doi: 10.22124/cr.2020.14930.1532

دانشگاه گیلان
دانشکده علوم کشاورزی

تحقیقات غلات

دوره نهم/ شماره چهارم/ زمستان ۱۳۹۸ (۳۹۹-۳۸۵)

کارایی لاین‌های خالص ذرت (*Zea mays* L.) از لحاظ جذب و مصرف فسفر خاک

مریم رزمجو[۱]، رضا درویش‌زاده[۲]*، هادی علی‌پور[۳] و ابراهیم سپهر[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۲

چکیده

فسفر بعد از نیتروژن مهم‌ترین عنصر غذایی ضروری مورد نیاز گیاه است و مهم‌ترین نقش را در تولید و انتقال انرژی دارد. در این آزمایش، کارایی جذب و مصرف فسفر در ۹۳ لاین خالص ذرت تحت دو شرایط بهینه و کمبود فسفر قابلِ استفاده بر اساس طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلدانی ارزیابی شد. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که لاین‌های ذرت از لحاظ وزن خشک شاخساره، مقدار و غلظت فسفر کل، شاخص پاسخ به کود، شاخص کارایی جذب فسفر، شاخص کارایی مصرف فسفر و شاخص کارایی فسفر تفاوت معنی‌داری داشتند. شاخص کودپذیری لاین‌های ذرت از ۱۳ تا ۲۲۳/۶۷ گرم متغیر و میانگین آن ۷۰/۳۹ گرم بود. شاخص کارایی جذب فسفر در لاین‌های مورد مطالعه از ۰/۱۱ تا ۰/۸۵ و میانگین آن ۰/۴۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. شاخص کارایی مصرف فسفر نیز از ۱/۱۰ تا ۴/۶۵ گرم ماده خشک بر میلی‌گرم فسفر متغیر بود و میانگین آن تحت شرایط بهینه و کمبود فسفر به‌ترتیب ۰/۹۷و ۱/۸۹ گرم محاسبه شد. دامنه تغییرات شاخص کارایی فسفر نیز بین ۰/۴۰ تا ۰/۹۵ درصد و میانگین آن ۰/۷۱ بود. بر اساس شاخص‌های ارزیابی شده تحت شرایط کمبود فسفر خاک، لاین‌های ۱، ۹، ۱۰ و ۲۶ به‌عنوان لاین‌های فسفر-کارا و لاین‌های ۶۵، ۴۶، ۴۹ و ۷۹ به‌عنوان لاین‌های فسفر-ناکارا معرفی می‌شوند. لاین‌های فسفر-کارای معرفی شده در این تحقیق می‌توانند جهت تولید ارقام فسفر-کارا در برنامه‌های به‌نژادی آینده مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: تنش غیرزیستی، تنوع ژنتیکی، فسفر-کارا، کمبود فسفر

۱- دانشجوی دکتری، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- استاد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۳- استادیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۴- دانشیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
* نویسنده مسئول: r.darvishzadeh@urmia.ac.ir

مقدمه

گیاهان طی رشد خود با تنش‌های محیطی متعددی مواجه می‌شوند. هر یک از این تنش‌ها می‌توانند بسته به میزان حساسیت و مرحله رشد گونه گیاهی، آثار متفاوتی بر رشد، متابولیسم و عملکرد آن داشته باشند (Heidari, 2006). فسفر یکی از ۱۷ عنصر غذایی ضروری برای رشد گیاهان محسوب می‌شود (Hawkesford and Barraclough, 2011) که در غلظت‌های خیلی کم در محلول خاک وجود دارد و جذب آن توسط گیاه منجر به کاهش بیش‌تر این عنصر در ناحیه نزدیک به ریشه می‌شود (Bhattacharyya *et al.*, 2003). این عنصر بعد از نیتروژن مهم‌ترین عنصر غذایی مورد نیاز گیاه است و نقش آن در گیاهان قابل جایگزین با عناصر دیگر نیست (Hawkesford *et al.*, 2012; Elanchezhian *et al.*, 2015). فلتچر و همکاران (Fletcher *et al.*, 2008) گزارش دادند که در بیش از ۳۰ درصد از مناطق دنیا کمبود فسفر موجب محدودیت کشت محصولات می‌شود. امروزه توانایی ژنوتیپ‌های مختلف گیاهی در جذب و مصرف عناصر غذایی توسط محققین بسیاری مورد توجه قرار گرفته است. تفاوت کارایی ژنوتیپ‌ها در استفاده از عناصر غذایی به ساختار و عمل ریشه‌ها، طریقه مصرف توسط گیاه و یا هر دو بستگی دارد و اهمیت نسبی این راهکارها بسته به نوع عنصر و نوع گونه گیاه متفاوت است (Marschner, 1998).

گاهونیا و نیلسن (Gahoonia and Nielsen, 1996) عقیده دارند که از نقطه نظر تغذیه گیاهی، ژنوتیپ کارا در جذب فسفر (Phosphorous efficient) ژنوتیپی است که بتواند فسفر خاک را بیش‌تر محلول و جذب و یا بتواند از فسفر جذب شده برای تولید محصول به‌نحو مطلوب استفاده کند. باتن (Batten, 1992) اصلاح و توسعه ژنوتیپ‌های فسفر-کارا را یک جزء مکمل و حتی جایگزین برای مصرف کودها در کشاورزی بیان کرد. ازتورک و همکاران (Ozturk *et al.*, 2005) اظهار داشتند که جذب فسفر یک عامل مهم در فسفر-کارایی است. آن‌ها 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 فسفر-کارایی باشند. هورست و همکاران (Horst *et al.*, 1993) در مقایسه فسفر-کارایی بین یک رقم جدید گندم با یک رقم بومی دریافتند که رقم جدید هم در حالت ناکافی و هم در حالت کفایت فسفر، عملکرد بالایی داشت و کاراتر از رقم بومی بود. آن‌ها کارایی رقم جدید را متاثر از سه عامل مورفولوژی ریشه، جابجایی مجدد فسفر و مصرف بهینه فسفر در داخل گیاه بیان کردند.

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری کارایی جذب و مصرف فسفر در منابع ذکر شده است (Hammond *et al.*, 2009). مسئله کلیدی در ارزیابی فسفر-کارایی، انتخاب شاخص مناسب ارزیابی است (Zhang *et al.*, 2008). با توجه به اهمیت ژنوتیپ‌های کارا در جذب عناصر غذایی به‌ویژه فسفر و تحقیقات اندک در ایران، این آزمایش جهت بررسی کارایی لاین‌های مختلف ذرت در جذب و مصرف فسفر خاک تحت دو شرایط کمبود و بهینه فسفر با شاخص‌های مختف انجام شد.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی این تحقیق شامل ۹۳ لاین خالص ذرت بود که از دانشگاه رازی کرمانشاه، مرکز تحقیقات کشاورزی خراسان رضوی و موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شدند. لاین‌ها تحت دو شرایط بهینه (فراهمی) و کمبود فسفر قابلِ استفاده در شرایط گلدانی و در فضای باز در دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ ارزیابی شدند. دلیل انتخاب این نوع طرح یکنواختی شرایط و ماده آزمایشی بود. بر اساس نتایج تجزیه خاک، خاک با میزان فسفر پایین (۷/۲۴ mg/kg) (Shahbazi and Besharati, 2013) انتخاب شد (جدول ۱). خاک مورد آزمایش از منطقه خان‌ارخی دانشگاه ارومیه با طول جغرافیایی ۴۵/۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷/۳۲ دقیقه شمالی با ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا و از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری برداشت شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش در جدول ۱ ارایه شده است.

