

مقاله علمی-پژوهشی

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

جلال قادری^{*۱} - فریدون نورقلی پور^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۰۶

چکیده

شناسایی رقم‌هایی از گیاهان که به صورت کارآمدی بتوانند فسفر خاک را جذب و مصرف کنند، می‌تواند باعث کاهش هزینه مالی و زیست‌محیطی کاربرد کودهای فسفوره گردد. لذا به منظور مقایسه ارقام زمستانه کلزا از نظر جذب، مصرف و کارایی فسفر، این آزمایش به صورت 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 کارایی 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 به دست آمد. در شرایط کمبود فسفر، تفاوت معنی‌دار بین ارقام از لحاظ عملکرد دانه، مشاهده نشد. تفاوت معنی‌داری بین سه رقم از نظر شاخص‌های کارایی 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 کارایی ارقام، وابسته به کارایی در جذب فسفر باشد (** $R^2 = 0/477$) تا کارایی در مصرف فسفر ($R^2 = 0/076$). کارایی جذب می‌تواند به عنوان شاخص کلیدی برای تفکیک ارقام فسفر کارا 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

تغذیه گیاه و از جمله 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 محدود شدن 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 قابل کشت ایران (۷۰/۲ درصد از اراضی آبی) کم‌تر از ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، گزارش شده است (۲۹). مطالعات نشان داده است که به دلیل پیچیدگی خواص شیمیایی فسفر در خاک‌های آهکی، کم‌تر از ۲۰ درصد کود فسفوره مصرفی توسط گیاه برداشت می‌شود و بقیه آن در خاک تثبیت و یا تغییر شکل یافته و به شکل غیر قابل‌جذب درمی‌آید (۳۰). ثابت شده 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 هر سال نسبت

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 از نظر

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

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 کارایی در ارقام کلزای موردبررسی آنها بود و کارایی در مصرف یا جابجایی مجدد عناصر در اندام‌های گیاه کلزا، نقش کمتری داشت. آنها همچنین از وزن خشک نسبی اندام هوایی به‌عنوان شاخص کارایی، استفاده کردند و نشان دادند که تحت شرایط ناکافی فسفر، فسفر کل گیاه و وزن خشک اندام هوایی می‌توانند شاخص‌های مورد اعتمادی برای ارزیابی کارایی فسفر باشند. گونز و همکاران (۱۱) گزارش دادند که نتایج فسفر کارایی در شرایط مزرعه‌ای و گلخانه‌ای در گیاه گندم باهم مطابقت نداشت و هیچ همبستگی بین فسفر کارایی ارقام در دو شرایط مشاهده نشد.

با توجه به موارد اشاره‌شده، به نظر می‌رسد برای افزایش کارایی فسفر در زراعت کلزا، لازم است، ارقام انتخاب گردند که کارایی 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 آزادگرد افشان 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.

به مصرف مقادیر زیاد کودهای فسفاتی اقدام کنند که بر اساس برخی بررسی‌ها، منابع فسفوری 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 از لحاظ 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 گزارش شده است که اختلاف در عکس-العمل ژنوتیپ‌های مختلف در شرایط کمبود فسفر، ممکن است با تغییر ویژگی‌های مورفولوژی ریشه، کارایی 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 کارایی فسفر می‌شود، معلوم نیست و تفاوت‌های زیادی از نظر 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 در نتیجه 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 گرفته شده است (۱۲). اختر و همکاران (۲) گزارش کردند که کارایی

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	منگنز	روی	آهن	پتاسیم	فسفر	کربن	کربن	هدایت	پ- هاش pH	
	قابل استفاده گیاه (Cu)	قابل استفاده گیاه (Mn)	قابل استفاده گیاه (Zn)	قابل استفاده گیاه (Fe)	قابل استفاده گیاه (K)	قابل استفاده گیاه (P)	آلی (OC)	نیترژن (N)	ت کلسیم (TNV)		دسی زیمنس بر متر EC (dS m^{-1})
میلی گرم 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

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 طول موج ۴۷۰ نانومتر (۳۲) اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل آماری نتایج با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS و مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام گرفت. در این بررسی، شاخص‌های کارایی استفاده از فسفر، جذب فسفر و فسفر کارایی ارقام با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه شد.

