تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۹، شماره ۳، مرداد و شهریور ۱۳۹۷ (ص ۵۲۵-۵۱۵) DOI: 10.22059/ijswr.2017.216103.667537

واکنش ارقام مختلف کلزا با تیپ رشد زمستانه به تنش کمبود فسفر

فریدون نورقلی پور[۱]، حسین میرسید حسینی[۲*]، محمد مهدی طهرانی[۳]، بابک متشرع زاده[۴] و فرهاد مشیری[۵]

۱. دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران و مربی پژوهش موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران؛ کرج

۳. استادیار پژوهش موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

۴. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران؛ کرج

۵. استادیار پژوهش موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

(تاریخ دریافت: ۱۴/ ۷/ ۱۳۹۵- تاریخ بازنگری: ۲۱/ ۸/ ۱۳۹۶- تاریخ تصویب: ۲۷/ ۸/ ۱۳۹۶)

چکیده

فسفر به دلیل حلالیت و تحرک اندک در خاک‌های زراعی دنیا و نقش حیاتی ترکیبات آن در متابولیسم سلول گیاهی، به‌عنوان عنصر غذایی پرمصرف برای گیاه در نظر گرفته می‌شود. شناسایی رقم‌هایی از گیاهان که به‌صورت کارآمدی بتوانند فسفر را جذب و مصرف کنند، می‌تواند باعث کاهش هزینه مالی و زیست‌محیطی کاربرد کودهای فسفره گردد. کلزا به‌عنوان گیاه دانه روغنی در سطح وسیعی در جهان و نیز در ایران کشت می‌گردد. در این تحقیق گلخانه‌ای، کارایی جذب و مصرف فسفر هفت رقم کلزا با تیپ رشد زمستانه (Talaye, Okapi, L72, Gabriela, Karaj, Brutus, Elvis) در دو سطح فسفر صفر و ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فسفر از منبع مونوپتاسیم‌فسفات در خاکی با مقدار فسفر قابل‌دسترس ۴/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، در طرح کاملاً تصادفی در قالب فاکتوریل مورد بررسی قرار گرفت. شاخص‌های وزن خشک اندام هوایی، سطح برگ، حجم و وزن خشک ریشه، جذب عناصر فسفر و کلسیم در ریشه و اندام هوایی اندازه‌گیری گردید. برای به‌دست آوردن خاک ریزوسفری و غیر ریزوسفری از تکنیک رایزوبگ استفاده شد. بر اساس نتایج، ارقام ازلحاظ تولید بیوماس، جذب فسفر و کلسیم، کارایی جذب و کارایی استفاده، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند. فسفر کارایی از ۰/۶۱۵ در رقم Gabriela تا ۰/۲۴۸ در رقم Elvis متغیر بود و کارایی جذب فسفر ارقام کلزا نیز از ۰/۴۶۹ در رقم Gabriela تا ۰/۱۵۷ در رقم Elvis متغیر بود و روند عکس آن در مورد شاخص تنش فسفر وجود داشت. مقدار pH خاک درون و بیرون رایزوبگ در شرایط فراهمی فسفر، تفاوت معنی‌دار داشت. به نظر می‌رسد که فسفر کارایی و تولید ماده خشک در زمان کمبود فسفر این ارقام، بیشتر وابسته به کارایی آن‌ها در جذب فسفر و نیز وابسته به جذب بیشتر کلسیم آن‌ها از طریق افزایش حجم سیستم ریشه و افزایش توانایی تحرک و جذب فسفر خاک باشد.

واژه‌های کلیدی: کارایی، ریشه، کلسیم، رایزوبگ، فسفر

مقدمه

فسفر یکی از ۱۷ عنصر غذایی ضروری برای رشد گیاهان محسوب می‌شود (Hawkesford and Barraclough, 2011) و نقش آن در گیاه قابل جایگزین با عنصر دیگری نیست (Elanchezhian *et al.* 2015). این عنصر تمامی واکنش‌های بیوشیمیایی و توسعه‌ای در گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Akhtar *et al.*, 2009b). فسفر در میان عناصر پرمصرف، کمترین قابلیت استفاده را برای گیاه در خاک دارد (Tiessen, 2008) و این امر ناشی از رسوب فسفر به صورت فسفات‌های کلسیم در خاک‌های آهکی و به صورت فسفات‌های آهن و آلومینیوم در خاک‌های اسیدی است که درنهایت از قابلیت دسترسی فسفر برای گیاه می‌کاهد (Aziz *et al.*, 2006). کاربرد کودهای معدنی فسفره اگرچه مقدار تولید محصولات کشاورزی را به صورت غیر قابل‌انکار افزایش داده ولی اثرات سوء نیز بر محیط‌زیست داشته است (Akhtar *et al.*, 2009a). به این دلیل اصلاح گیاه برای هماهنگ شدن با خاک به‌جای اصلاح خاک برای هماهنگ شدن با نیاز گیاه، راهکار اکولوژیکی مؤثر در تولید پایدار محصولات کشاورزی است (Akhtar *et al.*, 2009a). گیاهان در مواجهه با تنش کمبود فسفر، برخی از راهبردهای مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی را در پیش

* نویسنده مسئول: mirseyed@ut.ac.ir

می‌گیرند تا بتوانند فسفر را جذب نمایند (Vance *et al.*, 2003). مکانیسم‌های تطبیقی شامل: کاهش سرعت رشد، افزایش رشد به ازای هر واحد فسفر جذب‌شده (Korkmaz and Altıntaş, 2016)، جابجایی مجدد فسفر، تغییر در اسیدیته محیط ریزوسفر ریشه (Pearse *et al.*, 2006)، افزایش تولید و ترشح اسیدهای آلی و آنزیم‌های فسفاتاز و تغییر در آرایش و مورفولوژی ریشه، افزایش سطح تماس ریشه ناشی از افزایش رشد ریشه (Vance *et al.*, 2003; Aziz *et al.*, 2006) و افزایش تولید ناقلین فسفر معدنی (Raghothama and Karthikeyan, 2005) می‌باشد. تمامی مکانیسم‌هایی که در بالا در مورد واکنش‌های گیاهان در زمان کمبود فسفر گفته شد می‌توانند در دو گروه دسته‌بندی شوند: کارایی جذب فسفر و کارایی درونی استفاده از فسفر. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری کارایی جذب و استفاده فسفر در نظر گرفته شده است (Hammond *et al.*, 2009). مسئله کلیدی در ارزیابی فسفر کارایی، انتخاب شاخص مناسب ارزیابی هست (Zhang *et al.*, 2008).

