

اثر ریزوسفر گندم بر شکل‌های مختلف فسفر در خاک‌های آهکی تیمار شده با لجن فاضلاب شهری

* طاهره رئیسی^۱ و علیرضا حسین‌پور^۲

^۱ پژوهشگر در مؤسسه تحقیقات علوم باغبانی، پژوهشکده مرکبات و میوه‌های نیمه‌گرمسیری، سازمان تحقیقات،

آموزش و ترویج کشاورزی، رامسر، آستاد گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: ۹۳/۹/۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۴

چکیده

سابقه و هدف: ریشه گیاه به‌طور مستقیم از طریق فعالیت خود یا به‌طور غیرمستقیم از طریق تحریک جمعیت و فعالیت ریزجانداران می‌تواند شرایط بیولوژیکی و شیمیایی متفاوتی در مقایسه با خاک توده ایجاد کند. اطلاعات در مورد وجود شکل‌های مختلف فسفر در خاک‌های ریزوسفری تیمار شده با لجن فاضلاب شهری محدود می‌باشد. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی اثرات ریزوسفر گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم بکراس روشن بر شکل‌های فسفر معدنی و فسفر آلی کل در ده خاک آهکی تیمار شده با یک درصد (وزنی/وزنی) لجن فاضلاب شهری از تصفیه‌خانه شهرکرد در ریزوباکس اجرا شد.

مواد و روش‌ها: بدین منظور در یک طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار، گندم در ریزوباکس‌های تهیه شده کشت شد. هشت هفته پس از جوانه زدن، گیاهان برداشت و ریزوباکس‌ها باز و خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری تفکیک گردیدند. شکل‌های مختلف فسفر به روش تصحیح شده عصاره‌گیری مرحله‌ای اولسن و سامرز تعیین شدند. همچنین، فعالیت فسفاتاز اسیدی و فسفر قابل استفاده تعیین گردیدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که ریزوسفر گندم منجر به کاهش معنادار شکل‌های فسفر قابل استفاده، فسفر مسدود نشده، فسفر مسدود شده، فسفر آلی و فسفر باقی‌مانده، ولی افزایش معنادار فسفات کلسیم گردید. همچنین، فعالیت فسفاتاز اسیدی در خاک ریزوسفری در مقایسه با خاک غیرریزوسفری افزایش یافت. علاوه بر این، نتایج مطالعه همبستگی نشان داد که شاخص جذب فسفر توسط بخش هوایی گندم همبستگی معناداری با فسفر استخراجی با روش اولسن، شکل‌های فسفر مسدود نشده، فسفر مسدود شده در اکسیدهای آهن و فسفات کلسیم در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری داشت.

نتیجه‌گیری: علاوه بر فسفر استخراجی با روش اولسن (فسفر قابل استفاده) و فسفر مسدود نشده؛ فسفر مسدود شده و فسفات کلسیم را نیز می‌توان به‌عنوان منابعی برای تأمین فسفر قابل استفاده گندم در دوره زمانی کوتاه‌مدت در خاک‌های آهکی تیمار شده با لجن فاضلاب در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: فسفر معدنی، فسفر آلی، عصاره‌گیری مرحله‌ای، ویژگی‌های زیستی

* مسئول مکاتبه: taraiesi@gmail.com

مقدمه

ریزوسفر عبارت است از حجمی از خاک که تحت تأثیر فعالیت ریشه‌ها و گیاهان در حال رشد قرار می‌گیرد (۳۲). با توجه به این که ریشه‌ها منبع اصلی کربن در خاک بوده و در خاک ریزوسفری احتمالاً محدودیتی از لحاظ کربن برای ریزجانداران وجود ندارد (۷)، ویژگی‌های زیستی و شیمیایی این منطقه از توده خاک کاملاً متفاوت است، که می‌تواند منجر به وضعیت تغذیه‌ای متفاوت این منطقه از سایر بخش‌های خاک (توده خاک) گردد. وضعیت تغذیه‌ای فسفر نیز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در منطقه ریزوسفر به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم متأثر از فعالیت ریشه‌ها می‌باشد. ریشه‌ها از طریق تغییر ترکیب جمعیت و افزایش فعالیت ریزجانداران در محیط پیرامون خود می‌توانند به‌طور غیرمستقیم بر فراهمی فسفر اثرگذار باشند. ریزجانداران قادرند در محیط پیرامون ریشه فراهمی فسفر برای گیاه را افزایش و یا کاهش دهند. گیاهان و ریزجانداران می‌توانند حلالیت ترکیبات معدنی فسفر را از طریق آزادسازی پروتون، هیدروکسیل، دی‌اکسید کربن و آنیون‌های آلی (۱۵) افزایش داده و فسفر آلی را از طریق آزادسازی آنزیم‌های فسفاتاز مختلف معدنی کنند (۲، ۳۵). بنابراین، در ریزوسفر، فسفر توسط ترکیبات منشأ گرفته از گیاه و یا ریزجانداران متحرک می‌شود و رقابت شدیدی برای جذب فسفر بین گیاه و ریزجانداران وجود دارد. ولی، ریزجانداران از طریق تخریب ترشحات آلی ریشه گیاه، جذب فسفر در بدن ریزجاندارانی با زمان بازگشت طولانی و جلوگیری از رشد ریشه گیاه منجر به کاهش جذب فسفر توسط ریشه گیاه می‌شوند (۱۵).

ریشه گیاه نیز با جذب فسفر از فاز محلول خاک، تعادل بین فاز جامد و محلول را بر هم می‌زند و سبب ایجاد شیب غلظت لازم برای پخشیدگی فسفر از توده خاک به سمت ریشه می‌شود (۳) و بدین طریق به‌طور مستقیم فراهمی فسفر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. طبق

نظر دارا (۱۹۹۳) طبیعت این شیب غلظت به سه عامل سرعت جذب یا آزادسازی عناصر غذایی، تحرک عناصر غذایی در خاک و سرعت تبدیل شکل‌های غیرقابل دسترس به شکل‌های قابل دسترس‌تر بستگی دارد (۸). بنابراین، فراهمی فسفر برای گیاه به سازوکارهای مختلف کسب فسفر از ریزوسفر و تدابیر به‌کار گرفته توسط گیاه برای برداشت فسفر بستگی دارد. یکی از تدابیر به‌کار گرفته شده توسط گیاه استفاده از شکل‌هایی از فسفر با فراهمی پایین در محیط پیرامون خود می‌باشد. شکل‌های مختلف فسفر خاک اغلب به کمک روش عصاره‌گیری مرحله‌ای بررسی می‌شوند. روش عصاره‌گیری مرحله‌ای، از سازوکار توانایی واکنشگرهای شیمیایی مختلف برای حل کردن انتخابی فازهای فسفات آهن، آلومینیم و کلسیم موجود در خاک‌ها استفاده می‌کنند. روش جزءبندی فسفر معدنی در سال ۱۹۵۷ توسط چنگ و جکسون به‌کار گرفته شد (۶). روش چنگ و جکسون (۱۹۵۷) به مرور زمان توسط پژوهشگران دیگر تصحیح شد (۶). اولسن و سامرز در سال ۱۹۸۲ به تصحیح روش چنگ و جکسون پرداختند و تقریب نسبتاً مناسبی را از شکل‌های فسفر در خاک‌های آهکی فراهم کردند (۱۹). طی دهه‌های گذشته در مطالعات زیادی به بررسی شکل‌های مختلف فسفر و قابلیت استفاده فسفر با استفاده از روش‌های عصاره‌گیری مرحله‌ای در خاک پرداخته شده است (۱۷، ۲۱، ۳۸). شواهدی نیز مبنی بر تغییر شکل‌های مختلف فسفر (فسفر محلول در آب، فسفر قابل استخراج توسط بی‌کربنات سدیم، فسفر رزین، فسفر قابل استخراج توسط باز و فسفر قابل استخراج توسط اسید) در خاک ریزوسفر وجود دارد که از آن جمله می‌توان به تخلیه فسفر محلول (۲۵)، فسفر قابل استخراج توسط بی‌کربنات سدیم (۲۲)، فسفر قابل استخراج توسط باز (۲۵، ۳۷) و فسفر قابل استخراج توسط اسید (۲۶، ۳۴) در ریزوسفر گیاهان مختلف اشاره کرد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش ۳۰ نمونه خاک از نقاط مختلف زمین‌های زراعی دشت شهرکرد از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری جمع‌آوری شدند. پس از هوا خشک کردن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، ۱۰ نمونه خاک بر اساس مقادیر درصد رس، کربنات کلسیم معادل و فسفر قابل استفاده (۱۹) بر اساس ضریب تغییرات و این‌که خاک‌های منتخب دامنه وسیعی از لحاظ ویژگی‌های بررسی شده را به خود اختصاص دهند، انتخاب شدند. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از جمله pH در سوسپانسیون ۲ به ۱ محلول به خاک (۳۱)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره‌های صاف شده با نسبت ۲ به ۱ محلول به خاک (۲۴)، کربنات کلسیم معادل خاک به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتراژ با هیدروکسید سدیم (۱۴)، درصد کربن آلی خاک به روش اکسایش تر (۱۸)، گنجایش تبادل کاتیونی به روش استات سدیم یک مولار در $pH=8/2$ (۵) و بافت خاک به روش هیدرومتر (۱۰) تعیین شد.