جذب فسفر^۱ دانه (کیلوگرم فسفر در هکتار) = حاصل ضرب غلظت فسفر (کیلوگرم فسفر در کیلوگرم دانه) و عملکرد دانه (کیلوگرم دانه در هکتار).

شاخص کارایی استفاده از فسفر^۲ (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 دهنده تولید ماده خشک گیاهی به ازای واحد فسفر جذب شده می‌باشد و رقمی که بتواند فعالیت‌های متابولیکی خود را در غلظت پایین فسفر تنظیم نماید و ماده خشک بیشتری نسبت به واحد فسفر جذب شده 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 جذب شده در دانه تولید شده است.

شاخص کارایی در جذب فسفر^۳ (کیلوگرم بر کیلوگرم) = نسبت جذب فسفر دانه در تیمار شاهد (کیلوگرم فسفر در هکتار) به جذب فسفر دانه در تیمار کود فسفات (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 کارایی^۴ (بدون واحد) = نسبت عملکرد دانه در تیمار شاهد (کیلوگرم دانه در هکتار) به عملکرد دانه در تیمار کود

در نمونه خاک، بافت به‌روش هیدرومتری بویکاس (۸)، کربن آلی به روش والکلی و بلک (۳۱)، pH گل اشباع به‌وسیله الکتروود شیشه‌ای مک لین (۱۹)، هدایت الکتریکی عصاره اشباع با دستگاه هدایت سنج به روش بلک و همکاران (۶)، فسفر قابل جذب با روش اولسن (۲۱)، آهن، روی، منگنز و مس با عصاره‌گیر DTPA به‌روش لیندسی و نورول (۱۷) عصاره‌گیری و با دستگاه جذب اتمی قرائت شدند. این تحقیق در خاکی انجام شد که مقدار فسفر قابل جذب 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 نیترژنه (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 مورد استفاده 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 لونتزل به مقدار یک لیتر در هکتار، استفاده شد. در مرحله خروج از ریزش 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 (حاصل ضرب 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 هم

1- Phosphorus uptake

2- Phosphorus utilization efficiency= PUTE

3- P acquisition efficiency= PACE

4- P efficiency= PE

است ناشی از پایین بودن مقدار فسفر قابل جذب اولیه در خاک باشد که پایین تر از حد بحرانی فسفر برای گیاه کلزا بود. کورکماز و التیتاش (۱۶) نیز در بررسی خود بر روی ارقام زمستانه کلزا، کاهش وزن خشک ریشه و اندام هوایی را در خاکی با مقدار ۳/۵ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، مشاهده نمودند که این امر نشان دهنده اهمیت فسفر برای رشد اندام هوایی و نیز ریشه گیاه کلزا می باشد. در بررسی های دیگر انجام شده نیز کاهش رشد و علائم کمبود فسفر را در گیاه کلزا و در خاکهایی با فسفر اولسن کم تر از ۵ میلی گرم بر کیلوگرم خاک، مشاهده نمودند (۲۸ و ۳۴). در بررسی نایت و همکاران (۱۴)، گیاه کلزا در خاکهایی با مقدار فسفر کم تر از ۱۶-۲۵ میلی گرم 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، بیش تر از تیمار شاهد بدون فسفر بود و به صورت میانگین بیش ترین مقدار مربوط به سطح ۳۰۰ کیلوگرم کود بود ولی تفاوت بین تیمارهای فسفر مصرفی باهم، معنی دار نگردید (جدول ۳). رقم اکایی بیش ترین نسبت دانه به کاه را تولید نمود. در این رقم بیش ترین مقدار نسبت دانه به کاه از سطح ۲۴۰ کیلوگرم کود حاصل شد در صورتی که در دو رقم دیگر از سطح ۳۰۰ کیلوگرم کود به دست آمد (جدول ۴). با توجه به عدم معنی داری نسبت دانه به کاه در سطوح بالاتر مصرف کود، سطح بهینه مصرف، می تواند مقدار ۸۰ کیلوگرم بر هکتار کود باشد. به نظر می رسد در رقم اپرا در زمان کمبود فسفر مقدار بیش تر انرژی گیاه برای تولید کاه نیز استفاده شده است. به دلیل این که هدف در تولید برخی از محصولات زراعی از جمله کلزا تولید دانه بیشتر است لذا نسبت دانه به کاه نیز در این محصول ها دارای اهمیت است و برای محاسبه کارایی ارقام از بابت فسفر از مقدار تولید دانه به جای بیوماس کل گیاه استفاده می گردد (۲۶).