کلزا (*Brassica napus L.*) به دلیل سازگاری آن با شرایط مختلف، ارزش اقتصادی و قیمت مناسب آن در مقایسه با غلات، به‌عنوان مهم‌ترین گیاه دانه روغنی در ایران بوده و بیشترین سطح کشت را در این گروه دارد (Agricultural Ministry of Iran, 2014). مقدار فسفر قابل‌دسترس در ۵/۲ میلیون هکتار از اراضی قابل‌کشت ایران (۷۰/۲ درصد از اراضی آبی) کمتر از ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم هست (Tehrani *et al.*, 2012). مقدار نیاز گیاه کلزا به فسفر بیشتر از گندم است (Rose *et al.*, 2007). در مطالعات Rose *et al.* (2007)، غلظت فسفر ۴۰ روز پس از کشت در سه رقم کلزا در کل اندام هوایی از ۴/۱ تا ۴/۷ گرم بر کیلوگرم متغیر بود. کمبود فسفر باعث محدود شدن رشد اندام هوایی و ریشه می‌شود و مقدار مناسب آن باعث بلوغ زودتر گیاه می‌شود که این امر در مناطقی که دارای محدودیت دوره رشدی است، مهم می‌باشد (Orlovius, 2003). لذا کاربرد کودهای فسفره در مناطق دارای کمبود برای دستیابی به عملکرد مناسب، ضروری است و درصورتی‌که زارع در شرایط کمبود فسفر نتواند کود را به مقدار کافی فراهم نماید، مقدار تولید دانه کلزا نیز کاهش خواهد یافت. مجموع این عوامل، پایداری تولید کلزا را در ایران کاهش می‌دهد. هدف از این پژوهش بررسی و مقایسه رشد، جذب و تغییرات pH در ریزوسفر ریشه ۷ رقم کلزا با تیپ رشد زمستانه در شرایط مواجه‌شدن با تنش کمبود فسفر با استفاده از شاخص‌های مناسب کارایی بود. نتایج این تحقیق می‌تواند مشخص نماید که کدام‌یک از ارقام برای رشد یکسان 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

نمونه‌برداری و تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک

خاک استفاده شده (عمق ۰- ۳۰ سانتی‌متر) از مزارع ایستگاه تحقیقات اسماعیل‌آباد قزوین (″۱۵/۸۵ ′ ۳۶°۱۵ شمالی و″ ۱۸/۸۸ ′ ۴۹°۵۴ شرقی، ارتفاع ۱۲۷۸ متر) بر اساس مقدار فسفر قابل‌دسترس پایین و مقدار فسفر کل زیاد انتخاب گردید. بر اساس طبقه‌بندی آمریکایی، خاک به‌صورت coarse-loamy, mixed, mesic, Typic Xerorthents طبقه‌بندی گردید (Eskandarzadeh and Baghdadi, 1985). برخی از خصوصیات مهم نمونه خاک در جدول (۱) ارائه شده است. مقدار فسفر قابل‌دسترس خاک با کاربرد بی‌کربنات سدیم نیم مولار (pH=۸/۵) عصاره‌گیری و از طریق تولید کمپلکس آبی فسفومولیبدات (Olsen and Sommers, 1982) با دستگاه اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری گردید. مقدار فسفر محلول خاک با آب مقطر (Self-Davis *et al.*, 2000) و مقدار فسفر کل خاک با ترکیب $HF+ H_2SO_4 + H_2O_2$ عصاره‌گیری شد (Bowman, 1988) و با اسپکتروفوتومتر (Novaspec II visible spectrophotometer) به روش تولید کمپلکس آبی فسفومولیبدات اندازه‌گیری شد (Murphy and Riley, 1962). درصد ذرات تشکیل‌دهنده خاک به روش هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986)، کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون مرطوب (Nelson and Sommers, 1996)، عناصر میکروی قابل‌دسترس با عصاره گیر DTPA به روش Lindsay and Norvell (1978)، شوری خاک در عصاره اشباع (Rhoades, 1982) و بور به روش آب داغ اندازه‌گیری گردید (Keren, *et al.*, 1996). مقدار پتاسیم قابل‌دسترس با عصاره‌گیر استات آمونیوم (۱ نرمال با pH= ۷) و کلسیم و منیزیم قابل‌دسترس با استات آمونیوم عصاره‌گیری گردید (Sparks *et al.*, 1996). کربنات کلسیم معادل خاک[1] به روش خنثی‌سازی با هیدروکلریک اسید اندازه‌گیری شد (Loeppert and Suarez, 1996). مقدار فسفر محلول و کل خاک به ترتیب ۲/۷۸ و ۱۳۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود.

1 calcium carbonate equivalent

جدول ۱. برخی از خصوصیات مهم فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده‌شده

B	Zn	Cu	Mn	Fe	Mg	Ca	K	P	EC	pH_S^{**}	OC	Clay	Silt	Sand	CCE
(mg kg^{-1})*									(dS m^{-1})		(٪)				
۰/۳۸	۱/۱	۱	۶/۳	۲/۵	۳۰۶	۳۸۵۰	۲۷۰	۴/۶	۰/۷۹	۷/۹	۰/۳	۸	۳۲	۶۰	۵

OC: کربن آلی، EC: قابلیت هدایت الکتریکی، $P_{soluble}$: فسفر محلول در آب، P_{total}: فسفر کل خاک، * عناصر قابل‌جذب گیاه در خاک، pH_S^{**} در گل اشباع (saturated paste)، CCE: کربنات کلسیم معادل (Calcium carbonate equivalent)

کشت گیاه، روش مطالعه رایزوبگ و جداسازی ارقام

هفت رقم کلزا (*Brassica napus L.*) عبارت بودند از: Talaye, Okapi, L72, Gabriela, Karaj 3 (ارقام آزادگرده‌افشان) Brutus, Elvis (ارقام هیبرید). آزمایش در شرایط کنترل‌شده در اتاق رشد گروه علوم و مهندسی خاک پردیس کشاورزی دانشگاه تهران انجام شد. دمای شب ۱۸ و روز ۲۰ درجه سانتی‌گراد، شدت نور PAR[1] ۱۲۶ µmol photons m^{-2} s^{-1} که به‌وسیله صفحه‌ای حاوی لامپ‌های فلورسنت تأمین گردید. رطوبت نسبی ۶۵ درصد و ساعت روشنایی- تاریکی به ترتیب ۱۶-۸ ساعت بود. در این آزمایش گلدان‌های پلی‌اتیلنی با ۱۴ سانتی‌متر ارتفاع، ۱۵/۵ سانتی‌متر قطر دهانه بالا، ۱۲ سانتی‌متر قطر دهانه پایین و ۲۲۰۰ گرم خاک هوا خشک (عبور کرده از الک ۴ میلی‌متر) استفاده شد. تیمار فسفر دارای دو سطح بود که در تیمار سطح صفر، هیچ کود فسفره‌ای در خاک مصرف نشد. در تیمار دوم فسفر، مقدار ۸۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک، از منبع KH_2PO_4 اضافه شد. مقدار ۱۰۱ mg K kg^{-1} از منبع KCl در تیمارهای بدون فسفر برای توازن پتاسیم افزوده شده از منبع مونوپتاسیم‌فسفات، استفاده شد. کودهای پایه به مقدار mg N ۱۰۰ kg^{-1} از منبع اوره، mg Mg kg^{-1} ۴۰ از منبع $MgSO_4.7H20$، ۲ mg B kg^{-1} از منبع H_3BO_3، ۵ mg Mn kg^{-1} از منبع $MnSO_4$ $3H_20$، ۶ mg Fe kg^{-1} از منبع Fe-EDDHA 138 که به‌صورت محلول غذایی پیش از کشت با خاک مخلوط شدند. ۲۵ روز پس از کشت نیز عنصر کودی نیتروژن به میزان ۶۵ mg N kg^{-1} از منبع $(NH_4)_2SO_4$ به‌صورت محلول به گلدان‌ها اضافه شد. گلدان‌ها به‌صورت روزانه و تا ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه به‌صورت وزنی و با آب مقطر آبیاری گردید. در این تحقیق تکنیک رایزوبگ[2] برای جدا کردن خاک ریزوسفری از خاک غیر ریزوسفری استفاده شد (McGrath *et al.*, 1997; Gonzaga *et al.*, 2006). به این منظور مقدار ۵۱۶ گرم خاک در داخل توری‌هایی به شکل استوانه (۱۱/۵ سانتی‌متر قطر و ۸ سانتی‌متر ارتفاع) و از جنس پارچه پلی‌استر ۵۸ میکرون متر، در وسط گلدان قرارداده شد (شکل ۱). بقیه خاک در اطراف رایزوبگ ریخته شد. ۸ روز پس از کشت، جوانه‌ها تنک شد و در هر گلدان تعداد ۲ جوانه تا انتهای آزمایش حفظ گردید. ۴۵ روز پس از کشت مقارن با مرحله رشدی ۱۷-۱۸ از کد دو رقمی رشد کلزا (Bleiholder *et al.*, 2001)، برداشت انجام شد (در این مرحله گیاه کلزا در مرحله رشد رویشی با ۷-۸ برگ حقیقی است). در بوته‌های برداشت‌شده، سطح برگ (CI 202 Area Meter CID, Inc USA) اندازه‌گیری شد. ریشه‌های موجود در درون رایزوبگ در چند نوبت با آب مقطر تمیز شدند. رطوبت ریشه‌ها با کاغذ صافی گرفته و سپس حجم ریشه‌ها با استفاده از استوانه مدرج اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها در آون در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفت و پس از خشک شدن، وزن خشک قرائت گردید. نمونه‌ها پس از قرارگیری در کوره در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ ساعت در اسید هیدروکلریدریک ۲ نرمال هضم شدند (Chapman and Pratt, 1962). غلظت فسفر (mg g^{-1}) در ریشه و اندام هوایی گیاه به روش رنگ زرد مولیبدو وانادات (Chapman and Pratt, 1962) با اسپکتروفوتومتر (Milton Roy Spectronic 601) قرائت شد. غلظت کلسیم (mg g^{-1}) با دستگاه اتمیک اسپکتروفوتومتر (Perkin Elmer model 3110 AA spectrometer USA) اندازه‌گیری شد (Elmer and Conn,1982; Walinga *et al.*, 1989). کارایی درونی استفاده از فسفر[3] (۱) بر اساس روش Sepehr *et al.* (2012) و شاخص استفاده از فسفر[4] (۲) بر اساس Rose and Wissuw (2012)، فسفر کارایی[5] (۳) و کارایی جذب فسفر[6] (۴) بر اساس روش Ozturk *et al.* (2005) و شاخص تنش فسفر[7] (۵) بر اساس وزن