جهت اجرای آزمایش، تعداد ۶۰۰ گلدان ۱۵ کیلویی تهیه و به دو دسته ۳۰۰ تایی تقسیم شدند. در هر دو دسته، گلدان‌ها با خاک با میزان فسفر پایین و ماسه به نسبت دو به یک پر شدند. خاک با میزان فسفر پایین قبل از استفاده با کودهای نیتروژن به مقدار ۰/۶ g/kg (طی سه مرحله طی دوره رشد)، سولفات پتاسیم به مقدار ۰/۹ g/kg، سکوسترین آهن به مقدار ۰/۱ g/kg، سولفات منگنز

به مقدار g/kg ۰/۰۱۵، سولفات روی به مقدار g/kg ۰/۰۶۶، سولفات مس به مقدار g/kg ۰/۰۲و اسیدبوریک به مقدار g/kg ۰/۰۱۴، تقویت شد. در دسته اول (۳۰۰ گلدان اول) به خاک با میزان فسفر پایین علاوه بر کودهای گفته شده، کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل به مقدار g/kg ۰/۴ اضافه شد، در حالی‌که به دسته دوم (۳۰۰ گلدان دوم) کود فسفر اضافه نشد. فاصله دو ردیف گلدان از هم ۵۰ سانتی‌متر و فاصله گلدان‌ها از هم در روی ردیف ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در هر گلدان چهار عدد بذر ذرت کشت شد. در روزهای ابتدایی آزمایش، آبیاری گلدان‌ها به‌وسیله آب‌پاش هر سه روز یک‌بار انجام شد، ولی بعد از جوانه‌زدن بذرها و مشاهده گیاهچه‌ها (سبز شدن مزرعه) و مصادف شدن گیاهان با فصل گرما، آبیاری به‌صورت روزانه با سامانه آبیاری قطره‌ای انجام گرفت. پس از سبز شدن گیاهچه‌ها و در مرحله چهار برگی، دو گیاه در هر گلدان نگهداری شد. مبارزه با علف‌های هرز به‌صورت مکانیکی و با توجه به نیاز انجام گرفت.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Physical and chemical properties of the soil used in the experiment

Parameter†	Organic carbon	Lime	Clay	Sand	Silt	Soil texture	pH	EC (dS/m)
	Percent (%)							
Content	0.74	31.5	40	30	30	Clay loam	7.92	0.78

†: EC, electrical conductivity; pH, acidity; Zn, zinc; Fe, iron; Mn, magnesium; Cu, copper; P, phosphorus; K, potassium; mg/kg, milligrams per kilogram; dS/m, deci-Siemens per meter.

جدول ۱- ادامه

Table 1. Continued

Parameter†	Organic matter (%)	Zn	Fe	Mn	Cu	P	K
		mg/kg					
Content	1.28	0.11	11	10.3	1.3	7.24	102

†: EC, electrical conductivity; pH, acidity; Zn, zinc; Fe, iron; Mn, magnesium; Cu, copper; P, phosphorus; K, potassium; mg/kg, milligrams per kilogram; dS/m, deci-Siemens per meter.

پس از طی دوره رشد (رشد کامل)، بوته‌ها برداشت و اندام هوایی در آون با دمای ۷۲ درجه سلسیوس طی مدت ۴۸ ساعت خشک شد. پس از آسیاب کردن بخش هوایی، غلظت فسفر به‌وش کالری‌متری (رنگ زرد مولیبدات وانادات) وسترمن (Westerman, 1990) توسط دستگاه اسپکتوفتومتر با طول موج ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. با استفاده از داده‌های به‌دست آمده، شاخص پاسخ به کود (کودپذیری) و دیگر شاخص‌های کارایی فسفر بر اساس روابط (۱) تا (۷) محاسبه شدند:

۱- شاخص پاسخ به کود (کودپذیری): از اختلاف وزن خشک شاخساره در شرایط فراهمی فسفر (SDW_{PS}) و مقدار آن در شرایط محدودیت فسفر (SDW_{PD}) محاسبه شد (Williams, 2000; Gunes *et al.*, 2006):

$$FR = SDW_{PS} - SDW_{PD} \quad (۱)$$

۲- فسفر کل جذب‌شده (TP): که از حاصل‌ضرب غلظت فسفر (PC) در وزن خشک شاخساره (SDW) محاسبه شد (Ozturk *et al.*, 2005):

$$TP = SDW \times PC \quad (۲)$$

۳- شاخص کارایی جذب فسفر (PACE): برای حذف نقش زمینه ژنتیکی لاین‌ها در میزان فسفر جذب‌شده از اصطلاح جذب نسبی فسفر به‌عنوان شاخص کارایی جذب فسفر استفاده و نسبت فسفر کل در شرایط محدودیت فسفر (TP_{PD}) به میزان آن در شرایط فراهمی فسفر (TP_{PS}) محاسبه شد (Sepehr *et al.*, 2009b):

$$PACE = \frac{TP_{PD}}{TP_{PS}} \quad (۳)$$

۴- کارایی مصرف فسفر (PUTE): بیانگر تولید ماده خشک به‌ازای یک واحد فسفر جذب‌شده است و از نسبت وزن خشک شاخساره (SDW) به فسفر کل جذب‌شده برآورد شد (Bridgham *et al.*, 1995):

$$PUTE = \frac{SDW}{TP} \quad (۴)$$

۵- کارایی فسفر (PE): از نسبت ماده خشک ژنوتیپ‌ها در شرایط محدودیت فسفر (SDW_{PD}) به میزان آن در شرایط فراهمی فسفر (SDW_{PS}) به‌دست آمد (Ozturk *et al.*, 2005):

$$PE = \frac{SDW_{PD}}{SDW_{PS}} \quad (۵)$$

۶- کارایی محاسبه‌شده فسفر (CPE): از حاصل‌ضرب کارایی جذب و مصرف فسفر محاسبه شد (Sepehr *et al.*, 2009b):

$$CPE = PACE \times PUTE \quad (۶)$$

۷- کارایی فیزیولوژیک فسفر (PPE): از نسبت تفاوت ماده خشک در تیمار حاوی کود (DM_{FT}) و شاهد (DM_{CT}) به تفاوت فسفر جذب شده در تیمار حاوی کود (TP_{FT}) و شاهد (TP_{CT}) بر حسب گرم بر کیلوگرم (رابطه ۷) محاسبه شد (Abbasi *et al.*, 2010):

$$PPE = \frac{DM_{FT} - DM_{CT}}{TP_{FT} - TP_{CT}} \quad (۷)$$

زیاد بودن مقدار عددی این شاخص‌ها حالت مطلوب می‌باشد. تجزیه آماری داده‌های به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۲ انجام شد و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون LSD استفاده شد. ضریب همبستگی نیز با استفاده از نرم‌افزار R نسخه ۳/۶/۰ محاسبه شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد بین لاین‌های ذرت از لحاظ شاخص‌های مختلف فسفرکارایی اختلاف آماری معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد وجود دارد (جدول‌های ۲ و ۳). ضریب تغییرات (محیطی) در جدول تجزیه واریانس بین ۱۱/۱۴ تا ۵۹/۶۱ متغیر بود. هر چند بالا بودن مقدار ضریب تغییرات به مفهوم پایین بودن دقت آزمایش است ($CV = \frac{\sqrt[2]{MS_E}}{\overline{X}_{..}} \times 100$)، ولی درصورتی که اثر عوامل (تیمارها) در جدول تجزیه واریانس بسیار معنی‌دار باشد، نیازی به اجزای مجدد آزمایش نیست چون در این شرایط تفاوت بین سطوح عوامل آنقدر زیاد است که با وجود بالا بودن خطای آزمایشی، اختلاف‌ها باز هم معنی‌دار خواهند شد. از طرف دیگر، مقدار ضریب تغییرات بستگی به ماهیت صفات دارد و صفاتی که توسط تعداد زیادی ژن کنترل می‌شوند (صفات کمی یا صفات چندژنی)، بیش‌تر تحت تاثیر محیط قرار می‌گیرند و در نتیجه ممکن است ضریب تغییرات بالایی داشته باشند.

جدول ۲- تجزیه واریانس کارایی فیزیولوژیک فسفر و غلظت فسفر، وزن خشک شاخساره و فسفر کل جذب‌شده تحت شرایط بهینه و کمبود فسفر در ذرت

Table 2. Analysis of variance of phosphorous physiological efficiency as well as phosphorus concentration, shoot dry weight and total phosphorus under phosphorus sufficient and deficiency conditions in maize

Source of variations	df	Mean squares						
		Phosphorus concentration		Shoot dry weight		Total phosphorus		Physiological efficiency
		Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	
Line	92	0.0492**	0.0500**	25136.5**	14183.4**	41748.6**	5477.40**	0.0956*
Error	186	0.0140	0.0193	1740/28	708.82	6519.24	732.78	0.0705
CV (%)	-	11.39	23.50	17.50	15.86	30.52	27.72	39.22

* and **: Significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۳- تجزیه واریانس شاخص‌های کارایی جذب فسفر، کارایی مصرف فسفر، کارایی فسفر، کارایی محاسبه شده فسفر و پاسخ به کود (کود پذیری) تحت شرایط بهینه و کمبود فسفر در ذرت

Table 3. Analysis of variance of phosphorus acquisition efficiency, phosphorus utilization efficiency, phosphorus efficiency, calculated phosphorus efficiency and fertilizer response under phosphorus sufficient and phosphorus deficient conditions in maize

Source of variations	df	Mean squares					
		Phosphorus utilization efficiency		Phosphorus adsorption efficiency	Phosphorus efficiency	Calculated phosphorus efficiency	Fertilizer response
		Normal	Stress				
Line	92	0.0368**	0.112**	0.0605**	0.0425**	0.119**	5248.1**
Error	186	0.0118	0.0409	0.0283	0.0119	0.0493	1761.4
CV%	-	11.14	14.96	40.62	19.74	31.55	59.61

