نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۹، ص. ۴۵۳-۴۳۹

Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 2, May-June 2020, p. 439-453

مقاله علمی-پژوهشی

تأثیر فسفر بر عملکرد دانه و شاخص‌های کارآیی فسفر در ارقام زمستانه کلزا در منطقه کرمانشاه

جلال قادری[1*]- فریدون نورقلی پور[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۰۶

چکیده

شناسایی رقم‌هایی از گیاهان که به‌صورت کارآمدی بتوانند فسفر خاک را جذب و مصرف کنند، می‌تواند باعث کاهش هزینه مالی و زیست‌محیطی کاربرد کودهای فسفره گردد. لذا به‌منظور مقایسه ارقام زمستانه کلزا ازنظر جذب، مصرف و کارآیی فسفر، این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو عامل الف) فسفر (P) در پنج سطح صفر، ۸۰، ۱۶۰، ۲۴۰ و ۳۰۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل بر هکتار و ب) ارقام کلزا شامل اکاپی، اپرا و زرفام، در سه تکرار و در مزرعه ایستگاه تحقیقاتی ماهیدشت کرمانشاه طی دو سال زراعی اجرا گردید. نتایج نشان داد که اثرات برهم‌کنش مقدار فسفر و ارقام کلزا بر غلظت فسفر برگ، عملکرد دانه، کاه، غلظت و جذب فسفر دانه و شاخص‌های کارآیی بر اساس وزن دانه و جذب فسفر دانه، معنی‌دار بود. با توجه به مقدار فسفر اولیه خاک (۷/۲ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک) در میانگین دو سال، بیش‌ترین عملکرد دانه و کاه به ترتیب ۳۲۰۳ و ۴۶۱۳ کیلوگرم بر هکتار از مصرف ۳۰۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تریپل بر هکتار و با رقم اکاپی به‌دست آمد. در شرایط کمبود فسفر، تفاوت معنی‌دار بین ارقام ازلحاظ عملکرد دانه، مشاهده نشد. تفاوت معنی‌داری بین سه رقم ازنظر شاخص‌های کارآیی فسفر، مشاهده شد. رقم اپرا کارا در جذب (۰/۸۴) و رقم زرفام کارا در استفاده از فسفر (۱۵۲ کیلوگرم دانه در هر کیلوگرم کود)، ولی رقم اپرا فسفر کارا بود. با توجه به روابط همبستگی با شاخص تنش کمبود فسفر به نظر می‌رسد، فسفر کارآیی ارقام، وابسته به کارآیی در جذب فسفر باشد (R^2 =۰/۴۷۷ **) تا کارآیی در مصرف فسفر (R^2 =۰/۰۷۶ ^{ns}). کارآیی جذب می‌تواند به‌عنوان شاخص کلیدی برای تفکیک ارقام فسفر کارای کلزا در شرایط مزرعه استفاده گردد. کاربرد ارقام اپرا و اکاپی با ۸۰ کیلوگرم کود در شرایط مشابه این آزمایش، قابل توصیه خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: استفاده از فسفر، جذب، غلظت فسفر، کارایی، کلزا

مقدمه

گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) به دلیل سازگاری با شرایط مختلف و ارزش اقتصادی در مقایسه با غلات، یکی از مهم‌ترین گیاهان دانه روغنی در ایران می‌باشد و محصولی مناسب برای تناوب زراعی با غلات است (۱). عملکرد و کیفیت کلزا بستگی به عوامل محیطی، ژنوتیپ و اثر برهم‌کنشی آن‌ها دارد (۱۵).

پایین بودن سطح حاصلخیزی خاک مخصوصاً کمبود فسفر، از عوامل محدودکننده عملکرد کلزا می‌باشد و کاربرد آن در مراحل اولیه رشد این محصول حیاتی است (۳۴). فسفر دومین عنصر کلیدی ازنظر تغذیه گیاه و ازجمله عناصر مهم در تولید محصول به شمار می‌رود که غلظت آن در گیاه کلزا در مراحل شروع ساقه دهی تا قبل از گلدهی بین ۰/۳۵ تا ۰/۷ درصد متغیر است (۲۲). مقدار نیاز کلزا به فسفر بیش‌تر از گندم است (۲۶). کمبود فسفر باعث محدودشدن رشد اندام هوایی و ریشه شده و مقدار مناسب آن باعث بلوغ زودتر گیاه می‌شود (۲۱). مقدار فسفر قابل‌دسترس در ۵/۲ میلیون هکتار از اراضی قابل‌کشت ایران (۷۰/۲ درصد از اراضی آبی) کم‌تر از ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، گزارش‌شده است (۲۹). مطالعات نشان داده است که به دلیل پیچیدگی خواص شیمیایی فسفر در خاک‌های آهکی، کم‌تر از ۲۰ درصد کود فسفره مصرفی توسط گیاه برداشت می‌شود و بقیه آن در خاک تثبیت و یا تغییر شکل یافته و به شکل غیر قابل‌جذب درمی‌آید (۳۰). ثابت‌شده است که جذب اختصاصی فسفر روی کانی‌های با بار متغیر مانند اکسیدهای آهن و آلومینیم و رس‌ها مسئول پایین بودن قابلیت دسترسی به فسفر بومی خاک و فسفر مصرفی به فرم کودهای شیمیایی است (۳). بنابراین کشاورزان برای رسیدن به یک عملکرد مناسب جهت حفظ تولید باید هرسال نسبت

۱- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران
(*- نویسنده مسؤل: Email: ghaderij@yahoo.com)
۲- استادیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

DOI: 10.22067/jsw.v34i2.82911

به مصرف مقادیر زیاد کودهای فسفاتی اقدام کنند که بر اساس برخی بررسی‌ها، منابع فسفری که برداشت از آن‌ها اقتصادی است، ممکن است تا سال ۲۰۵۰ به اتمام برسد (۳۰). مصرف بی‌رویه کودهای فسفاته نیز دارای اثرات سوء بر محیط‌زیست می‌باشد (۲). افزایش قیمت کودها و مشکلات زیست‌محیطی، باعث افزایش آگاهی عمومی نسبت به حفاظت از خاک، آب، انرژی و کنترل آلودگی آب‌های زیرزمینی شده است و ایده اصلاح گیاهان ازلحاظ فسفر کارایی به‌جای اصلاح خاک برای حل مشکل کمبود فسفر در خاک‌ها مطرح‌شده است (۱۰). گسترش ارقام زراعی که بتوانند شکل‌های تثبیت‌شده فسفر خاک را به‌طور مؤثرتری مصرف کنند، می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های تولید، ایجاد سیستم‌های زراعی پایدار و حفظ سلامت محیط‌زیست گردد (۲۷). از دیدگاه تغذیه‌ی گیاهی، ژنوتیپ کارا ژنوتیپی است که بتواند فسفر خاک را بیش‌تر محلول کرده و جذب نماید و یا بتواند از فسفر جذب‌شده، برای تولید محصول به نحو مطلوب استفاده نماید (۲۰). تفاوت‌های ژنوتیپی در کارایی فسفر در بسیاری از گیاهان، مطالعه و گزارش‌شده است که اختلاف در عکس-العمل ژنوتیپ‌های مختلف در شرایط کمبود فسفر، ممکن است با تغییر ویژگی‌های مورفولوژی ریشه، کارآیی مکانیسم جذب یون، اسیدی کردن ریزوسفر، وجود آنیون‌های آلی در ترشحات ریشه، حرکت عناصر غذایی از ریشه و آوندها، مصرف عناصر غذایی در متابولیسم و فرآیندهای رشد مربوط باشد (۲۰). فسفر کارایی پدیده‌ای پیچیده است که تحت تأثیر مکانیسم‌های گیاهی دخیل در جذب فسفر از خاک و مصرف فسفر در سطح متابولیسم سلولی، می‌باشد. اینکه کدام‌یک از این عوامل سبب افزایش کارآیی فسفر می‌شود، معلوم نیست و تفاوت‌های زیادی ازنظر اثر هر یک از عوامل ذکرشده بر کارایی فسفر وجود دارد (۲۶). برخی از مطالعات نشان داده‌اند که گیاهان فسفر کارا از طریق ترشح مقادیر زیادی اسیدهای آلی باعث افزایش حلالیت فسفات‌های کم محلول از قبیل فسفات‌های کلسیم می‌شوند (۳۰). گیاهان فسفر کارا برای رشد بهتر دو مکانیسم اصلی را به کار می‌برند که شامل افزایش در جذب فسفر از خاک و افزایش در مصرف فسفر (شامل مکانیسم‌های داخلی در سلول) می‌باشد (۲۴). کارایی جذب در حقیقت توانایی گیاه در استخراج فسفر از خاک در شرایط کمبود فسفر می‌باشد. گیاهان همچنین می‌توانند با استفاده از مکانیسم‌هایی، کارایی استفاده از فسفر را در درون خود بهبود بخشند که درنتیجه آن مقدار بیشتر وزن خشک در هر واحد فسفر جذب‌شده تولید می‌شود. فسفر کارایی ارقام ترکیبی از هر دو مکانیسم کارایی جذب و نیز مصرف فسفر می‌باشد (۲۶). مسئله کلیدی در ارزیابی فسفر کارایی، انتخاب شاخص مناسب ارزیابی است (۳۳). روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری کارایی جذب و استفاده فسفر در نظر گرفته‌شده است (۱۲). اختر و همکاران (۲) گزارش کردند که کارآیی جذب و مصرف فسفر، دو فاکتور مهم در ارزیابی ارقام کلزا هستند. بنا به نظر عزیز و همکاران (۳) و زانگ و همکاران (۳۴)، قابلیت بیشتر در جذب فسفر و تغییر در وضعیت ریشه و نیز ترشحات ریشه، دلیل افزایش کارآیی در ارقام کلزای موردبررسی آن‌ها بود و کارآیی در مصرف یا جابجایی مجدد عناصر در اندام‌های گیاه کلزا، نقش کمتری داشت. آن‌ها هم‌چنین از وزن خشک نسبی اندام هوایی به‌عنوان شاخص کارآیی، استفاده کردند و نشان دادند که تحت شرایط ناکافی فسفر، فسفر کل گیاه و وزن خشک اندام هوایی می‌توانند شاخص‌های مورد اعتمادی برای ارزیابی کارآیی فسفر باشند. گونز و همکاران (۱۱) گزارش دادند که نتایج فسفر کارآیی در شرایط مزرعه‌ای و گلخانه‌ای در گیاه گندم باهم مطابقت نداشت و هیچ همبستگی بین فسفر کارآیی ارقام در دو شرایط مشاهده نشد.