1. Photo synthetically Active Radiation
2. rhizobag

3. P utilization efficiency=PUTE
4. P utilization index =PUI
5. P efficiency= PE
6. P acquisition efficiency= PACE
7. P stress factor = PSF

خشک اندام هوایی[1] مطابق روش Akhtar *et al.* (2007b) تعیین شدند. pH نمونه‌های خاک درون و بیرون رایزوبگ در گل اشباع پس از یک‌شب توقف به‌وسیله pH متر (Metrohm 691 pH meter Swiss made) تعیین شد (Burt and Staff, 2014). جذب فسفر از حاصل ضرب غلظت فسفر در وزن خشک آن اندام از گیاه محاسبه شد.

(رابطه ۱)(Sepehr *et al*.,2012)

$$PUTE\ (P\ utilization\ efficiency) = (g\ DW\ mg\ P^{-1}) = \left(\frac{SDW\ (g\ plant^{-1})}{shoot\ P\ uptake\ (mg\ plant^{-1})}\right)$$

(رابطه ۲) (Rose and Wissuw , 2012)

$$PUI\ (P\ utilization\ index) = (g^2\ DW\ mg\ P^{-1}) = \frac{SDW\ (g\ plant^{-1})}{shoot\ P\ concentration\ (mg\ g^{-1})}$$

(رابطه ۳) (Ozturk *et al*., 2005)

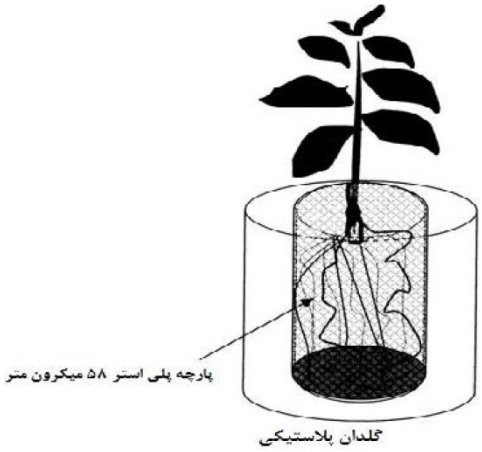
$$PE\ (P\ efficiency) = \frac{SDW\ P0\ (g\ plant^{-1})}{SDW\ P80\ (g\ plant^{-1})}$$

(رابطه ۴) (Ozturk *et al*., 2005)

$$PACE\ (P\ acquisition\ efficiency) = \frac{shoot\ P\ uptake\ P0\ (mg\ plant^{-1})}{shoot\ P\ uptake\ P80\ (mg\ plant^{-1})}$$

(رابطه ۵) (Akhtar *et al*., 2007b)

$$(PSF\ (P\ stress\ factor) = \frac{(SDW\ P80 - SDW\ P0)}{SDW\ P80}$$



شکل ۱. نمایی از سیستم رایزوبگ استفاده‌شده

تجزیه آماری نتایج

آزمایش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی در قالب فاکتوریل (factorial CRD) شامل ۷ رقم کلزا و دو سطح تیمار فسفره در سه تکرار انجام شد. برای تجزیه آماری نتایج از نرم‌افزار SAS 9.1(USA NC, SAS institute, Cary) استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها در سطح ۵ درصد به روش آزمون دانکن انجام شد. همچنین ارقام کلزا بر اساس روش به‌کاربرده شده توسط *et al.* Damon (2007) بر مبنای میانگین فسفر کارایی به گروه کارا، غیرکارا و حد وسط، تفکیک شدند. در این روش از میانه (median) فسفر کارایی ارقام و خطای استاندارد استفاده شد.

نتایج و بحث

تأثیر تنش کمبود فسفر بر تجمع بیوماس در ارقام مختلف کلزا

مطابق نتایج تجزیه واریانس اثر متقابل نوع رقم کلزا و مقدار فسفر بر وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و نسبت ریشه به اندام هوایی معنی‌دار بود ولی اثر متقابل آن بر سطح برگ معنی‌دار نبود (جدول ۲). تنش کمبود فسفر باعث کاهش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی (حدود ۵۶/۶ درصد) گیاه گردید. در شرایط تنش فسفر، ارقام کلزا تفاوت معنی‌داری از لحاظ وزن خشک و حجم ریشه داشتند (جدول ۲). بیشترین و کمترین وزن خشک‌ریشه همانند وزن خشک اندام هوایی به ترتیب به دو رقم Gabriela وElvis تعلق داشت و این روند در مورد حجم ریشه نیز مشاهده شد. در شرایط کمبود فسفر، مقدار وزن خشک‌ریشه حدود ۵۴/۹ درصد و حجم ریشه حدود ۴۸/۸ درصد نسبت به شرایط فراهمی فسفر کاهش یافت. (2016) Korkmaz and Altıntaş, نیز در بررسی خود بر روی ارقام زمستانه کلزا، کاهش وزن خشک‌ریشه و اندام هوایی را در خاکی با مقدار ۳/۵ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک مشاهده نمودند که این امر نشان‌دهنده اهمیت فسفر برای رشد اندام هوایی و نیز ریشه گیاه کلزا می‌باشد. در بررسی‌های انجام‌شده قبلی نیز کاهش رشد و علائم کمبود فسفر در خاک‌هایی با فسفر اولسن کمتر از ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک مشاهده شد (Zhang *et al.*, 2009; Shi *et al.*, 2012). در بررسی Knight *et al.* (2014)، گیاه کلزا در خاک‌هایی با مقدار فسفر کمتر از ۱۶-۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم به کاربرد کود فسفره واکنش نشان داد که این امر وابسته به مکان و نوع رقم متفاوت بود. در این بررسی مقدار کاهش وزن خشک در اندام هوایی نسبت به ریشه، اندکی بیشتر بود. نسبت وزن خشک‌ریشه به اندام هوایی در شرایط تنش فسفر در ارقام Gabriela و Talaye، نسبت به شرایط فراهمی فسفر بیشتر بود ولی تفاوت دو سطح معنی‌دار نبود. مقدار بیشتر این نسبت در برخی از ارقام دچار تنش می‌تواند ناشی از افزایش مقدار انتقال مواد فتوسنتزی به ریشه و مصرف مواد فتوسنتزی در ریشه و افزایش سطح ریشه و متعاقب آن افزایش جذب فسفر باشد. افزایش در رشد ریشه می‌تواند به گیاه دچار تنش کمک نماید تا بتواند مقدار بیشتری فسفر از محیط اطراف جذب نماید (Akhtar *et al*., 2007a). ژنوتیپ‌هایی از گیاهان که دارای سیستم ریشه گسترده‌تر و درعین‌حال مقدار بیشتر ماده خشک

