

اثر ریزوسفر لوبیا بر سینتیک آزادسازی فسفر در خاک‌های آهکی دشت شهرکرد

طاهره رئیسی^{۱*}، علیرضا حسین پور^۲

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۶/۰۲ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۲/۲۲

^۱ پژوهشگر در مؤسسه تحقیقات علوم باغبانی، پژوهشکده مرکبات و میوه‌های نیمه‌گرمسیری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مازندران، ایران.

^۲ استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: taraiesi@gmail.com

چکیده

شرایط شیمیایی و زیستی خاک‌های ناحیه ریزوسفر متفاوت از خاک ناحیه غیرریزوسفر هست. اطلاعات در مورد مقدار آزادسازی فسفر در خاک‌های ناحیه ریزوسفر لوبیا محدود هست. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی اثرهای ریزوسفر لوبیا قرمز رقم صیاد (*Phaseolus vulgaris* L.) بر سینتیک آزادسازی فسفر در نه خاک آهکی از استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از ریزوباکس تحت شرایط گلخانه اجرا شد. سینتیک آزادسازی فسفر از ناحیه خاک‌های ریزوسفر و غیرریزوسفر لوبیا به وسیله عصاره‌گیری متوالی با بی‌کربنات سدیم در یک دوره از ۲ تا ۱۰۰۸ ساعت در دمای 25 ± 1 درجه سلسیوس بررسی شد. نتایج نشان داد که میانگین مقدار فسفر استخراج شده بعد از ۱۰۰۸ ساعت از ناحیه خاک‌های ریزوسفر (۲۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به‌طور معنی‌داری کمتر از ناحیه خاک‌های غیرریزوسفر (۲۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. همچنین، نتایج نشان داد که توابع مرتبه اول و نمایی و نیز معادله الویچ ساده می‌توانند روند آزادشدن فسفر از ناحیه خاک‌های ریزوسفر و غیرریزوسفر را به‌خوبی تشریح کنند. نتایج نشان داد مقدار فسفر آزاد شده پس از ۱۰۰۸ ساعت از شروع آزمایش و ثابت سرعت رهاسازی اولیه معادله تابع‌نمایی در ناحیه خاک‌های ریزوسفر و غیرریزوسفر همبستگی معنی‌داری با شاخص‌های رشد گیاه لوبیا داشتند. نتایج این تحقیق نشان داد که ریزوسفر لوبیا می‌تواند مقدار و سرعت آزادسازی فسفر را تغییر دهد. علاوه‌براین، مقدار و سرعت آزادسازی فسفر از خاک‌ها عامل مهمی در تأمین فسفر قابل‌استفاده برای گیاه هست.

واژه‌های کلیدی: ریزوباکس، ریزوسفر، فسفر، عصاره‌گیری متوالی، مدل‌های سینتیکی

The Influence of Bean Rhizosphere on Phosphorus Release Kinetics in Calcareous Soils of Shahrekord Plain

T Raiesi^{1*}, AL Hosseinpour²

Received: 24 August 2014

Accepted: 12 May 2015

¹ Researcher at Horticultural Science Research Institute, Citrus and Subtropical Fruit Research Center, Agricultural Research and Education Organization (AREO), Mazandaran, Iran

² Prof. of Soil Science Dept., Shahrekord University, Iran

* Corresponding Author, Email : taraiesi@gmail.com

Abstract

Rhizosphere region soils have different chemical and biological properties from bulk soils. Information about phosphorus (P) release in the rhizosphere region soil of bean is limited. Therefore, the objective of this research was to evaluate the effects of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) rhizosphere on P release kinetics in 9 types of calcareous soils from Chaharmahal-Va-Bakhtiari province under greenhouse conditions in a rhizobox. The kinetics of P release in the bulk and the rhizosphere region soils were determined by successive extractions with 0.5 M NaHCO₃ in a period of 2 to 1008 h at 25 ± 1°C. The results of kinetics study showed that the mean amount of the extracted P after 1008 h in the extraction period in the rhizosphere region soils (215 mg kg⁻¹) was significantly lower than that in the bulk soils (226 mg kg⁻¹). The release kinetics of P from the rhizosphere region and bulk soils could be defined well by use of the first order, power functions and also, the simplified Elovich equation. The results showed that the amount of the P released after 1008 h and the constant P release rate in power function of the rhizosphere region and the bulk soils had a significant correlation with bean plant growth indices. This research indicated that bean rhizosphere could modify the P release characteristics. In addition, the released P amount and rate are important factors in supplying available P to plants.

