

## بررسی برخی از ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه و شاخس‌های کارآبی در تعدادی از ارقام فسفرکارا و ناکارای گندم

راضیه خلیلی‌راد<sup>۱</sup> و \*حسین میرسید حسینی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران، آدنشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۱۹

### چکیده

**سابقه و هدف:** با توجه به ویژگی‌های خاص فسفر به‌عنوان یک عنصر کم‌تحرک در خاک، شناسایی و استفاده از ارقامی از گیاهان که به‌عنوان فسفرکارا شناخته می‌شوند، گامی مؤثر در استفاده از فسفر خاک خواهد بود. از گزینه‌های اصلی مورد توجه در مدیریت فسفر استفاده از راهکارهایی برای به حداکثر رساندن کارآیی استفاده از آن توسط گیاهان است. اولین قدم برای بهبود تأثیر عملیات مدیریتی درک چگونگی تقابل سیستم ریشه‌ای گیاهان با خاک است. با توجه به محدود بودن پژوهش‌ها در مورد نقش ریشه‌ها در جذب عناصر کم‌تحرک خاک، این پژوهش با هدف مطالعه تعدادی از خصوصیات مورفولوژیکی ریشه چند رقم فسفرکارا و فسفرناکارای گندم و ارتباط آن‌ها با شاخص‌های فسفرکارایی انجام گرفت.

**مواد و روش‌ها:** تعدادی از ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه چند رقم فسفرکارا و ناکارای گندم اندازه‌گیری و همبستگی آن‌ها با شاخص‌های کارآیی بررسی گردید. همچنین تأثیر ریزوسفر هر رقم بر pH خاک و تغییرات اجزای فسفر خاک در سطح کودی صفر مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشی گلخانه‌ای روی گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.) به‌مدت شش هفته به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در ۸ تیمار و ۳ تکرار انجام شد. فاکتورها شامل ارقام مختلف در ۴ سطح (۲ رقم فسفرکارا (آزادی (*Azadi*) و یاوروس (*Yavarus*)) و ۲ رقم فسفرناکارا (کرج ۱ (*Karaj1*) و مرودشت (*Marvdasht*)) و فسفر خاک در ۲ سطح (سطح طبیعی فسفر خاک و سطح ۲۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک) بودند. تعدادی از خصوصیات مورفولوژیکی ریشه شامل وزن تر و خشک ریشه و حجم ریشه اندازه‌گیری گردید و سپس طول و سطح ریشه‌ها محاسبه شد. وزن تر و خشک شاخساره و نسبت شاخساره به ریشه نیز در ارقام مختلف اندازه‌گیری و محاسبه شد. در نهایت جذب کل فسفر، کارآیی جذب و مصرف فسفر و فسفرکارایی محاسبه گردید و همبستگی ویژگی‌های ریشه‌ای با شاخص‌های کارآیی بررسی شد.

**یافته‌ها:** تفاوت معناداری ( $P < 0/05$ ) بین ارقام از نظر ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه مشاهده گردید و ارقام با کارآیی بالاتر، سیستم‌های ریشه‌ای گسترده‌تری تولید نمودند. ارقام گندم آزادی و مرودشت به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار خصوصیات کمی ریشه‌ای (وزن تر (به‌ترتیب ۲/۲۷ و ۱/۲۸ گرم) و وزن خشک ریشه (به‌ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۲۰ گرم)، کل طول ریشه (به‌ترتیب ۲۷۸/۴ و ۱۷۹/۰۴ سانتی‌متر)، سطح ریشه (به‌ترتیب ۹۰/۲ و ۵۶/۰۶ سانتی‌متر مربع در

\* مسئول مکاتبه: [mirseyed@ut.ac.ir](mailto:mirseyed@ut.ac.ir)

گلدان) و حجم ریشه (به ترتیب ۲/۳ و ۱/۴ میلی لیتر در گلدان) را داشتند. همچنین ارقام مختلف تفاوت معناداری ( $P < 0/05$ ) را از نظر وزن خشک شاخساره، نسبت شاخساره به ریشه، غلظت و جذب کل فسفر شاخساره و نیز کارایی جذب و مصرف فسفر نشان دادند. با مصرف کود فسفوری، ماده خشک تمامی ارقام به طور معناداری ( $P < 0/05$ ) افزایش یافت. همبستگی مثبت و معناداری بین ویژگی های ریشه ای این ارقام با شاخص های فسفر کارایی (غلظت و جذب کل فسفر شاخساره) وجود داشت ولی همبستگی این ویژگی ها با شاخص کارایی مصرف فسفر منفی بود. مقادیر pH در ریزوسفر همه ارقام گندم به طور معناداری ( $P < 0/05$ ) نسبت به خاک غیرریزوسفری کاهش یافت. کاهش pH در ریزوسفر ارقام مورد مطالعه بین ۰/۳۸-۰/۱۲ بود. ارقام آزادی و مرودشت به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار کاهش pH را نشان دادند. همه ارقام گندم اجزای فسفر خاک (دی کلسیم فسفات، اکتا کلسیم فسفات، فسفر پیوند شده با آهن و فسفر آپاتیتی) را به طور معناداری ( $P < 0/05$ ) نسبت به خاک شاهد کاهش دادند. این کاهش در مورد تمام ارقام و اجزا یکسان نبود.

**نتیجه گیری:** اختلاف های موجود بین ارقام به تفاوت های ژنتیکی، اندازه و مورفولوژی ریشه و تغییرات شیمیایی ریزوسفر نسبت داده می شود. شناسایی استراتژی های گیاهان برای سازگاری با شرایط کمبود عناصر و انتخاب درست ارقام گیاهی می تواند افزایش جذب فسفر از خاک های دارای محدودیت فسفر و افزایش تولید محصول را به دنبال داشته باشد.

**واژه های کلیدی:** ریشه، فسفر کارایی، کارایی جذب فسفر، کارایی مصرف فسفر، اجزای فسفر خاک

#### مقدمه

از فسفر توسط گیاهان است. مفهوم کارایی در تغذیه معدنی گیاه بر اساس فرایندهای جذب عنصر غذایی توسط گیاه، انتقال، ذخیره و استفاده از آن جهت تولید ماده خشک یا دانه در شرایط فراهمی کم عنصر غذایی تعریف می شود (۳۲).

گیاهان فسفر خاک را از طریق ریشه جذب می کنند. توانایی سیستم ریشه در جذب آب و عناصر غذایی از خاک به ویژگی های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی آن بستگی دارد. در مورد اثرات انواع مختلف ریشه و معماری آن ها بر کارایی جذب عناصر غذایی مطالعات کمی صورت گرفته است. گزارش شده که تحت شرایط تنش رطوبتی و کمبود فسفر، معماری ریشه ممکن است با کارایی جذب فسفر توسط گیاهان مرتبط باشد. بنابراین درک چگونگی تقابل سیستم ریشه ای گیاهان با خاک و نیز بررسی رابطه بین ویژگی های ریشه ای و شاخص های مختلف

فسفر یکی از عناصر غذایی ضروری پرمصرف محدودکننده رشد گیاه است. با افزایش روزافزون تقاضا برای تولیدات کشاورزی توجه بیشتری به کاربرد منابع فسفر به عنوان یک منبع تجدیدنشدنی معطوف شده است. بیش از ۹۰ درصد فسفر کاربردی به شکل کودهای شیمیایی توسط خاک جذب شده و برای گیاهان فاقد استراتژی های خاص قابل دسترس نخواهد بود (۳۵). کاربرد بیش از حد کودهای شیمیایی فسفوری زیان های زیست محیطی متعددی را در دهه های گذشته به همراه داشته که این امر مغایر با اصول تولید پایدار است (۱۲). با توجه به ویژگی های خاص فسفر مدیریت مناسب آن در خاک برای تضمین کشاورزی پایدار ضروری است. یکی از گزینه های اصلی مورد توجه در مدیریت فسفر استفاده از راهکارهایی برای به حداکثر رساندن کارایی استفاده

دقت هر روش در جداسازی خاک ریزوسفری و ریشه‌ها مورد مطالعه و مد نظر قرار گیرد.

در پژوهشی که توسط جیانگ و همکاران (۲۰۱۰) صورت گرفت مشخص شد که گیاهان بر اساس مورفولوژی و فیزیولوژی خود در توانایی جذب فسفر از خاک متفاوتند. رشد ریشه‌های نابجا، طول، سطح و حجم ریشه، وزن صددانه و کارایی استفاده از فسفر دانه به‌عنوان شاخص‌های مناسب برای جداسازی ژنوتیپ‌های مقاوم به شرایط کمبود فسفر در طول مرحله بلوغ گزارش شدند. از این شاخص‌ها می‌توان برای تولید ارقام فسفرکارا استفاده کرد (۱۶). سپهر و همکاران (۲۰۰۹) با بررسی ارقام مختلف غلات، ارقام گندم نان و دوروم را کاراتر از نظر جذب فسفر معرفی نموده و احتمال دادند که این ارقام در حالت محدودیت فسفر بیش‌تر به سوی مکانیسم‌های افزایش جذب فسفر از خاک مانند افزایش گسترش ریشه و ترشح اسیدهای آلی می‌روند (۳۴). میاساکا و هابته (۲۰۰۱) نیز گزارش دادند که گونه‌های گیاهی با کارایی فسفر کم، سرعت جذب و نسبت ریشه به شاخساره کمی دارند؛ در حالی‌که گونه‌های با کارایی فسفر متوسط تا زیاد، یا سرعت جذب زیاد یا نسبت ریشه به شاخساره زیاد یا هم سرعت جذب زیاد هم نسبت ریشه به شاخساره زیادی دارند (۲۸). جامی‌معینی و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی خصوصیات مورفولوژیک ریشه و کارایی مصرف نیتروژن چند رقم سیب‌زمینی، تفاوت معناداری را بین ارقام از نظر خصوصیات مورفولوژیک ریشه گزارش کردند. این پژوهش‌گران بیان داشتند که ارقام دارای عملکرد و کارایی بالاتر سیستم‌های ریشه‌ای قوی‌تر و گسترده‌تری تولید نمودند (۱۴). بنابراین اندازه سیستم ریشه در جذب عناصر غذایی کم‌تحرک در خاک از اهمیت زیادتری برخوردار خواهد بود. با توجه به محدود بودن پژوهش‌ها در مورد نیمه پنهان گیاهان و با توجه

فسفرکارایی ممکن است اطلاعات اساسی برای بهبود کارایی جذب این عنصر فراهم نماید (۲۰).