1. SDW=shoot dry weight

در اندام هوایی هستند، می‌توانند به‌عنوان ارقام فسفر کارا در شرایط تنش کمبود فسفر در نظر گرفته شوند (Elanchezhian *et al*., 2015). تنش کمبود فسفر همچنین باعث کاهش ۴۶/۱ درصدی سطح برگ شد. در این شرایط بیشترین سطح برگ را رقم Gabriela و کمترین آن را رقم Elvis تولید نمود. تنش کمبود فسفر از طریق کاهش تقسیم سلولی در منطقه مریستم اندام هوایی بر سطح برگ مؤثر بوده و از گسترش سطح برگ ممانعت می‌نماید. همچنین این تأثیر از طریق کاهش هدایت هیدرولیکی ریشه نیز اعمال می‌گردد (Akhtar *et al*., 2007c). در این آزمایش رابطه همبستگی معنی‌دار و مثبت بین سطح برگ با وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک‌ریشه مشاهده شد (به ترتیب** ۰/۸۶۶ و** R^2=۰/۸۷۱).

جدول ۲. نتایج مقایسه میانگین وزن خشک اندام هوایی، سطح برگ، حجم ریشه، وزن خشک‌ریشه، نسبت وزن خشک‌ریشه به اندام هوایی هفت رقم کلزای زمستانه در دو سطح فسفر

	وزن خشک اندام هوایی		سطح برگ		حجم ریشه		وزن خشک‌ریشه		نسبت ریشه به اندام هوایی	
	(g plant^{-1})		(cm^2 plant^{-1})		(ml plant^{-1})		(g plant^{-1})		–	
رقم	P0	P80	P0	P80	P0	P80	P0	P80	P0	P80
Gabriela	۱/۲۱a×	۱/۹۸a	۳۳۹a	۴۸۰a	۱/۵۳a	۲/۱۵a	۰/۱۹۷a	۰/۲۵۴a	۰/۱۶۲a	۰/۱۲۹ab
Karaj	۰/۷۳b	۱/۷۶ab	۲۲۷b	۴۴۴a	۰/۷۵b	۱/۶۷bc	۰/۰۶۹bc	۰/۱۹۰bc	۰/۰۹۴bc	۰/۱۰۷b
Okapi	۰/۷۴b	۲/۰۸a	۲۱۸b	۴۲۲ab	۰/۶۷bc	۲/۰۳ab	۰/۰۶۱bc	۰/۲۱۰ab	۰/۰۸۱cd	۰/۱۰۱b
L72	۰/۷۷b	۱/۸۱ab	۲۳۶b	۴۵۱a	۰/۷۸b	۱/۵۸c	۰/۰۸۳b	۰/۲۰۶b	۰/۱۰۸b	۰/۱۱۵ab
Talaye	۰/۷۲b	۱/۳۷bc	۲۰۲b	۳۵۳c	۰/۸۷b	۱/۲۹cd	۰/۰۶۶bc	۰/۱۱۱de	۰/۰۹۱bc	۰/۰۸۲c
Brutus	۰/۶b	۱/۲۸c	۱۸۸bc	۳۷۸bc	۰/۴۳cd	۰/۷۳e	۰/۰۳۸cd	۰/۰۸۱e	۰/۰۶۳d	۰/۰۶۳d
Elvis	۰/۳۶c	۱/۴۹bc	۱۴۱c	۳۴۸c	۰/۳۲d	۱/۰de	۰/۰۳d	۰/۱۵۵cd	۰/۰۸۴cd	۰/۱۰۵b
میانگین	۰/۷۳۳	۱/۶۸	۲۲۲	۴۱۱	۰/۷۶	۱/۴۹	۰/۰۷۸	۰/۱۷۲	۰/۰۹۸	۰/۱
منابع تغییر	میانگین مربعات									
رقم (C)	**		**		**		**		**	
مقدار فسفر (P)	**		**		**		**		ns	
P × C	*		ns		**		**		**	

×حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد به روش دانکن

*، **، ns، به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، یک درصد و غیر معنی‌دار

جذب عناصر فسفر و کلسیم در اندام هوایی و ریشه ۷ رقم کلزای زمستانه در دو سطح فسفر

اثر متقابل تیمارهای نوع رقم کلزا و مقدار فسفر بر جذب فسفر و کلسیم در اندام هوایی و ریشه ارقام کلزا معنی‌دار بود (جدول ۳). تنش کمبود فسفر باعث کاهش معنی‌دار جذب فسفر در اندام هوایی (۷۱/۹ درصد) و ریشه (۷۷/۳ درصد) شد (جدول ۳). در کلیه ارقام کلزا و در هر دو سطح فسفر، مقدار جذب فسفر در اندام هوایی بیشتر از ریشه بود. بیشترین مقدار فسفر جذب‌شده اندام هوایی در رقم Gabriela و کمترین آن در رقم Elvis مشاهده شد و در ریشه نیز روند به همین صورت بود. در بررسی Aziz *et al*., (2006), (2011) و Shi *et al*. (2012) نیز همین روند مشاهده شد و جذب فسفر در ریشه کمتر از اندام هوایی و در رقم غیرکارا جذب هم در ریشه و هم اندام هوایی، کمتر از رقم کارا بود. رابطه همبستگی مثبت و معنی‌داری بین جذب فسفر در ریشه و جذب در اندام هوایی (R^2 =۰/۸۳۷**) وجود داشت. رابطه مثبت بین جذب کلسیم و جذب فسفر در اندام هوایی نیز وجود داشت (R^2 =۰/۸۷۷**). بر اساس نظر Devau *et al*. (2010)، اثر تسهیل‌کننده جذب کلسیم بر روی قابلیت دسترسی فسفر به غیر از اثرات جذب فسفر و تغییرات قلیائیت ایجادشده در اثر فعالیت ریشه است و معمولاً پتانسیل تأثیر آن در قابلیت دسترسی فسفر ریزوسفر، در بررسی منابع در نظر گرفته نمی‌شود. تأثیر جذب کلسیم بر قابلیت دسترسی فسفر می‌تواند ناشی از تأثیر مثبت جذب سطحی[1] کلسیم بر جذب سطحی فسفر باشد که در نتیجه افزودن یون‌های مثبت بر سطح کانی‌ها ایجاد می‌شود و باعث متوازن نمودن اثر دفعی یون‌های منفی مثل فسفر و سطوح معدنی می‌گردد. تنش

1. adsorption

کمبود فسفر باعث کاهش معنی‌دار جذب کلسیم در اندام هوایی (۴۴/۷۸ درصد) و ریشه (۳۸/۸ درصد) شد (جدول ۳). در کلیه ارقام کلزا و در هر دو سطح فسفر مقدار جذب کلسیم در اندام هوایی بیشتر از ریشه بود. در مطالعات Akhtar *et al.* (2009a) نیز مقدار جذب کلسیم در اندام هوایی بیشتر از ریشه و در رقم غیرکارا کمتر از رقم کارا بود. بیشترین مقدار کلسیم جذب‌شده اندام هوایی در رقم Gabriela و کمترین آن در رقم Elvis مشاهده شد و در ریشه نیز روند به همین صورت بود.

