

سینتیک آزاد شدن فسفر و همبستگی ضرایب مدل‌های سینتیکی با برخی ویژگی‌های خاک و شاخص‌های گیاهی در تعدادی از خاک‌های همدان

فرزانه السادات بیابانکی^{۱*} و علیرضا حسین پور^۲

(تاریخ دریافت: ۸۴/۷/۶؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۵/۹)

چکیده

در اکثر مناطق دنیا فسفر بعد از نیتروژن مهم‌ترین عنصر محدود کننده رشد محصولات کشاورزی می‌باشد. اطلاعات درباره سرعت آزاد شدن فسفر در خاک‌های همدان محدود است. هدف از این تحقیق مطالعه سرعت رهاسازی فسفر در ده نمونه از خاک‌های استان همدان به وسیله عصاره‌گیری مرحله‌ای با استفاده از بی کربنات سدیم $\text{pH}=8/5$ در مدت ۱۷۵۲ ساعت و همبستگی ثابت‌های سرعت معادلات سینتیکی با خصوصیات خاک و شاخص‌های گیاه ذرت بود. نتایج این پژوهش نشان داد رهاسازی فسفر از خاک‌ها در ابتدا سریع و سپس به آهستگی ادامه یافت. بعد از گذشت ۱۷۵۲ ساعت مقدار فسفر آزاد شده در خاک‌ها بین ۳۰۹ - ۵۸۶ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر بود. فسفر تجمیعی آزاد شده به وسیله شش مدل سینتیکی ارزیابی شد. نتایج تجزیه‌های آماری نشان داد که رهاسازی فسفر توسط معادلات پخشیدگی پارابولیکی، مرتبه اول و تابع نمایی به خوبی قابل توصیف بود. نتایج مطالعات همبستگی نشان داد که برخی ضرایب آزاد شدن فسفر از جمله شب و عرض از مبدأ معادلات مرتبه اول، انتشار پارابولیکی، تابع نمایی، و نیز مقادیر فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۱۷۵۲ ساعت با ویژگی‌های خاک مانند مقدار فسفر قابل دسترس اولیه، در صد کربنات کلسیم، شن و سلیت همبستگی معنی‌داری دارند. نتایج ارتباط شاخص‌های گیاهی با ضرایب سرعت معادلات سینتیکی نشان داد شب معادله مرتبه اول با شاخص‌های گیاهی همبستگی معنی‌داری نداشت. ثابت‌های معادلات انتشار پارابولیک، تابع نمایی و فسفر آزاد شده پس از ۱۷۵۲ ساعت همبستگی معنی‌داری با شاخص‌های گیاهی داشتند. نتایج این تحقیق نشان داد سرعت آزاد شدن فسفر در خاک‌ها متفاوت و فاکتور مهمی در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فسفر، آزاد سازی، معادلات سینتیکی، ذرت، همدان

مقدمه

بسیار متعددی است که آثار این عوامل همیشه توان می‌باشد به طوری که امکان مطالعه جداگانه آنها بسیار ضعیف است. فسفر در خاک واکنش‌های گوناگونی مانند جذب سطحی، رسوب، ثبیت و رهاسازی دارد. از جمله عوامل مؤثر بر واکنش‌های

فسفر یکی از عناصر غذایی پر نیاز موجودات زنده است (۱۲) که از نظر اهمیت غذایی در گیاهان پس از نیتروژن در درجه دوم قرار می‌گیرد. حلایلت و قابلیت جذب فسفر تابع عوامل

۱. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعالی سینا، همدان

۲. استادیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعالی سینا، همدان و در حال حاضر دانشیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: f.biabanki@yahoo.com

عصاره‌گیری با رزین در سال ۱۹۵۵ توسط آمر و همکاران (۱) و نیز در سال ۱۹۶۳ به وسیله کوک و هیسلوب (۲) مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از این روش‌ها چندین مطالعه در سال‌های بعد انجام شد تا این‌که در سال ۱۹۹۵ فریس و همکاران (۷) با استفاده از روش جدیدی سیتیک رهاسازی فسفات‌از خاک‌ها را مطالعه نمودند. این محققین از غشاها دیالیزی لوله‌ای آگشته به اکسید آهن (فریک) و اکسید آبدار (فری هیدرات) به عنوان مخزن جاذب فسفر با قدرت جذب نامحدود استفاده نمودند. لوکمن و همکاران (۱۶) به بررسی بلند مدت آزاد شدن فسفر با استفاده از اکسید آهن آبدار درون لوله‌های دیالیزی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که رهاسازی فسفر در ابتدا سریع و سپس به کندی انجام می‌شود. گارسیا و سوتزر (۸) به پیش‌بینی پارامترهای سیتیکی رهاسازی فسفر از خاک‌های شمال شرق اسپانیا اقدام نموده و در طی مطالعه خود به همبستگی بین این پارامترها و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها دست یافتند. مک داول و شارپلی (۱۸) به بررسی همبستگی سیتیک حلالیت و رهاسازی فسفر با غلظت فسفر آزمون خاک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که همبستگی معنی‌داری بین مقدار فسفر تجمعی آزاد شده از خاک و فسفر آزمون خاک وجود دارد.

معادلات متعددی برای توصیف سرعت رهاسازی عناصر در کانی‌های رسی و خاک استفاده شده است (۱۱ و ۱۲). این معادلات شامل معادله مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، الوریج ساده، انتشار پارabolیک وتابع نمایی می‌باشند.

مطالعه همبستگی بین پارامترهای آزاد سازی فسفر خاک‌ها با شاخص‌های گیاهی ویا ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها می‌تواند در توصیف وضعیت فسفر قابل استفاده خاک‌ها مفید باشد. اهداف انجام تحقیق حاضر عبارت‌اند از:

- ۱- مطالعه سیتیک رهاسازی فسفر قابل دسترس از خاک‌ها
- ۲- مقایسه معادلات سیتیکی و انتخاب بهترین معادله جهت توصیف آزاد شدن فسفر از خاک‌ها
- ۳- مطالعه همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها با ثابت‌های معادلات سیتیکی

فسفر در خاک زمان می‌باشد. برای درک اثرهای متقابل فسفر با ذرات خاک و پیش‌بینی سرنوشت آن، اطلاعاتی درباره سرعت واکنش اهمیت دارد (۲ و ۱۵). سرعت فراهم شدن فسفر برای گیاه از نظر تغذیه گیاه حائز اهمیت می‌باشد. بررسی سرعت واکنش‌ها و انجام مطالعات سیتیکی در خاک به سبب حضور انواع کانی‌ها و ترکیبات پیچیده آنها به مراتب دشوارتر از سیستم‌های حاوی یک کانی مشخص می‌باشد. لذا این گونه مطالعات در خاک‌ها کمتر انجام شده‌اند. درک سیتیک آزاد شدن فسفر از خاک‌ها می‌تواند در کاهش ورود فسفر به روان آب اهمیت داشته باشد (۲۴). غلظت پایین فسفر خاک به علت واکنش‌های قوی فسفات با تعدادی از فازهای جامد آلی وغیرآلی و کند بودن سرعت بسیاری از واکنش‌های آزاد سازی فسفر است. از این رو بررسی واکنش‌های جذب و رهاسازی فسفر در خاک دارای اهمیت است. وجود تعادل بین سطوح فسفر خاک برای کشاورزی و سطوح بی خطر فسفر برای محیط زیست الزامی می‌باشد. در این راستا شناخت کشاورز از سرعت و ظرفیت رهاسازی فسفر خاک اهمیت دارد چرا که نشان دهنده فسفر قابل دسترس گیاه خواهد بود (۵). از فواید دیگر مطالعات سیتیک رهاسازی فسفر این می‌باشد که نشان می‌دهد تمامی فسفر موجود در خاک ممکن است در زمان ژئولوژیکی به محلول خاک راه یابند ولی همین مقدار فسفر در زمان محدودی مانند دوره رشد گیاه قادر به وارد شدن به محلول نمی‌باشد.

