولید دانه‌های روغنی پس از سویا (*Glycine max* L)، بادام‌زمینی (*Arachis hypogaea* L)، کلزا (*Brassica napus* L)، آفتابگردان (*Helianthus annus* L)، کنجد (*Sesamum indicum* L) کتان (*Linium usitatissimum* L) و کرچک (*Ricinus communis* L) در رتبه هشتم جهان قرار دارد (۲۲). در سال ۲۰۲۳، سطح زیر کشت، تولید و متوسط عملکرد دانه گلرنگ در جهان به ترتیب ۹۱۱ هزار هکتار، ۷۲۴ هزار تن و ۷۹۵ کیلوگرم در هکتار بود (۱۴). بیشترین حجم تولید متعلق به قزاقستان و سپس هند می‌باشد (۲۲). مساحت کشت گلرنگ در ایران ۷۹۲۴ هکتار و میزان تولید در ایران حدود ۱۱۰۴۹ تن است (۵۱). بیشترین مساحت کشت این گیاه نیز در استان‌های اصفهان، فارس، کرمان و همدان می‌باشد (۵۱). میانگین عملکرد گلرنگ در زراعت آبی در شرایط کمبود فسفر در ایران بر اساس منطقه، ارقام و شدت کمبود فسفر بین ۱۲۵۴ تا ۱۴۶۴ کیلوگرم در هکتار است (۳۳). میانگین عملکرد گلرنگ در زراعت آبی در کشور حدود ۲۳۹۸ کیلوگرم در هکتار و در زراعت دیم حدود ۴۲۱ کیلوگرم در هکتار می‌باشد (۵۱). میانگین عملکرد این محصول (برای میانگین شرایط آبی و دیم) در جهان ۸۰۰ کیلوگرم در هکتار است (۱۵).

اثر قابل‌توجه فسفر بر عملکرد و تولید گلرنگ در مطالعات قبلی گزارش‌شده است (۴۸ و ۵۰). کودهای فسفری می‌توانند بر ارتفاع بوته، رشد زایشی و تعداد کپسول در بوته در گلرنگ تأثیرگذار باشند (۲۰). مقادیر کود فسفر توصیه‌شده برای عملکرد بهینه گلرنگ در محدوده ۷ تا ۴۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار است که به وضعیت فسفر موجود در خاک، آبیاری یا دیم بودن مزارع، بستگی دارد (۴). مقدار توصیه برای شرایط سرد ایران ۱۰ کیلوگرم در هکتار فسفر خالص به دست آمد (۳۵).

گیاهان از برخی استراتژی‌های تطبیقی مورفولوژیک، فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی برای جذب فسفر در شرایط کمبود فسفر استفاده می‌کنند (۵۵). این مکانیسم‌های تطبیقی شامل کاهش سرعت رشد، افزایش رشد در واحد فسفر جذب‌شده (۲۶)، جابجایی درونی فسفر، تغییر در اسیدیته محیط ریزوسفر ریشه (۳۸)، افزایش در تولید و ترشح اسیدهای آلی و آنزیم‌های فسفاتاز، تغییر در معماری سیستم ریشه، افزایش سطح تماس ریشه به دلیل افزایش رشد ریشه (۸) و افزایش تولید ناقلین فسفر معدنی (۴۰) می‌باشند. مکانیسم‌های تطبیقی را می‌توان بر اساس تأثیر بر جذب یا راندمان استفاده از فسفر طبقه‌بندی کرد (۳۵).

مطالعات مختلف نشان داده است که تفاوت بین گیاهان ازنظر کارایی مصرف عناصر غذایی می‌تواند بسته به نوع عنصر، گونه‌های گیاهی و ارقام و شرایط محیطی رشد گیاه، متفاوت باشد(۴۴). بر اساس بررسی منابع (۵۶،

۱۸،۲۳،۱۲،۳۵)، اگرچه تحقیقات زیادی در مورد کارایی فسفر در گیاهان دانه‌های روغنی انجام‌شده است، اما این اطلاعات در مورد گلرنگ محدود است. گزارش‌شده است که کارایی استفاده از فسفر در گلرنگ کمتر از آفتابگردان است (۲). بر اساس مطالعه انجام‌شده توسط آبادی[1] (۱) با افزایش میزان کاربرد فسفر، راندمان جذب فسفر در گلرنگ کاهش یافت. گلرنگ در شرایط کمبود فسفر دارای تراکم ویژه ریشه، شعاع ریشه کمتر و سرعت رشد اندام هوایی کندتر بود (۱). اندام هوایی گلرنگ نسبت به ریشه تقاضای بیشتری برای فسفر در شرایط فسفر کم دارد (۱).

برخلاف سایر گیاهان، مقدار فسفر توصیه‌شده برای گلرنگ در مناطق مختلف ایران هنوز به‌صورت دقیق مشخص نشده است. ضمناً شناسایی ارقام فسفر کارای گلرنگ می‌تواند به کاهش میزان مصرف کود فسفر کمک کند. لذا با توجه به کمبود فسفر در سطح وسیعی از خاک‌های کشاورزی ایران و روند افزایشی قیمت کود فسفر، توصیه دقیق‌تر به جهت استفاده بهینه از کود فسفر ضروری است. بنابراین، این مطالعه به‌منظور بررسی رشد، عملکرد دانه و روغن و شاخص‌های کارایی فسفر در ارقام مختلف گلرنگ تحت تأثیر میزان کاربرد کود فسفر انجام شد. نتایج تحقیق می‌تواند به‌عنوان راهبردی برای کاربرد مؤثرتر کود فسفر و بهبود عملکرد دانه و روغن گلرنگ در خاک‌های آهکی ایران مورداستفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های خاک و شرایط آب و هوایی مناطق مختلف

این مطالعه در ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی مناطق داراب (استان فارس)، اصفهان، دزفول (استان خوزستان) و کرمان انجام شد. مشخصات و موقعیت مکانی این ایستگاه‌ها در جدول یک ارائه‌شده است.

قبل از کاشت، خصوصیات خاک شامل بافت خاک (۱۷)، درصد کربن آلی (۳۱)، عناصر غذایی کم‌مصرف (۲۷)، کربنات کلسیم معادل (۲۸)، pH و هدایت الکتریکی (۴۲)، پتاسیم قابل‌جذب (۴۹) و فسفر قابل‌جذب خاک (۳۷) اندازه‌گیری شد. نتایج آزمون خاک مناطق موردمطالعه در جدول دو، ارائه‌شده است. بافت خاک در مناطق اصفهان، داراب و دزفول سنگین‌تر از منطقه کرمان بود. کربن آلی موجود در همه خاک‌ها پائین و کربنات کلسیم معادل خاک‌ها زیاد بود. خاک‌ها غیر شور (در منطقه اصفهان لب‌شور)، با پتاسیم ناکافی در مناطق اصفهان، کرمان و دزفول بود و در همه مناطق مقدار فسفر متوسط بود.

شرایط رشد و تیمارها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در فصول زراعی سال‌های ۹۷ و ۱۳۹۸ انجام شد. با توجه به دوساله بودن آزمایش، تجزیه مرکب دوساله انجام شد. تجزیه مرکب برای هر استان انجام شد. فاکتورهای اول شامل کود فسفر در پنج سطح ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار از منبع سوپر فسفات تریپل و فاکتور دوم ارقام گلرنگ شامل پدیده (خاردار با گل‌های نارنجی و دیررس) و گلدشت (بدون خار با گل‌های قرمز و زودرس) برای مناطق اصفهان و داراب و ارقام گلدشت و صفه (بدون خار و گل قرمز) برای مناطق کرمان و دزفول بود. تمامی ارقام آزادگرده‌افشان بوده و از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شد. مشخصات این ارقام در جدول ۳ ارائه‌شده است. سطوح انتخاب‌شده برای مقدار کود فسفری بر اساس نتایج مطالعات قبلی در کشور و جهان و مقدار نیاز گیاه انتخاب شد.

1- Abbadi

جدول(۱) موقعیت جغرافیایی و اطلاعات بارندگی مناطق مختلف

Table (1) Geographical location and rainfall information of the different regions

استان province	موقعیت جغرافیایی Geographical location	میانگین بارندگی Average rainfall	طبقه‌بندی خاک (USDA) Soil classification	ارتفاع از سطح دریا height
–	–	میلی‌متر (mm)	–	متر (m)
اصفهان Isfahan	32 degrees 60 minutes 42 seconds North, 49 degrees 50 minutes 33 seconds East (first year) 32 degrees 19 minutes 36 seconds North, 52 degrees 5 minutes 29 seconds North (second year)	<100	fine loamy mixed Termic Typic Haplocalcids	1524
خوزستان (دزفول) Khuzestan (Dezful)	32 degrees 16 minutes north and 48 degrees 25 minutes east	344	clayey, mixed, Hyperthermic, Aridic, Haplustepts	143
فارس (داراب) Fars (Darab)	28 degrees 61 minutes north and 54 degrees 34 minutes east	279	Fine loamy, Carbonatic, Hyperthermic Aridic Calciustepts	1074
کرمان Kerman	30° 7.37' North, 57° 3.565' East	142	Typic Haplocambids	1760

جدول(۲) برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در مناطق مختلف

Table (2) Some soil chemical and physical properties in different regions

منطقه Region	**سال** year	**مس** Cu	**روی** Zn	**آهن** Fe	**منگنز** Mn	**پتاسیم** K	**فسفر** P	**کربن آلی** O.C	**آهک** T.N.V	**اسیدیته** pH	**شوری** EC ($dS.m^{-1}$)	**بافت** texture
		mg kg^{-1}						%				
اصفهان Isfahan	1	1.1	0.7	4.5	5.0	190	11.2	0.42	32	7.8	3.8	رسی لومی Loam clay
	2	2.1	0.7	3.8	6.0	180	9.2	0.38	34	7.5	3.6	Loam clay
داراب Darab*	1-2	0.9	1.0	11.5	19.9	200	11	0.48	39	8.1	0.8	لوم loam
کرمان Kerman	1	1.67	0.64	1.7	4.3	150	6.0	0.60	43	7.4	2.4	شنی رسی Loam sandy
	2	1.50	0.62	1.9	4.0	170	8.0	0.60	43	7.4	2.5	Loam sandy
دزفول Dezful	1	1.1	1.4	6.2	4.0	170	7.2	0.55	46	7.7	1.1	لوم Loam
	2	0.4	1.1	5.0	2.6	154	7.1	0.68	48.5	7.8	1.2	رسی لومی Loam clay

*در هر دو سال در یک مزرعه اجرا شد

*In both years was carried out in the same farm plot

جدول(۳) مشخصات ارقام انتخاب‌شده

Table (3) The characteristics of selected cultivars

رقم Cultivar	مشخصات Specifications	ارتفاع بوته Height (cm)	وزن هزار دانه Kernel weight (gr)	میانگین عملکرد Yield (Ton ha^{-1})	درصد روغن Oil (%)
پدیده Padideh	Single plant selection from local Urmia safflower cultivar using pure line selection method	150-180	30-35	2-2.5	27-29
گلدشت Goldasht	From the local safflower cultivar of East Azarbaijan	130-150	35-40	1.7-2	24-25
صفه Soffeh	From the local Isfahan safflower cultivar	100-130	30	1.5-1.7	30

تمام تیمارهای فسفر و یک‌سوم کود نیتروژن (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره) قبل از کاشت استفاده شد و توسط دیسک با خاک مخلوط شد. بقیه کود اوره در دو مرحله شامل شروع ساقه دهی (۱۲۰ کیلوگرم اوره در هکتار) و قبل از گلدهی (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره) استفاده شد (کد دورقمی رشد ۱۹ و ۶۱) (۱۶). سایر عناصر غذایی بر اساس آزمون خاک (جدول ۲) برای رشد بهتر گیاه استفاده شد. در اصفهان مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم، در دزفول و کرمان ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار و در داراب ۳۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم مصرف شد.