* and **: Significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

غلظت فسفر و مقدار فسفر در بخش هوایی گیاه

غلظت فسفر در شرایط بهینه از ۰/۶۴ میلی‌گرم در گرم ماده خشک در لاین شماره ۳۲ تا ۱/۹۱ میلی‌گرم در گرم ماده خشک در لاین شماره ۸۰ متغیر بود. کم‌ترین و بیش‌ترین غلظت فسفر در شرایط کمبود فسفر، به‌ترتیب در لاین شماره ۵۳ با مقدار ۰/۲۳ میلی‌گرم در گرم ماده خشک و لاین شماره ۱۲۰ با مقدار ۰/۹۰ میلی‌گرم در گرم ماده خشک مشاهده شد. میانگین غلظت فسفر نیز در لاین‌های ذرت در شرایط کمبود و بهینه به‌ترتیب برابر با ۰/۵۹ و ۱/۱۱ میلی‌گرم در گرم ماده خشک بود (جدول ۴). مقایسه دو شرایط نشان داد که میانگین غلظت فسفر بخش هوایی در شرایط بهینه تقریباً دو برابر مقدار آن در شرایط کمبود فسفر بود. بیش‌ترین میزان فسفر کل جذب شده در شرایط کمبود فسفر در لاین‌های ۱۱، ۹، ۶۴، ۲۶ و ۱۰ به‌ترتیب با ۲۳۶/۴۴، ۲۲۰/۳۶، ۱۷۵/۲۲، ۱۷۴/۲۳ و ۱۷۲/۰۹ میلی‌گرم در گلدان و کم‌ترین میزان در لاین‌های ۷۹، ۳۸، ۴۶ و ۴۹ به‌ترتیب با ۲۰/۴۲، ۳۱/۶۵، ۳۶/۲۹ و ۳۹/۳۱ میلی‌گرم در گلدان مشاهده شد. تحت شرایط فراهمی فسفر، بیش‌ترین میزان فسفر کل جذب شده به‌ترتیب با ۶۵۰، ۶۰۹/۹۷، ۵۸۱/۶۳، ۵۷۴/۸۴، ۵۳۵/۰۲ و ۵۱۰/۵۳ در لاین‌های ۲، ۷، ۶۴، ۱۱، ۱۳ و ۸۰ و کم‌ترین میزان با ۱۰۶/۶۵، ۱۰۹/۳۹، ۱۰۹/۹۸ و ۱۱۱/۵۳ میلی‌گرم در گلدان در لاین‌های ۳۸، ۱۰۶، ۳۲ و ۳۴ به‌ترتیب مشاهده شد. به‌طور کلی، میانگین جذب فسفر در شرایط کمبود فسفر ۹۷/۶۳ میلی‌گرم در گلدان بود که با مصرف فسفر به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و به مقدار ۲۶۴/۵۳ میلی‌رم در گلدان رسید (جدول ۴).

ازتورک و همکاران (Ozturk *et al.*, 2005) مشاهده کردند که در حالت محدودیت فسفر، غلظت فسفر شاخساره ارقام گندم نان و دوروم ۵۰ درصد کاهش یافت. سپهر و همکاران (Sepehr *et al.*, 2009a) نیز در بررسی کارایی ارقام مختلف غلات از لحاظ جذب فسفر، مشاهده کردند که در شرایط بدون مصرف فسفر در گیاه، میانگین غلظت فسفر ۰/۱۹ بود که با مصرف فسفر به ۰/۴۷ رسید. سپهر و همکاران (Sepehr *et al.*, 2009b) با بررسی غلظت فسفر شاخساره غلات مختلف در خاک‌های آهکی مشاهده کردند که غلظت فسفر شاخساره غلات در شرایط محدودیت فسفر ۲/۲-۱/۲ میلی‌گرم بر گرم ماده خشک و در شرایط فراهمی فسفر بین ۵-۴ میلی‌گرم بر گرم ماده خشک بود. مانسک و همکاران (Manske *et al.*, 2000) در گندم در CIMMYT کارایی جذب را مهم‌تر از کارایی مصرف گزارش کردند. لیاو و همکاران (Liao *et al.*, 2008) نیز نشان دادند که در حالت محدودیت فسفر، غلظت فسفر شاخساره ارقام مختلف گندم زیر غلظت بحرانی فسفر شاخساره بود.

وزن خشک شاخساره (عملکرد اندام هوایی)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین لاین‌های ذرت از لحاظ وزن خشک شاخساره اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد وجود داشت. بیش‌ترین و کم‌ترین میزان ماده خشک در شرایط بهینه مربوط به لاین‌های ۱۰ (از کرمانشاه) با ۴۸۹/۳۳ گرم در گلدان و ۷۹ (از مشهد) با ۱۰۴/۳۳ گرم در گلدان بود. تحت شرایط کمبود فسفر، بیش‌ترین مقدار وزن خشک شاخساره در لاین‌های ۱۰ (از کرمانشاه) با ۳۵۴/۶۷ و ۱ (از کرمانشاه) با ۳۲۴ گرم در گلدان و کم‌ترین مقدار در لاین ۶۵ (از کرج) با ۵۸/۵۰ گرم در گلدان مشاهده شد (جدول ۴). میانگین وزن خشک شاخساره ۱۶۷/۸۶ گرم در گلدان بود که با مصرف کود فسفر به ۲۳۸/۲۶ گرم در گلدان رسید. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که با اضافه کردن کود فسفر به خاک، عملکرد اندام هوایی افزایش یافت.

بالمی (Balemi, 2009) گزارش داد که کاهش فرآیندهای وابسته به فتوسنتز یا کاهش تغییر و تبدیلات موثر در فرآیند گرفتن نور منجر به کاهش عملکرد بخش هوایی ارقام در حالت کمبود فسفر می‌شود. گانز و همکاران (Gunes *et al.*, 2006)، ازتورک و همکاران (Ozturk *et al.*, 2005) و اسبورن و رنگل (Osborne and Rengel, 2002) با مقایسه عملکرد شاخساره غلات در مقادیر مختلف فسفر محلول، افزایش معنی‌دار عملکرد اندام هوایی را در اثر مصرف فسفر گزارش کردند. رونقی و همکاران (Ronaghi *et al.*, 2002) نشان دادند که کاربرد فسفر تا سطح ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سبب افزایش وزن خشک قسمت هوایی ذرت شد. باگایوکو و همکاران (Bagayoko *et al.*, 2000) عقیده دارند که گیاه ذرت با تشکیل یک سیستم ریشه‌ای گسترده به خوبی در برابر شرایط کمبود عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و زیادی آلومینیوم مقاومت می‌کند. برگ و همکاران (Berg *et al.*, 2005) گزارش کردند که کاربرد فسفر عملکرد یونجه را افزایش داد. اسمیت و همکاران (Smith *et al.*, 1990) بیان داشتند که فسفر سبب افزایش

عملکرد گیاه می‌شود، زیرا با تنظیم هورمون‌های گیاهی نقش مهمی در فرآیندهای تقسیم سلولی، تولید مواد فتوسنتزی و تولید انرژی در گیاه دارد.

کارایی جذب فسفر

کارآیی جذب فسفر به معنی توانایی بیش‌تر گیاه در جذب این عنصر از خاک دارای محدودیت فسفر است. با توجه به اینکه در محاسبه میزان فسفر جذب شده، زمینه (پتانسیل) ژنتیکی لاین‌ها برای تولید محصول نقش موثری دارد، از این‌رو برای حذف اثر این عامل از شاخص کارایی جذب استفاده شد. میانگین این شاخص در لاین‌های مختلف ذرت ۰/۴۱ به‌دست آمد و از این جهت لاین‌های ۹، ۵، ۸، ۱۰۶ و ۸۳ بالاتر از میانگین و لاین‌های ۴۶، ۲، و ۷۹ پایین‌تر از میانگین بودند (جدول ۵). لاین‌هایی که دارای کارایی جذب فسفر بالا باشند، به‌عنوان لاین‌های فسفر-کارا محسوب می‌شوند. بر اساس گزارش ازتورک و همکاران (Ozturk *et al.*, 2005) گیاهان فسفر-کارا برای رشد بهتر، دو مکانیسم اصلی افزایش در جذب فسفر از خاک و افزایش در مصرف فسفر را به‌کار می‌برند. مارشنر (Marschner, 1998) گزارش کرد که اختلاف ژنتیکی بین ارقام از نظر جذب فسفر مهم‌ترین عامل تعیین کننده در عنصر-کارایی است که به ویژگی‌های ریشه (مورفولوژی و فیزیولوژی) گیاه وابسته است. لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2004) بیان کردند که بالا بودن فعالیت آنزیم فسفاتاز در ریشه ارقام ذرت منجر به هیدرولیز فسفر آلی و افزایش فسفر قابل جذب در گیاهان می‌شود.

