

تأثیر باکتریهای حل کننده فسفات در سینتیک آزاد شدن فسفر از خاک ریزوسفری ریشه نیشکر و همبستگی پارامترهای آن با منابع مختلف فسفر خاک

سعید صفیرزاده^{۱*}، مصطفی چرم^۲، نعیمه عنایتی ضمیر^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۴)

چکیده

به منظور بررسی اثرات ریزوسفری ریشه نیشکر در سینتیک آزاد شدن فسفر از خاک و نیز اثر فعالیت باکتریهای حل کننده فسفات و گذشت زمان بر روی آن، آزمایش گلخانه‌ای با کشت گیاه نیشکر انجام شد. در این مطالعه کود فسفر در سه سطح (شاهد (P₀))، ۵۰ درصد (P₅₀) و ۱۰۰ درصد (P₁₀₀) (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) و نیز از دو سویه باکتری انتروباکتر کلواسه R₁₃ (R₁₃) و انتروباکتر کلواسه R₃₃ (R₃₃) استفاده و در نهایت گیاه نیشکر در سه مقطع زمانی ۶۰، ۹۵ و ۱۴۰ روز پس از کشت، برداشت شد. آزمایش با ۸۱ گلدان به صورت طرح فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. بررسی سینتیک آزاد شدن فسفر در بازه زمانی ۳۰ تا ۵۷۶۰ دقیقه به صورت عصاره‌گیری متوالی انجام شد. نتایج نشان داد که فسفر تجمعی آزاد شده با افزایش مصرف کود فسفر و حضور باکتریهای حل کننده فسفات، بیش‌تر بود و این اختلاف با گذشت زمان کاهش یافت. برازش داده‌های آزاد شدن فسفر از خاک ریزوسفری نشان داد که معادلات مرتبه دوم و تابع توان قابلیت بیش‌تری در توصیف آزاد شدن فسفر از خاک اطراف ریشه نیشکر دارا بودند. در شرایط کمبود فسفر قابل دسترس در خاک (P₀)، ضرایب a و ab در معادله تابع توان در حضور باکتریها افزایش یافته بودند. هم‌چنین این ضرایب با گذشت زمان روند کاهشی را نشان دادند. از بررسی همبستگی ضرایب معادلات سینتیکی و پارامترهای گیاهی مانند وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه، غلظت فسفر گیاه، مقدار فسفر جذب شده از منابع مختلف فسفر قابل دسترس، فسفر پخشیده شده به سطح ریشه و فسفر نامحلول، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضرایب b و ab در معادله تابع توان، مقادیر فسفر از منابع قابل دسترس در ریزوسفر نیشکر کاهش یافته و سهم منابع نامحلول فسفر افزایش می‌یابد. هم‌چنین باکتریهای حل کننده فسفات تأثیر مثبتی را در افزایش سرعت آزاد شدن فسفر در ریزوسفر نیشکر نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: واجذب فسفر، معادلات سینتیکی، ریزوسفر و نیشکر

صفیرزاده س.، چرم م.، عنایتی ضمیر ن. ۱۳۹۸. تأثیر باکتریهای حل کننده فسفات در سینتیک آزاد شدن فسفر از خاک ریزوسفری ریشه نیشکر و همبستگی پارامترهای آن با منابع مختلف فسفر خاک. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۷ شماره ۲. ص: ۱۶۸-۱۸۱.

۱- دانشجوی دکترای گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز (مکاتبه کننده)

۲- استاد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- دانشیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز

* پست الکترونیک: s_safirzade@yahoo.com

مقدمه

گونه‌های گیاهی مختلف، متفاوت باشند که در مقدار جذب فسفر توسط گیاه و سینتیک آزاد شدن فسفر در محیط ریزوسفر تفاوت ایجاد می‌کند. بخش زیادی از فسفر در خاک به صورت ترکیبات نامحلول فسفات بوده که استفاده از باکتری‌های حل کننده فسفات یک راهکار در افزایش حلالیت این ترکیبات در خاک می‌باشد. تبدیل شکل‌های غیرمحلول فسفر به اشکال قابل دسترس برای گیاه یک عمل مهم باکتری‌های حل کننده فسفات در افزایش عملکرد گیاه بوده که عمدتاً از طریق تغییر pH و ترشح اسیدهای آلی و آنزیم‌ها فراهم می‌شود (Hariprasad & Niranjana, 2009). بنابراین حضور این باکتری‌ها در محیط ریزوسفر می‌تواند سرعت آزاد شدن فسفر از ذرات خاک را تحت تأثیر قرار دهد. به دلیل محدود بودن مطالعات سینتیک آزاد شدن فسفر در ریزوسفر گیاه به‌ویژه نیشکر و بررسی تأثیر باکتری‌های حل کننده فسفات در این فرآیند شیمیایی، در تحقیق حاضر به مطالب ذکر شده پرداخته شده است. در این مطالعه فسفر خاک به سه منبع فسفر قابل دسترس، فسفر قابل پخشیده شدن و فسفر غیرقابل دسترس تقسیم شده است. بنابراین در ریزوسفر گیاه نیشکر این منابع فسفر با توجه به نوع تیمار، دستخوش تغییراتی می‌شوند که ارتباط و همبستگی ضرایب سینتیک آزاد شدن فسفر با این منابع مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین به دلیل تغییراتی که در جذب فسفر با افزایش سن گیاه اتفاق می‌افتد، بررسی سینتیک آزاد شدن فسفر در سه زمان مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده در تحقیق حاضر از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری یکی از مزارع شرکت کشت و صنعت حکیم فارابی تهیه شد. بخشی از خاک برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اولیه پس از کوبیدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. در این نمونه بافت خاک لوم (به ترتیب ترکیبی از ۲۵، ۴۵ و ۳۰ درصد رس، سیلت و شن) به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1961)، pH (۷/۸) در عصاره حاصل از نسبت ۲:۱ خاک به آب، مقدار فسفر قابل دسترس (۵/۶۱ میلی‌گرم در کیلوگرم) توسط استخراج با بی‌کربنات سدیم ۰/۵ نرمال (Olsen &