مطالعه خاک ریزوسفری عمدتاً به دلیل لایه نازک خاکی که مستقیماً تحت‌تأثیر ریشه قرار می‌گیرد و نیز گستردگی توزیع ریشه‌ها در خاک، از نظر تکنیکی مشکل است. روش‌های مختلفی برای جداسازی ریشه‌ها و مطالعه تغییرات شیمیایی ریزوسفر پیشنهاد شده است. یک روش ساده برای جمع‌آوری خاک ریزوسفری، تکان دادن ملایم ریشه‌ها است که خاک جدا شده از این طریق به‌عنوان خاک غیرریزوسفری و خاک باقی‌مانده در سطح ریشه‌ها به‌عنوان خاک ریزوسفری در نظر گرفته می‌شود (۳۳). در روش‌های دیگر، انواع مختلفی از تجهیزات از جمله ریزوباکس‌ها<sup>۱</sup> و ریزوبگ‌ها<sup>۲</sup> برای جداسازی ریشه‌ها و مطالعه خاک ریزوسفری استفاده شده‌اند (۴، ۱۸، ۴۰، ۴۱). در این روش‌ها برای محدود کردن رشد ریشه‌ها به حجم مشخصی از خاک، عمدتاً از نایلون‌های مشبک با مش ریز که به‌صورت افقی یا عمودی در خاک قرار داده می‌شوند و اجازه عبور آب، گاز و عناصر غذایی را جهت استفاده گیاه می‌دهند، استفاده می‌شود. در جداسازی خاک ریزوسفری و ریشه با استفاده از تکنیک ریزوبگ مقدار مشخصی خاک داخل یک کیسه نایلونی مشبک با مش ریز ریخته می‌شود تا رشد ریشه‌ها را به فضای داخل ریزوبگ محدود کند. سپس این ریزوبگ در مرکز گلدان پلاستیکی دیگری قرار داده و اطراف آن توسط خاک پر می‌شود به‌صورتی‌که خاک داخل و خارج از ریزوبگ هم سطح باشد (۲۷).

محدود کردن رشد ریشه‌ها به حجم مشخصی از خاک تراکم ریشه‌ای بیش‌تری ایجاد و نمونه‌برداری از خاک ریزوسفری را تسهیل می‌کند. گرچه هر روش مزایا و معایب خاص خود را دارد و لازم است تفاوت‌ها و

1- Rhizobox

2- Rhizobag

بافت خاک به روش هیدرومتر (۵) و کربنات کلسیم معادل (ECC) به روش تیتراسیون برگشتی (۲۲) اندازه‌گیری شد. کربن آلی خاک (OC) به روش واکلی- بلک (۳۹) و از طریق اکسیداسیون دی‌کرومات و تیتراسیون با فروآمونیم سولفات و نیتروژن کل به روش کج‌لدال تعیین شد. پتاسیم قابل استفاده توسط استات آمونیوم ۱ نرمال (pH=۷) عصاره‌گیری و با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر اندازه‌گیری شد (۳۶). pH و هدایت الکتریکی خاک (EC) نیز به ترتیب در گل اشباع و عصاره اشباع اندازه‌گیری شد. فسفر قابل دسترس (فسفر اولسن) توسط بیکربنات سدیم ۰/۵ مولار (pH=۸/۵) عصاره‌گیری و با استفاده از اسپکتروفتومتر به روش اسید آسکوربیک تعیین شد (۱۳). فسفر محلول در آب، فسفر کل به روش هضم توسط اسید پرکلریک (HClO<sub>4</sub>) و سایر عناصر بر اساس روش‌های استاندارد (۳۶) اندازه‌گیری شدند. تعدادی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

به نقش ریشه‌ها در جذب مؤثرتر فسفر از خاک و لزوم آشنایی با ویژگی‌های ریشه‌ای ارقام جهت انتخاب ژنوتیپ‌هایی از گیاهان که مقاومت بیشتری به کمبود فسفر داشته باشند، پژوهش حاضر با هدف بررسی و مقایسه خصوصیات مورفولوژیکی ریشه در چند رقم فسفرکارا و فسفرناکارای گندم و ارتباط آن‌ها با شاخص‌های فسفرکارایی انجام گرفت.

### مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش یک نمونه خاک دارای محدودیت فسفر (فسفر کم‌تر از ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از ایستگاه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی قزوین واقع در اسماعیل‌آباد (۴۹ درجه، ۵۴ دقیقه و ۲۸ ثانیه شرق و ۳۶ درجه، ۱۵ دقیقه و ۱۷ ثانیه شمال) با میانگین بارش سالیانه ۳۲۰-۳۱۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه ۹ درجه سلسیوس از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری انتخاب شد و پس از هوا خشک کردن و عبور از الک ۲ میلی‌متری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن بر اساس روش‌های استاندارد تعیین گردید (۳۶).

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

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

| Zn                               | Cu  | Mn   | Fe  | P                    | K   | EC                 | pH   | N    | OC  | CCE | Clay | Silt | Sand | Texture                  |
|----------------------------------|-----|------|-----|----------------------|-----|--------------------|------|------|-----|-----|------|------|------|--------------------------|
| Available (mgkg <sup>-1</sup> )* |     |      |     | (dSm <sup>-1</sup> ) |     | (In saturated mud) |      | (%)  |     |     | بافت |      |      |                          |
| 0.76                             | 1.1 | 10.4 | 2.1 | 4.65                 | 299 | 1.49               | 7.45 | 0.05 | 0.5 | 7   | 19   | 24   | 57   | لوم شنی<br>Sandy<br>Loam |

CCE: کربنات کلسیم معادل، OC: کربن آلی، EC: قابلیت هدایت الکتریکی، \* عناصر قابل جذب گیاه در خاک.

فسفر خاک یا سطح کودی صفر (F<sub>0</sub>) و سطح کودی اعمال شده برای رساندن فسفر خاک به حد بهینه برای گیاه (F<sub>e</sub>) بود. سطح کودی بهینه بر اساس منابع موجود ۲۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک در نظر گرفته شد (۲۴، ۲۵) و با توجه به منبع کودی مورد

آزمایشی گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در ۸ تیمار و ۳ تکرار انجام شد. فاکتورها شامل ارقام مختلف گندم (*Triticum aestivum* L. در ۴ سطح (۲ رقم فسفرکارا و ۲ رقم فسفرناکارا) و فسفر خاک در ۲ سطح (سطح طبیعی

استفاده (منوپتاسیم فسفات) و مقدار فسفر خاک و نیز با در نظر گرفتن میزان بازیابی کود فسفوری، سطح فسفر قابل دسترس گلدان‌ها در خاک به حدود ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسانده شد. به این ترتیب، مقدار کود فسفوری مصرفی حدود ۲۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک (حدود ۶۷/۵ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک) بود که به صورت محلول در آب آبیاری و قبل از کشت به صورت اسپری کردن به خاک اضافه گردید تا کاملاً با آن مخلوط شود. اثر پتاسیم همراه کود فسفوری مصرفی از طریق محاسبه درصد پتاسیم موجود در آن و وزن‌دهی به همان مقدار به گلدان‌های صفر با استفاده از کود سولفات پتاسیم حذف گردید. بر اساس پژوهش‌های سپهر و همکاران (۲۰۰۹) ارقام گندم آزادی (*Azadi*) (T<sub>1</sub>) و یاوروس (*Yavarus*) (T<sub>2</sub>) به‌عنوان ارقام فسفرکارا و ارقام گندم کرج ۱ (*Karaj1*) (T<sub>3</sub>) و مرودشت (*Marvdasht*) (T<sub>4</sub>) به‌عنوان ارقام فسفرناکارا انتخاب شد (۳۴). ارقام گندم یاوروس، کرج ۱ و مرودشت دارای تیپ رشد بهاره و رقم آزادی پاییزه است که در مورد رقم پاییزه، بهاره‌سازی قبل از کشت انجام شد. جهت جدا کردن راحت‌تر ریشه‌ها از تکنیک ریزوبگ استفاده گردید (۲۷). هر ریزوبگ با حدود ۳۸۰ گرم خاک پر شد و در وسط گلدان‌های پلاستیکی با قطر ۱۰ و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر قرار گرفت. حدود ۱/۷ کیلوگرم خاک به هر گلدان اضافه شد و خاک داخل و خارج از ریزوبگ هم‌سطح شد. تعداد پنج عدد بذر در داخل ریزوبگ‌های استوانه‌ای شکل به قطر ۶ و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و با قطر منافذ حدود ۶۰ (۲۵۰ میکرون یا ۰/۲۵ میلی‌متر) کاشته شد. پس از یک هفته تعداد بوته‌ها به سه عدد کاهش داده شد. در طول آزمایش رطوبت گلدان‌ها در حد ظرفیت مزرعه نگه داشته شد. عناصر مختلف کودی (۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم

نیترژن به صورت اوره در دو تقسیط، ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم منیزیم به صورت سولفات منیزیم، پنج میلی‌گرم بر کیلوگرم آهن به صورت سکوسترین آهن ۱۳۸ و ۰/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بور به صورت اسید بوریک) در طول مرحله داشت در تمام گلدان‌ها به‌طور یکسان اضافه شدند. پس از شش هفته اندام هوایی گیاهان از محل طوقه جدا شد و کل ریشه توسعه‌یافته در داخل ریزوبگ‌های گلدان‌ها مورد نمونه‌برداری قرار گرفت. به‌منظور درک ویژگی‌های ریشه‌ای مؤثر در فسفرکارایی مرتبط با نوع رقم تعدادی از خصوصیات مورفولوژیکی ریشه شامل وزن تر ریشه، وزن خشک ریشه و نیز حجم ریشه با استفاده از استوانه مدرج و پس از قرار گرفتن ریشه شسته شده در حجم مشخصی از آب اندازه‌گیری گردید و سپس با استفاده از روش‌های محاسباتی (۳، ۳۰) طول و سطح ریشه‌ها تخمین زده شد. طول ریشه‌ها به دو روش استفاده از کاغذ میلی‌متری و نیز بر اساس وزن خشک ریشه و با استفاده از فرمول  $0.89 \times [\text{وزن ریشه‌ها بر حسب میلی‌گرم}] = \text{طول ریشه‌ها (cm)}$  تخمین زده شد و برای محاسبه سطح ریشه از روش موسوم به اتکینسون<sup>۱</sup> استفاده شد.

= سطح ریشه‌ها (cm<sup>2</sup>)

$$\left\{ \frac{1}{2} \times \pi \times [\text{طول ریشه‌ها (cm)}] \times [\text{حجم ریشه‌ها (mL)}] \right\}^{1/2}$$

وزن تر و خشک شاخساره و نسبت شاخساره به ریشه نیز در ارقام مختلف اندازه‌گیری و محاسبه شد. جهت بررسی رابطه بین ویژگی‌های ریشه‌ای مذکور و شاخص‌های کارایی، ابتدا غلظت فسفر در گیاه به روش رنگ‌سنجی اندازه‌گیری شد (۱۹). سپس جذب کل فسفر (TP) (حاصل‌ضرب غلظت فسفر (PC) در وزن خشک شاخساره (SDW))، کارایی جذب فسفر

آماري SPSS و SAS و MSTATC انجام گرفت و نمودارها توسط نرم افزار Excel رسم گردید.

### نتایج و بحث

ویژگی های مورفولوژیکی ریشه: نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲)، نشان داد که اثرات اصلی نوع رقم و سطوح کودی بر وزن تر و خشک ریشه، سطح، حجم و کل طول ریشه در سطح یک درصد معنادار گردید. همچنین اثرات متقابل نوع رقم و سطح کودی بر وزن تر، حجم و سطح ریشه معنادار بود. مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارها بر ویژگی های مورفولوژیکی ریشه در جدول ۳ آورده شده است.

(PAE) (میزان نسبی کل فسفر جذب شده)، کارایی مصرف فسفر (PUE) (تولید ماده خشک به ازای واحد فسفر جذب شده) و فسفر کارایی (PE) (نسبت ماده خشک ارقام در شرایط محدودیت فسفر به مقدار آن در شرایط فراهمی فسفر) محاسبه گردید (۳۴). pH ۱:۵ خاک به آب و بعد از نیم ساعت تکان دادن روی شیکر توسط pH متر اندازه گیری گردید (۱۰). علاوه بر این، تغییرات اجزای فسفر معدنی خاک بعد از کشت ارقام مختلف، در سطح کودی صفر با استفاده از روش جیانگ و گو (۱۹۸۹) در خاک های ریزوسفری و غیرریزوسفری مورد بررسی قرار گرفت (۱۵). تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از برنامه های

جدول ۲- تجزیه واریانس ویژگی های مورفولوژیکی ریشه ای اندازه گیری شده.

Table 2. Analysis of variance of measured root morphological properties.

| میانگین مربعات<br>(Mean squares)               |                               |                         |                                  |                                 |                                | درجه آزادی<br>Degree of Freedom | منابع تغییرات<br>Sources of variations        |
|--|-------------------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---|
| نسبت شاخساره<br>به ریشه<br>Shoot to root ratio | سطح ریشه<br>Root surface area | حجم ریشه<br>Root volume | کل طول ریشه<br>Total root length | وزن خشک ریشه<br>Root dry weight | وزن تر ریشه<br>Root wet weight |                                 |   |
| 0.2581 <sup>ns</sup>                           | 10583.16**                    | 6.6150**                | 106696.00**                      | 0.1347**                        | 6.3551**                       | 1                               | سطح کودی<br>Fertilizer level                  |
| 0.7684**                                       | 1216.90**                     | 0.9628**                | 9938.70**                        | 0.0125**                        | 1.0248**                       | 3                               | رقم<br>Cultivar                               |
| 0.0875 <sup>ns</sup>                           | 123.41**                      | 0.2317**                | 123.70 <sup>ns</sup>             | 0.0001 <sup>ns</sup>            | 0.2005**                       | 3                               | سطح کودی × رقم<br>Fertilizer level × Cultivar |
| 0.0592   | 20.83                         | 0.0375                  | 205.02                           | 0.0002                          | 0.0260                         | 16                              | خطا<br>(Error)                                |
| 9.32   | 6.05                          | 9.27                    | 6.27                             | 6.27                            | 8.83                           |                                 | ضریب تغییرات<br>(CV)                          |

\*\* و <sup>ns</sup> به ترتیب معنادار در سطح احتمال ۱٪ و بدون اختلاف معنادار.

\*\* and <sup>ns</sup> Mean square (MS) of the treatments are significant at the 0.01 level and mean square of the treatments are not significant, respectively.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارها بر ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه‌ای.

Table 3. Compare mean of the main effects of treatments on root morphological properties.

| حجم ریشه<br>Root Volume<br>(mL/pot) | سطح ریشه<br>Root surface area<br>(cm <sup>2</sup> /pot) | کل طول ریشه<br>Total root length | نسبت شاخساره به ریشه<br>Shoot to root ratio | وزن خشک شاخساره<br>Shoot dry weight<br>(g/pot) | وزن خشک ریشه<br>Root dry weight<br>(g/pot) | وزن تر ریشه<br>Root wet Weight<br>(g/pot) | تیمارها<br>Treatments  |
|-------------------------------------|---|----------------------------------|---|--|--|---|--|
| 2.33 <sup>a</sup>                   | 90.17 <sup>a</sup>                                      | 278.42 <sup>a</sup>              | 2.32 <sup>b</sup>                           | 0.73 <sup>a</sup>                              | 0.31 <sup>a</sup>                          | 2.27 <sup>a</sup>                         | آزادی (Azadi) (T <sub>1</sub> )  |
| 2.05 <sup>b</sup>                   | 75.92 <sup>b</sup>                                      | 223.84 <sup>b</sup>              | 2.77 <sup>a</sup>                           | 0.70 <sup>a</sup>                              | 0.25 <sup>b</sup>                          | 1.78 <sup>b</sup>                         | یاواروس (Yavarus) (T <sub>2</sub> )  |
| 2.17 <sup>ab</sup>                  | 79.39 <sup>b</sup>                                      | 231.55 <sup>b</sup>              | 2.31 <sup>b</sup>                           | 0.61 <sup>b</sup>                              | 0.26 <sup>b</sup>                          | 1.97 <sup>b</sup>                         | کرج ۱ (Karaj 1) (T <sub>3</sub> )  |
| 1.42 <sup>c</sup>                   | 56.06 <sup>c</sup>                                      | 179.04 <sup>c</sup>              | 3.04 <sup>a</sup>                           | 0.59 <sup>b</sup>                              | 0.20 <sup>c</sup>                          | 1.28 <sup>c</sup>                         | مرودشت (Marvdasht) (T <sub>4</sub> )   |
| 1.47 <sup>b</sup>                   | 54.39 <sup>b</sup>                                      | 161.54 <sup>b</sup>              | 2.51 <sup>a</sup>                           | 0.45 <sup>b</sup>                              | 0.18 <sup>b</sup>                          | 1.31 <sup>b</sup>                         | سطح کودی صفر<br>No P fertilizer (F <sub>0</sub> )                                      |
| 2.52 <sup>a</sup>                   | 96.38 <sup>a</sup>                                      | 294.89 <sup>a</sup>              | 2.71 <sup>a</sup>                           | 0.86 <sup>a</sup>                              | 0.33 <sup>a</sup>                          | 2.34 <sup>a</sup>                         | سطح ۲۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک (F <sub>e</sub> )<br>20 mg P kg <sup>-1</sup> soil |

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

Means followed by the same letter in each column are not significantly different (P&lt;0.05).

افزایش معناداری را در سطح احتمال پنج درصد در وزن تر ریشه، وزن خشک ریشه و سایر پارامترهای ریشه‌ای به دنبال داشت و در مورد وزن تر ریشه به‌طور متوسط از ۱/۳۱ به ۲/۳۴ گرم در گلدان رسید (جدول ۳). اثرات متقابل تیمارها بر برخی از ویژگی‌های ریشه‌ای اندازه‌گیری شده در جدول ۴ نشان داده شده است.

