اثر رایزوسفر گیاه برنج بر شکل‌های فسفر معدنی در خاک‌های شالیزاری شمال ایران: پس از کاربرد کود فسفر

نصرت اله نجفی[۱]* و حسن توفیقی[۲]

[۱] استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، [۲] دانشیار، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۹/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۷/۱۹)

چکیده

در یک آزمایش گلخانه‌ای، تغییرات فسفر قابل‌جذب و شکل‌های فسفر معدنی در رایزوسفر برنج (*Oryza sativa* L.) رقم خزر پس از مصرف ۴۰ میلی‌گرم فسفر به‌صورت مونوکلسیم فسفات بر کیلوگرم خاک‌های شالیزاری شمال ایران بررسی گردید. آزمایش به‌صورت فاکتوریل ۲×۱۴ و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با دو فاکتور نوع خاک در ۱۴ سطح (۱۰ خاک آهکی و چهار خاک غیرآهکی و اسیدی) و کشت گیاه در دو سطح (با کشت و بدون کشت برنج) و هر سطح با دو تکرار انجام شد. لوله‌های خاک را که به روش خاصی طراحی و در ابتدای آزمایش در تمامی گلدان‌های باکشت و بدون کشت برنج قرار داده شده بودند، پس از گذشت سه ماه، از خاک رایزوسفر (گلدان‌های باکشت) و توده خاک (بدون کشت)، به‌طور هم‌زمان بیرون کشیده و بلافاصله شکل‌های فسفر معدنی در خاک‌های آهکی به روش عصاره‌گیری متوالی Jiang and Gu (1989) و در خاک‌های غیرآهکی به روش Kuo (1996) و فسفر قابل‌جذب به روش اولسن اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که در همه ۱۴ خاک مورد مطالعه، فسفر قابل‌استخراج با عصاره‌گیر اولسن در خاک رایزوسفر برنج (باکشت) به‌طور معنی‌داری از توده خاک (کشت نشده) کمتر بود ولی پس از افزودن فسفر جذب شده به‌وسیله گیاه به فسفر قابل‌استخراج باقی‌مانده در خاک رایزوسفر، کل فسفر قابل‌جذب در خاک رایزوسفر بیشتر از توده خاک گردید. در خاک‌های آهکی، مقدار فسفر به شکل‌های دی‌کلسیم فسفات، اکتاکلسیم فسفات و فسفات‌های آلومینیوم در خاک رایزوسفر به‌طور معنی‌داری از توده خاک (کشت نشده) کمتر بود در حالی‌که مقدار فسفر به شکل‌های فسفات‌های آهن و فسفر محبوس در اکسیدهای آهن در رایزوسفر تفاوت معنی‌داری با توده خاک نداشت. مقدار آپاتایت فقط در دو خاک آهکی در رایزوسفر برنج به‌طور معنی‌داری کمتر از توده خاک بود. در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی، مقدار فسفر به شکل‌های به‌سهولت محلول، فسفات‌های آلومینیوم و فسفات‌های آهن در رایزوسفر به‌طور معنی‌داری از توده خاک کمتر بود در حالی‌که مقدار فسفر به شکل‌های آپاتایت و فسفر محبوس در اکسیدهای آهن در خاک رایزوسفر تفاوت معنی‌داری با توده خاک نداشت. نتایج این تحقیق نشان داد که عصاره‌گیر اولسن ممکن است فسفر قابل‌جذب خاک را در شرایط آزمایشگاهی (هواخشک) کمتر از مقدار واقعی برآورد نماید.

واژه‌های کلیدی: برنج، خاک‌های شالیزاری، رایزوسفر، شکل‌های فسفر معدنی، فسفر قابل‌جذب.

مقدمه

رایزوسفر ناحیه‌ای است پیرامون ریشه گیاه، که بر اثر فعالیت ریشه زنده گیاه تغییرات مختلف شیمیایی، زیستی و فیزیکی در آن ایجاد می‌شود. این تغییرات بر قابلیت جذب عناصر غذایی و در نتیجه بر رشد و عملکرد گیاهان تأثیر دارند (Marschner, 1995; Hinsinger, 1998; Romheld, 2004). گرچه ویژگی‌های شیمیایی توده خاک برای رشد ریشه و قابلیت جذب عناصر غذایی خیلی مهم هستند، ولی شرایط رایزوسفر و دامنه تغییراتی که توسط ریشه‌ها ایجاد می‌شود، تعیین کننده میزان جذب عناصر غذایی به‌وسیله ریشه هستند (Chung and Zasoski, 1994). لذا، تغذیهٔ گیاهان تحت تأثیر تغییرات ایجاد شده به وسیلهٔ ریشه در رایزوسفر قرار می‌گیرد و شرایط موجود در رایزوسفر در بسیاری موارد با خاک غیررایزوسفر متفاوت است (Romheld, 1994). فعالیت ریشه می‌تواند شیمی رایزوسفر، جذب فسفر و قابلیت جذب آن را تغییر دهد (Wang et al. 2004).

قابلیت جذب عناصر غذایی در رایزوسفر به سه عامل بستگی دارد: ۱) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک که باعث انتشار عناصر غذایی از فاز جامد به محلول خاک می‌شود؛ ۲) فعالیت ریزجانداران خاک؛ ۳) نیازهای گیاه و سرعت جذب عناصر غذایی به‌وسیله ریشه. این عامل‌ها باعث ایجاد شیب غلظت و افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی در ناحیه ریشه

* نویسنده مسئول: n-najafi@tabrizu.ac.ir

می‌شود. چون غلظت فسفر در محلول خاک کم است، به سرعت توسط ریشه جذب شده و مقدار آن در خاک رایزوسفر کاهش می‌یابد. اگرچه، غلظت کل این عنصر در خاک بیشتر از نیاز گیاه است اما سرعت فراهمی آن از طریق فرآیند انتشار اغلب کندتر از نیاز گیاه برای رشد مناسب می‌باشد (Neumann and Romheld, 2002). در نتیجه، غلظت فسفر در محلول خاک رایزوسفر کاهش می‌یابد. Jianguo and Shuman (1991) گزارش کردند که غلظت‌های فسفر محلول، فسفر قابل‌جذب و فسفات‌های کلسیم به شکل آپاتایت در خاک رایزوسفر برنج کاهش یافتند. آنان این کاهش را به ترشح پروتون به‌وسیله ریشه و کاهش pH خاک نسبت دادند و بیان داشتند که کاهش pH رایزوسفر می‌تواند به‌عنوان یک عامل سازگاری مفید گیاه در شرایط کمبود فسفر باشد. Yuan and Huang (1995) گزارش دادند که غلظت فسفر محلول در آب در محل تماس ریشه برنج با خاک کمترین مقدار را داشت و با زیاد شدن فاصله از سطح ریشه، افزایش یافت. Hanafi and Ng (1996) مشاهده کردند که فسفر قابل‌جذب در خاک رایزوسفر رقم‌های برنج به‌طور معنی‌داری از توده خاک کمتر بود.

فعالیت‌های ریشه از قبیل رشد و گسترش سیستم ریشه‌ای، جذب آب و عناصر به‌وسیله ریشه، تنفس ریشه، سلول‌های ریزان ریشه و ترشحات ریشه می‌توانند به‌طور مستقیم ویژگی‌های خاک رایزوسفر را تغییر دهند. وسعت این تغییرات به قدرت بافری خاک بستگی دارد (Darra, 1993; Hinsinger et al. 2004). افزایش مواد آلی خاک رایزوسفر، سبب افزایش جمعیت و فعالیت میکروبی (از جمله باکتری‌ها و قارچ‌های حل‌کننده فسفات) شده و می‌تواند فسفر قابل‌جذب خاک را افزایش دهد. افزایش فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز و ترشح اسیدهای آلی به‌وسیله ریشه و ریزجانداران رایزوسفر نیز سبب افزایش قابلیت جذب فسفر می‌شوند (Marschner, 1995; Hinsinger, 2001; Bhadraray et al. 2002; Li et al. 2008, Bagayoko et al. 2000). با کشت چند گونه گیاه در خاک‌های اسیدی مشاهده کردند که بر اثر تغییرات pH، قابلیت جذب فسفر در مجاورت ریشه‌ها ۱۹۰ تا ۲۷۰ درصد نسبت به توده خاک افزایش یافت.

