

## اثرات ریزوسفری گندم (*Triticum aestivum* L.) بر سینتیک آزادسازی فسفر

طاهره رئیسی<sup>۱\*</sup> - علیرضا حسین پور<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۳۰

### چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثرات ریزوسفر گندم بر سینتیک آزادسازی فسفر در ۱۰ خاک آهکی با استفاده از ریزوباکس اجرا شد. سینتیک آزادسازی فسفر از خاک‌های ریزوسفری و توده توسط عصاره‌گیری متوالی با بی‌کربنات سدیم در یک دوره از ۲ تا ۸۴۰ ساعت در دمای ۱۵±۲۵ درجه سانتی‌گراد بررسی شد. نتایج نشان داد که میانگین مقدار فسفر استخراج شده در ۸۴۰ ساعت از خاک‌های ریزوسفری (۱۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به طور معنی‌داری کمتر از خاک‌های توده (۲۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. همچنین، نتایج نشان داد که شیب منحنی تجمعی فسفر آزاد شده از خاک‌های ریزوسفری و توده در ۱۶۸ ساعت تغییر کرد. بنابراین نمودارها به دو بخش تقسیم و در هر بخش (۱۶۸-۲ و ۸۴۰-۱۶۸ ساعت) معادلات سینتیکی به داده‌ها برازش شدند. نتایج نشان دادند که معادله‌های تابع نمایی، پخشیدگی پارابولیک، الوویج ساده و مرتبه اول می‌توانند در هر دو بخش سرعت آزاد شدن فسفر را به خوبی، تشریح کنند. همچنین نتایج مطالعات همبستگی نشان داد که در بخش اول، مقدار فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ ساعت از شروع آزمایش، ثابت سرعت معادلات الوویج ساده، پخشیدگی پارابولیک، و معادله مرتبه اول در خاک‌های ریزوسفری و توده همبستگی معنی‌داری با شاخص‌های گیاه گندم داشتند ( $p \leq 0.05$ ). در بخش دوم، ثابت سرعت معادلات الوویج ساده و پخشیدگی پارابولیک در خاک‌های ریزوسفری و توده همبستگی معنی‌داری با شاخص‌های گیاه گندم داشتند ( $p \leq 0.01$ ). نتایج این تحقیق نشان داد که ریزوسفر گندم منجر به کاهش مقدار و سرعت آزادسازی فسفر می‌شود و سرعت آزادسازی فسفر از خاک‌ها فاکتور مهمی در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ریزوسفر، شاخص‌های گیاهی، عصاره‌گیری متوالی

### مقدمه

فوق وابسته به عوامل مهمی از قبیل pH، غلظت کاتیون‌های فلزی نظیر کلسیم، آهن و آلومینیوم، و غلظت لیگاندهای آلی و معدنی رقابت کننده با یون‌های فسفر می‌باشد (۱۰). ریشه گیاهان از طریق تغییر سه عامل ذکر شده (pH، غلظت کاتیون‌های فلزی و غلظت لیگاندهای آلی و معدنی) در نتیجه‌ی جذب و یا تراوش آنها منجر به ایجاد تغییراتی در تعادلات شیمیایی فسفر در خاک می‌شود و از این طریق تحرک و قابلیت دسترسی فسفر معدنی خاک را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (۱۰). به طور معمول، تخلیه فسفر در ریزوسفر توسط گیاه منجر به انتقال مجدد فسفر به فاز محلول از فاز جامد خاک می‌شود. سرعت انتقال مجدد فسفر به محلول خاک از فاز جامد هم به غلظت فسفر در فاز محلول و هم به زمان وابسته است و با خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک تغییر می‌کند (۲ و ۳). وقتی فعالیت ریشه گیاه از طریق تخلیه و تجمع فسفر در ریزوسفر، تغییر pH ریزوسفر، تراوش آنیون‌های آلی و آنزیم فسفاتازها شرایط متفاوتی را در اطراف خود نسبت به توده خاک (غیرریزوسفری) ایجاد می‌کند (۶، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۲۱ و ۲۳)، ضرورت بررسی آزاد شدن فسفر، از فاز جامد به محلول

ریشه گیاه به طور مستقیم از طریق فعالیت خود یا به طور غیر مستقیم از طریق تحریک جمعیت و فعالیت ریزجانداران می‌تواند، شرایط شیمیایی و بیولوژیکی متفاوتی در سطح خود نسبت به خاک توده ایجاد کند. نتایج مطالعات حاکی است که جذب عناصر غذایی توسط گیاه به سرعت عرضه شکل قابل دسترس عنصر برای ریشه بیش از کل مقدار عنصر در خاک بستگی دارد (۲۰). فسفر یکی از مهمترین عناصر غذایی است که در غلظت‌های خیلی کم در محلول خاک وجود دارد و جذب آن توسط گیاه منجر به کاهش بیشتر این عنصر در ناحیه نزدیک به ریشه می‌شود (۴). غلظت یون‌های فسفر در فاز محلول توسط گونه‌بندی فسفر و یک دامنه واکنش با فاز جامد خاک (جذب-واذب-رسوب) تعیین می‌شود. همگی عوامل

۱ و ۲- دانشجوی دکتری و استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

(Email: taraiesi@gmail.com)

\*- نویسنده مسئول:

ریزوسفر گندم از ریزوباکس استفاده شد. ابعاد ریزوباکس  $160 \times 132 \times 180$  میلی‌متر (ارتفاع  $\times$  عرض  $\times$  ارتفاع) در نظر گرفته شد (شکل ۱). ریزوباکس به سه بخش، شامل بخش مرکزی یا قسمت ریزوسفری (طول ۳۲ میلی‌متر) و قسمت‌های غیرریزوسفری (به طول ۵۰ میلی‌متر در دوطرف خاک ریزوسفری) تقسیم شد. دو قسمت خاک غیرریزوسفری از قسمت ریشه و خاک ریزوسفری توسط یک پوشش نایلونی با قطر منافذ حدود ۲۴ میکرومتر جدا شد. قسمت ریزوسفری و قسمت‌های توده‌ی به ترتیب با ۹۰۰ و ۳۱۰۰ گرم خاک هوا خشک پر شدند. نظر به اینکه خاک ریزوباکس‌ها نباید از لحاظ سایر عناصر غذایی کمبودی داشته باشند، در ابتدای کشت به هر ریزوباکس ۱۰۰ میلی‌گرم پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم و ۵ میلی‌گرم آهن به صورت سکوسترین ۱۳۸ در کیلوگرم خاک و ۲ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک از منبع سولفات روی اضافه شد. همچنین، به هر ریزوباکس مقدار ۱۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در کیلوگرم خاک از منبع اوره به صورت تقسیط در سه نوبت اضافه شد. برای کشت گیاه، بذرها ی گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم بکراس 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 تقلیل یافت. در طول مدت رشد، مراقبت‌های لازم انجام و سعی شد رطوبت خاک‌ها در حد ظرفیت مزرعه ثابت بماند. 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 مرتبه سلسیوس خشک و وزن خشک اندام هوایی و ریشه تعیین شد. نمونه‌های خشک شده در آون (بخش هوایی) به روش خاکستر خشک هضم و مقدار فسفر موجود در نمونه‌های هضم شده به روش رنگ-سنجی (۱۸) تعیین شد. همچنین، ریزوباکس‌ها در پایان فصل رشد باز شدند و از هر ریزوباکس دو نمونه خاک، یکی از قسمت ریشه و دیگری از بخش توده‌ی خاک (خاک غیرریزوسفری) برداشت شد. این دو نمونه خاک در هر ریزوباکس به ترتیب معرف خاک ریزوسفری و خاک توده بودند.

بررسی آزاد شدن فسفر در نمونه خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری گندم با استفاده از روش عصاره‌گیری متوالی<sup>۱</sup> با محلول بی‌کربنات سدیم انجام شد. بدین منظور، ۱ گرم خاک از نمونه‌ها، همراه با ۲۰ میلی‌لیتر بی‌کربنات سدیم ۰/۵ مولار با  $\text{pH} = 8/5$  در لوله‌های ساتریفیوژ به صورت جداگانه ریخته شد. نمونه‌ها داخل انکوباتور در دمای  $25 \pm 1$  درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند.