جهت انجام این پژوهش از لجن فاضلاب شهری از تصفیه‌خانه فاضلاب شهرکرد استفاده شد. لجن فاضلاب، هوا خشک شد و از الک ۰/۵ میلی‌متری عبور داده شد و پاره‌ای ویژگی‌های لجن فاضلاب مورد استفاده از جمله pH، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره‌های صاف شده با نسبت ۵ به ۱ محلول به خاک، کربن آلی به روش اکسایش تر (۱۸)، هم‌چنین، فسفر کل به روش هضم تر (۱۳)، نیتروژن کل به روش کجلدال (۴)، روی، مس، کادمیوم، نیکل و سرب کل (۲۸) اندازه‌گیری شدند.

به‌منظور مطالعه اثر ریزوسفر گندم، یک آزمایش گلخانه‌ای به‌صورت فاکتوریل (فاکتورها شامل نوع خاک و محیط (ریزوسفر و غیرریزوسفر)) در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۱۰ نوع خاک و در سه تکرار

یکی از منابع آلی حاوی مقادیر ارزشمند فسفر، پسماندهای آلی نظیر لجن فاضلاب می‌باشند (۲۷). استفاده از لجن فاضلاب به‌عنوان یکی از راه‌های مؤثر در افزایش باروری خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته شده است (۱۱). اطلاعات نسبتاً جامعی در مورد اثر کاربرد لجن فاضلاب بر ویژگی‌های زیستی و شکل‌های مختلف فسفر در خاک در دسترس می‌باشد (۱، ۲۳). در مطالعات زیادی نیز اثرات ریزوسفری بر ویژگی‌های زیستی و شکل‌های مختلف فسفر خاک بررسی شده است (۲۰، ۲۶) اما اطلاعات کمی در مورد اثر لجن فاضلاب بر ویژگی‌های زیستی و شکل‌های مختلف فسفر در خاک‌های ریزوسفری موجود می‌باشد. بررسی و درک اثر متقابل میان ریشه گیاه، کودهای آلی حاوی فسفر و خصوصیات زیستی و شیمیایی فسفر از جمله پژوهش‌های جدید و مورد ملاحظه بسیاری از پژوهشگران در سال‌های اخیر می‌باشد.

به‌طورکلی ویژگی‌های بیوشیمیایی خاک، ترکیب کود آلی و فرایندهای ریزوسفری بر قابلیت استفاده فسفر به دنبال کاربرد کودهای آلی مؤثر هستند (۳۵). روابط بین این ترکیبات (ویژگی‌های خاک، ترکیب کود آلی و فرایندهای ریزوسفری) پیچیده و درک کاملی از اثر متقابل میان ریشه گیاه، کودهای آلی حاوی فسفر و ویژگی‌های شیمیایی و زیستی هنوز حاصل نشده است. علی‌رغم پژوهش‌های فراوان صورت گرفته پیرامون جزءبندی فسفر و ویژگی‌های میکروبیولوژیک، در زمینه تأثیر ریزوسفر گندم بر جزءبندی فسفر و ویژگی‌های زیستی در خاک‌های آهکی تیمار شده با لجن فاضلاب شهری مطالعات اندکی انجام گرفته است. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی اثر ریزوسفر گندم بر شکل‌های فسفر، فعالیت فسفاتازهای اسیدی، کربن آلی محلول و فسفر زیست‌توده میکروبی با استفاده از ریزوباکس در خاک‌های آهکی انجام شد.

نمونه‌های خشک شده در آن (بخش هوایی) به روش خاکستر خشک هضم و مقدار فسفر موجود در نمونه‌های هضم شده به روش رنگ‌سنجی (۱۶) تعیین شد. ریزوباکس‌ها در پایان هفته هشتم باز شدند و از هر ریزوباکس دو نمونه خاک، یکی از بخش ریزوسفر و دیگری از بخش توده خاک (خاک غیرریزوسفری) برداشت شد. مقداری از خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری هر ریزوباکس در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به منظور اندازه‌گیری فعالیت فسفاتاز اسیدی ذخیره شد. باقی‌مانده خاک هوا خشک و برای اندازه‌گیری فسفر قابل استخراج با روش اولسن (فسفر قابل استفاده، ۱۳) و شکل‌های فسفر استفاده گردید. برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی از روش طباطبایی و برمنر (۱۹۶۹) استفاده شد (۳۰). همچنین، فسفر آلی در همه نمونه‌های خاک به روش سوزاندن (۱۳) تعیین شد. برای مقایسه جزءبندی فسفر در نمونه خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری پس از پایان دوره رشد گندم از روش عصاره‌گیری مرحله‌ای اولسن و سامرز (۱۹۸۲) (جدول ۱) با یک تصحیح برای اندازه‌گیری فسفر باقی‌مانده استفاده شد (۱۹). بدین صورت که در انتهای عصاره‌گیری مرحله‌ای، فسفر باقی‌مانده (شامل فسفر آلی و معدنی مقاومی که توسط عصاره‌گیرهای قبلی و در مراحل قبلی عصاره‌گیری استخراج نشده است) با روش هضم با اسید نیتریک و اسید پرکلریک (۱۳) اندازه‌گیری شد. غلظت فسفر در عصاره‌ها به روش رنگ‌سنجی (۱۶) تعیین شد. لازم به ذکر است در ادامه و در جداول مجموع فسفر مرتبط با اکسیدهای آهن و آلومینیم و فسفر دوباره جذب سطحی شده تحت عنوان فسفر مسدود نشده توسط اکسیدهای آهن و آلومینیم در نظر گرفته شد.

انجام و پس از برداشت گیاه، خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری جدا شد. در ابتدا، به‌منظور تیمار خاک‌ها با لجن فاضلاب، معادل یک درصد وزنی (W/W) لجن فاضلاب عبور داده شده از الک نیم میلی‌متری به خاک‌ها اضافه و اختلاط لجن فاضلاب و خاک به وسیله مخلوط کردن با یک اسپاتولا انجام شد. رطوبت خاک‌ها به حد ظرفیت مزرعه‌ای رسانده و یک ماه پس از اعمال تیمارها (به‌منظور انجام واکنش‌های بین خاک و لجن فاضلاب)، خاک‌ها به ریزوباکس‌ها برای مطالعه اثر ریزوسفری گندم، منتقل شدند. ابعاد ریزوباکس ۱۶۰×۱۳۲×۱۸۰ میلی‌متر (ارتفاع × عرض × طول) در نظر گرفته شد. ریزوباکس به سه بخش، شامل بخش مرکزی (ریزوسفر) (طول ۳۲ میلی‌متر؛ یوسف و چینو، ۱۹۸۸) و بخش غیرریزوسفری (به طول ۵۰ میلی‌متر در دو طرف خاک ریزوسفری؛ ۳۶) تقسیم شد. دو قسمت خاک غیرریزوسفری (توده خاک) از بخش خاک ریزوسفری توسط یک پوشش نایلونی با قطر منافذ حدود ۲۴ میکرومتر جدا شدند. بخش ریزوسفری و بخش‌های غیرریزوسفری (توده خاک) به‌ترتیب با ۹۰۰ و ۳۱۰۰ گرم خاک هوا خشک پر شدند. برای کشت گیاه، بذرهای گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم بک‌کراس روشن پس از ضدعفونی با هیپوکلریت سدیم به تعداد شش بذر در قسمت مرکزی ریزوباکس‌ها کشت شدند. در پایان هفته اول تعداد بذرها در هر ریزوباکس به چهار عدد کاهش یافت. در طول مدت رشد، مراقبت‌های زراعی لازم انجام گردید و سعی شد گیاهان دچار تنش خشکی نشوند. بخش هوایی گیاهان ۸ هفته بعد از کاشت برداشت شد. بخش‌های هوایی گیاهان با آب مقطر شسته شده و به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۶۵ درجه سلسیوس خشک و وزن خشک اندام هوایی تعیین شد.