فسفر یکی از عناصر پرمصرف ضروری برای رشد گیاهان است و پس از نیتروژن مهم‌ترین نقش را در تولید محصولات کشاورزی ایفا می‌کند. این عنصر در خاک به چند شکل معدنی و آلی وجود دارد امّا به‌وسیلهٔ گیاه تقریباً فقط به‌صورت فسفر معدنی جذب می‌شود (Anderson, 1980). قابلیت جذب فسفر برای گیاه به شکل‌های خاص فسفر معدنی بستگی دارد. تعیین فسفر قابل‌جذب، شکل‌های خاص فسفر معدنی و تغییرات این شکل‌ها ناشی از عامل‌های خاک و گیاه، زمینه‌ای برای تشخیص بهتر چگونگی پاسخ محصول به کود فسفر فراهم می‌آورد (Yang and Jacobsen, 1990). برای تعیین شکل‌های فسفر معدنی از روش عصاره‌گیری متوالی استفاده می‌شود. با انجام مطالعات مربوط به عصاره‌گیری متوالی می‌توان تعدادی از مسیرهای چرخه فسفر در خاک را روشن‌تر کرد. روش‌های عصاره‌گیری متوالی فسفر ایده‌ای درباره ظرفیت عرضه فسفر خاک به گیاه فراهم می‌کنند (Saleque et al. 2004). با تعیین شکل‌های مختلف فسفر در خاک کشت شده (رایزوسفر) و کشت نشده (غیررایزوسفر) می‌توان مشخص کرد که گیاه کدام شکل‌های فسفر را در خاک‌های مختلف جذب می‌کند (Wang and Shuman, 1994). بررسی‌ها نشان داده است که فسفات‌های آهن و آلومینیوم از منابع قابل‌جذب فسفر برای رقم‌های مختلف برنج می‌باشند (Jianguo and Shuman, 1991; Hedley et al. 1994; Wang and Shuman, 1994).

با توجه به اینکه مطالعات در مورد اثر رایزوسفر برنج بر شکل‌های فسفر معدنی در دنیا محدود است و در خاک‌های کشور نیز فقط یک مطالعه در زمینهٔ اثر رایزوسفر گیاه برنج بر این شکل‌ها در شرایط بدون کاربرد کود فسفر انجام شده است(Najafi and Towfighi, 2006)؛ لذا، این تحقیق برای بررسی اثر رایزوسفر گیاه برنج بر شکل‌های فسفر معدنی در خاک‌های شالیزاری شمال ایران پس از کاربرد کود فسفر انجام گردید.

مواد و روش‌ها

تعداد ۴۰ نمونهٔ مرکب خاک از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک‌های شالیزاری استان‌های گیلان، مازندران و گلستان برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. پس از هواخشک شدن، خاک‌ها از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها مثل pH در سوسپانسیون ۱:۱ آب به خاک (Mclean, 1982)، بافت به روش هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتر کردن با سود (Richards, 1954)، کربن آلی به روش اکسایش تر (Nelson and Sommers, 1982) اندازه‌گیری گردید (جدول ۳). سپس بر اساس این ویژگی‌ها، تعداد ۱۴ نمونه (۱۰ نمونه خاک قلیایی آهکی و چهار نمونه خاک غیرآهکی و اسیدی) از میان آن‌ها برای انجام این بررسی انتخاب شد. آزمایش گلخانه‌ای به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی و با دو تکرار شامل نوع خاک در ۱۴ سطح (فاکتور اول) و کشت گیاه در دو سطح باکشت و بدون کشت برنج (فاکتور دوم) انجام شد. یک گرم از

هر نمونه خاک را درون لوله پارچه‌ای پلاستیکی به طول ۲۳ سانتی‌متر و قطر حدود سه تا چهار میلی‌متر ریخته و مجموعه را در داخل لوله پارچه‌ای دیگر قرار داده سپس ته آن به کف گلدان استوانه‌ای شکل خاصی چسبانده شد. به این ترتیب ارتفاع خاک درون لوله پارچه‌ای تقریباً با ارتفاع خاک درون گلدان برابر می‌شد. در هر گلدان تعداد چهار عدد از این ستون‌های خاک (دو عدد برای تعیین فسفر قابل‌جذب و دو عدد برای تعیین شکل‌های فسفر معدنی) قرار داده شد. سپس حجمی از آب مقطر را که یک کیلوگرم از هر نمونه خاک را اشباع کرده و حداقل یک سانتی‌متر آب روی سطح خاک باقی بماند، به هرگلدان افزوده شد. فسفر به میزان ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از منبع مونوکلسیم فسفات، نیتروژن به میزان ۱۴۰ میلی‌گرم اوره بر کیلوگرم خاک، پتاسیم به میزان ۱۰۰ میلی‌گرم سولفات پتاسیم بر کیلوگرم خاک و روی به میزان ۲۲ میلی‌گرم سولفات روی بر کیلوگرم خاک، به‌صورت محلول به آب درون گلدان‌ها افزوده شد. بلافاصله یک کیلوگرم از هر نمونه خاک به آن ریخته شد و به‌طور کامل مخلوط گردید. گلدان‌ها به‌مدت سه روز در این شرایط نگهداری شدند تا خاک غرقاب درون گلدان‌ها به وضعیت نسبتاً متعادلی برسد. سپس تعداد هشت عدد بذر جوانه‌دار شدهٔ برنج (*Oryza sativa* L.) رقم خزر به گلدان‌ها (در تیمارهای باکشت) انتقال یافت. بعد از دو هفته رشد دانهال‌ها در گلدان‌ها، بوته‌ها به تعداد پنج عدد تنک شدند. پس از استقرار گیاه در خاک، پنج سانتی‌متر آب در سطح خاک قرار داده شد. تمام شرایط اعمال شده بر روی گلدان‌های کشت شده به گلدان‌های کشت نشده نیز هم‌زمان اعمال شد. گیاهان تا پس از خوشه‌دهی در گلخانه در دمای حداکثر ۳۰ و حداقل ۱۸ درجهٔ سلسیوس نگهداری شدند. برای افزایش رطوبت نسبی هوای گلخانه، در طول روز کف گلخانه خیس نگه داشته شد. برای رفع کمبود نیتروژن، در طول دوره رشد چند بار کود اوره به‌میزان ۱۰۰ میلی‌گرم به تمام گلدان‌های باکشت و بدون کشت افزوده شد. پس از گذشت حدود سه ماه که گیاه خوشه‌دار بود، از گلدان‌های باکشت و بدون کشت، لوله‌ها به‌طور هم‌زمان از داخل خاک بیرون کشیده شد سپس لوله پارچه‌ای حاوی ستون خاک از درون لوله پارچه‌ای دیگر خارج گردید و با کمی آب مقطر قسمت بیرونی آن شسته شده و با قیچی به قطعات کوچکتر بریده و به درون لوله سانتریفیوژ حاوی عصاره‌گیر ریخته شد. بلافاصله شکل‌های فسفر معدنی در خاک‌های آهکی به روش عصاره‌گیری متوالی Jiang and Gu (1989) (جدول ۱) و در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی به روش Kuo (1996) (جدول ۲) و فسفر قابل‌جذب به روش اولسن استخراج گردید. فسفر معدنی موجود در داخل عصاره‌ها به روش اسید آسکوربیک یا روش آبی مولیبدوفسفریک اسید و با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Murphy and Riley, 1962; Kuo, 1996). تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از قبیل آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTATC و نمودارها با نرم‌افزار Excel رسم گردید.

جدول ۱- عصاره‌گیری متوالی فسفر معدنی در خاک‌های آهکی به روش Jiang and Gu (1989)

مرحله عصاره‌گیری	ترکیب عصاره‌گیر	نسبت حجم عصاره‌گیر (mL) به جرم خاک(g)	مدت تکان دادن (ساعت)	شکل استخراج شده
۱	0.25M $NaHCO_3$ با pH=7.5	۵۰:۱	۱	دی‌کلسیم‌فسفات (Ca_2-P)
۲	0.5M NH_4AC با pH=4.2	۵۰:۱	۱	اکتاکلسیم‌فسفات (Ca_8-P)
۳	0.5M NH_4F با pH=8.2	۵۰:۱	۱	فسفات آلومینیوم (Al-P)
۴	0.1N NaOH + 0.1N Na_2CO_3	۵۰:۱	۲+۲	فسفات آهن (Fe-P)
۵	$Na_3C_6H_5O_7.2H_2O$+ $Na_2S_2O_4.2H_2O$+$NaHCO_3$	–	–	فسفر محبوس در اکسیدهای آهن (CBD-P)
۶	0.25M H_2SO_4	۵۰:۱	۱	آپاتایت (Ca_{10}-P)

جدول ۲- عصاره‌گیری متوالی فسفر معدنی در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی به روش Kuo (1996)

مرحله عصاره‌گیری	ترکیب عصاره‌گیر	نسبت حجم عصاره‌گیر (mL) به جرم خاک(g)	مدت تکان دادن (ساعت)	شکل استخراج شده
۱	1M NH_4Cl	۵۰:۱	۰/۵	فسفر به‌سهولت محلول
۲	0.5M NH_4F با pH=8.2	۵۰:۱	۱	فسفات آلومینیوم (Al-P)
۳	0.1N NaOH	۵۰:۱	۱۷	فسفات آهن (Fe-P)
۴	$Na_3C_6H_5O_7.2H_2O$+ $Na_2S_2O_4.2H_2O$+$NaHCO_3$	–	–	فسفر محبوس در اکسیدهای آهن (CBD-P)
۵	0.25M H_2SO_4	۵۰:۱	۱	آپاتایت (Ca_{10}-P)

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک‌ها: در جدول (۳) برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود خاک‌ها از نظر ویژگی‌های مختلف تنوع خوبی داشتند. بنابراین، بهتر می‌توان نتایج حاصل از این پژوهش را به خاک‌های مشابه تعمیم داد. در اکثر مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است از تعداد محدودی خاک استفاده شده و اغلب این مطالعات در خاک‌های اسیدی بوده است در حالی‌که در مطالعه حاضر از تعداد زیادتری خاک (هم خاک‌های قلیایی آهکی و هم خاک‌های غیرآهکی و اسیدی) استفاده شده است.