فسفر به عنوان سومین عنصر غذایی مورد نیاز گیاه نیشکر بعد از نیتروژن و پتاسیم، عمدتاً در خاک به صورت ترکیبات نامحلول و غیرقابل دسترس برای گیاه وجود دارد. اما در محیط ریزوسفر گیاه شرایط متفاوتی نسبت به توده خاک حاکم بوده که به‌ویژه در عدم مصرف کود شیمیایی، قابلیت تبدیل بخشی از فسفر به صورت قابل جذب تبدیل را دارد. ریزوسفر یک ناحیه بسیار فعال بوده که بسیاری از واکنش‌های شیمیایی و فرآیندهای زیستی در این ناحیه اتفاق می‌افتد (Barbas *et al.*, 1999). بنابراین فرآیندهایی که قابلیت دسترسی فسفر را برای گیاه تغییر می‌دهند می‌تواند در ریزوسفر گیاه اتفاق بیفتد که با توجه به گونه‌های گیاهی، شرایط تغذیه‌ای گیاه و شرایط خاک تغییر می‌کنند (Hinsinger, 2001). جذب فسفر توسط ریشه‌های گیاه به کاهش مقدار فسفر محلول خاک منجر شده که منجر به آزادسازی فسفر از فاز جامد به فاز محلول می‌شود. بنابراین افزون بر مقدار فسفر ذخیره شده در خاک، مقدار فسفر محلول در هر زمان به سرعت آزاد شدن فسفر از ذرات جامد به محلول خاک بستگی دارد (Shariatmadari *et al.*, 2006). مرحله محدودکننده سرعت قابلیت دسترسی فسفر برای گیاه، سرعت واکنش‌هایی بوده که فسفر محلول جذب شده را جایگزین می‌کنند (Moradi *et al.*, 2012). تاکنون مطالعات سینتیکی متعددی در زمینه سرعت آزاد شدن فسفر در خاک انجام شده که تعداد بسیار محدودی از آن‌ها در محیط ریزوسفر گیاه صورت پذیرفته است. مطالعات سینتیکی می‌توانند در تعیین کمیّت جریان فسفر بین ذرات جامد و فاز محلول کمک کنند (Abdu, 2012). لذا بررسی‌های سینتیکی در مورد فسفر در ریزوسفر می‌تواند نشان دهنده تفاوت‌های متعدد این ناحیه ریشه با توده خاک و نیز گویای مقدار جذب فسفر در شرایط مختلف تغذیه‌ای گیاه باشد. گیاهان استراتژی‌های متعددی برای افزایش جذب فسفر از خاک داشته که شامل تنظیم ویژگی‌های ریخت‌شناسی ریشه (Ge *et al.*, 2000) و تولید ترشحات ریشه‌ای مانند فسفاتاز (George *et al.*, 2002) یا پروتون و اسیدهای آلی هستند. بنابراین این سازوکارها بویژه در شرایط کمبود فسفر قابل دسترس برای گیاه ممکن است بین

نشد. کود اوره به مقدار معادل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در دو نوبت بصورت محلول در آب آبیاری به گلدان‌ها اضافه شد. به‌منظور تأمین رطوبت مورد نیاز گیاه، گلدان‌ها هر سه روز یکبار آبیاری شدند. به‌منظور بررسی اثرات افزایش سن گیاه در سینتیک آزاد شدن فسفر از خاک، سه زمان برداشت ۶۰، ۹۵، ۱۴۰ روز پس از کشت انتخاب شدند. به دلیل عدم استفاده از ریزوباکس، از گلدان‌های بدون کشت نیشکر و اعمال تیمارهای یکسان برای تهیه خاک توده استفاده شد. در هر زمان برداشت، اندام هوایی گیاه از سطح خاک بریده شده و سپس در آون و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. نمونه‌های گیاهی آسیاب و سپس استخراج فسفر به روش میلر (Miller, 1998) و اندازه‌گیری غلظت فسفر در عصاره حاصل به روش مورفی و ریلی (Murphy & Riley, 1962) انجام شد. سپس خاک درون گلدان‌ها تخلیه شده و خاک چسبیده به ریشه (خاک ریزوسفری) به دقت جدا شد و پس از خشک شدن و عبور از الک دو میلی‌متری برای آزمایش‌های سینتیکی در کیسه‌های پلاستیکی در دمای چهار درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. پس از آن ریشه‌های هر گلدان جدا شدند و پس از شستن و حذف ذرات خاک، طول آن‌ها به روش تننت (Tennant, 1975) اندازه‌گیری شد.

به‌منظور بررسی سینتیک آزاد شدن فسفر از خاک، دو گرم نمونه خاک ریزوسفری به همراه ۲۰ میلی‌لیتر بی‌کربنات سدیم ۰/۵ مولار (pH ۸/۵) در داخل لوله‌های سانتریفیوژ ریخته و با استفاده از روش عصاره‌گیری متوالی اندازه‌گیری شد. در فاصله زمانی بین دو اندازه‌گیری، نمونه‌ها در انکوباتور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. نمونه‌ها در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۳۶۰، ۴۸۰، ۱۴۴۰، ۲۸۸۰ و ۵۷۶۰ دقیقه پس از اضافه کردن عصاره‌گیر (بی‌کربنات سدیم) با قرار دادن در سانتریفیوژ در سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه و عبور دادن از کاغذ صافی عصاره‌گیری شدند. سپس در هر مرحله همان مقدار بی‌کربنات دوباره به رسوب باقی مانده در لوله سانتریفیوژ اضافه شده و پس از به هم زدن به مدت ۱۵ دقیقه تا زمان بعدی عصاره‌گیری در انکوباتور در دمای $25 \pm 1/5$ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. در پایان پس از اتمام دوره

(Watanabe, 1954)، مقدار فسفر کل (۶۴۳/۸۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) به روش هضم با پرکلریک اسید (Kuo, 1996) و مقدار کربن آلی (۵۶/۰ درصد) به روش اکسیداسیون تر (Nelson & Sommers, 1996) اندازه‌گیری شدند.

در این تحقیق از سه فاکتور کود فسفر (در سه سطح شامل شاهد، ۵۰ درصد مصرف کود و ۱۰۰ درصد مصرف کود (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار))، باکتری حل‌کننده فسفات (در سه سطح شاهد، باکتری سویه R₁₃ و باکتری سویه R₃₃) و زمان نمونه‌برداری (در سه زمان ۶۰، ۹۵ و ۱۴۰ روز پس از کشت) در سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی و در مقیاس گلدان استفاده شد. به‌منظور ایجاد محیط تقریباً یکنواخت، کلوخه‌ها از خاک جدا شدند و در هر گلدان مقدار ۲۵ کیلوگرم خاک بدون استریل کردن ریخته شد. قبل از کشت نیشکر، کود فسفر در سه سطح معادل صفر (شاهد)، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار از منبع سوپر فسفات تریپل به خاک گلدان‌ها اضافه شد که به ترتیب به‌صورت P₀، P₅₀ و P₁₀₀ در متن نشان داده شدند. در هر گلدان تعداد سه قلمه تک جوانه‌ای نیشکر رقم CP۵۷-۶۱۴ کشت شد که در مرحله دو برگی تعداد یک عدد از آن‌ها حذف شده و دو عدد در هر گلدان باقی ماند. در این زمان یک میلی‌لیتر از مایع تلقیح حاوی باکتری حل‌کننده فسفات (۱۰^۶ سلول در میلی‌لیتر) در زیر هر قلمه تزریق شد. دلیل انتخاب فراوانی باکتری استفاده شده، توجیه اقتصادی استفاده از این باکتری در مرحله اجرایی در صورت به‌دست آوردن نتایج مناسب از آن‌ها بود. در این تحقیق باکتری‌های حل‌کننده فسفات از دو سویه انتروباکتر کلوآسه^۱ R₁₃ و انتروباکتر کلوآسه^۲ R₃₃ (R₃₃) جداسازی شده از ریزوسفر ریشه نیشکر انتخاب شدند که ویژگی‌های این دو سویه توسط لامی‌زاده و همکاران (Lamizaden et al., 2016) توضیح داده شده است.