هر قطعه آزمایشی به مساحت ۱۲ مترمربع و شامل ۱۲ خط کاشت به طول ۵ متر و فاصله ردیف‌ها ۲۰ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها ۵ سانتی‌متر بود. کشت با کارنده Winter Stagier انجام شد و از ۸ کیلوگرم بذر در هکتار استفاده شد. در مرحله ۳ برگی پس از اطمینان از استقرار گیاه، بوته‌ها تنک و به ۴۵ بوته در مترمربع رسانده شد. سیستم آبیاری به‌صورت بارانی (کلاسیک ثابت با فواصل ۱۰-۷ روزه با توجه به شرایط خاک و اقلیم منطقه) و شوری آب آبیاری به ترتیب ۲/۳۵، ۰/۸، ۰/۶ و ۰/۵ دسی‌زیمنس‌برمتر به ترتیب برای مناطق اصفهان، داراب، کرمان و دزفول بود.

ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

پس از پایان دوره روزت و قبل از گل‌دهی (قبل از کد دورقمی رشد ۶۲)، پنج نمونه گیاه کامل به‌صورت تصادفی از هر کرت تهیه شد و وزن خشک بوته[1] (DW)، غلظت فسفر و جذب فسفر گیاهان[2] (حاصل‌ضرب وزن خشک در غلظت فسفر بوته) در این مرحله از رشد، تعیین شد. نمونه‌برداری گیاه (کل بوته کف بر) از کلیه کرت‌ها انجام شد. جهت اندازه‌گیری غلظت فسفر گیاه، نمونه‌های گیاه پس از قرار دادن در آون با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ ساعت در اسید هیدروکلریک ۲ نرمال هضم شدند. فسفر به روش اسپکتروسکوپی (رنگ زرد مولیبدات وانادات) و با اسپکتروفتومتر (Milton Roy Spectronic 601) در طول‌موج ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (۹). در مرحله رسیدگی (کد دورقمی رشد ۹۷)، عملکرد دانه کرت‌های آزمایشی، اندازه‌گیری شد. برای حذف اثر حاشیه، نیم متر از ابتدا و انتهای کرت‌ها در برداشت عملکرد درنظر گرفته نشد و در کرت‌های وسط، برداشت انجام شد.

کارایی استفاده از فسفر (PUTE[3]) گیاهان بر اساس روش رز و ویسووا[4] (۴۵) (معادله ۱) محاسبه شد. هر چه

1- Dry weight
2- P uptake
3- P utilization efficiency (PUTE)
4- Rose and Wissuwa

مقدار این شاخص بیشتر باشد به ازای هر واحد فسفر جذب‌شده در گیاه، زیست‌توده بیشتری تولید می‌شود.

(معادله ۱) PUTE (کیلوگرم در کیلوگرم) = وزن خشک اندام هوایی (کیلوگرم در هکتار) / جذب فسفر (کیلوگرم در هکتار)

کارایی جذب فسفر (PACE[1]) با استفاده از معادله ۲ و فسفر کارایی (PE[2]) با استفاده از معادله ۳ محاسبه شد (۳۴).

(معادله ۲) PACE (کیلوگرم در کیلوگرم) = جذب فسفر در تیمار شاهد / جذب فسفر در تیمار فسفر (کیلوگرم در هکتار)

(معادله ۳) PE = وزن خشک اندام هوایی (DW) یا عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) در تیمار شاهد/ وزن خشک اندام هوایی (DW) یا عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) در تیمار فسفر

هر چه مقدار کارایی جذب فسفر در رقم گلرنگ بیشتر باشد، میزان جذب فسفر در شرایط تنش کمبود و در شرایط فراهمی فسفر به یکدیگر نزدیک‌تر است (۱).

تحلیل آماری نتایج

در این مطالعه ابتدا آزمون بارتلت انجام شد و با توجه به عدم معنی‌داری، فرایند تجزیه واریانس صورت گرفت. تجزیه‌وتحلیل آماری نتایج ازجمله تجزیه واریانس و مدل آزمون چند دامنه‌ای دانکن ($p<0.05$) با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 انجام شد. برای نتایجی که اثرات تیمارها در مورد آنها در جدول تجزیه واریانس معنی‌دار شده بود، مقایسه میانگین انجام شد. همبستگی بین شاخص‌ها از طریق نرم‌افزار اکسل (۲۰۱۶) محاسبه شد.

نتایج و بحث

این آزمایش تفاوت‌های مهمی را در واکنش ارقام گلرنگ به فسفر خاک و کود، به‌ویژه تولید زیست‌توده و شاخص‌های کارایی فسفر نشان داد. در قسمت‌های زیر، تفاوت بین ارقام ازلحاظ واکنش به تیمارها موردبررسی قرار می‌گیرد.

تأثیر تنش کمبود فسفر بر وزن خشک بوته قبل از مرحله گلدهی و عملکرد دانه ارقام گلرنگ

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر رقم بر عملکرد دانه در مناطق دزفول، اصفهان و کرمان معنی‌دار بود (به ترتیب $p<$ ۰/۰۵، $p<$ ۰/۰۱ و $p<$ ۰/۰۵)؛ ولی اثر آن بر وزن خشک بوته تنها در کرمان معنی‌دار بود ($p<$ ۰/۰۱). اثر میزان فسفر بر عملکرد دانه و وزن خشک بوته در تمام مناطق، معنی‌دار بود ($p<$ ۰/۰۱). اثر متقابل سه عامل (میزان فسفر× رقم× سال) بر شاخص‌های موردمطالعه معنی‌دار نبود. اثر متقابل دو عامل (میزان فسفر× رقم) بر عملکرد دانه فقط در اصفهان معنی‌دار بود ($p<$ ۰/۰۵). اثر رقم در سال بر وزن خشک بوته در مناطق اصفهان و کرمان معنی‌دار بود (به ترتیب $p<$ ۰/۰۱ و $p<$ ۰/۰۱). اثر رقم × سال تنها در منطقه کرمان بر عملکرد دانه معنی‌دار بود ($p<$ ۰/۰۱). اثر مقدار فسفر در سال بر وزن خشک بوته در اصفهان معنی‌دار بود ($p<$ ۰/۰۱).

در منطقه داراب کاربرد ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار (۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل) عملکرد دانه گلرنگ را نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش داد (از ۳۲۰۰ کیلوگرم در هکتار تیمار شاهد به ۳۷۰۴ کیلوگرم در هکتار در ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار) (شکل a۱). در این منطقه بیشترین مقدار وزن خشک بوته قبل گلدهی از ۱۰ و ۲۰ کیلوگرم فسفر در هکتار (۱۲۸ گرم در بوته) به دست آمد که اختلاف آن با شاهد (۱۰۲/۸ گرم بوته) معنی‌دار بود. در منطقه کرمان در سال اول عملکرد دانه رقم گلدشت بیشتر از رقم صفه بود اما در سال دوم اختلاف دو رقم معنی‌دار نبود (شکل b۱). عملکرد دانه رقم گلدشت برای سال اول و دوم به ترتیب ۲۲۲۵ و ۱۶۲۱ کیلوگرم در هکتار بود (شکل b ۱). مقادیر عملکرد رقم صفه به ترتیب ۱۱۵۰ و ۱۷۸۶

1- P acquisition efficiency (PACE)
2- P efficiency

کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۱ b). در این منطقه، بیشترین میزان عملکرد دانه (۳۳۰۳ کیلوگرم در هکتار) از کاربرد ۳۰ کیلوگرم فسفر در هکتار و از رقم گلدشت به دست آمد که ازنظر آماری با سایر تیمارها تفاوت داشت. در این منطقه عملکرد دانه رقم گلدشت در شاهد، ۵۰ درصد بیشتر از شاهد رقم صفه در این منطقه بود. با توجه به اثر اصلی مقدار کود بر وزن خشک بوته، بیشترین مقدار وزن خشک بوته از تیمار ۲۰ کیلوگرم فسفر در هکتار (۱۸۰/۳ گرم در بوته) به دست آمد که اختلاف آن با تیمار شاهد (۷۷/۴ گرم در بوته) معنی‌دار بود. وزن خشک بوته نیز در سال اول در رقم گلدشت بیشتر از رقم صفه بود ولی در سال دوم تفاوت دو رقم معنی‌دار نبود (شکل ۱d).

در منطقه اصفهان بیشترین عملکرد دانه از کاربرد ۱۰ کیلوگرم در هکتار فسفر در رقم گلدشت (۳۹۸۰ کیلوگرم در هکتار معادل ۲۸/۵ درصد افزایش نسبت به رقم شاهد) به دست آمد، درحالی‌که رقم پدیده برای تولید عملکرد دانه معادل این مقدار به ۳۰ کیلوگرم فسفر در هکتار نیاز داشت (شکل ۱c). بیشترین مقدار وزن خشک بوته از ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار (۷۶ گرم بوته) به دست آمد که اختلاف آن با شاهد (۵۳/۶ گرم در بوته) معنی‌دار بود. وزن خشک اندام هوایی گلدشت برای سال اول و دوم به ترتیب ۶۵/۴ و ۶۷/۶ گرم در بوته بود (شکل ۱d).

در منطقه دزفول با کاربرد ۲۰ کیلوگرم فسفر در هکتار، عملکرد دانه از ۱۳۳۳ کیلوگرم در هکتار در تیمار شاهد به ۲۳۰۶ کیلوگرم در هکتار افزایش یافت (شکل ۱a). افزایش مصرف فسفر در این منطقه، عملکرد دانه را نسبت به تیمار ۲۰ کیلوگرم فسفر در هکتار به‌طور معنی‌داری افزایش نداد (شکل ۱a). در میانگین کلی، با توجه به معنی‌دار بودن اثر رقم در این منطقه (جدول۴)، عملکرد دانه در رقم صفه ۲۱۰۶ کیلوگرم در هکتار و بیشتر از رقم گلدشت (۲۰۱۴ کیلوگرم در هکتار) بود و تفاوت بین دو رقم معنی‌دار بود.