رهاسازی فسفر از کلوئیدهای خاک یکی از فرایندهای کترول کننده جذب فسفر توسط ریشه‌ها و مؤثر در رشد گیاهان می‌باشد. بنابراین مطالعه سیتیک رهاسازی فسفر از خاک وسیله بسیار خوبی برای بررسی وضعیت فسفر می‌باشد (۲۱). مطالعات انجام شده در مورد سرعت آزاد شدن فسفر از خاک به سال‌های گذشته مربوط می‌شود. در بررسی رهاسازی فسفر روش‌های گوناگونی مورد استفاده قرار گرفته است که عصاره‌گیری یا پیکربنات در سال ۱۹۵۴ پایه‌گذاری شد (۲۰)، روش

جدول ۱. معادله‌های سیتیکی استفاده شده

معادله	مدل
$P_0 - P_t = a - K_d \cdot t$	معادله مرتبه صفر
$\ln(P_0 - P_t) = a - K_d \cdot t$	معادله مرتبه اول
$1/P_t = a + K_d \cdot t$	معادله مرتبه دوم
$P_t = a + b \ln t$	معادله الوریچ ساده شده
$P_t/P_0 = a + R \cdot t^{0.50}$	معادله پخشیدگی پارابولیک
$\ln P_t = \ln a + b \ln t$	معادله تابع نمایی

P_t^0 : فسفری که می‌تواند در حال تعادل آزاد شود.
 t : زمان
 a : عرض از مبدأ معادلات
 b, R, K_d : ضرایب سرعت معادلات سیتیکی

منظور یک گرم از هر خاک در لوله ساتنریفیوژ ریخته و ۲۰ میلی‌لیتر بی کربنات سدیم ۵٪ مولار که pH آن روی ۸/۵ تنظیم شده بود به آنها اضافه شد. نمونه‌ها برای ۲ تا ۱۷۵۲ ساعت در انکوباتور قرار داده شدند. در فواصل زمانی مشخص سوسپانسیون صاف و محلول رویی جمع آوری شد. سپس ۲۰ میلی‌لیتر محلول جدید اضافه و تکان دادن نمونه‌ها تکرار شد. فسفر نمونه‌ها به روش رنگ سنجی (۱۹) اندازه‌گیری شد. در پایان معادلات سیتیکی مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، الوریچ ساده، تابع نمایی و انتشار پارابولیکی (جدول ۱) بر مقدار تجمعی فسفر آزاد شده برآورد شد و بر اساس ضرایب تشخیص و اشتباه استاندارد برآورد معادله یا معادلاتی که قادر به توصیف آزاد شدن فسفر بودند انتخاب و ضرایب آنها برآورد شد.

اشتباه استاندارد برآورد (SE) با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$SE = \left(\frac{\sum (P_t - P_t^*)^2}{n - 2} \right)^{0.5}$$

که در آن:

P_t - غلظت فسفر آزاد شده در زمان t بر حسب mg kg^{-1} .

P_t^* - غلظت فسفر برآورده شده از مدل در زمان t بر حسب mg kg^{-1} و n تعداد نقاط آزمایشی است.

به منظور مطالعه همبستگی بین ویژگی‌های سیتیکی آزاد شدن فسفر و شاخص‌های گیاهی مطالعه گلدانی انجام شد. این

۴- مطالعه همبستگی بین شاخص‌های گیاه ذرت با ثابت‌های رهاسازی معادلات سیتیکی.

مواد و روش‌ها

در ابتدا بیست و سه نمونه خاک سطحی (عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری) با بیشترین پراکنش جغرافیایی در استان همدان جمع آوری شدند. پس از هوا خشک کردن و گذراندن نمونه‌ها از الک ۲ میلی‌متری درصد رس به روش هیدرومتر بایکاس (۹)، مقدار فسفر قابل استفاده به روش اولسن (۲۰) و درصد کربنات کلسیم به روش تیتراسیون برگشتی (۱۷) تعیین شدند. ده نمونه خاک که از نظر ویژگی‌های مذکور متنوع بودند، انتخاب شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آنها اندازه‌گیری شد. بافت خاک به روش هیدرومتر بایکاس با اعمال تصحیحات دمایی (۹)، pH خاک در عصاره ۲ به اخاک به آب مقطر به وسیله دستگاه pH متر مدل متراهم (۷۴۴)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۲ به اخاک به آب مقطر با هدایت سنج مدل متراهم (۷۱۲)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌ها به روش استات سدیم با pH=۷ (۲۵) در صد مواد آلی به روش اکسیداسیون تر (۲۸)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (۱۷)، فسفر قابل دسترس به روش اولسن عصاره‌گیری شده (۲۰) و به روش رنگ سنجی (۱۹) اندازه‌گیری شد. مطالعه سیتیک آزاد شدن فسفر به روش عصاره‌گیری متوالی (Successive extraction) انجام شد. به این

استفاده از روش رنگ سنجی (۱۹) تعیین شد. سپس شاخص‌های گیاهی شامل فسفر جذب شده توسط اندام هوایی، عملکرد نسبی و پاسخ محصول به کود فسفره با استفاده از روابط زیر تعیین گردید.

$$\text{غله} = \frac{\text{فسفر جذب شده توسط اندام هوایی}}{\text{عملکرد خشک}} \times \text{عملکرد خشک}$$

$$\begin{aligned} \text{غله} &= \frac{\text{پاسخ گیاه به کود فسفره}}{\text{عملکرد گیاه در تیمار کود داده نشده} - \text{عملکرد گیاه در تیمار کود داده شده}} \\ &= \frac{\text{عملکرد نسبی}}{(\text{عملکرد در تیمار کود داده شده} / \text{عملکرد در تیمار کود داده نشده})} \\ &\quad \text{در پایان ضرایب همبستگی مقدار تجمعی فسفر رها شده،} \\ &\quad \text{ضرایب معادلات سرعت با ویژگی‌های خاک و شاخص‌های} \\ &\quad \text{گیاهی با استفاده از نرم افزار SPSS تعیین گردید.} \end{aligned}$$

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که خاک‌های مورد مطالعه دارای دامنه گسترده‌ای از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی می‌باشند (جدول ۲). دامنه تغییرات درصد رس، سیلت و شن در خاک‌های مطالعه شده به ترتیب $53-53$ ، $36-36$ و $75-75$ می‌باشد. بافت خاک‌ها از رسی تالوم رسی شنی متغیر است. خاک‌های مطالعه شده آهکی با دامنه pH بین $7.7-7.7$ می‌باشند. دامنه تغییرات قابلیت هدایت الکتریکی خاک‌ها $39-50$ دسی زیمنس بر متر، دامنه تغییرات گنجایش تبادل کاتیونی $26-26$ سانتی مول بار در کیلوگرم، دامنه تغییرات ماده آلی $17-63$ درصد و دامنه تغییرات کربنات کلسیم معادل خاک‌ها بین $2-22$ درصد و دامنه تغییرات فسفر عصاره‌گیری شده با اولسن بین $49-50$ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد (جدول ۲). بیشترین و کمترین مقدار فسفر قابل عصاره‌گیری با روش اولسن به ترتیب در خاک شماره ۳ و خاک شماره ۱۰ می‌باشد.