جدول ۳. نتایج مقایسه میانگین جذب عناصر فسفر و کلسیم در اندام هوایی و ریشه، شاخص کارایی مصرف (PUI) و کارایی استفاده درونی از فسفر (PUTE) ارقام مختلف کلزا در دو سطح از فسفر

	PUTE		PUI		ریشهp		اندام هواییp		ریشهCa		اندام هواییCa	
	(g SDW mg^{-1} P)		(g^2 SDW mg^{-1} P)		جذب (mg plant^{-1})							
رقم	P0	P80	P0	P80	P0	P80	P0	P80	P0	P80	P0	P80
Gabriela	۰/۳۱۵ab[x]	۰/۲۳۳a	۰/۳۸۲a	۰/۴۶۱a	۰/۳۴۸a	۱/۰۸a	۳/۸۴a	۸/۵۳ab	۲۶a	۱۵c	۴۲a	۴۸abc
Karaj	۰/۳۲۲ab	۰/۱۹۷c	۰/۲۳۶bc	۰/۳۴۶ab	۰/۱۲۰c	۰/۶۷bc	۲/۲۶b	۸/۹۹a	۶/۸۴bc	۱۸/۶ab	۲۸b	۵۷a
Okapi	۰/۳۵۰ab	۰/۲۲۳ab	۰/۲۶۱bc	۰/۴۶۳a	۰/۱۰۲c	۰/۵۹cd	۲/۱۲b	۹/۳۴a	۶/۹۲b	۱۷/۴b	۲۶b	۵۰ab
L72	۰/۳۶۳a	۰/۲۰۸abc	۰/۲۷۹b	۰/۳۷۸ab	۰/۱۶۱b	۰/۷۴b	۲/۱۰b	۸/۶۷ab	۶/۹۲b	۱۹/۲a	۲۷b	۵۳ab
Talaye	۰/۳۴۷ab	۰/۲۰۶bc	۰/۲۴۸bc	۰/۲۸۳b	۰/۰۹۷c	۰/۳۱e	۲/۰۸b	۶/۶۳bc	۶/۱۹bc	۷/۵e	۲۶b	۴۸abc
Brutus	۰/۳۰۵b	۰/۲۲۱abc	۰/۱۸۴cd	۰/۲۸۴b	۰/۰۶۱d	۰/۲۸e	۱/۹۴b	۵/۸۲c	۳/۹۹cd	۵/۱f	۲۳b	۳۷c
Elvis	۰/۳۴۶ab	۰/۲۲۰abc	۰/۱۲۳d	۰/۳۲۹b	۰/۰۵۳d	۰/۴۸d	۱/۰۳c	۶/۷۴bc	۲/۲۶d	۱۱/۱d	۱۴c	۴۵bc
میانگین	۰/۳۳۵	۰/۲۱۵	۰/۲۴۵	۰/۳۶۳	۰/۱۳۴	۰/۵۹	۲/۲۰	۷/۸۲	۸/۱۶	۱۳/۴	۲۶/۶	۴۸/۱
منابع تغییر	میانگین مربعات											
رقم (C)	ns		**		**		**		**		**	
مقدار فسفر (P)	**		**		**		**		**		**	
P * C	*		ns		**		**		**		**	

[x]حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد به روش دانکن، *، **، ns، به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، یک درصد و غیر معنی‌دار

فسفر کارایی، کارایی جذب و استفاده از فسفر و شاخص تنش فسفر

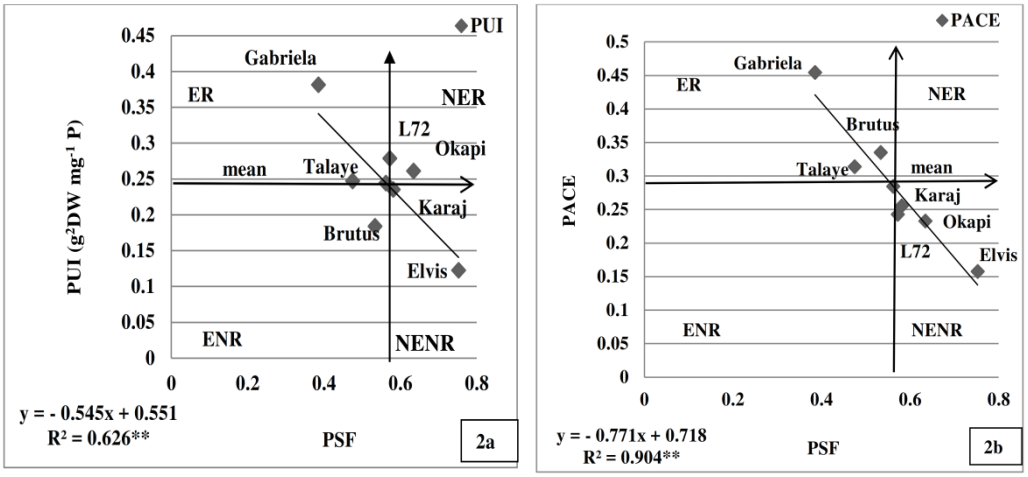
اثر متقابل نوع رقم کلزا و مقدار فسفر استفاده شده بر کارایی استفاده درونی از فسفر (PUTE) معنی‌دار و بر شاخص کارایی مصرف فسفر (PUI) غیر معنی‌دار بود (جدول ۲). کاهش ۳۵/۸ درصدی کارایی استفاده درونی از فسفر در شرایط فراهمی فسفر، نسبت به شرایط کمبود آن نشان می‌دهد که مقدار وزن خشک کمتری برای هر واحد فسفر جذب‌شده تولید شده یا مقدار کمتری از فسفر درونی برای تولید ماده خشک مصرف شده است (Akhtar *et al.*, 2009a) (جدول ۳). بر اساس نظر Santa-Maria *et al.* (2015) استفاده از شاخص کارایی مصرف فسفر و کارایی استفاده درونی از فسفر در زمانی صحیح است که غلظت عنصر غذایی در محدوده رشد پایین‌تر از شرایط نرمال برای رشد گیاه است. دو شاخص PUI و PUTE متفاوت از یکدیگر هستند که بر اساس غلظت و یا جذب فسفر محاسبه می گردند و به وسیله محققین مختلفی استفاده شده‌اند ولی به نظر می‌رسد میزان استفاده از شاخص PUTE در میان محققین بیشتر باشد. بر اساس نتایج (جدول ۳) کارایی استفاده درونی از فسفر در رقم کارای Gabriela کمتر از رقم غیرکارای Elvis بود (۰/۳۱۵ در برابر g DW mg^{-1} P ۰/۳۴۶). در مطالعات Aziz *et al.* (2011) و Zhang *et al.* (2008) در شرایط تنش کمبود فسفر، کارایی مصرف فسفر در ارقام غیرکارا بیشتر بود ولی کارایی جذب فسفر ارقام غیرکارا کمتر بود که نتیجه مشابه آن در این بررسی نیز به دست آمد. به نظر آن‌ها 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 جابجایی مجدد عناصر در اندام گیاه. بیشترین شاخص کارایی مصرف فسفر در رقم Gabriela و کمترین آن در رقم Elvis مشاهده شد. بین ارقام کلزای استفاده شده در این آزمایش از لحاظ فسفر کارایی، کارایی جذب فسفر و شاخص تنش فسفر تفاوت معنی‌دار وجود داشت (جدول ۴). رابطه بین PUI وPSF معنی‌دار و منفی بود (R^2 = ۰/۶۲۶**). این امر نشان می‌دهد که ارقامی که برای هر غلظت فسفر مقدار بیشتری از ماده خشک را تولید نمودند، مقدار کمتری تحت تأثیر تنش فسفر، تولید ماده خشک را کاهش دادند. فسفر کارایی از ۰/۶۱۵ در رقم Gabriela تا ۰/۲۴۸ در رقم Elvis متغیر بود (جدول ۴). در شرایط تنش،