خاک به عنوان تابعی از زمان (سینتیک آزادسازی فسفر) در دو خاک ریزوسفری و خاک غیرریزوسفری مشخص می‌شود.

اطلاعات کمی درباره‌ی اثر فرایندهای ریزوسفری بر آزادسازی فسفر از خاک‌ها در دسترس می‌باشد. در تعدادی از تحقیقات، سینتیک آزادسازی فسفر از خاک در غیاب ریشه گیاه با استفاده از بی‌کربنات سدیم مطالعه شده است (۱، ۹ و ۳۰). همچنین، چندین رابطه برای تشریح آزادسازی فسفر استفاده شده که از آن جمله: معادله مرتبه اول؛ معادله پخشیدگی پارابولیک؛ الوویچ ساده و معادله توانی قابل ذکر است (۱، ۷، ۹، ۱۶، ۲۴، ۲۵، ۲۸ و ۳۰). کوک (۷) به بررسی سرعت آزادسازی فسفر از خاک توسط رزین تبادل آنیونی در دو سری خاک پرداخت. این محقق گزارش کرد که اگر مقدار فسفر آزاد شده در برابر جذر زمان آزادسازی ترسیم گردد، خط راستی بدست می‌آید. شیب این خط راست که در واقع ظرفیت خاک برای تأمین فسفر برای گیاه در حال رشد بود با مقدار فسفر برداشت شده توسط چاودار همبستگی معنی‌داری داشت. بیابانکی و حسین‌پور (۱) گزارش کردند که ثابت‌های معادلات پخشیدگی پارابولیک، تابع توانی و فسفر آزاد شده توسط عصاره‌گیری متوالی با بی‌کربنات سدیم پس از ۱۷۵۲ ساعت همبستگی معنی‌داری با شاخص‌های گیاه ذرت داشتند. حال سوالی که پیش می‌آید این است که اصلاحات و تغییراتی که توسط ریشه گیاه در ریزوسفر رخ می‌دهد، می‌تواند توانایی فاز جامد خاک را برای آزادسازی فسفر تحت تأثیر قرار دهد یا خیر؟ بنابراین پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر ریزوسفری گندم بر مقدار و سرعت آزادسازی فسفر در ریزوباکس اجرا شد.

## 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، نمونه‌های خاک از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس ۱۰ نمونه خاک بر اساس مقادیر درصد رس، کربنات کلسیم معادل و مقدار فسفر عصاره‌گیری شده با روش اولسن انتخاب شدند. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منتخب به روش‌های معمول آزمایشگاهی تعیین شدند. pH نمونه‌های خاک در عصاره ۲ به ۱ محلول به خاک (۲۹)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره‌های صاف شده با نسبت ۲ به ۱ محلول به خاک (۲۲)، کربنات کلسیم معادل خاک به روش تیتراسیون برگشتی با هیدروکسید سدیم (۱۳)، درصد کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر (۱۹)، گنجایش تبادل کاتیونی به روش استات سدیم یک مولار در  $\text{pH} = 8/2$  (۵) و بافت خاک به روش هیدرومتر (۸) تعیین شد.

به منظور تعیین شاخص‌های گیاه گندم، یک آزمایش گلخانه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. برای مطالعه

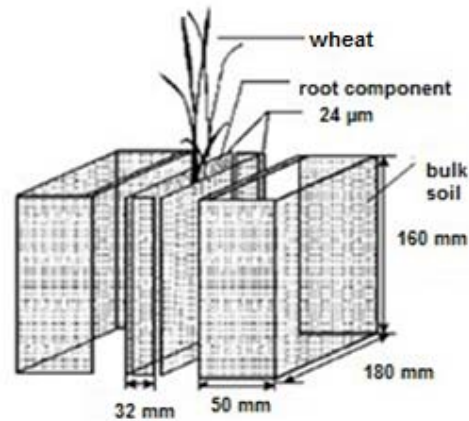
همبستگی ضرایب معادلاتی که بهترین توصیف را از آزاد شدن فسفر در نمونه‌های مطالعه شده داشتند، با شاخص‌های گندم بررسی شد. اثر ریزوسفر بر مقدار فسفر آزاد شده با آزمون تی تست جفت شده بررسی شد. کلیه آنالیزهای آماری با استفاده از نرم‌افزار استاتیسیتیکا ۱۰ (۲۷) اجرا شد.

## نتایج و بحث

دامنه مقدار رس در خاک‌های مورد مطالعه از ۱۳۳ تا ۵۵۰ گرم بر کیلوگرم خاک، 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 ۰/۶۱ دسی‌زیمنس بر متر) بودند. بنابراین، می‌توان گفت خاک‌های بررسی شده دارای دامنه وسیعی از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی می‌باشند (جدول ۲).

مقدار فسفر تجمعی آزاد شده از خاک ریزوسفری و توده شماره ۴ توسط عصاره‌گیری متوالی با بی‌کربنات سدیم به عنوان تابعی از زمان عصاره‌گیری در شکل ۲ نشان داده شده است. بقیه خاک‌ها نیز روندی مشابه با خاک شماره ۴ را نشان دادند. روند آزاد شدن تجمعی فسفر با زمان شامل دو بخش بود. بررسی نمودار آزاد شدن تجمعی فسفر توسط عصاره‌گیر بی‌کربنات سدیم نشان داد که سرعت آزاد شدن فسفر از این خاک‌ها (چه ریزوسفری و چه توده) در مراحل اولیه سریع و سپس کند بود.

شارپلی و آهوجا (۲۵) گزارش کردند که واجذب فسفر در طول دوره‌های کوتاه، فرایندی با انرژی فعالسازی پایین بود. این پژوهشگران پیشنهاد کردند که به دلیل پایین بودن انرژی فعالسازی در طول دوره‌های کوتاه، احتمالاً مرحله تعیین کننده سرعت واجذب فسفر در این دوره‌ها، سرعت پخشیدگی فسفر آزاد شده از غشاء‌های آبی احاطه کننده ذرات خاک به خارج است.



شکل ۱- ساختار شماتیک سیستم ریزوباکس

۱۵ دقیقه قبل از قرار دادن نمونه‌ها در انکوباتور و ۱۵ دقیقه قبل از اتمام هر دوره، نمونه‌ها به وسیله دستگاه تکان دهنده برقی تکان داده شدند. خاک‌ها در زمان‌های ۰، ۲، ۴، ۸، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰، ۱۴۴، ۱۶۸، ۲۴۰، ۳۳۶، ۵۰۴، ۶۷۲ و ۸۴۰ ساعت پس از افزودن محلول‌ها، عصاره‌گیری شدند. بدین منظور، سوسپانسیون‌ها با دستگاه سانتریفیوژ با ۳۰۰۰ دور در دقیقه صاف و محلول رویی جدا و مقدار لازم از محلول عصاره‌گیر مجدداً به نمونه خاک‌ها اضافه و پس از ۱۵ دقیقه تکان دادن توسط دستگاه تکان دهنده برقی، نمونه‌ها به انکوباتور منتقل خواهند شد. غلظت فسفر عصاره‌ها به روش رنگ-سنجی (۱۸) تعیین شد. پس از پایان دوره آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها، معادلات مرتبه اول، الوویج ساده شده، تابع توانی و پخشیدگی پارابولیک (جدول ۱) بر مقدار تجمعی فسفر آزاد شده برآزش و ثابت‌های معادلات برآورد شد. سپس، بر اساس ضریب تعیین و خطای استاندارد تخمین، بهترین مدل یا مدل‌ها برای توصیف آزاد شدن فسفر انتخاب و ضرایب این معادلات گزارش شد. خطای استاندارد تخمین از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$SE = \left\{ \sum (P_i - P^*)^2 / n - 2 \right\}^{0.5}$$

که در آن:  $P_i$  و  $P^*$  به ترتیب مقدار فسفر آزاد شده و برآورد شده بوسیله مدل در زمان  $t$  و  $n$  تعداد نقاط آزمایشی است. در نهایت