رقم آزادی به‌عنوان رقم فسفرکارا و رقم مرودشت به‌عنوان رقم فسفرناکارا به‌ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار پارامترهای ریشه‌ای مذکور بودند. به‌عنوان مثال رقم آزادی با ۲/۲۷ گرم در گلدان و رقم مرودشت با ۱/۲۸ گرم در گلدان به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار وزن تر ریشه را داشتند. مصرف کود فسفوری

جدول ۴- اثر متقابل سطح کودی و رقم بر ویژگی‌های مورفولوژیکی ریشه‌ای اندازه‌گیری شده.

Table 4. The interaction effect of fertilizer level and cultivar on measured root morphological properties.

| میانگین<br>(Mean)                   |   |                                       |   |   |   |  | تیمارها<br>Treatments         |
|-------------------------------------|---|---------------------------------------|---|---|---|--|-------------------------------|
| حجم ریشه<br>Root Volume<br>(mL/pot) | سطح ریشه<br>Root surface area<br>(cm <sup>2</sup> /pot) | کل طول ریشه<br>Total root length (cm) | نسبت شاخساره به ریشه<br>Shoot to root ratio | وزن خشک شاخساره<br>Shoot dry weight (g/pot) | وزن خشک ریشه<br>Root dry weight (g/pot) | وزن تر ریشه<br>Root wet weight (g/pot) |                               |
| 1.67 <sup>c</sup>                   | 66.01 <sup>c</sup>                                      | 210.04                                | 2.27  | 0.53  | 0.24                                    | 1.57 <sup>de</sup>                     | T <sub>1</sub> F <sub>0</sub> |
| 1.53 <sup>c</sup>                   | 55.50 <sup>d</sup>                                      | 159.90                                | 2.79  | 0.50  | 0.18                                    | 1.43 <sup>de</sup>                     | T <sub>2</sub> F <sub>0</sub> |
| 1.50 <sup>cd</sup>                  | 54.78 <sup>d</sup>                                      | 159.31                                | 2.19  | 0.39  | 0.18                                    | 1.32 <sup>c</sup>                      | T <sub>3</sub> F <sub>0</sub> |
| 1.17 <sup>d</sup>                   | 41.25 <sup>e</sup>                                      | 116.89                                | 2.78  | 0.36  | 0.13                                    | 0.92 <sup>f</sup>                      | T <sub>4</sub> F <sub>0</sub> |
| 3.00 <sup>a</sup>                   | 114.33 <sup>a</sup>                                     | 346.80                                | 2.37  | 0.92  | 0.39                                    | 2.97 <sup>a</sup>                      | T <sub>1</sub> F <sub>e</sub> |
| 2.57 <sup>b</sup>                   | 96.33 <sup>b</sup>                                      | 287.77                                | 2.75  | 0.89  | 0.32                                    | 2.14 <sup>c</sup>                      | T <sub>2</sub> F <sub>e</sub> |
| 2.83 <sup>ab</sup>                  | 104.00 <sup>b</sup>                                     | 303.79                                | 2.43  | 0.83  | 0.34                                    | 2.61 <sup>b</sup>                      | T <sub>3</sub> F <sub>e</sub> |
| 1.67 <sup>c</sup>                   | 70.87 <sup>c</sup>                                      | 241.19                                | 3.30  | 0.82  | 0.27                                    | 1.65 <sup>d</sup>                      | T <sub>4</sub> F <sub>e</sub> |

F<sub>0</sub>: سطح کودی صفر، F<sub>e</sub>: سطح ۲۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، T<sub>1</sub>: رقم آزادی (Azadi)، T<sub>2</sub>: رقم یاواروس (Yavarus)، T<sub>3</sub>: رقم کرج ۱ (Karaj 1)،T<sub>4</sub>: رقم مرودشت (Marvdasht)، میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

Means followed by the same letter in each column are not significantly different (P&lt;0.05).

غلظت و جذب کل فسفر شاخساره: مقایسه میانگین اثر ارقام مختلف بر غلظت و جذب کل فسفر شاخساره نیز تفاوت معناداری را در سطح پنج درصد نشان دادند. همچنین مصرف کود فسفوری تأثیر مثبت و معناداری بر پارامترهای مذکور داشت. ارقام آزادی و مرودشت به ترتیب با ۳/۲۹ و ۲/۰۵ میلی گرم بر گرم ماده خشک، بیشترین و کمترین مقدار غلظت فسفر شاخساره را به خود اختصاص دادند (جدول ۵). بالاتر بودن غلظت فسفر در شاخساره رقم آزادی نشان دهنده توانایی زیادتر سیستم ریشه‌ای این رقم در جذب فسفر از خاک است. در شرایط بدون مصرف فسفر، میانگین غلظت فسفر شاخساره ۱/۹۵ میلی گرم بر گرم ماده خشک بود که با مصرف کود فسفوری به ۳/۳۹ رسید. کمترین مقدار جذب کل فسفر شاخساره، که از حاصل ضرب غلظت فسفر شاخساره در ماده خشک آن محاسبه گردید، با ۱/۳۵ میلی گرم در گلدان در رقم مرودشت و بیشترین مقدار آن با ۲/۵۷ میلی گرم در گلدان در رقم آزادی مشاهده شد. میانگین جذب کل فسفر در شرایط بدون مصرف کود فسفوری ۰/۸۹ میلی گرم در گلدان بود که با مصرف کود فسفوری به طور معناداری افزایش یافت و به ۲/۹۵ میلی گرم در گلدان رسید (جدول ۵). لیائو و همکاران (۲۰۰۵) و اوزترک و همکاران (۲۰۰۵) نیز نتایج مشابهی را گزارش نمودند (۲۱، ۳۱).

در شرایط کمبود فسفر رقم آزادی بیوماس ریشه بیش‌تری نسبت به سایر ارقام داشت. این تفاوت در بیوماس ریشه ارقام مختلف را می‌توان به تفاوت ژنتیکی بین آن‌ها نسبت داد. تغییر در مورفولوژی و بیوماس ریشه به‌عنوان یکی از استراتژی‌های گیاهان فسفرکارا برای دسترسی بیش‌تر به فسفر خاک در شرایط کمبود فسفر معرفی شده است. باگایوکو و همکاران (۲۰۰۰) عقیده دارند که گیاه ذرت با تشکیل یک سیستم ریشه‌ای گسترده به خوبی در برابر شرایط کمبود عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و زیاده آلومینیوم مقاومت می‌کند (۱). گزارش شده است که گیاهان در شرایط کمبود فسفر نسبت ریشه به شاخساره بیش‌تری تولید می‌کنند و این نسبت در گیاهان کارا تر بیش‌تر است (۹).

**وزن خشک شاخساره:** مقایسه میانگین‌ها تفاوت معناداری را از نظر وزن خشک شاخساره و همچنین نسبت شاخساره به ریشه در بین ارقام مختلف در سطح پنج درصد نشان داد. با مصرف کود فسفوری، ماده خشک تمامی ارقام به‌طور معناداری ( $P < 0.05$ ) افزایش یافت و به‌طور متوسط از ۰/۴۵ به ۰/۸۶ گرم در گلدان رسید (جدول ۳). بیش‌ترین پاسخ به کود مربوط به رقم مرودشت بود که از ۰/۳۶ به ۰/۸۲ گرم در گلدان رسید (جدول ۴). سپهر و همکاران (۲۰۰۹) نیز نتایج مشابهی را در مورد ارقام مختلف گندم گزارش نمودند (۳۴).



جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارها بر شاخص‌های کارایی محاسبه شده.

Table 5. Compare mean of the main effects of treatments on calculated efficiency indexes.

| کارایی مصرف فسفر<br>P utilization efficiency (g/mg) | کارایی جذب فسفر<br>P acquisition efficiency (%) | فسفر کارایی P efficiency (%) | جذب کل فسفر شاخساره<br>Shoot total P uptake (mg/pot) | غلظت فسفر شاخساره<br>Shoot P concentration (mg/g) | تیمارها<br>Treatments  |
|---|---|------------------------------|--|---|--|
| 0.33 <sup>c</sup>                                   | 32.90 <sup>a</sup>                              | 57.32 <sup>a</sup>           | 2.57 <sup>a</sup>                                    | 3.29 <sup>a</sup>                                 | آزادی (Azadi) (T <sub>1</sub> )  |
| 0.41 <sup>b</sup>                                   | 32.75 <sup>a</sup>                              | 56.51 <sup>a</sup>           | 1.95 <sup>b</sup>                                    | 2.61 <sup>b</sup>                                 | یاواروس (Yavarus) (T <sub>2</sub> )  |
| 0.39 <sup>b</sup>                                   | 29.10 <sup>ab</sup>                             | 47.48 <sup>ab</sup>          | 1.82 <sup>b</sup>                                    | 2.75 <sup>b</sup>                                 | کرج ۱ (Karaj 1) (T <sub>3</sub> )  |
| 0.54 <sup>a</sup>                                   | 23.44 <sup>b</sup>                              | 44.60 <sup>b</sup>           | 1.35 <sup>c</sup>                                    | 2.05 <sup>c</sup>                                 | مرودشت (Marvdasht) (T <sub>4</sub> )   |
| 0.53 <sup>a</sup>                                   | -   | -                            | 0.89 <sup>b</sup>                                    | 1.95 <sup>b</sup>                                 | سطح کودی صفر (F <sub>0</sub> )<br>No P fertilizer                                      |
| 0.30 <sup>b</sup>                                   | -   | -                            | 2.95 <sup>a</sup>                                    | 3.39 <sup>a</sup>                                 | سطح ۲۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک (F <sub>e</sub> )<br>20 mg P kg <sup>-1</sup> soil |

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

Means followed by the same letter in each column are not significantly different (P&lt;0.05).