جدول ۱- تعیین شکل مرحله‌ای فسفر به روش اولسن و سامرز (۱۹۸۲).

Table 1. Sequential P fraction methodology (Olsen and Sommers, 1982).

شکل‌های فسفر عصاره‌گیری شده Targeted P forms	زمان تعادل Equilibration	عصاره‌گیر Extractant
فسفر پیوند شده با اکسیدهای آهن و آلومینیم (۶). (Aluminium and iron-bound Pi (6))	۱۷ ساعت تکان دادن (17 h)	هیدروکسید سدیم ۰/۱ مولار و کلرید سدیم ۱ مولار (0.1 N sodium hydroxide + 1 M sodium chloride)
فسفات دوباره جذب سطحی شده به وسیله کربنات در مرحله عصاره‌گیری با هیدروکسید سدیم، هم‌چنین فسفات‌های کلسیم پدوژنیک (۹) (Phosphate re-adsorbed to carbonate surfaces during the preceding sodium hydroxide extraction; also extracted are the labile pedogenic Ca-rich phosphates (9))	۱۵ دقیقه حرارت در دمای ۸۵ درجه سلیسیوس در بن‌ماری (15 min at 85 °C)	سیترات سدیم ۰/۳ مولار و بی‌کربنات سدیم ۱ مولار (0.3 M sodium citrate + 1 M sodium bicarbonate)
فسفر مسدود شده در داخل اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و بخش کوچکی از فسفات کلسیم لبایل که در طی مرحله قبلی عصاره‌گیری (مرحله دوم) استخراج نشده است (۶). (Reductant-soluble P, mostly occluded in Fe oxides; this fraction may also include a small portion of labile Ca-P not removed in the previous CB extraction (6))	بلافاصله بعد از افزودن یک گرم دی‌تیونات سریعاً محتویات لوله را تکان داده، سپس ادامه حرارت دادن در دمای ۸۵ درجه سلیسیوس به مدت ۱۵ دقیقه (Preheat 15 min at 85 °C after sodium citrate + sodium bicarbonate addition; additional 15 min after dithionite addition)	سیترات سدیم ۰/۳ مولار، بی‌کربنات سدیم ۱ مولار و ۱ گرم دی‌تیونات سدیم (0.3 M sodium citrate + 1 M sodium bicarbonate + sodium dithionite (1 g))
فسفات‌های کلسیم پایدار شامل آپاتیت لیتوژنیک با استثناء شکل‌های فسفات کلسیم قابل استفاده‌تری که در مراحل قبلی (مرحله دوم و سوم) استخراج شده‌اند (۶). (Stable Ca phosphates, including lithogenic apatite but excluding more labile Ca-P forms removed in the previous CB and CBD fractions (6))	۱ ساعت تکان دادن (1 h)	اسید هیدروکلریک ۱ نرمال (1 N hydrochloric acid)

لازم به ذکر است در این مقاله مجموع فسفر دوباره جذب سطحی شده با فسفر مرتبط با اکسیدهای آهن و آلومینیم تحت عنوان فسفر مسدود نشده توسط اکسیدهای آهن و آلومینیم در نظر گرفته شد.

Note: The re-adsorbed P is normally combined with the aluminium and iron bound Pi fraction to correctly estimate non-occluded.

آزمون حداقل اختلافات معنادار (LSD) و در سطح احتمال ۵ درصد مورد سنجش قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مطالعه شده در جدول ۲ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دامنه مقدار رس و سیلت در خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب از ۱۳/۳ تا

اثر ریزوسفر و نوع خاک در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب شهری بر مقدار ویژگی‌های شیمیایی و زیستی مطالعه شده توسط تجزیه واریانس دو طرفه بررسی شد. هم‌چنین، اثر متقابل ریزوسفر و سطح لجن صرف‌نظر از نوع خاک بر ویژگی‌های مورد مطالعه توسط تجزیه واریانس دو طرفه و در آخر اثر نوع خاک بر شاخص‌های گیاه توسط تجزیه واریانس یک طرفه با استفاده از نرم‌افزار Statistica نسخه ۱۰ بررسی شد (۲۹). معنادار بودن تفاوت‌ها توسط

۰/۶۱ دسی‌زیمنس بر متر) بودند. دامنه فسفر استخراجی با روش اولسن از ۱۵/۹ تا ۷۱/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. بنابراین، می‌توان گفت خاک‌های بررسی شده دارای دامنه وسیعی از نظر مقدار کربنات کلسیم معادل، رس و فسفر قابل استفاده می‌باشند.

۵۵ و از ۲۵ تا ۵۶ درصد، دامنه کربنات کلسیم معادل از ۱۶۲ تا ۴۷۵ گرم بر کیلوگرم خاک و مقدار کربن آلی از ۳/۱ تا ۱۳/۹ گرم بر کیلوگرم خاک می‌باشد. خاک‌های مورد مطالعه قلیایی (دامنه pH از ۷/۹ تا ۸/۱) و غیرشور (دامنه هدایت الکتریکی از ۰/۲۶ تا

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اولیه خاک‌های مطالعه شده.

Table 2. Physicochemical properties of the studied soils.

فسفر اولسن (olsen-P)	کربن آلی (O.C)	کربنات کلسیم معادل (CaCO ₃)	رس (Clay)	سیلت (Silt)	شن (Sand)	گنجایش تبادل کاتیونی (CEC)	هدایت الکتریکی (EC)	pH	خاک (soil)
میلی‌گرم بر کیلوگرم (mg/kg)	گرم بر کیلوگرم (g/kg)	گرم بر کیلوگرم (g/kg)	درصد (%)	درصد (%)	درصد (%)	سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک (cmol _e /kg)	دسی‌زیمنس بر متر (dS/m)		
24.7	3.1	421	37	35	28	14.2	0.36	8.0	1
15.9	5.0	162	48	40	13	23.7	0.38	8.0	2
17.5	4.3	410	45	33	42	10.3	0.46	8.0	3
19.1	4.1	475	49	56	14	12.4	0.42	8.0	4
18.1	5.4	388	52	43	50	29.4	0.46	8.0	5
22.4	8.4	267	55	30	15	33.3	0.59	7.9	6
40.1	5.1	325	37	44	19	16.3	0.36	8.1	7
32.0	13.9	266	49	39	12	25.9	0.59	8.1	8
71.9	10.4	210	37	47	16	18.9	0.61	8.0	9
16.8	7.0	190	13	25	62	10.3	0.26	8.0	10
62	50	35	33	23	66	42	26	0.71	ضریب تغییرات (%) CV (%)

بخشی از نیاز گیاه به این عناصر کم‌مصرف را تأمین کند. مقدار کل کادمیم، نیکل و سرب موجود در این منبع آلی به ترتیب ۰/۹۱، ۷۸ و ۲۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. مقایسه مقادیر فلزات سنگین موجود در لجن فاضلاب مورد استفاده با استانداردهای آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA) نشان داد که غلظت این عناصر در لجن فاضلاب کم‌تر از حداکثر غلظت استاندارد این عناصر (حداکثر غلظت استاندارد عناصر روی، مس، کادمیم، نیکل و سرب

لجن فاضلاب مورد استفاده دارای pH کمی قلیایی (۷/۵) و EC ۲/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر بود. مقدار کربن آلی این ترکیب ۲۰ درصد بود که می‌تواند اثر مطلوبی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک داشته باشد. مقدار نیتروژن کل و فسفر کل در لجن فاضلاب شهری مورد استفاده به ترتیب ۵/۷ و ۱/۸۵ درصد بود. هم‌چنین مقدار روی و مس کل آن به ترتیب ۱۳۲۱ و ۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. بنابراین انتظار می‌رود استفاده از لجن فاضلاب شهری می‌تواند حداقل

به ترتیب ۷۵۰۰، ۴۳۰۰، ۸۵، ۴۲۰ و ۸۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم) بود (۳۳). هم چنین، لازم به ذکر است که دامنه فسفر قابل استخراج با روش اولسن در خاک‌های یک ماه خوابانیده شده با لجن فاضلاب شهری از ۲۹/۵ تا ۸۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم بود (داده‌ها آورده نشده است).