زیست‌توده یکی از شاخص‌های اصلی در مطالعات تغذیه گیاه است. کاهش در وزن خشک اندام هوایی به میزان ۲۱ درصد و کاهش ۱۶ درصدی عملکرد دانه به دلیل تنش کمبود فسفر که در منطقه داراب مشاهده شد، می‌تواند مربوط به غلظت ناکافی فسفر موجود در خاک منطقه داراب (۱۱ میلی‌گرم در کیلوگرم) باشد. در مقایسه میانگین تیمارهایی که در آنها کود فسفر مصرف شد با تیمار بدون کود فسفره (تیمار شاهد)، ۲۰ درصد کاهش در وزن خشک اندام هوایی و ۷۳ درصد کاهش در عملکرد دانه در خاک دزفول (با فسفر قابل‌دسترس۷ میلی‌گرم در کیلوگرم)، ۳۲ درصد کاهش در وزن خشک اندام هوایی و ۱۹ درصد کاهش عملکرد دانه در اصفهان (۱۱ و ۹ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم بر کیلوگرم خاک) و ۴۱ درصد کاهش در وزن خشک اندام هوایی و ۱۰۵ درصد کاهش در عملکرد دانه در کرمان (۶ و ۸ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک) مشاهده شد. به‌طور متوسط ۲۹ درصد کاهش در وزن خشک اندام هوایی و ۵۳ درصد کاهش در عملکرد دانه در میانگین تمام مناطق مشاهده شد. مطالعات قبلی در مورد گیاه گلرنگ نشان داد که علائم کمبود فسفر و کاهش رشد گیاه در مقادیر فسفر اولسن کمتر از ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم قابل‌مشاهده است (۲۴ و ۵۳). در شرایط تنش غیر زیستی ازجمله کمبود عناصر غذایی (کمبود فسفر)، رادیکال‌های آزاد اکسیژن در گیاهان فعال می‌شوند (۱۹) که تشکیل این رادیکال‌های اکسیژن بر چربی‌ها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک در سیستم گیاهی اثر مضر می‌گذارد. در نتیجه بر رشد و انجام فرایندهای طبیعی گیاه مؤثر است (۱۱). مشخص‌شده است که به دلیل محدودیت فسفر، تشکیل اندام‌های تولیدمثلی به تأخیر می‌افتد، تعداد گل‌ها کاهش می‌یابد و به‌ویژه تشکیل دانه‌ها محدود می‌شود (۳۰). در یک بررسی انجام‌گرفته کاهش عملکرد گلرنگ تحت تأثیر کمبود فسفر، بیشتر از آفتابگردان بود (۱).

بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی در اصفهان، داراب و دزفول از کاربرد ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار و در کرمان از کاربرد ۲۰ کیلوگرم فسفر در هکتار به دست آمد. عملکرد بهینه دانه در داراب و اصفهان از کاربرد ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار و در دزفول و کرمان به ترتیب از

کاربرد ۲۰ و ۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار به دست آمد (شکل ۱ a). به‌استثنای منطقه کرمان، در سایر مناطق، افزایش میزان فسفر باعث افزایش معنی‌دار عملکرد دانه نشد. این امر ممکن است به دلیل تعامل فسفر با سایر عناصر غذایی از جمله عناصر کم‌مصرف باشد. همان‌گونه که در شکل 1e مشاهده می‌گردد با افزایش کاربرد فسفر، مقدار غلظت فسفر اندام هوایی زیاد شد ولی بالاترین غلظت فسفر، بهترین عملکرد دانه را تولید نکرد (شکل ۱ a). جذب بیش‌ازحد فسفر ممکن است از انتقال عناصر کم‌مصرف به دانه جلوگیری کند و باعث کاهش عملکرد دانه شود (۳۹). عناصر کم‌مصرف می‌توانند همانند فسفر در ریشه‌ها تجمع یابند. این عناصر کم‌مصرف احتمالاً با فیتات پیوند خورده‌اند که میل ترکیبی قوی با عناصر کم‌مصرف دارد و حلالیت آن‌ها را کاهش می‌دهد (۳۹). در گیاه ذرت، فسفر اضافی با کاهش انتقال روی از طریق اندودرم به آوند چوبی ریشه و کاهش سرعت جذب آن از طریق لایه اپیدرمی یا سلولی سطحی ریشه، جذب روی را مهار می‌کند (۵۷). تحرک نسبی روی با افزایش نسبت کاربرد P: Zn کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده تجمع روی در ریشه است، یعنی از انتقال به شاخه‌ها جلوگیری می‌کند. کاربرد فسفر، تولید زیست‌توده را افزایش نمی‌دهد مگر اینکه روی نیز استفاده شود (۳۹)؛ اما برای گندم و ذرت، اثرات آنتاگونیستی بین P-Zn با اثر رقیق‌سازی و کاهش کارایی جذب روی در ریشه به‌جای کاهش انتقال و جابجایی مجدد می‌تواند توضیح داده شود (۵۸)؛ بنابراین، اثرات متقابل بین عناصر غذایی نقش مهمی در رشد و عملکرد بهینه گیاهان دارد (۴۳) و باید برای مدیریت بهینه کود دهی گیاهان در نظر گرفته شود. هنگامی‌که گیاه به عناصر غذایی نیاز دارد، به کاربرد آن‌ها واکنش مثبت نشان می‌دهد. با برآورده شدن تدریجی نیاز گیاه، پاسخ آن به افزایش میزان کود، کاهش می‌یابد (۴۳).

تأثیر مثبت کود فسفر بر عملکرد و اجزای عملکرد گلرنگ ممکن است به دلیل نقش مستقیم این عنصر غذایی در فرآیندهای متابولیسم گیاه ازجمله تقسیم و رشد سلولی، انتقال انرژی، تولید ترکیبات آلی، تنفس و فتوسنتز باشد. هنگامی‌که گیاه بتواند مقدار بیشتری تابش خورشیدی را جذب کند، می‌تواند با مقدار بیشتری ذخایر فتوسنتزی در مرحله رشد رویشی وارد مرحله زایشی شود. درنتیجه علاوه بر تولید عملکرد بیشتر، قادر خواهد بود مقدار بیشتری از مواد جذب‌شده فتوسنتزی را به دانه منتقل کند و درنتیجه عملکرد دانه را افزایش دهد. از طرفی تأمین بهینه فسفر در زمان گلدهی باعث افزایش گرده‌افشانی در گیاهان می‌شود، زیرا فسفر نقش مهمی در گرده‌افشانی گیاهان دارد؛ بنابراین به نظر می‌رسد که فسفر می‌تواند با افزایش اجزای عملکرد، عملکرد دانه را بهبود بخشد (۴۷ و ۵).

اثر رقم بر وزن خشک اندام هوایی تنها در منطقه کرمان ازنظر آماری معنی‌دار بود (شکل c۱). درحالی‌که اثر آن بر عملکرد دانه در مناطق دزفول و اصفهان معنی‌دار بود، زیرا رقم گلدشت در اصفهان برتری داشت. رقم صفه در منطقه دزفول برتر بود. گزارش‌شده است که تفاوت‌های ژنتیکی زیادی بین ارقام گلرنگ وجود دارد که به پتانسیل ژنتیکی آن‌ها مربوط می‌شود (۲۵)؛ اما نتایج نشان داد که اقلیم در عملکرد دانه ارقام مؤثر است؛ زیرا رقم صفه برای رشد بهتر شب خنک را ترجیح می‌دهد؛ بنابراین در منطقه کرمان عملکرد دانه خوبی ندارد اما در منطقه دزفول که شب‌ها خنک‌تر از کرمان است عملکرد بهتری دارد. عملکرد بیشتر دانه نشان‌دهنده کارایی گیاه در تولید و انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های در حال رشد است (۱۳).

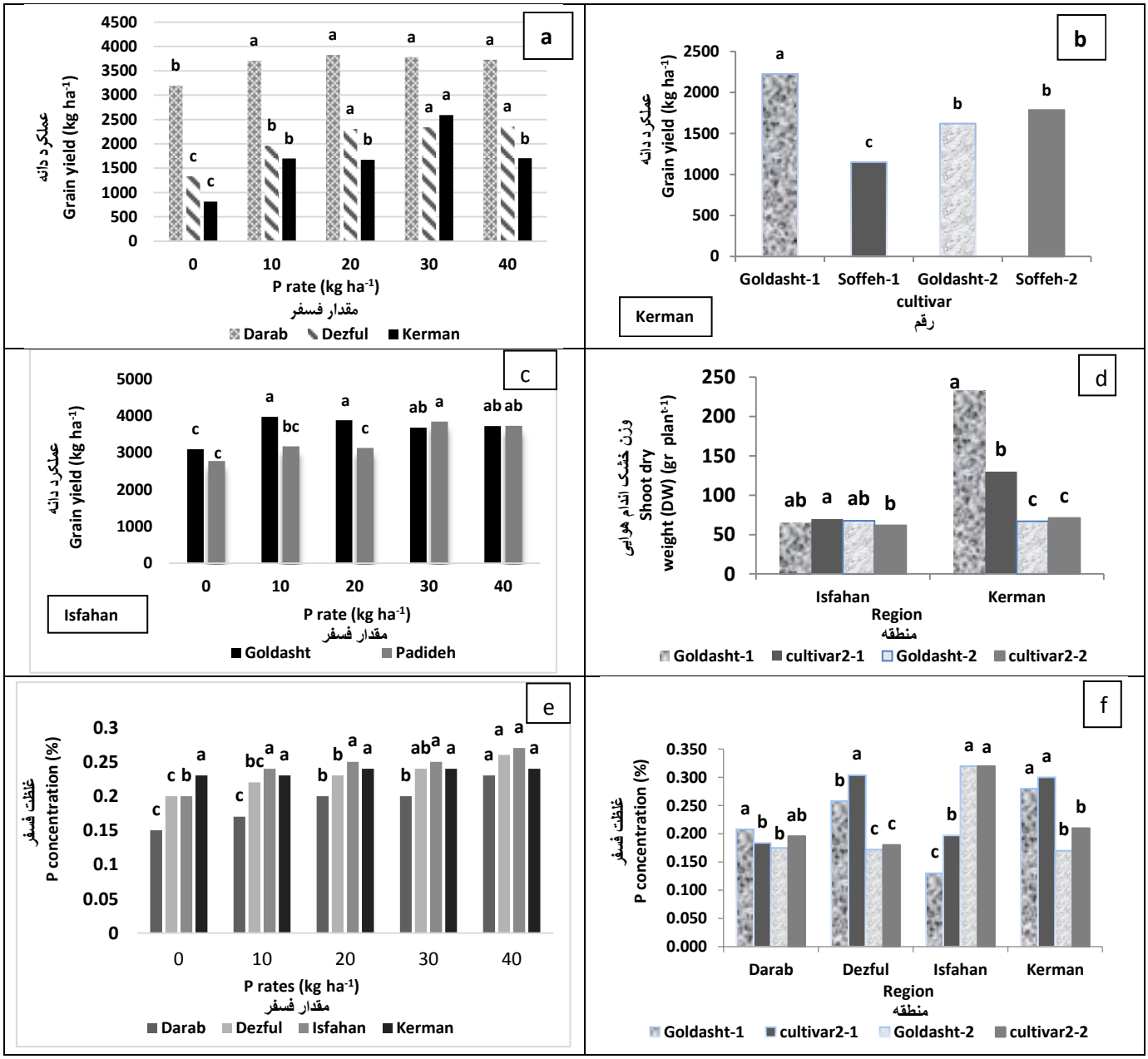
با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در مناطق گرم با ۱۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک، کاربرد ۱۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار و در مناطق با ۷ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک، کاربرد ۳۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار توصیه می‌گردد.