## شاخص‌های کارایی محاسبه شده

**کارایی جذب فسفر:** کارایی جذب فسفر به معنی توانایی بیش‌تر گیاه در جذب این عنصر از خاک دارای محدودیت فسفر است و از نسبت جذب کل فسفر در شرایط بدون مصرف کود به جذب کل آن در شرایط مصرف کود به‌دست می‌آید. ارقام گندم مورد مطالعه تفاوت معناداری را در سطح احتمال پنج درصد از نظر کارایی جذب فسفر نشان دادند. نتایج مقایسه میانگین اثر نوع رقم بر شاخص کارایی جذب فسفر نشان داد که ارقام آزادی و یاواروس به‌ترتیب با ۳۲/۹۰ و ۳۲/۷۵ درصد بیش‌ترین و ارقام کرج ۱ و مرودشت به‌ترتیب با ۲۹/۱۰ و ۲۳/۴۴ درصد کم‌ترین مقدار این شاخص را به خود اختصاص دادند (جدول ۵). نتایج این پژوهش با نتایج سپهر و همکاران (۲۰۰۹) همخوانی داشت (۳۴).

مکانیسم اصلی مرتبط با افزایش کارایی جذب، نوع مورفولوژی و معماری ریشه است که بر اساس افزایش حجم و سطح ریشه، افزایش نسبت ریشه به شاخساره، افزایش طول تارهای کشنده و توانایی

ژنوتیپی برای تشکیل اجتماعاتی با میکروارگانسیم‌های ریزوسفر خاک (میکوریزا، باکتری‌ها و قارچ‌ها) استوار است و منجر به تسهیل جذب فسفر و توانایی ژنوتیپ برای ترشح ترکیبات آلی (مانند فسفات‌ها و اسیدهای آلی) خواهد شد که آن‌ها را قادر به آزادسازی فسفر از منابع آلی و معدنی خاک می‌نماید (۳۲). تفاوت‌های ژنوتیپی زیادی در بین ارقام از نظر جذب فسفر گزارش شده است و بسیاری از پژوهش‌گران به نقش پارامترهای ریشه‌ای در این مورد اشاره کرده‌اند. مارشنر (۱۹۹۸) تفاوت‌های ژنتیکی موجود بین ارقام مختلف گیاهان را عاملی مهم و تعیین‌کننده در کارایی گزارش کرد و آن را با ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی ریشه مرتبط دانست (۲۶). کراسیلنیکوف و همکاران (۲۰۰۳) به‌منظور ارزیابی تأثیر تفاوت در طول ریشه‌ها، طول تارهای کشنده و فرایندهای ریزوسفری بر شاخص کارایی جذب فسفر، آزمایشی گلدانی با استفاده از هشت رقم لوبیا و یک خاک دارای فسفر کم انجام دادند. این پژوهش‌گران تفاوت معناداری را در طول ریشه و طول تارهای کشنده

هر واحد فسفر جذب شده ماده خشک بیشتری تولید می‌کنند و این نوعی سازگاری در برابر شرایط کمبود فسفر محسوب می‌شود. جامی معینی و همکاران (۲۰۱۰) نیز کاهش شاخص کارایی مصرف را با افزایش سطح کود کاربردی در ارقام مختلف سیب‌زمینی گزارش کردند (۱۴).

**فسفرکارایی:** به‌طور عمده فسفرکارایی از نسبت عملکرد در شرایط محدودیت فسفر به عملکرد در شرایط فراهمی آن به‌دست می‌آید.

نتایج این پژوهش نشان داد که اثر رقم بر فسفرکارایی در سطح احتمال پنج درصد معنادار بود و مقایسه میانگین اثر نوع رقم بر فسفرکارایی نشان داد که رقم آزادی با  $57/3$  درصد بیش‌ترین و رقم مرودشت با  $44/6$  درصد کم‌ترین مقدار فسفرکارایی را داشت (جدول ۵). شاخص‌های مختلفی توسط پژوهش‌گران به‌عنوان شاخص فسفرکارایی در نظر گرفته می‌شوند. گود و همکاران (۲۰۰۴) دو مفهوم کارایی در جذب و کارایی در مصرف عنصر را دو مؤلفه عمده در کارایی عنصر غذایی توسط گیاه معرفی نموده و بیان داشتند که کارایی بهتر فسفر در گیاهان از طریق بهبود هر دو مؤلفه یعنی کارایی جذب و کارایی استفاده از فسفر در داخل گیاه حاصل می‌گردد. این پژوهش‌گران با بررسی فسفرکارایی ارقام مختلف گندم و جو تفاوت‌های کارایی را بیش‌تر متأثر از طول تارهای کشنده و ترشحات ریشه‌ای بیان کردند (۸). اوزترک و همکاران (۲۰۰۵) ژنوتیپ‌های مختلف گندم نان و دوروم را از نظر فسفرکارایی در یک خاک آهکی دارای کمبود فسفر مورد بررسی قرار داده و کارایی در جذب، مهم‌ترین مکانیسم مؤثر در تفاوت فسفرکارایی بین ارقام مورد مطالعه گزارش شد. این پژوهش‌گران از عملکرد نسبی اندام هوایی به‌عنوان شاخص فسفرکارایی استفاده کرده و نشان دادند که پارامترهای غلظت کل فسفر در گیاه و عملکرد شاخساره در حالت فسفر ناکافی نیز می‌توانند به‌عنوان شاخص قابل اطمینان

ریشه ژنوتیپ‌های مختلف مشاهده کردند و پارامترهای ریشه‌ای مذکور را عامل مؤثر در کارایی جذب فسفر توسط گیاهان معرفی کردند (۱۷). ونس و همکاران (۲۰۰۳) با بررسی ارقام مختلف گندم و جو، تغییر در مورفولوژی ریشه (افزایش انشعابات ریشه، طول مؤثر ریشه و تارهای کشنده و افزایش نسبت ریشه به شاخه) و نیز افزایش ترشحات ریشه‌ای را عامل اختلاف ارقام در جذب فسفر دانستند (۳۸). استین‌گروب و همکاران (۲۰۰۴) گزارش دادند که گیاه ذرت در شرایط کمبود فسفر به‌طور معنی‌داری قطر ریشه‌ها و نسبت طول ساقه به ریشه‌ها را کاهش می‌دهد. به عقیده آنان گیاه ذرت به‌طور فعال قابلیت جذب و کارایی جذب فسفر را افزایش داده و به شرایط کمبود فسفر سازگار می‌شود (۳۷). بنابراین گیاهان دارای سیستم ریشه‌ای قوی‌تر و گسترده‌تر در جذب فسفر از خاک و انتقال آن به اندام هوایی کاراترند و توجه به ویژگی‌های ژنتیکی ارقام در این زمینه می‌تواند توصیه کودی مؤثرتری را به دنبال داشته باشد و منجر به کاهش استفاده از کودهای شیمیایی و تخریب محیط زیست گردد.

**کارایی مصرف فسفر:** کارایی مصرف فسفر نشانگر توانایی گیاه برای تولید عملکرد بیش‌تر به‌ازای هر واحد از عنصر غذایی جذب شده و توانایی بیش‌تر در انتقال عنصر از اندام هوایی به دانه می‌باشد و از نسبت ماده خشک به جذب کل فسفر محاسبه می‌شود. ارقام مرودشت و آزادی به‌ترتیب با  $0/54$  و  $0/33$  گرم ماده خشک بر میلی‌گرم فسفر جذب‌شده، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار این شاخص را به خود اختصاص دادند. مصرف کود فسفوری کاهش این شاخص را در پی داشت که به‌طور میانگین از  $0/53$  به  $0/30$  رسید (جدول ۵).

گیل و همکاران (۲۰۰۴) با بررسی واریته‌های گندم بهاره، تفاوت‌های معناداری را بین ارقام از نظر میزان جذب فسفر و کارایی مصرف فسفر گزارش کردند (۷). گیاهان کاراتر از نظر مصرف فسفر، به‌ازای

که بین بیشتر پارامترهای ریشه‌ای از جمله وزن تر و خشک ریشه، سطح، طول و حجم ریشه و نیز وزن خشک شاخساره با غلظت و جذب کل فسفر شاخساره همبستگی مثبت و معناداری وجود داشت ولی همبستگی این پارامترها با شاخص کارایی مصرف فسفر منفی بود. با افزایش نسبت شاخساره به ریشه، غلظت و جذب کل فسفر شاخساره و همین‌طور شاخص کارایی جذب فسفر و فسفرکارایی کاهش یافت و همبستگی بین نسبت شاخساره به ریشه با این پارامترها منفی بود. کاهش غلظت فسفر شاخساره با افزایش نسبت شاخساره به ریشه را می‌توان با اثر رقت عنصر غذایی در شاخساره گیاه مرتبط دانست. رابطه مثبت و معناداری ( $r=0.80$ ) بین نسبت شاخساره به ریشه با شاخص کارایی مصرف فسفر وجود داشت (شکل ۱). بنابراین می‌توان گفت که گسترش سیستم ریشه‌ای گیاهان، که در ارقام فسفرکارا به وضوح دیده می‌شود، افزایش جذب فسفر از خاک و افزایش فسفرکارایی را در پی خواهد داشت.