مقدار فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی در جدول ۳ آورده شده است. بررسی نتایج نشان داد صرف نظر از نوع خاک، فعالیت فسفاتاز اسیدی در خاک ریزوسفری افزایش یافته است ($P < 0/05$). دامنه تغییرات فسفاتاز اسیدی در خاک‌های ریزوسفری از ۷۸ تا ۸۲ تا ۲۰۵ و در خاک‌های غیرریزوسفری از ۷۸ تا ۱۱۰ میکروگرم پی‌نینرو فنول فسفات بر گرم خاک در ساعت بود. هم چنین، نویسندگان مقاله حاضر در مطالعه‌ای مجزا در خاک‌های مطالعه شده، اثر ریزوسفر بر فسفر استخراجی با روش اولسن و ویژگی‌های زیستی و شیمیایی را مورد بررسی قرار دادند (۲۲). در مقاله ذکر شده مشاهده می‌شود که بدون در نظر گرفتن نوع خاک، کربن آلی محلول، فسفر زیست‌توده میکروبی و کربن زیست‌توده میکروبی در خاک ریزوسفری افزایش و فسفر استخراجی با روش اولسن در خاک ریزوسفری کاهش یافته‌اند (۲۲). بنابراین، افزایش فعالیت فسفاتاز اسیدی در خاک ریزوسفری هر خاک نسبت به خاک غیرریزوسفری، با افزایش فعالیت ریشه و ریزجانداران در ناحیه احاطه‌کننده ریشه منطبق است.

تأثیر مثبت ریزوسفر بر ویژگی‌های زیستی خاک توسط دیگر پژوهشگران گزارش شده است (۲، ۷، ۲۲). بالیک و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که فعالیت فسفاتاز اسیدی در خاک ریزوسفر گندم در تیمار لجن فاضلاب، کود دامی و کنترل نسبت به خاک غیرریزوسفری افزایش یافت (۲).

به طور کلی، فسفر زیست‌توده میکروبی می‌تواند از طریق رقابت با گیاهان برای جذب فسفر مخزن مهمی

برای فسفر محلول خاک و یا از طریق تأمین بخشی از فسفر مورد نیاز گیاه منبع مهمی از فسفر باشد. مازاد بر این، تولیدات حاصل از تخریب میکروبی و ترشحات آلی گیاه از قبیل کربن آلی محلول می‌تواند منجر به وا جذب فسفر جذب سطحی شده، گشته و هم چنین، می‌تواند حلالیت فسفر غیرقابل دسترس گیاه را افزایش داده و از این طریق منجر به افزایش فسفر قابل استفاده گردند. بنابراین، با توجه به اثر ریزوسفر بر ویژگی‌های زیستی بررسی شده و اثر احتمالی ویژگی‌های زیستی بررسی شده بر جزء بندی فسفر، به نظر می‌رسد احتمالاً بخشی از تبدیلات فسفر در ریزوسفر توسط بررسی خصوصیات زیستی قابل توجیه باشد. بنابراین در ادامه این پژوهش ابتدا به بررسی اثر ریزوسفر بر مقدار شکل‌های مختلف فسفر و سپس به بررسی ارتباط بین شکل‌های مختلف فسفر و برخی ویژگی‌های زیستی آورده شده در مقاله رئیسی و حسین پور (۲۰۱۴b)، پرداخته شده است (۲۲).

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود صرف نظر از نوع خاک، مقدار شکل‌های فسفر مسدود نشده توسط اکسیدهای آهن و آلومینیم، فسفر مسدود شده در اکسیدهای آهن، فسفر آلی و فسفر باقی مانده در خاک ریزوسفری گندم کم‌تر از مقادیر این اجزاء در خاک غیرریزوسفری بود اما، مقدار فسفات کلسیم در خاک ریزوسفری گندم به طور معنادار بیش تر از این شکل در خاک غیرریزوسفری بود (جدول ۳). به نظر می‌رسد فسفر مسدود نشده که شامل فسفر پیوند شده با اکسیدهای آهن و آلومینیم و فسفات دوباره جذب سطحی شده به وسیله کربنات در مرحله عصاره‌گیری با هیدروکسید سدیم می‌باشد، از قابلیت استفاده کم‌تری نسبت به فسفر استخراجی با روش اولسن در خاک‌های آهکی برخوردار است. فسفر مسدود نشده،

۳۶۵ میلی گرم بر کیلوگرم متغیر و ریزوسفر گندم منجر به کاهش معنادار این شکل شده است ($P < 0/05$). دامنه تغییرات فسفر آلی در خاک‌های ریزوسفری از ۸۳ تا ۲۰۸ و در خاک‌های غیرریزوسفری از ۷۶ تا ۲۶۱ میلی گرم بر کیلوگرم بود. بررسی نتایج نشان داد در خاک‌های ریزوسفری این شکل با درصد رس ($r = 0/68^{**}$ و $P < 0/05$) همبستگی معناداری داشت. در خاک‌های غیرریزوسفری نیز این شکل با درصد رس ($P < 0/10$) و ($r = 0/62^*$) همبستگی معناداری داشت.

به‌طور کلی در مطالعه حاضر صرف‌نظر از نوع خاک، ریزوسفر گندم منجر به کاهش شکل‌های فسفر مسدود نشده، فسفر مسدود شده در اکسیدهای آهن، فسفر آلی و فسفر باقی‌مانده و افزایش معنادار فسفات کلسیم در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب شد. تخلیه فسفر معدنی و آلی به‌دلیل جذب فسفر معدنی توسط گیاه و ریزجانداران می‌باشد. در خاک‌های قلیایی دیگر نیز تخلیه فسفر باقی‌مانده در ریزوسفر گندم و خلر (۳۴) و ریزوسفر خلر (۲۵) گزارش شده است. زویسا و همکاران (۱۹۹۹) گزارش کرد که فسفر مسدود نشده و فسفر محلول در اسید سولفوریک در ریزوسفر چای نسبت به خاک‌های غیرریزوسفری کاهش یافتند (۳۷). رز و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که شکل فسفر مسدود نشده در خاک‌های قلیایی یکی از شکل‌های فسفر معدنی تخلیه شده توسط گندم بود (۲۵). هم‌چنین، این پژوهشگران تغییر معناداری در شکل فسفات کلسیم یافت نکردند. نتایج والد‌ریپ و همکاران (۲۰۱۱) بیانگر تجمع فسفات کلسیم در محیط ریزوسفری علف چاودار در هفته هشتم رشد در خاک‌های تیمار شده با کود مرغی بود (۳۵).

از تنوع وسیعی در خاک‌های مطالعه شده برخوردار بود. دامنه این شکل در خاک‌های ریزوسفری از ۱۱۱ تا ۲۰۹ و در خاک‌های غیرریزوسفری از ۱۱۲ تا ۲۳۳ میلی گرم بر کیلوگرم متغیر بود. بررسی نتایج نشان داد در خاک‌های ریزوسفری این شکل با کربن آلی اولیه ($r = 0/59^*$ و $P < 0/10$) pH و ($r = 0/61^*$ و $P < 0/10$) همبستگی معناداری داشت. در خاک‌های غیرریزوسفری، این شکل با درصد سیلت ($P < 0/10$) و ($r = 0/75^*$) و فسفر قابل استفاده اولیه ($P < 0/10$) و ($r = 0/61^*$) همبستگی معناداری داشت. دامنه فسفر محلول در سیترات-بی‌کربنات-دیتیونات، فسفر مسدود شده در اکسیدهای آهن، در خاک‌های ریزوسفری از ۴۹ تا ۱۳۴ و در خاک‌های غیرریزوسفری از ۶۳ تا ۱۲۱ میلی گرم بر کیلوگرم متغیر بود. لازم به ذکر است که احتمالاً قابلیت استفاده فسفر مسدود شده در اکسیدهای آهن از فسفر مسدود نشده و فسفر استخراجی با روش اولسن کم‌تر می‌باشد. بررسی نتایج نشان داد در خاک‌های ریزوسفری این شکل با کربن آلی اولیه ($P < 0/05$) و ($r = 0/66^{**}$) و فسفر قابل استفاده اولیه ($P < 0/05$) و ($r = 0/76^{**}$) همبستگی معناداری داشت. در خاک‌های غیرریزوسفری، این شکل با فسفر قابل استفاده اولیه ($P < 0/05$) و ($r = 0/87^{**}$) همبستگی معناداری داشت. دامنه غلظت فسفات کلسیم در خاک‌های ریزوسفری از ۳۵۳ تا ۷۲۸ و در خاک‌های غیرریزوسفری از ۳۲۵ تا ۷۰۶ میلی گرم بر کیلوگرم خاک متغیر و ریزوسفر گندم منجر به افزایش معنادار این شکل شده است ($P < 0/05$). این بخش، شکل غالب فسفر در خاک‌های مطالعه شده بود. شکل فسفر باقی‌مانده، از تنوع وسیعی در خاک‌های مطالعه شده برخوردار بود، به‌طوری‌که دامنه این شکل در خاک‌های ریزوسفری از ۱۳۵ تا ۲۸۷ و در خاک‌های غیرریزوسفری از ۱۸۲ تا