در جدول ۳ مقدار فسفر آزاد شده از خاک‌های مختلف به

آزمایش با استفاده از گیاه ذرت (*Zea mays*) واریته سینگل کراس ۷۰۴ انجام شد. قبل از کاشت، بذرهای ذرت به خوبی با قارچ کش بنویل ضد عفونی شده وجهت جوانه زنی به مدت چند روز در رطوبت مناسب و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. سه بذر جوانه زده در گلدان‌های پلاستیکی حاوی ۳ کیلوگرم خاک عبور یافته از الک ۸ میلی‌متری در عمق ۳ سانتی‌متری کشت شدند. قبل از ریختن خاک‌ها درون گلدان‌ها برای ایجاد تهویه و خروج آب اضافی منافذی در کف گلدان ایجاد و چند عدد سنگریزه در کف هر گلدان قرار داده شد. قبل از پرکردن گلدان‌ها کودهای لازم به خاک هر گلدان اضافه شدند. بدین منظور ابتدا مقدار کود با کمی خاک مخلوط و سپس مخلوط خاک و کود به خاک گلدان‌ها اضافه شد. در این آزمایش از دو تیمار صفر و 200 میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک استفاده شد. نظر به این‌که خاک گلدان‌ها باقیستی از نظر سایر عناصر غذایی کمبودی نداشته باشد 5 میلی‌گرم در کیلوگرم پتابسیم به صورت $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ، 200 میلی‌گرم در کیلوگرم پتابسیم به صورت K_2SO_4 و 5 میلی‌گرم در کیلوگرم آهن به صورت سکوسترین آهن به خاک همه گلدان‌ها اضافه شد. کود نیتروژن در دو مرحله به ترتیب یک هفته پس از کاشت و شش هفته پس از کاشت بذرهای ذرت به مقدار 50 و 100 میلی‌گرم در کیلوگرم به خاک‌ها به صورت حل کردن در آب به گلدان‌ها افزوده شد. در طول فصل رشد مراقبت‌های لازم انجام شد. آبیاری با آب معمولی و یک روز در میان صورت گرفت. پس از گذشت 90 روز اندام هوایی گیاهان از یک سانتی‌متری بالای خاک برداشت و به داخل پاکت انتقال داده شدند. سپس نمونه‌ها در دمای 70 درجه سانتی‌گراد خشک شدند. پس از توزین، نمونه‌ها آسیاب شده و غله از تغییرات فسفر در آنها اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری فسفر در بافت گیاهی ابتدا یک گرم نمونه آسیاب شده در کروزه چینی ریخته شد و به مدت 2 ساعت در کوره الکتریکی با دمای 50°C درجه سانتی‌گراد خاکستر گردید. سپس 10 میلی‌لیتر اسید کلریدریک دو نرمال به این خاکستر اضافه و حرارت داده شد. سپس نمونه‌ها صاف گردید (۱۴). غله از تغییرات فسفر عصاره‌ها با

جدول ۲. برخی از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های مطالعه شده

شناختی	سینت	٪	رسن	آلی	ماده کربنات کلسیم	معدال استخراج	mgkg⁻¹	Cmolkg⁻¹	dsm⁻¹	قابلیت هدایت		ب-هاش	کاتیونی کلچاپش تبدیل	فسفور قابل استخراج	mgkg⁻¹	٪	٪	نحوه	محل نمونه برداری	شماره خاک		
										کلچاپش	تبدیل											
۴۸/۷	۲۱/۲	۳۰/۱	۱/۲۵	۱/۰	۳۴/۹	۱/۵	۱/۵/۹	۷/۱	۰/۱۱۴	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۵	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	موشی جین	۱
۵۰/۵	۲۱/۲	۲۸/۳	۱/۳۵	۰/۵	۴۹/۱	۰/۵	۱/۹/۹	۷/۰/۳	۰/۰/۹۹	۰/۰/۵	۰/۰/۵	۰/۰/۵	۰/۰/۵	۰/۰/۵	۰/۰/۵	۰/۰/۵	۰/۰/۵	۰/۰/۵	۰/۰/۵	۰/۰/۵	بهار	۲
۵۶/۸	۱۶/۲	۱۶/۰	۰/۷۷	۰/۷	۴۴/۱	۰/۷	۰/۴/۹	۰/۰/۴	۰/۰/۱۶	۰/۰/۴	۰/۰/۴	۰/۰/۴	۰/۰/۴	۰/۰/۴	۰/۰/۴	۰/۰/۴	۰/۰/۴	۰/۰/۴	۰/۰/۴	۰/۰/۴	کنج تپه	۳
۲۹/۳	۲۳/۸	۳۶/۹	۰/۱۲۷	۰/۱۲۸	۲۳/۱	۰/۱۲۸	۰/۲۲/۳	۰/۰/۶	۰/۰/۲۱	۰/۰/۶	۰/۰/۶	۰/۰/۶	۰/۰/۶	۰/۰/۶	۰/۰/۶	۰/۰/۶	۰/۰/۶	۰/۰/۶	۰/۰/۶	۰/۰/۶	سلیمان آباد	۴
۱۴/۴	۳۶/۳	۲۹/۳	۰/۱۷۲	۰/۱۷۲	۱۵/۰	۰/۱۷۰	۰/۳۰/۰	۰/۰/۱	۰/۰/۳۰	۰/۰/۱	۰/۰/۱	۰/۰/۱	۰/۰/۱	۰/۰/۱	۰/۰/۱	۰/۰/۱	۰/۰/۱	۰/۰/۱	۰/۰/۱	۰/۰/۱	دستجرد ۱	۵
۴۲/۵	۲۶/۳	۳۱/۲	۰/۰/۶۵	۰/۰/۶۵	۹/۰	۰/۰/۵	۰/۱۰/۴	۰/۰/۹	۰/۰/۱۵	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	۰/۰/۹	دستجرد ۲	۶
۳۷/۳	۳۱/۳	۳۱/۴	۰/۰/۸۲	۰/۰/۸۲	۱۰/۰	۰/۱۷/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۱۷	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	دستجرد ۳	۷
۱۸/۹	۳۶/۳	۴۴/۸	۰/۱۰۱	۰/۱۰۱	۲۰/۰	۰/۱۹/۲	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	لهجه جین	۸
۱۵/۶	۳۱/۳	۵۳/۱	۰/۰/۸۹	۰/۰/۸۹	۲۲/۰	۰/۱۹/۶	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	جاده غار علیصدر	۹
۷۵/۷	۱۱/۳	۱۳/۰	۰/۰/۶۳	۰/۰/۶۳	۱/۰	۰/۳۸/۲	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	۰/۰/۰	یکن آباد	۱۰

جدول ۳. فسفر عصارة گیری شده از خاک های مورد مطالعه در زمان های مختلف (میلی گرم بر کیلو گرم)

نام خاک	زمان های عصارة گیری (ساعت)											
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱۷/۰۱	۱۵۸۴	۱۴۱۶	۱۲۴۸	۱۰۸۰	۹۱۲	۷۴۴	۵۰۸	۳۶۰	۲۴۰	۱۶۸	۱۴۴	۱۲۰
۴۳/۹	۴۰۴	۳۹۷	۳۷۱	۳۵۰	۳۲۹	۳۰۷	۲۸۲	۲۵۰	۲۱۷	۲۱۰	۱۹۲	۱۷۲
۵۸/۶	۵۳۷	۵۲۱	۴۹۰	۴۶۸	۴۴۰	۴۲۶	۴۱۳	۳۹۳	۳۶۷	۳۴۶	۳۲۷	۳۰۰
۵۲/۳	۴۷۸	۴۶۳	۴۴۰	۴۲۱	۳۹۸	۳۷۸	۳۵۸	۳۲۲	۲۸۷	۲۳۰	۲۰۹	۱۹۰
۴۱/۰	۳۸/۶	۳۶/۹	۳۲/۹	۳۰/۱	۲۸/۵	۲۷/۳	۲۶/۰	۲۳/۲	۲۰/۵	۱۸/۳	۱۶/۴	۱۸
۴۲/۶	۳۰/۱	۲۸/۳	۲۳/۰	۲۰/۶	۱۸/۰	۱۷/۰	۱۵/۳	۱۳/۰	۱۱/۷	۱۰/۲	۹/۳	۷/۳
۳۰/۹	۲۹/۳	۲۸/۲	۲۷/۰	۲۵/۱	۲۲/۲	۲۰/۲	۱۹/۷	۱۷/۰	۱۵/۰	۱۴/۰	۱۲/۰	۹/۰
۳۲/۷	۳۰/۸	۲۹/۵	۲۸/۸	۲۶/۰	۲۳/۶	۲۱/۰	۲۰/۰	۱۸/۹	۱۶/۰	۱۴/۱	۱۲/۱	۹/۲
۳۸/۹	۳۵/۱	۳۴/۱	۳۱/۸	۳۰/۳	۲۸/۲	۲۶/۶	۲۴/۶	۲۲/۹	۱۹/۷	۱۶/۶	۱۳/۸	۱۰/۲
۳۱/۸	۲۹/۷	۲۷/۹	۲۶/۲	۲۴/۹	۲۲/۱	۲۰/۷	۱۹/۹	۱۷/۷	۱۴/۷	۱۲/۲	۱۰/۰	۷/۸
۴۸/۱	۴۴/۱	۴۳/۲	۴۱/۲	۳۹/۳	۳۷/۱	۳۴/۷	۳۳/۵	۳۲/۲	۲۹/۱	۲۶/۰	۲۳/۳	۱۹/۰