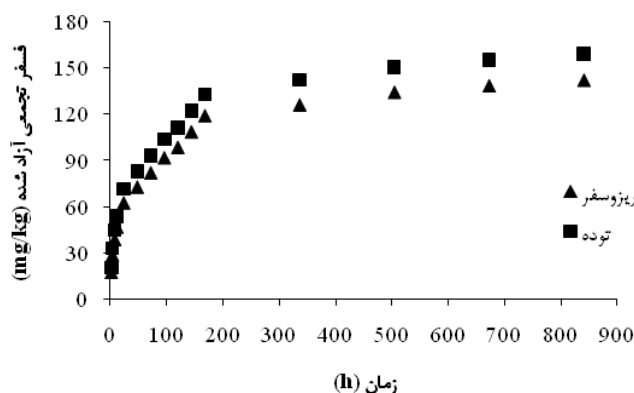
جدول ۱- معادلات سینتیکی مورد استفاده در بررسی آزاد شدن فسفر

| فرمول                       | مدل سینتیکی       |
|-----------------------------|-------------------|
| $\ln (P_0 - P_t) = a - kt$  | مرتبه اول         |
| $P_t = a + Rt^{0.5}$        | پخشیدگی پارابولیک |
| $\ln P_t = \ln a + b \ln t$ | تابع توانی        |
| $P_t = a + 1/\beta \ln t$   | الوویج ساده شده   |

$P_0$ : مقدار فسفر آزاد شده در زمان  $t$  (mg/kg);  $P_t$ : مقدار فسفر آزاد شده پس از  $h$  (mg/kg);  $R$  و  $1/\beta$ : ثابت‌های سرعت معادلات سینتیکی;  $a$ : عرض از مبدأ معادلات و  $t$ : زمان (h).

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

| شماره خاک | طول و عرض جغرافیایی | رده بندی           | واکنش خاک | هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) | کربنات کلسیم معادل | شن رس | کربن آلی |
|-----------|---------------------|--------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------|-------|----------|
|           |                     |                    |           | گرم بر کیلوگرم                    |                    |       |          |
| ۱         | ۵۸°E<br>۳۲° ۸'N     | Typic Haploxerepts | ۸/۰       | ۰/۳۶                              | ۴۲۱                | ۲۷۷   | ۳/۱      |
| ۲         | ۴۰°E<br>۳۲° ۵۰'     | Typic Haploxerepts | ۸/۰       | ۰/۳۸                              | ۱۶۲                | ۱۲۶   | ۵/۰      |
| ۳         | ۵۹°E<br>۳۲° ۶'N     | Typic Haploxerafls | ۸/۰       | ۰/۴۶                              | ۴۱۰                | ۴۱۶   | ۴/۳      |
| ۴         | ۵۸°E<br>۳۲° ۹'N     | Typic Haploxerepts | ۸/۰       | ۰/۴۲                              | ۴۷۵                | ۱۴۳   | ۴/۱      |
| ۵         | ۳۴°E<br>۳۲° ۵۰'     | Typic Calcixerpts  | ۸/۰       | ۰/۴۶                              | ۳۸۸                | ۵۰    | ۵/۴      |
| ۶         | ۴۴°E<br>۳۲° ۵۰'     | Typic Haploxerepts | ۷/۹       | ۰/۵۹                              | ۲۶۷                | ۱۴۷   | ۸/۴      |
| ۷         | ۵۶°E<br>۳۲° ۵۰'     | Typic Haploxerepts | ۸/۱       | ۰/۳۶                              | ۳۲۵                | ۱۸۹   | ۵/۱      |
| ۸         | ۵۱°E<br>۳۲° ۵۰'     | Typic Calcixerpts  | ۸/۱       | ۰/۵۹                              | ۲۶۶                | ۱۱۷   | ۱۳/۹     |
| ۹         | ۵۸°E<br>۳۲° ۵۰'     | Typic Calcixerpts  | ۸/۰       | ۰/۶۱                              | ۲۱۰                | ۱۶۲   | ۱۰/۴     |
| ۱۰        | ۵۵°E<br>۳۲° ۵۰'     | Typic Haploxerepts | ۸/۰       | ۰/۲۶                              | ۱۹۰                | ۶۱۷   | ۷/۰      |



شکل ۲- مقدار تجمعی فسفر آزاد شده با زمان

گونه‌های فسفر مرحله محدود کننده سرعت در آزادسازی فسفر و در بازه‌های زمانی کوتاه مدت فرایند واکنشی احتمالاً غالب است. به علت مشکل در جداسازی این دو فرایند سینتیک آزادسازی فسفر به صورت ترکیبی از دو فرایند رهاسازی و انحلال در نظر گرفته می‌شود. مقادیر فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ ساعت و ۸۴۰ ساعت از شروع آزمایش در

در طول مراحل اولیه رهاسازی، فسفر نگهداشت شده در مکان‌های با انرژی فعالسازی پایین رها می‌شود این در حالی است که در طول مراحل آخر، فسفر نگهداشت شده در مکان‌های با انرژی فعالسازی بالا واکنشی می‌شود. علاوه بر این، مک‌دوول و شارپلی (۱۶) پیشنهاد کردند که در بازه‌های زمانی طولانی مدت، انحلال

همان طور که اشاره شد، روند آزاد شدن تجمعی فسفر با زمان شامل دو بخش بود. بررسی نمودار آزاد شدن تجمعی فسفر نشان داد که سرعت آزاد شدن فسفر از این خاک‌ها (چه ریزوسفری و چه توده) در مراحل اولیه سریع و سپس کند بود. بنابراین نمودارها به دو بخش تقسیم و در هر بخش (۱۶۸-۲ و ۸۴۰-۱۶۸ ساعت) معادلات سینتیکی بر داده‌ها برازش شدند. دامنه تغییرات و میانگین  $R^2$  و SE معادلات برای هر دو بخش (۱۶۸-۲ و ۸۴۰-۱۶۸ ساعت) در جدول ۴ آورده شده است.

نتایج نشان دادند که در بخش اول، معادله‌های تابع نمایی، پخشیدگی پارابولیک، الوویج ساده و مرتبه اول می‌توانند سرعت آزاد شدن فسفر را به خوبی، تشریح کنند. همچنین، در بخش دوم معادله‌های تابع نمایی، پخشیدگی پارابولیک، الوویج ساده و مرتبه اول می‌توانند سرعت آزاد شدن فسفر را به خوبی، توضیح دهند. ثابت‌های برآورد شده معادله‌های مربوط به بخش اول و دوم در خاک‌های ریزوسفری و توده در جداول ۵ و ۶ آورده شده است. در بخش اول، دامنه ثابت سرعت معادله الوویج ساده در خاک‌های ریزوسفری و توده به ترتیب از ۱۳/۴ (خاک ۱۰) تا ۵۲/۸ (خاک ۹) و از ۱۴/۱ (خاک ۱۰) تا ۵۵/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بر ساعت (خاک ۹) بود.

دامنه ثابت سرعت معادله پخشیدگی پارابولیک در خاک‌های ریزوسفری و توده به ترتیب از ۴/۹ (خاک ۱۰) تا ۱۶/۳ (خاک ۹) و از ۵/۱ (خاک ۱۰) تا ۲۰/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم بر ساعت به توان نیم (خاک ۹) بود. دامنه ثابت سرعت تابع توانی در خاک‌های ریزوسفری و توده به ترتیب از ۰/۲۷ (خاک ۸) تا ۰/۴۱ (خاک ۳) و از ۰/۲۷ (خاک ۳) تا ۰/۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بر ساعت (خاک ۷) بود. دامنه ثابت سرعت معادله مرتبه اول ( $k_1 \times 10^3$ ) در خاک‌های ریزوسفری و توده به ترتیب از ۱۲/۳۷ (خاک ۱۰) تا ۱۷/۷۵ (خاک ۷) و از ۱۲/۰۳ (خاک ۱۰) تا ۱۷/۹۲ میلی‌گرم در کیلوگرم بر ساعت (خاک ۷) بود.

جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان داد که دامنه مقدار فسفر استخراج شده بعد از ۸۴۰ ساعت از خاک‌های ریزوسفری و توده به ترتیب از ۹۴ (خاک ۱۰) تا ۳۸۷ (خاک ۹) و از ۱۰۰ (خاک ۱۰) تا ۴۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم (خاک ۹) بود. همچنین، دامنه مقدار فسفر استخراج شده بعد از ۱۶۸ ساعت از خاک‌های ریزوسفری و توده به ترتیب از ۸۱ (خاک ۱۰) تا ۳۱۲ (خاک ۹) و از ۸۶ (خاک ۱۰) تا ۳۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم (خاک ۹) بود. نتایج تی تست جفت شده نشان داد که مقدار فسفر استخراج شده توسط عصاره‌گیری متوالی با بی‌کربنات سدیم بعد از سپری شدن ۱۶۸ و ۸۴۰ ساعت از خاک‌های ریزوسفری به طور معنی‌داری کمتر از خاک‌های توده بود.

در آزمایش حاضر، فعالیت ریشه نه تنها فسفر قابل استفاده (فسفر اولسن) را تحت تأثیر قرار داد، همچنین ویژگی‌های بیولوژیکی و شیمیایی خاک را نیز تحت تأثیر قرار داد. نتایج نشان داد که ریزوسفر گندم منجر به افزایش فعالیت فسفاتاز اسیدی، فسفاتاز قلیایی، کربن آلی محلول، کربن و فسفر زیست توده میکروبی و کاهش فسفر قابل استخراج با روش اولسن شد (نتایج نشان داده نشده است). علاوه بر این نتایج نشان داد که توزیع برخی از جزءهای فسفر معدنی و مقدار فسفر آلی در خاک‌های ریزوسفری و خاک‌های توده گندم متفاوت بود. بنابراین، کاهش غلظت فسفر در خاک مجاور ریشه، نیروی لازم برای پخشیدگی فسفر به سمت ریشه را تأمین نموده و علاوه بر این تعادل جذب-واجدبی و رسوب-انحلال را بر هم زده و منجر به دسترسی بیشتر گیاه به منابع فسفر کمتر قابل دسترس گردیده است. مطابق با تحقیقات چن و همکاران (۶) و مارشنر و همکاران (۱۴) و گزارش کردند که شرایط شیمیایی و بیولوژیکی ریزوسفر متفاوت از خاک‌های توده بود. همچنین گزارشاتی مبنی بر تفاوت جزءبندی فسفر در خاک‌های ریزوسفری و خاک‌های توده وجود دارد (۱۲) و (۲۳).

جدول ۳- مقدار فسفر آزاد شده (mg/kg) از خاک‌های ریزوسفری و توده مطالعه شده

| شماره خاک | ۱۶۸-۸۴۰ h       |                 | ۲-۸۴۰ h          |                  | ۲-۱۶۸ h          |                  |
|-----------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|           | توده            | ریزوسفر         | توده             | ریزوسفر          | توده             | ریزوسفر          |
| ۱         | ۳۱              | ۳۱              | ۱۴۶              | ۱۳۹              | ۱۱۵              | ۱۰۷              |
| ۲         | ۳۶              | ۲۸              | ۱۵۳              | ۱۳۳              | ۱۱۸              | ۱۰۵              |
| ۳         | ۵۴              | ۴۴              | ۲۲۴              | ۱۹۳              | ۱۷۰              | ۱۴۹              |
| ۴         | ۲۶              | ۲۳              | ۱۵۹              | ۱۴۲              | ۱۳۳              | ۱۱۹              |
| ۵         | ۳۳              | ۳۳              | ۱۷۳              | ۱۶۱              | ۱۴۰              | ۱۲۸              |
| ۶         | ۳۰              | ۲۶              | ۱۴۲              | ۱۳۳              | ۱۱۲              | ۱۰۷              |
| ۷         | ۸۱              | ۸۰              | ۳۲۹              | ۳۰۷              | ۲۴۸              | ۲۲۶              |
| ۸         | ۳۲              | ۲۹              | ۲۳۴              | ۲۲۶              | ۲۰۳              | ۱۹۸              |
| ۹         | ۸۳              | ۷۵              | ۴۰۸              | ۳۸۷              | ۳۲۵              | ۳۱۲              |
| ۱۰        | ۱۴              | ۱۴              | ۱۰۰              | ۹۴               | ۸۶               | ۸۱               |
| میانگین   | ۴۲ <sup>A</sup> | ۳۸ <sup>B</sup> | ۲۰۷ <sup>A</sup> | ۱۹۲ <sup>B</sup> | ۱۶۵ <sup>A</sup> | ۱۵۳ <sup>B</sup> |

حروف متفاوت در سطر پایانی نشان‌دهنده تفاوت میانگین‌ها توسط تی تست جفت‌شده می‌باشد

جدول ۴- ضرایب تشخیص و خطای استاندارد برآورد (mg/kg) معادلات استفاده شده در دو بخش

| خاک     | مرتب اول       |       | تابع توانی |            | پخشیدگی پارابولیک |            | الویج ساده شده |            |
|---------|----------------|-------|------------|------------|-------------------|------------|----------------|------------|
|         | میانگین        | دامنه | میانگین    | دامنه      | میانگین           | دامنه      | میانگین        | دامنه      |
| ریزوسفر | R <sup>2</sup> | ۰/۹۷  | ۰/۹۸       | ۰/۹۷-۰/۹۹۹ | ۰/۹۷              | ۰/۹۲-۰/۹۹  | ۰/۹۷           | ۰/۹۷-۰/۹۹۹ |
|         | SE             | ۹     | ۶-۱۷       | ۳-۱۰       | ۵                 | ۴-۱۶       | ۷              | ۳-۱۳       |
| توده    | R <sup>2</sup> | ۰/۹۷  | ۰/۹۸       | ۰/۹۶-۰/۹۹۹ | ۰/۹۷              | ۰/۹۲-۰/۹۹  | ۰/۹۸           | ۰/۹۷-۰/۹۹۹ |
|         | SE             | ۹     | ۶-۱۷       | ۳-۱۱       | ۵                 | ۵-۱۶       | ۷              | ۴-۱۴       |
| ریزوسفر | R <sup>2</sup> | ۰/۹۷  | ۰/۹۸       | ۰/۹۷-۰/۹۹۹ | ۰/۹۹              | ۰/۹۹-۰/۹۹۹ | ۰/۹۷           | ۰/۹۶-۰/۹۹  |
|         | SE             | ۴/۲   | ۱/۵-۸/۹    | ۲/۸        | ۲/۷-۵/۱           | ۱/۴        | ۳/۵            | ۰/۸-۶/۸    |
| توده    | R <sup>2</sup> | ۰/۹۷  | ۰/۹۸       | ۰/۹۵-۰/۹۹۹ | ۰/۹۹              | ۰/۹۸-۰/۹۹۹ | ۰/۹۷           | ۰/۹۴-۰/۹۹  |
|         | SE             | ۴/۴   | ۱/۹-۸/۱    | ۲/۷        | ۰/۷-۴/۳           | ۱/۴        | ۳/۵            | ۰/۹-۵/۸    |

فسفر کل در ریزوسفر گندم (۷۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در مقایسه با متوسط مقدار فسفر کل در خاک‌های توده (۸۰۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) می‌تواند تصدیق بر نتیجه‌گیری فوق باشد. در گذشته نیز به کاهش فسفر کل در خاک‌های ریزوسفری نسبت به خاک‌های توده اشاره شده است (۱۰). بنابراین، سرعت آزادسازی فسفر در خاک‌های ریزوسفر پایین تر از خاک‌های توده است. سازگاری‌هایی که گونه‌های گیاهی مختلف تحت شرایط کمبود فسفر به کار می‌گیرند، بر حسب گونه گیاه متفاوت هستند.