جدول ۳- اثر ریشه گندم و نوع خاک بر فعالیت فسفاتاز اسیدی (میکروگرم بی نیتر و فنول فسفات بر گرم خاک در ساعت) و شکل های مختلف فسفر (میلی گرم بر کیلوگرم) در خاک های تیمار شده با لجن فاضلاب شهری.
Table 3. Effects of root activity (rhizosphere and bulk soils) and soil on activity of acid phosphatase (μ PNP/(g soil h)) and various P fractions (mg-P/ kg) in soils amended with sewage sludge.

فسفر باقیمانده (Residual P)	فسفر آلی (Organic P)		فسفات کلسیم (Calcium P)		فسفر مسدود شده (occluded P)		فسفر مسدود نشده (Non-occluded P)		فسفاتاز اسیدی (acid phosphatase)		خاک (Soil)	
	ریزوسفر (Rhizosphere)	شیر ریزوسفر (Bulk)	ریزوسفر (Rhizosphere)	شیر ریزوسفر (Bulk)	ریزوسفر (Rhizosphere)	شیر ریزوسفر (Bulk)	ریزوسفر (Rhizosphere)	شیر ریزوسفر (Bulk)	ریزوسفر (Rhizosphere)	شیر ریزوسفر (Bulk)		
192	163	122	163	426	446	72	64	119	116	83	87	1
182	171	130	198	518	539	63	49	147	120	78	82	2
205	163	144	83	487	574	68	65	134	132	83	132	3
216	183	154	172	325	353	64	69	137	112	84	118	4
189	149	135	146	557	611	63	63	137	134	77	107	5
295	212	261	172	425	448	94	89	112	111	97	110	6
365	287	119	112	706	728	121	89	175	170	77	85	7
196	163	196	208	384	385	95	94	141	136	87	205	8
195	135	209	104	656	688	113	134	233	209	91	93	9
338	272	76	91	513	541	68	66	124	133	110	112	10
LSD	p value	LSD	p value	LSD	p value	LSD	p value	LSD	p value	LSD	p value	
31	<0.01	10	<0.05	11	<0.01	3.3	<0.05	3.8	<0.01	12	<0.01	محیط (Environment)
70	<0.01	22	<0.01	24	<0.01	7.4	<0.01	8.5	<0.01	26	<0.01	خاک (Soil)
99	0.98	31	<0.01	34	0.08	11	<0.01	12	<0.01	37	<0.01	محیط × خاک (Environment*soil)

محیط شامل خاک های ریزوسفر و غیر ریزوسفر می باشد.

Environment including rhizosphere and bulk soils

نتایج همبستگی شکل‌های مختلف فسفر با برخی ویژگی‌های زیستی در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری گندم در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- ضرایب همبستگی شکل‌های مختلف فسفر با برخی ویژگی‌های زیستی در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری گندم (n=۳۰).

Table 4. Correlation coefficients between chemical and biological properties and different P fractions in the rhizosphere and the bulk soils (n=30).

فسفاتاز اسیدی (Acid phosphatase)	فسفر زیست‌توده (Microbial biomass P)	کربن آلی محلول (Dissolved organic C)	محیط (Environment)	شکل‌های مختلف فسفر (P fractions)
-0.09	0.54**	0.21	ریزوسفر (Rhizosphere)	۱- فسفر پیوند شده با اکسیدهای آهن و آلومینیم (Non-occluded P)
-0.24	0.41*	0.31	غیرریزوسفر (Bulk)	
0.03	0.29	0.03	ریزوسفر (Rhizosphere)	۲- فسفر مسدود شده در اکسیدهای آهن (occluded P)
0.10	0.27	-0.01	غیرریزوسفر (Bulk)	
0.43*	0.13	0.54**	ریزوسفر (Rhizosphere)	۳- فسفات کلسیم (Calcium P)
0.22	0.29	0.19	غیرریزوسفر (Bulk)	
0.00	-0.16	-0.30	ریزوسفر (Rhizosphere)	۴- فسفر آلی (Organic P)
0.21	0.11	-0.17	غیرریزوسفر (Bulk)	
-0.08	-0.40*	-0.27	ریزوسفر (Rhizosphere)	۵- فسفر باقی مانده (Residual P)
0.14	-0.44*	-0.17	غیرریزوسفر (Bulk)	

** و * به ترتیب معنادار در سطح احتمال ۹۹ و ۹۵ درصد.

** , * are significant at probability levels 99, 95% (P<0.01, P<0.05), respectively.

معنی دار ذکر شده در خاک ریزوسفری قوی‌تر از خاک غیرریزوسفری بود. رابطه مثبت بین کربن آلی محلول و فسفات کلسیم ممکن است حاکی از این امر باشد که تولیدات حاصل از تخریب میکروبی و ترشحات آلی گیاه می‌توانند منجر به واجدبندی فسفر جذب سطحی شده، گشته و هم‌چنین، می‌توانند حلالیت فسفر غیرقابل دسترس گیاه (فسفر باقی مانده) را افزایش داده و منجر به تجمع فسفات کلسیم در خاک

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود فسفاتاز اسیدی همبستگی معناداری با فسفات کلسیم در خاک‌های ریزوسفری داشت. در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری همبستگی معنی‌داری بین فسفر زیست‌توده و فسفر مرتبط با اکسیدهای آهن و آلومینیم و فسفر باقی مانده یافت شد. کربن آلی محلول همبستگی معناداری با شکل فسفات کلسیم در خاک‌های ریزوسفری داشت. همه همبستگی‌های

و آلومینیم < فسفر مسدود شده در اکسیدهای آهن > فسفر آلی < فسفر باقی مانده کاهش یافت.

افزودن لجن فاضلاب منجر به افزایش معنادار جزءهای فسفر پیوند شده با اکسیدهای آهن و آلومینیم، فسفر مسدود شده در اکسیدهای آهن و فسفر باقی مانده در خاکهای ریزوسفیری و غیرریزوسفیری شد (جدول ۶). درصد کم‌تر افزایش جزء فسفر مرتبط با اکسیدهای آهن و آلومینیم و فسفر باقی مانده در خاکهای ریزوسفیری در مقایسه با خاک غیرریزوسفیری می‌تواند به دلیل جذب جزء مرتبط با اکسیدهای آهن و آلومینیم توسط ریشه گیاه و ریزجانداران و یا تبدیل فسفر باقیمانده در ریزوسفر به اجزای دیگر فسفر باشد. لازم به ذکر است که جزء فسفر مرتبط با اکسیدهای آهن و آلومینیم با فسفر جذب شده توسط گندم همبستگی معناداری داشت. درصد افزایش بیش‌تر فسفر مسدود شده در خاکهای ریزوسفیری در مقایسه با خاکهای غیرریزوسفیری به دنبال کاربرد لجن فاضلاب می‌تواند به دلیل تبدیلات دیگر اجزاء فسفر به این جزء در خاکهای ریزوسفیری باشد. از سوی دیگر همان‌طور که در بخش بعدی مشاهده خواهد شد این جزء همبستگی معناداری با فسفر جذب شده توسط گندم دارد. بنابراین، احتمالاً سرعت جذب فسفر توسط ریشه گندم از این جزء کم‌تر از سرعت تبدیل دیگر جزءهای فسفر به جزء ذکر شده در خاکهای ریزوسفیری بود. نقش افزایش فسفر آلی پس از کاربرد لجن فاضلاب نیز مشابه جزء مسدود شده بود که اشاره می‌کند به دنبال کاربرد لجن فاضلاب در خاک ریزوسفیری آلی شدن سریع فسفر رخ داده است و ریزجانداران در این خاکهای تیمار شده بیشتر مخزنی برای فسفر بوده‌اند تا منبعی برای فسفر.