می باشند. اما قسمتی از فسفر خاک آن چنان قوی پیوند شده است که عملاً به صورت غیر قابل برگشت و تثبیت شده می باشد. رهاسازی بلند مدت فسفر از خاک، با استفاده از دو مخزن در خاک توصیف می شود: مخزن اول قابل دسترس و مخزن دوم شدیداً تثبیت شده (۱۶). به عبارت دیگر، مخزن هایی با ظرفیت رهاسازی سریع و آهسته. رهاسازی سریع فسفر به پیوندهای اولیه فسفر در سطح ذرات که در معرض مستقیم فاز محلول می باشند، مربوط می شود. بسته به نوع خاک، درصد فسفر با رهاسازی سریع متفاوت است. در مطالعه ای که توسط لوکمن و همکاران (۱۶) انجام گرفت این معادل ۲۲ درصد به دست آمد. البته زمان تماس بین فسفر و خاک نیز نقش مهمی در رابطه با رهاسازی فسفر دارد. زمان طولانی تعادل بین فسفر و خاک، منجر به پخشیدگی فسفر به سمت اکسیدها و هیدروکسیدهای فلزی خواهد شد (۱۶).

شش معادله سیتیکی شامل معادله مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، الوریج ساده شده، پخشیدگی پارابولیک وتابع نمایی برای بررسی توصیف رهاسازی فسفر مورد استفاده قرار گرفتند. ضرایب تشخیص و خطای استاندارد برآورده معادلات سیتیکی به کار گرفته شده برای توصیف سرعت آزاد شدن فسفر در جدول ۴ نشان داده شده است. معادلاتی که ضریب تشخیص بالا و خطای استاندارد برآورده کم داشته باشند سرعت آزاد شدن فسفر را بهتر توصیف می کنند. معادلات مرتبه صفر والوریج ساده با وجود بالا بودن ضریب تشخیص به دلیل بالا بودن خطای استاندارد برآورده و معادله مرتبه دوم به دلیل کم بودن ضریب تشخیص نمی توانند سرعت آزاد شدن فسفر را به خوبی توضیح دهند. معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک وتابع نمایی به دلیل بالا بودن ضرایب تشخیص و پایین بودن خطای استاندارد برآورده می توانند سرعت آزاد شدن فسفر را به خوبی توصیف کنند (جدول ۴). ضرایب این معادلات در خاک های مطالعه شده در جدول ۵ نشان داده است.

هم خوانی سرعت آزاد شدن فسفر با معادله مرتبه اول و پخشیدگی پارابولیک نشان می دهد که آزاد شدن فسفر احتمالاً

روش عصاره گیری مرحله ای با بی کربنات سدیم با توجه به زمان نشان داده شده است. سرعت آزاد شدن فسفر در کلیه خاک ها تا مرحله نهم نمونه برداری (۱۶۸ ساعت پس از شروع آزمایش) بالا بوده و پس از این مرحله، رهاسازی با سرعت کمتری ادامه پیدا کرده است. مشابه این نتایج توسط پژوهشگران دیگر گزارش شده است (۶، ۱۰ و ۱۶). مقدار فسفر آزاد شده در مراحل اولیه عصاره گیری در خاک های مختلف متفاوت می باشد به طوری که ۱۶۸ ساعت پس از شروع آزمایش، بیشترین مقدار فسفر از خاک شماره ۲ (۲۹۶ میلی گرم در کیلو گرم) و کمترین مقدار آن از خاک شماره ۹ (۱۰۵ میلی گرم در کیلو گرم) آزاد شد (جدول ۳). تقریباً در تمام خاک ها تا مرحله نهم نمونه برداری به طور میانگین حدود ۴۰ درصد از کل فسفر استخراج شده خارج شده است. اختلاف مقادیر فسفر رها شده از خاک ها را می توان به تفاوت اشکال فسفر موجود در این خاک ها نسبت داد. فسفر در خاک به حالت های رسوب یافته، حبس شده توسط اکسیدها و هیدروکسیدها، جذب سطحی شده بر سطوح اکسیدها موجود می باشد (۱۲).

علاوه بر تفاوت فسفر آزاد شده در مراحل اولیه، مقدار فسفر آزاد شده در مراحل کند بعدی نیز متفاوت است (جدول ۳). مقدار تجمعی فسفر رها شده پس از ۱۷۵۲ ساعت نشان می دهد که در خاک هایی با کمترین فسفر قابل استفاده در ابتدای عصاره گیری فسفر آزاد شده س از ۱۷۵۲ ساعت نیز کمترین مقدار بوده است ولی در خاک هایی که فسفر قابل استفاده در ابتدای عصاره گیری بیشترین مقدار بوده (خاک های ۲ و ۳) مقدار فسفر آزاد شده بیشترین مقدار نبوده است. این نتیجه نشان می دهد که در قابلیت جذب فسفر علاوه بر مقدار فسفر قابل جذب، سرعت آزاد شدن فسفر را نیز باید در نظر گرفت. زمان لازم برای این که یون های فسفات فاز جامد را ترک کرده و وارد محلول خاک شوند به نوع خاک و ویژگی های آن بستگی دارد. دامنه تغییرات مقدار فسفر آزاد شده از این خاک ها پس از ۱۷۵۲ ساعت بین ۳۰۹-۵۸۶ میلی گرم در کیلو گرم است. از نظر تئوری، همه فسفر موجود در خاک قابل رهاسازی