شاخص کارایی مصرف فسفر

بر اساس شاخص کارایی مصرف فسفر، لاین‌هایی که بتوانند با غلظت‌های پایین فسفر اندام هوایی، فعالیت‌های متابولیک را در بافت‌ها و اندام‌های خود طوری تنظیم کنند که وزن خشک بالایی به‌ازای هر واحد فسفر جذب شده تولید کنند، دارای کارایی مصرف بالایی هستند. تحت شرایط کمبود فسفر، شاخص کارایی مصرف فسفر بین ۱/۱۰ در لاین شماره ۱۲۰ (از کرمانشاه) تا ۴/۶۵ گرم ماده خشک بر میلی‌گرم فسفر در لاین شماره ۵۳ (از کرج) متغیر بود (جدول ۵). بر این اساس می‌توان گفت که لاین شماره ۵۳ نسبت به لاین‌های شماره ۷۹، ۱۰۹، ۴۶، ۱۱۰ دارای کارایی مصرف فسفر بالاتری بود و لاین‌های شماره ۱۲۰، ۱۱۳، ۶۵ و ۶۲ کارایی مصرف فسفر پایین‌تری داشتند. مصرف کود فسفر کاهش این شاخص را در پی داشت، به‌طوری‌که میانگین کارایی مصرف فسفر از ۱/۸۹ گرم ماده خشک بر میلی‌گرم فسفر در شرایط کمبود فسفر به ۰/۹۷ گرم ماده خشک بر میلی‌گرم فسفر در شرایط بهینه فسفر رسید. تحت شرایط کمبود فسفر، لاین‌های ۱، ۱۰، ۲۲، ۲۴، ۵۳، و ۱۰۵ بالاترین راندمان مصرف فسفر را نشان دادند.

گیل و همکاران (Gill *et al.*, 2004) با بررسی واریته‌های گندم بهاره، تفاوت‌های معنی‌داری را بین ارقام از نظر میزان جذب فسفر و کارآیی مصرف فسفر گزارش کردند. گیاهان با کارآیی بیش‌تر از نظر مصرف فسفر، ماده خشک بیش‌تری به‌ازای هر واحد فسفر جذب شده تولید می‌کنند و این نوعی سازگاری در برابر شرایط کمبود فسفر محسوب می‌شود. در تحقیقات جامی معینی و همکاران (Jami Moeini *et al.*, 2010) نیز کاهش شاخص کارآیی مصرف فسفر در اثر افزایش سطح کود استفاده شده در ارقام مختلف سیب‌زمینی گزارش شد. سپهر و همکاران (Sepehr *et al.*, 2009b) نیز گزارش کردند که با افزایش مصرف کود فسفاته در خاک‌های آهکی، کارایی مصرف فسفر در غلات از ۰/۵۵ به ۰/۲۱ کاهش یافت و ارقام جو، یولاف، چاودار و تریتیکاله، کارایی مصرف فسفر بالاتری از ارقام گندم نان و دوروم داشتند. موسوی و همکاران (Musavi and Sepehr, 2013) نیز کاهش معنی‌داری در کارایی مصرف فسفر ارقام جو بعد از تلقیح با ریزجاندران حل‌کننده فسفات گزارش کردند. این کاهش نشان می‌دهد که گیاه تحت شرایط محدودیت و تنش، مسیر سازگاری را انتخاب می‌کند و به‌عبارت دیگر، با افزایش فراهمی فسفر در محیط رشد گیاه، اگرچه جذب فسفر توسط گیاه افزایش می‌یابد، اما گیاه ماده خشک کم‌تری به‌ازای هر واحد فسفر جذب‌شده تولید می‌کند. فاگریا و همکاران (Fageria *et al.*, 1998) نیز گزارش دادند که با مصرف کود فسفره، کارایی مصرف فسفر در ارقام برنج به‌طور معنی‌داری کاهش یافت.

جدول ۴- غلظت فسفر، وزن خشک شاخساره، فسفر کل جذب‌شده و کارایی فیزیولوژیک فسفر در لاین‌های ذرت

Table 4. Phosphorus concentration, shoot dry matter, total absorbed phosphorus and physiological efficiency of phosphorous in different maize lines

Code	Origin	Phosphorus concentration (mg/g DW)		Shoot dry matter (g/pot)		Total absorbed phosphorus (mg/pot)		Physiological efficiency
		Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	
1	Kermanshah	0.69	0.50	415.33	324.00	286.53	159.02	0.72
2	Kermanshah	1.47	0.43	436.00	212.33	650.00	89.96	0.40
3	Mashhad	0.89	0.51	297.33	198.33	262.21	98.15	0.60
4	Mashhad	0.93	0.62	345.67	220.67	310.62	135.31	0.71
5	Mashhad	0.92	0.69	272.00	245.23	244.07	170.92	0.37
6	Mashhad	0.92	0.60	328.67	275.23	304.29	163.72	0.38
7	Mashhad	1.54	0.66	390.33	241.13	609.97	159.96	0.33
8	Mashhad	0.82	0.66	270.33	241.00	222.74	160.00	0.47
9	Mashhad	0.81	0.73	323.67	305.33	260.02	220.36	0.46
10	Kermanshah	0.83	0.49	489.33	354.67	408.01	172.09	0.57
11	Kermanshah	1.24	0.77	469.33	308.67	574.84	236.44	0.47
12	Kermanshah	0.97	0.53	352.67	275.00	341.75	147.39	0.40
13	Kermanshah	1.19	0.56	448.00	304.00	535.02	170.36	0.39
14	Kermanshah	1.01	0.44	265.33	201.67	269.38	88.36	0.35
15	Kermanshah	0.86	0.54	321.00	170.00	279.56	91.30	0.80
16	Kermanshah	0.85	0.61	183.33	145.00	155.86	89.80	0.58
17	Kermanshah	0.79	0.57	226.00	159.00	180.88	87.43	0.72
18	Kermanshah	0.88	0.62	227.23	164.00	203.38	104.56	0.64
19	Kermanshah	0.93	0.72	313.33	205.67	295.01	145.62	0.72
20	Kermanshah	1.05	0.55	253.67	227.43	269.12	126.56	0.18
21	Kermanshah	1.07	0.58	450.00	269.67	479.51	156.21	0.56
22	Kermanshah	1.27	0.45	359.67	319.00	465.24	138.10	0.12
23	Kermanshah	1.20	0.46	294.33	235.33	347.74	108.36	0.25
24	Kermanshah	0.91	0.34	382.67	213.33	349.92	71.26	0.61
25	Kermanshah	1.31	0.57	356.33	281.80	462.79	158.82	0.25
26	Kermanshah	0.81	0.67	341.33	258.57	275.75	174.23	0.82
27	Kermanshah	0.98	0.67	374.33	265.00	363.07	171.98	0.57
28	Kermanshah	0.90	0.69	392.00	206.80	343.44	141.32	0.92
30	Kermanshah	1.86	0.67	214.67	137.67	396.58	91.88	0.25
31	Kermanshah	0.99	0.65	155.00	106.33	160.00	70.26	0.54
32	Kermanshah	0.65	0.49	172.67	98.67	109.98	46.98	1.17
33	Kermanshah	0.91	0.62	182.33	119.67	165.33	72.59	0.68
34	Kermanshah	0.88	0.70	126.00	101.33	111.53	72.36	0.63
35	Kermanshah	1.59	0.68	197.00	125.67	311.21	83.33	0.31
36	Kermanshah	1.18	0.47	248.33	148.67	290.28	69.86	0.45
37	Kermanshah	0.95	0.55	194.67	126.33	187.04	69.76	0.58
38	Kermanshah	0.93	0.43	113.67	72.67	106.65	31.65	0.55
39	Kermanshah	1.28	0.74	180.67	139.33	238.87	100.31	0.30
40	Kermanshah	1.05	0.56	178.33	131.33	179.20	76.44	0.46
42	Kermanshah	1.21	0.67	146.67	88.67	183.54	57.78	0.46
43	Kermanshah	0.84	0.62	182.67	147.33	150.44	95.13	0.64
44	Kermanshah	0.95	0.58	203.00	189.33	194.88	110.17	0.16
45	Kermanshah	1.53	0.61	158.00	131.67	242.30	80.78	0.16
46	Karaj	1.86	0.32	191.00	118.00	354.35	36.29	0.23
48	Karaj	1.04	0.73	167.67	127.00	173.60	93.64	0.51
49	Karaj	0.94	0.60	182.00	67.00	165.70	39.31	0.91
50	Karaj	1.34	0.65	130.33	71.33	180.78	46.21	0.44
51	Karaj	1.74	0.67	145.33	83.00	252.11	56.03	0.32
52	Karaj	1.03	0.64	175.67	140.67	190.56	86.19	0.34
53	Karaj	0.84	0.24	297.10	217.33	250.24	53.25	0.40
54	Karaj	1.87	0.80	158.33	123.00	294.81	100.77	0.18
55	Karaj	0.81	0.68	167.33	79.67	138.62	53.70	1.03
57	Karaj	1.30	0.72	167.33	117.67	221.82	86.76	0.37
60	Kermanshah	1.25	0.53	273.33	195.33	349.49	102.62	0.32