گردد. همان‌طور که مشاهده شد، کربن آلی محلول با فسفر آلی و فسفر باقی مانده همبستگی منفی داشت اما همبستگی این پارامتر تنها با شکل فسفات کلسیم در خاکهای ریزوسفیری معنی‌دار و مثبت بود. علاوه بر این، فسفر معدنی آزاد شده توسط هیدرولیز آنزیمی می‌تواند به‌طور مستقیم در شکل‌های معدنی فسفر تجمع یابد. بنابراین، آزادسازی فسفر معدنی توسط فسفاتاز اسیدی می‌تواند یکی از دلایل تجمع فسفات کلسیم در ریزوسفر باشد. در مطالعه حاضر با توجه به ارتباط مثبت و منفی زیست‌توده میکروبی به ترتیب با فسفر مسدود نشده و فسفر باقی مانده به نظر می‌رسد فسفر زیست‌توده می‌تواند منبع مهمی از فسفر و مخزن مهمی برای فسفر در خاکهای مطالعه شده باشد. علاوه بر این، شکل فسفر باقی مانده می‌تواند در بین شکل‌های دیگر توزیع مجدد شود. هم‌چنین، نویسندگان مقاله حاضر در پژوهشی مجزا در خاکهای مطالعه شده اما بدون تیمار با لجن فاضلاب شهری، اثر ریزوسفر بر شکل‌های مختلف فسفر را مورد بررسی قرار دادند (۲۱). در ادامه با استناد به نتایج مقاله ذکر شده (۲۱) اثر متقابل کاربرد لجن فاضلاب شهری و ریزوسفر بر شکل‌های مختلف فسفر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تجزیه واریانس اثر لجن، محیط (ریزوسفر و غیرریزوسفر) و اثرهای متقابل عوامل ذکر شده بر جزءبندی فسفر در جدول ۵ آورده شده است. افزودن لجن فاضلاب منجر به افزایش معنادار جزءهای فسفر پیوند شده با اکسیدهای آهن و آلومینیم، فسفر مسدود شده در اکسیدهای آهن و فسفر باقی مانده شد. بررسی مقدار افزایش نسبی جزءهای مختلف فسفر به دنبال کاربرد افزودن لجن به صورت فسفر مرتبط با اکسیدهای آهن

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر تیمارها بر مقادیر جزءهای مختلف فسفر در کشت گندم.

Table 5. Analysis of variance of the treatment effects over P fractionation.

میانگین مربعات (Average of squares)					درجه آزادی (Degree of freedom)	منبع تغییر (Source of variations)
فسفر باقی مانده (Residual P)	فسفر آلی (Organic P)	فسفات کلسیم (Calcium P)	فسفر مسدود شده در اکسیدهای آهن (Occluded P)	فسفر پیوند شده با اکسیدهای آهن و آلومینیم (Non-occluded P)		
24103**	49268**	0.12 ^{ns}	9.91**	16**	1	لجن (Sewage sludge)
42565**	5134 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.04 ^{ns}	1	محیط (Environment)
11035 ^{ns}	352 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.004 ^{ns}	1	لجن × محیط (Sludge*environment)
3467	2066	0.05	0.13	0.10	116	خطا (Error)

** و * F محاسبه شده در سطح احتمال ۹۹ و ۹۵ درصد معنادار هست و F^{ns} محاسبه شده در سطح احتمال ۹۵ درصد معنادار نیست.
***, * Calculated F is Significant at P<0.05 and P<0.01 respectively, ^{ns} Non-significant.

جدول ۶- اثر متقابل سطح لجن و محیط (ریزوسفر و غیرریزوسفر) بر مقادیر جزءهای مختلف فسفر (میلی گرم بر کیلوگرم) در کشت گندم.

Table 6. Interaction effects of sewage sludge and environment (rhizosphere o bulk soil) over P fractionation (mg/kg).

فسفر باقی مانده (Residual P)	فسفر آلی (Organic P)	فسفر مرتبط با کلسیم (Calcium P)	فسفر مسدود شده در اکسیدهای آهن (Occluded P)	فسفر مرتبط با اکسیدهای آهن و آلومینیم (Non-occluded P)	محیط (Environment)	لجن (Sewage sludge)
190(13%)b	145(44%)a	531(-2%)a	78(71%)a	137(89%)a	ریزوسفر (Rhizosphere)	تیمار نشده (Un-amended)
237(29%)a	155(32%)a	500(-9%)a	82(66%)a	145(98%)a	غیرریزوسفر (Bulk)	
214(21%)A	150(37%)A	515(-5%)A	80(68%)A	141(94%)A		میانگین Mean
171b	101b	542a	46b	73b	ریزوسفر (Rhizosphere)	تیمار شده (Amended)
181b	117b	548a	49b	73b	غیرریزوسفر (Bulk)	
176B	109B	545A	48B	73B		میانگین (Mean)

حروف بزرگ مشابه برای هر شاخص نشان می دهند کاربرد لجن فاضلاب بر مقدار آن شاخص تأثیر معناداری در سطح احتمال ۹۵ درصد نداشته است؛ در هر ستون میانگین هایی که دارای حداقل یک حرف کوچک مشترک باشند تفاوت معناداری در سطح احتمال ۹۵ درصد ندارند. اعداد داخل پرانتز درصد نسبی تغییر هر ویژگی بر اثر افزودن لجن فاضلاب را نشان می دهند.

Means followed by the same uppercase letter are not different (P<0.05) between treatments (un-amended, amended) within columns; means followed by the same lowercase letter are not different (P<0.05) between environment types (rhizosphere, bulk) within columns and treatments. Number in () showed relative changes in the value of indices following application of sewage sludge.

ماده خشک اندام هوایی گندم، غلظت فسفر و فسفر جذب شده توسط بخش هوایی گندم در ده خاک مورد مطالعه در جدول ۷ آورده شده است. کمترین جذب فسفر توسط گندم مربوط به خاک ۱ (۹/۷ میلی گرم در ریزوباکس) بود. بیشترین جذب فسفر توسط گندم مربوط به خاک ۹ (به ترتیب ۳۳/۵ میلی گرم در ریزوباکس) بود (جدول ۷).

بررسی نتایج همبستگی شاخص‌های گیاه گندم با ویژگی‌های شیمیایی و زیستی مطالعه شده نشان داد که شاخص غلظت فسفر در بخش هوایی گندم همبستگی معناداری با شکل فسفات کلسیم، فسفر مسدود نشده در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری، با فسفر آلی در خاک‌های ریزوسفری، و با فسفر مسدود شده در اکسیدهای آهن در خاک‌های غیرریزوسفری داشت. ماده خشک و جذب فسفر توسط بخش هوایی گندم همبستگی معناداری با شکل فسفر مسدود شده در اکسیدهای آهن در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری، و با فسفر آلی در خاک‌های غیرریزوسفری داشتند. علاوه بر این، شاخص جذب همبستگی معناداری با شکل‌های فسفر مسدود نشده، فسفات کلسیم و فسفر استخراجی با روش اولسن در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری داشت (جدول ۸). نتایج والد ریپ و همکاران (۲۰۱۱) نیز بیانگر وجود همبستگی معنادار بین فسفر جذب شده توسط چاودار با فسفر کل و فسفر معدنی قابل استخراج توسط اسید در محیط ریزوسفر در خاک‌های تیمار شده با کود آلی بود (۳۵).