جدول(٤) تجزیه واریانس نتایج دوساله بر وزن خشک گیاه، عملکرد دانه و غلظت فسفر گلرنگ در مناطق مختلف

Table (4) analysis of variance of the effects of compound analysis of treatments (cultivar and P rate) on shoot dry weight (DW), grain yield and phosphorus concentration of safflower in different regions in two years

منابع تغییر Source of variance	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square											
		داراب Darab			دزفول Dezful			اصفهان Isfahan			کرمان Kerman		
		وزن خشک DW	عملکرد دانه Grain yield	غلظت فسفر P concentration	وزن خشک DW	عملکرد دانه Grain yield	غلظت فسفر P concentration	وزن خشک DW	عملکرد دانه Grain yield	غلظت فسفر P concentration	وزن خشک DW	عملکرد دانه Grain yield	غلظت فسفر P concentration
تکرار rep	2	862 ^{ns}	1436743 **	0.0017 ns	737 ^{ns}	18925 ^{ns}	0.0000 ^{ns}	174 ^{ns}	53223 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	36.8 ^{ns}	0.002^{ns}
سال year	1	163543 **	2064392 **	0.0016 ns	36842 ^{ns}	35868 ^{ns}	0.165 **	120 ^{ns}	41659 ^{ns}	0.369 *	0.027 *	11.6 ^{ns}	0.148^{ns}
تکرار در سال Year*rep	2	518 ^{ns}	896274 *	0.0008 ns	3984 ^{ns}	188767 **	0.00007 ^{ns}	182 *	182991 ^{ns}	0.007 ^{ns}	0.0017 **	185 ^{ns}	0.018**
رقم Cult.	1	1.84 ^{ns}	527906 ^{ns}	0.00004 ns	2411 ^{ns}	127974 *	0.010 **	10.6 ^{ns}	1763020 **	0.017 *	0.0018 **	390 *	0.012 ^{ns}
فسفر P rate	4	1433 **	781243 **	0.011 **	10362 **	2289429 **	0.005 **	835 **	1340888 **	0.009 *	0.0024 **	655 **	0.0002^{ns}
فسفر در رقم P rate * cult	4	75.2 ^{ns}	5985 ^{ns}	0.0006 ^{ns}	2511 ns	7064 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	1.15 ^{ns}	568553 *	0.003 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	91.3 ^{ns}	0.001^{ns}
سال در فسفر Year*p rate	4	730 ^{ns}	99064 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	3584 ns	30127 ^{ns}	0.0006 ^{ns}	385 **	154459 ^{ns}	0.0018 ^{ns}	0.0005 ^{ns}	59.8 ^{ns}	0.002^{ns}
سال در رقم Year*cult	1	297 ^{ns}	373828 ^{ns}	0.007 **	325 ns	126 ^{ns}	0.005 *	392 *	340054 ^{ns}	0.017 *	0.0012 *	698 **	0.0008^{ns}
در رقم در سال فسفرYear*cult*p rate	4	131 ^{ns}	12217 ^{ns}	0.001 ^{ns}	4084 ns	2455 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	107 ^{ns}	96333 ^{ns}	0.0017 ^{ns}	0.0005 ^{ns}	49.4 ^{ns}	0.001^{ns}
خطا error		304	182538	0.0008	1818	18835	0.0009	57.7	211653	0.0027	0.0002	85.6	0.0024
CV%ضریب تغییر	-	14.3	11.7	15.4	17.6	6.6	13.2	11.5	13.1	21.5	1.05	23.4	20.9

*DW: shoot dry weight in stem elongation stage, Cult. Cultivar, ** and * : significance at the 1 and 5 percent levels, and ^{ns} no significant difference



شکل(۱) میانگین اثرات رقم، مقدار کود و سال بر شاخص‌های اندازه‌گیری شده در مناطق مختلف.

گلدشت-۱: گلدشت در سال اول، گلدشت-۲: گلدشت در سال دوم، رقم ۲-۱: رقم ۲ در سال اول، رقم ۲-۲: رقم ۲ در سال دوم، رقم ۲ در اصفهان: پدیده، رقم ۲ در داراب: پدیده، رقم ۲ در دزفول: صفه، رقم ۲ در کرمان: صفه. مقایسه میانگین‌ها در سطح ۵ درصد آزمون دانکن.

Figure 1- Mean interaction effect of cultivar, P rate and year on the investigated indices in the different regions

Goldasht(1) Goldasht in first year, Goldasht-2: Goldasht in second year, Cultivar2-1: Cultivar2 in first year, Cultivar2-2: Cultivar2 in second year, Cultivar2 in Isfahan: Padideh, Cultivar2 in Darab: Padideh, Cultivar2 in Dezful: Soffeh, Cultivar2 in Kerman: Soffeh. Differences at the 5% level of Duncan's test

غلظت فسفر اندام هوایی ارقام گلرنگ در تیمارهای مختلف فسفر

اثر اصلی رقم بر غلظت فسفر اندام هوایی گلرنگ قبل از مرحله گلدهی در دزفول، اصفهان و کرمان معنی‌دار بود (به ترتیب $p <$ ۰/۰۱، $p <$ ۰/۰۵ و $p <$ ۰/۰۵) (جدول ۴). اثر اصلی میزان فسفر بر غلظت فسفر اندام هوایی در تمام مناطق به‌جز کرمان معنی‌دار بود. اثر رقم در سال بر غلظت فسفر در شهرستان داراب، دزفول، اصفهان معنی‌دار بود (به ترتیب $p <$ ۰/۰۱، $p <$ ۰/۰۵ و $p <$ ۰/۰۵) (جدول ۲).

با کاربرد ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار، غلظت فسفر نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی‌داری نداشت (۰/۱۷ درصد نسبت به ۰/۱۵ درصد در داراب، ۰/۲۲ درصد نسبت به ۰/۲۰ درصد در دزفول و ۰/۲۴ درصد نسبت به ۰/۲۰ درصد در اصفهان)؛ اما با افزایش میزان فسفر (از ۲۰ کیلوگرم فسفر در هکتار به ۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار) این تفاوت در مقایسه با شاهد معنی‌دار بود (شکل ۱ e). در منطقه داراب اختلاف بین ۳۰ تا ۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار معنی‌دار بود. در اصفهان تفاوت بین ۴۰، ۳۰ و ۲۰ کیلوگرم فسفر در هکتار با شاهد معنی‌دار بود (شکل ۱ e).

در منطقه داراب رقم گلدشت در سال اول نسبت به سال دوم درصد فسفر بیشتری داشت (شکل f۱). غلظت فسفر برای گلدشت در سال اول و دوم آزمایش به ترتیب ۰/۲۱ و ۰/۱۸ و برای رقم پدیده ۰/۱۸ و ۰/۲ درصد بود (شکل f۱). غلظت فسفر رقم گلدشت در منطقه دزفول در سال دوم کاهش و غلظت فسفر در رقم صفه افزایش یافت. در منطقه دزفول میزان فسفر برای گلدشت به ترتیب ۰/۲۶ و ۰/۱۷ درصد در سال اول و دوم آزمایش و برای رقم صفه ۰/۳ و ۰/۱۸ درصد بود (شکل f۱). در میانگین دو سال فسفر در رقم صفه (۰/۲۴ درصد) نسبت به گلدشت (۰/۲۲ درصد) بیشتر بود. در اصفهان مقدار فسفر رقم گلدشت به ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۳۲ درصد در سال اول و دوم آزمایش و برای رقم پدیده ۰/۲۰ و ۰/۳۲ درصد بود (شکل f۱). در میانگین دو سال غلظت در رقم پدیده (۰/۲۶ درصد) نسبت به رقم گلدشت (۰/۲۳ درصد) بیشتر بود. در منطقه کرمان با کاربرد فسفر، غلظت فسفر (درصد) در گیاه نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی‌داری نداشت. درصد فسفر گلدشت در سال اول و دوم آزمایش به ترتیب ۰/۲۸ و ۰/۱۷ درصد و در رقم صفه ۰/۳ و ۰/۳۱ درصد بود.

رقم پدیده در اصفهان و رقم صفه در دزفول دارای مقادیر بیشتری از غلظت فسفر (درصد) در اندام هوایی نسبت به رقم گلدشت بودند (شکل f۱). در تمام مناطق آزمایش به‌جز کرمان، با کاربرد ۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار، بیشترین غلظت فسفر مشاهده شد. با افزایش میزان فسفر مصرفی غلظت فسفر گیاه نیز افزایش یافت (شکل ۱ e). افزایش درصد فسفر می‌تواند مربوط به رشد ریشه، ترشح اسیدهای آلی یا ترشح یون پروتون در ریزوسفر ریشه باشد که به جذب بهتر فسفر کمک می‌کند (۲۱). در این مطالعه، ویژگی‌های ریشه اندازه‌گیری نشد، اما مطالعه در مورد ارقام کلزا در شرایط گلخانه نشان داد که ویژگی‌های ریشه در جذب فسفر مهم است (۳۴). علاوه بر این، به دلیل غلظت کم فسفر موجود در خاک (زیر حد بحرانی؛ ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم)، پاسخ به کود فسفر محتمل بود. افزایش جذب فسفر درنتیجه کاربرد فسفر در سایر مطالعات گلرنگ نیز گزارش‌شده است (۱). اگر گیاهی بتواند در خاکی با فسفر کم رشد و نمو کند، مصرف مقادیر زیاد کود باعث هدر رفتن منابع و همچنین کاهش کیفیت خاک و ایجاد آلودگی بیشتر می‌شود.

در بیشتر مناطق این تحقیق، وزن خشک اندام هوایی و عملکرد بهتر دانه با مقادیر کمتر فسفر استفاده‌شده (۱۰ و ۲۰ کیلوگرم فسفر در هکتار) به دست آمد که در اندام هوایی غلظت کمتری از فسفر نسبت به تیمار ۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار داشت. به نظر می‌رسد در صورت استفاده از مقادیر بیشتر کود، گلرنگ مقادیر بیشتری از فسفر را جذب می‌کند، اما می‌تواند در اندام هوایی با درصد فسفر پایین‌تر، عملکرد بهینه‌ای تولید نماید (مقایسه شکل‌های a۱ و e۱).

نتایج نشان داد که میزان فسفر اندام هوایی رقم گلدشت در مرحله رشد طویل شدن ساقه (قبل از کد دورقمی رشد ۶۲) در منطقه داراب در محدوده ۰/۲۰۶–۰/۱۷۵ و در

اصفهان مقدار ۰/۲۲ درصد در محدوده کفایت فسفر در اندام هوایی گیاه است. برای رقم پدیده در منطقه اصفهان مقدار ۰/۲۱-۰/۱۹۳ درصد و در داراب مقدار ۰/۲۷ درصد در محدوده کفایت است (شکل a۱ شکل e۱ و شکل f۱).