Table 4. Continued

جدول ۴- ادامه

Code	Origin	Phosphorus concentration (mg/g DW)		Shoot dry matter (g/pot)		Total absorbed phosphorus (mg/pot)		Physiological efficiency
		Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	
62	Karaj	0.99	0.77	168.33	133.67	166.06	102.14	0.54
64	Karaj	1.53	0.68	376.87	255.33	581.63	175.22	0.30
65	Karaj	1.41	0.77	122.67	58.50	173.58	44.88	0.50
66	Karaj	1.02	0.62	240.33	173.00	245.16	103.57	0.48
72	Karaj	1.11	0.68	178.33	73.17	196.83	50.17	0.72
73	Karaj	1.42	0.64	275.00	195.00	396.43	123.60	0.29
74	Karaj	1.19	0.47	203.80	119.57	244.30	54.06	0.44
75	Mashhad	0.88	0.42	139.00	97.67	123.38	42.27	0.51
76	Kermanshah	1.06	0.71	233.00	189.00	248.07	135.69	0.39
77	Mashhad	1.40	0.65	191.33	125.67	276.33	81.92	0.34
79	Mashhad	1.44	0.34	104.33	60.00	159.07	20.42	0.32
80	Mashhad	1.91	0.56	265.67	181.00	510.53	100.86	0.21
83	Mashhad	1.18	0.74	181.00	152.33	208.25	112.95	0.30
85	Mashhad	1.12	0.68	141.00	117.00	154.27	78.54	0.32
89	Mashhad	1.17	0.64	179.33	126.00	203.75	79.39	0.43
91	Mashhad	1.75	0.59	176.67	163.67	309.11	96.25	0.06
96	Kermanshah	1.30	0.59	158.33	109.00	210.53	63.39	0.34
98	Mashhad	1.07	0.69	137.00	61.67	151.20	42.54	0.69
100	Mashhad	1.21	0.77	146.67	116.00	178.90	87.73	0.34
104	Mashhad	1.05	0.50	263.00	207.33	278.52	102.86	0.32
105	Mashhad	1.07	0.32	227.33	203.33	245.01	65.26	0.13
106	Mashhad	0.87	0.70	126.00	110.67	109.39	76.24	0.46
107	Kermanshah	0.86	0.51	164.67	111.67	147.40	57.99	0.59
108	Mashhad	0.88	0.67	173.67	117.33	153.53	77.98	0.75
109	Mashhad	1.06	0.48	210.33	165.33	220.11	81.06	0.32
110	Mashhad	0.88	0.35	187.67	147.00	162.72	53.65	0.37
111	Mashhad	1.01	0.40	227.67	168.00	231.49	65.25	0.36
112	Mashhad	0.98	0.42	235.00	198.00	231.81	85.17	0.25
113	Mashhad	0.97	0.84	214.90	121.00	207.66	101.15	0.88
114	Mashhad	0.81	0.33	250.67	148.33	203.18	50.22	0.67
115	Kermanshah	0.89	0.62	173.67	142.33	157.36	88.47	0.45
116	Mashhad	1.27	0.43	279.23	220.33	343.62	94.96	0.24
117	Mashhad	1.43	0.73	161.33	82.67	239.61	59.46	0.44
118	Mashhad	0.94	0.58	178.67	126.00	168.64	74.99	0.56
119	Mashhad	1.49	0.61	254.67	179.67	380.83	111.09	0.28
120	Kermanshah	1.27	0.91	155.67	100.67	200.21	91.20	0.50
121	Mashhad	1.03	0.64	250.33	154.00	257.32	98.27	0.61
122	Mashhad	1.24	0.69	311.67	189.67	381.02	131.03	0.49
123	Mashhad	0.94	0.53	205.23	178.33	194.68	96.21	0.27
Mean	-	1.11	0.59	238.26	167.86	264.53	97.63	0.46
$LSD_{5\%}$	-	0.41	-	67.19	-	130.06	-	-
CV (%)	-	11.39	-	17.50	-	30.52	-	-

نتایج حاصل از تجزیه واریانس صفت کارایی فیزیولوژیک فسفر نشان داد که اختلاف بین لاین‌ها برای این شاخص در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۴) نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین کارایی فیزیولوژیک فسفر مربوط به لاین‌های ۳۲ و ۲۲ به‌ترتیب با ۱/۱۷ و ۰/۱۲ گرم ماده خشک به‌ازای هر میلی‌گرم جذب فسفر کودی بود. کارایی فیزیولوژیک نشان می‌دهد که گیاه چقدر می‌تواند متناسب با میزان فسفر جذب کرده، ماده خشک تولید کند. عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2010) همبستگی بین عملکرد ماده خشک و کارایی فیزیولوژیک نیتروژن را مثبت گزارش کردند. میرزاخانی (Mirzakhani, 2009) با بررسی سطوح مختلف مصرف نیتروژن و فسفر در گلرنگ، اظهار داشت که بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار کارایی

فیزیولوژیک فسفر، با میانگین ۱۷۵/۲ و صفر کیلوگرم دانه تولید شده به کیلوگرم فسفر مصرف شده به‌ترتیب مربوط به تیمارهای مصرف ۱۵۹ کیلوگرم نیتروژن + ۷۵ کیلوگرم فسفر و تیمار شاهد (عدم مصرف کود) بود.

شاخص کارایی فسفر

در این تحقیق بر اساس مطالعات قبلی (Rengel, 1999; Ozturk *et al.*, 2005; Sepehr *et al.*, 2009b) از مقدار نسبی ماده خشک اندام هوایی به‌عنوان شاخص کارایی فسفر استفاده شد. نتایج این آزمایش نشان داد که متوسط شاخص کارایی فسفر در لاین‌های ذرت بررسی شده ۰/۷۱ بود و لاین‌های ۹ و ۴۴ به‌ترتیب با ۰/۹۴ و ۰/۹۳ درصد، بالاترین شاخص کارایی فسفر و لاین‌های ۴۹ و ۷۲ با ۰/۴۰ و ۰/۴۳ درصد، پایین‌ترین شاخص کارایی فسفر را داشتند (جدول ۵). ازتورک و همکاران (Ozturk *et al.*, 2005) ژنوتیپ‌های مختلف گندم نان و دوروم را از نظر شاخص کارایی فسفر در یک خاک آهکی دارای کمبود فسفر بررسی کردند و کارایی جذب را مهم‌ترین مکانیسم موثر در تفاوت کارایی فسفر ارقام مورد مطالعه گزارش کردند. این پژوهشگران از عملکرد نسبی اندام هوایی به‌عنوان شاخص کارایی فسفر استفاده کردند و نشان دادند که پارامترهای غلظت کل فسفر در گیاه و عملکرد شاخساره در حالت کمبود فسفر می‌توانند به‌عنوان شاخص قابل اطمینانی برای ارزیابی کارایی فسفر باشند. پان ون و همکاران (Pan *et al.*, 2008) با بررسی پارامترهای مرفولوژیک و فیزیولوژیک ۹۶ رقم سویا نشان دادند که عملکرد خشک اندام هوایی در حالت کمبود فسفر (SDW) و عملکرد نسبی خشک اندام هوایی (Relative Shoot Dry Weight) از عامل‌های ساده و مؤثر برای بررسی فسفر کارایی ارقام مختلف سویا هستند. آن‌ها بیان کردند که کارایی فسفر سویا کمیت پیچیده‌ای است که برای ارزیابی آن باید پارامترهای مرفولوژیک و فیزیولوژیک ریشه به‌صورت گسترده در دو حالت کمبود و کفایت فسفر بررسی شوند. بنابراین فسفر-کارایی، شاخصی مهم برای ارزیابی کارایی فسفر در گیاهان است که دو عامل کارایی در جذب و کارایی در مصرف فسفر را در شامل می‌شود.