تجزیه واریانس مرکب دوساله نتایج نشان داد که اثر متقابل رقم و مقدار فسفر بر عملکرد دانه و کاه در سطح پنج درصد معنی دار گردید (جدول ۲) و بیش ترین عملکرد دانه از رقم اکایی و سطح ۳۰۰ کیلوگرم بر هکتار کود فسفات حاصل شد. این تیمار بیش ترین عملکرد کاه را نیز داشت و کم ترین عملکرد به سطح شاهد رقم زرفام تعلق داشت (جدول ۴). اگرچه کلزا عموماً به کمبود فسفر حساس است، اما بررسی ها نشان داده که رقم های مختلف حساسیت متفاوتی دارند. چن و همکاران (۹) افزایش معنی دار عملکرد دانه و کاه و به تبع 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 معنی دار بود ($R^2 = 0/35^{**}$).

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^۱ بر اساس عملکرد دانه (GW=grain weight) تعیین شد (۲). افزایش مقدار این شاخص نشان می دهد رقم کلزا به مقدار بیشتری تحت تأثیر تنش کمبود فسفر است.

$$PSF = \frac{(GW_{P_{fertilized}} - GW_{P_0}) (Kg \ ha^{-1})}{GW_{P_{fertilized}} (Kg \ ha^{-1})}$$

نتایج و بحث

همان گونه که در جدول ۲ مشاهده می گردد اثر سال بر کلیه شاخص های اندازه گیری شده، غیر از عملکرد کاه، معنی دار بود. این امر ممکن است مربوط به تفاوت میانگین بارندگی، میانگین حداقل و حداکثر دما، دوره های بروز تنش سرمای زیر ۵- درجه و مدت زمان آن و مطابقت آن با دوره های 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 معنی دار گردید (جدول ۲). بین ارقام از لحاظ عملکرد دانه، تفاوت معنی داری وجود نداشت (جدول ۳). ارقام کلزای اکایی، زرفام و اپرا در سطح فسفر صفر به ترتیب ۲۷۹۴، ۲۷۵۴ و ۲۸۱۴ کیلوگرم بر هکتار دانه تولید نمودند که تفاوت آن ها با یکدیگر در این سطح فسفر معنی دار نبود. این امر نشان می دهد هر سه رقم در مقدار فسفر اولیه خاک (۷/۲ میلی گرم بر کیلوگرم) به صورت تقریباً مشابهی از لحاظ تولید دانه عمل نمودند. اگرچه مقدار کاه تولیدی در این سطح در رقم اپرا به صورت معنی داری بیش تر از رقم اکایی بود. مقایسه میانگین نتایج نشان داد که با مصرف فسفر، شاخص های مذکور افزایش معنی داری داشت، به طوری که بیش ترین عملکرد دانه و کاه به ترتیب ۳۱۹۴ و ۴۴۷۱ کیلوگرم بر هکتار از سطح ۳۰۰ کیلوگرم کود فسفات حاصل شد که تفاوت آن با شاهد (بدون کاربرد کود فسفر دار)، معنی دار گردید. با افزایش مقدار کاربرد فسفر در خاک از سطح صفر به ۸۰ کیلوگرم در هکتار کود، مقدار عملکرد دانه در دو رقم اکایی و اپرا افزایش معنی دار یافت (به ترتیب ۹/۴ و ۹/۳ درصد) ولی در رقم زرفام تفاوت معنی دار نبود (افزایش ۶/۳ درصد). در هیچ یک از سه رقم کلزا در این سطح فسفر (۸۰ کیلوگرم بر هکتار)، عملکرد کاه نسبت به شاهد، افزایش معنی دار نیافت (جدول ۴). افزایش عملکرد دانه به دلیل مصرف کود ممکن