در منطقه داراب غلظت فسفر ۰/۱۵۸ درصد در اندام هوایی در مرحله رشد طویل شدن ساقه (قبل از کد دورقمی رشد ۶۲) را برای رقم گلدشت و غلظت ۰/۱۴ را برای رقم پدیده، می‌توان به‌عنوان غلظت کمبود فسفر در گیاه گلرنگ، درنظر گرفت. این مقادیر در منطقه اصفهان برای رقم گلدشت ۰/۱۹ و برای رقم پدیده ۰/۲ درصد می‌باشد.

در منطقه دزفول غلظت فسفر در رقم گلدشت به مقدار ۰/۲۱۵-۰/۲۲۳ درصد و برای رقم صفه مقدار ۰/۲۷-۰/۲۸ درصد در محدوده کفایت است.

برای منطقه دزفول غلظت کمبود فسفر برای رقم گلدشت ۰/۱۹ درصد و برای رقم پدیده ۰/۲۲ درصد است. در منطقه کرمان غلظت فسفر ۰/۲۱۳ درصد برای رقم گلدشت و غلظت فسفر ۰/۲۵ درصد برای رقم پدیده در محدوده کفایت است. نتایج نشان داد که رقم صفه برای رشد بهتر در مناطق موردمطالعه به غلظت فسفر بیشتری نسبت به رقم گلدشت و پدیده نیاز دارد (شکل f۱).

تأثیر تیمارهای فسفر بر شاخص‌های فسفر کارایی ارقام

نتایج نشان داد که اثر اصلی میزان فسفر بر شاخص کارایی مصرف فسفر اندام هوایی گلرنگ قبل از مرحله گلدهی ($p<$۰/۰۱) در داراب، کارایی جذب فسفر ($p<$۰/۰۵) و نیز فسفر کارایی دانه ($p<$۰/۰۵) در دزفول و فسفر کارایی اندام هوایی قبل از مرحله گلدهی ($p<$۰/۰۱) در اصفهان، معنی‌دار بود (جدول‌های ۵، ۶ و ۷).

اثر اصلی رقم بر شاخص فسفر کارایی اندام هوایی قبل از مرحله گلدهی ($p<$۰/۰۱) در داراب و بر کارایی مصرف فسفر اندام هوایی ($p<$۰/۰۵) در مناطق اصفهان و کرمان معنی‌دار بود (جدول ۵، ۷، ۸).

اثر متقابل رقم در سال بر کارایی جذب فسفر در داراب ($p<$۰/۰۱) و اصفهان ($p<$۰/۰۵) معنی‌دار بود (جدول ۷). اثر متقابل رقم در سال بر کارایی استفاده از فسفر در داراب ($p<$۰/۰۵) و اصفهان ($p<$۰/۰۱) معنی‌دار بود. اثر متقابل رقم در سال بر فسفر کارایی دانه ($p<$۰/۰۱) و کارایی مصرف فسفر اندام هوایی($p<$۰/۰۵) در کرمان معنی‌دار بود (جدول ۸).

اثر متقابل مقدار فسفر در سال تنها بر فسفر کارایی اندام هوایی در داراب، معنی‌دار بود ($p<$۰/۰۵).

اثر متقابل رقم × مقدار فسفر × سال بر فسفر کارایی اندام هوایی در اصفهان ($p<$۰/۰۵) (جدول ۵) و بر کارایی جذب ($p<$۰/۰۵) و فسفر کارایی اندام هوایی ($p<$۰/۰۵) در کرمان معنی‌دار بود (جدول ۸).

اثر تیمارها بر فسفر کارایی دانه در مناطق داراب و اصفهان (جدول ۵ و ۷) و بر کارایی استفاده از فسفر و فسفر کارایی اندام هوایی در دزفول معنی‌دار نبود (جدول ۶).

در منطقه دزفول شاخص‌های فسفر کارایی بین دو رقم گلدشت و صفه معنی‌دار نبود؛ اما کارایی جذب فسفر در ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار (۷۹/۵) به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از ۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار بود(۵۷/۲) (شکل a۲). همین شرایط برای کارایی مصرف فسفر مشاهده شد (۰/۵۰ کیلوگرم در کیلوگرم برای ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار و ۰/۴۲ کیلوگرم در کیلوگرم برای ۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار) (شکل a۲). فسفر کارایی دانه در ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار نسبت به سایر تیمارهای فسفر به‌طور معنی‌داری بیشتر بود و با افزایش میزان فسفر مصرفی کاهش یافت (به ترتیب ۶۸، ۵۸، ۵۷، ۵۷ برای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار) (شکل a۲).

کاهش کارایی مصرف فسفر در مقادیر بیشتر استفاده از فسفر در مقایسه با مقادیر کمتر فسفر، نشان می‌دهد که ماده خشک کمتری برای تیمار فسفری ایجادشده یا استفاده داخلی از فسفر برای تولید ماده خشک تولیدشده کمتر شده است (۶ و ۷).

در منطقه داراب میانگین نتایج دوساله نشان داد که، کارایی مصرف فسفر در ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر مقادیر فسفر بود و با افزایش مقدار

فسفر مصرفی، این شاخص کاهش یافت (۰/۵۹، ۰/۵۲، ۰/۵۱، ۰/۴۳ کیلوگرم در کیلوگرم، به ترتیب برای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار) (شکل ۲ b). میزان فسفر بر شاخص کارایی جذب فسفر تأثیر معنی‌داری نداشت. کارایی جذب فسفر رقم گلدشت (۷۱) بیشتر از رقم پدیده(۵۶) بود (شکل ۳a). کارایی مصرف فسفر بین دو رقم تفاوت معنی‌داری نداشت اما فسفر کارایی اندام هوایی در رقم گلدشت (۸۷) به‌طور معنی‌داری بیشتر از رقم پدیده(۷۷) بود (شکل ۳ b). میانگین فسفر کارایی دانه در دو رقم، تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۳). کارایی جذب فسفر و کارایی مصرف فسفر تحت تأثیر سال و رقم قرار گرفت. کارایی جذب فسفر در رقم گلدشت در سال اول (۷۸) بیشتر از سال دوم (۶۳/۲) بود، اما در رقم پدیده در سال دوم افزایش یافت (۵۱ نسبت به ۶۰ در پدیده). مقدار کارایی مصرف فسفر در رقم گلدشت نسبت به پدیده بیشتر بود (شکل ۳ b).

جدول(۵) تجزیه واریانس مرکب اثرات تیمارها بر شاخص‌های فسفر کارایی در داراب در دو سال

Table (5) Analysis of variance of the effects resulting from the composite analysis of the treatments on phosphorus efficiency indicators in Darab region in two years

		میانگین مربعات Mean square			
منابع تغییر Source of variance	درجه آزادی df	فسفر کارایی دانه PE of grain	فسفر کارایی وزن خشک PE of DW	کارایی مصرف PUTE	کارایی جذب PACE
تکرار rep	2	23.8 ^{ns}	75.3 ^{ns}	0.017*	1263**
سال year	1	867.0**	24.1 ^{ns}	0.006 ^{ns}	99 ^{ns}
سال در تکرار Year*rep	2	72.4 ^{ns}	182.5 ^{ns}	0.005 ^{ns}	508 ^{ns}
رقم Cult.	1	24.1 ^{ns}	1140**	0.0001 ^{ns}	2715**
فسفر P rate	3	55.4 ^{ns}	158.2 ^{ns}	0.052**	281 ^{ns}
فسفر در رقم P rate * cult	3	11.8 ^{ns}	2.6 ^{ns}	0.003 ^{ns}	50 ^{ns}
فسفر در سال Year*p rate	3	84.0 ^{ns}	382.1*	0.002 ^{ns}	119 ^{ns}
سال در رقم Year*cult	1	60.7 ^{ns}	3.00 ^{ns}	0.025*	1716**
سال در رقم در فسفرYear*cult*p rate	3	17.2 ^{ns}	18.05 ^{ns}	0.010 ^{ns}	133 ^{ns}
خطا error	28	63.6	113.4	0.005	207
ضریب تغییر CV%	-	9.6	12.9	14.6	22.8

*PE: phosphorus efficiency, PUTE: phosphorus utilization efficiency, PACE: phosphorus acquisition efficiency, DW: shoot dry weight in stem elongation stage, Cult. Cultivar, ** and * indicates the significance of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ^{ns} indicates no significant difference.

جدول(٦) تجزیه واریانس مرکب اثرات تیمارها بر شاخص‌های فسفر کارایی در دزفول در دو سال

Table (6) Summary of the analysis of variance of the effects resulting from the composite analysis of the treatments on phosphorus efficiency indicators in Dezful region in two years

		میانگین مربعات Mean square			
منابع تغییر Source of variance	درجه آزادی df	فسفر کارایی دانه PE of grain	فسفر کارایی وزن خشک PE of DW	کارایی مصرف PUTE	کارایی جذب PACE
تکرار rep	2	12.06 ^{ns}	169.0 ^{ns}	0.001 ^{ns}	138.1 ^{ns}
سال year	1	2.08 ^{ns}	133.3 ^{ns}	0.56**	475.0 ^{ns}
سال در تکرار Year*rep	2	158.1**	49.1 ^{ns}	0.0009 ^{ns}	393.9 ^{ns}
رقم Cult.	1	18.7 ^{ns}	374.1 ^{ns}	0.017 ^{ns}	28.5 ^{ns}
فسفر P rate	3	358.8**	270.0 ^{ns}	0.013 ^{ns}	1082*
فسفر در رقم P rate * cult	3	8.58 ^{ns}	193.1 ^{ns}	0.0007 ^{ns}	156.5 ^{ns}
فسفر در سال Year*p rate	3	30.9 ^{ns}	333.0 ^{ns}	0.0007 ^{ns}	412.3 ^{ns}
سال در رقم Year*cult	1	0.00 ^{ns}	243.0 ^{ns}	0.003 ^{ns}	28.5 ^{ns}
سال در رقم در فسفرYear*cult*p rate	3	2.9 ^{ns}	445.1 ^{ns}	0.008 ^{ns}	268.7 ^{ns}
خطا error	28	33.9	172.7	0.006	319.3
ضریب تغییر CV%	-	9.7	16.5	17.6	25.9

*PE: phosphorus efficiency, PUTE: phosphorus utilization efficiency, PACE: phosphorus acquisition efficiency, DW: shoot dry weight in stem elongation stage, Cult. Cultivar, ** and * indicates the significance of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ^{ns} indicates no significant difference.