چنین سازگاری‌هایی شامل شرح کربوکسیلات‌ها، اسید فسفاتاز، کاهش در pH ریزوسفر، افزایش وزن اختصاص یافته به ریشه، افزایش طول ویژه ریشه، افزایش تعداد ریشه‌های جانبی و تشکیل تار کشنده (۲۱) و همچنین تجمع و تخلیه فسفر معدنی در ریزوسفر (۱۰) می‌باشد. نتایج نشان داد که ثابت‌های سرعت در بخش دوم چه در خاک‌های ریزوسفری و چه در خاک‌های توده کمتر از ثابت‌های سرعت در بخش اول بود.

همچنین، بررسی نتایج نشان داد که به طور متوسط مقدار کاهش ثابت سرعت معادله الویج ساده، پخشیدگی پارابولیک، تابع توانی و معادله مرتبه اول در بخش دوم نسبت به بخش اول در خاک‌های ریزوسفری به ترتیب ۱۳، ۶۰ و ۷۷ درصد بود. همچنین، متوسط مقدار کاهش ثابت سرعت معادله الویج ساده، پخشیدگی پارابولیک، تابع توانی و معادله مرتبه اول در بخش دوم نسبت به بخش اول در خاک‌های توده به ترتیب ۱۲، ۷۵، ۵۸ و ۷۸ درصد بود. به نظر می‌رسد کاهش غلظت فسفر در خاک مجاور ریشه، نیروی لازم برای پخشیدگی فسفر به سمت ریشه را تأمین نموده و در وهله‌ی اول منجر به واگذاری فسفر تا درجه‌ای که مطابق با حلالیت ترکیب فسفر با حداقل پایداری است، خواهد شد (۲۶).

به نظر می‌رسد جذب فسفر توسط ریشه گیاه منجر به تخلیه مخازن لبایل در خاک‌های ریزوسفری شده و در نتیجه سرعت آزادسازی فسفر در خاک‌های ریزوسفر پایین تر از خاک‌های توده است. در تحقیقات گذشته نیز به تخلیه فسفر لبایل در ریزوسفر گندم اشاره شده است (۴، ۱۰ و ۱۴). در بخش دوم، دامنه ثابت سرعت معادله الویج ساده در خاک‌های ریزوسفری و توده به ترتیب از ۸/۶ (خاک ۱۰) تا ۵۰/۰ (خاک ۷) و از ۹/۰ (خاک ۱۰) تا ۵۱/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم بر ساعت (خاک ۹) بود. دامنه ثابت سرعت معادله پخشیدگی پارابولیک در خاک‌های ریزوسفری و توده به ترتیب از ۰/۸۷ (خاک ۱۰) تا ۵/۱۱ (خاک ۷) و از ۰/۹۲ (خاک ۱۰) تا ۵/۲۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بر ساعت به توان نیم (خاک ۹) بود. دامنه ثابت سرعت تابع توانی در خاک‌های ریزوسفری و توده به ترتیب از ۰/۰۹ (خاک ۸) تا ۰/۲۰ (خاک ۷) و از ۰/۰۹ (خاک ۸) تا ۰/۱۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بر ساعت (خاک ۳ و ۷) بود. دامنه ثابت سرعت معادله مرتبه اول ( $p1 \times 10^3$ ) در خاک‌های ریزوسفری و توده به ترتیب از ۳/۰۴ (خاک ۲) تا ۳/۷۴ (خاک ۴) و از ۲/۷۶ (خاک ۱) تا ۳/۸۲ میلی‌گرم در کیلوگرم بر (خاک ۴) ساعت بود. به نظر می‌رسد جذب فسفر توسط ریشه گیاه منجر به تخلیه مخازن لبایل در خاک‌های ریزوسفری شده و با ادامه جذب و تخلیه فسفر تعادل جذب-واگذاری و رسوب-انحلال را بر هم زده و منجر به دسترسی بیشتر گیاه به منابع فسفر تقریباً غیر قابل دسترس می‌گردد و احتمالاً جزءهای از فسفر با قابلیت دسترسی بسیار پایین در ریزوسفر باقی می‌مانند و کنترل کننده سرعت آزادسازی فسفر از خاک‌های ریزوسفری در این مرحله می‌باشند. این در حالی است که در خاک‌های توده احتمالاً ترکیبات فسفر با قابلیت دسترسی پایین و بسیار پایین کنترل کننده سرعت آزادسازی فسفر از خاک‌های توده در این بخش می‌باشند. کمتر بودن متوسط مقدار

جدول ۵ - ضرایب معادلات استفاده شده برای تشریح سینتیک آزادسازی فسفر از خاک‌های ریزوسفری و توده در بخش اول (۱۶۸-۳)

| شماره خاک | مرتبه اول |      |                                 |         |      |                                 | تابع توانی |    |      |         |      |    | شماره خاک |      |       |
|-----------|-----------|------|---------------------------------|---------|------|---------------------------------|------------|----|------|---------|------|----|-----------|------|-------|
|           | توده      |      |                                 | ریزوسفر |      |                                 | توده       |    |      | ریزوسفر |      |    |           |      |       |
|           | a         | 1/B  | k <sub>t</sub> *10 <sup>3</sup> | a       | 1/B  | k <sub>t</sub> *10 <sup>3</sup> | a          | b  | a    | b       | a    | b  |           |      |       |
| ۱         | ۴/۲       | ۱۹/۵ | ۱۵/۱۵                           | -۳/۵    | ۲۱/۳ | ۴/۴۹                            | ۱۳/۴۸      | ۱۸ | ۰/۳۶ | ۱۶      | ۰/۳۷ | ۱۸ | ۰/۳۶      | ۴/۴۹ | ۱۵/۱۵ |
| ۲         | -۲/۸      | ۱۸/۹ | ۱۴/۵۵                           | -۰/۷    | ۲۱/۱ | ۴/۴۹                            | ۱۳/۸۹      | ۲۰ | ۰/۳۴ | ۱۶      | ۰/۳۶ | ۲۰ | ۰/۳۴      | ۴/۴۹ | ۱۴/۵۵ |
| ۳         | -۱۳/۰     | ۲۸/۶ | ۱۵/۴۴                           | -۱۲/۱   | ۳۲/۶ | ۴/۹۴                            | ۱۴/۷۲      | ۲۳ | ۰/۳۹ | ۱۸      | ۰/۴۱ | ۲۳ | ۰/۳۹      | ۴/۹۴ | ۱۵/۴۴ |
| ۴         | -۳/۶      | ۲۱/۶ | ۱۴/۲۲                           | -۲/۷    | ۳۳/۰ | ۴/۶۲                            | ۱۳/۷۵      | ۲۱ | ۰/۳۶ | ۱۸      | ۰/۳۶ | ۲۱ | ۰/۳۶      | ۴/۶۲ | ۱۴/۲۲ |
| ۵         | -۴/۴      | ۲۲/۹ | ۱۳/۴۱                           | -۰/۷    | ۳۳/۵ | ۴/۶۶                            | ۱۲/۵۹      | ۲۳ | ۰/۳۵ | ۱۹      | ۰/۳۷ | ۲۳ | ۰/۳۵      | ۴/۶۶ | ۱۳/۴۱ |
| ۶         | -۱/۴      | ۱۸/۷ | ۱۲/۷۵                           | -۰/۲    | ۱۹/۵ | ۴/۴۱                            | ۱۲/۴۰      | ۱۹ | ۰/۳۴ | ۱۷      | ۰/۳۵ | ۱۹ | ۰/۳۴      | ۴/۴۱ | ۱۲/۷۵ |
| ۷         | -۱۸/۴     | ۴۴/۱ | ۱۶/۹۷                           | -۲/۲    | ۴۸/۵ | ۵/۲۵                            | ۱۶/۵۰      | ۲۲ | ۰/۴۰ | ۲۹      | ۰/۴۰ | ۲۲ | ۰/۴۰      | ۵/۲۵ | ۱۶/۹۷ |
| ۸         | -۱۸/۹     | ۳۴/۲ | ۱۷/۹۲                           | -۱۸/۳   | ۳۵/۵ | ۴/۸۷                            | ۱۷/۷۵      | ۵۱ | ۰/۲۷ | ۵۰      | ۰/۲۷ | ۵۱ | ۰/۲۷      | ۴/۸۷ | ۱۷/۹۲ |
| ۹         | -۳۷/۹     | ۵۲/۸ | ۱۷/۶۷                           | -۲۶/۱   | ۵۵/۵ | ۵/۴۳                            | ۱۷/۵۸      | ۷۴ | ۰/۲۹ | ۷۳      | ۰/۲۸ | ۷۴ | ۰/۲۹      | ۵/۴۳ | ۱۷/۶۷ |
| ۱۰        | -۴/۲      | ۱۳/۴ | ۱۲/۰۳                           | ۴/۹     | ۱۴/۱ | ۴/۰۶                            | ۱۲/۳۷      | ۱۸ | ۰/۳۰ | ۱۶      | ۰/۳۰ | ۱۸ | ۰/۳۰      | ۴/۰۶ | ۱۲/۰۳ |