با توجه به موارد اشاره‌شده، به نظر می‌رسد برای افزایش کارآیی فسفر در زراعت کلزا، لازم است، ارقامی انتخاب گردند که کارآیی جذب بیش‌تری داشته و در استفاده از فسفر جذب‌شده مؤثرتر عمل نمایند. با توجه به کمبود فسفر در سطح وسیعی از مزارع کشور و اهمیت شناسایی ارقام فسفر کارا و تحقیقات کم انجام‌شده در این زمینه در ایران و گلخانه‌ای بودن مطالعات قبلی انجام‌شده، این پژوهش به‌صورت مزرعه‌ای اجرا شد. نتایج این تحقیق می‌تواند مشخص نماید که کدام‌یک از ارقام برای تولید یکسان دانه به مقدار کمتری از فسفر نیاز دارد. این امر می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد سودمند برای شرایط کمبود فسفر در نظر گرفته شود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش شامل مقدار فسفر (P) در پنج سطح صفر، ۸۰، ۱۶۰، ۲۴۰ و ۳۰۰ کیلوگرم بر هکتار از منبع کود سوپرفسفات تریپل و سه رقم کلزا به اسامی اکاپی، اپرا و زرفام در سه تکرار به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، در مزرعه ایستگاه تحقیقاتی ماهیدشت، استان کرمانشاه (مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۱۶ دقیقه عرض شمالی، ارتفاع از سطح دریا ۱۳۸۰ متر و در کیلومتر ۲۰ جاده کرمانشاه به اسلام‌آباد غرب) به مدت دو سال زراعی اجرا شد. متوسط بارندگی ۱۰ ساله‌ی منطقه ۳۳۵ میلی‌متر بود. ارقام کشت‌شده آزادگرده‌افشان بوده و بذرها از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، تهیه شد. قبل از کشت از محل اجرای آزمایش یک نمونه مرکب خاک (Fine, Mixed, Thermic Vertic Calcixerepts) از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری تهیه و برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن اندازه‌گیری گردید که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل انجام آزمایش قبل از کشت

Table 1- Some physical and chemical properties of soil

بافت خاک Soil texture	مس قابل‌استفاده گیاه (Cu)	منگنز قابل‌استفاده گیاه (Mn)	روی قابل‌استفاده گیاه (Zn)	آهن قابل‌استفاده گیاه (Fe)	پتاسیم قابل‌استفاده گیاه (K)	فسفر قابل‌استفاده گیاه (P)	کربن آلی (OC)	نیتروژن (N)	کربنات کلسیم (TNV)	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) EC ($dS\ m^{-1}$)	پ‌هاش pH
	میلی‌گرم بر کیلوگرم ($mg\ kg^{-1}$)						درصد (%)				
SC	1.2	6	0.7	5.2	290	7.2	0.84	0.08	17	0.6	7.8

در نمونه خاک، بافت به‌روش هیدرومتری بویکاس (۸)، کربن آلی به روش والکلی و بلک (۳۱)، pH گل اشباع به‌وسیله الکترود شیشه‌ای مک لین (۱۹)، هدایت الکتریکی عصاره اشباع با دستگاه هدایت سنج به روش بلک و همکاران (۶)، فسفر قابل‌جذب با روش اولسن (۲۱)، آهن، روی، منگنز و مس با عصاره‌گیر DTPA به‌روش لیندسی و نورول (۱۷) عصاره گیری و با دستگاه جذب اتمی قرائت شدند. این تحقیق در خاکی انجام شد که مقدار فسفر قابل‌جذب آن پایین‌تر از حد بحرانی برای گیاه کلزا (۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود (۱۴). تمامی تیمارهای فسفر همراه با ۳۰ کیلوگرم بر هکتار کود سولفات روی و نیز یک‌سوم کود نیتروژنه (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره) هنگام کاشت مصرف و به‌وسیله دیسک با خاک مخلوط شدند. مابقی کود اوره در دو مرحله ساقه رفتن (۱۲۰ کیلوگرم بر هکتار اوره) و اوایل گلدهی (۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار اوره) به‌صورت سرک مورداستفاده قرار گرفتند.

هر کرت آزمایشی دارای مساحت ۱۲ مترمربع بود و شامل ۱۲ خط کاشت به طول ۵ متر و فاصله ردیف‌ها و بوته‌ها به ترتیب ۲۰ و ۵ سانتی‌متر بود. کشت با دستگاه کارنده وینتر اشتایگر و مقدار بذر مصرفی ۸ کیلوگرم بر هکتار بود. آبیاری با استفاده از سیستم آبیاری بارانی (کلاسیک ثابت) انجام شد و کلاس آب آبیاری C3- S1 بود. سایر عملیات زراعی مانند تنک کردن، بر اساس نیاز انجام شد. در پاییز برای مبارزه با علف‌های هرز باریک برگ از سم سوپرگالانت به مقدار یک لیتر در هکتار و در اوایل بهار برای مبارزه با علف‌های هرز پهن‌برگ از سم لونترل به مقدار یک لیتر در هکتار، استفاده شد. در مرحله خروج از روزت و ابتدای ساقه دهی، نمونه برگ مقارن با مرحله رشدی ۱۸ از کد دورقمی رشد کلزا (۷) تهیه شد (کامل‌ترین برگ از بالا) و غلظت فسفر آن اندازه‌گیری شد. پس از پایان دوره رسیدگی، مقدار عملکرد دانه، کاه، غلظت فسفر در دانه و جذب فسفر دانه (حاصل‌ضرب عملکرد دانه در غلظت فسفر دانه) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری غلظت فسفر، نمونه‌های دانه پس از شستشو با آب مقطر، در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد با آون خشک و توسط آسیاب برقی پودر شدند. سپس مقدار ۰/۵ گرم از نمونه آسیاب شده به روش هضم مرطوب روی اجاق الکتریکی در دمای ۲۰۰ الی ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده و فسفر به روش طیف‌سنجی (رنگ زرد مولیبدات وانادات) و با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۴۷۰ نانومتر (۳۲) اندازه‌گیری شد. تجزیه‌وتحلیل آماری نتایج با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS و مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام گرفت. در این بررسی، شاخص‌های کارآیی استفاده از فسفر، جذب فسفر و فسفر کارایی ارقام با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه شد.

جذب فسفر[1] دانه (کیلوگرم فسفر در هکتار) = حاصل‌ضرب غلظت فسفر (کیلوگرم فسفر در کیلوگرم دانه) و عملکرد دانه (کیلوگرم دانه در هکتار).

شاخص کارایی استفاده از فسفر[2] (کیلوگرم دانه با هر کیلوگرم فسفر) = نسبت عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) به جذب فسفر دانه در تیمار مربوطه (کیلوگرم فسفر در هکتار) (۲۶). نشان دهندهٔ تولید ماده خشک گیاهی به ازای واحد فسفر جذب‌شده می‌باشد و رقمی که بتواند فعالیت‌های متابولیکی خود را در غلظت پایین فسفر تنظیم نماید و ماده خشک بیشتری نسبت به واحد فسفر جذب‌شده تولید نماید رقم کارا در مصرف فسفر شناخته می‌شود. هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد نشان می‌دهد که مقدار بیشتری دانه به ازای هر واحد فسفر جذب‌شده در دانه تولیدشده است.

شاخص کارآیی در جذب فسفر[3] (کیلوگرم بر کیلوگرم) = نسبت جذب فسفر دانه در تیمار شاهد (کیلوگرم فسفر در هکتار) به جذب فسفر دانه در تیمار کود فسفاته (کیلوگرم فسفر در هکتار) (۲۴). هر چه مقدار این شاخص در رقم کلزا بیشتر باشد نشان می‌دهد که مقدار جذب در شرایط تنش کمبود فسفر و شرایط فراهمی فسفر به هم نزدیک‌تر است.