به دلیل مناسب بودن مقدار پتاسیم قابل تبادل در خاک بر اساس آزمایش اولیه خاک و نیز تشابه با روش متداول کوددهی در منطقه مورد مطالعه، کود پتاسیم مصرف

1. *Enterobacter cloacae* strain Rhizo_13

2. *Enterobacter cloacae* strain Rhizo_33

(فسفر قابل دسترس، فسفر پخشیده شده به ریشه و فسفر جذب شده از منابع نامحلول) با ثابت‌های سرعت معادلات تعیین شدند. در این تحقیق، تجزیه و تحلیل‌های آماری توسط نرم افزار MINITAB 16 انجام شد.

$$S. E. = \left(\frac{\sum (P_t - P)^2}{n - 2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

آزمایش، داده‌های آزاد شدن فسفر با معادلات مرتبه اول، مرتبه دوم، الویچ ساده شده، انتشار پارابولیک و تابع توان (جدول ۱) برازش داده شدند. سپس بهترین معادله یا معادلات بر اساس بیش‌ترین ضریب تبیین (R^2) و کم‌ترین اشتباه استاندارد (رابطه ۱) انتخاب و ضرایب این معادلات تعیین شدند. در پایان نیز رابطه همبستگی برخی پارامترهای گیاهی مانند وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه، غلظت فسفر گیاه، و منابع مختلف فسفر که از نظر قابلیت دسترسی برای گیاه متفاوتند

جدول ۱- معادله‌های سینتیکی برازش داده شده به داده‌های آزاد شدن فسفر

Table 1. Kinetic equations fitted with phosphorus release data

Model	Equation
First order	$\ln (P_0 - P_t) = \ln P_0 - k_1 t$
Second order	$1/(P_0 - P_t) = 1/P_0 + k_2 t$
Simplified Elovich	$q_t = (1/\beta) \ln (\alpha\beta) + (1/\beta) \ln (t)$
Parabolic diffusion	$q_t = R t^{1/2} + \text{constant}$
Power function	$\ln q_t = \ln a + b \ln t$

$k_1, k_2, \alpha, \beta, R$ و b ثابت‌های سرعت; a عرض از مبدا; P_0 فسفر آزاد شده در زمان تعادل (میلی‌پرم بر کیلوگرم); P_t فسفر آزاد شده در زمان t (میلی‌پرم بر کیلوگرم)

$k_1, k_2, \alpha, \beta, R$ and b , are constants; a is intercept; P_0 is P released at equilibrium (mg kg^{-1}); P_t is P released at desired time (mg kg^{-1})

که در آن π برابر $3/14$ ، ΔL رشد نمایی ریشه $(\Delta L_t = L_{t-1} e^k)$ ، نشان دهنده شعاع ریشه (سانتی‌متر)، t نشان دهنده زمان (روز) و زیرنویس‌های ۱ و ۲ نشان دهنده زمان برداشت و D_e ضریب پخشیدگی فسفر السن در خاک است.

$$D_e = D_1 \theta f / b \quad (6)$$

که در آن D_1 ضریب پخشیدگی H_2PO_4^- در آب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، θ مقدار رطوبت حجمی، f فاکتور مقاومت در برابر حرکت و b قدرت بافری است.

نتایج و بحث

نتایج آزاد شدن فسفر از خاک ریزوسفر نمونه‌های اولین مرحله نمونه‌برداری نشان دهنده یک روند آزاد شدن اولیه سریع است که تا زمان ۴۸۰ دقیقه ادامه داشته و پس از آن تا زمان ۵۷۶۰ دقیقه با سرعت آهسته‌تری ادامه یافت (شکل ۱). روند آزاد شدن فسفر در دو زمان ۹۵ و ۱۴۰ روز پس از کشت دارای تغییراتی نسبت به زمان اول نمونه‌برداری بود که به دلیل محدودیت در تعداد اشکال، نشان داده نشده‌اند. با گذشت زمان در نمونه‌های برداشت شده در دو زمان ۹۵ و ۱۴۰ روز پس

به‌منظور تعیین منابع مختلف فسفر (شامل فسفر قابل دسترس، فسفر پخشیده شده به ریشه و فسفر جذب شده از منابع نامحلول) از رابطه ۲ استفاده شد (Krasilnikoff *et al.*, 2003).

$$Q_{\text{non-Olsen-P}} = Q_P - Q_1 - Q_2 \quad (2)$$

که در آن Q_P مقدار فسفر جذب شده توسط گیاه (میلی‌گرم در گلدان)، Q_1 مقدار فسفر السن در ریزوسفر (میلی‌گرم در گلدان)، Q_2 مقدار فسفر پخشیده شده به درون ریزوسفر (میلی‌گرم در گلدان) و $Q_{\text{non-Olsen}}$ فسفر ناشی از منابع غیرمحلول (میلی‌گرم در گلدان) است. مقادیر Q_1 و Q_2 از طریق روابط ۳ تا ۶ به دست می‌آیند:

$$Q_1 = \text{Olsen-P} \cdot V_t \quad (3)$$

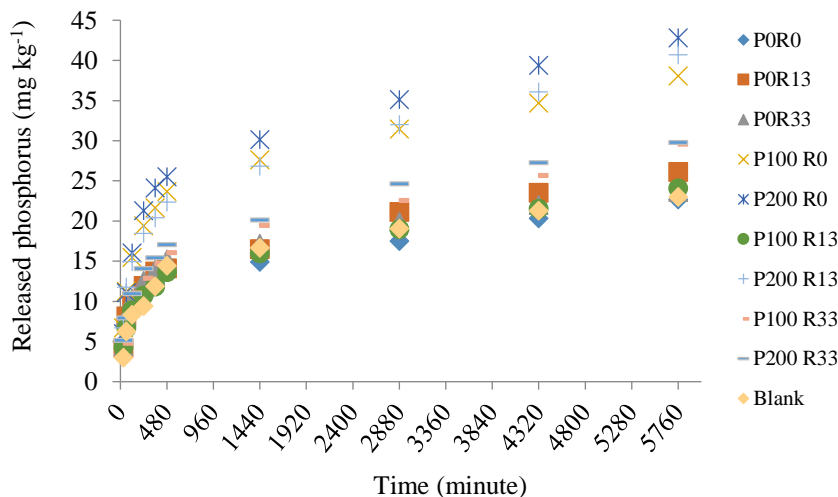
$$V_t = \pi L_t (r_0)^2 \quad (4)$$

که در آن V_t حجم خاک اشغال شده توسط ریشه گیاه است (میلی‌متر مکعب در گلدان) و L_t طول ریشه (متر) در زمان t است.

$$Q_2 = \pi(\text{Olsen-P}) \sum_{t_1}^t ((\Delta L_t (\sqrt{2D_e (t_2 - t_1)} + r_0)^2 - r_0^2) \Delta t)$$

زمان تعادل کاهشی بود. به عنوان مثال، در تیمار P_0R_0 این مقدار از $۶۰/۲$ درصد در اولین زمان نمونه برداری به $۵۴/۸$ درصد در نمونه های خاک ریزوسفر زمان سوم رسید. همچنین در تیمارهای P_0R_{33} و $P_{200}R_{33}$ این مقادیر به ترتیب از $۶۴/۶$ و $۵۷/۳$ درصد در اولین زمان نمونه برداری به $۵۶/۱$ و $۵۵/۶$ درصد در سومین زمان کاهش یافتند.