ارقامی که فسفر کارایی بیشتری داشتند وزن خشک بیشتری نیز تولید نمودند (R^2 =۰/۹۱۲**). کارایی جذب فسفر ارقام کلزا از ۰/۴۶۹ در رقم Gabriela تا ۰/۱۵۷ در رقم Elvis متغیر بود. رابطه همبستگی مثبت و معنی‌داری بین کارایی جذب فسفر و وزن خشک اندام هوایی با فسفر کارایی وجود داشت (به ترتیب ۰/۷۰** و R^2 =۰/۸۵ **). این امر می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر بیشتر کارایی جذب فسفر در ایجاد فسفر کارایی در ارقام کلزای موردبررسی نسبت به کارایی مصرف فسفر باشد. اگر رابطه همبستگی بین فسفر کارایی و کارایی مصرف درونی فسفر را در نظر بگیریم (R^2 = ۰/۲ns) می‌توان فسفر کارایی در این ارقام را مرتبط با کارایی جذب فسفر در نظر گرفت ولی اگر رابطه بین فسفر کارایی و شاخص کارایی مصرف فسفر را در نظر بگیریم (R^2 = ۰/۶**)، متوجه می‌شویم که علاوه بر کارایی جذب، کارایی مصرف فسفر نیز در کلزا مؤثر خواهد بود. بر اساس رابطه همبستگی بین PUI و PACE با PSF، ارقام کلزا در چهار گروه قرار گرفتند (شکل ۲): کارا و واکنش‌پذیر (ER = efficient responsive)، کارا و غیر واکنش‌پذیر (ENR= efficient and non-responsive), غیرکارا و واکنش‌پذیر (NER)، غیرکارا و غیر واکنش‌پذیر (NENR). بر اساس شاخص PUI در گروه کارا و واکنش‌پذیر ارقامی مثل Gabriela و Talaye و ارقامی مثل Brutus به‌صورت کارا ولی غیر واکنش‌پذیر و ارقام Karaj و Elvis به‌صورت غیرکارا و غیر واکنش‌پذیر و ارقام Okapi و L72 در گروه غیرکارا ولی واکنش‌پذیر قرار گرفتند (شکل ۲a). بر اساس شاخص PACE در گروه کارا و واکنش‌پذیر ارقامی مثل Gabriela، Talaye و Brutus قرار گرفتند. ارقامی مثل Okapi، L72، Karaj و Elvis به‌صورت غیرکارا و غیر واکنش‌پذیر و هیچ‌یک از ارقام در گروه غیرکارا ولی واکنش‌پذیر و کارا ولی غیر واکنش‌پذیر قرار نگرفتند (شکل ۲b). تفاوت در نحوه قرارگیری ارقام در دو نوع دسته‌بندی به تفاوت آن‌ها ازلحاظ کارایی جذب و یا کارایی مصرف وابسته است. مطابق نظر *et al.* (2007) Damon *et al.* با در نظر گرفتن فسفر کارایی و خطوط افقی حاصل از میانه (median) فسفر کارایی بعلاوه خطای استاندارد و یا میانه منهای خطای استاندارد نیز ارقام دسته‌بندی شدند و ارقام زیر خط افقی پایین به‌عنوان ارقام غیرکارا در نظر گرفته شدند مثل Elvis (شکل ۳). آن‌هایی که مثل Gabriela بالای خط افقی میانه بعلاوه خطای استاندارد قرار گرفتند به‌عنوان ارقام کارا بودند.

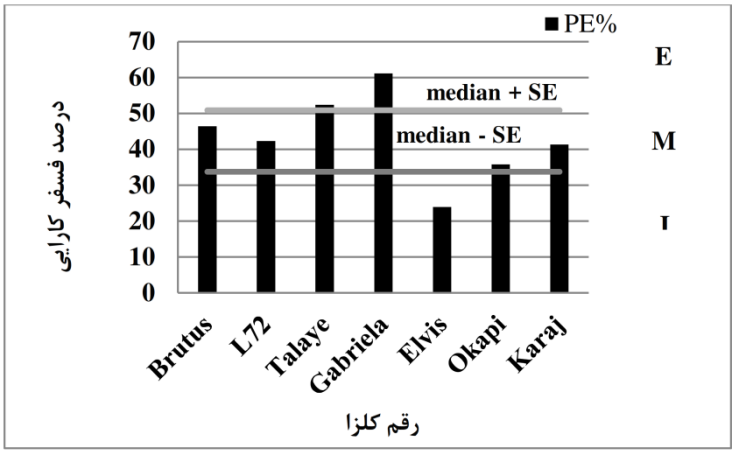
جدول ۴. تفاوت ارقام مختلف کلزای زمستانه از لحاظ کارایی جذب، فسفر کارایی و فاکتور تنش فسفر

رقم	PSF	PACE	PE
Gabriela	۰/۳۹d×	۰/۴۶۹a	۰/۶۱۵a
Karaj	۰/۵۹bc	۰/۲۵۲c	۰/۴۱۹bc
Okapi	۰/۶۳b	۰/۳۱۴b	۰/۳۶۶c
L72	۰/۵۷bc	۰/۲۴۳c	۰/۴۲۸bc
Talaye	۰/۴۷cd	۰/۳۱۴b	۰/۵۲۵ab
Brutus	۰/۵۳bc	۰/۳۳۵b	۰/۴۶۷bc
Elvis	۰/۷۵a	۰/۱۵۷d	۰/۲۴۸d
منبع تغییر	میانگین مربعات		
رقم	**	**	**

×حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد به روش دانکن، ** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد



شکل ۲. تفکیک ارقام بر اساس شاخص کارایی استفاده از فسفر (PUI) یا بر اساس کارایی جذب فسفر (PACE) به‌عنوان تابعی از فاکتور تنش فسفر (PSF)



شکل ۳. فسفر کارایی برای ۷ رقم کلزا. خطوط افقی ارقام را بر اساس یک خطای استاندارد بیشتر و کمتر از میانه فسفر کارایی ارقام کلزا تفکیک می‌نماید (Median=۴۲/۳، Average = ۴۳/۳، Standard Error=۸/۵۶ (SE))، (کارا =E، متوسط = M، غیرکارا =I)