برای ارزیابی فسفرکارایی باشند (۳۱). سپهر و همکاران (۲۰۰۹) کارایی ارقام مختلف غلات را از نظر جذب فسفر مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ارقام از لحاظ تعداد پنجه، غلظت فسفر در اندام هوایی، فسفر کل گیاه و وزن خشک شاخساره تفاوت معنادار دارند. از شاخص عملکرد نسبی شاخساره به‌عنوان شاخص کارایی فسفر استفاده گردید (۳۴). لیائو و همکاران (۲۰۰۵) ۱۸ رقم غلات در دو نوع خاک با فسفر کل کم و زیاد را در استرالیا مطالعه کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که تفاوت‌های معناداری بین ارقام در رشد و جذب فسفر در هر دو نوع خاک وجود دارد. در این آزمایش کل فسفر جذب شده توسط گیاه با عملکرد اندام هوایی همبستگی خوبی نشان داد و به‌عنوان پارامتری قابل اطمینان برای شناسایی ارقام فسفرکارا معرفی شد (۲۱).

**رابطه پارامترهای رشد و شاخص‌های کارایی:** همبستگی بین پارامترهای رشد اندازه‌گیری یا محاسبه شده با غلظت و جذب کل فسفر شاخساره و همچنین شاخص‌های کارایی محاسبه شده (جدول ۶) نشان داد

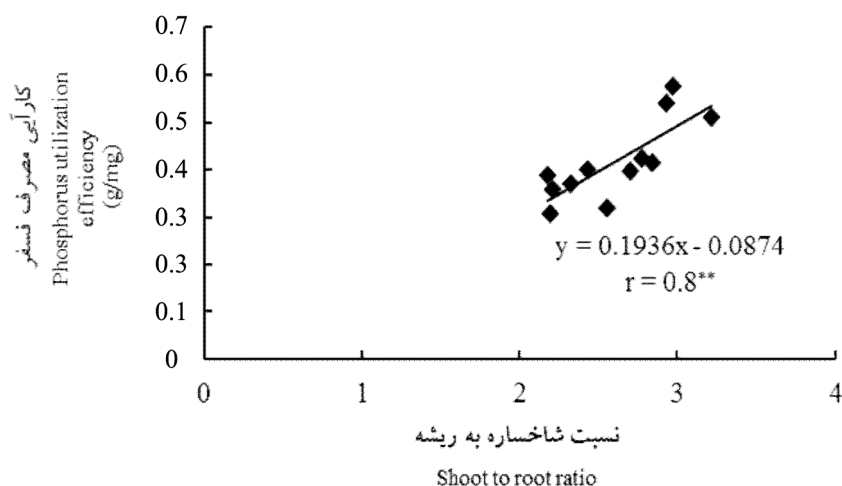
جدول ۶- همبستگی پارامترهای رشد اندازه‌گیری شده و شاخص‌های کارایی محاسبه شده.

Table 6. Correlation between measured growth parameters and calculated efficiency indexes.

| فسفرکارایی<br>P efficiency | کارایی مصرف فسفر<br>P utilization<br>efficiency | کارایی جذب فسفر<br>P acquisition<br>efficiency | جذب فسفر شاخساره<br>Shoot total P<br>uptake | غلظت فسفر شاخساره<br>Shoot P<br>concentration |   |
|----------------------------|---|--|---|---|---|
| 0.59*                      | -0.95**   | 0.70*  | 0.89**                                      | 0.93**  | وزن تر ریشه<br>Root wet weight              |
| 0.61*                      | -0.95**   | 0.69*  | 0.95**                                      | 0.97**  | وزن خشک ریشه<br>Root dry weight             |
| 0.61*                      | -0.96**   | 0.73**   | 0.93**                                      | 0.95**  | سطح ریشه<br>Root surface area               |
| 0.57 <sup>ns</sup>         | -0.92**   | 0.72**   | 0.86**                                      | 0.89**  | حجم ریشه<br>Root volume                     |
| 0.61*                      | -0.95**   | 0.69*  | 0.95**                                      | 0.97**  | طول ریشه<br>Root length                     |
| 0.82**                     | -0.68*  | 0.76**   | 0.87**                                      | 0.72**  | وزن خشک شاخساره<br>Shoot dry weight         |
| -0.13 <sup>ns</sup>        | 0.80**  | -0.32 <sup>ns</sup>                            | -0.65*                                      | -0.78**                                       | نسبت شاخساره به ریشه<br>Shoot to root ratio |

\*\*، \* و <sup>ns</sup> به ترتیب معنادار در سطوح احتمال ۱٪، ۵٪ و بدون اختلاف معنادار.

\*\*، \* and <sup>ns</sup> Significant at the 0.01 and 0.05 level and are not significant, respectively.

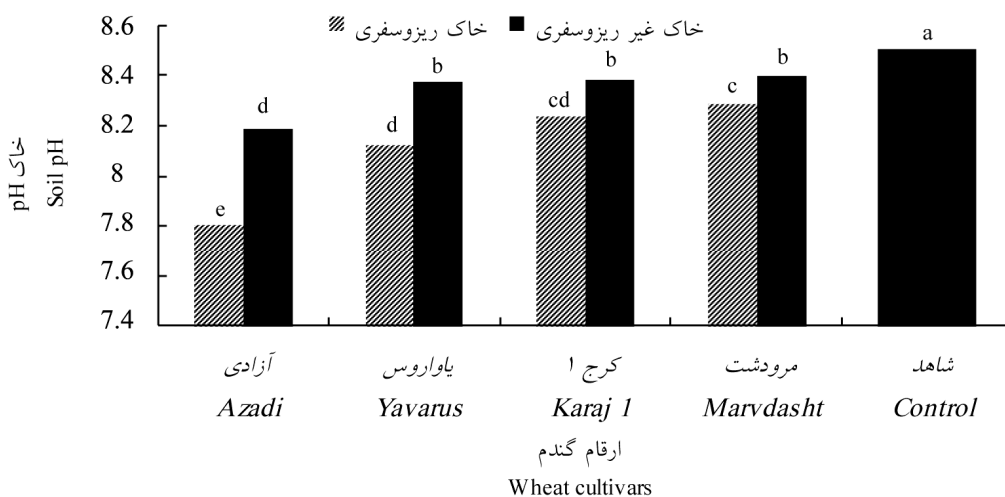


شکل ۱- همبستگی بین نسبت شاخساره به ریشه و کارایی مصرف فسفر.

Figure 1. Correlation between shoot to roor ratio and phosphorus utilization efficiency.

در ریزوسفر ارقام مورد مطالعه بین ۰/۱۲-۰/۳۸ بود. بیشترین کاهش pH در ریزوسفر رقم آزادی مشاهده شد (۰/۳۸). کاهش pH در ریزوسفر ارقام یاوروس و کرج ۱ به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۱۵ بود و رقم مرودشت با کاهش ۰/۱۲ کمترین تأثیر را بر pH داشت.

تأثیر کشت ارقام گندم بر pH و توزیع اجزای فسفر خاک دارای محدودیت فسفر: بررسی pH خاکهای ریزوسفیری و غیرریزوسفیری در سطح کودی صفر نشان داد که مقادیر pH در ریزوسفر همه ارقام مورد مطالعه به طور معناداری ( $P < 0.05$ ) نسبت به خاک غیرریزوسفیری کمتر بود (شکل ۲). کاهش pH خاک



شکل ۲- pH خاکهای ریزوسفیری و غیرریزوسفیری ارقام مختلف گندم در شرایط محدودیت فسفر.

Figure 2. Soil pH in the rhizosphere and non-rhizosphere soil of wheat cultivars in low phosphorus condition.

گیاه در خاک شامل مقدار فسفر جذب شده به وسیله گیاه (ریشه و شاخساره) و فسفر قابل جذب باقیمانده در خاک بعد از برداشت گیاه است (۲۹). کم‌ترین مقدار فسفر آلی با میانگین ۱۲۰/۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک شاهد (بدون گیاه) و بیش‌ترین مقدار آن در خاک کشت شده با رقم آزادی (۱۳۹/۳۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد (جدول ۷). مقایسه میانگین اثرات اصلی نوع رقم بر اجزای فسفر (جدول ۷) نشان داد که خاک شاهد (بدون گیاه) بیش‌ترین مقدار اجزای فسفر معدنی شامل دی‌کلسیم فسفات (۱۵/۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، اکتا کلسیم فسفات (۱۱۳/۹۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، فسفر پیوند شده با آلومینیوم (۱۳/۵۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، فسفر پیوند شده با آهن (۱۲/۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و آپاتیت (۷۶۹/۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) را داشت. کشت ارقام مختلف گندم سبب کاهش معنادار اجزای فسفر معدنی خاک گردید. گرچه این کاهش برای تمام اشکال فسفر و در مورد تمام ارقام گندم یکسان نبود. بلیک و همکاران (۲۰۰۳) گزارش کردند که کشت گیاه بدون مصرف کود فسفوری سبب کاهش اجزای معدنی فسفر گردید که نشان‌دهنده تبدیل این اجزا به اجزای قابل جذب برای گیاه است (۲). ارقام آزادی و مروشت به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر اجزای فسفر معدنی را داشتند (جدول ۷). رقم آزادی به‌عنوان یک رقم فسفرکارا بیش‌ترین توانایی را در کاهش اجزای فسفر معدنی خاک داشت. به‌عنوان مثال مقدار آپاتیت از ۷۶۹/۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک شاهد (بدون گیاه) به ۶۹۴/۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک کشت شده با این رقم رسید (جدول ۷). بخشی از کاهش آپاتیت و اکتا کلسیم فسفات در خاک مورد مطالعه، احتمالاً ناشی از تغییر شکل این اجزا و تبدیل آنها به سایر اجزای با حلالیت بیش‌تر بوده است و لزوماً توسط گیاه جذب نشده است. همچنین بخش

کاهش pH در ریزوسفر گیاهان توسط سایر پژوهش‌گران نیز گزارش شده است. ما و همکاران (۲۰۰۹) با بررسی pH در ریزوسفر تعدادی از گونه‌های گیاهان علفی میانگین کاهش ۰/۵ واحدی pH و جرج و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعات خود کاهش pH در ریزوسفر شبدر را گزارش کردند (۲۳، ۶). هینسینگر و همکاران (۲۰۰۳) منابع تغییرات pH در ریزوسفر را بررسی کرده و نقش عواملی مانند توازن در تبادل کاتیونی و آنیونی، ترشح اسیدهای آلی، ترشحات ریشه‌ای و تنفس، فرایندهای مرتبط با احیاء و اثرات محدودیت‌های محیطی و تغذیه‌ای را در این زمینه مهم دانستند (۱۱).