خواهد بود (۲۶). مارل و هینسینگر (۱۷) به بررسی سینتیک تبادل یون فسفر بین محلول خاک و فاز جامد خاک در دو خاک ریزوسفری و خاک غیرریزوسفری پرداختند. نتایج نشان داد که سینتیک تبادل فسفر بین فاز جامد و مایع خاک به طور معنی‌داری بین خاک

جدول ۶ - ضرایب معادلات استفاده شده برای تشریح سینتیک آزادسازی فسفر از خاک‌های ریزوسفری و توده در بخش دوم (۸۴۰-۱۶۸)

| شماره خاک | مرتبه اول |      |                                 |         |      |                                 | تابع توانی |     |      |         |      |     | شماره خاک |      |      |
|-----------|-----------|------|---------------------------------|---------|------|---------------------------------|------------|-----|------|---------|------|-----|-----------|------|------|
|           | توده      |      |                                 | ریزوسفر |      |                                 | توده       |     |      | ریزوسفر |      |     |           |      |      |
|           | a         | 1/B  | k <sub>t</sub> *10 <sup>3</sup> | a       | 1/B  | k <sub>t</sub> *10 <sup>3</sup> | a          | b   | a    | b       | a    | b   |           |      |      |
| ۱         | ۵/۹       | ۱۹/۴ | ۲/۷۶                            | ۱۴/۶    | ۱۹/۰ | ۴/۰۲                            | ۳/۱۶       | ۵۱  | ۰/۱۵ | ۴۶      | ۰/۱۶ | ۵۱  | ۰/۱۵      | ۴/۰۲ | ۲/۷۶ |
| ۲         | ۱۳/۶      | ۱۷/۴ | ۳/۱۲                            | ۱/۸     | ۳۲/۱ | ۴/۲۱                            | ۳/۰۴       | ۴۸  | ۰/۱۷ | ۴۷      | ۰/۱۵ | ۴۸  | ۰/۱۷      | ۴/۲۱ | ۳/۱۲ |
| ۳         | ۴/۵       | ۳۷/۶ | ۳/۴۵                            | -۶/۰    | ۳۳/۷ | ۴/۶۸                            | ۳/۲۸       | ۶۸  | ۰/۱۸ | ۶۲      | ۰/۱۷ | ۶۸  | ۰/۱۸      | ۴/۶۸ | ۳/۴۵ |
| ۴         | ۳۳/۱      | ۱۴/۷ | ۳/۸۲                            | ۴۷/۴    | ۱۶/۵ | ۴/۰۰                            | ۳/۷۴       | ۷۴  | ۰/۱۱ | ۶۶      | ۰/۱۱ | ۷۴  | ۰/۱۱      | ۴/۰۰ | ۳/۸۲ |
| ۵         | ۱۸/۸      | ۲۰/۸ | ۳/۵۵                            | ۳۲/۱    | ۲۰/۷ | ۴/۲۰                            | ۳/۲۵       | ۶۹  | ۰/۱۳ | ۵۹      | ۰/۱۵ | ۶۹  | ۰/۱۳      | ۴/۲۰ | ۳/۵۵ |
| ۶         | ۲۰/۶      | ۱۶/۵ | ۳/۲۳                            | ۱/۰     | ۱۹/۱ | ۴/۰۹                            | ۳/۱۵       | ۴۹  | ۰/۱۶ | ۵۱      | ۰/۱۴ | ۴۹  | ۰/۱۶      | ۴/۰۹ | ۳/۲۳ |
| ۷         | -۳۵/۹     | ۵۰/۰ | ۳/۲۴                            | -۱۴/۱   | ۵۰/۳ | ۵/۰۴                            | ۳/۸۹       | ۹۷  | ۰/۱۸ | ۸۱      | ۰/۲۰ | ۹۷  | ۰/۱۸      | ۵/۰۴ | ۳/۲۴ |
| ۸         | ۱۰/۴      | ۱۷/۹ | ۳/۶۰                            | ۹۹/۴    | ۱۹/۹ | ۴/۱۷                            | ۳/۳۴       | ۱۲۶ | ۰/۰۹ | ۱۲۷     | ۰/۰۹ | ۱۲۶ | ۰/۰۹      | ۴/۱۷ | ۳/۶۰ |
| ۹         | ۶۷/۷      | ۴۶/۸ | ۳/۳۱                            | ۵۴/۵    | ۵۱/۹ | ۵/۰۸                            | ۳/۱۷       | ۱۵۳ | ۰/۱۴ | ۱۵۳     | ۰/۱۴ | ۱۵۳ | ۰/۱۴      | ۵/۰۸ | ۳/۳۱ |
| ۱۰        | ۳۶/۲      | ۸/۶  | ۳/۶۳                            | ۳۸/۶    | ۹/۰  | ۳/۴۰                            | ۳/۷۳       | ۵۱  | ۰/۱۰ | ۴۸      | ۰/۱۰ | ۵۱  | ۰/۱۰      | ۳/۴۰ | ۳/۶۳ |

در صورتی که جذب توسط گیاه ادامه یابد هر واجدیی بیشتر از سطح ترکیبات خاک به منظور تامین کردن فسفر در فاز محلول، منجر به انحلال ترکیب فسفر و دوباره پر شدن سیستم جذب خواهد شد. در این مرحله انحلال ترکیبات فسفر مرحله‌ی محدود کننده سرعت

در بخش اول، مقدار فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ ساعت از شروع آزمایش، ثابت سرعت معادلات الوویج ساده، پخشیدگی پارابولیک، و معادله مرتبه اول همبستگی معنی‌داری با وزن خشک بخش هوایی و فسفر جذب شده توسط بخش هوایی گندم داشتند. همچنین، در بخش اول، نسبت وزن خشک ریشه به وزن خشک بخش هوایی گندم همبستگی معنی‌دار و منفی با ثابت سرعت معادلات الوویج ساده و پخشیدگی پارابولیک و مقدار فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ ساعت از شروع آزمایش، داشت. این نتیجه نشان داد که هر چه مقدار فسفر آزاد شده کمتر باشد، گیاه گندم مقدار وزن خشک و کربن بیشتری را به ریشه نسبت به خاک‌های با توان بالاتر برای بافر کردن فسفر در فاز محلول اختصاص می‌دهد.

نتایج نشان داد که در بخش دوم، مقدار فسفر آزاد شده در بازه زمانی ۱۶۸ تا ۸۴۰ ساعت و ضرایب سرعت معادله الوویج ساده و پخشیدگی پارابولیک در خاک‌های ریزوسفری و توده همبستگی معنی‌داری با غلظت فسفر و فسفر جذب شده توسط بخش هوایی گندم داشتند. همبستگی ثابت‌های سرعت معادلات سینتیکی با شاخص‌های گیاهی در مطالعات گذشته نیز گزارش شده است (۱، ۷، ۲۸ و ۳۰). بیابانکی و حسین‌پور (۱) گزارش کردند که ثابت‌های معادلات پخشیدگی پارابولیک، تابع توانی و فسفر آزاد شده توسط عصاره‌گیری متوالی با بی‌کربنات سدیم پس از ۱۷۵۲ ساعت همبستگی معنی‌داری با شاخص‌های گیاه ذرت داشتند.