شاخص فسفر کارآیی[4] (بدون واحد) = نسبت عملکرد دانه در تیمار شاهد (کیلوگرم دانه در هکتار) به عملکرد دانه در تیمار کود

1- Phosphorus uptake
2- Phosphorus utilization efficiency= PUTE
3- P acquisition efficiency= PACE
4- P efficiency= PE

فسفره (کیلوگرم دانه در هکتار) (۲۴). هرچه مقدار این شاخص در یک رقم کلزا بیشتر باشد آن رقم قادر است در شرایط کمبود نیز مقدار دانه نزدیک به شرایط فراهمی فسفر تولید نماید.

و شاخص تنش فسفر[1] بر اساس عملکرد دانه (GW=grain weight) تعیین شد (۲). افزایش مقدار این شاخص نشان می‌دهد رقم کلزا به مقدار بیشتری تحت تأثیر تنش کمبود فسفر است.

$$PSF = (GW\ P_{fertilized} - GW\ P0)\ (Kg\ ha^{-1}) / GW\ P_{fertilized}\ (Kg\ ha^{-1})$$

نتایج و بحث

همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌گردد اثر سال بر کلیه شاخص‌های اندازه‌گیری شده، غیر از عملکرد کاه، معنی‌دار بود. این امر ممکن است مربوط به تفاوت میانگین بارندگی، میانگین حداقل و حداکثر دما، دوره‌های بروز تنش سرمای زیر ۵- درجه و مدت‌زمان آن و مطابقت آن با دوره‌های حساس رشدی کلزا در دو سال اجرای آزمایش باشد.

عملکرد دانه و کاه

تجزیه واریانس مرکب دوساله نتایج نشان داد که اثر اصلی مقدار فسفر بر عملکرد دانه و کاه در سطح یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). بین ارقام ازلحاظ عملکرد دانه، تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۳). ارقام کلزای اکاپی، زرفام و اپرا در سطح فسفر صفر به ترتیب ۲۷۹۴، ۲۷۵۴ و ۲۸۱۴ کیلوگرم بر هکتار دانه تولید نمودند که تفاوت آن‌ها با یکدیگر در این سطح فسفر معنی‌دار نبود. این امر نشان می‌دهد هر سه رقم در مقدار فسفر اولیه خاک (۷/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به‌صورت تقریباً مشابهی ازلحاظ تولید دانه عمل نمودند. اگرچه مقدار کاه تولیدی در این سطح در رقم اپرا به‌صورت معنی‌داری بیش‌تر از رقم اکاپی بود. مقایسه میانگین نتایج نشان داد که با مصرف فسفر، شاخص‌های مذکور افزایش معنی‌داری داشت، به‌طوری‌که بیش‌ترین عملکرد دانه و کاه به ترتیب ۳۱۹۴ و ۴۴۷۱ کیلوگرم بر هکتار از سطح ۳۰۰ کیلوگرم کود فسفاته حاصل شد که تفاوت آن با شاهد (بدون کاربرد کود فسفر دار)، معنی‌دار گردید. با افزایش مقدار کاربرد فسفر در خاک از سطح صفر به ۸۰ کیلوگرم در هکتار کود، مقدار عملکرد دانه در دو رقم اکاپی و اپرا افزایش معنی‌دار یافت (به‌ترتیب ۹/۴ و ۹/۳ درصد) ولی در رقم زرفام تفاوت معنی‌دار نبود (افزایش ۶/۳ درصد). در هیچ‌یک از سه رقم کلزا در این سطح فسفر (۸۰ کیلوگرم بر هکتار)، عملکرد کاه نسبت به شاهد، افزایش معنی‌دار نیافت (جدول ۴). افزایش عملکرد دانه به دلیل مصرف کود ممکن است ناشی از پایین بودن مقدار فسفر قابل‌جذب اولیه در خاک باشد که پایین‌تر از حد بحرانی فسفر برای گیاه کلزا بود. کورکماز و التیناش (۱۶) نیز در بررسی خود بر روی ارقام زمستانه کلزا، کاهش وزن خشک ریشه و اندام هوایی را در خاکی با مقدار ۳/۵ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، مشاهده نمودند که این امر نشان‌دهنده اهمیت فسفر برای رشد اندام هوایی و نیز ریشه گیاه کلزا می‌باشد. در بررسی‌های دیگر انجام‌شده نیز کاهش رشد و علائم کمبود فسفر را در گیاه کلزا و در خاک‌هایی با فسفر اولسن کم‌تر از ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، مشاهده نمودند (۲۸ و ۳۴). در بررسی نایت و همکاران (۱۴)، گیاه کلزا در خاک‌هایی با مقدار فسفر کم‌تر از ۱۶–۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به کاربرد کود فسفره واکنش نشان داد که این امر وابسته به مکان و نوع رقم متفاوت بود. در کلیه سطوح فسفر کاربردی، نسبت دانه به کاه، بیش‌تر از تیمار شاهد بدون فسفر بود و به‌صورت میانگین بیش‌ترین مقدار مربوط به سطح ۳۰۰ کیلوگرم کود بود ولی تفاوت بین تیمارهای فسفر مصرفی باهم، معنی‌دار نگردید (جدول ۳). رقم اکاپی بیش‌ترین نسبت دانه به کاه را تولید نمود. در این رقم بیش‌ترین مقدار نسبت دانه به کاه از سطح ۲۴۰ کیلوگرم کود حاصل شد درصورتی‌که در دو رقم دیگر از سطح ۳۰۰ کیلوگرم کود به‌دست آمد (جدول ۴). با توجه به عدم معنی‌داری نسبت دانه به کاه در سطوح بالاتر مصرف کود، سطح بهینه مصرف، می‌تواند مقدار ۸۰ کیلوگرم بر هکتار کود باشد. به نظر می‌رسد در رقم اپرا در زمان کمبود فسفر مقدار بیش‌تر انرژی گیاه برای تولید کاه نیز استفاده‌شده است. به دلیل این‌که هدف در تولید برخی از محصولات زراعی ازجمله کلزا تولید دانه بیشتر است لذا نسبت دانه به کاه نیز در این محصول‌ها دارای اهمیت است و برای محاسبه کارایی ارقام از بابت فسفر از مقدار تولید دانه به‌جای بیوماس کل گیاه استفاده می‌گردد (۲۶).

تجزیه واریانس مرکب دوساله نتایج نشان داد که اثر متقابل رقم و مقدار فسفر بر عملکرد دانه و کاه در سطح پنج درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲) و بیش‌ترین عملکرد دانه از رقم اکاپی و سطح ۳۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود فسفاته حاصل شد. این تیمار بیش‌ترین عملکرد کاه را نیز داشت و کم‌ترین عملکرد به سطح شاهد رقم زرفام تعلق داشت (جدول ۴). اگرچه کلزا عموماً به کمبود فسفر حساس است، اما بررسی‌ها نشان داده که رقم‌های مختلف حساسیت متفاوتی دارند. چن و همکاران (۹) افزایش معنی‌دار عملکرد دانه و کاه و به‌تبع آن عملکرد روغن را در اثر مصرف فسفر در مقایسه با تیمار شاهد بدون مصرف فسفر گزارش کردند. رابطه همبستگی بین عملکرد دانه و کاه در مطالعه فعلی، مثبت و معنی‌دار بود (R^2 =۰/۳۵ **).

1- P stress factor = PSF

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس مرکب (میانگین مربعات) تأثیر مقدار فسفر و رقم بر عملکرد، غلظت و شاخص‌های کارآیی فسفر در کلزا

Table 2- Combined analysis of variance (Mean squares) for effect of phosphorus on grain yield and phosphorus efficiency indices in canola cultivars

منبع Source	درجه آزادی df	Grain yield (kg ha^{-1}) عملکرد دانه	Straw yield (kg ha^{-1}) عملکرد کاه	Grain/Straw نسبت دانه به کاه	Phosphorus concentration in grain (%) غلظت فسفر دانه	Phosphorus concentration in leaf (%) غلظت فسفر برگ	Phosphorus efficiency فسفر کارایی	Phosphorus use efficiency (Kg GW kg^{-1}P) کارایی استفاده از فسفر	Phosphorus uptake (Kg P ha^{-1}) جذب فسفر	Phosphorus uptake efficiency کارایی جذب فسفر
تکرار (Replication)	2	8489.09^{ns}	40678.18^{ns}	0.001^{ns}	0.002^{ns}	0.003^{ns}	0.001	68.02^{ns}	0.551^{ns}	0.006^{ns}
رقم (cultivar)	2	7721.1^{ns}	73292.98^{ns}	0.004^{ns}	0.008**	0.010**	0.005*	623.94**	6.242*	0.032**
فسفر (Phosphorus)	4	426734.71**	217564.27**	0.006**	0.039**	0.009**	0.010**	1868.80**	103.477**	0.046**
رقم*فسفر (cultivar* Phosphorus)	8	34083.06**	107111.03**	0.002*	0.007**	0.002*	0.004*	301.23**	5.260**	0.008*
سال (Year)	1	82810.00**	36401.11^{ns}	0.011**	0.206**	0.227**	0.032**	9361.56**	139.378**	0.094**
رقم*سال (cultivar*Year)	2	125132.23**	21101.11^{ns}	0.005*	0.014**	0.003**	0.002*	806.41**	1.499^{ns}	0.002^{ns}
فسفر*سال (Phosphorus*Year)	4	55200.47**	72487.22^{ns}	0.001^{ns}	0.002*	0.002*	0.006**	51.94^{ns}	8.250**	0.010*
فسفر*رقم*سال (Cultivar*Phosphorus*Year)	8	50695.50**	43333.06^{ns}	0.001^{ns}	0.002**	0.002*	0.006**	103.07**	1.299^{ns}	0.002^{ns}
خطا (Error)	58	10359.35	29145.69	0.001	0.001	0.001	0.001	29.94	1.463	0.003

ns, **, *: به ترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد

No significantly different, significantly different at 1 and 5% probability level, respectively.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر ساده فسفر بر عملکرد، غلظت و شاخص‌های کارآیی فسفر در ارقام کلزا