تأثیر ریزوسفر ۴ رقم گندم مورد مطالعه به همراه شاهد (گلدان بدون گیاه) بر تغییر اجزای فسفر خاک‌های ریزوسفیری و غیرریزوسفیری در سطح کودی صفر مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه میانگین اثر اصلی نوع رقم بر فسفر اولسن، فسفر محلول و فسفر کل نشان داد که خاک شاهد (بدون گیاه) بیش‌ترین مقدار فسفر محلول (۱/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، فسفر اولسن (۳/۵۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و فسفر کل (۱۰۹۱/۶) را داشت. کاشت ارقام گیاهی کاهش معنادار ( $P < 0/05$ ) این اجزا را به دنبال داشت. ارقام آزادی و مروشت به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار فسفر محلول (۱/۴۳، ۱/۷۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، فسفر اولسن (۱/۱۵ و ۲/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و فسفر کل (۱۰۱۸/۰ و ۱۰۶۸/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) را به خود اختصاص دادند (جدول ۷). در مقایسه با توده خاک فسفر اولسن در ریزوسفر ارقام مورد مطالعه کاهش یافت که این امر نشان‌دهنده سرعت کم‌تر تبدیل سایر شکل‌های فسفر به فسفر قابل جذب در مقایسه با سرعت جذب فسفر توسط گیاه است که منجر به کاهش فسفر اولسن در خاک ریزوسفیری می‌گردد (۲، ۳۵). کل فسفر قابل جذب

ریزوسفر می‌تواند نتیجه‌ای از تغییرات شیمیایی ایجاد شده توسط ریشه گیاهان و فعالیت‌های میکروبی باشد که به تغییر شکل این جزء از فسفر به اشکال با حلالیت بیشتر می‌انجامد تا در شرایط کمبود فسفر به‌عنوان یک منبع فسفری مورد استفاده گیاه قرار گیرد (۲، ۲۳).

دیگر آن ناشی از خطای روش جزءبندی می‌باشد. نجفی و توفیقی (۲۰۰۶) نیز اثر ریزوسفر گیاه برنج را بر اشکال فسفر معدنی در خاک‌های شالیزاری مورد بررسی قرار داده و کاهش معنی‌دار آپاتیت را در خاک ریزوسفری بیش‌تر خاک‌های مورد مطالعه در شرایط بدون مصرف کود فسفری گزارش کردند (۲۹). کاهش فسفر قابل‌عصاره‌گیری با اسید (آپاتیت) در

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر نوع رقم بر فسفر اولسن، فسفر محلول، فسفر کل و فسفر آلی خاک دارای محدودیت فسفر.

Table 7. Soil inorganic P fractions, Olsen P, soluble P and total P as affected by plant cultivars.

| رقم گیاه<br>Plant cultivar           | فسفر اولسن<br>Olsen P | فسفر محلول<br>Soluble P | فسفر کل<br>Total P  | فسفر آلی<br>Organic P | دی‌کلسیم فسفات<br>DCP | اکتا کلسیم فسفات<br>OCP | فسفر پیوندشده با آلومینیوم<br>Al-P | فسفر پیوندشده با آهن<br>Fe-P | آپاتیت<br>Apatite-P  |
|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------------|
| (mg kg <sup>-1</sup> )               |                       |                         |                     |                       |                       |                         |                                    |                              |                      |
| آزادی (Azadi) (T <sub>1</sub> )      | 1.15 <sup>d</sup>     | 1.43 <sup>b</sup>       | 1018.0 <sup>c</sup> | 139.31 <sup>a</sup>   | 4.98 <sup>d</sup>     | 79.30 <sup>d</sup>      | 8.58 <sup>c</sup>                  | 7.13 <sup>d</sup>            | 694.60 <sup>d</sup>  |
| یاواروس (Yavarus) (T <sub>2</sub> )  | 1.50 <sup>c</sup>     | 1.73 <sup>a</sup>       | 1073.1 <sup>b</sup> | 138.77 <sup>a</sup>   | 7.59 <sup>c</sup>     | 90.61 <sup>c</sup>      | 12.69 <sup>a</sup>                 | 8.62 <sup>c</sup>            | 723.52 <sup>bc</sup> |
| کرج ۱ (Karaj 1) (T <sub>3</sub> )    | 1.43 <sup>c</sup>     | 1.46 <sup>b</sup>       | 1071.0 <sup>b</sup> | 136.48 <sup>b</sup>   | 6.54 <sup>c</sup>     | 83.77 <sup>d</sup>      | 10.34 <sup>b</sup>                 | 8.22 <sup>cd</sup>           | 711.77 <sup>cd</sup> |
| مروذشت (Marvdasht) (T <sub>4</sub> ) | 2.05 <sup>b</sup>     | 1.76 <sup>a</sup>       | 1068.2 <sup>b</sup> | 131.21 <sup>c</sup>   | 12.51 <sup>b</sup>    | 97.41 <sup>b</sup>      | 13.25 <sup>a</sup>                 | 10.51 <sup>b</sup>           | 732.63 <sup>b</sup>  |
| شاهد (Control)                       | 3.57 <sup>a</sup>     | 1.83 <sup>a</sup>       | 1091.6 <sup>a</sup> | 120.73 <sup>d</sup>   | 15.17 <sup>a</sup>    | 113.95 <sup>a</sup>     | 13.57 <sup>a</sup>                 | 12.78 <sup>a</sup>           | 769.78 <sup>a</sup>  |

\* میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنادار در سطح احتمال پنج درصد به روش دانکن می‌باشند.

Means followed by the same letter in each column are not significantly different (P<0.05).

منابع فسفری خاک از طریق کاشت ارقام فسفرکارا در این پژوهش به وضوح مشاهده شد. به‌نظر می‌رسد که تفاوت در ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه از یک سو و توسعه بیش‌تر ریشه‌ها از سوی دیگر دسترسی گیاه را به حجم بیش‌تری از خاک میسر نموده که در جذب بیش‌تر فسفر مؤثر بوده است. ارقام فسفرکارا در شرایط کمبود فسفر از طریق اسیدی کردن محیط ریشه و ترشح اسیدهای آلی امکان استفاده بهتر از فسفر خاک و غلبه بر شرایط کمبود فسفر را فراهم

### نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که خصوصیات مورفولوژیک ریشه ارقام فسفرکارا به‌طور معناداری نسبت به ارقام فسفرناکارا متفاوت است. همچنین همبستگی مثبت و معناداری بین خصوصیات ریشه‌ای این ارقام با شاخص‌های مختلف فسفرکارایی وجود داشت. ارقام فسفرکارا در شرایط کمبود فسفر بیوماس ریشه بیش‌تری تولید نمودند. علاوه بر این، تغییرات pH در ریزوسفر بر فسفر خاک و قابلیت دسترسی به آن مؤثر بود. کاهش pH ریزوسفر و امکان تغییر در

اقتصادی تولید محصول را افزایش و اثرات منفی استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی فسفوری بر محیط زیست را کاهش می‌دهد و امنیت غذایی جهانی را به دنبال خواهد داشت.

می‌سازند. شناسایی راهکارهایی که گیاهان مختلف برای سازگاری با شرایط کمبود عناصر کم‌تحرک خاک به کار می‌گیرند و توسعه گیاهان با قدرت بهره‌برداری بیش‌تر از عناصر خاک در شرایط نامساعد، بازدهی

### منابع

1. 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 Soil*. 225: 117-127.
2. Blake, L., Jhonston, A.E., Poulton, P.R., and Goulding, K.W.T. 2003. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. *Plant Soil*. 254: 245-261.
3. Bohm, W. 1979. *Methods of Studying Root Systems*. Ecological Studies. Springer-verlag, Berlin, 188p.
4. Gahoonia, T.S., and Nielsen, N.E. 1991. A method to study rhizosphere processes in thin soil layers of different proximity to roots. *Plant Soil*. 135: 143-146.
5. Gee, G.W., and Bauer, J.W. 1986. Particle Size Analysis. P 383-411, In: A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. SSSA, Madison, WI., USA.
6. George, T.S., Turner, B.L., Gregory, P.J., Cade-menun, B.J., and Richardson, A.E. 2006. Depletion of organic phosphorus from oxisols in relation to phosphatase activities in the rhizosphere. *Eur. J. Soil Sci*. 57: 47-57.
7. 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.). *Arch. Agron. Soil Sci*. 56: 563-572.
8. 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 Plant Sci*. 9: 597-605.
9. Gutschick, V. 1993. Nutrient-limited growth rates: roles of nutrient-use efficiency and of adaptations to increase uptake rate. *J. Exp. Bot*. 44: 41-51.
10. Hesse, P.R. 1971. *A Text Book of Soil Chemical Analysis*. John Murray, London, 520p.
11. Hinsinger, P., Plassard, C., Tang, C., and Jaillard, B. 2003. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. *Plant Soil*. 248: 43-59.
12. Hooper, S., Heaney, A., and Gordon, S. 2000. Phosphorus nutrition in Australian agriculture. *Aust. commod*. 72. 341-347.
13. Jackson, M.L. 1958. *Soil Chemical Analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 930p.
14. Jami Moeini, M., Modarres Sanavy, S.A.M., Keshavarz, P., Sorooshzadeh, A., and Ganjeali, A. 2010. Relationship between root morphological properties and Nitrogen utilization efficiency in six cultivars of potato. *Iran. J. Field Crops Res*. 8: 3. 444-454. (In Persian)
15. Jiang, B., and Gu, Y. 1989. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Fertil. Res*. 20: 159-165.
16. Jiang, H., Yang, J., Zhang, J., and Hou, Y. 2010. Screening of tolerant maize genotypes in the low phosphorus field soil. 19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia.
17. Krasilnikoff, G., Gahoonia, T., and Nielsen, N.E. 2003. Variation in phosphorus uptake efficiency by genotypes of cowpea (*Vigna unguiculata*) due to differences in root and root hair length and induced rhizosphere processes. *Plant Soil*. 251: 83-91.