شاخص پاسخ به کود

متوسط شاخص کودپذیری برای لاین‌های ذرت مورد مطالعه برابر با ۷۰/۳۹ بود. در بین لاین‌ها، لاین‌های شماره ۲، ۲۸ و ۲۱ به‌ترتیب با ۲۲۳/۶۷، ۱۸۵/۲۰ و ۱۸۰/۳۳ گرم بر گلدان، کودپذیری بالاتر از میانگین و لاین‌های شماره ۹۱، ۴۴ و ۱۰۶ به‌ترتیب با مقدار ۱۳، ۱۳/۶۷ و ۱۵/۳۳ گرم بر گلدان، کودپذیری پایین‌تر از میانگین نشان دادند (جدول ۵). سپهر و همکاران (Sepehr *et al.*, 2009b) در تحقیقی گزارش دادند که در بین ارقام گندم نان، رقم M-81-13 و در بین ارقام گندم دوروم، رقم آریا و در بین ارقام جو، رقم M-80-16 شاخص کودپذیری بالاتری نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها نشان دادند.

شاخص کارایی محاسبه شده فسفر

میانگین شاخص کارایی محاسبه شده فسفر در لاین‌های ذرت در شرایط کمبود فسفر برابر با ۰/۷۰ بود. هر چه مقدار عددی این شاخص بالاتر باشد، نشان‌دهنده مصرف بالای فسفر لاین مورد نظر است. طبق نتایج حاصل از این پژوهش، به‌ترتیب لاین‌های ۹، ۱، ۸، ۵ و ۱۰۶ با میزان ۱/۱۷، ۱/۱۵، ۱/۰۸، ۱/۰۳ و ۱/۰۱ دارای بالاترین و لاین‌های ۶۵، ۵۱ و ۴۶ با میزان ۰/۳۴، ۰/۳۴ و ۰/۳۵ دارای پایین‌ترین میزان مصرف فسفر بودند (جدول ۵).

شاخص‌های مختلفی توسط پژوهشگران به‌عنوان شاخص فسفرکارایی در نظر گرفته می‌شوند. گود و همکاران (Good *et al.*, 2004) دو مفهوم کارایی در جذب و کارایی در مصرف عنصر را دو مولفه عمده در کارایی عنصر غذایی معرفی کردند و بیان داشتند که کارایی بهتر فسفر در گیاهان از طریق بهبود هر دو مولفه یعنی کارایی جذب و کارایی استفاده از فسفر در داخل گیاه حاصل می‌شود. این پژوهشگران با بررسی فسفرکارایی ارقام مختلف گندم و جو، تفاوت‌های کارایی را بیش‌تر متأثر از طول تارهای کشنده و ترشحات ریشه‌ای بیان کردند. لیاو و همکاران (Liao *et al.*, 2005)، ۱۸ رقم غلات را در دو نوع خاک با فسفر کل کم و زیاد در استرالیا مطالعه کردند. نتایج آزمایش آن‌ها نشان داد که تفاوت‌های معنی‌داری بین ارقام در رشد و جذب فسفر در هر دو نوع خاک وجود دارد.

جدول ۵- کارایی جذب فسفر، کارایی مصرف فسفر، کارایی فسفر، کارایی محاسبه شده فسفر و پاسخ به کود در لاین‌های مختلف ذرت

Table 5. Phosphorus acquisition efficiency, phosphorus utilization efficiency, phosphorus efficiency, calculated phosphorus efficiency and fertilizer response in different maize lines

Code	Origin	Phosphorus adsorption efficiency	Phosphorus consumption efficiency (g APDW/mg P)		Phosphorus efficiency (%)	Calculated phosphorus efficiency	Fertilizer response (g/pot)
			Normal	Stress			
1	Kermanshah	0.56	1.46	2.06	0.78	1.15	91.33
2	Kermanshah	0.15	0.72	2.43	0.49	0.35	223.67
3	Mashhad	0.37	1.13	2.13	0.67	0.76	99.00
4	Mashhad	0.44	1.13	1.63	0.64	0.72	125.00
5	Mashhad	0.72	1.14	1.46	0.91	1.03	26.77
6	Mashhad	0.54	1.09	1.78	0.84	0.92	53.43
7	Mashhad	0.30	0.68	1.66	0.63	0.44	149.20
8	Mashhad	0.72	1.22	1.52	0.89	1.08	29.33
9	Mashhad	0.85	1.24	1.39	0.95	1.17	18.33
10	Kermanshah	0.43	1.22	2.07	0.73	0.89	134.67
11	Kermanshah	0.43	0.84	1.32	0.66	0.55	160.67
12	Kermanshah	0.44	1.08	1.96	0.78	0.81	77.67
13	Kermanshah	0.35	0.87	1.91	0.70	0.60	144.00
14	Kermanshah	0.32	0.99	2.41	0.76	0.76	63.67
15	Kermanshah	0.35	1.20	1.87	0.53	0.66	151.00
16	Kermanshah	0.59	1.19	1.71	0.79	0.94	38.33
17	Kermanshah	0.54	1.27	1.99	0.72	0.91	67.00
18	Kermanshah	0.58	1.15	1.65	0.75	0.88	63.23
19	Kermanshah	0.51	1.08	1.40	0.66	0.72	107.67
20	Kermanshah	0.48	0.96	1.93	0.90	0.87	26.23
21	Kermanshah	0.33	0.94	1.78	0.61	0.57	180.33
22	Kermanshah	0.34	0.85	2.36	0.89	0.76	40.67
23	Kermanshah	0.34	0.88	2.27	0.81	0.71	59.00
24	Kermanshah	0.21	1.10	3.19	0.56	0.61	169.33
25	Kermanshah	0.36	0.78	1.82	0.80	0.62	74.53
26	Kermanshah	0.64	1.24	1.49	0.76	0.94	82.77
27	Kermanshah	0.48	1.06	1.60	0.71	0.76	109.33
28	Kermanshah	0.41	1.16	1.54	0.54	0.61	185.20
30	Kermanshah	0.24	0.54	1.53	0.66	0.36	77.00
31	Kermanshah	0.49	1.11	1.62	0.70	0.80	48.67
32	Kermanshah	0.42	1.55	2.42	0.62	0.94	74.00
33	Kermanshah	0.48	1.19	1.65	0.69	0.77	62.67
34	Kermanshah	0.64	1.15	1.49	0.80	0.92	24.67
35	Kermanshah	0.28	0.63	1.56	0.66	0.41	71.33
36	Kermanshah	0.25	0.88	2.23	0.60	0.53	99.67
37	Kermanshah	0.40	1.07	1.82	0.66	0.72	68.33
38	Kermanshah	0.34	1.11	2.74	0.64	0.72	41.00
39	Kermanshah	0.48	0.81	1.42	0.79	0.65	41.33
40	Kermanshah	0.46	1.08	1.84	0.76	0.79	47.00
42	Kermanshah	0.38	0.90	1.54	0.64	0.59	58.00
43	Kermanshah	0.61	1.22	1.77	0.81	0.97	35.33
44	Kermanshah	0.56	.05	1.74	0.93	0.98	13.67
45	Kermanshah	0.34	0.66	1.67	0.84	0.55	26.33
46	Karaj	0.11	0.54	3.43	0.65	0.35	73.00
48	Karaj	0.56	0.98	1.39	0.77	0.75	40.67
49	Karaj	0.26	1.10	1.69	0.40	0.44	115.00
50	Karaj	0.29	0.80	1.54	0.54	0.44	59.00
51	Karaj	0.23	0.58	1.49	0.58	0.34	62.33
52	Karaj	0.58	1.02	1.67	0.82	0.85	35.00
53	Karaj	0.22	1.19	4.66	0.74	0.89	79.77
54	Karaj	0.36	0.54	1.33	0.81	0.43	35.33
55	Karaj	0.43	1.24	1.54	0.50	0.62	87.67
57	Karaj	0.51	0.84	1.41	0.74	0.66	49.67
60	Kermanshah	0.33	0.85	1.91	0.75	0.65	78.00
62	Karaj	0.64	1.05	1.31	0.80	0.83	34.67
64	Karaj	0.30	0.66	1.49	0.68	0.45	121.53
65	Karaj	0.26	0.71	1.30	0.48	0.34	64.17