جدول ۴. ضرایب تشخیص و خطای استاندارد برآورده مدل‌های سیتیکی استفاده شده

معادله تابع نمایی		معادله پخشیدگی پارabolیک		معادله الوویچ ساده شده		معادله مرتبه دوم		معادله مرتبه اول		معادله مرتبه صفر		شماره خاک
r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	
۰/۹۷	۰/۱۲	۰/۹۷	۰/۰۴	۰/۹۳	۳۱/۰	۰/۲۳	۰/۰۰۶	۰/۹۸	۰/۱۱	۰/۸۳	۰/۰۹	۱
۰/۹۸	۰/۰۸	۰/۹۷	۰/۰۴	۰/۹۳	۴۰/۰	۰/۲۷	۰/۰۰۴	۰/۹۷	۰/۱۳	۰/۸۲	۶۵/۸	۲
۰/۹۸	۰/۰۸	۰/۹۸	۰/۰۴	۰/۹۱	۴۵/۹	۰/۲۵	۰/۰۰۶	۰/۹۸	۰/۰۹	۰/۸۵	۵۹/۹	۳
۰/۹۹	۰/۰۸	۰/۹۹	۰/۰۳	۰/۸۸	۴۱/۸	۰/۲۵	۰/۰۱۰	۰/۹۹	۰/۰۷	۰/۸۷	۴۳/۲	۴
۰/۹۸	۰/۱۲	۰/۹۹	۰/۰۲	۰/۸۴	۵۴/۳	۰/۲۱	۰/۰۱۷	۰/۹۹	۰/۰۶	۰/۹۰	۴۲/۱	۵
۰/۹۹	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۰۲	۰/۸۴	۳۸/۱	۰/۳۰	۰/۰۱۳	۰/۹۸	۰/۰۹	۰/۹۰	۳۰/۱	۶
۰/۹۷	۰/۱۵	۰/۹۹	۰/۰۳	۰/۸۷	۳۶/۵	۰/۱۷	۰/۰۲۷	۰/۹۹	۰/۰۸	۰/۸۸	۳۴/۹	۷
۰/۹۹	۰/۰۹	۰/۹۸	۰/۰۳	۰/۸۷	۴۴/۸	۰/۲۴	۰/۰۱۵	۰/۹۹	۰/۰۸	۰/۸۸	۴۲/۹	۸
۰/۹۷	۰/۱۷	۰/۹۹	۰/۰۲	۰/۸۵	۳۹/۲	۰/۱۴	۰/۰۳۹	۰/۹۹	۰/۰۵۶	۰/۸۹	۳۳/۲	۹
۰/۹۸	۰/۰۹	۰/۹۹	۰/۰۴	۰/۹۱	۴۳/۲	۰/۲۴	۰/۰۰۸	۰/۹۹	۰/۰۸۳	۰/۸۵	۵۶/۰	۱۰

جدول ۵. ثابت‌های معادلات سیتیکی در خاک‌های مطالعه شده

معادله تابع نمایی		معادله پخشیدگی پارabolیک		معادله مرتبه اول		شماره خاک
b	Lna	$R \times 10^{-3}$	a	$Kd \times 10^{-3}$	a	
۰/۳۴	۳/۵۴	۲/۱۲	۰/۱۶۷	۱/۷	۵/۸۰	۱
۰/۳۳	۳/۸۸	۲/۰۸	۰/۱۷۱	۱/۶	۶/۰۹	۲
۰/۳۹	۳/۳۹	۲/۲۴	۰/۱۱۲	۱/۶	۶/۰۴	۳
۰/۴۲	۲/۹۰	۲/۳۰	۰/۰۷۳	۱/۶	۵/۸۵	۴
۰/۴۹	۲/۴۱	۲/۴۴	۰/۰۰۹	۱/۶	۵/۹۸	۵
۰/۴۴	۲/۴۱	۲/۴۰	۰/۰۲۹	۱/۷	۵/۶۵	۶
۰/۴۹	۲/۱۶	۲/۳۹	۰/۰۳۵۲	۱/۶	۵/۶۷	۷
۰/۴۷	۲/۴۸	۲/۴۱	۰/۰۳۵	۱/۶	۵/۸۴	۸
۰/۵۳	۱/۸۵	۲/۴۶	۰/۰۰۸	۱/۶	۵/۶۷	۹
۰/۴۰	۳/۱۹	۲/۲۹	۰/۱۰۲	۱/۷	۵/۹۸	۱۰

تغییرات ضریب سرعت معادله تابع نمایی بین ۰/۵۳- ۰/۳۳- بر ساعت می‌باشد که بیشترین مقدار در خاک شماره ۹ و کمترین در خاک شماره ۲ می‌باشد.

معادلات مرتبه صفر، مرتبه دوم و الوویچ ساده شده برای تفسیر داده‌های رهاسازی فسفر مناسب نبودند. از این رو برای استفاده از این معادلات برای توصیف رهاسازی فسفر، داده‌ها به دو بخش تقسیم شدند: بخش اول شامل فسفر آزاد شده تا ۱۶۸

یک فرایند پخشیدگی می‌باشد. دامنه تغییرات ضریب سرعت رهاسازی فسفر در معادله مرتبه اول بین $1/6 \times 10^{-3}$ تا $1/7 \times 10^{-3}$ بر ساعت می‌باشد. خاک‌های ۱، ۶ و ۱۰ دارای بیشترین ضریب سرعت رهاسازی هستند. ضریب سرعت رهاسازی معادله پخشیدگی پارabolیک از $2/08 \times 10^{-2}$ تا $2/46 \times 10^{-2}$ بر محدوده ساعت متغیر بود. خاک شماره ۹ بیشترین و خاک شماره ۲ کمترین ضریب سرعت را نشان می‌دهند. دامنه

جدول ۶. ضرایب تشخیص و خطای استاندارد برآورد معادلات سیتیکی دوبخشی در خاک‌های استفاده شده

بخش دوم								بخش اول								شماره خاک	
معادله الویج ساده شده		معادله مرتبه صفر		معادله مرتبه دوم		معادله الویج ساده شده		معادله مرتبه صفر		معادله مرتبه دوم		معادله الویج ساده شده		معادله مرتبه صفر			
r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE	r^2	SE		
۰/۹۹	۵/۶	۰/۸۴	۰/۰۰۲	۰/۹۵	۱۴/۹	۰/۹۹	۷/۰	۰/۴۱	۰/۰۰۸	۰/۸۷	۲۴/۹	۱	۰/۹۹	۵/۶	۰/۸۴	۰/۰۰۲	
۰/۹۸	۱۰/۸	۰/۸۹	۰/۰۰۱	۰/۹۷	۱۳/۳	۰/۹۸	۱۲/۷	۰/۵۰	۰/۰۰۴	۰/۹۰	۲۹/۴	۲	۰/۹۹	۶/۴	۰/۸۱	۰/۰۰۲	
۰/۹۹	۵/۹	۰/۷۷	۰/۰۰۵	۰/۹۴	۱۹/۱	۰/۹۳	۱۱/۷	۰/۴۰	۰/۰۲۱	۰/۹۵	۱۰/۰	۵	۰/۹۹	۵/۵	۰/۸۰	۰/۰۰۴	
۰/۹۹	۵/۹	۰/۷۷	۰/۰۰۵	۰/۹۴	۱۹/۱	۰/۹۳	۱۱/۷	۰/۴۰	۰/۰۲۱	۰/۹۵	۱۰/۰	۵	۰/۹۹	۵/۶	۰/۷۹	۰/۰۰۶	
۰/۹۹	۵/۶	۰/۷۹	۰/۰۰۶	۰/۹۵	۱۲/۸	۰/۹۳	۸/۷	۰/۵۵	۰/۰۱۴	۰/۹۴	۷/۶	۶	۰/۹۸	۶/۶	۰/۸۲	۰/۰۰۵	
۰/۹۹	۵/۸	۰/۷۹	۰/۰۰۴	۰/۹۵	۱۵/۴	۰/۹۳	۱۱/۶	۰/۴۷	۰/۰۱۷	۰/۹۵	۱۰/۲	۸	۰/۹۹	۷/۴	۰/۷۵	۰/۰۰۷	
۰/۹۹	۵/۱	۰/۸۱	۰/۰۰۳	۰/۹۳	۲۰/۰	۰/۹۷	۱۱/۶	۰/۴۷	۰/۰۰۹	۰/۹۲	۱۹/۶	۱۰	۰/۹۹	۵/۱	۰/۸۱	۰/۰۰۳	