جدول ۳- برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه

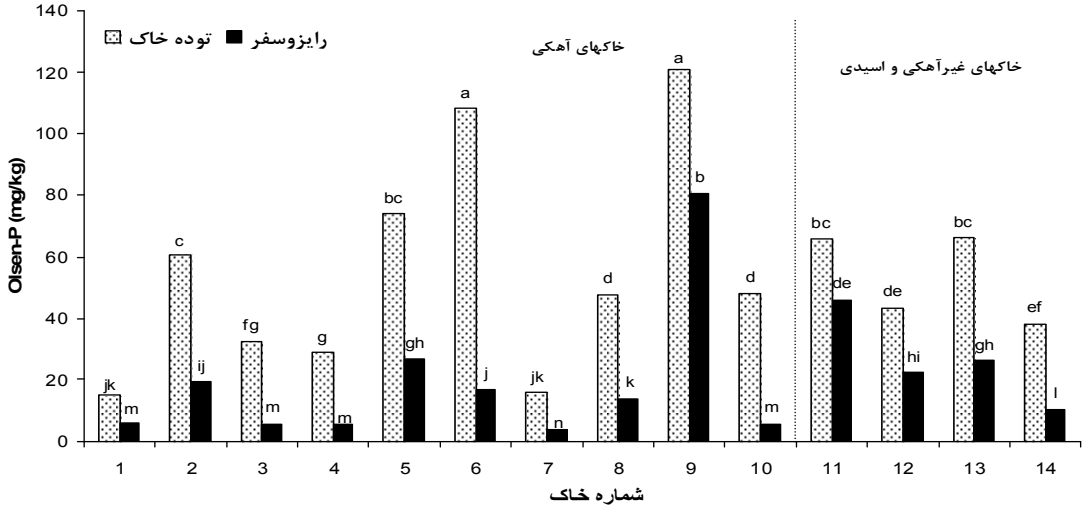
شماره خاک	pH	فسفر قابل جذب* (mg/kg)	کربنات کلسیم معادل	کربن آلی (g/kg)	رس	سیلت	گروه بافت خاک
۱	۷/۴	۵/۷	۱۵۵	۷	۱۵۲	۲۵۲	SL
۲	۷/۴	۲۱/۸	۱۴۱	۱۰	۹۱	۲۰۲	SL
۳	۷/۵	۱۰/۰	۲۸۵	۲۷	۴۰۷	۱۶۷	C
۴	۸/۰	۶/۰	۳۲	۱۶	۱۹۶	۹۱	SL
۵	۷/۱	۳۲/۰	۳۴	۱۲	۱۱۴	۱۹۰	SL
۶	۷/۲	۴۳/۶	۱۰۴	۱۴	۳۷۹	۲۳۵	CL
۷	۷/۷	۳/۸	۴۲۴	۲۵	۲۵۵	۲۸۵	L
۸	۷/۷	۱۴/۳	۶۱	۱۷	۱۷۳	۲۴۳	SL
۹	۷/۵	۵۸/۶	۱۰۲	۲۷	۲۳۵	۲۶۵	SCL
۱۰	۷/۱	۱۳/۹	۱۳۸	۲۰	۱۵۸	۳۴۶	L
۱۱	۷/۲	۳۲/۴	ناچیز	۱۲	۵۳	۵۹	S
۱۲	۶/۶	۹/۲	ناچیز	۱۶	۲۲۱	۲۱۸	SCL
۱۳	۶/۱	۲۱/۰	ناچیز	۲۵	۱۷۵	۲۷۴	SL
۱۴	۵/۷	۵/۶	ناچیز	۱۳	۱۳۲	۱۸۵	SL

* فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک در شرایط هوا خشک

اثر کشت برنج بر فسفر قابل‌جذب خاک‌های آهکی، غیرآهکی و اسیدی: برای بررسی اثر رایزوسفر گیاه برنج بر فسفر قابل‌جذب و شکل‌های فسفر معدنی از روش Wang and Shuman (1994) استفاده شد. در این روش مقدار فسفر قابل-جذب و شکل‌های فسفر معدنی در خاک رایزوسفر و در توده خاک تعیین می‌شود و تفاوت آن‌ها شاخصی از کارایی گیاه برنج در استفاده از شکل مورد نظر می‌باشد. مقایسه میانگین‌ها (شکل ۱) نشان داد که در تمام خاک‌های مورد مطالعه، مقدار فسفر قابل‌جذب در خاک رایزوسفر برنج به‌طور معنی‌داری از توده خاک (کشت نشده) کمتر بود که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (Jianguo and Shuman, 1991; Hanafi and Ng, 1996; Shen et al. 2004; Ma et al. 2009). به‌طور کلی، میانگین مقدار فسفر قابل‌جذب در خاک رایزوسفر برنج ۲۰/۶ و در توده خاک ۵۴/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. علت این تفاوت جذب فسفر توسط گیاه می‌باشد. فسفر قابل‌جذب شامل فسفر محلول و بخشی از فسفر موجود در فاز جامد می‌باشد. با توجه به اینکه سطح فسفر قابل‌جذب در خاک رایزوسفر نسبت به توده خاک کاهش یافته است، این داده‌ها نشان می‌دهند که سرعت تبدیل سایر شکل‌های فسفر به فسفر قابل‌جذب کمتر از سرعت جذب فسفر توسط گیاه برنج می‌باشد. بنابراین، بر اثر جذب فسفر به-وسیله ریشه برنج، فسفر قابل‌جذب در خاک رایزوسفر نسبت به توده خاک کاهش می‌یابد.

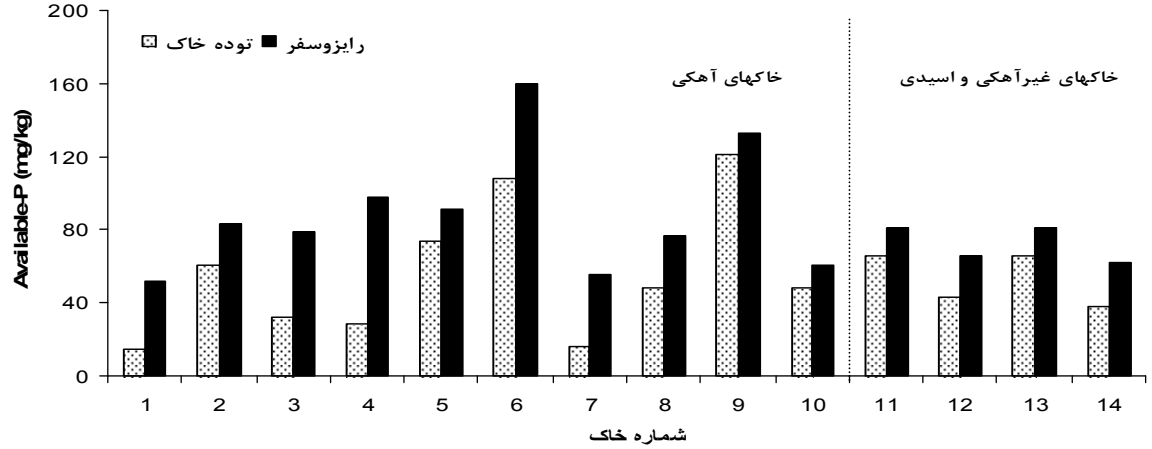
کل فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک را می‌توان شامل فسفر جذب شده به‌وسیله ریشه و بخش هوایی و فسفر قابل‌جذب باقی‌مانده در خاک پس از برداشت برنج دانست. در این بررسی امکان جداسازی ریشه از خاک وجود نداشت چون شبکه پیچیده‌ای از ریشه (شبیه کلاف) در گلدان‌ها وجود داشت که خاک داخل گلدان را کاملاً احاطه کرده بود؛ لذا، امکان تعیین مقدار فسفر ریشه فراهم نشد ولی مقدار فسفر بخش هوایی برنج اندازه‌گیری شد. در نتیجه، بر اساس مشاهده میزان رشد ریشه‌ها در گلدانها و مقایسه آنها با میزان رشد بخش هوایی، فرض شد که مقدار کل فسفر ریشه برنج حدود ۲۵ درصد بخش هوایی آن باشد (بررسی‌های بعدی ما (داده‌ها منتشر نشده است) نشان داد که برآورد محتاطانه‌ای می‌باشد و حتی بیشتر از ۲۵ درصد می-

باشد). برای تعیین مقدار کل فسفر قابل‌جذب، مقدار فسفر ریشه و بخش هوایی به مقدار فسفر قابل‌جذب باقی‌مانده در خاک پس از برداشت برنج (خاک رایزوسفر) افزوده شد. مقدار فسفر قابل-جذب خاک کشت نشده نیز هم‌زمان با آن تعیین گردید. همان-طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود در تمام خاک‌های مورد مطالعه، مقدار فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک رایزوسفر برنج (کشت شده) از توده خاک بیشتر بود. بنابراین، قابلیت جذب فسفر در خاک رایزوسفر برنج نسبت به توده خاک حتی با کاربرد کود فسفر در خاک‌ها افزایش یافت که با گزارش Ahad and Debnath (1989) مطابقت داشت. Bagayoko et al. (2000) با کشت چند گونه گیاه در خاک‌های اسیدی و مبتلا به کمبود شدید فسفر مشاهده کردند که فسفر قابل‌جذب (Bray-P) در مجاورت ریشه ۱۹۰ تا ۲۷۰ درصد نسبت به توده خاک افزایش یافت. این نتایج از جمله شواهدی است که نشان می‌دهد محیط شیمیایی رایزوسفر با توده خاک تفاوت زیادی دارد.