از کشت، مشاهده شد که مرحله سریع اولیه در زمان کوتاه تری (کمتر از ۴۸۰ دقیقه) اتفاق افتاده و پس از آن، مرحله با سرعت کم تر تا رسیدن به تعادل ادامه داشت. بررسی درصد فسفر آزاد شده در زمان ۴۸۰ دقیقه به فسفر آزاد شده در زمان تعادل نیز آن را تأیید کرد. در تمام تیمارها به جزء تیمارهای P_0R_{13} و $P_{100}R_{33}$ ، روند درصد فسفر آزاد شده در زمان ۴۸۰ دقیقه به



شکل ۱- روند آزاد شدن تجمعی فسفر در تیمارهای مختلف در ۶۰ روز پس از کشت
Figure 1. Cumulative P release at various treatments at 60 days after planting

کنش بین یون های فسفر جذب شده روی ذرات خاک آزاد می شود که پس از آن، زمانی که پوشش سطحی و انرژی بر هم کنش کاهش می یابد، جذب فسفر نیز کاهش می یابد. همچنین مگور و همکاران (Maguire *et al.*, 2001) آزاد شدن سریع را واجذب فسفر از سطوح ذرات خاک می دانند و مرحله آهسته را پخشیدگی نسبتاً آهسته زیر سطحی می دانند. به سبب اهمیت استفاده از باکتری های حل کننده فسفات در شرایط کمبود فسفر و عدم مصرف کود شیمیایی، مقایسه ها عمدتاً بین تیمارهای P_0 انجام شد. بررسی فسفر تجمعی آزاد شده بین تیمارهای P_0R_0 با P_0R_{13} و P_0R_{33} نشان می دهد که با گذشت زمان نمونه برداری، اختلاف بین تیمار شاهد با تیمارهای تلقیح شده توسط باکتری ها به ویژه در P_0R_{33} کاهش یافت. به طوری که در سومین زمان نمونه برداری خاک ریزوسفری، مقدار فسفر تجمعی آزاد شده در تیمار P_0R_0 از P_0R_{33} نیز کم تر شد (جدول ۲).

بنابراین می توان نتیجه گرفت که مرحله سریع آزاد شدن فسفر در واقع نشان دهنده بخشی از فسفر بوده که می تواند با سهولت بیشتری در دسترس گیاه قرار گرفته و جذب فسفر توسط گیاه نیشکر با گذشت زمان سبب کاهش این مرحله شد. حضور باکتری های حل کننده فسفات در خاک ریزوسفری موجب شد که فسفر بیشتری از خاک آزاد شده و نیشکر فسفر بیشتری را جذب کند که در نتیجه باعث آزاد شدن کم تر فسفر از خاک ریزوسفری دارای باکتری شد. مقایسه نتایج جذب فسفر توسط گیاه نیشکر در شکل ۲ نیز نشان دهنده جذب بیشتر در تیمارهای تلقیح شده توسط باکتری های حل کننده فسفات بود که این اختلاف با افزایش زمان بیشتر می شود. بنابراین به طور نسبی در مقایسه با تیمار بدون تلقیح، خاک از فسفر قابل دسترس کمتری برخوردار بود. کیو و لوتس (Kuo & Lotse, 1974) و هنسن و استرون (Hansen & Strawn, 2003) بیان کردند که در مرحله سریع، فسفر بیشتر از برهم

جدول ۲- مقدار فسفر تجمعی آزاد شده در زمان تعادل (۵۷۶۰ دقیقه) در سه زمان مختلف نمونه برداری
Table 2. Cumulative released P in equilibrium time (5760 min) at three sampling times

Treatments	Cumulative released P (mg kg ⁻¹)		
	60 days after planting	95 days after planting	140 days after planting
P ₀ R ₀	22.69 ^{c*}	20.57 ^c	21.39 ^{bc}
P ₅₀ R ₀	38.07 ^a	28.06 ^b	22.81 ^b
P ₁₀₀ R ₀	42.84 ^a	33.73 ^a	28.03 ^a
P ₀ R ₁₃	26.14 ^{bc}	28.16 ^b	22.85 ^b
P ₅₀ R ₁₃	24.12 ^{bc}	26.09 ^{bcd}	20.35 ^{bc}
P ₁₀₀ R ₁₃	40.74 ^a	30.25 ^{ab}	28.86 ^a
P ₀ R ₃₃	23.60 ^c	21.45 ^{de}	16.99 ^c
P ₅₀ R ₃₃	29.60 ^b	22.76 ^{cde}	21.98 ^b
P ₁₀₀ R ₃₃	29.78 ^b	27.01 ^{bc}	31.63 ^a

*در هر ستون، حروف نامشابه اختلاف معنی داری در سطح پنج درصد از طریق آزمون توکی دارند.

* In each column, the means with dissimilar letters are significantly different at $p < 0.05$ (Tukey test)

فسفر خاک در محیط ریزوسفر توسط گیاه است. رئیسی و حسین پور (Raiesi & Hosseinpour, 2013) نیز در محیط ریزوسفر گیاه گندم به نتایج مشابهی دست یافته بودند. این در حالی است که در نمونه‌های خاک تلقیح شده توسط باکتری سویه‌های R₁₃ و R₃₃ نتایج معکوس شده و نمونه‌های خاک ریزوسفری به‌ویژه در حضور باکتری سویه R₃₃ مقدار فسفر بیش‌تری را نسبت به خاک توده آزاده کرده بود که می‌تواند نشان دهنده اثرات متقابل محیط فعال ریزوسفر نیشکر و فعالیت این باکتری‌ها در این محیط باشد که بخش بیش‌تری از منابع کم‌تر محلول فسفر را به شکل قابل دسترس و قابل تبادل برای جذب گیاه تبدیل می‌کنند. کارپاگام و ناگالاکشمی (Karpagam & Nagalakshmi, 2014) باکتری انتروباکتر را از باکتری‌های با توانایی حل‌کنندگی فسفات معرفی کردند. هم‌چنین فرناندز و همکاران (Fernandez et al., 2007) در تحقیقی روی باکتری‌های حل‌کننده فسفات از انتروباکتر استفاده کردند که در مقایسه با دیگر باکتری‌های استفاده شده مقدار فسفر مناسبی را در خاک آزاد کرده بود.