18. Kuchenbuch, R., and Jungk, A. 1982. A method for determining concentration profiles at the soil-root interface by thin slicing rhizosphere soil. *Plant Soil*. 68: 391-394.
19. Kuo, S. 1996. Phosphorus. P 869-919, In: R.L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods*, SSSA, Madison, WI., USA.
20. Liao, H., Ge, Zh., and Yan, X.L. 2001. Ideal root architecture for phosphorus acquisition of plants under water and phosphorus coupled stresses: From simulation to application. *Chin. Sci. Bull.* 46: 16. 1346-1357.
21. Liao, M.T., Hocking, P.J., and Dong, B. 2005. Screening for genotypic variation in phosphorus uptake efficiency in cereals on Australian soils. P 114-115, In: C.J. Li (Ed.), *Plant nutrition for food security, human health and environmental protection*. Tsinghua University Press. Beijing, China.
22. Loeppert, R.H., and Suarez, G.L. 1996. Carbonates and Gypsum. P 437-474, In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. SSSA, Madison, WI, USA.
23. Ma, B., Zhou, Z.Y., Zhang, C.P., Zhang, G., and Hu, Y.J. 2009. Inorganic phosphorus fractions in the rhizosphere of xerophytic shrubs in the Alxa Desert. *J. Arid Environ.* 73: 55-61.
24. Malakouti, M.J., and Gheibi, M.N. 2000. Determination of critical levels of nutrients in soil, plant and fruit for the quality and yield improvements of Iran's strategic crops. *Amoozesh-e-Keshavarzi*, Tehran, 92p.
25. Malakouti, M.J. 2005. Sustainable agriculture and yield increase through balanced fertilization. *Sana*, Tehran, 460p.
26. Marschner, H. 1998. Role of root growth, arbuscular mycorrhiza, and root exudates for the efficiency in nutrient acquisition. *Field and Crops Res.* 56: 203-207.
27. McGrath, S.P., Shen, Z.G., and Zhao, F.J. 1997. Heavy metals uptake and chemical changes in the rhizosphere of *Thlaspi caerulescens* and *Thlaspi ochroleucum* grown in contaminated soils. *Plant Soil*. 188: 153-159.
28. Miyasaka, S.C., and Habte, M. 2001. Plant mechanisms and mycorrhizal symbiosis to increase phosphorus uptake efficiency. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32: 1101-1147.
29. Najafi, N., and Towfighi, H. 2006. Effects of rhizosphere of rice plant on the inorganic phosphorus fractions in the paddy soils of north of Iran: 1-Native soil phosphorus fractions. *Iran. J. Agric. Sci.* 37: 919-933. (In Persian)
30. Newman, E.I. 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.* 3: 139-145.
31. 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 Soil*. 269: 69-80.
32. Parentoni, S.N., and de Souza Júnior, C.L. 2008. Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency in tropical maize genotypes. *Pesquisa. agropecuaria bras., Brasileira.* 43: 7. 893-901.
33. Riley, D., and Barber, S.A. 1969. Bicarbonate accumulation and pH changes at the soybean (*Glycine max* (L.) Merr) root-soil interface. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 33: 905-908.
34. 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. *Int. J. Plant Prod.* 3: 3. 17-28.
35. Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Zh., Chen, X., Zhang, W., and Zhang, F. 2011. Phosphorus dynamics: From soil to plant. *Plant Physiol.* 156: 997-1005.
36. Sparks, D.L. 1996. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. SSSA, Madison, WI., USA.
37. Steingrobe, B., Schulze, J., Fischinger, S., Zach, A., Mint, K., and Classen, N. 2004. How does maize increase P-uptake efficiency during ontogenesis when grown on low P soils? *Rhizosphere international congress abstracts*, 12-17 Sept. 2004. Munich, Germany.
38. Vance, C., Uhde-Stone, C., and Allan, D.L. 2003. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytol.* 157: 423-447.



39. Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
40. Wenzell, W.W., Wieshammer, G., Fitz, W.J., and Puschenreiter, M. 2001. Novel rhizobox design to assess rhizosphere characteristics at high spatial resolution. *Plant Soil.* 237: 37-45.
41. Youssef, R.A., and Chino, M. 1988. Development of a new rhizobox system to study the nutrient status in the rhizosphere. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 34: 461-465.



## Assessing some root morphological properties and efficiency indexes in several phosphorus efficient and inefficient cultivars of wheat

R. Khalili-Rad<sup>1</sup> and \*H. Mirseyed Hosseini<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Graduate, Dept. of Soil Science and Engineering, University of Tehran,

<sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, University of Tehran

Received: 10/26/2015; Accepted: 05/08/2016

### Abstract

**Background and Objectives:** Regarding to phosphorus as a low mobility element in soil, identification and application of traits of cultivars that are recognized as phosphorus efficient, will be very important for crop improvement and optimum usage of soil. Maximizing the phosphorus use efficiency of crops in the system is one of the most important approaches considered in phosphorus management. The first step in improving effectiveness of nutrient management practices is having information about how plant root systems interact with the soil. Because of limited researches on function of roots at the uptake of low mobile elements, this investigation was conducted to study some root morphological properties of several phosphorus efficient and phosphorus inefficient cultivars of wheat and their relations with phosphorus efficiency indexes.

**Materials and Methods:** In this study, some root morphological properties of several phosphorus-efficient and phosphorus-inefficient cultivars of wheat (*Triticum aestivum* L.) were compared and their correlations with efficiency indexes were studied. Furthermore, the rhizosphere effect of each cultivar on soil pH and soil phosphorus fractions was investigated. A greenhouse experiment on wheat cultivars as a factorial in completely randomized design was conducted with 8 treatments and 3 replications for six weeks. Experimental factors were different cultivars (2 phosphorus efficient i.e. *Azadi* and *Yavarus* and 2 phosphorus inefficient i.e. *Karaj 1* and *Marvdasht*) and soil P levels (natural level of soil P and 20 mg P kg<sup>-1</sup> soil). To understand root properties affecting phosphorus efficiency related to cultivar, some root morphological properties (root wet weight, root dry weight and root volume) were measured and then total root length and root surface area were calculated. Shoot wet and dry weight and shoot to root ratio in different cultivars was measured and calculated, too. Finally, total phosphorus uptake, phosphorus acquisition efficiency, phosphorus utilization efficiency and phosphorus efficiency were calculated and correlation between root morphological properties and efficiency indexes was investigated.

**Results:** There was a significant ( $P < 0.05$ ) difference of root morphological properties between phosphorus efficient and phosphorus inefficient cultivars and with higher efficient cultivars produced stronger and more extensive root system. *Azadi* and *Marvdasht* cultivars had the highest and lowest root quantitative properties (wet weight (2.27 and 1.28 g), dry weight (0.31 and 0.20 g), total root length (278.4 and 179.04 Cm), root surface area (90.2 and 56.06 Cm<sup>2</sup>/pot) and root volume (2.3 and 1.4 mL/pot), respectively. Also, different cultivars showed significant differences ( $P < 0.05$ ) in the dry weight of shoots, shoot to root ratio, shoot P concentration and shoot total uptake as well as phosphorus acquisition efficiency and phosphorus utilization efficiency. Dry matter significantly ( $P < 0.05$ ) increased for all cultivars with phosphorus fertilization. There was a positive and significant correlation between root parameters of studied cultivars with different efficiency indexes such as shoot phosphorus concentration and shoot total phosphorus absorption but there was a negative correlation between mentioned parameters with phosphorus utilization efficiency index. Soil pH values in the rhizosphere of all four wheat cultivars were significantly ( $P < 0.05$ ) lower than those in the corresponding non-rhizosphere soil. pH decreased between 0.12-0.38 in the rhizosphere of studied cultivars. *Azadi* and *Marvdasht* cultivars showed the highest and the lowest amount of pH decreases, respectively. In all wheat cultivars phosphorus forms (DCP-P, OCP-P, Al-P and Apatite-P) decreased significantly ( $P < 0.05$ ). This difference was not equal for all cultivars and all fractions.

**Conclusion:** The differences are attributed to genetic differences among cultivars, root size, root morphology and changes in the rhizosphere. Identification of plants strategies for adoption to low nutrient condition and the right selection of the cultivars can improve the uptake of P in P-deficient soils and crop production.

**Keywords:** Root, Phosphorus efficiency, Phosphorus acquisition efficiency, Phosphorus utilization efficiency, Soil phosphorus fractions

\* Corresponding Authors; Email: [mirseyed@ut.ac.ir](mailto:mirseyed@ut.ac.ir)