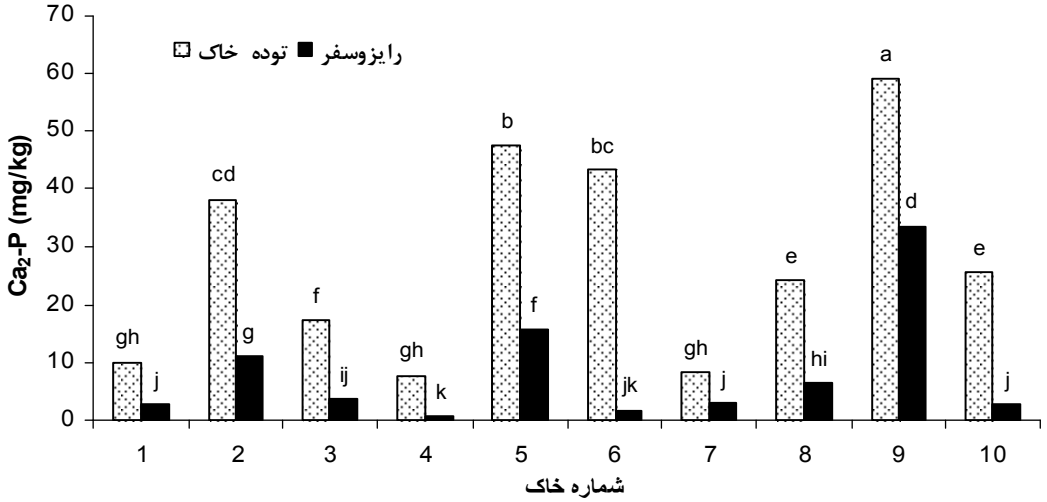


شکل ۱- اثر کشت برنج بر فسفر قابل‌جذب (Olsen-P) در خاک‌های آهکی، غیرآهکی و اسیدی

اثر کشت برنج بر مقدار دی‌کلسیم فسفات‌ها در خاک‌های آهکی: برای استخراج دی‌کلسیم فسفات‌ها (Ca_2-P) در خاک‌های آهکی از عصاره‌گیر 0.25M $NaHCO_3$ با pH=7.5 استفاده گردید (جدول ۱). به نظر می‌رسد این عصاره‌گیر مونوکلسیم فسفات‌های موجود در خاک را نیز استخراج می-نماید. مقایسه میانگین‌ها (شکل ۳) نشان داد که در تمام خاک-های آهکی مورد مطالعه، مقدار Ca_2-P، در خاک رایزوسفر برنج به‌طور معنی‌داری از توده خاک (کشت نشده) کمتر بود که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (Shen et al. 2004). به‌طور کلی، میانگین مقدار Ca_2-P در خاک رایزوسفر برنج برابر با ۸/۰ و در توده خاک ۲۸/۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. بنابراین، دی-کلسیم فسفات‌های موجود در خاک‌های آهکی یکی از منابع فسفر قابل‌جذب گیاه برنج می‌باشد. Ma et al. (2009) نیز اثر کشت گیاهان علفی مختلف را بر شکل‌های فسفر معدنی با استفاده از روش Jiang and Gu (1989) بررسی و گزارش کردند که مقادیر قابل‌ملاحظه‌ای فسفر از شکل Ca_2-P آزاد و توسط گیاهان مورد مطالعه جذب گردید و مقدار این شکل فسفر در خاک رایزوسفر کمتر از توده خاک بود.

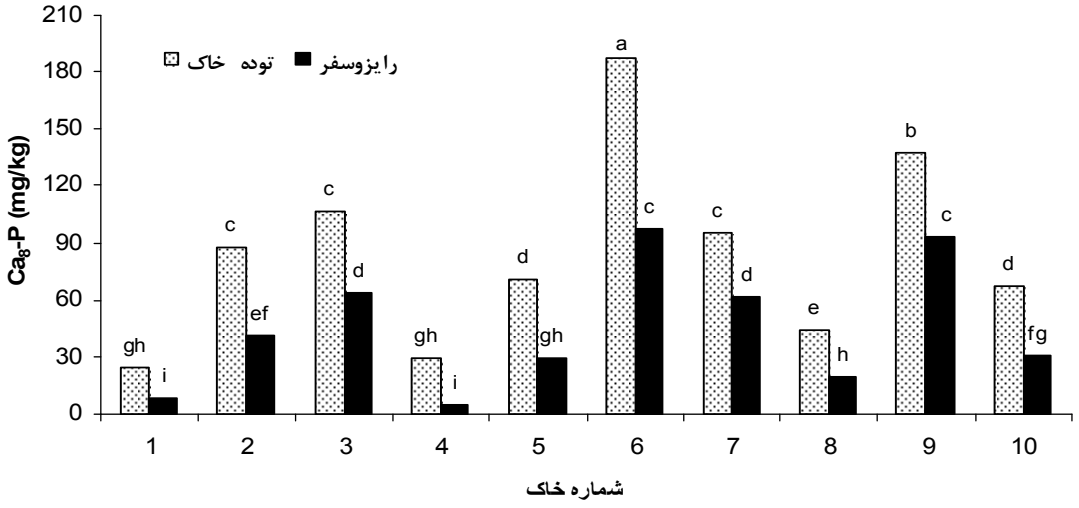


شکل ۲- مقدار فسفر قابل‌جذب در خاک رایزوسفر برنج و توده خاک پس از افزودن فسفر جذب شده به‌وسیله برنج



شکل ۳- اثر کشت برنج بر مقدار دی‌کلسیم فسفات‌ها در خاک‌های آهکی

اثر کشت برنج بر مقدار اکتاکلسیم فسفات‌ها در خاک‌های آهکی: برای استخراج اکتاکلسیم فسفات‌ها (Ca_8-P) در خاک‌های آهکی از عصاره‌گیر 0.5M NH_4AC با pH=4.2 استفاده گردید (جدول ۱). مقایسه میانگین‌ها (شکل ۴) نشان داد که در تمام خاک‌های آهکی مورد مطالعه، مقدار این شکل در خاک رایزوسفر برنج به‌طور معنی‌داری از توده خاک کمتر بود. به‌طور کلی، میانگین مقدار Ca_8-P در خاک رایزوسفر برنج ۴۴/۹ و در توده خاک ۸۵/۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. بنابراین، یکی دیگر از منابع فسفر قابل‌جذب برنج در خاک‌های آهکی، اکتا کلسیم فسفات‌ها می‌باشد که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (Shen et al., 2004). در بررسی‌های مختلف گزارش شده است که اکتاکلسیم فسفات قابلیت استفاده زیادی برای گیاهان مورد مطالعه داشته است (Ridley and Tayakepisuthe, 1974; Olsen et al., 1983; Adepoju et al., 1986; Ma et al., 2009). نتایج نشان داد که pH محلول خاک در گلدان‌های باکشت برنج کمتر از گلدان‌های بدون کشت بود (Najafi and Towfighi, 2009). Kirk and Bajita (1995) نیز گزارش دادند که pH خاک رایزوسفر برنج بیش از دو واحد از توده خاک کمتر بود. کاهش pH خاک رایزوسفر برنج نسبت به توده خاک به‌وسیله سایر محققان نیز گزارش شده است (Hedley et al., 1994; Saleque and Kirk, 1995; Yuan and Huang, 1995). این کاهش pH خاک رایزوسفر می‌تواند باعث انحلال فسفات‌های کلسیم (از قبیل Ca_2-P و Ca_8-P) شده و فسفر آزاد شده از انحلال آن‌ها به‌وسیله ریشه برنج جذب می‌شود.