1- P stress factor = PSF

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس مرکب (میانگین مربعات) تأثیر مقدار فسفر و رقم بر عملکرد، غلظت و شاخص‌های کارایی 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 w نسبت دانه به کاه	Phosphorus concentration in grain (%) غلظت فسفر دانه	Phosphorus concentration in leaf (%) غلظت فسفر برگ	Phosphorus efficiency (Kg GW kg ⁻¹ P) کارایی فسفر	Phosphorus use efficiency (Kg P ha ⁻¹) استفاده از 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*Y ear)	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, ns, 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 شاخص های کارایی 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)	عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)	عملکرد کاه Straw yield (kg ha ⁻¹)	نسبت دانه به کاه Grain/Straw	غلظت فسفر دانه Phosphorus concentration in grain (%)	غلظت فسفر برگ Phosphorus concentration in leaf (%)	Phosphorus use			کارایی جذب فسفر Phosphorus uptake efficiency
						غلظت فسفر در دانه Phosphorus concentration in grain (%)	غلظت فسفر در برگ Phosphorus concentration in leaf (%)	کارایی استفاده از فسفر Phosphorus efficiency (Kg GW kg ⁻¹ P)	
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	^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 معنی دار در سطح ۵ درصد ندارند.
 In each column, numbers with similar letters, not significantly different at 5% level

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل مقدار فسفر و ارقام کلزا بر عملکرد، غلظت و شاخص‌های کارایی فسفر

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

*در هر ستون اعداد دارای حروف مشابه، اختلاف معنی دار 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

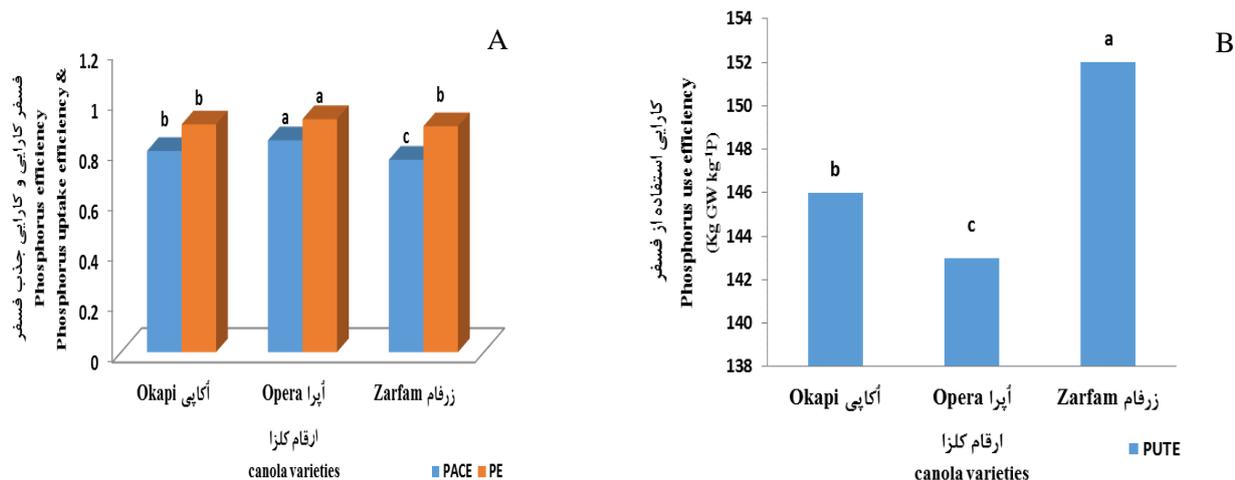
نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی مقادیر کاربرد فسفر بر غلظت فسفر برگ و نیز غلظت فسفر دانه در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). کاربرد فسفر باعث افزایش غلظت فسفر برگ و نیز غلظت و جذب فسفر دانه ارقام کلزا شد و از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد بین مقادیر کود فسفات مصرفی وجود داشت (جدول ۳ و ۴). هم در برگ کلزا و هم در دانه، غلظت فسفر رقم زرفام (۰/۴۸۱ درصد) به صورت معنی‌داری در سطح یک درصد کمتر از دو رقم دیگر بود (۰/۵۱۷ و ۰/۵۰۵ 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 به دست 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 فسفات در رقم زرفام به دست 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 از لحاظ جذب فسفر دانه بود. در رقم زرفام نیز این وضعیت برای سطح ۸۰ کیلوگرم کود وجود داشت، در حالی که 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 از لحاظ 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 فسفات با توجه به پایین بودن مقدار فسفر قابل جذب خاک (پایین‌تر از حد بحرانی) نسبت داد.