در منطقه اصفهان کارایی مصرف فسفر رقم گلدشت (۰/۵۳) به‌طور معنی‌داری بیشتر از رقم پدیده (۰/۴۲) بود (۰/۵۳ کیلوگرم در کیلوگرم در مقایسه با ۰/۴۲ کیلوگرم در کیلوگرم) (شکل ۳ b). فسفر کارایی اندام هوایی در تیمار ۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار در مقایسه با ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار به‌طور معنی‌داری، بیشتر بود (۷۲ برای ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار و ۸۴ برای ۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار). راندمان جذب فسفر و کارایی مصرف فسفر تحت تأثیر سال و رقم بود. راندمان جذب فسفر در رقم گلدشت در سال اول بیشتر از سال دوم بود، اما در رقم پدیده در سال دوم افزایش یافت (۷۴/۵ در مقایسه با ۵۷/۸ در گلدشت و ۵۷/۳ در مقایسه با ۵۹/۵ در پدیده) (شکل ۳ a). راندمان مصرف فسفر در هر دو رقم در سال دوم کاهش یافت (شکل ۳ b). اثر متقابل رقم × سال × مقدار فسفر بر فسفر کارایی اندام هوایی نشان داد که بیشترین مقدار با کاربرد ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار از رقم پدیده در سال اول به دست آمد.

در منطقه کرمان شاخص‌های فسفر کارایی، تحت تأثیر سال قرار گرفت. مقدار فسفر کارایی دانه در سال اول در رقم گلدشت بیشتر از صفه بود ولی در سال دوم عکس این موضوع مشاهده شد (شکل ۳ c). راندمان مصرف فسفر در هر دو رقم در سال دوم افزایش یافت و میزان آن در رقم گلدشت بیشتر از رقم صفه بود (۰/۳۷ کیلوگرم در کیلوگرم نسبت به ۰/۵۹ کیلوگرم در کیلوگرم در رقم گلدشت و ۰/۳۶ کیلوگرم در کیلوگرم نسبت به ۰/۴۹ کیلوگرم در کیلوگرم در رقم صفه (شکل ۳ b).

جدول(۷) تجزیه واریانس مرکب اثرات تیمارها بر شاخص‌های فسفر کارایی در اصفهان در دو سال

Table (7) Summary of analysis of variance of effects resulting from composite analysis of treatments on phosphorus efficiency indicators in Isfahan region in two years

		میانگین مربعات Mean square			
منابع تغییر Source of variance	درجه آزادی df	فسفر کارایی دانه PE of grain	فسفر کارایی وزن خشک PE of DW	کارایی مصرف PUTE	کارایی جذب PACE
تکرار rep	2	50.8 ^{ns}	150.7 ^{ns}	0.043*	265.3 ^{ns}
سال year	1	379.7 ^{ns}	1485**	1.48**	630.7 *
سال در تکرار Year*rep	2	182.3 ^{ns}	84.0 ^{ns}	0.052**	16.7 ^{ns}
رقم Cult.	1	4.7 ^{ns}	17.5 ^{ns}	0.15**	720.7 ^{ns}
فسفر P rate	3	63.7 ^{ns}	366.4**	0.006 ^{ns}	79.4 ^{ns}
فسفر در رقم P rate * cult	3	363.4 ^{ns}	0.85 ^{ns}	0.005 ^{ns}	96.1 ^{ns}
فسفر در سال Year*p rate	3	67.2 ^{ns}	456.1*	0.006 ^{ns}	319.4 ^{ns}
سال در رقم Year*cult	1	150.5 ^{ns}	20.0 ^{ns}	0.148**	1064*
سال در رقم در فسفر Year*cult*p rate	3	42.6 ^{ns}	229.7*	0.001 ^{ns}	205.9 ^{ns}
خطا error	28	144.7	78.6	0.010	227.6
ضریب تغییر CV%	-	14.7	11.2	21.5	24.2

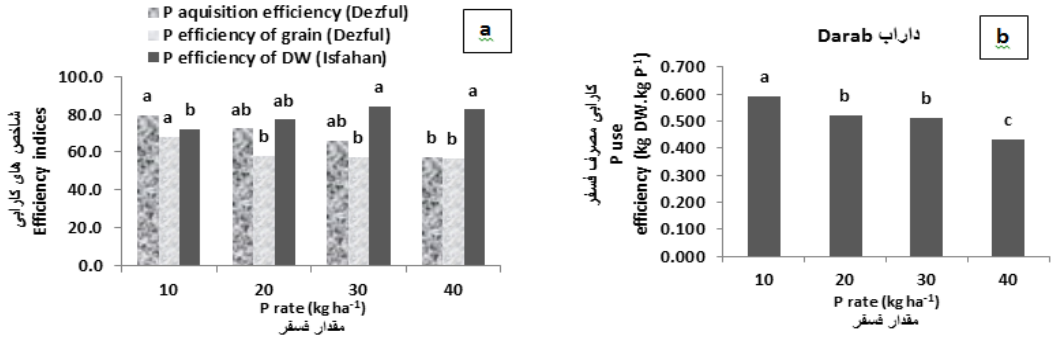
*PE: phosphorus efficiency, PUTE: phosphorus utilization efficiency, PACE: phosphorus acquisition efficiency, DW: shoot dry weight in stem elongation stage, Cult. Cultivar, and * indicates the significance of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ^{ns} indicates no significant difference.

جدول(۸) تجزیه واریانس مرکب اثرات تیمارها بر شاخص‌های فسفر کارایی در کرمان در دو سال

Table (8) Summary of analysis of variance of effects resulting from composite analysis of treatments on phosphorus efficiency indicators in Kerman region in two years

		میانگین مربعات Mean square			
منابع تغییر Source of variance	درجه آزادی df	فسفرکارایی دانه PE of grain	فسفرکارایی وزن خشک PE of DW	کارایی مصرف PUTE	کارایی جذب PACE
تکرار rep	2	1.27 ^{ns}	590 ^{ns}	0.014 ^{ns}	8.45 *
سال year	1	5.71 ^{ns}	336 ^{ns}	0.358 **	28.47 **
سال در تکرار Year*rep	2	10.29 **	2697 **	0.045 **	6.36 ^{ns}
رقم Cult.	1	5.64 ^{ns}	42.2 ^{ns}	0.036 *	0.015 ^{ns}
فسفر P rate	3	4.51 ^{ns}	657 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	3.05 ^{ns}
فسفر در رقم P rate * cult	3	3.04 ^{ns}	783 ^{ns}	0.004 ^{ns}	2.48 ^{ns}
فسفر در سال Year*p rate	3	2.52 ^{ns}	724 ^{ns}	0.0006 ^{ns}	2.97 ^{ns}
سال در رقم Year*cult	1	19.05 **	1.68 ^{ns}	0.030 *	3.17 ^{ns}
سال در رقم در فسفرYear*cult*p rate	3	1.06 ^{ns}	1258 *	0.001 ^{ns}	6.63 *
خطا error	28	2.21	376	0.007	2.16
ضریب تغییر CV%	-	20.97	29.8	18.7	19.04

*PE: phosphorus efficiency, PUTE: phosphorus utilization efficiency, PACE: phosphorus acquisition efficiency, DW: shoot dry weight in stem elongation stage, Cult. Cultivar, ** **and** * indicates the significance of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ^{ns} indicates no significant difference.

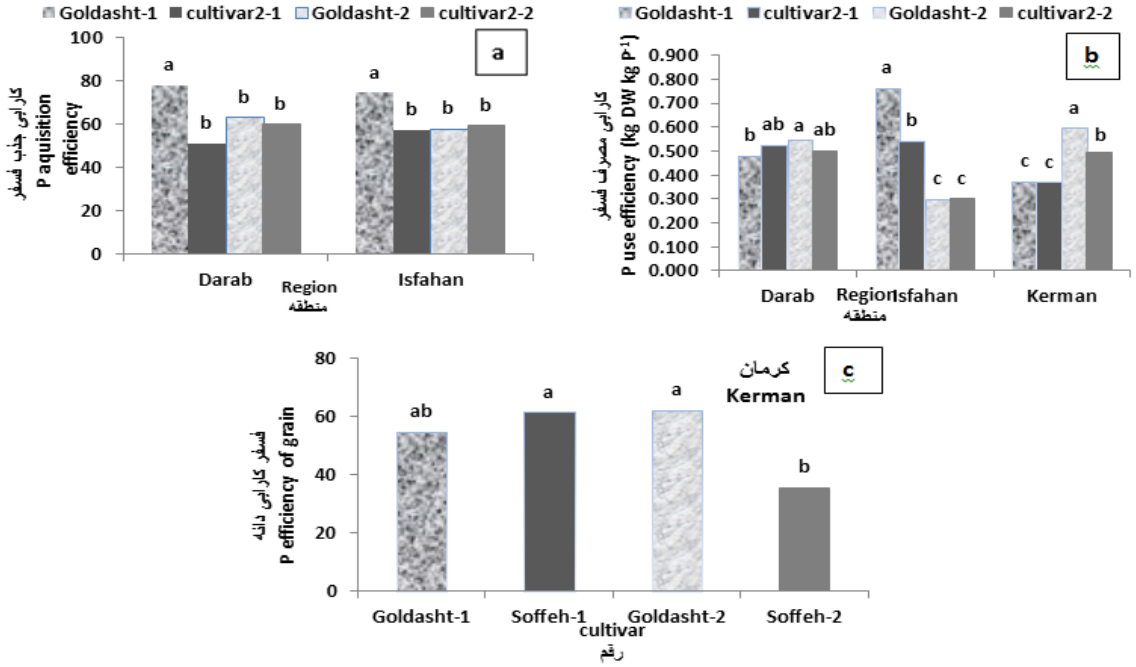


شکل(۲) اثر اصلی مقدار فسفر بر شاخص‌های فسفر کارایی در مناطق مورد آزمایش

مقایسه میانگین‌ها در سطح ۵ درصد آزمون دانکن

Figure (2) Main effect of P rate on phosphorus efficiency indices in tested regions

Differences at the 5% level of Duncan's test



شکل(۳) میانگین اثرات متقابل رقم در سال بر شاخص‌های کارایی در مناطق تحت آزمایش

گلدشت-۱: گلدشت در سال اول، گلدشت-۲: گلدشت در سال دوم، رقم ۲-۱: رقم ۲ در سال اول، رقم ۲-۲: رقم ۲ در سال دوم، رقم ۲ در اصفهان: پدیده، رقم ۲ در داراب: پدیده، رقم ۲ در کرمان: صفه. مقایسه میانگین‌ها در سطح ۵ درصد آزمون دانکن

Figure (3) Mean interaction effect of cultivar * year on phosphorus efficiency indices in tested regions

Goldasht(1) Goldasht in first year, Goldasht-2: Goldasht in second year, Cultivar2-1: Cultivar2 in first year, Cultivar2-2: Cultivar2 in second year, Cultivar2 in Isfahan: Padideh, Cultivar2 in Darab: Padideh, Cultivar2 in Kerman: Soffeh. Differences at the 5% level of Duncan's test

هنگامی‌که دو رقم گلرنگ ازنظر شاخص‌های کارایی فسفر مقایسه می‌شوند، مشاهده می‌شود که در منطقه دزفول مقدار بیشتر کارایی جذب فسفر، فسفر کارایی اندام هوایی و فسفر کارایی دانه از تیمار ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار به دست آمد (شکل a۲). در منطقه داراب کارایی استفاده از فسفر در ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار بیشتر از سایر مقادیر فسفر بود (شکل b ۲). در این منطقه رقم گلدشت از بابت کارایی جذب فسفر و فسفر کارایی، بهتر از رقم پدیده بود (شکل a۳). در منطقه اصفهان، رقم گلدشت از بابت کارایی استفاده از فسفر، بهتر از رقم پدیده بود (شکل b۳). در هر دو منطقه داراب و اصفهان، عملکرد دانه گلرنگ رقم گلدشت نسبت به رقم پدیده بیشتر بود که این وضعیت در مورد شاخص فسفر کارایی دو رقم هم مشاهده شد. در منطقه کرمان، فسفر کارایی دانه در رقم گلدشت به‌طور معنی‌داری بیشتر از رقم صفه در سال دوم بود (شکل c ۳).