همبستگی شاخص‌های گیاه با شکل‌هایی که در ریزوسفر تغییر نکرده و یا بعضاً افزایش یافته است نشان می‌دهد که تخلیه تعدادی از مخازن فسفر با افزایش در مخازن دیگر همراه است که تبدیلات

فسفر میان مخازن مختلف فسفر را نشان می‌دهد. بنابراین، مقدار دخالت شکل‌های مختلف فسفر در جذب گیاه در مطالعه حاضر نمی‌تواند کمی شود اما این عمل با افزودن فسفر نشاندار به خاک و انکوباسیون خاک برای مدت زمان کافی امکان‌پذیر می‌باشد. دامنه کفایت فسفر برای گندم بهاره در زمان ظهور خوشه ۰/۵۰-۰/۲۰ درصد (۱۲) می‌باشد. طبق تجزیه بخش هوایی گندم، غلظت فسفر در همه خاک‌ها به استثناء خاک شماره ۹ در دامنه کفایت قرار داشت. غلظت فسفر در بخش هوایی گندم رشد یافته در خاک ۹ بالاتر از حد کفایت بود و در مرز زیاد بود قرار می‌گرفت. همچنین، نتایج مطالعات همبستگی بین شاخص‌های گیاه و ویژگی‌های زیستی نشان داد که شاخص‌های گندم در خاک‌های تیمار شده همبستگی معناداری با فسفر زیست‌توده میکروبی نداشتند (جدول ۸). رئیسی و همکاران (۲۰۱۳) همبستگی معناداری بین فسفر زیست‌توده میکروبی و شاخص جذب فسفر توسط بخش هوایی گندم (۰/۷۸) و ۰/۶۷ به ترتیب در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری) در خاک‌های تیمار نشده یافتند (۲۰). بنابراین، به نظر می‌رسد در شرایط تأمین ناکافی فسفر (خاک‌های تیمار نشده) چرخه فسفر از طریق زیست‌توده میکروبی می‌تواند به‌عنوان یک سازوکار حفاظتی فسفر لبایل عمل کرده و احتمالاً در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه دخیل باشد اما در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب شهری، با توجه به اثر مثبت لجن فاضلاب بر قابلیت استفاده فسفر و تأمین فسفر مورد نیاز گیاه، به نظر می‌رسد در خاک‌های مطالعه شده فسفر زیست‌توده میکروبی در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه دخالت کمتری دارد.

جدول ۷- شاخص‌های گیاه گندم در خاک‌های مطالعه شده.

Table 7. Wheat plant indices in the studied soils.

جذب فسفر توسط اندام هوایی میلی گرم فسفر بر ریزوباکس (P uptake mg/rhizobox)	وزن ماده خشک اندام هوایی گرم بر ریزوباکس (Shoot g/rhizobox)	غلظت فسفر اندام هوایی میلی گرم فسفر بر کیلوگرم (P concentration mg/kg)	خاک (Soil)
9.7	4.1	2353	1
13.5	4.6	2953	2
15.9	4.7	3372	3
11.8	4.4	2661	4
16.3	5.4	3008	5
24.2	7.3	3300	6
30.4	7.6	4578	7
17.6	7.1	2483	8
33.5	5.7	5853	9
10.4	3.4	3104	10
5.2	1.3	667	LSD
22**	9.8**	22**	F

جدول ۸- ضرایب همبستگی شاخص‌های گیاه گندم با شکل‌های مختلف فسفر در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری گندم.

Table 8. Correlation coefficients between plant indices and different P fractions determined in the rhizosphere and the bulk soils.

جذب فسفر P uptake	غلظت فسفر P concentration	ماده خشک اندام هوایی Shoot	محیط Environment	شکل‌های مختلف فسفر P fractions
0.57**	0.56**	0.32	ریزوسفر (Rhizosphere)	فسفر مسدود نشده (Non-occluded P)
0.53**	0.51**	0.22	غیرریزوسفر (Bulk)	
0.66**	0.29	0.65**	ریزوسفر (Rhizosphere)	فسفر مسدود شده (occluded P)
0.68**	0.40*	0.65**	غیرریزوسفر (Bulk)	
0.50**	0.72**	0.09	ریزوسفر (Rhizosphere)	فسفات کلسیم (Calcium P)
0.47**	0.73**	0.05	غیرریزوسفر (Bulk)	
-0.10	-0.45*	0.21	ریزوسفر (Rhizosphere)	فسفر آلی (Organic P)
0.50**	0.07	0.59**	غیرریزوسفر (Bulk)	
-0.04	0.16	-0.05	ریزوسفر (Rhizosphere)	فسفر باقی مانده (Residual P)
0.19	0.30	0.14	غیرریزوسفر (Bulk)	
0.39*	0.15	0.29	ریزوسفر (Rhizosphere)	اولسن (Olsen P)
0.53**	0.27	0.44*	غیرریزوسفر (Bulk)	
ویژگی‌های زیستی				
0.31	0.33	0.04	ریزوسفر (Rhizosphere)	کربن آلی محلول (Dissolved organic C)
0.05	0.07	-0.06	غیرریزوسفر (Bulk)	
0.14	0.06	0.09	ریزوسفر (Rhizosphere)	فسفر زیست‌توده میکروبی (Microbial biomass P)
0.27	0.10	0.20	غیرریزوسفر (Bulk)	
-0.12	-0.24	0.14	ریزوسفر (Rhizosphere)	فسفاتاز اسیدی (Acid phosphatase)
0.03	0.04	-0.05	غیرریزوسفر (Bulk)	

** و * به ترتیب معنادار در سطح احتمال ۹۹ و ۹۵ درصد.

** , * are significant at probability levels 99, 95% (P<0.01, P<0.05), respectively.

نتیجه گیری کلی

به طور کلی بررسی نتایج نشان داد که ریزوسفر گندم منجر به تخلیه معنادار شکل های فسفر مسدود نشده، مسدود شده، فسفر آلی و فسفر باقی مانده و تجمع معنی دار فسفات کلسیم شد. تخلیه فسفر معدنی به دلیل جذب فسفر معدنی توسط گیاه و ریزجانداران می باشد. علاوه بر این، نقش توزیع شکل های فسفر معدنی بین خاک های ریزوسفری و غیر ریزوسفری متفاوت بود. به طور کلی ریزوسفر گندم جزء بندی فسفر، فسفر زیست توده میکروبی، کربن آلی محلول و فعالیت فسفاتاز اسیدی را تحت تأثیر قرار داد. با توجه به نتایج همبستگی شاخص جذب فسفر توسط بخش هوایی گندم با شکل های مختلف فسفر به نظر می رسد، شکل های فسفر مسدود نشده؛ فسفر مسدود شده در

اکسیدهای آهن و فسفات کلسیم می توانند برآوردی مناسب از فسفر قابل استفاده گندم در خاک های مورد مطالعه داشته باشند. همبستگی شاخص های گیاه با شکل هایی که در ریزوسفر تغییر نکرده (فسفر مسدود شده) و یا بعضاً افزایش (فسفات کلسیم) نشان می دهد که تخلیه تعدادی از مخازن فسفر با افزایش در مخازن دیگر همراه است که تبدیلات فسفر میان مخازن مختلف فسفر را نشان می دهد. همچنین، در پژوهش حاضر، با توجه به اثر مثبت لجن فاضلاب بر قابلیت استفاده فسفر و تأمین فسفر مورد نیاز گیاه، به نظر می رسد در خاک های مطالعه شده فسفر زیست توده میکروبی در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه دخیل نمی باشد.