تفاوت‌های ژنتیکی در جذب فسفر ممکن است مربوط به اختلاف ژنوتیپ‌ها در کارایی 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 (ns) ($R^2 = 0/11$). بین غلظت فسفر برگ و جذب فسفر دانه نیز ارتباط معنی‌داری مشاهده نشد (ns) ($R^2 = 0/01$). بین غلظت فسفر برگ و عملکرد دانه نیز ارتباط معنی‌دار نبود (ns) ($R^2 = 0/1$). 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 (ns) ($R^2 = 0/03$).

شاخص‌های کارایی فسفر

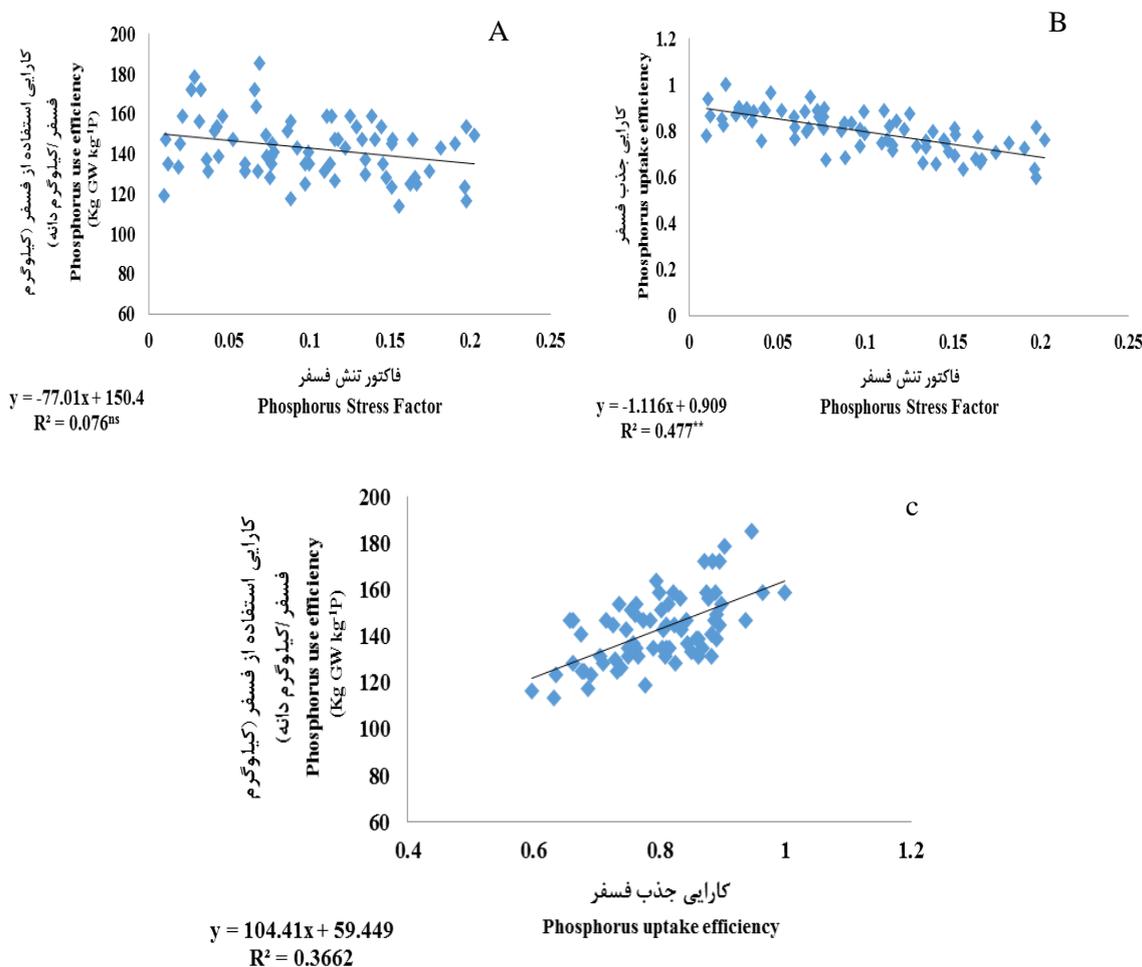
کارایی جذب فسفر

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 کارایی 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 به صورت 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 فسفات مصرفی، کارایی جذب فسفر کاهش یافت، چراکه وقتی تأمین یک عنصر غذایی زیاد می‌شود، دیگر عناصر غذایی می‌توانند عامل محدودکننده شوند (۴). در بین ارقام کلزای مورد مطالعه، اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد از لحاظ کارایی جذب فسفر وجود داشت. به طوری که 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 شکل ۱A). در رقم اکاپی بین سطوح فسفر کاربردی از لحاظ کارایی جذب فسفر تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد وجود نداشت. در رقم زرفام بین سطوح فسفر ۸۰ و ۱۶۰ 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 با هم غیر معنی‌دار بود. اختلافات ژنتیکی بین ارقام گیاهی از لحاظ جذب به عنوان مهم‌ترین فاکتور تعیین‌کننده در کارایی گزارش شده که به ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک ریشه وابسته است (۲۸).