ریزوسفری و خاک غیرریزوسفری متفاوت بود. علاوه بر این، مک‌دوول و شارپلی (۱۶) به بررسی سینتیک آزادسازی فسفر با استفاده از نوارهای کاغذی در ماتریکس  $CaCl_2$  در طول یک دوره ۲۴۶۰ دقیقه‌ای به عنوان تابعی از غلظت اولیه فسفر آزمون خاک (اولسن و کلرید کلسیم) پرداختند. آنها معادله تابع توانی را بر داده‌های آزادسازی فسفر در طول دروهی مورد مطالعه برازش دادند و مشاهده کردند که ضریب سرعت این معادله با افزایش فسفر استخراج شده به روش اولسن (P-اولسن) و فسفر استخراج شده توسط کلرید کلسیم ( $CaCl_2$ -P) کاهش یافت. تشریح موفقیت آمیز سینتیک آزادسازی فسفر توسط معادله الوویج ساده (۹، ۲۴، ۲۸ و ۳۰)؛ پخشیدگی پارابولیک (۱ و ۳۰) تابع توانی (۱ و ۹)؛ معادله مرتبه اول (۱) در گذشته گزارش شده است.

نتایج نشان داد که شاخص‌های گیاه گندم شامل: غلظت فسفر، عملکرد خشک ساقه و مقدار فسفر جذب شده توسط بخش هوایی (ساقه) گندم به طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع خاک است (جدول ۵). کمترین و بیشترین جذب فسفر توسط گندم مربوط به خاک ۱۰ (۰/۲) میلی‌گرم در ریزوباکس)؛ و خاک ۹ (۲۹/۷ میلی‌گرم در ریزوباکس) بود. همچنین کمترین عملکرد خشک و غلظت فسفر در بخش هوایی گندم در خاک ۱۰ مشاهده شد و بیشترین عملکرد خشک و غلظت فسفر در بخش هوایی گندم مربوط به خاک ۹ بود (جدول ۷).

بررسی ضرایب همبستگی شاخص‌های گیاه گندم با ضرایب سرعت آزاد شدن فسفر از خاک‌های ریزوسفری و توده در جدول ۸ و ۹ آورده شده است.

جدول ۷- اثر نوع خاک بر شاخص‌های گیاه گندم (n= ۳)

| شماره خاک | جذب ساقه<br>(mg rhizobox <sup>-1</sup> ) | عملکرد خشک ساقه<br>(g rhizobox <sup>-1</sup> ) | غلظت فسفر ساقه<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) |
|-----------|------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|
| ۱         | ۲/۰                                      | ۰/۷                                            | ۲۶۵۰                                     |
| ۲         | ۲/۷                                      | ۱/۰                                            | ۲۶۵۵                                     |
| ۳         | ۳/۱                                      | ۱/۵                                            | ۲۰۰۰                                     |
| ۴         | ۴/۷                                      | ۲/۷                                            | ۱۷۷۱                                     |
| ۵         | ۸/۳                                      | ۳/۶                                            | ۲۲۶۱                                     |
| ۶         | ۸/۱                                      | ۳/۱                                            | ۲۷۰۰                                     |
| ۷         | ۱۴/۵                                     | ۵/۳                                            | ۲۷۶۱                                     |
| ۸         | ۱۳/۵                                     | ۵/۸                                            | ۲۳۱۹                                     |
| ۹         | ۲۹/۷                                     | ۵/۸                                            | ۵۲۰۶                                     |
| ۱۰        | ۰/۲                                      | ۰/۴                                            | ۵۰۰                                      |
| LSD       | ۳/۱۵                                     | ۱/۲۰                                           | ۵۱۳                                      |
| F         | ۸۳/۶**                                   | ۲۶/۷**                                         | ۴۳**                                     |

\*\* و \* - به ترتیب معنی دار در  $p < 0.05$  و  $p < 0.01$



جدول ۸- ضرایب همبستگی بین شاخص‌های گیاهی و ثوابت معادلات سینتیکی در خاک‌های ریزوسفری و توده در بخش اول

| بخش هوایی/ریشه | جذب    | وزن خشک<br>بخش هوایی | غلظت فسفر |                 |  |
|----------------|--------|----------------------|-----------|-----------------|--|
| ریزوسفر        | ۰/۸۵** | ۰/۸۲**               | ۰/۴۴      | فسفر آزاد شده   |  |
| توده           | ۰/۸۳** | ۰/۷۹**               | ۰/۴۴      | ۲-۱۶۸h          |  |
| ریزوسفر        | ۰/۸۲** | ۰/۷۸**               | ۰/۴۳      | الووئج ساده شده |  |
| توده           | ۰/۸۲** | ۰/۷۸**               | ۰/۴۳      |                 |  |
| ریزوسفر        | ۰/۸۲** | ۰/۷۸**               | ۰/۴۳      | پخشیدگی هذلولی  |  |
| توده           | ۰/۸۲** | ۰/۷۸**               | ۰/۴۳      |                 |  |
| ریزوسفر        | -۰/۲۰  | -۰/۳۱                | -۰/۱۰     | تابع توانی      |  |
| توده           | -۰/۱۶  | -۰/۲۸                | -۰/۰۵     |                 |  |
| ریزوسفر        | ۰/۳۸   | ۰/۶۷**               | ۰/۴۳      | مرتبه اول       |  |
| توده           | ۰/۳۱   | ۰/۶۳*                | ۰/۴۷      |                 |  |

\*\* و \* - به ترتیب معنی دار در  $p < 0/05$  و  $p < 0/1$ 

جدول ۹- ضرایب همبستگی بین شاخص‌های گیاهی و ثوابت معادلات سینتیکی در خاک‌های ریزوسفری و توده در بخش دوم

| بخش هوایی/ریشه | جذب    | وزن خشک<br>بخش هوایی | غلظت فسفر |                 |  |
|----------------|--------|----------------------|-----------|-----------------|--|
| ریزوسفر        | ۰/۶۲*  | ۰/۵۲                 | ۰/۵۸*     | فسفر آزاد شده   |  |
| توده           | ۰/۶۱*  | ۰/۵۰                 | ۰/۶۵**    | ۱۶۸-۸۴۰h        |  |
| ریزوسفر        | ۰/۶۲*  | ۰/۵۲                 | ۰/۵۸*     | الووئج ساده شده |  |
| توده           | ۰/۶۶** | ۰/۵۵*                | ۰/۶۷**    |                 |  |
| ریزوسفر        | ۰/۶۲*  | ۰/۵۲                 | ۰/۵۸*     | پخشیدگی هذلولی  |  |
| توده           | ۰/۶۶** | ۰/۵۵*                | ۰/۶۷**    |                 |  |
| ریزوسفر        | -۰/۰۳  | -۰/۱۸                | ۰/۳۵      | تابع توانی      |  |
| توده           | ۰/۰۵   | -۰/۱۰                | ۰/۵۰      |                 |  |
| ریزوسفر        | ۰/۲۷   | -۰/۱۳                | ۰/۵۵*     | مرتبه اول       |  |
| توده           | ۰/۲۱   | -۰/۱۵                | ۰/۷۰**    |                 |  |

\*\* و \* - به ترتیب معنی دار در  $p < 0/05$  و  $p < 0/1$ 

## نتیجه‌گیری

در خاک مجاور ریشه، نیروی لازم برای پخشیدگی فسفر به سمت ریشه را تأمین نموده و در وهله‌ی اول منجر به واجدبی فسفر تا درجه‌ای که مطابق با حلالیت ترکیب فسفر با حداقل پایداری است، خواهد شد. به نظر می‌رسد این مرحله مطابق با بخش اول منحنی آزادسازی فسفر می‌باشد. در صورتی که جذب توسط گیاه ادامه یابد هر واجدبی بیشتر فسفر از سطح ترکیبات خاک به منظور تأمین فسفر در فاز محلول منجر به انحلال ترکیب فسفر با حداقل پایداری و دوباره پر شدن سیستم جذب خواهد شد. در این مرحله انحلال ترکیبات فسفر مرحله‌ی محدود کننده سرعت خواهد بود. همچنین نتایج مطالعات همبستگی نشان داد که در هر دو بخش مقدار فسفر آزاد شده در بازه زمانی مورد نظر، ثابت سرعت معادلات الوئج ساده و پخشیدگی پارابولیک، در خاک‌های ریزوسفری و توده همبستگی معنی‌داری با شاخص‌های گیاه گندم داشتند. بنابراین، سرعت و مقدار آزادسازی فسفر از فاز جامد اثر قابل ملاحظه‌ای بر جذب فسفر توسط