تغییرات pH در خاک منطقه ریزوسفر

مطابق نتایج، اثر اصلی مقدار فسفر و نیز اثر اصلی نوع خاک (ریزوسفری و غیر ریزوسفری) و نیز اثر متقابل نوع خاک و مقدار فسفر مصرفی بر **pH** خاک معنی‌دار بود ولی اثرات متقابل دیگر بر این شاخص معنی‌دار نگردید (جدول ۵). این امر نشان می‌دهد که شرایط اسیدیته خاک، متأثر از منطقه فعالیت ریشه گیاه و کمبود یا فراهمی فسفر در خاک است. در این آزمایش مقدارpH در شرایط کمبود فسفر در خاک درون و بیرون ریزوبگ تفاوت معنی‌داری نداشت ولی در شرایط فراهمی فسفر از منبع مونوپتاسیم-فسفات، مقدار pH در درون ریزوبگ نسبت به بیرون آن افزایش یافت (جدول ۶). در بررسی Pearse *et al.* (2006)، گیاه کلزا در شرایط کمبود و نیز فراهمی فسفر باعث افزایش pH خاک، نسبت به خاک شاهد بدون کشت شد. در آزمایش این محقق، pH خاک ریزوسفر در شرایط کمبود فسفر کمتر از شرایط فراهمی فسفر بود. همچنین در بررسی ایشان، فراهم کردن فسفر از منبع KH_2PO_4 باعث افزایش pH نسبت به منابع دیگر کود شد، زیرا به‌صورت معنی‌داری مقدار آزادسازی کربوکسیلات‌ها را کاهش داد (Pearse *et al.*, 2007). نوع خاک، شرایط کشت و عدم توازن جذب کاتیون ـ آنیون در گیاه نیز می‌تواند از دلایل تفاوت pH خاک ارقام کلزا در شرایط کمبود فسفر باشد (Zhang *et al.*, 2009). بر اساس نظر Moorby *et al.* (1988) ترشح یون H^+ از قسمت انتهایی ریشه‌های جوان کلزا اتفاق می‌افتد ولی جذب فسفر از کل طول ریشه انجام می‌شود. در زمان کمبود فسفر، مقدار ترشح HCO_3^- از قسمت انتهایی ریشه کاسته شده و مقدار ترشح H^+ از این منطقه افزایش می‌یابد ولی قسمت‌های دیگر ریشه هنوز به ترشح HCO_3^- ادامه می‌دهند. درنتیجه ممکن است تغییر pH تنها در محدوده انتهایی ریشه‌های جوان اتفاق افتد. پس نوع سیستم ریشه‌ای تولیدی نیز بر این روند مؤثر است و در صورتی‌که وزن بیشتر ریشه در ریشه اولیه تجمع یابد نه در ریشه‌های جانبی، ممکن است وزن ریشه زیاد گردد ولی تغییر محسوسی در pH مشاهده نشود. عدم تغییرات معنی‌دار pH در ریزوسفر نسبت به توده خاک به هیچ عنوان به معنی عدم وقوع جریان‌های پروتونی در ریزوسفر نیست به‌طوری‌که این پروتون‌ها ممکن است در طیف وسیعی از واکنش‌هایی که منجر به مصرف پروتون می‌شوند مثل انحلال آهک، شرکت داشته باشند (Hinsinger and Gilkes, 1996).

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس تغییرات pH در خاک درون و بیرون رایزوبگ برای هفت رقم کلزای زمستانه در دو شرایط فسفر

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
رقم	۶	۰/۰۰۹^{ns}	نوع خاک × مقدار فسفر	۱	۰/۱۵۳**
مقدار فسفر	۱	۰/۳۷۵**	رقم × مقدار فسفر	۶	۰/۰۰۲^{ns}
نوع خاک	۱	۰/۰۶۱**	رقم × مقدار فسفر × نوع خاک	۶	۰/۰۰۳^{ns}
رقم × نوع خاک	۶	۰/۰۰۶^{ns}	خطا	۵۶	۰/۰۰۵

*، **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و ۵ درصد، ns: غیر معنی‌دار

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر متقابل مقدار فسفر مصرفی و نوع خاک (خاک درون (۱) و بیرون رایزوبگ (۲)) بر pH خاک

مقدار فسفر ($mg\ kg^{-1}$)	نوع خاک	pH
۰	۱	۷/۶۸ c[×]
	۲	۷/۷۱ c
۸۰	۱	۷/۹۰ a
	۲	۷/۷۶ b

[×] حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد به روش دانکن (n= ۲۱)

جمع‌بندی نتایج

در شرایط تنش کمبود فسفر بین ارقام کلزای موردبررسی در این آزمایش ازلحاظ وزن خشک اندام هوایی و ریشه، مقدار جذب فسفر، کلسیم، کارایی جذب فسفر و خصوصیات ریشه تفاوت وجود داشت. ارقامی از کلزا که مقدار بیشتری از فسفر را در ریشه جذب نمودند، مقدار بیشتری فسفر را نیز در ساقه داشتند و توانستند وزن خشک بیشتری در ریشه و ساقه تولید نمایند. ارقامی از کلزا که کارایی جذب بیشتری داشتند مثل Gabriela در شرایط تنش، وزن خشک بیشتری نیز تولید نمودند. مقدار بالاتر جذب کلسیم در رقم Gabriela ممکن است عامل افزایش قابلیت جذب فسفر بخصوص از محل فسفات‌های کلسیم در منطقه ریزوسفر گیاه باشد. این امر ممکن است درنتیجه ترشح اسیدهای آلی و افزایش حلالیت و تحرک فسفر (که در این تحقیق اندازه‌گیری نشد) و یا افزایش سطح تماس ریشه برای جذب کلسیم ایجادشده باشد. اثر مقدار فسفر مصرف‌شده بر مقدار pH خاک ریزوسفری و غیر ریزوسفری معنی‌دار بود. رقم Gabriela در شرایط تنش، دارای شاخص‌های رشدی بهتری نسبت به ارقام دیگر بود و نشان داد که می‌تواند برای شرایط تنش فسفر، رقم مناسب‌تری باشد. در ارقامی که رشد سیستم ریشه آن‌ها محدود است، در توصیه کودی فسفر برای گیاه کلزا، علاوه بر مقدار فسفر قابل‌دسترس اولیه خاک و دیگر خصوصیات خاک، باید نوع رقم مورداستفاده برای کشت و خصوصیات ریشه آن نیز مدنظر قرار گیرد چراکه در ارقام کارا در مقایسه با ارقام ناکارا برای دستیابی به عملکرد یکسان، نیاز به مصرف مقدار کمتری کود خواهد بود. در جمع‌بندی می‌توان گفت که فسفر کارایی ارقام و تولید وزن خشک در شرایط تنش کمبود فسفر به توانایی آن‌ها در جذب فسفر و نیز جذب بیشتر کلسیم وابسته است و این امر باعث ایجاد تنوع در فسفر کارایی ارقام مختلف کلزا شد. استفاده از ارقام فسفر کارا می‌تواند به‌عنوان راهبرد سودمند در تولید پایدار محصولات کشاورزی و نیز حفظ محیط‌زیست در نظر گرفته شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از آزمایشگاه حاصلخیزی گروه خاکشناسی گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران و نیز آزمایشگاه تجزیه خاک و گیاه موسسه تحقیقات خاک و آب به خاطر فراهم نمودن امکانات اجرای این تحقیق تشکر می‌گردد.

REFERENCES

Agricultural Ministry of Iran, (2014). Office of statistics and information technology, bureau of agricultural statistics and information technology statistics. Ministry of Agriculture. Retrieved February 23, 2016 from http://amar.maj.ir/Portal/File/ShowFile.aspx?ID=e0b180a1-71de-4f1e-8798-531dd0f3132f. (In Farsi)

Akhtar, M., Oki, Y., & Adachi, T. (2007 a). Genetic diversity in *Brassica* cultivars under deficiently buffered P stress environment: I. biomass accumulation, P concentration, P uptake, and related growth parameters. *Journal of American Science*, 3(2), 55-63.