Table 3- Mean comparison results for main effect of phosphorus on grain yield and phosphorus efficiency indices in canola cultivars

مقدار کود فسفر Fertilizer (kg TSP ha^{-1})	Grain yield (kg ha^{-1}) عملکرد دانه	Straw yield (kg ha^{-1}) عملکرد کاه	Grain/Straw نسبت دانه به کاه	Phosphorus concentration in grain (%) غلظت فسفر دانه	Phosphorus concentration in leaf (%) غلظت فسفر برگ	Phosphorus efficiency فسفر کارایی	Phosphorus use efficiency (Kg GW kg^{-1}P) کارایی استفاده از فسفر	Phosphorus uptake (Kg P ha^{-1}) جذب فسفر	Phosphorus uptake efficiency کارایی جذب فسفر
0	2787^{c}	4171^{c}	0.669^{b}	0.619^{d}	0.471^{d}	-	163^{a}	17.2^{d}	-
80	3021^{b}	4342^{b}	0.695^{a}	0.681^{c}	0.503^{bc}	0.925^{a}	149^{b}	20.5^{c}	0.846^{a}
160	3038^{b}	4368^{ab}	0.696^{a}	0.691^{c}	0.489^{c}	0.921^{a}	146^{b}	21.0^{c}	0.827^{a}
240	3064^{b}	4378^{ab}	0.698^{a}	0.717^{b}	0.516^{ab}	0.911^{a}	140^{c}	21.9^{b}	0.790^{b}
300	3194^{a}	4471^{a}	0.715^{a}	0.742^{a}	0.528^{a}	0.874^{b}	136^{d}	23.7^{a}	0.732^{c}
Mean	3021	4346	0.695	0.69	0.501	0.91	147	20.86	0.799
رقم Cultivar									
Okapi	3039^{a}	4297^{b}	0.708^{a}	0.692^{a}	0.517^{a}	0.903^{b}	146^{b}	21.0^{a}	0.798^{b}
Opera	3007^{a}	4350^{ab}	0.691^{b}	0.705^{a}	0.505^{a}	0.924^{a}	143^{c}	21.2^{a}	0.84^{a}
Zarfam	3016^{a}	4396^{a}	0.687^{b}	0.673^{b}	0.481^{b}	0.896^{b}	152^{a}	20.4^{b}	0.763^{c}
Mean	3021	4348	0.696	0.69	0.501	0.91	147	20.8	0.8

در هر ستون اعداد دارای حروف مشابه، اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد ندارند.

In each column, numbers with similar letters, not significantly different at 5% level

جدول ٤- مقایسه میانگین اثر متقابل مقدار فسفر و ارقام کلزا بر عملکرد، غلظت و شاخص‌های کارآیی فسفر

Table 4- Mean comparison results for interaction effects of phosphorus on grain yield and phosphorus efficiency indices in canola cultivars

Cultivar رقم	Fertilizer (Kg TSP ha^{-1}) مقدار کود فسفر	Grain yield (kg ha^{-1}) عملکرد دانه	Straw yield (kg ha^{-1}) عملکرد کاه	Grain/Straw نسبت دانه به کاه	Phosphorus concentration in grain (%) غلظت فسفر دانه	Phosphorus concentration in leaf (%) غلظت فسفر برگ	Phosphorus efficiency کارایی فسفر	Phosphorus use efficienc (Kg GW kg^{-1}P) کارایی استفاده از فسفر	Phosphorus uptake (Kg P ha^{-1}) جذب فسفر	Phosphorus uptake efficiency کارایی جذب فسفر
اکاپی Okapi	0	2794^{fg}	4046^{f}	0.693^{bcd}	0.625^{cd}	0.483^{ab}	-	161^{ab}	17.4^{fg}	–
	80	3056^{abcd}	4244^{cdef}	0.719^{ab}	0.705^{abc}	0.502^{ab}	0.915^{abcd}	143^{bcd}	21.5^{bcd}	0.817^{ab}
	160	2990^{bcde}	4220^{def}	0.708^{abc}	0.725^{ab}	0.520^{ab}	0.938^{abc}	139^{cd}	21.7^{abc}	0.808^{ab}
	240	3154^{abc}	4364^{bcde}	0.724^{ab}	0.683^{abc}	0.535^{a}	0.886^{abcd}	146^{bcd}	21.7^{abc}	0.805^{ab}
	300	3203^{a}	4613^{a}	0.695^{bc}	0.717^{ab}	0.547^{a}	0.874^{cd}	141^{cd}	22.9^{ab}	0.763^{bc}
زرفام Zarfam	0	2754^{g}	4133^{ef}	0.664^{cd}	0.585^{d}	0.442^{b}	-	173^{a}	16.0^{g}	–
	80	2927^{defg}	4355^{bcde}	0.673^{cd}	0.653^{bcd}	0.500^{ab}	0.941^{ab}	156^{abc}	19.0^{def}	0.850^{a}
	160	3142^{abc}	4517^{ab}	0.698^{bc}	0.630^{cd}	0.463^{ab}	0.879^{bcd}	159^{ab}	19.8^{cde}	0.815^{ab}
	240	3073^{abcd}	4482^{abc}	0.684^{bcd}	0.740^{a}	0.480^{ab}	0.898^{abcd}	136^{d}	22.6^{ab}	0.713^{cd}
	300	3184^{ab}	4494^{ab}	0.708^{abc}	0.757^{a}	0.522^{ab}	0.865^{d}	134^{d}	24.1^{a}	0.672^{d}
اپرا Opera	0	2814^{efg}	4335^{bcde}	0.650^{d}	0.647^{bcd}	0.487^{ab}	-	155^{bc}	18.2^{efg}	-
	80	3078^{abcd}	4427^{abcd}	0.692^{bcd}	0.683^{abc}	0.508^{ab}	0.919^{abcd}	147^{bcd}	21.1^{bcd}	0.872^{a}
	160	2981^{cdef}	4363^{bcde}	0.683^{bcd}	0.718^{ab}	0.483^{ab}	0.945^{ab}	140^{cd}	21.4^{bcd}	0.857^{a}
	240	2966^{cdef}	4317^{bcde}	0.687^{bcd}	0.722^{ab}	0.523^{a}	0.950^{a}	139^{cd}	21.4^{bcd}	0.852^{a}
	300	3196^{a}	4307^{bcde}	0.743^{a}	0.753^{a}	0.515^{ab}	0.882^{bcd}	133^{d}	24.1^{a}	0.760^{bc}
ضریب تغییرات CV (%)		3.6	3.9	4.2	3.9	5	3.8	3.7	5.9	6.72
میانگین Mean		3021	4348	0.69	0.69	0.501	0.908	147	20.9	0.859

*در هر ستون اعداد دارای حروف مشابه، اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد ندارند.