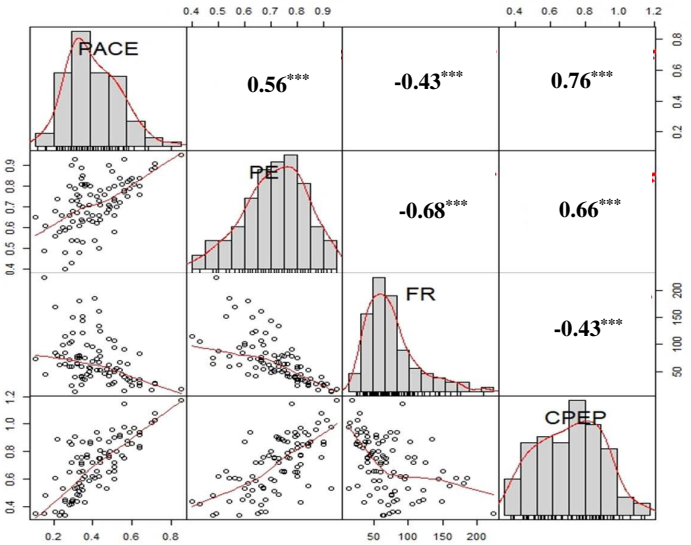
Table 5. Continued

جدول ۵- ادامه

Code	Origin	Phosphorus adsorption efficiency	Phosphorus consumption efficiency (g APDW/mg P)		Phosphorus efficiency (%)	Calculated phosphorus efficiency	Fertilizer response (g/pot)
			Normal	Stress			
66	Karaj	0.43	1.00	1.79	0.73	0.75	67.33
72	Karaj	0.29	0.99	1.46	0.43	0.42	105.17
73	Karaj	0.33	0.72	1.63	0.71	0.51	80.00
74	Karaj	0.26	0.89	2.37	0.59	0.45	84.23
75	Mashhad	0.39	1.14	2.47	0.76	0.87	41.33
76	Kermanshah	0.55	0.96	1.41	0.81	0.77	44.00
77	Mashhad	0.32	0.78	1.61	0.67	0.54	65.67
79	Mashhad	0.16	0.76	3.60	0.61	0.48	44.33
80	Mashhad	0.21	0.53	1.85	0.68	0.36	84.67
83	Mashhad	0.64	0.98	1.38	0.84	0.84	28.67
85	Mashhad	0.60	1.03	1.58	0.84	0.86	24.00
89	Mashhad	0.42	0.91	1.59	0.75	0.66	53.33
91	Mashhad	0.31	0.57	1.73	0.93	0.53	13.00
96	Kermanshah	0.38	0.83	1.81	0.71	0.59	49.33
98	Mashhad	0.33	0.95	1.46	0.48	0.48	75.33
100	Mashhad	0.51	0.85	1.36	0.80	0.69	30.67
104	Mashhad	0.39	1.03	2.28	0.80	0.86	55.67
105	Mashhad	0.29	0.95	3.52	0.90	0.85	24.00
106	Mashhad	0.70	1.15	1.46	0.88	1.01	15.33
107	Kermanshah	0.51	1.18	2.21	0.73	0.90	53.00
108	Mashhad	0.52	1.14	1.52	0.70	0.80	56.33
109	Mashhad	0.37	0.97	2.09	0.81	0.78	45.00
110	Mashhad	0.31	1.15	3.40	0.79	0.91	40.67
111	Mashhad	0.29	1.01	2.55	0.73	0.72	59.67
112	Mashhad	0.35	1.02	2.86	0.85	0.87	37.00
113	Mashhad	0.51	1.04	1.20	0.58	0.60	93.90
114	Mashhad	0.28	1.41	3.17	0.60	0.87	102.33
115	Kermanshah	0.59	1.13	1.61	0.83	0.94	31.33
116	Mashhad	0.28	0.83	2.45	0.80	0.65	58.90
117	Mashhad	0.32	0.76	1.38	0.54	0.44	78.67
118	Mashhad	0.44	1.06	1.89	0.71	0.75	52.67
119	Mashhad	0.32	0.67	1.88	0.73	0.49	75.00
120	Kermanshah	0.47	0.79	1.11	0.67	0.53	55.00
121	Mashhad	0.40	0.99	1.57	0.63	0.62	96.33
122	Mashhad	0.35	0.84	1.52	0.63	0.52	122.00
123	Mashhad	0.50	1.10	1.91	0.87	0.96	26.90
Mean	-	0.41	0.97	1.89	0.71	0.70	70.39
$LSD_{5\%}$	-	0.27	0.35	-	0.22	0.35	67.60
$CV_{\%}$	-	40.62	11.14	-	19.74	31.55	59.61

همبستگی بین شاخص‌های برآورد فسفر-کارایی

نتایج نشان داد که همبستگی بین شاخص کارایی جذب فسفر با شاخص‌های کارایی فسفر (۰/۵۶) و کارایی محاسبه شده فسفر (۰/۷۶) مثبت و معنی‌دار و با شاخص کودپذیری (۰/۴۳-) منفی و معنی‌دار بود. همبستگی بین شاخص کارایی فسفر و شاخص کودپذیری (۰/۶۸-) نیز منفی و معنی‌دار بود. شاخص کارایی محاسبه شده فسفر که از حاصل‌ضرب کارایی جذب در کارایی مصرف فسفر در شرایط محدودیت فسفر به‌دست آمد، با کارایی فسفر (۰/۶۶) همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت (شکل ۱) و نشان داد که عملکرد نسبی شاخساره شامل هر دو کارایی جذب و مصرف فسفر است و یک شاخص مناسب برای ارزیابی فسفر- کارایی است که با نتیجه لیاو و همکاران (Liao *et al.*, 2005) مطابقت داشت. در مطالعات انجام شده توسط ازتورک و همکاران (Ozturk *et al.*, 2005)، سپهر و همکاران (Sepehr *et al.*, 2009b) و موسوی و همکاران (Musavi *et al.*, 2013) نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری بین کارایی فسفر و کارایی محاسبه شده فسفر گزارش شده است.



شکل ۱- توزیع فراوانی و همبستگی بین شاخص‌های پاسخ به کود، کارایی محاسبه شده، کارایی جذب و کارایی فسفر در لاین‌های ذرت

Figure 1. Frequency distribution and correlation among fertilizer response, calculated phosphorus efficiency, phosphorus adsorption efficiency and phosphorus efficiency in maize lines

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که بین لاین‌های مختلف ذرت از لحاظ جذب و مصرف فسفر تفاوت‌های معنی‌داری وجود داشت. بر اساس نتایج حاصل از حداقل دو شاخص ارزیابی‌شده، در شرایط فراهمی فسفر لاین‌های ۱، ۲، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۸۰ به‌عنوان لاین‌های فسفر-کارا و لاین‌های ۳۲، ۳۴، ۴۶ و ۴۹ به‌عنوان فسفر-ناکارا معرفی می‌شوند. در شرایط کمبود فسفر، لاین‌های ۱، ۹، ۱۰ و ۲۶ به‌عنوان لاین‌هایی با بالاترین مقدار فسفر-کارایی و لاین‌های ۶۵، ۴۶، ۴۹ و ۷۹ به‌عنوان لاین‌های فسفر-ناکارا معرفی می‌شوند. بر اساس نتایج حاصل، پیشنهاد می‌شود لاین‌هایی که شاخص کودپذیری بالاتری داشتند در آزمایش‌های تکمیلی با مقادیر مختلف کود فسفر از لحاظ عملکرد و راندمان زراعی کاربرد فسفر دقیق‌تر بررسی شوند. در صورت تایید کارایی لاین‌ها در جذب و مصرف فسفر از آن‌ها می‌توان به‌طور بالقوه در تولید ارقام هیبرید فسفر-کارا در برنامه‌های اصلاحی استفاده کرد. اطلاعات حاصل از این تحقیق می‌تواند در توسعه هیبریدهای ذرت با راندمان بالا در استفاده از فسفر مفید باشد.

References

Abbasi, M. K., Kazmi, M. and Hussan, F. 2005. Nitrogen use efficiency and herbage production of an established grass sward in relation to moisture and nitrogen fertilization. **Journal of Plant Nutrition** 28: 1693-1708.

Bagayoko, M., Alvey, S., Neumann, G. and Buerkert, A. 2000. Root-induced increases in soil pH and nutrient availability to field-grown cereals and legumes on acid sandy soils of Sudano-Sahelian West Africa. **Plant and Soil** 225: 117-127.

Balemi, T. 2009. Effect of phosphorus nutrition on growth of potato genotypes with contrasting phosphorus efficiency. **African Crop Science Journal** 17 (4): 199-212.

Batten, G. D. 1992. A review of phosphorus efficiency in wheat. **Plant and Soil** 149: 163-168.

Berg, W. K., Cunningham, S. M., Brouder, S. M., Johnson, K. D., Joernand, B. C. and Volenec, J. J. 2005. Influence of phosphorus and potassium fertilization on alfalfa yield and yield components. **Crop Science** 45: 297-304.