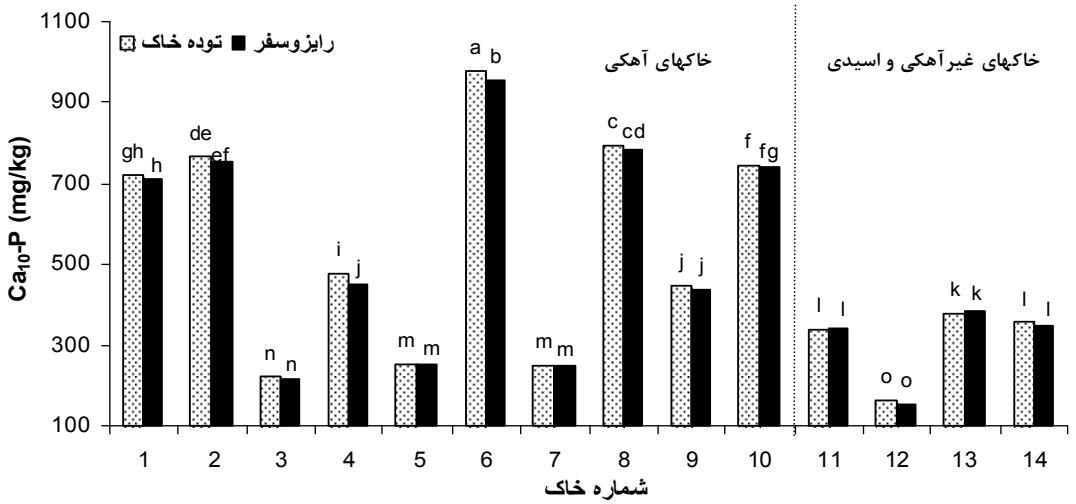


شکل ۴- اثر کشت گیاه برنج بر مقدار اکتاکلسیم فسفات‌ها در خاک‌های آهکی

اثر کشت برنج بر آپاتایت در خاک‌های آهکی، غیرآهکی و اسیدی: برای استخراج فسفر به شکل آپاتایت (Ca_{10}-P) در خاک‌های آهکی، غیرآهکی و اسیدی از عصاره‌گیر 0.25M H_2SO_4 استفاده گردید (جدول‌های ۱ و ۲). در خاک‌های غیرآهکی این عصاره‌گیر فسفر کانی‌های گروه آپاتایت و اکتاکلسیم فسفات‌ها را استخراج می‌کند (Olsen, and

(Khasawneh, 1980; Kuo, 1996). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که از ۱۰ خاک آهکی مورد مطالعه، فقط در دو خاک ۴ و ۶ گیاه برنج توانسته است مقدار این شکل را به‌طور معنی‌داری در خاک رایزوسفر کاهش دهد (شکل ۵). میانگین ماده خشک و جذب فسفر به‌وسیله برنج در این دو خاک دو برابر خاک‌های دیگر بود. میانگین جذب فسفر در این دو خاک ۱۱۷/۸ و در خاک‌های دیگر ۵۹ میلی‌گرم بر گلدان بود. بنابراین، به‌نظر می‌رسد جذب بیشتر فسفر توسط گیاه برنج در این دو خاک باعث می‌شود که برنج بخشی از نیاز فسفر خود را از انحلال کانی‌های گروه آپاتایت تأمین نماید. به‌طور کلی، در ۱۰ خاک آهکی، میانگین مقدار Ca_{10}-P در خاک رایزوسفر برنج ۵۵۵/۵ و در توده خاک ۵۶۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. مقایسه این نتایج با نتایج مربوط به حاصل از این تحقیق با نتایج مربوط به تیمارهای بدون کود فسفر نشان داد که در تیمارهای بدون کود فسفر از ۱۰ خاک آهکی مورد مطالعه، در ۷ خاک مقدار Ca_{10}-P در خاک رایزوسفر برنج به‌طور معنی‌داری کمتر از توده خاک بود (Najafi and Towfighi, 2006) که نشانگر این است که با مصرف کود فسفر، گیاه برنج فسفر مورد نیاز خود را از منابع سهل‌الوصول‌تر جذب می‌کند و از آپاتایت چندان استفاده نمی‌کند.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی، مقدار فسفر قابل‌استخراج با 0.25M H_2SO_4 در خاک رایزوسفر برنج با توده خاک تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۵) که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (Wang and Shuman, 1994). به‌طور کلی، در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی، میانگین مقدار Ca_{10}-P در خاک رایزوسفر برنج ۳۰۸/۴ و در توده خاک ۳۰۷/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. به‌نظر می‌رسد معنی‌دار نشدن اثر کشت برنج بر مقدار فسفر به شکل آپاتایت در خاک‌های غیرآهکی، ناشی از کم بودن ماده خشک گیاه و جذب کمتر فسفر به‌وسیله برنج در این خاک‌ها می‌باشد؛ مقایسه میانگین‌ها با آزمون تی نمونه‌های غیرجفتی نشان داد که جذب کل فسفر از خاک هر گلدان و وزن ماده خشک گیاه در خاک‌های غیرآهکی به‌طور معنی‌داری کمتر از خاک‌های آهکی بود. این نتایج نشان دهنده این است که کانی‌های گروه آپاتایت در این خاک‌ها در برابر اثرات ریشه گیاه پایدار می‌باشد و فسفر موجود در آن‌ها برای برنج قابل‌جذب نمی‌باشد.

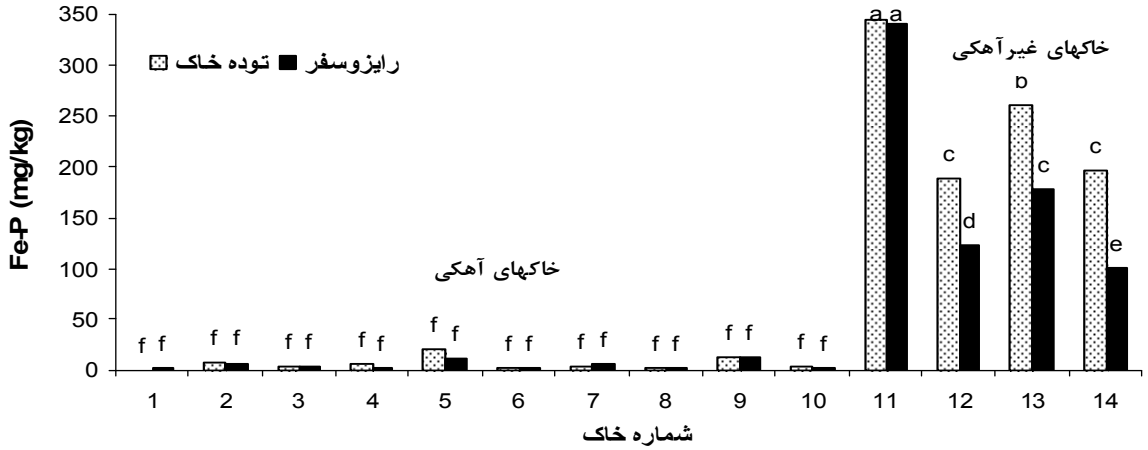


شکل ۵- اثر کشت برنج بر مقدار فسفر به شکل آپاتایت در خاک‌های آهکی، غیرآهکی و اسیدی

اثر کشت برنج بر فسفات‌های آهن در خاک‌های آهکی، غیرآهکی و اسیدی: برای استخراج این شکل از فسفر در خاک‌های آهکی از عصاره‌گیر 0.1N Na_2CO_3 + 0.1N NaOH استفاده گردید و با Fe-P نشان داده شد (جدول ۱). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر کشت برنج بر مقدار فسفر به شکل فسفات‌های آهن در هیچ‌یک از خاک‌های آهکی مورد مطالعه معنی‌دار نبود (شکل ۶) که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (Shen et al., 2004). به‌طور کلی، در ۱۰ خاک آهکی، میانگین مقدار Fe-P در خاک رایزوسفر برنج ۴/۷ و در توده خاک ۶/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. معنی‌دار نشدن اثر کشت برنج بر مقدار فسفات‌های آهن در خاک‌های آهکی علاوه بر علل دیگر، ممکن است به این علت باشد که مقدار این شکل در خاک‌های آهکی بسیار کم بوده و به‌علت خطای اندازه‌گیری فسفر (که در غلظت‌های کم، زیاد می‌باشد)، اثر احتمالی کشت قابل‌تشخیص نبوده است.