In each column, numbers with similar letters, not significantly different at 5% level

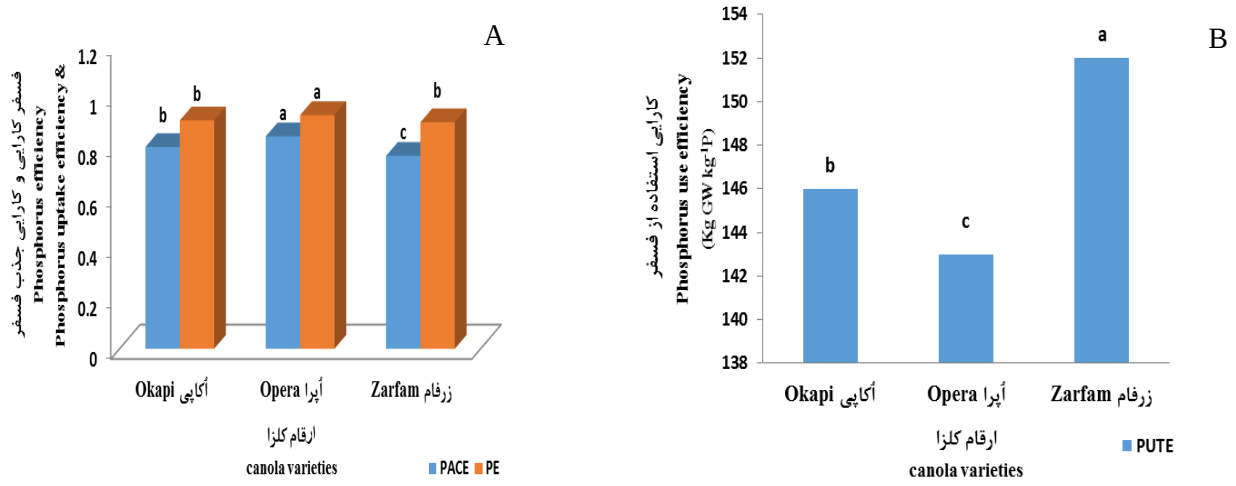
غلظت فسفر در برگ و دانه و جذب فسفر در دانه

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی مقادیر کاربرد فسفر بر غلظت فسفر برگ و نیز غلظت فسفر دانه در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). کاربرد فسفر باعث افزایش غلظت فسفر برگ و نیز غلظت و جذب فسفر دانه ارقام کلزا شد و ازلحاظ آماری اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد بین مقادیر کود فسفاته مصرفی وجود داشت (جداول ۳ و ۴). هم در برگ کلزا و هم در دانه، غلظت فسفر رقم زرفام (۰/۴۸۱ درصد) به‌صورت معنی‌داری در سطح یک درصد کمتر از دو رقم دیگر بود (۰/۵۰۵ و ۰/۵۱۷ درصد به ترتیب در ارقام اپرا و اکاپی). جذب در دانه نیز روندی مشابه این در ارقام داشت و در دو رقم اپرا و اکاپی (به ترتیب ۲۱/۲ و ۲۱ کیلوگرم بر هکتار) بیش‌تر از رقم زرفام بود (۲۰/۳ کیلوگرم بر هکتار). در بررسی اثرات متقابل، بیش‌ترین غلظت فسفر برگ در رقم اکاپی و با کاربرد ۳۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود به‌دست آمد (۰/۵۴۷ درصد) و کم‌ترین آن مربوط به تیمار شاهد رقم زرفام بود (۰/۴۴۲ درصد). در درون هر یک از ارقام، کاربرد فسفر باعث افزایش معنی‌دار غلظت فسفر برگ نسبت به شاهد آن رقم نشد. تنها اختلاف معنی‌دار بین شاهد رقم زرفام (۰/۴۴۲ درصد) و تیمار ۲۴۰ و ۳۰۰ کیلوگرم کود در ارقام اکاپی و اپرا وجود داشت. در دانه بیش‌ترین مقدار غلظت فسفر با کاربرد ۳۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود فسفاته در رقم زرفام به‌دست آمد (۰/۷۵۷ درصد) که اختلاف آن نسبت به تیمار شاهد این رقم معنی‌دار بود. در رقم اکاپی کاربرد سطح ۱۶۰ کیلوگرم کود دارای اختلاف معنی‌دار با تیمار شاهد این رقم بود. در رقم زرفام سطح ۲۴۰ کیلوگرم کود دارای اختلاف معنی‌دار با شاهد بود و در رقم اپرا سطح ۳۰۰ کیلوگرم کود دارای اختلاف معنی‌دار با شاهد این رقم بود. کم‌ترین غلظت فسفر دانه مربوط به تیمار شاهد رقم اکاپی بود (۰/۶۲۵ درصد). بیش‌ترین مقدار جذب فسفر دانه مربوط به سطح ۳۰۰ کیلوگرم کود در ارقام زرفام و اپرا بود (۲۴/۱ کیلوگرم بر هکتار) و کم‌ترین آن مربوط به تیمار شاهد رقم زرفام (۱۶ کیلوگرم بر هکتار) بود. در رقم اکاپی سطح ۸۰ کیلوگرم کود دارای اختلاف معنی‌دار با شاهد این رقم ازلحاظ جذب فسفر دانه بود. در رقم زرفام نیز این وضعیت برای سطح ۸۰ کیلوگرم کود وجود داشت، درحالی‌که اختلاف سطح کودی ۸۰ و ۱۶۰ کیلوگرم معنی‌دار نبود. اختلاف ۲۴۰ کیلوگرم کود با آن‌ها معنی‌دار بود. در رقم اپرا اختلاف سطح ۸۰ کیلوگرم کود با شاهد ازلحاظ جذب فسفر دانه معنی‌دار بود، ولی بین سطوح ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ کیلوگرم اختلاف غیر معنی‌دار بود. سطح ۳۰۰ کیلوگرم کود در این رقم با کلیه سطوح این رقم دارای اختلاف معنی‌دار بود. افزایش غلظت فسفر در گیاه را می‌توان پاسخ به کود فسفاته با توجه به پایین بودن مقدار فسفر قابل‌جذب خاک (پایین‌تر از حد بحرانی) نسبت داد. تفاوت‌های ژنتیکی در جذب فسفر ممکن است مربوط به اختلاف ژنوتیپ‌ها در کارآیی جذب عناصر غذایی از خاک و تفاوت در تبدیل عناصر جذب‌شده برای تولید ماده خشک گیاه باشد. بین غلظت فسفر برگ و غلظت فسفر دانه، همبستگی معنی‌داری وجود نداشت (R^2 =۰/۱۱ ^{ns}). بین غلظت فسفر برگ و جذب فسفر دانه نیز ارتباط معنی‌داری مشاهده نشد (R^2 =۰/۰۱ ^{ns}).). بین غلظت فسفر برگ و عملکرد دانه نیز ارتباط معنی‌دار نبود(R^2 =۰/۱ ^{ns}). این نتایج نشان می‌دهد که بر اساس مقدار فسفر برگ در مرحله خروج از روزت، پیش‌بینی مقدار غلظت فسفر دانه و یا عملکرد دانه کلزا مقدور نخواهد بود. روند مشابه این بین غلظت فسفر دانه و عملکرد دانه وجود داشت (R^2 =۰/۰۳ ^{ns}).