منابع

1. Akhtar, M., Mc Callister, D.L., and Eskridge, K.M. 2002. Availability and fractionation of phosphorus in sewage sludge-amended soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33: 2057-2068.
2. Balik, J., Pavlikova, D., Vanek, V., Kulhanek, M., and Kotkova, B. 2007. The influence of long-term sewage sludge application on the activity of phosphatases in the rhizosphere of plants. *Plant Soil Environ.* 53: 375-381.
3. Bhattacharyya, P., Datta, S.C., and Dureja, P. 2003. Interrelationship of pH organic acids and phosphorus concentration in soil solution of rhizosphere and non-rhizosphere of wheat and rice crops. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 34: 231-245.
4. Bremner, J.M. 1996. Nitrogen-total, P 1085-1121. In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3 chemical methods*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
5. Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity, P 891-901. In: C.A. Black (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2, Soil American Society and Agronomy*, Madison, Wisconsin.
6. Chang, S.C., and Jackson, M.L. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.* 84: 133-144.
7. Cheng, W., Zhang Q., and Coleman, D.C. 1996. Is available carbon limiting microbial respiration in the rhizosphere?. *Soil Biol. Biochem.* 28: 1283-1288.
8. Darrah, P.R. 1993. The rhizosphere and plant nutrition: a quantitative approach. *Plant Soil.* 155: 1-20.
9. Delgado, A., Ruiz, J.R., Del Campillo, M.D., Kassem, S., and Andreu, L. 2000. Calcium- and iron-related phosphorus in calcareous and calcareous marsh soils: Sequential chemical fractionation and P-31 nuclear magnetic resonance study. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31: 2483-2499.
10. Gee, G.H., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis, P 383-409. In: A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2 physical properties*, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
11. Hejazi Mehrizi, M., Shariatmadari, H., and Afyuni, M. 2013. Cumulative and Residual Effect of Sewage Sludge on Inorganic P Fractions and P Availability in a Calcareous. *Soil J. Water and Soil Sci.* 17: 33-43. (In Persian)

12. Khoshgoftarmanesh, A.H. 2007. Evaluation of plant nutrition status and optimum fertilizer management. Isfahan University of Technology Press, Isfahsn, Iran, 158p. (In Persian)
13. Kuo, S. 1996. Phosphorus, P 869-920. In: D.L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3 chemical methods. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
14. Loeppert, R.H., and Sparks, D.L. 1996. Carbonate and gypsum, P 437-474. In: D.L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 3 chemical methods, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
15. Marschner, P., Crowley, D., and Rengel, Z. 2011. Rhizosphere interactions between microorganisms and plants govern iron and phosphorus acquisition along the root axis e model and research methods. Soil Biol. Biochem. 43: 883-894.
16. Murphy, J., and Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chem. Acta. 27: 31-36.
17. Najafi, N., and Towfighi, H. 2012. Effects of rhizosphere of rice plant on the inorganic phosphorus fractions in the paddy soils (in North Iran) Following P Fertilizer Application. Iranian Journal of Water and Soil Research. 43: 3. 231-242. (In Persian)
18. Nelson, D.W., and Summers, L.E. 1996. Total carbon organic carbon and organic matter, P 961-1011. In: D.L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 3 chemical methods, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
19. Olsen, S.R., and Sommers, L.E. 1982. Phosphorus, P 403-427. In: A.L. Page R.H. Miller and D.R. Keeney (Eds.), Methods of soil analysis, Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr, ASA and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
20. Raiesi, T., and Hosseinpour, A.R. 2013. The rhizospheric effects of wheat (*Triticum aestivum* L.) on phosphorus availability and some biological properties in calcareous soils from Shahrekord plain. J. Sci. Technol. Greenhouse Culture. 4: 51-65. (In Persian)
21. Raiesi, T., and Hosseinpour, A.R. 2014a. The effect of wheat rhizosphere on chemical forms of phosphorus in some calcareous soils. J. Soil Res. 28: 15-26. (In Persian)
22. Raiesi, T., and Hosseinpour, A.R. 2014b. Effects of wheat rhizosphere on phosphorus availability and some biological properties in soils amended with municipal sewage sludge. J. Soil Res. 28: 477-488. (In Persian)
23. Reddy, G.B., Faza, A., and Benneit, R. 1987. Activity of enzymes in rhizosphere and non-rhizosphere soils amended with sludge. Soil Biol. Biochem. 19: 203-205.
24. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids, P 417-437. In: D.L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 3 chemical methods, SSSA, Medison, WI.
25. Rose, T.J., Hardiputra, B., and Rengel, Z. 2010. Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics. Plant Soil. 326: 159-170.
26. Safari Sinigani, A.A., and Rashidi, T. 2011. Changes in phosphorus fractions in the rhizosphere of some crop species under glasshouse conditions. J. Plant Nutr. Soil Sci. 174: 899-907.
27. Smith, S.R. 1996. Agricultural recycling of sewage sludge and the environment. CAB International, Wallingford.
28. Sposito, G., Lund, L.J., and Chang, A.C. 1982. Trace Metal chemistry in aird-zone field soils amended sewage sludge: I. Fractionation of Ni Cu Zn Cd Pb in solid phases. Soil Sci. Soc. Am. J. 46: 260-264.
29. StatSoft, Inc. 2010. STATISTICA (data analysis software system), Version 10. www.statsoft.com.
30. Tabatabai, M.A., and Bremner, J.M. 1969. Use of *p*-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. Soil Biol. Biochem. 1: 301-307.
31. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity, P 475-491. In: D.L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 3 chemical methods, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.

32. Uren, N.C. 2007. Types, amounts, and possible functions of compounds released into the rhizosphere by soil-grown plants, P 1-23. In: R. Pinton, Z. Varanini and P. Nannipieri (Eds.), *The Rhizosphere: Biochemistry and Organic Substances at the Soil-Plant Interface*, CRC Press.
33. USEPA. 1995. Land application of sewage sludge and domestic septage. Section 503. EPA/625/R-95/001 USEPA. Washington DC, 290p.
34. Vu, D.T., Tang, C., and Armstrong, R.D. 2008. Changes and availability of P fractions following 65 years of P application to a calcareous soil in a Mediterranean climate. *Plant Soil*. 304: 21-33.
35. Waldrip-Dail, H., He, Z., Erich, M.S., and Honeycutt, C.W. 2011. Effects of poultry manure amendment on phosphorus uptake by ryegrass, soil phosphorus fractions and phosphatase activity. *Biol. Fertil. Soils*. 47: 407-418.
36. Youssef, R.A., and Chino, M. 1988. Development of a new rhizobox system to study the nutrient status in the rhizosphere. *Soil Sci. Plant Nutr.* 34: 461-465.
37. Zoysa, A.K.N., Loganathan, P., and Hedley, M.J. 1999. Phosphorus utilisation efficiency and depletion of phosphate fractions in the rhizosphere of three tea (*Camellia sinensis* L.) clones. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 53: 189-201.
38. Zhao, Q., Zeng, D., and Fan, Z. 2010. Nitrogen and phosphorus transformations in the rhizospheres of three tree species in a nutrient-poor sandy soil. *Appl. Soil Ecol.* 46: 341-346.



The effect of wheat rhizosphere on phosphorus forms in some calcareous soils amended with municipal sewage sludge

*T. Raiesi¹ and A.R. Hosseinpur²

¹Researcher in Horticultural Science Research Institute, Citrus and Subtropical Fruit Research Center, Agricultural Research and Education Organization (AREO), Ramsar, ²Professor, Dept. of Soil Science, University of Shahrekord

Received: 11/23/2014; Accepted: 08/26/2015

Abstract

Background and Objectives: The biological and chemical conditions of the rhizosphere are known to considerably differ from those of the bulk soil, as a consequence of a range of processes that are induced either directly by the activity of plant roots or indirectly by the stimulation of microbial population and activity in the rhizosphere. Information about phosphorus (P) fractionation in the rhizosphere soils amended with municipal sewage sludge (MSS) is limited. Thus, the objectives of this research was to evaluate the rhizospheric effects of wheat (*Triticum aestivum* L.) on the status of various inorganic P fractions, total organic P and some biological properties in 10 calcareous soils amended with 1% (W/W) municipal sewage sludge from the refinery of Shahrekord city under rhizobox conditions.

Materials and Methods: Wheat was planted in completely randomized design with three replications. Eight weeks after germination, plants were harvested, rhizoboxes were dismantled and the rhizosphere and bulk soils were separated. P fractions were determined by modified Olsen and Sommers' sequential fractionation procedure. Also, acid (ACP) phosphatases, available P were measured.

Results: The results showed that wheat rhizosphere showed a significant depletion of available P, non-occluded P, occluded P, organic P and residual P fractions and a significant increase of calcium phosphate fraction. Also, the results showed that the activity of acid phosphatase considerably increased in wheat rhizosphere soils when compared to the bulk soils. Simple correlation coefficients showed that plant indices have positive relationship with non-occluded P, occluded P and calcium phosphate fractions in the rhizosphere and bulk soils ($p < 0.05$).

Conclusion: The results indicated that in addition to Olsen P (labile-Pi) and non-occluded P, occluded P, calcium phosphate could also act as a short-term source of wheat-available P in the calcareous soils amended with MSS.

Keywords: Biological properties, Mineral phosphorus, Organic phosphorus, Sequential extraction

* Corresponding Authors; Email: taraiesi@gmail.com