علت بیش‌تر بودن مقدار فسفر تجمعی آزاد شده در تیمارهای بدون باکتری در مقایسه با تیمارهای تلقیح شده توسط باکتری، بیش‌تر بودن مقدار جذب فسفر توسط گیاه در تیمارهای دارای باکتری است (شکل ۲) که بیش‌ترین تأثیر در شرایط بدون مصرف کود شیمیایی (P₀) در تلقیح توسط سویه R₃₃ مشاهده شد. مقایسه مقادیر فسفر جذب شده توسط گیاه نیشکر که در شکل ۲ نشان داده شده است بیانگر تأثیر مثبت فعالیت باکتری سویه R₃₃ در ریزوسفر نیشکر در جذب فسفر گیاه است. همان‌طور که مشاهده شد، تیمار P₀R₃₃ دارای اختلاف معنی‌داری نسبت به دو تیمار P₀R₀ و P₀R₁₃ در فسفر جذب شده توسط گیاه نیشکر بوده که این امر سبب تخلیه فسفر قابل دسترس در خاک ریزوسفری شد. همان‌طور که در بالا اشاره شد، مقدار فسفر آزاد شده از خاک ریزوسفری تیمار مذکور کم‌ترین مقدار بود. هم‌چنین مقایسه مقدار فسفر تجمعی آزاد شده توسط بی‌کربنات سدیم در نمونه‌های خاک ریزوسفری و خاک توده نشان داد که در تیمار شاهد (P₀R₀) مقدار فسفر آزاد شده از خاک توده بیش‌تر از خاک ریزوسفری ریشه نیشکر بود که نشان دهنده جذب



شکل ۲- فسفر جذب شده توسط گیاه نیشکر در تیمارهای مختلف در سه زمان نمونه برداری

Figure 2. Total phosphorus uptake by sugarcane in various treatments at three harvesting times

زمان نمونه برداری خاک، بدون در نظر گرفتن تیمار باکتری‌های حل کننده فسفات، ضریب k_2 در معادله مرتبه دوم با افزایش کود فسفر کاهش نشان داد. اسپارکس (Sparks, 1989) بیان کرد که لگاریتم ثابت سرعت رابطه عکس با جذر قدرت یونی دارد. بنابراین با اضافه کردن کود فسفر مقدار قدرت یونی افزایش یافته و در این صورت ثابت سرعت کاهش می‌یابد. در زمان ۹۵ روز پس از کشت، نمونه‌های خاک ریزوسفری تیمار P_0R_{13} با $6/6 \times 10^{-3}$ برعکس میلی گرم در کیلوگرم خاک دارای بیشترین مقدار ثابت سرعت معادله مرتبه دوم و تیمار $P_{200}R_0$ با مقدار $3/9 \times 10^{-3}$ برعکس میلی گرم در کیلوگرم خاک دارای کمترین مقدار ثابت سرعت معادله مرتبه دوم بودند. ثابت k_2 در سومین زمان برداشت در تیمارهای P_0R_0 ، $P_{100}R_0$ و $P_{100}R_{33}$ دارای بیشترین مقدار ($5/1 \times 10^{-3}$) برعکس میلی گرم در کیلوگرم و تیمار $P_{200}R_{13}$ ($2/5 \times 10^{-3}$) برعکس میلی گرم در کیلوگرم) دارای کمترین مقدار بودند (جدول ۳). معادله مرتبه دوم نشان می‌دهد که آزاد شدن فسفر در خاک، هم تابع مقدار فسفر موجود در سطح ذرات و هم تابع غلظت فسفر در محلول خاک می‌باشد. بنابراین در اولین زمان برداشت در تیمارهایی که گیاه، فسفر بیشتری را از خاک جذب کرده بود مشاهده شد که ثابت سرعت معادله مرتبه دوم افزایش یافت که علت آن کاهش مقدار فسفر محلول و آزاد شدن فسفر از ذرات خاک به سمت محلول است زیرا معادله مرتبه دوم رابطه بین فسفر محلول و در سطح ذرات است.

برازش داده‌های آزاد شدن فسفر با معادلات سینتیکی نشان می‌دهد که در هر سه زمان نمونه برداری، معادلات مرتبه دوم و تابع توان بر اساس بالاترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین اشتباه استاندارد بهتر قادر به توضیح آزاد شدن فسفر از خاک ریزوسفری نیشکر بودند. در معادله مرتبه دوم، مقادیر ضریب تبیین در اولین زمان برداشت از ۰/۹۰ تا ۰/۹۶ تغییر کرده و اشتباه استاندارد نیز بین ۰/۱۸ تا ۰/۵۵ متغیر بود. این مقادیر در برازش داده‌ها توسط معادله تابع توان برای ضریب تبیین و اشتباه استاندارد به ترتیب ۰/۹۱ تا ۰/۹۶ و ۰/۱۰۶ تا ۰/۱۹۶ بودند. در دو زمان دیگر نمونه برداری تغییرات ضریب تبیین و اشتباه استاندارد مشابهی مشاهده شد. مک دوول و شارپلی (McDowell & sharply, 2003) و نیز جلالی و همکاران (Jalali *et al.*, 2011) از معادله تابع توان برای توصیف سینتیک آزاد شدن فسفر از خاک استفاده کردند. صمدی و گیلکس (Samadi & Gilkes, 1999) بیان کردند که معادله مرتبه دوم سرعت آزاد شدن فسفر از خاک را بهتر توصیف می‌کند. بنابراین ضرایب سرعت در معادلاتی بررسی می‌شوند که قادرند آزاد شدن فسفر را از خاک به خوبی توضیح دهند. در نمونه‌های خاک ریزوسفری در اولین زمان برداشت گیاه در ۶۰ روز پس از کشت، بیشترین مقدار k_2 با 7×10^{-3} برعکس میلی گرم در کیلوگرم خاک متعلق به تیمار P_0R_{33} بوده در حالی که کمترین مقدار ثابت سرعت معادله مرتبه دوم با $2/3 \times 10^{-3}$ برعکس میلی گرم در کیلوگرم خاک در تیمار $P_{200}R_{13}$ مشاهده شد. در هر سه

جدول ۳- ضرایب سرعت آزاد شدن فسفر در معادلات مرتبه دوم و تابع توان در سه زمان نمونه برداری
 Table 3. Rate coefficient of P release at second order and power function equations at three harvesting times

	Second Order	Power Function			Second Order	Power Function			Second Order	Power Function		
	$k_2 * 10^{-3}$	a	b	ab	$k_2 * 10^{-3}$	a	b	ab	$k_2 * 10^{-3}$	a	b	ab
P ₀ R ₀	4.4	2.42	0.26	0.63	5.2	1.51	0.31	0.47	5.1	1.03	0.36	0.37
P ₅₀ R ₀	3.2	3.49	0.29	1.00	4.9	1.15	0.39	0.44	5.1	1.68	0.31	0.52
P ₁₀₀ R ₀	3.2	3.00	0.32	0.96	2.9	1.72	0.35	0.61	3.7	1.35	0.36	0.49
P ₀ R ₁₃	4.2	2.20	0.29	0.64	6.6	1.35	0.37	0.50	4.0	1.86	0.30	0.55
P ₅₀ R ₁₃	4.1	1.99	0.29	0.58	3.9	2.04	0.30	0.61	4.3	1.21	0.33	0.40
P ₁₀₀ R ₁₃	2.3	3.29	0.29	0.97	4.1	2.16	0.32	0.68	2.5	3.20	0.55	1.75
P ₀ R ₃₃	7.0	2.59	0.27	0.69	4.6	1.73	0.29	0.51	4.8	1.22	0.36	0.43
P ₅₀ R ₃₃	2.7	2.34	0.30	0.69	3.4	1.92	0.29	0.55	5.1	2.11	0.28	0.58
P ₁₀₀ R ₃₃	4.4	2.37	0.30	0.71	3.4	1.23	0.37	0.45	3.5	1.15	0.43	0.50