شاخص‌های کارآیی فسفر

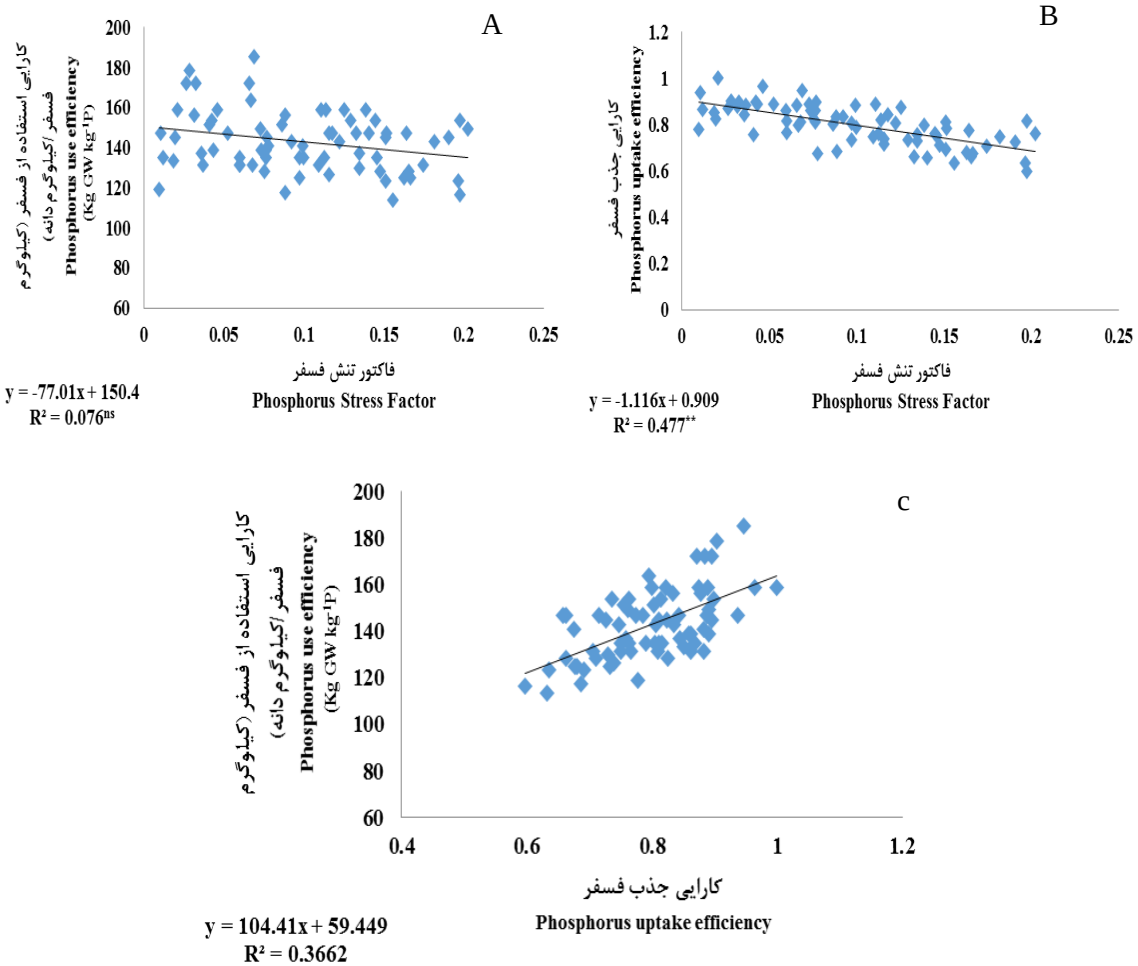
کارآیی جذب فسفر

نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثر اصلی دو تیمار و اثر متقابل تیمارهای مقدار فسفر و نوع رقم کلزا بر شاخص کارایی جذب فسفر دانه به ترتیب در سطح یک، یک و پنج درصد معنی‌دار بود. بیش‌ترین مقدار کارآیی جذب با کاربرد ۸۰ کیلوگرم بر هکتار کود سوپرفسفات تریپل حاصل شد که تفاوت آن با سطح ۱۶۰ کیلوگرم کود معنی‌دار نبود، ولی در این دو سطح به‌صورت معنی‌داری بیش‌تر از سطوح ۲۴۰ و ۳۰۰ کیلوگرم کود بود. بزرگ‌تر بودن این شاخص در سطح ۸۰ کیلوگرم کود نسبت به سطوح دیگر نشان می‌دهد که مقدار جذب در این سطح به مقدار جذب در تیمار شاهد (بدون فسفر) نزدیک‌تر است. در کلیه ارقام با افزایش مقدار کود فسفاته مصرفی، کارآیی جذب فسفر کاهش یافت، چراکه وقتی تأمین یک عنصر غذایی زیاد می‌شود، دیگر عناصر غذایی می‌توانند عامل محدودکننده شوند (۴). در بین ارقام کلزای موردمطالعه، اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد ازلحاظ کارآیی جذب فسفر وجود داشت. به‌طوری‌که در شرایط کمبود فسفر، رقم اپرا با ۰/۸۴ توانایی بالایی در جذب فسفر داشت و کاراتر از دو رقم دیگر بود (جدول ۳ و شکل۱A). در رقم اکاپی بین سطوح فسفر کاربردی ازلحاظ کارآیی جذب فسفر تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد وجود نداشت. در رقم زرفام بین سطوح فسفر ۸۰ و۱۶۰ کیلوگرم کود، تفاوت غیر معنی‌دار، ولی این دو سطح با سطوح دیگر، تفاوت معنی‌دار داشتند. در رقم اپرا تفاوت ۳ سطح ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ کیلوگرم کود باهم غیر معنی‌دار بود. اختلافات ژنتیکی بین ارقام گیاهی ازلحاظ جذب به‌عنوان مهم‌ترین فاکتور تعیین‌کننده در کارایی گزارش‌شده که به ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک ریشه وابسته است (۲۸).



شکل ۱– تفاوت بین ارقام کلزا از نظر شاخص های کارایی در جذب، فسفر کارایی (A) و کارایی مصرف فسفر (B)

Figure 1- Differences between canola cultivars in terms of phosphorus uptake efficiency (PACE), phosphorus efficiency (A) and phosphorus use efficieny (B)



شکل ۲– روابط همبستگی بین کارایی جذب و کارایی مصرف فسفر و شاخص تنش فسفر در گیاه کلزا

Figure 2- Correlation between phosphorus uptake efficiency and phosphorus utilization efficiency and P stress factor in canola

اختر و همکاران (۲) نشان دادند که ارقام کارای کلزا، تغییرات مورفولوژی (افزایش انشعابات ریشه، نسبت ریشه به شاخساره، طول مؤثر ریشه و تارهای کشنده) و فیزیولوژی ریشه (ترشح پروتون، آنیون‌های اسیدهای آلی و فسفاتازها) را برای جذب بیش‌تر فسفر و تولید زیست‌توده به کار بردند. در مطالعات عزیز و همکاران (۲) و زانگ و همکاران (۳۳) در شرایط تنش کمبود فسفر، کارآیی در جذب و تغییرات مورفولوژی ریشه و ترشحات ریشه دلیل افزایش کارآیی در ارقام کلزای موردبررسی آن‌ها بود نه کارآیی در مصرف یا جابجایی مجدد عناصر در اندام گیاه. در مطالعه کنونی، بیش‌ترین مقدار کارآیی جذب فسفر با ۰/۸۷ در سطح ۸۰ کیلوگرم کود فسفاته و به رقم اپرا تعلق داشت. کارآیی جذب فسفر بیشترین همبستگی را با فسفر کارآیی داشت (R^2 =۰/۴۶۵ **). مطابق نتایج (شکل 2B) شاخص تنش کمبود فسفر (PSF) دارای همبستگی منفی و معنی‌دار با کارآیی جذب فسفر بود (R^2 =۰/۴۷۷ **)، ولی مقدار همبستگی این شاخص با شاخص کارآیی مصرف فسفر غیر معنی‌دار بود (R^2 =۰/۰۷۶ ns). این امر نشان می‌دهد که در ارقام مورداستفاده در این آزمایش نیز همانند مطالعات سایر محققان، کارآیی در جذب نقش بیش‌تری در فسفر کارآیی و کاهش تنش کمبود فسفر دارد و کارآیی مصرف فسفر در مرحله بعد قرار دارد (۲، ۱۳ و ۳۳).

کارآیی استفاده از فسفر

نتایج تجزیه واریانس مرکب نتایج نشان داد که اثر اصلی مقدار فسفر و نوع رقم بر کارآیی استفاده از فسفر دانه در سطح یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). مقایسه میانگین نتایج نشان داد که با مصرف فسفر این شاخص کاهش یافت و بیش‌ترین مقدار آن در تیمار شاهد با ۱۶۹ کیلوگرم دانه برای هر کیلوگرم فسفر و کم‌ترین مقدار آن در سطح ۳۰۰ کیلوگرم کود فسفاته مصرفی حاصل شد. این نتیجه با نتایج سپهر و همکاران (۲۰۰۹) در غلات مطابقت داشت که گزارش کردند با افزایش کود فسفاته در خاک آهکی با فسفر قابل‌دسترس پایین، کارآیی مصرف فسفر کاهش یافت. متوسط شاخص کارآیی مصرف فسفر ۱۴۷ کیلوگرم دانه برای هر کیلوگرم فسفر بود و بین ارقام ازلحاظ کارآیی مصرف فسفر، اختلاف معنی‌دار بود که در این شرایط، رقم زرفام با ۱۵۲ کیلوگرم دانه برای هر کیلوگرم فسفر توانایی بالایی در استفاده از فسفر داشت و کاراتر از سایر ارقام بود (جدول ۳ و شکل 1B). این امر می‌تواند به این دلیل باشد که کارآیی مصرف فسفر عمدتاً به توانایی و متابولیسم گیاهی در مصرف فسفر، مربوط می‌باشد. پس از زرفام رقم اکاپی و در انتها رقم اپرا قرار داشت. در بررسی اثرات متقابل، بیش‌ترین مقدار کارآیی استفاده از فسفر در رقم زرفام و در تیمار شاهد بدون فسفر حاصل شد (۱۷۳ کیلوگرم دانه برای هر کیلوگرم کود فسفر) که با تیمار شاهد رقم اکاپی اختلاف معنی‌دار آماری نداشت، ولی اختلاف آن با تیمار شاهد رقم اپرا معنی‌دار بود و تیمار شاهد رقم اپرا کم‌تر از تیمار شاهد دو رقم دیگر بود. این نتیجه نشان می‌دهد که در شرایط کمبود فسفر رقم زرفام برای تولید هر کیلوگرم دانه مقدار کیلوگرم فسفر کم‌تری مصرف نموده است. در مطالعات هو و همکاران (۱۵) در شرایط گلخانه‌ای نیز در شرایط کمبود فسفر، کارآیی استفاده از فسفر در گیاه فسفر کارا کم‌تر از گیاه فسفر ناکارا بود.این نتایج مؤید آن است که فسفر کارآیی در کلزا مربوط به توسعه بهتر سیستم ریشه و جذب مؤثر فسفر است (۱۳). ویژگی‌های گیاهی که در مقابله با کمبود فسفر سبب افزایش کارآیی استفاده از فسفر می‌شود عبارت‌اند از انتقال مجدد عنصر، استفاده از مسیرهای یا آنزیم‌های غیر وابسته به فسفر، اصلاح مسیر متابولیسم کربن و حفظ فسفر درون‌سلولی می‌باشند (۵) و تفاوت‌های زیادی ازنظر اثر هر یک از عوامل ذکرشده بر کارآیی فسفر وجود دارد. اختر و همکاران (۲) در ارزیابی کارآیی مصرف فسفر ارقام گیاهی کلزا بیان کردند که کارآیی مصرف فسفر به رقم و سطوح فسفر وابسته است. به‌طوری‌که با مصرف فسفر، کارآیی مصرف فسفر ارقام دو برابر کاهش نشان داد که اشاره بر این دارد که ارقام گیاهی موردمطالعه به ازای هر واحد فسفر جذب‌شده ماده خشک کم‌تری تولید کردند. رابطه همبستگی بین کارآیی مصرف فسفر و شاخص تنش فسفر وجود نداشت (منفی و غیر معنی‌دار R^2 =۰/۰۷۶ ns) (شکل 2A) ولی رابطه همبستگی مثبت و معنی‌داری (R^2 =۰/۳۶۶ **) بین کارآیی جذب فسفر و کارآیی مصرف فسفر وجود داشت (شکل 2C) و رابطه همبستگی بین کارآیی استفاده از فسفر و نیز شاخص فسفر کارآیی معنی‌دار نبود (R^2 =۰/۱ ns).