جدول ۷. ثابت‌های معادلات سیتیکی دو بخشی در خاک‌های مطالعه شده

بخش دوم				بخش اول				شماره خاک	
معادله الویج ساده شده		معادله مرتبه صفر		معادله الویج ساده شده		معادله مرتبه صفر			
a	b	a	K_d	a	b	a	K_d		
۴/۷	۰/۰۰۹	۲۰۷	۰/۱۲۵	۲۷	۰/۰۲۳	۲۶۸	۰/۹۵۹	۱	
۴/۴	۰/۰۰۶	۲۸۶	۰/۱۲۰	۴۰	۰/۰۱۹	۴۹۴	۱/۳۴۱	۲	
۳/۱	۰/۰۰۷	۲۶۶	۰/۱۶۰	۲۹	۰/۰۲۳	۴۶۰	۱/۰۶۱	۳	
۳/۲	۰/۰۰۸	۲۲۹	۰/۱۳۸	۱۸	۰/۰۲۶	۳۶۹	۰/۷۷۰	۴	
۲/۲	۰/۰۰۸	۲۳۵	۰/۱۴۲	۱۳	۰/۰۳۱	۳۵۹	۰/۶۴۱	۵	
۱/۶	۰/۰۱۲	۱۶۵	۰/۰۹۹	۱۱	۰/۰۴۵	۲۷۷	۰/۴۷۹	۶	
۱/۹	۰/۰۱۱	۱۷۶	۰/۱۰۵	۱۱	۰/۰۳۵	۳۰۵	۰/۵۹۲	۷	
۲/۰	۰/۰۰۸	۲۱۹	۰/۱۳۲	۱۲	۰/۰۲۹	۳۵۹	۰/۶۴۸	۸	
۱/۳	۰/۰۰۹	۱۹۳	۰/۱۱۷	۸	۰/۰۴۵	۲۹۹	۰/۵۲۲	۹	
۲/۵	۰/۰۰۶	۲۴۷	۰/۱۵۲	۲۳	۰/۰۲۶	۴۲۷	۰/۹۸۳	۱۰	

نشان داده شده است. در بخش اول (تا ۱۶۸ ساعت پس از شروع آزمایش)، ثابت سرعت رهاسازی معادله مرتبه صفر از ۰/۴۷ تا ۱/۳۴ بر ساعت متغیر می‌باشد. کمترین مقدار آن در خاک شماره ۶ و بیشترین مقدار آن در خاک شماره ۲ می‌باشد (جدول ۷). در بخش دوم، ثابت سرعت رهاسازی از ۰/۰۹ تا ۰/۱۶ بر ساعت متغیر می‌باشد که نشان می‌دهد سرعت رهاسازی در بخش دوم

ساعت پس از شروع آزمایش و بخش دوم ۱۶۸ تا ۱۷۵۲ ساعت پس از شروع آزمایش را شامل می‌شوند. ضرایب تشخیص و خطای استاندارد برآورد این معادلات در دو بخش در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که معادلات مرتبه صفر والویج در بخش اول و بخش دوم می‌توانند برای توصیف آزاد شدن فسفر استفاده شوند. ضرایب این معادلات در جدول ۷

دارد (جدول ۸). شارپلی گزارش نمود که هم‌بستگی معنی‌داری بین مقدار کربنات کلسیم با ثابت‌های رهاسازی معادلات سیتیکی وجود دارد (۲۳) وی هم‌چنین بیان داشت که مقادیر کربنات کلسیم، کربن آلی و رس خاک شاخصی از سطح ویژه واکنش پذیر با فسفر می‌باشد. گارسیا و استورز گزارش کردند که شبیع معادله مرتبه اول هم‌بستگی معنی‌داری با هیچ کدام از ویژگی‌های خاک نداشت (۸). در تحقیق حاضر شبیع معادله مرتبه اول فقط با گنجایش تبادل کاتیونی و درصد کربنات کلسیم معادل هم‌بستگی معنی‌داری داشت (جدول ۸). مقدار فسفر قابل استفاده اولیه با شبیع معادلات تابع نمایی، پخشیدگی پارابولیک، مرتبه صفر در بخش اول رهاسازی و عرض از مبدأ معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی، مرتبه صفردر هر دو بخش اول و دوم و ثابت‌های معادله الوویچ ساده و مقدار فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۱۷۵۲ ساعت هم‌بستگی معنی‌داری دارد (جدول ۸).

نتایج کشت گلدانی در جدول ۹ نشان داده شده است. در تیمار شاهد عملکرد خشک اندام هوایی ذرت در بین خاک‌های مورد مطالعه از ۱۵ تا ۲۴ گرم در گلدان و در تیمار کود داده شده از ۲۳ تا ۳۱ گرم در گلدان تغییر می‌کند. در تمامی خاک‌ها عملکرد خشک بخش هوایی در تیمار کود داده شده نسبت به تیمار شاهد بیشتر می‌باشد. تأثیر کوددهی فسفر بر افزایش عملکرد به عوامل گوناگونی از جمله مقدار فسفر قابل استفاده برای گیاه بستگی دارد. دامنه تغییرات غلظت فسفر در اندام هوایی گیاه ذرت در تیمار شاهد در خاک‌های مختلف بین ۱۷۱۲ تا ۱۸۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم و در تیمار کود داده شده بین ۷۳۶ تا ۵۱ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد. فسفر جذب شده توسط گیاه ذرت در تیمار شاهد از ۹ تا ۴۱ میلی‌گرم در گلدان و تیمار کود داده شده از ۱۲ تا ۱۲ میلی‌گرم در گلدان متغیر می‌باشد (جدول ۹).

ضرایب هم‌بستگی بین ویژگی‌های آزاد شدن فسفر و برخی شاخص‌های گیاهی در جدول ۱۰ نشان داده شده است. با بررسی ارتباط بین ثابت‌های معادلات آزاد شدن فسفر و شاخص‌های گیاهی می‌توان به اثر رهاسازی فسفر در رشد گیاه پی‌برد. عملکرد خشک اندام هوایی با عرض از مبدأ معادلات مرتبه اول،

نسبت به بخش اول کمتر می‌باشد. در این بخش کمترین و بیشترین ثابت سرعت به ترتیب در خاک شماره ۶ و شماره ۳ وجود دارد. در بخش اول، ثابت سرعت در معادله الوویچ از ۰/۰۱۹ تا ۰/۰۴۵٪ متغیر می‌باشد. کمترین مقدار آن در خاک شماره ۲ و بیشترین مقدار آن در خاک‌های شماره ۹ و ۶٪ می‌باشد (جدول ۷). در بخش دوم، ثابت سرعت در معادله الوویچ از ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۱۲٪ متغیر می‌باشد. در این بخش کمترین ثابت سرعت در خاک‌های شماره ۲ و ۰/۰۱۰٪ بیشترین مقدار آن در خاک شماره ۶ وجود دارد.

ضرایب هم‌بستگی بین ثابت‌های معادلات سیتیکی و ویژگی‌های خاک در جدول ۸ نشان داده شده است. بین اجزای معادلات مربوط به آزاد شدن فسفر با درصد رس هم‌بستگی معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۸). علت این امر ممکن است تفاوت در نوع کانی‌های کنترل کننده حلایت فسفر در این خاک‌ها باشد. دلال در مطالعه خود دریافت که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر تثیت فسفر مانند درصد سلیت، رس و مقدار ماده آلی هم‌بستگی معنی‌داری با مقدار فسفر آزاد شده خاک‌ها نداشت (۴). هم‌بستگی معنی‌داری بین درصد سلیت خاک‌های مورد مطالعه و ثابت سرعت معادله الوویچ ساده شده در بخش اول رهاسازی مشاهده شد. هم‌بستگی معنی‌داری بین درصد شن و شبیع معادله مرتبه صفر در بخش اول، پخشیدگی پارابولیک و تابع نمایی و عرض از مبدأ معادلات تابع نمایی و پخشیدگی پارابولیک وجود داشت. pH این خاک‌ها با شبیع و عرض از مبدأ معادلات پخشیدگی پارابولیک و تابع نمایی هم‌بستگی معنی‌داری داشت. بین قابلیت هدایت الکتریکی و ضرایب معادلات آزاد سازی فسفر رابطه معنی‌داری وجود نداشت. بین گنجایش تبادل کاتیونی و ثابت سرعت رهاسازی معادله مرتبه اول رابطه معنی‌داری مشاهده شد (جدول ۸). درصد ماده آلی با هیچ کدام از ثابت‌های معادلات رهاسازی فسفر هم‌بستگی معنی‌دار پنداشت. این نتایج اثراکم ماده آلی را در تامین فسفر قابل جذب بیان می‌کند. مقدار کربنات کلسیم معادل هم‌بستگی معنی‌داری با عرض از مبدأ معادلات پخشیدگی پارابولیک و تابع نمایی و شبیع معادلات مرتبه اول و تابع نمایی