در هیچ‌یک از مناطق کارایی جذب فسفر اندام هوایی در مرحله طویل شدن ساقه، با عملکرد دانه همبستگی نداشت. فسفر کارایی اندام هوایی با کارایی جذب فسفر اندام هوایی همبستگی بیشتری داشت (**۰/۴۵، *۰/۱۹، **۰/۴۳، **۰/۵۷ به ترتیب در مناطق اصفهان، داراب، کرمان و دزفول) ولی همبستگی فسفر کارایی اندام هوایی با کارایی مصرف فسفر در هر چهار منطقه غیر معنی‌دار بود. به نظر می‌رسد کارایی جذب فسفر اندام هوایی در ارقام موردمطالعه از اهمیت بیشتری نسبت به کارایی مصرف فسفر

برخوردار باشد. کارایی جذب فسفر با کارایی مصرف فسفر همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت (به ترتیب در مناطق اصفهان، داراب و دزفول **۰/۳، **۰/۲۶، **۰/۲۳).

تفاوت در کارایی جذب فسفر بین ارقام نشان‌دهنده مکانیسم‌های متمایزکننده ارقام ازنظر بازده جذب فسفر ازجمله عوامل خاکی و عوامل گیاهی است. گزارش‌شده است که مهم‌ترین شاخص‌های کنترل‌کننده جذب عناصر غذایی، شامل میانگین غلظت عناصر غذایی محلول[1] (پارامتر خاکی) و حداکثر سرعت جذب عناصر غذایی[2] (پارامتر فیزیولوژیکی ریشه) بوده و مهم‌ترین پارامتر بعدی، ضریب پخشیدگی مؤثر[3] (پارامتر خاکی) است (۳). مکانیسم‌های متعددی برای تغییر در کارایی جذب گیاهان مانند اندازه سیستم ریشه، فیزیولوژی جذب عناصر غذایی و توانایی گیاهان برای افزایش حلالیت فسفر در ریزوسفر، گزارش‌شده است (۲). در شرایط فسفر کم، گلرنگ دارای طول ریشه نسبی بالاتر، تراکم ویژه ریشه و قطر ریشه نازک‌تر بود (۱). در مطالعه حاضر به دلیل کشت در شرایط مزرعه، امکان اندازه‌گیری خصوصیات ریشه ارقام وجود نداشت.

کارایی استفاده از فسفر به‌عنوان یک شاخص قابل‌اعتماد برای تفکیک ارقام کلزا استفاده‌شده است (۱۰ و ۵۷). مصرف کود فسفر باعث کاهش معنی‌دار مقدار کارایی مصرف فسفر در مناطق داراب و دزفول شد که در ارقام مختلف کلزا نیز مشاهده شد (۳۳). کاهش کارایی مصرف فسفر در مقادیر بیشتر استفاده از فسفر در مقایسه با مقادیر کمتر فسفر، نشان می‌دهد که ماده خشک کمتری برای تیمار فسفری ایجادشده یا استفاده داخلی از فسفر برای تولید ماده خشک تولیدشده کمتر شده است (۶ و ۷). کارایی استفاده از فسفر باید در محدوده‌ای از غلظت عناصر غذایی بررسی گردد که کمتر از غلظت بهینه باشد (۴۵). در برخی از مطالعات، ازجمله در گیاه کلزا، کارایی مصرف داخلی فسفر در شرایط تنش فسفر در ارقام فسفر کارا، کمتر از ارقام غیرکارا بود (۵۷) ولی کارایی جذب جبران آن قسمت را در این ارقام انجام می‌داد.

نتیجه‌گیری

نتایج کار حاضر نشان داد که ارقام موردمطالعه پاسخ‌های متفاوتی به کاربرد فسفر دارند. رقم گلدشت نسبت به رقم پدیده عملکرد دانه بهتری داشت. این رقم در منطقه کرمان نیز عملکرد بهتری نسبت به صفه داشت اما در منطقه دزفول رقم صفه بهتر از رقم گلدشت بود. این امر نشان می‌دهد که موقعیت منطقه برای انتخاب ارقام مناسب، مهم است. در بیشتر خاک‌های موردمطالعه، وزن خشک بهتر اندام هوایی، از کاربرد ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار به دست آمد، اما عملکرد دانه بهتر از تیمار ۱۰ کیلوگرم فسفر در هکتار در دو مکان و از ۲۰ و ۴۰ کیلوگرم فسفر در هکتار در دو مکان دیگر به دست آمد. در صورت استفاده از مقادیر بیشتر کود، گلرنگ مقادیر بیشتری از فسفر را جذب می‌کند، اما می‌تواند ازلحاظ اندام هوایی در درصد فسفر کمتر، عملکرد بهینه‌ای تولید نماید. غلظت ۰/۱۸ درصد فسفر در اندام هوایی گلرنگ می‌تواند به‌صورت کمبود و ۰/۲۳ درصد در اندام هوایی گلرنگ در مرحله ساقه روی، در حد کفایت در نظر گرفته شود. شاخص فسفر کارایی رقم گلدشت بیشتر از رقم پدیده بود. عملکرد دانه این رقم نیز بهتر بود. کارایی جذب فسفر با فسفر کارایی اندام هوایی همبستگی بیشتری داشت در مقایسه با همبستگی فسفر کارایی با کارایی استفاده از فسفر؛ بنابراین به نظر می‌رسد راندمان جذب مهم‌تر از راندمان مصرف در ارقام گلرنگ مطالعه شده باشد. برای تعیین مکانیسم‌های دخیل در پاسخ گلرنگ به کاربردهای فسفر، مطالعات بیشتری بر روی ارقام مختلف به‌منظور ایجاد جداول دقیق‌تر توصیه فسفر برای مناطق گرم موردنیاز است. وضعیت رشد ریشه در این گیاه به دلیل رشد عمیق و قوی در شرایط مزرعه نیاز به مطالعه بیشتر دارد.

1- The average dissolved nutrient concentration
2- Maximal rate of nutrient uptake
3- The effective diffusion coefficient

References

1. Abbadi, J. 2017. Phosphorous use efficiency of safflower and sunflower grown in different soils. World Journal of Agricultural Research, 5 (4): 212-220. doi: 10.12691/wjar-5-4-3.

2. Abbadi, J. and Gerendás, J. 2015. Phosphorus use efficiency of safflower (Carthamus tinctorius L.) and sunflower (Helianthus annuus L.). Journal of Plant Nutrition, 38(7): 1121-1142. https://doi.org/10.1080/01904167.2014.983115.

3. Adhikari, S., Anuragi, H., Chandra, K., Tarte, S.H., Dhaka, S.R., Jatav, H.S. and Hingonia, K., 2023. Molecular basis of plant nutrient use efficiency-concepts and challenges for its improvement. In Sustainable Plant Nutrition (pp. 107-151). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18675-2.00001-8

4. Afzal, O., Asif, M., Ahmed, M., Awan, F.K., Aslam, M.A., Zahoor, A., Bilal, M., Shaheen, F.A., Zulfiqar, M.A. and Ahmed, N., 2017. Integrated nutrient management of safflower (Carthamus tinctorius L.) under rainfed conditions. American Journal of Plant Sciences, 8(9): 2208-2218. doi.org/ 10.4236/ajps.2017.89148.

5. Ahmadpour Abnvi, S., Ramroudi, M., Galavi, M. and Shamsaddin Saied, M., 2019. Effect of biological and chemical phosphorus fertilizer on yield and yield components of safflower (Carthamus tinctorius L.) under low irrigation conditions. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 29 (1):269-284. (In Persian).

6. Akhtar, M.S., Oki, Y. and Adachi, T., 2009a. Mobilization and acquisition of sparingly soluble P-sources by Brassica cultivars under P-starved environment I. Differential growth response, P-efficiency characteristics and P-remobilization. Journal of integrative plant biology, 51(11): 1008-1023. doi: 10.1111/j.1744-7909.2009.00873.x.

7. Akhtar, M.S., Oki, Y. and Adachi, T., 2009b. Mobilization and Acquisition of Sparingly Soluble P-Sources by Brassica Cultivars under P-Starved Environment II. Rhizospheric pH changes, Redesigned Root Architecture and Pi-Uptake Kinetics. Journal of integrative plant biology, 51(11): 1024-1039.doi: 10.1111/j.1744-7909.2009.00873.x.

8. Aziz, T., Rahmatullah, M.A., Maqsood, M.A., Tahir, I.A. and Cheema, M.A., 2006. Phosphorus utilization by six Brassica cultivars (Brassica juncea L.) from tri-calcium phosphate; a relatively insoluble P compound. Pakistan Journal of Botany 38(5), pp.1529-1538.

9. Chapman, H.D. and Pratt, P.F., 1962. Methods of analysis for soils, plants and waters. Soil Science, 93(1), p.68.

10. Chen, S., Ding, G., Wang, Z., Cai, H. and Xu, F., 2015. Proteomic and comparative genomic analysis reveals adaptability of Brassica napus to phosphorus-deficient stress. Journal of proteomics, 117: 106-119. doi: 10.1016/j.jprot.2015.01.012.

11. Darvishi Zeidabadi, D. and Solimani Dehdivan, N., 2018. Antioxidants inhibit free radical mechanism and improve food safety. Journal of Biosafety, 11(1): 11-22. doi: 20.1001.1.27170632.1397.11.1.6.2. (In Persian).

12. De Oliveira, A.K.S., Soares, E.B., dos Santos, M.G., Lins, H.A., de Freitas Souza, M., dos Santos Coêlho, E., Silveira, L.M., Mendonça, V., Barros Júnior, A.P. and de Araújo Rangel Lopes, W., 2022. Efficiency of phosphorus use in sunflower. Agronomy, 12(7): p.1558. http://dx.doi.org/10.17582/journal.pjar/2021/34.2.294.299.

13. Ebrahimian, A. and Soleymani, A., 2013. Growth length and dry matter yield in different stages of safflower as affected by nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers. International journal of Agronomy and Plant Production, 4 (5): 963-969, 2013

14. FAO. 2025. Agricultural Data, FAOSTAT. Available at Food and Agriculture Organization of the United Nations. http: //faostat.fao.org/faostat/collections.

15. FAO. 2022. Agricultural Data, FAOSTAT. Available at Food and Agriculture Organization of the United Nations. http://faostat.fao.org/faostat/collections.

16. Flemmer, A.C., Franchini, M.C. and Lindström, L.I., 2015. Description of safflower (Carthamus tinctorius) phenological growth stages according to the extended BBCH scale. Annals of Applied Biology, 166(2): 331-339.