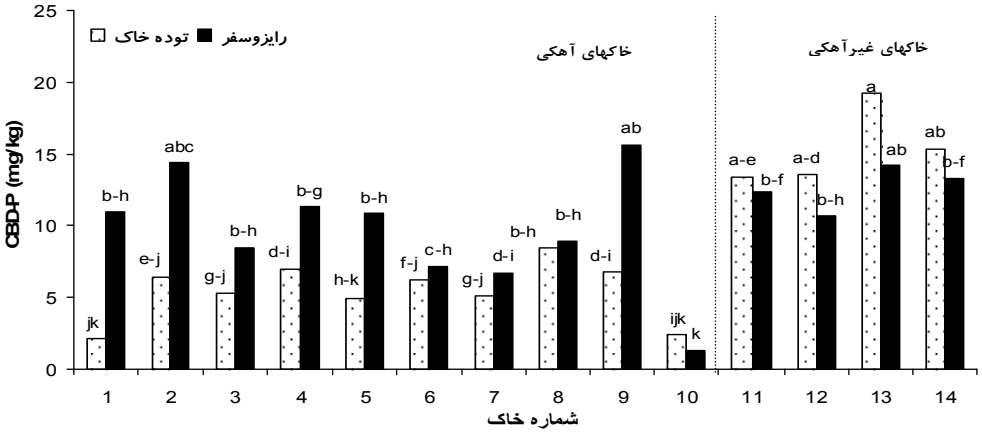
در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی فسفات‌های آهن به وسیله عصاره‌گیر 0.1N NaOH استخراج گردید (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که از چهار خاک غیرآهکی مورد

مطالعه، در سه خاک مقدار فسفات‌های آهن، در خاک رایزوسفر برنج به‌طور معنی‌داری از توده خاک (کشت نشده) کمتر بود (شکل ۶). به‌طور کلی، در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی، میانگین مقدار Fe-P در خاک رایزوسفر برنج ۱۸۵/۷ و در توده خاک ۲۴۷/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. بنابراین، احتمالاً یکی از منابع فسفر قابل‌جذب برای برنج غرقاب در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی، فسفات‌های آهن می‌باشد که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (Hedley et al., 1994; Wang and Shuman, 1994). در این خاک‌ها، بر اثر جذب آهن و فسفر به‌وسیله ریشه برنج غلظت آن‌ها در خاک رایزوسفر کاهش یافته و سبب انحلال فسفات‌های آهن می‌گردد. فسفات آزاد شده از انحلال ترکیبات مذکور، توسط ریشه برنج جذب می‌شود.



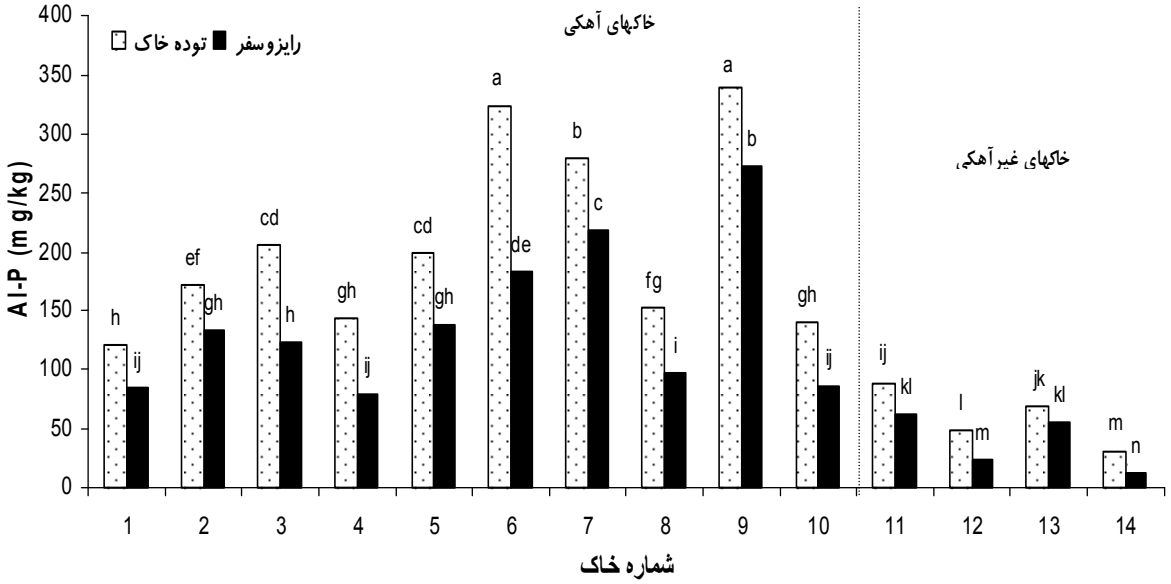
شکل ۶-اثر کشت برنج بر فسفات‌های آهن در خاک‌های آهکی، غیرآهکی و اسیدی

اثر کشت برنج بر فسفر محبوس در اکسیدهای آهن در خاک‌های آهکی، غیرآهکی و اسیدی: این شکل از فسفر به‌وسیله عصاره‌گیر سیترات-بیکربنات-دی‌تیونیت استخراج گردید و با علامت CBD-P نشان داده شد (جدول‌های ۱ و ۲). این شکل، فسفر محلول در احیاءکننده نیز نامیده می‌شود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که از ۱۴ خاک مورد مطالعه، فقط در سه خاک آهکی (شماره‌های ۱، ۲ و ۹) مقدار CBD-P در خاک رایزوسفر برنج به‌طور معنی‌داری از توده خاک بیشتر بود و در بقیه خاک‌ها مقدار CBD-P در خاک رایزوسفر برنج تفاوت معنی‌داری با توده خاک نداشت (شکل ۷). به‌طور کلی، در ۱۰ خاک آهکی، میانگین مقدار CBD-P در خاک رایزوسفر برنج ۹/۶ و در توده خاک ۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. این تفاوت کلی و شکل ۷ نشان دهنده روند افزایشی این شکل فسفر بر اثر کشت گیاه برنج می‌باشد. شاید یک توجیه برای زیادتر بودن مقدار CBD-P در خاک رایزوسفر برنج نسبت به توده خاک این باشد که اکسیژن آزاد شده از ریشه برنج باعث اکسایش آهن فرو و رسوب آن به شکل هیدروکسیدهای آهن در خاک رایزوسفر می‌شود (Kirk and Bajita, 1995). بخشی از فسفر افزوده شده به خاک توسط این رسوب جذب سطحی می‌شود و توسط رسوبات بعدی هیدروکسیدهای آهن محبوس می‌شود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در تمامی خاک‌های غیرآهکی و اسیدی، مقدار CBD-P در خاک رایزوسفر برنج تفاوت معنی‌داری با توده خاک نداشت (شکل ۷).



شکل ۷-اثر کشت برنج بر فسفر محبوس در اکسیدهای آهن در خاک‌های آهکی، غیرآهکی و اسیدی

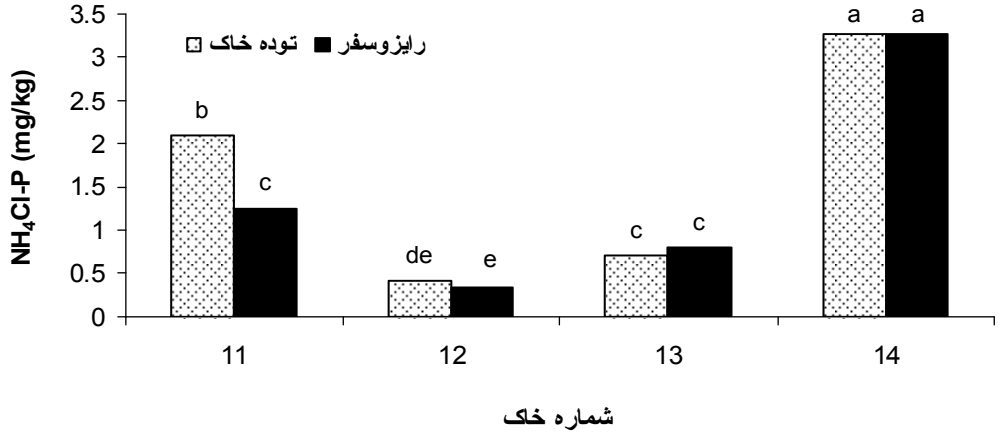
اثر کشت برنج بر فسفات‌های آلومینیوم در خاک‌های آهکی، غیرآهکی و اسیدی: این شکل از فسفر به وسیله عصاره‌گیر 0.5M NH_4F با pH=8.2 استخراج گردید و با علامت Al-P نشان داده شد (جدول‌های ۱ و ۲). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که از چهار خاک غیرآهکی در سه خاک مقدار فسفات‌های آلومینیوم در خاک رایزوسفر برنج به‌طور معنی‌داری از توده خاک کمتر بود؛ در حالی‌که در تمام خاک‌های آهکی مورد مطالعه، مقدار فسفات‌های آلومینیوم در خاک رایزوسفر برنج به‌طور معنی‌داری از توده خاک (کشت نشده) کمتر بود (شکل ۸). به‌طور کلی، در ۱۰ خاک آهکی، میانگین مقدار Al-P در خاک رایزوسفر برنج ۱۴۱/۸ و در توده خاک ۲۰۷/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. در خاک‌های اسیدی، میانگین مقدار Al-P در خاک رایزوسفر برنج ۳۸/۴ و در توده خاک ۵۹/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. بنابراین، یکی از شکل‌های قابل استفاده فسفر برای گیاه برنج در خاک‌های آهکی و اسیدی مورد مطالعه، فسفات‌های آلومینیوم می‌باشد که فسفات آزاد شده از این شکل به‌وسیله برنج جذب می‌شود. این نتایج با گزارش‌های سایر محققان (Jianguo and Shuman, 1991; Shen et al., 1994; Wang and Shuman, 1994) مطابقت داشت.