بیشتر از دو تیمار P_0R_0 و P_0R_{13} بود. در واقع فعالیت باکتری سویه R_{33} بویژه، با وجود جذب بیشتر فسفر توسط گیاه در این شرایط، سبب آزاد شدن بیشتر فسفر از منابع کم‌تر محلول فسفر در خاک شد. تأیید این مطلب در جدول ۴ نشان داد که در شرایط کمبود فسفر، ۸۱ درصد از فسفر جذب شده توسط نیشکر در تیمار P_0R_{33} از منابع فسفر غیرالسن جذب شده است در حالی که این مقادیر در تیمارهای P_0R_{13} و P_0R_0 به ترتیب ۷۶/۱۲ و ۷۰/۴ درصد بودند. هم‌چنین در سومین زمان برداشت نمونه، در تیمارهای دارای کمبود فسفر قابل دسترس، روند کاهش ضریب a به صورت $P_0R_0 > P_0R_{33} > P_0R_{13}$ بوده و در حالی که تغییرات ضریب b روند برعکس را نشان داد. بنابراین ضریب ab در تیمار P_0R_{13} بیشتر از دو تیمار P_0R_0 و P_0R_{33} بود. کم‌تر بودن ضرایب جذب در سومین زمان برداشت در تیمار P_0R_0 به دلیل خالی بودن ذرات خاک از فسفر قابل جذب توسط گیاه بود در حالی که در تیمار P_0R_{33} زیاد بودن برداشت گیاه از فسفر خاک می‌تواند دلیل کاهش سرعت آزاد شدن فسفر از خاک باشد. گیاه نیشکر کشت شده در تیمار P_0R_{33} حدود ۵۴ درصد از کل فسفر جذب شده را از منابع غیرالسن تأمین کرده بود در حالی که در تیمار P_0R_{13} این مقدار ۳۸ درصد و در تیمار P_0R_0 این مقدار ۴۱/۵ درصد بودند. مک دوول و شارپ لی (McDowell & Sharpley, 2003) نشان دادند که با افزایش غلظت فسفر السن، میزان سرعت اولیه آزاد شدن فسفر (a) افزایش می‌یابد و سرعت آزاد شدن فسفر با زمان (b) کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که با گذشت زمان، سرعت آزاد شدن فسفر به مقدار کمی تحت تأثیر افزایش غلظت فسفر السن قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد که استفاده از باکتری‌های حل‌کننده فسفات با گذشت زمان تا ۱۴۰ روز پس از کشت تأثیر بیشتری در جذب فسفر گیاه به‌ویژه از منابع کم‌تر محلول را نشان دادند که این اثر در تیمارهای بدون مصرف کود شیمیایی فسفر آشکارتر بود. در نتیجه استفاده از انتروباکتر به عنوان باکتری حل‌کننده فسفات در این تحقیق توانست به‌ویژه در شرایط نامناسب تغذیه‌ای فسفر رشد گیاه را بهبود ببخشد. بررسی همبستگی بین ثابت‌های سرعت و پارامترهای گیاهی نشان داد که در اولین زمان نمونه‌برداری، ضریب b معادله تابع توان رابطه مثبت

در دومین و سومین زمان برداشت مشاهده شد که تیمارهای تلقیح شده توسط انتروباکتر در مقایسه با تیمارهای تلقیح نشده با وجود جذب بیشتر گیاه، دارای ثابت سرعت کم‌تری بویژه در تیمار کمبود فسفر (P_0) بودند که می‌تواند توانایی باکتری‌ها را در تأمین فسفر محلول خاک و مورد نیاز گیاه نشان دهند.

نتایج نشان می‌دهد که ضریب a در معادله تابع توان با گذشت زمان نمونه‌برداری از زمان ۶۰ روز پس از کشت تا ۱۴۰ روز پس از کشت، کاهش می‌یابد. در نمونه‌های ریزوسفری برداشت شده در اولین زمان نمونه‌برداری، تیمار P_0R_{33} دارای بیش‌ترین مقدار ضریب a بود که پس از آن تیمارهای P_0R_0 و P_0R_{13} در شرایط کمبود فسفر قابل دسترس در خاک قرار دارند. به‌طور کلی بیش‌ترین مقدار ضریب a با ۳/۴۹ میلی‌گرم در کیلوگرم در ساعت در تیمار $P_{100}R_0$ و کم‌ترین مقدار ضریب a با ۱/۹۹ میلی‌گرم در کیلوگرم در ساعت در تیمار $P_{100}R_{13}$ نشان داده شده است. این در حالی است که کم‌ترین ضریب b در تیمار P_0R_0 (۰/۲۵۹) برعکس میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و بیش‌ترین مقدار در تیمار $P_{200}R_0$ (۰/۳۲۰ برعکس میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) مشاهده شد.

بررسی تغییرات ضریب b در معادله تابع توان نشان داد که عمدتاً کم‌ترین مقادیر b در نمونه‌های ریزوسفری مرحله اول و بیش‌ترین مقادیر b در نمونه‌های مرحله آخر نمونه‌برداری وجود داشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ضریب b در نمونه‌های خاک ریزوسفری نیشکر وقتی که مقدار فسفر قابل دسترس کم می‌شود، افزایش می‌یابد. در معادله تابع توان، ضریب ab نشان دهنده مقادیر عنصر آزاد شده در لحظات اولیه است (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۳). نتایج نشان داد که در هر سه زمان نمونه‌برداری، افزایش کود فسفر منجر به افزایش ضریب ab شد. در اولین زمان نمونه‌برداری اگر چه اختلاف بین تیمارها کوچک بود اما در شرایط کمبود فسفر قابل دسترس، بیش‌ترین ضریب ab در تیمار P_0R_{33} مشاهده شد و در حالی که پس از آن، تیمارهای P_0R_0 و P_0R_{13} قرار داشتند. در تیمارهایی که گیاه در شرایط کمبود فسفر کشت شده است، در دومین زمان نمونه‌برداری بیش‌ترین مقدار ضریب a و کم‌ترین مقدار ضریب b در تیمار P_0R_{33} مشاهده شد. بنابراین در ۹۵ روز پس از کشت نیز ضریب ab در تیمار P_0R_{33}

نشان داد. بنابراین با توجه به این که در سومین زمان برداشت نمونه نسبت به زمان اول مقدار ضریب b افزایش یافته و به دلیل همبستگی این ضریب با Q_{non} می‌توان نتیجه گرفت که ضریب b نشان دهنده استفاده از منابع کم‌تر محلول فسفر توسط گیاه نیشکر بود. ضریب ab در سومین زمان برداشت با وزن خشک ریشه نیشکر، مقدار فسفر جذب شده از منبع قابل دسترس (فسفر السن)، فسفر جذب شده از منابع کم‌تر محلول فسفر توسط نیشکر و حجم خاک قابل دسترس ریشه رابطه مثبت و معنی‌داری را در سطح پنج درصد نشان می‌دهد. به‌طور کلی چون کاهش مقدار ضریب b با افزایش دسترسی فسفر برای گیاه همراه است رابطه عکس با غلظت فسفر گیاه داشت. بنابراین تیمارهایی مانند تلقیح شده، به‌ویژه با گذشت زمان که این ضریب را کاهش دادند نشان دهنده مقدار جذب بیش‌تر فسفر توسط گیاه بودند. هم‌چنین تغییرات ضرایب a و ab نشان داد که ارتباط آن‌ها با منابع قابل دسترس فسفر برای گیاه معیاری از سهولت آزاد شدن فسفر و نیز جذب فسفر از منابع قابل دسترس است. لذا اثر تیمارهای تلقیح شده توسط باکتری با افزایش دادن این ضرایب نشان دهنده ایجاد شرایط مساعدی برای گیاه از نظر تغذیه فسفر می‌باشد.