جدول ۸. ضرایب همبستگی بین ثابت‌های مادلات سپتیکی و برخی ویژگی‌های فزیکی و شیمیایی خاک‌های مطالعه شده

فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ ساعت	فسفور آزاد شده پس از ۷۵۲ ساعت	پخش اول						معادله مرتبه اول					
		b	a	b	a	b	a	R	a	b	a	b	a
-۰/۵۳**	-۰/۵۸**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۴۹**	-۰/۴۹**	-۰/۴۹**	-۰/۴۹**	-۰/۴۹**	-۰/۴۹**
-۰/۵۸**	-۰/۵۷*	-۰/۵۷*	-۰/۵۷*	-۰/۵۷*	-۰/۵۷*	-۰/۵۷*	-۰/۵۷*	-۰/۵۷*	-۰/۵۷*	-۰/۵۷*	-۰/۵۷*	-۰/۵۷*	-۰/۵۷*
-۰/۵۰*	-۰/۵۹*	-۰/۵۹*	-۰/۵۹*	-۰/۵۹*	-۰/۵۹*	-۰/۵۹*	-۰/۵۹*	-۰/۵۸*	-۰/۵۸*	-۰/۵۸*	-۰/۵۸*	-۰/۵۸*	-۰/۵۸*
-۰/۵۰*	-۰/۵۹*	-۰/۵۹*	-۰/۵۹*	-۰/۵۹*	-۰/۵۹*	-۰/۵۹*	-۰/۵۹*	-۰/۵۸*	-۰/۵۸*	-۰/۵۸*	-۰/۵۸*	-۰/۵۸*	-۰/۵۸*
-۰/۳۸**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**	-۰/۵۷**
-۰/۶۰*	-۰/۶۰**	-۰/۶۰**	-۰/۶۰**	-۰/۶۰**	-۰/۶۰**	-۰/۶۰**	-۰/۶۰**	-۰/۶۰**	-۰/۶۰**	-۰/۶۰**	-۰/۶۰**	-۰/۶۰**	-۰/۶۰**
-۰/۴۴**	-۰/۵۳**	-۰/۴۰**	-۰/۴۰**	-۰/۴۰**	-۰/۴۰**	-۰/۴۰**	-۰/۴۰**	-۰/۴۳**	-۰/۴۳**	-۰/۴۳**	-۰/۴۳**	-۰/۴۳**	-۰/۴۳**
-۰/۲۹**	-۰/۳۷**	-۰/۱۷**	-۰/۱۷**	-۰/۱۷**	-۰/۱۷**	-۰/۱۷**	-۰/۱۷**	-۰/۱۸**	-۰/۱۸**	-۰/۱۸**	-۰/۱۸**	-۰/۱۸**	-۰/۱۸**
-۰/۴۴**	-۰/۸۰**	-۰/۵۴**	-۰/۵۴**	-۰/۵۴**	-۰/۵۴**	-۰/۵۴**	-۰/۵۴**	-۰/۴۵**	-۰/۴۵**	-۰/۴۵**	-۰/۴۵**	-۰/۴۵**	-۰/۴۵**
-۰/۹۷**	-۰/۹۵**	-۰/۹۰**	-۰/۹۰**	-۰/۹۰**	-۰/۹۰**	-۰/۹۰**	-۰/۹۰**	-۰/۸۹**	-۰/۸۹**	-۰/۸۹**	-۰/۸۹**	-۰/۸۹**	-۰/۸۹**

جدول ۹. شاخص‌های گیاه ذرت در خاک‌های مطالعه شده*

(mg pot ⁻¹)	فسفر جذب شده (mg kg ⁻¹)	غذای فسفر در اندازه هوایی (g po ³)		عمدکرد خشک (g po ³)	شماره خاک
		کود داده شده	شاهد		
۱۹ ^a	۴۴ ^b	۹۷۳ ^b	۱۴۵ ^a	۲۱ ^a	۱
۴۱ ^a	۵۰ ^a	۱۷۱ ^a	۱۸۲ ^a	۲۴۴	۲
۳۰ ^a	۵۱ ^b	۱۳۶ ^a	۱۸۳ ^b	۲۲۴	۳
۱۴ ^a	۳۳ ^b	۸۰ ^a	۱۲۹ ^b	۱۸۳	۴
۱۶ ^a	۳۶ ^b	۹۴۸ ^a	۱۳۷ ^b	۲۶۵	۵
۹ ^a	۱۲ ^a	۶۳ ^a	۷۶۳ ^a	۱۵۴	۶
۱۱ ^a	۳۴ ^b	۷۵۸ ^a	۱۱۹۹ ^b	۲۷۷	۷
۱۲ ^a	۳۲ ^b	۷۶۸ ^a	۱۲۰۴ ^b	۲۵۷	۸
۱۱ ^a	۲۷ ^b	۷۰۷ ^a	۹۶۶ ^b	۲۸۷	۹
۳۱ ^a	۵۱ ^b	۱۲۵ ^a	۱۷۶ ^a	۲۲۴	۱۰

*: در مورد هر شاخص حروف مشابه نشان دهنده معنی داربودن در سطح ۵ درصد می‌باشد.

جدول ۱. ضرایب هم بستگی بین شاخص‌های گیاهی و ضرایب سرعت معادلات سیتیکی در خاک‌های مطالعه شده												
شاخص‌های گیاهی		معادله پارابولیک		معادله پیشنهادی		معادله مرتبه اول		معادله پارابولیک		عملکرد خشک		
ساعت	ساعت	بنخش دوم	بنخش اول	معادله مرتبه صفر	معادله الوریج	معادله مرتبه صفر	معادله الوریج	K _d	a	R	a	K _d
۰/۹۷**	۰/۹۵**	۰/۹۶*	۰/۸۴**	۰/۸۹**	۰/۶۹*	۰/۸۴**	۰/۸۷**	۰/۹۰**	۰/۷۹**	-۰/۸۱**	۰/۷۸**	۰/۷۵**
۰/۹۵**	۰/۹۵**	۰/۹۶*	۰/۷۸**	۰/۸۹**	۰/۳۱NS	۰/۸۵**	۰/۷۹**	۰/۹۵**	۰/۸۴**	-۰/۷۶**	۰/۷۴**	-۰/۰/۰NS
۰/۹۵**	۰/۹۳NS	۰/۹۲NS	۰/۳۳NS	۰/۸۹**	۰/۳۵NS	۰/۸۵**	۰/۷۸**	۰/۹۵**	۰/۸۴**	-۰/۷۴**	۰/۷۳**	-۰/۰/۰NS
۰/۹۲**	۰/۹۳**	۰/۹۰NS	۰/۷۹**	۰/۷۸**	۰/۳۵NS	۰/۷۶**	۰/۷۹**	۰/۹۰NS	۰/۸۱**	-۰/۷۳**	۰/۷۲**	-۰/۰/۰NS
-۰/۷۸**	-۰/۷۹**	-۰/۷۴NS	-۰/۷۸**	-۰/۷۹**	۰/۴۹NS	-۰/۷۸*	-۰/۷۸**	-۰/۷۸NS	-۰/۷۸**	-۰/۷۵**	۰/۷۴**	-۰/۰/۰NS

شانص با فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۱۷۵۲ ساعت همبستگی معنی داری داشت. در مواردی که همبستگی معنی داری بین شانص‌های گیاهی و ضرایب معادلات آزاد سازی فسفر می‌باشد بیانگر نقش سیتیک آزاد شدن فسفر در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه می‌باشد. تور و باهل در مطالعه خود دریافتند که رابطه معنی داری بین شب معادله الوویچ و مقدار جذب فسفر توسط گیاه سویا وجود دارد که نشان می‌دهد سرعت رهاسازی فسفر پارامتر مفیدی در پیش بینی مقدار فسفر قابل استفاده گیاه می‌باشد (۲۷).