شکل ۱- تفاوت بین ارقام کلزا از نظر شاخص‌های 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 efficiency (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

برای هر کیلوگرم کود فسفر) که با تیمار شاهد رقم اکایی 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، کارایی استفاده از فسفر در گیاه فسفر کارا کم‌تر از گیاه فسفر ناکارا بود. این نتایج مؤید آن است که فسفر کارایی در کلزا مربوط به توسعه بهتر سیستم ریشه و جذب مؤثر فسفر است (۱۳). ویژگی‌های گیاهی که در مقابله با کمبود فسفر سبب افزایش کارایی 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 درون سلولی می‌باشند (۵) و تفاوت‌های زیادی از نظر اثر هر یک از عوامل ذکر شده بر کارایی فسفر وجود دارد. اختر و همکاران (۲) در ارزیابی کارایی مصرف فسفر ارقام گیاهی کلزا بیان کردند که کارایی مصرف فسفر به رقم و سطوح فسفر وابسته است. به طوری که با مصرف فسفر، کارایی مصرف فسفر ارقام دو برابر کاهش نشان داد که اشاره بر این دارد که ارقام گیاهی مورد مطالعه به ازای هر واحد فسفر جذب شده ماده خشک کم‌تری تولید کردند. رابطه همبستگی بین کارایی مصرف فسفر و شاخص تنش فسفر وجود نداشت (منفی و غیر معنی‌دار $R^2 = 0/076^{ns}$) (شکل ۲A) ولی رابطه همبستگی مثبت و معنی‌داری ($R^2 = 0/366^{**}$) بین کارایی جذب فسفر و کارایی مصرف فسفر وجود داشت (شکل ۲C) و رابطه همبستگی بین کارایی استفاده از فسفر و نیز شاخص فسفر کارایی معنی‌دار نبود ($R^2 = 0/1^{ns}$).