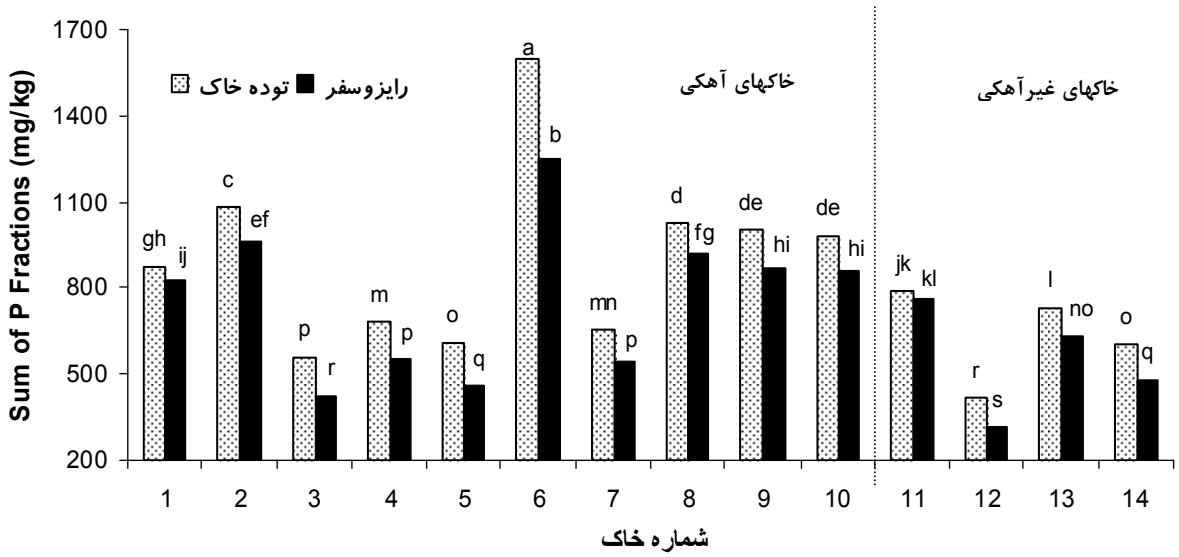
شکل ۸- اثر کشت برنج بر فسفات‌های آلومینیوم در خاک‌های آهکی، غیرآهکی و اسیدی

اثر کشت برنج بر فسفر به‌سهولت محلول در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی: این شکل از فسفر به‌وسیله عصاره‌گیر 1M NH_4Cl در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی استخراج گردید (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها (شکل ۹) نشان داد که از ۴ خاک غیرآهکی و اسیدی مورد مطالعه فقط در یک خاک مقدار فسفر به‌سهولت محلول در خاک رایزوسفر برنج به‌طور معنی‌داری از توده خاک (کشت نشده) کمتر بود. در توضیح این نتایج باید گفت که گرچه گیاه فسفر محلول را جذب و مقدار آن را در اطراف ریشه خود کاهش می‌دهد ولی به‌نظر می‌رسد بین شکل‌های مختلف فسفر یک رابطه دینامیکی وجود دارد که غلظت این شکل از فسفر را بافر می‌نماید. وجود همبستگی‌های معنی‌دار بین شکل‌های مختلف فسفر مؤید این فرض می‌باشد (Najafi and Towfighi, 2009). بنابراین، هم‌زمان با جذب فسفر به‌سهولت محلول توسط ریشه گیاه برنج، شکل‌های دیگر حل شده و فسفر همراه آن‌ها آزاد شده و کاهش سطح فسفر محلول را جبران می‌کند؛ در غیر این صورت فسفر به‌سهولت محلول، به‌دلیل مقدار بسیار کم آن، نمی‌تواند نیاز گیاه برنج به فسفر را تأمین کند.

اثر کشت برنج بر مجموع شکل‌های فسفر در خاک: برای اینکه مشخص شود گیاه برنج در یک فصل رشد به‌طور معنی‌داری فسفر خاک را تخلیه می‌کند یا نه، فسفر استخراج شده به‌وسیله عصاره‌گیرهای مختلف در هر روش عصاره‌گیری متوالی و در هر خاک باهم جمع گردید. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که از ۱۴ خاک مورد مطالعه، در ۱۳ خاک مجموع شکل‌های فسفر در خاک رایزوسفر به‌طور معنی‌داری نسبت به توده خاک کاهش یافت و فقط در خاک ۱۱ این کاهش از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۱۰). این خاک بافت شنی داشته و میزان رشد برنج و جذب فسفر در آن نسبت به خاک‌های دیگر کمتر بود.



شکل ۹-اثر کشت برنج بر فسفر به‌سهولت محلول در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی



شکل ۱۰-اثر کشت برنج بر مجموع شکل‌های فسفر معدنی در خاک‌های آهکی، غیرآهکی و اسیدی

بحث کلی: به‌طور کلی، فرآیندهای مختلفی در خاک رایزوسفر برنج اتفاق می‌افتند که بر انحلال شکل‌های مختلف فسفر و در نتیجه بر فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک اثر می‌گذارند؛ این فرآیندها عبارتند از (Darra, 1993; Marschner, 1995; Hinsinger, 1998; Hinsinger, 2001; Neumann and Romheld, 2002; Li et al., 2008): ۱) اکسایش Fe^{2+} به Fe^{3+} که طبق رابطه $4Fe(OH)_3 + 8H^+ \longrightarrow Fe^{2+}+O_2+10H_2O$ سبب کاهش pH خاک می‌شود. از طرف دیگر، این فرآیند سبب رسوب هیدروکسیدهای آهن در رایزوسفر می‌شود که می‌تواند در جذب و محبوس نمودن فسفر نقش داشته باشد. ۲) با توجه به اینکه شکل غالب نیتروژن در شرایط غرقاب NH_4^+ می‌باشد، گیاه برنج در مقابل جذب بیشتر کاتیون نسبت به آنیون، برای حفظ خنثی بودن بار الکتریکی در رایزوسفر و درون سلول‌های ریشه، پروتون به بیرون ترشح می‌کند که باعث کاهش pH خاک می‌شود. ۳) تولید گاز CO_2 بر اثر تنفس سلول‌های ریشه و ریزجانداران رایزوسفر و تجزیه مواد آلی خاک رایزوسفر که با آب واکنش داده و اسید کربنیک تشکیل می‌شود. بر اثر تفکیک این اسید پروتون آزاد شده و سبب کاهش pH خاک می‌شود. ۴) جذب آب به‌وسیله ریشه که سبب حرکت آب و در نتیجه یون‌های محلول در آن به سمت ریشه می‌شود و گستره خاک رایزوسفر را افزایش می‌دهد. اگر سرعت جذب آب به‌وسیله ریشه بیشتر از سرعت جذب عنصر باشد، عنصر در رایزوسفر انباشته می‌شود. ۵) جذب یون‌های مختلف (Ca^{2+}، Mg^{2+}، Fe^{3+}، Fe^{2+}، Al^{3+}، HPO_4^{2-} و غیره) به‌وسیله ریشه که سبب کاهش غلظت آن‌ها در محلول خاک شده و سبب انحلال ترکیبات جامد آنها مثل فسفات‌های آهن، آلومینیوم و کلسیم در خاک رایزوسفر می‌شود. ۶) ترشح ترکیبات آلی مختلف (مثل اسیدهای آلی، ترکیبات فنلی، اسیدهای آمینه، موسیلاژ و غیره) به‌وسیله ریشه به رایزوسفر به طرق مختلف قابلیت جذب فسفر در خاک را افزایش می‌دهد. این ترکیبات آلی با Ca^{2+}، Mg^{2+}، Fe^{3+}، Fe^{2+} و Al^{3+} کمپلکس تشکیل داده و غلظت این یون‌ها را در محلول خاک رایزوسفر کاهش داده و سبب انحلال ترکیبات جامد آنها و مانع رسوب فسفر موجود در محلول خاک می‌شوند. مواد آلی ترشح شده به‌وسیله ریشه روی سطوح رس‌ها و هیدروکسیدها را

پوشانده و مانع جذب فسفات‌ها می‌شوند. از طرف دیگر، آنیون‌های آلی برای جذب شدن روی سطوح رس‌ها و هیدروکسیدها با فسفات‌ها رقابت می‌کنند. این ترکیبات آلی در خاک رایزوسفر معدنی شده و فسفر معدنی موجود در محلول خاک را افزایش می‌دهند.۷) افزایش جمعیت میکروبی (مثل قارچ‌های میکوریزی و ریزجانداران حل‌کننده فسفات) و فعالیت آنزیمی (مثل آنزیم‌های فسفاتاز) در خاک رایزوسفر که به‌ترتیب سبب افزایش انحلال ترکیبات فسفاتی و معدنی شدن فسفر آلی شده و فسفر قابل‌جذب را افزایش می‌دهند (Marschner, 1995).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد که در تمام ۱۴ خاک مورد مطالعه، فسفر قابل‌استخراج با عصاره‌گیر اولسن در خاک رایزوسفر برنج به‌طور معنی‌داری کمتر از توده خاک بود ولی پس از افزودن فسفر جذب شده به وسیله گیاه به فسفر قابل استخراج باقی‌مانده در خاک رایزوسفر، کل فسفر قابل‌جذب در خاک رایزوسفر بیشتر از توده خاک گردید. شکل‌های دی‌کلسیم فسفات، اکتاکلسیم فسفات و فسفات‌های آلومینیوم از منابع فسفر قابل‌جذب گیاه برنج در خاک‌های آهکی بودند ولی فسفات‌های آهن و فسفر محبوس در اکسیدهای آهن سهم قابل‌ملاحظه‌ای در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه برنج نداشتند. آپاتایت فقط در دو خاک آهکی که رشد گیاه برنج در آن‌ها بیشتر از سایر خاک‌ها بود، از منابع فسفر قابل‌جذب گیاه برنج در خاک بود. فسفر به‌سهولت محلول، فسفات‌های آلومینیوم و فسفات‌های آهن از منابع فسفر قابل‌جذب گیاه برنج در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی بودند ولی آپاتایت و فسفر محبوس در اکسیدهای آهن سهم قابل‌ملاحظه‌ای در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه برنج در این خاکها نداشتند. نتایج این تحقیق نشان داد که در شرایط آزمایشگاهی عصاره‌گیر اولسن ممکن است فسفر قابل‌جذب گیاه برنج در خاک را کمتر از مقدار واقعی برآورد نماید.