فسفر کارآیی

نتایج تجزیه واریانس مرکب نتایج نشان داد که اثر اصلی مقدار فسفر و نوع رقم و اثر متقابل دو تیمار بر شاخص فسفر کارآیی در سطح یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). مقایسه میانگین اثرت اصلی نتایج نشان داد که با مصرف فسفر، این شاخص نیز کاهش یافت و بیش‌ترین مقدار آن در تیمار ۸۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تریپل در هکتار حاصل شد. اختلاف بین سطوح ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ کیلوگرم باهم معنی‌دار نبود. متوسط شاخص فسفر کارآیی در شرایط کمبود فسفر ۰/۹۱ بود و بین ارقام ازلحاظ فسفر کارآیی اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد وجود داشت که در این شرایط، رقم اپرا با مقدار ۰/۹۲۴ کاراتر از دو رقم دیگر بود (جدول ۳ و شکل1C). در رقم اپرا کارایی جذب فسفر و نیز فسفر کارایی آن بیشتر بود. هم‌چنین تجزیه واریانس مرکب نتایج نشان داد که اثر برهم‌کنش رقم و مقدار

فسفر بر شاخص فسفر کارآیی در سطح یک درصد معنی‌دار گردید. در رقم اکاپی بیش‌ترین مقدار فسفر کارآیی در سطح ۱۶۰ کیلوگرم کود حاصل شد. تفاوت بین سطوح در این رقم معنی‌دار نگردید. در رقم زرفام بیش‌ترین فسفر کارایی در سطح ۸۰ کیلوگرم کود حاصل شد و اختلاف آن با سطح ۳۰۰ کیلوگرم کود معنی‌دار بود. در رقم اپرا بیش‌ترین مقدار فسفر کارآیی از سطح ۲۴۰ کیلوگرم کود حاصل شد که اختلاف آن با سطوح ۸۰ و ۱۶۰ کیلوگرم کود غیر معنی‌دار و با ۳۰۰ کیلوگرم کود معنی‌دار بود (جدول ۴).

طبق بررسی‌های انجام‌گرفته ریشه رقم فسفر کارا در شرایط تنش کمبود فسفر، بلندتر بوده و ریشه‌های مویین جانبی متراکم‌تر، همراه با تعداد بیش‌تری انشعاب است (۱۸). این عوامل ممکن است باعث توسعه بهتر سیستم ریشه‌ای و جذب مؤثرتر فسفر شود. این امر سبب افزایش غلظت فسفر در گیاه و درنهایت تولید زیست‌توده بیش‌تر می‌شود. به‌هرحال، فسفر کارایی پدیده‌ای پیچیده است که تحت تأثیر مکانیسم‌های گیاهی دخیل در جذب فسفر از خاک و مصرف فسفر در سطح متابولیسم سلولی بوده و به محیط رشد گیاه و اشکال شیمیایی فسفر در خاک نیز وابسته می‌باشد (۱۸). نوع منبع فسفر نیز ممکن است فسفر کارایی ارقام را تحت تأثیر قرار دهد(۲۳). همان‌گونه که در قسمت‌های قبل بیان شد رابطه همبستگی بین فسفر کارآیی و کارآیی جذب فسفر معنی‌دار (R^2 =۰/۴۶۵ **) و در مورد کارآیی مصرف فسفر این رابطه غیر معنی‌دار گردید (R^2 =۰/۱ ^{ns}). این امر نشان می‌دهد که فسفر کارایی این ارقام بیشتر وابسته به توانایی آن‌ها در جذب فسفر بوده و توانایی تولید دانه به ازای فسفر جذب‌شده نقش کمتری دارد. رابطه بین شاخص تنش فسفر و غلظت فسفر برگ و نیز غلظت فسفر دانه در این مطالعه معنی‌دار نگردید.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که ارقام اپرا و اکاپی در سطح ۸۰ کیلوگرم فسفر، عملکرد بهینه دانه را نسبت به تیمار شاهد و تیمارهای دیگر فسفر، تولید نمودند. در رقم زرفام بیش‌ترین عملکرد دانه از سطح ۱۶۰ کیلوگرم کود حاصل شد ولی تفاوت آن با سطح ۸۰ کیلوگرم معنی‌دار نشد، ولی تفاوت ۱۶۰ کیلوگرم این رقم با شاهد معنی‌دار بود. لذا در این رقم کاربرد ۱۶۰ کیلوگرم کود برای شرایط مشابه قابل توصیه است. البته تفاوت عملکرد دانه تیمار ۸۰ کیلوگرم کود در دو رقم اکاپی و اپرا با تیمار ۱۶۰ کیلوگرم کود در رقم زرفام حدود ۷۵ کیلوگرم بود. مقدار ۷۵ کیلوگرم دانه کلزا با قیمت ۳۴۳۰ تومان، معادل ۲۵۷ هزار تومان درآمد ایجاد خواهد نمود و هزینه ۸۰ کیلوگرم کود معادل ۱۷۶ هزارتومان هزینه خواهد داشت که تفاوت آن‌ها ۸۱ هزار تومان شده و نسبت فایده به هزینه ۰/۴۶ خواهد بود. لذا ازلحاظ برآورد اقتصادی، کاربرد ارقام اپرا و اکاپی با ۸۰ کیلوگرم کود در شرایط مشابه این آزمایش قابل توصیه خواهد بود و مصرف مازاد کود فسفره باعث افزایش معنی‌دار عملکرد دانه نخواهد شد. کارآیی استفاده از فسفر رقم زرفام برتر از دو رقم دیگر بود، ولی ازلحاظ کارآیی جذب فسفر و فسفر کارآیی رقم اپرا برتر از دو رقم دیگر بود. لذا به نظر می‌رسد با توجه به همبستگی معنی‌دار شاخص تنش فسفر و شاخص کارایی جذب فسفر در سه رقم کلزا، شاخص کارایی جذب فسفر شاخص مهم‌تری نسبت به کارآیی مصرف فسفر بوده و می‌تواند به‌عنوان یک شاخص کلیدی برای تفکیک ارقام کلزا از ارقام ناکارا در شرایط مزرعه مورداستفاده قرار گیرد. با توجه به تفاوت سه رقم کلزا ازلحاظ واکنش به فسفر لازم است در توصیه‌های کودی، نوع رقم کلزا نیز در نظر گرفته شود. به دلیل هزینه بالای کودهای شیمیایی و خطرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف مازاد این کودها می‌توان گفت که گسترش ارقام کارا می‌تواند یک شیوه بسیار مؤثر در بهبود رشد و نمو گیاهان و کاهش مصرف کودهای شیمیایی فسفاته باشد.

منابع

1- Agricultural Ministry of Iran .2018. Agricultural statistics 2017. Office of statistics and information technology, bureau of agricultural statistics and information technology statistics, Ministry of Agriculture, retrieved February 23, 2018, from http://amar.maj.ir/Portal/File/ShowFile.aspx?ID=e0b180a1-71de-4f1e-8798-531dd0f3132f.

2- Akhtar M.S., Oki Y., and Adachi, T. 2009. 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.

3- Aziz T., Ahmed I., Farooq M., Maqsood M.A., and Sabir M. 2011. Variation in phosphorus efficiency among Brassica cultivars I: Internal utilization and phosphorus remobilization. Journal of Plant Nutrition 34(13): 2006-2017.

4- Balcha A. 2014. Effect of phosphorus rates and varieties on grain yield, nutrient uptake and phosphorus efficiency of Tef [(*Eragrostis tef*(Zucc)] Trotter. American Journal of Plant Sciences 5: 262- 267.

5- Balemi1 T., and Negisho K. 2012. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 12 (3): 547-561.