بررسی نمودار آزاد شدن تجمعی فسفر توسط عصاره‌گیر بی‌کربنات سدیم نشان داد که سرعت آزاد شدن فسفر از این خاک‌ها (چه ریزوسفری و چه توده) در مراحل اولیه سریع و سپس کند بود. بنابراین نمودارها به دو بخش تقسیم و در هر بخش (۱۶۸-۲ و ۸۴۰-۱۶۸ ساعت) معادلات سینتیکی بر داده‌ها برازش شدند. نتایج نشان داد که مقدار فسفر استخراج شده توسط عصاره‌گیری متوالی با بی‌کربنات سدیم بعد از سپری شدن ۱۶۸ و ۸۴۰ ساعت از خاک‌های ریزوسفری به طور معنی‌داری کمتر از خاک‌های توده بود. همچنین، در هر دو بخش، معادله‌های تابع نمایی، پخشیدگی پارابولیک، الوئج ساده و مرتبه اول می‌تواند سرعت آزاد شدن فسفر را به خوبی، تشریح کنند. نتایج نشان داد که در بخش اول و دوم سرعت آزادسازی فسفر از خاک‌های ریزوسفری کمتر از خاک‌های توده بود. کاهش غلظت فسفر

## منابع

- ۱- بیابانکی ف. و حسین‌پور ع.ر. ۱۳۸۶. سینتیک آزاد شدن فسفر و همبستگی ضرایب مدل‌های سینتیک با برخی ویژگی‌های خاک و شاخص‌های گیاهی در تعدادی از خاک‌های همدان. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۱: ۴۹۱-۵۰۳.
- 2- Barrow N.J. 1978. The description of phosphate adsorption curves. *Journal of Soil Science*, 29: 447-462.
- 3- Barrow N.J., Hansen H.C., B. Hansen P.E., and Magid J. 2000. A note on the description of the kinetics of phosphate sorption. *European Journal of Soil Science*, 51: 531-535.
- 4- Bhattacharyya P., Datta S.C., and Dureja P. 2003. Interrelationship of pH organic acids and phosphorus concentration in soil solution of rhizosphere and non-rhizosphere of wheat and rice crops. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34: 231-245.
- 5- Chapman H.D. 1965. Cation exchange capacity. p. 891-901. In: C.A. Black (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- 6- Chen C.R., Condon L.M., Davis M.R., and Sherlock R.R. 2002. Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and radiata pine (*Pinus radiata* D. Don.). *Soil Biology and Biochemistry*, 34: 487-499.
- 7- Cooke I.J. 1966. Kinetic approach to the description of soil phosphate status. *Journal of Soil Science*, 17: 56-64.
- 8- 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. SSSA, Madison, WI.
- 9- Gorgin N., Fekri M., and Sadegh L. 2011. Impact of organic-matter application on phosphorus-desorption kinetics in two agricultural soils in southeastern Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42: 514-527.
- 10- Hinsinger P. 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil*, 237: 173-195.
- 11- Kuo S. 1996. Phosphorus. p. 869-920. In: D.L. Sparks (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3 chemical methods. SSSA, Madison, WI.
- 12- Li Y.F., Luo A.C., Wei X.H., and Yao X.G. 2008. Changes in phosphorus fractions pH and phosphatase activity in rhizosphere of two rice genotypes. *Pedosphere*, 18: 785-794.
- 13- Loepfert 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. SSSA, Madison, WI.
- 14- Marschner P., Solaiman Z.M., and Rengel Z. 2005. Growth phosphorus uptake and rhizosphere microbial community composition of a phosphorus-efficient wheat cultivar in soils differing in pH. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168: 343-351.
- 15- Marschner P., Solaiman Z., and Rengel Z. 2007. Brassica genotypes differ in growth, phosphorus uptake and rhizosphere properties under P-limiting conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 39: 87-98.
- 16- 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.
- 17- Morel C., and Hinsinger P. 1999. Root-induced modifications of the exchange of phosphate ion between soil solution and soil solid phase. *Plant and Soil*, 211: 103-110.
- 18- 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.
- 19- 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. SSSA, Madison, WI.
- 20- Nishanth D., and Biswas D.R. 2008. Kinetics of phosphorus and potassium release from rock phosphate and waste mica enriched compost and their effect on yield and nutrient uptake by wheat (*Triticum aestivum*). *Bio-resource Technology*, 99: 3342-3353.
- 21- Nuruzzaman M., Lambers H., Bolland M.D.A., and Veneklaas E.J. 2006. Distribution of carboxylates and acid phosphatase and depletion of different phosphorus fractions in the rhizosphere of a cereal and three grain legumes. *Plant and Soil*, 281: 109-12.
- 22- Rhoades J.D. 1996. Salinity Electrical conductivity and total dissolved solids. p. 417-437. In: D.L. Sparks (ed.) *Methods of Soil Analysis*. SSSA: Madison, WI.
- 23- 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.
- 24- 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.
- 25- Sharpley A.N., and Ahuja L.R. 1983. A diffusion interpretation of soil phosphorus desorption. *Journal of Soil Science*, 135 322- 326.

- 26- Sparks D.L. 1999. Kinetics and mechanisms of chemical reactions at the soil mineral/water interface. p. 135-191. In: D.L. Sparks (ed.) Soil Physical Chemistry, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- 27- StatSoft, Inc. 2010. STATISTICA (data analysis software system), Version 10. www. Statsoft.com.
- 28- Steffens D. 1994. Phosphorus release kinetics and extractable phosphorus after long-term fertilization. Soil Science Society of America Journal, 58: 1702-1708.
- 29- 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. SSSA, Madison, WI.
- 30- Toor G.S., and Bahl G.S. 1999. Kinetics of phosphate desorption from different soils as influenced by application of poultry manure and fertilizer phosphorus and its uptake by soybean. Bioresource Technology, 69: 117-121.



## The Rhizospheric Effects of Wheat (*Triticum aestivum* L.) on Phosphorus Release Kinetics

T. Raiesi<sup>1\*</sup> - A. Hosseinpur<sup>2</sup>

Received: 19-01-2013

Accepted: 25-08-2013

### Abstract

The objective of this research was to evaluate the rhizospheric effects of wheat on phosphorus (P) release kinetics in 10 calcareous soils under rhizobox conditions. The kinetics of P release in the bulk and the rhizosphere soils were determined by successive extraction with 0.5 M NaHCO<sub>3</sub> in a period of 2 to 840 h at 25 ± 1°C. The results of kinetics study showed that mean of released P after 840 h of extraction period in the rhizosphere soils (192 mg/kg) was significantly lower than the bulk soils (207 mg/kg). A plot of cumulative amount of P released from both the rhizosphere and the bulk soils showed a discontinuity in slope at 168 h. Thus, two equations were applied to segments of the total reaction time (2 to 168 and 168 to 840 h). Release kinetics of P from the rhizosphere and the bulk soils conformed fairly well to parabolic diffusion, simplified Elovich, power function and first order models in two segments. The correlation results showed that P released after 168 and P release rate constants of simplified Elovich, parabolic diffusion and first order equations in the rhizosphere and the bulk soils were significantly correlated ( $p \leq 0.05$ ) with wheat plant indices. In second segment, P release rate constants of Elovich, and parabolic diffusion equations in the rhizosphere and the bulk soils were significantly correlated with wheat plant indices ( $p \leq 0.1$ ). The results of this research indicated that wheat rhizosphere caused decrease of the P release rate and P release amount and release rate of P are important factors in supplying available P to plants.

**Keywords:** Rhizosphere, Plant indices, Successive extraction

---

1,2-PhD Student and Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University  
(\* - Corresponding Author Email: taraiesi@gmail.com)