معنی‌دار در سطح یک درصد در تولید زی‌توده اندام هوایی گیاه نیشکر داشته در حالی که یک رابطه منفی معنی‌داری در سطح پنج درصد با غلظت فسفر در اندام هوایی گیاه نشان داد. بررسی ضرایب همبستگی در دومین زمان برداشت در ۹۵ روز پس از کشت نشان می‌دهد که فقط ضریب ab در معادله تابع توان با مقدار فسفر جذب شده توسط گیاه از منبع فسفر السن (Q_1) و حجم خاک قابل دسترس ریشه (V) در سطح پنج درصد ارتباط معنی‌داری دارد. هم‌چنین مقدار فسفر تجمعی آزاد شده دارای همبستگی معنی‌داری با ضرایب k_2 و b در سطح پنج درصد می‌باشد در حالی که این همبستگی در مورد ضرایب a و ab در سطح یک درصد معنی‌دار بود. در سومین زمان نمونه‌برداری در ۱۴۰ روز پس از کشت، ضریب a در معادله تابع توان بهترین همبستگی را در سطح پنج درصد با وزن خشک ریشه گیاه نیشکر، مقدار فسفر جذب شده از منبع فسفر السن (Q_1) و حجم خاک در دسترس ریشه گیاه نیشکر (V) داشت. این در حالی است که ضریب b معادله تابع توان با فسفر جذب شده از منبع فسفر غیرالسن (ترکیبات کم‌تر محلول فسفر در خاک) توسط گیاه در سطح پنج درصد همبستگی داشت. مقدار فسفر تجمعی آزاد شده نیز با ضریب k_2 رابطه منفی معنی‌داری را در سطح پنج درصد

جدول ۴- مقادیر فسفر جذب شده از منابع مختلف فسفر در خاک
Table 4- Uptake of phosphorus from different source in soil

Treatments	Available P (Q_1) (mg pot ⁻¹)		Diffused P (Q_2) (mg pot ⁻¹)		Non-soluble P ($Q_{non-Olsen}$) (mg pot ⁻¹)	
	95 DAP	140 DAP	95 DAP	140 DAP	95 DAP	140 DAP*
P ₀ R ₀	0.6 ab**	0.84 c	6.22 bc	15.70 c	16.26 bc	11.76 c
P ₅₀ R ₀	0.54 b	1.40 ab	4.06 c	29.78 cde	22.72 ab	24.34 bc
P ₁₀₀ R ₀	0.62 ab	1.31 b	11.83 a	35.59 bcd	17.24 bc	25.62 bc
P ₀ R ₁₃	0.53 b	1.11 bc	5.93 bc	33.19 bcde	20.62 ab	21.15 bc
P ₅₀ R ₁₃	0.61 ab	1.06 bc	4.18 c	52.26 ab	20.07 ab	5.47 c
P ₁₀₀ R ₁₃	0.87 a	1.69 a	7.20 bc	21.98 de	27.63 a	52.32 a
P ₀ R ₃₃	0.61 ab	1.19 bc	5.57 bc	32.50 cde	26.40 a	40.18 ab
P ₅₀ R ₃₃	0.60 b	1.29 b	6.24 bc	48.53 abc	17.91 bc	10.90 c
P ₁₀₀ R ₃₃	0.63 ab	1.32 ab	8.41 ab	67.41 a	11.60 c	15.80 c

*DAP: Day after planting ، روز پس از کشت ، DAP *

** در هر ستون، حروف نامشابه اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد از طریق آزمون توکی دارند.

** In each column, the means with dissimilar letters are significantly different at $p < 0.05$ (Tukey test)

جدول ۵- همبستگی بین ضرایب سرعت معادلات مرتبه دوم و تابع توان با پارامترهای گیاهی

Table 5. Correlation between rate coefficient second order and power function equations with crop parameter

Treatments	60 days after planting				95 days after planting				140 days after planting			
	Second Order	Power Function			Second Order	Power Function			Second Order	Power Function		
	$k_2 * 10^{-3}$	a	b	ab	$k_2 * 10^{-3}$	a	b	ab	$k_2 * 10^{-3}$	a	b	ab
Shoot biomass	-0.566	0.438	0.825**	0.637	-0.145	0.425	-0.264	0.430	-0.519	0.478	0.476	0.534
Root biomass	-0.560	0.502	0.560	0.633	-0.339	0.625	-0.280	0.718*	-0.613	0.752*	0.583	0.770*
Phosphorus concentration	0.495	0.095	-0.703*	-0.118	0.468	0.051	0.194	0.242	-0.327	0.410	0.039	0.311
Absorbed P-Olsen (Q_1)	-0.560	0.502	0.560	0.633	-0.339	0.625	-0.280	0.718*	-0.613	0.752*	0.583	0.770*
Non-soluble P ($Q_{non-Olsen}$)	ND	ND	ND	ND	0.291	0.422	-0.250	0.416	-0.536	0.611	0.670*	0.741*
Soil exploited with root	-0.560	0.502	0.560	0.633	-0.339	0.625	-0.280	0.718*	-0.613	0.752*	0.583	0.770*
Diffused P into rhizosphere (Q_2)	ND	ND	ND	ND	-0.533	0.047	0.211	0.293	-0.094	-0.288	-0.130	0.312
Released cumulative P	-0.672*	0.821**	0.685*	0.949**	-0.254	0.013	0.588	0.455	-0.750*	0.295	0.622	0.442

ND: تعیین نشده (ND: not determined)، * : در سطح ۰/۰۵ معنی دار (*: significant in 0.05)، **: معنی دار در سطح ۰/۰۱ (**: significant in 0.01)

نتیجه گیری کلی

محیط ریزوسفر نیشکر را توضیح دهند. همچنین بررسی همبستگی بین پارامترهای گیاهی و منابع فسفر با ضرایب سرعت نشان داد که به‌ویژه ضرایب سرعت معادله تابع توان همبستگی مثبت و معنی‌داری با برخی از پارامترهای نیشکر و منابع فسفر نشان داد.

سیاس گذاری

نویسندگان مقاله از شرکت کشت و صنعت حکیم فارابی به‌ویژه معاونت محترم کشاورزی جناب آقای مهندس بهروان و مدیریت محترم مطالعات کاربردی جناب آقای مهندس آریز به‌منظور تأمین هزینه‌ها و شرایط مورد نیاز این تحقیق کمال تشکر را می‌نمایند.