Bhattacharyya, P., Datta, S. C. and Dureja, P. 2003. Interrelationship of pH organic acids and phosphorus concentration in soil solution of rhizosphere and non-rhizosphere of wheat and rice crops. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 34: 231-245.

Bridgham, S. D., Pastor, J., McClaugherty, C. A. and Richardson, C. J. 1995. Nutrient-use efficiency: A litterfall index, a model, and a test along a nutrient-availability gradient in North Carolina peatlands. **The American Naturalist** 145 (1): 1-21.

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

Fageria, N. K., Wright, R. J. and Baligar, V. C. 1988. Upland rice genotypes evaluation for phosphorus use efficiency. **Journal of Plant Nutrition** 20: 499-509.

Fletcher, A. L., Moot, D. J. and Stone, P. J. 2008. Solar radiation and canopy expansion of sweet corn in response to phosphorus. **European Journal of Agronomy** 29: 80-87.

Gahoonia, T. S. and Nielsen, N. E. 1996. Variation in acquisition of soil phosphorus among wheat and barley genotypes. **Plant and Soil** 178: 223-230.

Gill, H. S., Singh, A., Sethi, S. K. and Behl, R. K. 2004. Phosphorus uptake and use efficiency in different varieties of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). **Archives of Agronomy and Soil Science 50:563–572.**

Good, A. G., Shrawat, A. K. and Muench, D. G. 2004. Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? **Trends in Plant Science** 9: 597-605.

Gunes, 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: 470- 478.

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.

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

Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Moller, I. S. and White, P. 2012. Functions of macronutrients. In: Marschner, P. (Ed.). Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London, U.K. pp: 135-189.

Heidari, M. 2006. Response of plants to environmental stress. Arass Rayaneh Press. (In Persian).

Horst, W. J., Abdou, M. and Wiesler, F. 1993. Genotypic differences in phosphorus efficiency of wheat. **Plant and Soil** 155/156: 293-296.

Jami Moeini, M., Modarres Sanavy, S. A. M., Keshavarz, P., Sorooshzadeh, A. and Ganjeali, A. 2010. Relationship between root morphological characteristics and nitrogen use efficiency in six potato cultivars. **Iranian Journal of Field Crops Research** 8 (3): 444-454. (In Persian with English Abstract).

Liao, M. T., Hocking, P. J. and Dong, B. 2005. Screening for genotypic variation in phosphorus uptake efficiency in cereals on Australian soils. In: Li C. J. (Ed.). Plant nutrition for food security, human health and environmental protection. Tsinghua University Press, Beijing, China. pp: 114-115.

Liao, M. T., Hocking, P. J., Dong, B., Delhaize, E., Richardson, A. E. and Ryan, P. R. 2008. Variation in early phosphorus uptake efficiency among wheat genotypes grown on two contrast in Australian soil. **Australian Journal of Agricultural Research** 59: 157-166.

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.

Manske, G. G. B., Ortiz-Monasterio, J. I., Van Ginkel, M., Gonzalez, R. M., Rajaram, S., Molina, E. and Vlek, P. L. G. 2000. Traits associated with improved P-uptake efficiency in CIMMYT's semidwarf spring bread wheat grown on an acid Andisol in Mexico. **Plant and Soil** 221: 189-204.

Marschner, H. 1998. Role of root growth, arbuscular mycorrhiza, and root exudates for the efficiency in nutrient acquisition. **Field Crops Research** 56: 203-207.

Mirzakhani, M. 2009. Effects of co-inoculation of *Azotobacter* and *Mycorrhiza* under nitrogen and phosphorus levels on nutrients absorption efficiency in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Ph. D. Dissertation. Islamic Azad University, Science and Research Branch-Khouzestan, Iran. (In Persian).

Musavi, R. and Sepehr, E. 2013. Phosphorus efficiency of some barley genotypes in the presence of phosphate-solubilizing microorganisms. **Journal of Soil and Plant Interactions** 4 (4): 27-40. (In Persian with English Abstract).

Osborne, L. D. and Rengel, Z. 2002. Screening cereals for genotypic variation in efficiency of P uptake and utilization. **Australian Journal of Agricultural Research** 53: 837-844.

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.

Pan, X.-W., Li, W.-B., Zhang, Q.-Y., Li, Y.-H. and Liu, M.-S. 2008. Assessment on phosphorus efficiency characteristics of soybean genotypes in phosphorus-deficient soils. **Agricultural Sciences in China** 7 (8): 958-969.

Rengel, Z. 1999. Physiological mechanisms underlying differential nutrient efficiency of crop genotypes. In: Rengel, Z. (Ed.). Mineral nutrition of crops: Fundamental mechanisms and implications. Food Products Press, New York. pp: 227-265.

Ronaghi, A., Adhami, E. and Karimian, N. 2002. Effect of phosphorus and zinc on the growth and chemical composition of corn. **Journal of Soil and Water Sciences** 6 (1): 105-119. (In Persian with English Abstract).

Sepehr, E., Malakouti, M. J., Kholdebarin, B., Samadi, A. and Karimian, N. A. 2009a. Genotypics variation in P efficiency of selected Iranian cereals in greenhouse experiment. **International Journal of Plant Production** 3: 17-28.

Sepehr, E., Malakouti, M. J., Kholdebarin, B., Samadi, A. and Karimian, N. A., Samadi, A., Rasouli, H., Nour-Gholipour, F., Rezaei, H. and Khademi, Z. 2009b. Evaluation of phosphorus efficiency in cereals. **Iranian Journal of Soil Research** (**Formerly Journal of Soil and Water Sciences**) 23 (2): 125-134. (In Persian with English Abstract).

Shahbazi, K. and Besharati, H. 2013. Overview of agricultural soil fertility status of Iran. **Journal of Land Management** 1 (1): 1-15. (In Persian with English Abstract).

Smith, F. W., Jackson, W. A. and van den Berg, P. J. 1990. Internal phosphorus flows during development of phosphorus stress in *Stylosanthes hamata.* **Australian Journal of Plant Physiology** 17: 451-464.

Westerman, R. L. 1990. Soil testing and plant analysis. (3rd Edition). American Society of Agronomy and Soil Science of America, Madison, Wisconsin.

Williams, L. E. 2000. Fertilizer use efficiency and influence of rootstock on uptake and accumulation of nutrients in winegrapes grown in the coastal valleys of California. Proceeding of the Eighth Annual Fertilizer Research and Education Program Conference, Nov. 14, 2000, Tulare, California.

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.

doi: 10.22124/cr.2020.14930.1532

University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 9, No. 4, Winter 2020 (385-399)

Efficiency of maize inbred lines (*Zea mays* L.) in terms of adsorption and consumption of soil phosphorus

Maryam Razmjou[1], Reza Darvishzadeh[2*], Hadi Alipour[3] and Ebrahim Sepehr[4]

Received: November 6, 2019 Accepted: Junuery 12, 2020

Abstract

After nitrogen, phosphorus is the most important and essential nutrient for plants, and plays the most important role in the process of energy production and transmission. In this sttudy, the efficiency of phosphorus adsorption and consumption in 93 maize inbred lines were assessed based on a potted experiment in a completely randomized design with three replications under phosphorus sufficient (optimum) and deficient conditions. The results of analysis of variance revealed that there was a significant difference among maize lines in terms of shoot dry weight, total phosphorus content and concentration, fertilizer response index, phosphorus adsorption efficiency index, phosphorus consumption efficiency index and calculated phosphorus efficiency index. The fertilizer response index of maize lines varied from 13 to 223.67 g with an average of 70.39 g. The phosphorus adsorption efficiency index in the studied lines ranged from 0.11 to 0.85 and its average was 0.41 mg/kg. The phosphorus consumption efficiency index varied from 1.10 to 4.65 g dry matter per mg phosphorus and its average under sufficient (optimum) and deficient conditions were calculated 0.97 and 1.89 g, respectively. The phosphorus efficiency index ranged from 0.40% to 0.95% with an average of 0.71%. Based on the evaluated indices under soil phosphorus deficiency conditions, the maize lines 1, 9, 10, and 26 are introduced as phosphorus-efficient genotypes and the lines 65, 46, 49 and 79 as phosphorus-inefficient genotypes. The phosphorous-efficient lines introduced in this research can be potentially used to produce phosphorus-efficient maize varieties in the future breeding programs.

Keywords: Abiotic stress, Genetic diversity, Phosphorus deficiency, Phosphorus-efficient

1. Ph. D. Student, Dept. of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran
2. Prof., Dept. of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran
3. Assist. Prof., Dept. of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran
4. Assoc. Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran
[*] Corresponding author: r.darvishzadeh@urmia.ac.ir