نتیجه‌گیری

مقدار فسفر آزاد شده پس از ۱۷۵۲ ساعت عصاره‌گیری متوالی یا بی‌کربنات سدیم در خاک‌های مختلف متفاوت است. معادلات سیتیکی مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک وتابع نمایی سرعت آزاد شدن فسفر را به خوبی توصیف کردند. معادلات مرتبه صفر والوویچ ساده شده دو قسمتی نیز آزاد شدن فسفر را به خوبی توصیف کردند. ضرایب معادلات آزاد شدن فسفر با برخی ویژگی‌های خاک نظیر درصد سلیت، شن، کربنات کلسیم، pH و مقدار فسفر قابل استفاده و نیز با برخی شانص‌های گیاهی مانند عملکرد ماده خشک اندام هوایی، غلظت فسفر در اندام هوایی ذرت، عملکرد نسبی و پاسخ گیاه به کود همبستگی معنی داری دارند. همبستگی معنی داری که بین شانص‌های گیاهی با مقادیر فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۱۷۵۲ ساعت وجود دارد، می‌تواند بیانگر این مطلب باشد که عملکرد گیاه با افزایش فسفر رها شده در دوره رشد افزایش می‌یابد که این رابطه مثبت تا حدودی می‌تواند به سرعت رها شدن فسفر به محلول خاک مربوط باشد. در پایان پیشنهاد می‌شود در مطالعات آزمون خاک فسفر سرعت آزاد سازی فسفر به محلول خاک نیز در نظر گرفته شود.

پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی، همبستگی معنی داری داشت. این شانص با ضریب سرعت معادلات پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی و معادله مرتبه صفر در بخش اول و دوم رهاسازی همبستگی معنی داری داشت. همچنین این شانص با عرض از مبدأ معادلات مرتبه صفر والوویچ ساده شده در بخش‌های اول و دوم رهاسازی همبستگی معنی داری داشت. غلظت فسفر در اندام هوایی گیاه ذرت با عرض از مبدأ معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی، مرتبه صفر والوویچ ساده شده در هر دو بخش رهاسازی همبستگی معنی داری داشت. این شانص با ضریب سرعت معادلات پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی، معادله صفر در بخش اول و معادله الوویچ ساده شده در بخش اول و دوم رهاسازی همبستگی معنی داری داشت. همچنین این شانص با فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۱۷۵۲ ساعت همبستگی معنی داری داشت. فسفر جذب شده با عرض از مبدأ معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک و تابع نمایی همبستگی معنی داری داشت. این شانص همچنین با ضرایب سرعت معادلات پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی و فسفر آزاد شده پس از ۱۷۵۲ ساعت همبستگی معنی داری داشت. عملکرد نسبی با عرض از مبدأ معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی مرتبه صفر در بخش اول و دوم رهاسازی والوویچ ساده شده در بخش اول رهاسازی همبستگی معنی داری داشت. این شانص با شب معادلات پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی و فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۱۷۵۲ ساعت همبستگی معنی داری داشت. پاسخ گیاه به کود با عرض از مبدأ معادلات مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک، تابع نمایی، مرتبه صفر در هر دو بخش رهاسازی والوویچ ساده شده در بخش اول رهاسازی و ضریب سرعت معادله الوویچ ساده شده در بخش اول رهاسازی همبستگی معنی داری داشت. همچنین این

منابع مورد استفاده

1. Amer, F.D., R. Boulden, C.A. Black and F.R. Duke. 1955. Characterization of soil phosphorus by anion-exchange resin adsorption and ^{32}P -equilibration. *Plant Soil* 6:391-408.
2. Barrow, N.J. 1979. The effects of temperature on the reactions between inorganic phosphate and soil. *J. Soil Sci.* 30: 271-279.
3. Cooke, I.J. and J. Hislop. 1963. Use of anion-exchange resin for the assessment of available soil phosphate. *Soil Sci.* 96: 308-312.

4. Dalal, R.C. 1974. Desorption of soil phosphate by anion exchange resin. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 5: 531-538.
5. Elkhatab, E.A. and J.L. Hern. 1988. Kinetics of phosphorus desorption from appalachian soils. *Soil Sci.* 145: 222-229.
6. Evans, R.L. and J.J. Jurinak. 1976. Kinetics of phosphate release from a desert soil. *Soil Sci.* 121: 205-211.
7. Freeze, D.R. Lookman, R. Merckx and W.H. Van Riemsdijk. 1995. New method for assessment of long-term phosphate desorption from soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 59: 1295-1300.
8. Garcia, R.I., and F. Gilsotres. 1997. Prediction of parameters describing phosphorus-desorption kinetics in soils of Galicia. *J. Environ. Qual.* 26: 1363-1369.
9. Gee,G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. In: A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 2, Physical and Mineralogical Methods. SSSA. Madison, WI.
10. Hansen, J.C. and D.G. Strawn. 2003. Kinetics of phosphorus release from manure-amended alkaline soils. *Soil Sci.* 168: 869-879.
11. Havlin, J.L. and D.G. Westfall. 1985. Potassium release kinetics and plant response in calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49: 366-370.
12. Illmer, P. and F. Schinner. 1992. Solubilization of inorganic phosphates by microorganisms isolated from forest soil. *Soil Biol. Biochem.* 24: 389-395.
13. Jardine, P.M. and D.L. Sparks. 1984. Potassium-calcium exchange in a multireactive soil system. I: Kinetics. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 47: 39-45.
14. Kalra, Y.P. 1997. *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. Soil and Plant Analysis Council Inc. Athens, Georgia.
15. Kuo, S. and E.G. Lotse. 1972. Kinetics of phosphate adsorption by calcium carbonate and Ca-kaolinite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36: 725-729.
16. Lookman, R. D., F. R. Merckxer and H. Van Riemsdijk. 1995. Long-term kinetics of phosphate release from soil. *Environ. Sci. Technol.* 29: 1569-1575.
17. Loeppert, R.H. and D.L. Suarez. 1996. Carbonate and gypsum. In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 3, Chemical Methods. SSSA. Madison, WI.
18. McDowell, R.W. and A.N. Sharpley. 2003. Phosphorus solubility and release kinetics as a function of soil test P concentration. *Geoderma* 112: 143-154.
19. Murphy, J. and J.P. Riley. 1952. A modified single solution method for determination of phosphate uptake by rye. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 48: 31-36.
20. Olsen, S.R., C.N. Cole, F.S. Watanabe and L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular 939. U. S. Government printing office, Washington, DC.
21. Olsen, S.R. and F.E. Khasawneh. 1980. Use and limitations of physical -chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. ASA. Madison, WI.
22. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 3, Chemical Methods. SSSA. Madison, WI.
23. Sharpley, A.N. 1983. Effect of soil properties on the kinetics of phosphorus desorption. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 462-469.
24. Sharpley, A.N., L. R. Ahuja and R.G. Menzel. 1981. The release of soil phosphorus to runoff in relation to the kinetics of desorption. *J. Environ. Qual.* 10: 386-391.
25. Sumner, M.E. and W.P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 3, Chemical Methods. SSSA. Madison, WI.
26. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: D.L. Sparks (ed.), *Methods of Soil Analysis*. part 3, Chemical Methods. SSSA. Madison, WI.
27. Toor, G.S. and G.S. Bahl. 1999. Kinetics of phosphate desorption from different soils as influenced by application of poultry manure and fertilizer phosphorus and its uptake by soybean. *Biores. Technol.* 69: 117-121.
28. Walkley, A. and C.A. Black. 1934. An examination of the method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.