استفاده از انتروباکتر به‌عنوان باکتری حل‌کننده فسفات در این تحقیق منجر به افزایش سرعت آزاد شدن فسفر از خاک در محیط ریزوسفر نیشکر شد. بنابراین همان‌طور که نتایج بررسی منابع مختلف فسفر در دسترس گیاه نشان داد فعالیت این باکتری در ریشه گیاه نیشکر سبب استفاده بیش‌تر گیاه از منابع فسفر کم‌تر محلول در خاک گردید که نتیجه آن سرعت آزاد شدن بیش‌تر فسفر از خاک می‌باشد که اثر بهتر آن در مقدار جذب فسفر توسط گیاه نشان داده شد. از میان معادلات سینتیکی استفاده شده در این تحقیق معادلات مرتبه دوم و تابع توان بهتر توانستند آزاد شدن فسفر در

References

- Abdu N. 2013. Formulation of a first-order kinetic model and release of added phosphorus in a savanna soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59 (1): 71-81.
- Barbas C., Lucas Garcı́a J.A., and Gutiérrez Mañero F.J. 1999. Separation and identification of organic acids in root exudates of lupinus luteus by capillary zone electrophoresis. *Phytochemical Analysis*, 10: 55-59.
- Bouyoucos G.J. 1961. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54: 464-465.
- Fernández L.A., Zalba P., Anahí Gómez M., and Antonio Sagardoy M. 2007. Phosphate-solubilization activity of bacterial strains in soil and their effect on soybean growth under greenhouse conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 43: 805-809.
- Ge Z., Rubio G., and Lynch J.P. 2000. The importance of root gravitropism for inter-root competition and phosphorus acquisition efficiency: results from a geometric simulation model. *Plant Soil*, 218: 159-171.
- George T.S., Gregory P.J., Wooda M., Reada D., and Bureshb R.J. 2002. Phosphatase activity and organic acids in the rhizosphere of potential agroforestry species and maize. *Soil Biology and Biochemistry*, 34: 1487-1494.
- Gómez-Muñoz B., Pittroff S.M., de Neergaard A., Jensen L.S., Nicolaisen M.H., and Magid J. 2016. Penicillium bilaii effects on maize growth and P uptake from soil and localized sewage sludge in a rhizobox experiment. *Biology and Fertility of Soils*, 53(1), pp.23-35.
- Hansen J.C., and Strawn D.G. 2003. Kinetics of phosphorus release from manure – amended alkaline soil. *Soil Science*, 168: 869-879.
- Hariprasad P., and Niranjana S.R. 2009. Isolation and characterization of phosphate solubilizing rhizobacteria to improve plant health of tomato. *Plant and Soil*, 316: 13-24.
- 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.
- Jalali M., Ahmadi N., and Zinli M. 2011. Kinetics of phosphorus release from calcareous soils under different land use in Iran. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174: 38-46.
- Karpagam T., and Nagalakshmi P.K. 2014. Isolation and characterization of phosphate solubilizing microbes from agricultural soil. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(3): 601-614.
- 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 and Soil*, 251: 83-91.
- Kou S., and Lotse E.G. 1974. Kinetics of phosphate adsorption and desorption by lake sediments. *Soil Science Society of America, Proceedings*, 38: 50-54.

- Kuo S. 1996. Phosphorus. *In*: Sparks D.L. et al. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods*, Soil Science Society of American, Madison, WI, pp. 869-919.
- Lamizadeh E., Enayatizamir N., and Motamedi H. 2016. Isolation and Identification of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) from the Rhizosphere of Sugarcane in Saline and Non-Saline Soil. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 5 (10): 1072-1083.
- Maguire R.O., Sims J.T., and Foy R.H. 2001. Long – term kinetics for phosphorus sorption – desorption by high phosphorus soils from Ireland and the Delmarva peninsula, USA. *Soil Science*, 166: 557-565.
- McDowell R.W., and Sharpley A.N. 2003. Phosphorus solubility and release kinetics as a function of soil test P concentration. *Geoderma*, 112: 143–154.
- Miller R.O. 1998. Determination of dry matter content of plant tissue: gravimetric moisture. *Handbook of Methods for Plant Analysis*. CRC Press.
- Moradi N., Rasouli Sadaghiani M.H., and Sepehr E. 2012. Effects of low-molecular-weight organic acids on phosphorus sorption characteristics in some calcareous soils. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 36: 459-468.
- Murphy J., and Riley J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytical Chemical Acta*, 27: 31-36.
- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. *Methods of Soil Analysis. Part III*. SSSA. Madison, WI, pp. 961-1010.
- Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe E.S., and Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *U. S. Dep. Agric. Cir.* 939p.
- Raiesi T., and Hosseinpour A.R. 2013. The rhizospheric effects of wheat (*Triticum aestivum* L.) on phosphorus release kinetics. *Journal of water and soil*, 27 (4): 780-791.
- Samadi A., and Gilkes R.J. 1999. Phosphorus transformation and their relationships with calcareous soil properties of Southern Western Australia. *Soil Science Society of America Journal*, 63: 809-815.
- Shariatmadari H., Shirvani M., and Jafari A. 2006. Phosphorus release kinetics and availability in calcareous soils of selected arid and semiarid toposequences. *Geoderma*, 132: 261-272.
- Sparks D.L. 1989. *Kinetics of soil chemical processes*. Academic Press, INC.
- Tennant D. 1975. A test of a modified line intercepts method of estimating root length. *Journal of Ecology*, 63: 995-1001.

Effect of Phosphate Solubilizing Bacteria on Phosphorus Release Kinetic in Rhizosphere of Sugarcane and Correlation with Various Source of Phosphorus

Saeed Safirzadeh^{1*}, Mostafa Chorom², Naeimeh Enayatizamir³

(Received: November 2017 Accepted: March 2018)

Abstract

The effect of sugarcane rhizospheric secretions and phosphate solubilizing bacteria on soil phosphorus desorption kinetic was examined at greenhouse conditions. The experiment was carried out with two treatments, including phosphorus levels (0% (blank, P₀), 50% (P₅₀) and 100% (P₁₀₀) and phosphate solubilizing bacteria strains (*Enterobacter cloacae* R₁₃ (R₁₃) and *Enterobacter cloacae* R₃₃ (R₃₃)). Soil sampling was conducted in 60, 95 and 140 days after planting. Statistical evaluation was performed as completely randomized factorial design with three replicates. The kinetics of phosphorus desorption was investigated by successive extraction method during 30 to 5760 min. According to results, high percentage of phosphorus fertilizer and phosphate solubilizing bacteria lead to increase of phosphorus desorption. Desorption kinetics was described by second order and power function equations well. Comparison of power function equation parameters among various treatments showed that the maximum coefficients were obtained at the lowest phosphorus fertilizer and phosphorus solubilizing bacteria. The reverse relationship was found between soil available phosphorus concentration and kinetic power function parameters, based on correlation analysis. Using of phosphorus solubilizing bacteria enhance the phosphorus bioavailability for plant.

Keywords: Kinetic equations, Phosphorus desorption, Rhizosphere, Sugarcane

Safirzadeh S., Mostafa Chorom M., Enayatizamir N. 2019. Effect of phosphate solubilizing bacteria on phosphorus release kinetic in rhizosphere of sugarcane and correlation with various source of phosphorus. *Applied Soil Research*, 7(2): 168-181.

1- PhD Student, Department of Soil Science, Shahid Chamran University, Iran

2- Professor, Department of Soil Science, Shahid Chamran University

3- Assistant Professor Department of Soil Science, Shahid Chamran University

* Corresponding Author Email: s_safirzade@yahoo.com