REFERENCES

Adepoju, A.Y., P.F. Pratt, and S.V. Mattigod. (1986). Relationship between probable dominant phosphate compound in soil and phosphorus availability to plants. *Plant and Soil*, 92, 47-54.

Ahad, M.A., and N.C. Debnath. (1989). Phosphorus availability and pH changes in the rhizosphere of rice, maize, soybean, and jute. *Journal of Andaman Science Association*, 5, 27-30.

Anderson, G. (1980). Assessing organic phosphorus in soils. pp. 411- 431. In: F.E. Khasawneh et al. (eds.) *The Role of Phosphorus in Agriculture*. ASA, CSA, SSSA, Madison, WI. USA.

Bagayoko, M., S. Alvey, G. Neuman, and A. Buerkert. (2000). Root induced increase 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.

Bhadraray, S., T.J. Purakayastha, P.K. Chhonkar, and V. Verma. (2002). Phosphorus mobilization in hybrid rice rhizosphere compared to high yielding varieties under integrated nutrient management. *Biology and Fertility of Soils*, 35, 73-78.

Chung, J.B., and R.J. Zasoski. (1994). Ammonium-potassium and ammonium-calcium exchange equilibria in bulk and rhizosphere soil. *Soil Science Society American Journal*, 58, 1368-1375.

Darra, P.R. 1993. The rhizosphere and plant nutrition: a quantitative approach. *Plant and Soil*, 155/156, 1-20.

Gee, G.W., and J.W. Bauder. (1986). Particle-size analysis. In: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part I. *Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. ASA, SSSA, Madison, WI. USA.

Hanafi, M.M., and C.H.L. Ng. (1996). Dissolution of phosphate rock in the rhizosphere of upland rice soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 27, 1459-1477.

Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale and W.L. Nelson. (1999). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. Sixth Edition, Prentice Hall, New Jersey, USA.

Hedley, M.J., G.J.D. Kirk, and M.B. Santos. (1994). Phosphorus efficiency and the forms of phosphorus utilized by upland rice cultivars. *Plant and Soil*, 158, 53-62.

Hinsinger, P. (1998). How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. *Advances in Agronomy*, 64, 225-265.

Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil*, 237, 173-195.

Hinsinger, P., G.R. Gorban, P.J. Gregory, and W.W. Wenzel. (2004). Rhizosphere: A unique environment. p. 7. In: *Proceedings* of *First Rhizosphere International Congress*, Session1, 12-17 September, Munich, Germany.

Jiang, B.F., and Y.C. Gu. (1989). A suggested fractionation scheme for inorganic phosphorus in calcareous soils. *Fertilizer Research*, 20, 159-165.

Jianguo, H. and L.M. Shuman. (1991). Phosphorus status and utilization in the rhizosphere of rice. *Soil Science*, 152, 360-364.

Kirk, G.J.D., and J.B. Bajita. (1995). Root-induced iron oxidation, pH changes and zinc solubilization in the rhizosphere of lowland rice. *New Phytologist*, 131, 129-137.

Kuo, S. (1996). Phosphorus. pp. 869-919. In: D.L. Sparks (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3. *Chemical Methods*. 3rd edition, SSSA Book

Series No. 5. Madison, WI. USA.

Li, Y.F., A.C. Luo, X.H. Wei, and X.G. Yao. (2008). Changes in phosphorus fractions, pH, and phosphatase activity in rhizosphere of two rice genotypes. *Pedosphere*, 18, 785-794.

Ma, B., Z.Y. Zhou, C.P. Zhang, G. Zhang, Y.J. Hu. (2009). Inorganic phosphorus fractions in the rhizosphere of xerophytic shrubs in the Alxa Desert. *Journal of Arid Environments*, 73, 55-61.

Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd Edition, Academic Press, London

Mclean, E. O. (1982). Soil pH and lime requirement. pp. 199-224. In: A. L., Page et al. (eds.) *Methods of Soil Analysis*. Part II. 2nd ed. ASA, SSSA, Madison, WI. USA.

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

Najafi N. and H. Towfighi. (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. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 37, 919-933. (In Farsi).

Najafi N. and H. Towfighi. (2008). Changes in pH, EC and concentration of phosphorus in soil solution during submergence and rice growth period in some paddy soils of north of Iran. pp. 555-567. In: *Proceedings of the International Meeting on Soil Fertility, Land Management, and Agroclimatology,* 29 October-1 November, Kusadasi, Turkey.

Najafi N. and H. Towfighi. (2009). Determination of inorganic phosphorus fractions and their relations with each other and available-P in paddy soils of north of Iran. pp. 2347-2349. In: *Proceedings of the 11th Iranian Soil Science Congress*, 11-14 July, Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan, Gorgan, Iran. (In Farsi).

Nelson, D.W. and L.E. Sommers. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. pp. 539-579. In: A.L. Page et al. (eds.) *Methods of Soil Analysis*. Part II. 2nd ed. ASA, SSSA, Madison, WI. USA.

Neumann G., and V. Romheld. (2002). Root-induced changes in the availability of nutrients in the rhizosphere. pp. 617-649. In: Kafkafi, U., Y. Waisel, and A. Eshel (eds.) *Plant Roots: The Hidden Half*. Marcel Dekker, Inc. New York, USA.

Olsen, S.R., and F.E. Khasawneh. (1980). Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. pp. 361-410. In: Khasawneh et al. (eds.) *The Role of Phosphorus in Agriculture*. SSSA, Madison, WI. USA.

Olsen, S.R., F.S. Watanabe, and R.A. Bowman. (1983). Evaluation of fertilizer phosphate residue by plant uptake and extractable phosphorus. *Soil Science Society American Journal*, 47, 952-958.

Richards, L.A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. US Salinity Laboratory Staff. Agricultural handbook. No. 60. USDA. USA.

Ridley, A.O., and S. Tayakepisuthe. (1974). Residual effects of fertilizer phosphorus as measured by crop yields, phosphorus uptake and soil analysis. *Canadian Journal of Soil Science*, 54, 265-272.

Romheld, V. (1990). The soil-root interface in relation to mineral nutrition. *Symbiosis*, 9, 19-27.

Romheld, V. (2004). The rhizosphere: Definition and perspectives. In: *Proceedings* of *First Rhizosphere International Congress*, 12-17 September, Munich, Germany.

Saleque, M.A. and G.J.D. Kirk. (1995). Root induced solubilization of phosphate in the rhizosphere of lowland rice. *New Phytologist*, 129, 325-336.

Saleque, M.A., U.A. Naher, A. Islam, A.B.M.B.U. Pathan, A.T.M.S. Hossain, and C.A. Meisner. (2004). Inorganic and organic phosphorus fertilizers effects on the phosphorus fractionation in wetland rice soils. *Soil Science Society American Journal*, 68, 1635-1644.

Shen, J., R. Li, F. Zhang, J. Fan, C. Tang, Z. Rengel. (2004). Crop yield, soil fertility and phosphorus fractions in response to long-term fertilization under the rice monoculture system on a calcareous soil. *Field Crops Research*, 86, 225-238.

Wang, J. and L.M. Shuman. (1994). Transformation of phosphate in rice (*Oryza sativa* L.) rhizosphere and it`s influence on phosphorus nutrition of rice. *Journal of Plant Nutrition*, 17, 1803-1815.

Wang, Z.Y., J.M. Kelly, and J.L. Kovar. (2004). In situ dynamics of phosphorus in the rhizosphere solution of five species. *Journal of Environmental Quality*, 33, 1387-1392.

Yang, J.E., and J.S. Jacobsen. (1990). Soil inorganic phosphorus fractions and their uptake relationships in calcareous soils. *Soil Science Society American Journal*, 54, 1666-1669.

Yuan, L., and J.G. Huang. (1995). Dynamics of soil P in the rhizosphere of hybrid rice plants and its utilization. *Journal of Southwest Agricultural University*, 17, 440-442.

Zhang, T.Q., and F. Mackenzie. (1997). Changes of phosphorus fractions under continuous corn production in a temperate clay soil. *Plant and Soil*, 192, 133-139.