فسفر کارایی

نتایج تجزیه واریانس مرکب نتایج نشان داد که اثر اصلی مقدار فسفر و نوع رقم و اثر متقابل دو تیمار بر شاخص فسفر کارایی در سطح یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). مقایسه میانگین اثر 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 کارایی در شرایط کمبود فسفر ۰/۹۱ بود و بین ارقام از لحاظ فسفر کارایی اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد وجود داشت که در این شرایط، رقم اپرا با مقدار ۰/۹۲۴ کارا تر از دو رقم دیگر بود (جدول ۳ و شکل ۱C). 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

اختر و همکاران (۲) نشان دادند که ارقام کارایی 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، کارایی در جذب و تغییرات مورفولوژی ریشه و ترشحات ریشه دلیل افزایش کارایی در ارقام کلزای مورد بررسی آن‌ها بود نه کارایی در مصرف یا جایجایی مجدد عناصر در اندام گیاه. در مطالعه کنونی، بیش‌ترین مقدار کارایی جذب فسفر با ۰/۸۷ در سطح ۸۰ کیلوگرم کود فسفات و به رقم اپرا تعلق داشت. کارایی جذب فسفر بیش‌ترین همبستگی را با فسفر کارایی داشت ($R^2 = 0/465$). مطابق نتایج (شکل ۲B) شاخص تنش کمبود فسفر (PSF) دارای همبستگی منفی و معنی‌دار با کارایی جذب فسفر بود ($R^2 = 0/477^{**}$)، ولی مقدار همبستگی این شاخص با شاخص کارایی مصرف فسفر غیر معنی‌دار بود ($R^2 = 0/076^{ns}$). این امر نشان می‌دهد که در ارقام مورد استفاده در این آزمایش نیز همانند مطالعات سایر محققان، کارایی در جذب نقش بیش‌تری در فسفر کارایی و کاهش تنش کمبود فسفر دارد و کارایی مصرف فسفر در مرحله بعد قرار دارد (۲، ۱۳ و ۳۳).

کارایی استفاده از فسفر

نتایج تجزیه واریانس مرکب نتایج نشان داد که اثر اصلی مقدار فسفر و نوع رقم بر کارایی 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 فسفات مصرفی حاصل شد. این نتیجه با نتایج سپهر و همکاران (۲۰۰۹) در غلات مطابقت داشت که گزارش کردند با افزایش کود فسفات در خاک آهکی با فسفر قابل‌دسترس پایین، کارایی مصرف فسفر کاهش یافت. متوسط شاخص کارایی مصرف فسفر ۱۴۷ کیلوگرم دانه برای هر کیلوگرم فسفر بود و بین ارقام از لحاظ کارایی 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 کارا تر از سایر ارقام بود (جدول ۳ و شکل ۱B). این امر می‌تواند به این دلیل باشد که کارایی مصرف فسفر عمدتاً به توانایی و متابولیسم گیاهی در مصرف فسفر، مربوط می‌باشد. پس از زرفام رقم اکایی و در انتها رقم اپرا قرار داشت. در بررسی اثرات متقابل، بیش‌ترین مقدار کارایی استفاده از فسفر در رقم زرفام و در تیمار شاهد بدون فسفر حاصل شد (۱۷۳ کیلوگرم دانه

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 کود معنی‌دار نبود. 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 هزار تومان هزینه خواهد داشت که تفاوت آن‌ها ۸۱ هزار تومان شده و نسبت فایده به هزینه ۰/۴۶ خواهد بود. لذا از لحاظ 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. کارایی استفاده از فسفر رقم زرفام برتر از دو رقم دیگر بود، ولی از لحاظ کارایی جذب فسفر و فسفر کارایی 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 کارایی 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 از لحاظ 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 سفاته باشد.

فسفر بر شاخص فسفر کارایی در سطح یک درصد معنی‌دار گردید. در رقم اکاپی بیش‌ترین مقدار فسفر کارایی 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 کارایی 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 موئین 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 در نهایت 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 کارایی و کارایی جذب فسفر معنی‌دار ($R^2 = 0/465^{**}$) و در مورد کارایی مصرف فسفر این رابطه غیر معنی‌دار گردید ($R^2 = 0/1^{ns}$). 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

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- Balemi 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., Ibrikli 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.

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

J. Ghaderi^{1*}- F. Nourgholipour²

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 m². 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