Akhtar, M. S., Oki, Y., & Adachi, T. (2007 b). Genetic diversity in *Brassica* cultivars under deficiently buffered P stress environment: II. Percent distribution of biomass and P concentration, P stress factor and P utilization efficiency. *Journal of American Science*, 3(2), 64-72.

Akhtar, M. S., Oki, Y., & Adachi, T. (2007 c). Genetic diversity in *Brassica* cultivars under deficiently buffered P stress environment: III. Leaf area (LA), P-stress induced percent reductions in LA, P absorption, transport and utilization rates. *Journal of American Science*, 3(2), 73-82.

Akhtar, M. S., Oki, Y., & Adachi, T. (2009 a). 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.

Akhtar, M. S., Oki, Y., & Adachi, T. (2009 b). Mobilization and acquisition of sparingly soluble P sources by *Brassica* cultivars under P starved environment II. Rhizospheric pH changes, redesigned root architecture and Pi uptake kinetics. *Journal of integrative plant biology*, 51(11), 1024-1039.

Aziz, T., Ahmed, I., Farooq, M., Maqsood, M. A., & Sabir, M. (2011). Variation in phosphorus efficiency among *Brassica cultivars* I: Internal utilization and phosphorus remobilization.

Journal of Plant Nutrition, 34(13), 2006-2017.

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

Bleiholder, H., Weber, E., Lancashire, P., Feller, C., Buhr, L., Hess, M., Klose, R. (2001). *Growth stages of mono-and dicotyledonous plants*, BBCH Monograph. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, Berlin, Germany.

Bowman, R. (1988). A rapid method to determine total phosphorus in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 52(5), 1301-1304.

Burt, R., & Staff, S. (2014). *Soil Survey Laboratory Methods.* Manual. Natural Resources Conservation Services. National Soil Survey Center, Lincoln, Nebraska.

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

Damon, P., Osborne, L., & Rengel, Z. (2007). Canola genotypes differ in potassium efficiency during vegetative growth. *Euphytica, 156(3)*, 387-397,

Devau, N., Le Cadre, E., Hinsinger, P., Gérard, F. (2010) A mechanistic model for understanding root-induced chemical changes controlling phosphorus availability. *Annals of Botany*. 105, 1183–1197.

Elanchezhian, R., Krishnapriya, V., Pandey, R., Rao, A. S., & Abrol, Y. P. (2015). Physiological and molecular approaches for improving phosphorus uptake efficiency of crops. *Current Science*, 108(7), 1271-1279.

Elmer, P., Conn, N. (1982). Analytical methods for atomic absorption spectrophotometry. Perkin Elmer, Norwalk, CT.

Eskandarzadeh, Y., & Baghdadi, M. (1985). *Semi-detailed soil survey and classification of Qazvin province plain lands (Iran)*. Project final report, 663, Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran. (In Farsi).

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

Gonzaga, M. I. S., Santos, J. A., & Ma, L. Q. (2006). Arsenic chemistry in the rhizosphere of *Pteris vittata L.* and *Nephrolepis exaltata L. Environmental Pollution*, 143(2), 254-260.

Hammond, J. P., Broadley, M. R., White, P. J., King, G. J., Bowen, H. C., Hayden, R., & 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.

Hawkesford, M. J., & Barraclough, P. (2011). The molecular and physiological basis of nutrient use efficiency in crops: John Wiley & Sons.

Hinsinger, P. & Gilkes, R. J. (1996). Mobilization of phosphate from phosphate rock and alumina–sorbed phosphate by the roots of ryegrass and clover as related to rhizosphere pH. *European Journal of Soil Science*, 47(4), 533-544.

Keren, R., Sparks, D., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., Soltanpour, P., Tabatabai, M., Johnston, C., & Sumner, M. (1996). Boron. Methods of soil analysis. Part 3-chemical methods. 603-626.

Knight, S., Morris, N., **Goulding, K.W.T., Johnston, A. E., Poulton, P. R.,** & 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.

Korkmaz, K., & Altıntaş, Ç. (2016). Phosphorus Use Efficiency in Canola Genotypes. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, *4*(6), 424-430.

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

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

McGrath, S., Shen, Z., & Zhao, F. (1997). Heavy metal uptake and chemical changes in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi ochroleucum* grown in contaminated soils. *Plant and Soil*, 188(1), 153-159.

Moorby, H., White, R. E. & Nye, P. H. (1988). The influence of phosphate nutrition on H ion efflux from the roots of young rape plants. *Plant and Soil*, 105(2), 247-256.

Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica chimica acta*, 27, 31-36.

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

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

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.

Ozturk, L., Eker, S., Torun, B., & Cakmak, I. (2005). Variation in phosphorus efficiency among 73 bread and durum wheat genotypes grown in a phosphorus-deficient calcareous soil. *Plant and Soil*, 269(1-2), 69-80.

Pearse, S. J., Veneklaas, E. J., Cawthray, G. R., Bolland, M. D., & Lambers, H. (2006). Carboxylate release of wheat, canola and 11 grain

legume species as affected by phosphorus status. *Plant and Soil*, 288(1-2), 127-139.

Pearse, S.J., Veneklaas, E.J., Cawthray, G., Bolland, M.D. & Lambers, H. (2007). Carboxylate composition of root exudates does not relate consistently to a crop species ability to use phosphorus from aluminium, iron or calcium phosphate sources. *New Phytologist*, 173(1), 181-190.

Raghothama, K., & Karthikeyan, A. (2005). *Phosphate acquisition, Root Physiology: from Gene to Function* (pp. 37-49): Springer.

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

Rose, T. J., Rengel Z., Ma, Q., & 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.

Rose, T. J., & 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.

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

Self-Davis, M.L., Moore Jr, P.A. & Joern, B.C. (2000). Determination of water and / or dilute salt-extractable phosphorus. In: *Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals and waters*. Southern Cooperative Series Bulletin no. 396 (ed. G.M. Pierzynski), pp. 24–26. North Carolina State University, Raleigh, NC.

Sepehr, E., Malakouti, M.J., Kholdebarin, B., Samadi, A. and Karimian, N. (2012). Genotypic variation in P efficiency of selected Iranian cereals in greenhouse experiment. *International Journal of Plant Production*, 3(3), 17-28.

Shi, T., Zhao, D., Li, D., Wang, N., Meng, J., Xu, F., & Shi, L. (2012). Brassica napus root mutants insensitive to exogenous cytokinin show phosphorus efficiency. *Plant and Soil*, 358(1), 61-74.

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

Tehrani, M. M., Balali, M. R., Moshiri, F., & Daryashenas, A. (2012). Recommendation and the estimation of mineral fertilizers in Iran: Challenges and Solutions. *Research of soil*, 26(2), 123-144. (In farsi)

Tiessen, H. (2008). Phosphorus in the global environment In: P.J. White, & J.P. Hammond (eds.) *The eco-physiology of plant phosphorus interactions*. Dordrecht, The Netherlands (pp. 1-7): Springer.

Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New phytologist*, 157(3), 423-447.

Walinga, I., Van Vark, W., Houba, V., & Van der Lee, J. (1989*). Soil and plant analysis*. Wageningen Agric. Univ. Wageningen, The Netherlands.

Zhang, H., Huang, Y., Ye, X., Shi, L., & 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.

Zhang, H. W., Huang, Y., Xiang-Sheng, Y., & 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.