6- Black C.A., Evans D.D., and Dinauer R.C. 1965. Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 653-708.
7- Bleiholder H., Weber E., Lancashire P., Feller C., Buhr L., Hess M., and Klose R. 2001. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants, BBCH Monograph. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, 150 pp.
8- Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. Agronomy Journal 54(5): 464-465.
9- Chen G., Nian F.Z., Xu F.S., and Wang Y. H. 2005. Effect of boron and molybdenum on yield and quality of two rapeseed cultivars. Plant Nutrition and Fertilizer Science 11: 243-247. (In Chinese)
10- Erkovan H.I., Güllap M.K., Daşçi M., and Koç A. 2010. Effects of phosphorus fertilizer and phosphorus solubilizing bacteria application on clover dominant meadow: I. Hay yield and botanical composition. Turkish Journal of Field Crops 15(1): 12-17.
11- Gunez a., Inal A., Alpaslan M., and Cakmak I. 2006. Genotypic variation in phosphorus efficiency between wheat cultivars grown under greenhouse and field conditions. Soil Science and Plant Nutrition 52(4): 470- 478.
12- Hammond J.P., Broadley M.R., White P.J., King G.J., Bowen H.C., Hayden R., and Spracklen W.P. 2009. Shoot yield derives phosphorus use efficiency in Brassica oleracea and correlates with root architecture traits. Journal of experimental botany 60(7): 1953-1968.
13- Hu Y., Ye Ye X., Shi L., Duan H., and Xu F. 2010. Genotypic differences in root morphology and phosphorus uptake kinetics in Brassica napus under low phosphorus supply. Journal of Plant Nutrition 33(6): 889-901.
14- Knight S., Morris N., Goulding K.W.T., Johnston A.E., Poulton P. R., and Philpott H. 2014. Identification of critical soil phosphate (P) levels for cereal and oilseed rape crops on a range of soil types. (HGCA Project Report No. 529). 74pp. HGCA/AHDB, Stoneleigh, UK.
15- Korkmaz K., Ibrikci H., Karnez E., Buyuk G., Ryan J., Ulger A.C., and Oguz H. 2009. Phosphorus Use Efficiency of Wheat Genotypes Grown in Calcareous Soils. Journal of Plant Nutrition 32(12): 2094–2106.
16- Korkmaz K., and Altıntaş Ç. 2016. Phosphorus Use Efficiency in Canola Genotypes. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology 4(6): 424-430.
17- Lindsay W. L., and Norvell W. A. 1978. Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society of America Journal 42: 421-428.
18- Liu Y., Mi G., Chen F., Zhang J., and Zhang F. 2004. Rhizosphere effect and growth of two maize (*Zea mays* L.) genotypes with contrasting p efficiency at low p availability. Plant Science 167: 217-223.
19- McLean, E. 1982. Soil pH and lime requirement. In: Klute A. (Ed.). Methods of Soil Analysis- Part 2. Chemical and Microbiological properties. Agronomy Monograph, 9.2, pp. 199-224.
20- Nourgholipour F., Mirseyed Hosseini H., Tehrani M.M., Motesharezadeh B., and Moshiri F. 2017. Comparison of phosphorus efficiency among spring oilseed rape cultivars in response to phosphorus deficiency. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science 46: 54-71. doi:10.1080/01140671.2017.1343192.
21- Olsen S. R., Cole C. V., Watanabe F. S., and Dean L. A. 1954. Estimation of available phosphorus in
22- Orlovius K. 2003. Oilseed rape. Fertilizing for High Yield and Quality, Bulletin 16. Retrieved February 23, 2016, from https://www.ipipotash.org/udocs/No%2016%20Oilseed%20rape.pdf.
23- Osborne L.D., and Rengel Z. 2002. Screening cereals for genotypic variation in efficiency of phosphorus uptake and utilization. Australian Journal of Agricultural Research 53(3): 295-303.
24- 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: 69-80.
25- Rose T. J., Rengel Z., Ma Q., and Bowden J.W. 2007. Differential accumulation patterns of phosphorus and potassium by canola cultivars compared to wheat. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 170(3): 404-411.
26- 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.
27- Sepehr E., Malakouti M.J., Kholdebarin B., Samadi A., and Karimian N. 2009. Genotypic variation in P efficiency of selected Iranian cereals in greenhouse experiment. International Journal of Plant Production 3: 17-28.
28- Shi T., Zhao D., Li D., Wang N., Meng J., Xu F., and Shi, L. 2012. *Brassica napus* root mutants insensitive to exogenous cytokinin show phosphorus efficiency. Plant and Soil 358(1): 61-74.
29- Tehrani M.M., Balali M.R., Moshiri F., and Daryashenas A. 2012. Recommendation and the estimation of mineral fertilizers in Iran: Challenges and Solutions. Research of Soil 26(2): 123-144.
30- Vanc C., Uhde-Stone C., and Allan D.L. 2003. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. New Phytologist 157: 423-447.
31- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37(1): 29-38.
32- Westerman R.L. 1990. Soil Testing and Plant Analysis. 3rd edition. American Society of Agronomy and Soil Science of America, Madison, Wisconsin.
33- Zhang H. W., Huang Y., Xiang-Sheng Y., and Fang-Sen X. 2008. Evaluation of phosphorus efficiency in rapeseed

(*Brassica napus* L.) recombinant inbred lines at seedling stage. Acta Agronomica Sinica 34(12): 2152-2159.

34- Zhang H., Huang Y., Ye X., Shi L., and Xu F. 2009. Genotypic differences in phosphorus acquisition and the rhizosphere properties of *Brassica napus* in response to low phosphorus stress. Plant and Soil 320(1-2): 91-102.

Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 2, May-June 2020, p. 439-453

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۹، ص. ۴۵۳-۴۳۹

Effects of Phosphorus on Grain Yield and Phosphorus Efficiency Indices in Canola Cultivars in Kermanshah Region

J. Ghaderi[1]*- F. Nourgholipour[2]

Received: 30-09-2019
Accepted: 25-03-2020

Introduction: Due to the compatibility of canola with different conditions, economic value, its price and importance of rotation with cereals, it has the highest level of cultivation area among the oilseed crops in Iran. Phosphorus (P) deficiency is a widespread macronutrient deficiency and is one of the major limiting constraints for canola production. Despite its importance, it limits crop yield on more than 40% of the world's arable land and 70.2% in Iran. Moreover, global P reserves are being depleted at a higher rate and according to some estimates, there will be no economic P reserve by the year 2050. This is a potential threat to sustainable canola production. Most of the P applied in the form of fertilizers may be adsorbed by the soil, and would not be available for plants lacking specific adaptations. It is widely accepted that the most realistic solution to the problem of P deficiency is to develop new plant cultivars that adapt to P-deficient soils. Phosphorus efficiency is a term that generally describes the ability of crop species/genotypes to give higher yield under P-limiting condition. Plant species as well as genotypes within the same species may differ in P efficiency. This study was conducted to determine the effect of phosphorus fertilization on the grain yield and phosphorus efficiency indices in different canola cultivars.

Materials and Methods: The present study was carried out at the research farm of the Mahidasht Agricultural Research Station located 20 km away from Kermanshah (with elevation of 1265 m). This experiment was conducted as factorial in a randomized complete block design with three replications with 2 factors including canola varieties and different amounts of phosphorus fertilizer. The first factor consisted of five triple superphosphate (TSP) levels (0, 16, 32, 49, and 61 kg per ha) and the second factor consisted of three cultivars (Okapi, Opera and Zarfam). This research was conducted on soil where the amount of available phosphorus was lower than the critical level required for canola (15 mg kg^{-1}). Prior to sowing, all phosphorus treatments with 30 kg ha^{-1} of zinc sulfate fertilizer as well as one-third of nitrogen fertilizer (100 kg ha^{-1} urea) were applied during planting and mixed thoroughly with the soil. The remaining urea fertilizer was applied at two stages of stem growth (120 kg ha^{-1}) and early flowering (100 kg ha^{-1}). Each experimental plot had an area of 12 m^2. Irrigation method was sprinkler. Grain and straw yield were determined after the harvest and seed samples (harvesting stage) were taken and rinsed with distilled water, oven dried at 70 °C, ground, digested and analyzed for determining the P concentration. Analysis of variance was performed using SAS software and mean comparisons performed by Duncan's multiple range tests ($P \leq 0.05$).

Results and Discussion: The results showed that the interaction effects of phosphorus fertilizer rate and canola cultivars on leaf P concentration, grain and straw yield, grain P concentration and uptake, and P efficiency indices were significant. In average of the two-years, the highest grain and straw yields (3203 and 4613 kg ha^{-1}, respectively) were obtained from 300 kg ha^{-1} P fertilizer rate for Okapi cultivar. Under the P deficiency condition, no significant difference was observed between cultivars in terms of grain yield. Significant differences were observed among three cultivars in terms of P efficiency. Opera cultivar was efficient in absorption (0.84) and Zarfam cultivar was efficient in phosphorus utilization (152 kg grain / kg fertilizer), but Opera was phosphorus efficient. With application of phosphorus fertilizer, phosphorus use efficiency decreased and the highest amount was found for the control treatment which produced 169 kg seeds per kg of phosphorus. The lowest amount of this characteristic was obtained for 300 kg phosphorus fertilizer treatment. Considering the correlation between phosphorus stress factor and P uptake efficiency, it seems that P efficiency was dependent

1- Assistant Professor of Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Kermanshah, Iran
(*- Corresponding Author Email: ghaderij@yahoo.com)
2- Assistant Professor OF Soil & Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
DOI: 10.22067/jsw.v34i2.82911

on P uptake ($R^2 = 0.477^{**}$) rather than P utilization ($R^2 = 0.076^{ns}$).

Conclusion: Phosphorus uptake efficiency can be used for selecting P efficient cultivars of canola under farm condition. Application of Opera and Okapi cultivars with 80 kg of fertilizer per ha in similar conditions of this experiment would be advisable and excess phosphorus fertilizer application would not significantly increase grain yield. Selecting suitable varieties could decrease application of chemical fertilizers in the soil.

Keywords: Canola, Efficiency, Phosphorus concentration, Phosphorus utilization, Uptake