17. Gee, G., and Bauder, J. 1986. Particle-size Analysis. In: A. Klute, (ed), Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods. SSSA and ASA, Madison, WI, 383-411.

18. Ghaderi, J. and Nourgholipour, F., 2020. Effects of Phosphorus on Grain Yield and Phosphorus Efficiency Indices in Canola Cultivars in Kermanshah Region. Water and Soil, 34(2): 439-453. https://doi.org/10.22067/jsw.v34i2.82911.

19. Hasanuzzaman, M., M. Fujita, H. Oku, K. Nahar, and B. Hawrylak-Nowak. 2018. Hasanuzzaman, M., Fujita, M., Oku, H., Nahar, K. and Hawrylak-Nowak, B. eds., 2018. Plant nutrients and abiotic stress tolerance. Springer Singapore.pages 590. doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8.

20. Heshmati, S., Amini Dehghi, M. and Fathi Amirkhiz, K. 2017. Effects of biological and chemical phosphorus fertilizer on grain yield, oil grain and fatty acids spring safflower in water deficit conditions. Iranian Journal of Field Crop Science, 48(1): 159- 169. (In Persian with English abstract). doi:10.22059/IJFCS.2017.135975.653977.

21. Hunter, P.J., Teakle, G.R. and Bending, G.D., 2014. Root traits and microbial community interactions in relation to phosphorus availability and acquisition, with particular reference to Brassica. Frontiers in Plant Science, 5: 1- 18.

22. Hussain, M.I., Lyra, D.A., Farooq, M., Nikoloudakis, N. and Khalid, N., 2016. Salt and drought stresses in safflower: a review. Agronomy for sustainable development, 36: 1-31. doi: 10.1007/s13593-015-0344-8.

23. Irfan, M., Abbas, M., Shah, J.A., Akram, M.A., Depar, N. and Memon, M.Y., 2020. Categorization and identification of Brassica genotypes for phosphorus utilization efficiency. International journal of agriculture & biology, 23:227–234. doi: 10.17957/IJAB/15.1280

24. Jaffar, R.A.A. and Al-Refai, S.I., 2021, November. Response of safflower to (NPK) fertilizer combinations and plants distribution. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 923, No. 1, p. 012056). IOP Publishing.

25. Killi, F., Kanar, Y. and Tekeli, F., 2016. Evaluation of seed and oil yield with some yield components of safflower varieties in Kahramanmaras (Turkey) conditions. International Journal of Environmental and Agriculture Research, 7(2); 136-140.

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

27. Lindsay, W. L., and Norvell, W. A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society American Journal, 42: 421-428.

28. Loeppert, R. H., and Suarez, D. L. 1996. Carbonate and Gypsum. In: D. L. Sparks, (ed.), Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods, SSSA and ASA, Madison, W. I.; 437-474.

29. Malek, H.A. and Ferri, F., 2014. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizers on safflower yield in dry land conditions. International Journal of Research in Agricultural Sciences, 1(1): 28-33. https://ijras.org/administrator/components/com_jresearch/files/publications/IJRAS_388-01_Final.pdf.

30. Malhotra, H., Vandana, Sharma, S. and Pandey, R., 2018. Phosphorus nutrition: plant growth in response to deficiency and excess. Plant nutrients and abiotic stress tolerance, 171-190. doi: 10.1007/978-981-10-9044-8_7.

31. Nelson, D., and Sommers, L.1996. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. In: D.L. Sparks (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods. SSSA and ASA, Madison, W. I, pp. 961-1010.

32. Nourgholipour, F., Hosseini, H.M., Tehrani, M.M., Motesharezadeh, B., Moshiri, F. and Mousavi, S.M., 2022a. Phosphorus fractionation affected by root induced changes of two canola cultivars. Eurasian Soil Science, 55(6): 819-829. https://doi.org/10.1134/S1064229322060102.

33. Nourgholipour, F., M. A. Khodshenas, J. Ghadbeglou, S. Zamani, M. Rajaee, H. Naqavi, R. Ahmadi Adli, M. Shariatmadari, M. Yahyaabadi, Kh. Dahmardeh, A. A. Shahabi, A. Sabbah, A. Baybordi, M. A. Rezaei, K. Mirzashahi. 2017. Optimization of fertilizer recommendations for new safflower cultivars in warm and cold regions of Iran. Final report of the research project, Soil and Water Research Institute. 53415-29/1/1397. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

34. Nourgholipour, F., Mirseyed Hosseini, H., Tehrani, M.M., Motesharezadeh, B. and Moshiri, F., 2018. Comparison of phosphorus efficiency among spring oilseed rape cultivars in response to phosphorus deficiency. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 46(1): 54-71.

35. Nourgholipour, F., Mousavi, S.M., Zamani, S. and Ahmadi Adli, R., 2024. Growth, Yield, and Phosphorus Efficiency of Safflower Cultivars as Affected by Phosphorus Application in East Azarbaijan Province, Iran. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 55(9): 1335-1348.

36. Nourgholipour, F., Tohidlu, S., Jafarnejadi, A., Mohammad Nejad, Y., Mirzashahi, K., Ghaderi, J., Arzanesh, M.H., Passandideh, M., Bybordi, A., Montajabi, N. and Zolfi Bavariani, M., 2022b. Comparison of farmer-specific fertilization method and the recommended combined fertilization in parts of Iran. Land Management Journal, 10(2): 209-220. doi: 10.22092/lmj.2022.127564 (in Persian).

37. Olsen, S.R., and Sommers, L. E. 1982. Phosphorus. In A. L. Page et al. (eds.), Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties of Phosphorus. 2nd ed. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp. 403-430.

38. Pearse, S.J., Veneklaas, E.J., Cawthray, G.R., Bolland, M.D. and Lambers, H., 2006. Carboxylate release of wheat, canola and 11 grain legume species as affected by phosphorus status. Plant and Soil, 288: 127-139.

39. Penn, C.J., Camberato, J.J. and Wiethorn, M.A., 2023. How Much phosphorus uptake is required for achieving maximum maize grain yield? Part 2: Impact of phosphorus uptake on grain quality and partitioning of nutrients. Agronomy, 13(1): 258. doi:10.3390/agronomy13010258.

40. Raghothama, K., and Karthikeyan, A. 2005. Phosphate acquisition. In Root Physiology: from Gene to Function (pp. 37-49): Eds, H. Lambers and T. D. Colmer. Pages: 270. Springer Dordrecht. doi:10.1007/1-4020-4099-7.

41. Raiesi, T., Moradi, B. and Mousavi, S.M., 2022. Alterations of P fractions and some biochemical features in rhizosphere soil induced by the root activities of citrus rootstocks with different P acquisition efficiency. Eurasian Soil Science, 55(2): 212-220. doi: 10.1134/S1064229322020107.

42. Rhoades, J. 1982. Soluble salts. In: A. L. Page (ed.), Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and microbiological properties, SSSA and ASA, Madison, WI, 167-179.

43. Rietra, R.P., Heinen, M., Dimkpa, C.O. and Bindraban, P.S., 2017. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. Communications in soil science and plant analysis, 48(16): 1895-1920. doi:10.1080/00103624.2017.1407429.

44. Rose, T. J., and Wissuwa, M. 2012. Rethinking internal phosphorus utilization efficiency: a new approach is needed to improve PUE in grain crops. Advances in agronomy, 116: 185-217.

45. Santa-María, G.E., Moriconi, J.I. and Oliferuk, S., 2015. Internal efficiency of nutrient utilization: what is it and how to measure it during vegetative plant growth?. Journal of experimental botany, 66(11): 3011-3018.

46. Shahbazi K., and Besharati, H. 2013. Overview of the fertility status of agricultural soils in Iran. Journal of Land Management, 1(1), pp. 1-15 (in Persian). doi:20.1001.1.23456205.1392.1.1.1.2.

47. Silva, C.J., da Silva, A.C., Zoz, T., Toppa, E.V.B., Silva, P.B. and Zanotto, M.D., 2015. Genetic divergence among accessions of Carthamus tinctorius L. by morphoagronomic traits. African Journal of Agricultural Research, 10(52): 4825-4830. doi:10.5897/AJAR2015.9859.

48. Sofy, S.O., Hama, S.J. and Hamma-Umin, B.O., 2020. Influence of phosphorus fertilizer on yield and oil of safflower (Carthamus tinctorius) varieties under rainfed condition. Applied Ecology & Environmental Research, 18(2). doi: 10.15666/aeer/1802_34093418.

49. Sparks, D.L., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R. , Soltanpour, P. , Tabatabai, M., Johnston, C., and Sumner, M. 1996. Methods of soil analysis. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

50. Sreekanth, N., Singh, V., Tiwari, D. and George, S.G., 2021. Effect of nitrogen and phosphorus levels on growth and yield of safflower (Carthamus tinctorius L.). The Pharma Innovation Journal, 10(10): 2271-2273. https://www.thepharmajournal.com/archives/2021/vol10issue10/PartAF/10-10-74-221.pdf

51. Statistics. 2023. Agricultural statistics of crops for the crop year 2022-2021. Ministry of Agricultural Jihad, Tehran, Iran. https://www.maj.ir/Dorsapax/userfiles/Sub65/Amarnameh-J1-1401.pdf . (In Persian).

52. Taalab, A.S., Ageeb, G.W., Siam, H.S. and Mahmoud, S.A., 2019. Some Characteristics of Calcareous soils. A review AS Taalab1, GW Ageeb2, Hanan S. Siam1 and Safaa A. Mahmoud1. Middle East Journal, 8(1): 96-105.

53. Tandy, S., Hawkins, J.M., Dunham, S.J., Hernandez-Allica, J., Granger, S.J., Yuan, H., McGrath, S.P. and Blackwell, M.S., 2021. Investigation of the soil properties that affect Olsen P critical values in different soil types and impact on P fertiliser recommendations. European Journal of Soil Science, 72(4): 1802-1816. https://doi.org/10.1111/ejss.13082

54. Tehrani, M.M., Balali, M.R., Moshiri, F. and Daryashenas, M., 2012. Fertilizer recommendation and forecast in Iran: challenges and strategies. Iranian Journal of Soil Research, 26(2): 123-144. (In Persian). doi: 10.22092/IJSR.2012.126365.

55. 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. doi:10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x.

56. Win, M., Nakasathien, S. and Sarobol, E., 2010. Effects of phosphorus on seed oil and protein contents and phosphorus use efficiency in some soybean varieties. Agriculture and Natural Resources, 44(1): 1-9.

57. Zhang, H.W., Huang, Y., Xiang-Sheng, Y.E. and Fang-Sen, X.U., 2008. Evaluation of phosphorus efficiency in rapeseed (Brassica napus L.) recombinant inbred lines at seedling stage. Acta Agronomica Sinica, 34(12): 2152-2159. doi: 10.1016/S1875-2780(09)60024-.

58. Zhang, W., Zhang, W., Wang, X., Liu, D., Zou, C. and Chen, X., 2021. Quantitative evaluation of the grain zinc in cereal crops caused by phosphorus fertilization. A meta-analysis. Agronomy for Sustainable Development, 41(1): p.6. doi: 10.1007/s13593-020-00661-0.