Keywords: Kinetics equations, Phosphorus, Rhizobox, Rhizosphere, Successive extraction

کمک خواهد کرد. طبق نظر یورن (۲۰۰۷) حجمی از خاک که تحت تأثیر فعالیت ریشه‌ها و گیاهان در حال رشد قرار می‌گیرد، ریزوسفر نامیده می‌شود. ریزوسفر محل انجام واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی زیادی هست. به‌همین دلیل، محیط ریزوسفر به‌عنوان مکان داغ^۱ خاک معروف است. نتایج مطالعات حاکی است که جذب عناصر غذایی به‌وسیله گیاه به‌سرعت عرضه شکل قابل‌دسترس عنصر برای ریشه بیش از کل مقدار عنصر در خاک بستگی دارد (نیشانت و بیسواز ۲۰۰۸).

مقدمه

ظرفیت جذب و آزادسازی عناصر در خاک عامل مهمی در کنترل مقدار عناصر در محلول خاک و قابلیت استفاده آن‌ها برای گیاه است (خاتر و زاقلول ۲۰۰۲). تمامی فسفر موجود در خاک ممکن است در زمان‌های زمین‌شناسی به محلول خاک راه یابد ولی در دوره رشد گیاه قادر به وارد شدن به محلول خاک نیست (لارسن ۱۹۶۷). ارزیابی توانایی خاک‌ها در آزاد کردن فسفر برای مدیریت این عنصر غذایی در تولید محصول اهمیت دارد. اگر سرعت آزاد شدن فسفر به‌ویژه در ناحیه اطراف ریشه مشخص باشد، به بهبود مدیریت فسفر

¹ hot-spot

بررسی آزادشدن فسفر از فاز جامد به محلول خاک به‌عنوان تابعی از زمان (سینتیک آزادسازی فسفر) در دو خاک ریزوسفیری و غیرریزوسفیری با هدف مقایسه با خاک ریزوسفیری را مشخص می‌کند.

اطلاعات کمی درباره اثر فرآیندهای ریزوسفیری بر آزادسازی فسفر از خاک‌ها در دسترس هست. در تعدادی از تحقیقات، سینتیک آزادسازی فسفر از خاک در غیاب ریشه گیاه با استفاده از محلول بافر شده بی‌کربنات سدیم مطالعه شده است (بیابانکی و حسین‌پور ۱۳۸۶، تور و باهل ۱۹۹۹، گرگین و همکاران ۲۰۱۱). همچنین، چندین رابطه برای تشریح آزادسازی فسفر استفاده شده که از آن جمله معادله‌های مرتبه صفر، مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک، الویچ ساده و تابع توانی قابل ذکر است (بیابانکی و حسین‌پور ۱۳۸۶، کوک ۱۹۶۶، کو و لوتز ۱۹۷۴، چین و کلایتون ۱۹۸۰، شریعتمداری و همکاران ۲۰۰۶، گرگین و همکاران ۲۰۱۱). کوک (۱۹۶۶) به بررسی سرعت آزادسازی فسفر از خاک به‌وسیله رزین تبادل آنیونی در دو سری خاک پرداخت. این محقق گزارش کرد که اگر مقدار فسفر آزادشده در برابر جذر زمان آزادسازی ترسیم گردد، خط راستی به‌دست می‌آید. شیب این خط راست، که در واقع ظرفیت خاک برای تأمین فسفر برای گیاه در حال رشد بود، با مقدار فسفر برداشت‌شده به‌وسیله چاودار همبستگی معنی‌داری داشت. بیابانکی و حسین‌پور (۱۳۸۶) گزارش کردند که ثابت‌های معادله‌های پخشیدگی پارابولیک، تابع توانی و فسفر آزادشده به‌وسیله عصاره‌گیری متوالی با بی‌کربنات سدیم پس از ۱۷۵۲ ساعت همبستگی معنی‌داری با شاخص‌های گیاه نرت داشتند. حال سؤالی که پیش می‌آید این است که تغییراتی که به‌وسیله ریشه گیاه در ریزوسفر رخ می‌دهد، نیز می‌تواند توانایی فاز جامد خاک را برای آزادسازی فسفر تحت تأثیر قرار دهد یا خیر.

محصولات اصلی کشت‌شده در استان چهارمحال و بختیاری عمدتاً گندم، جو، نرت و لوبیا هستند. سالانه در این منطقه مقدار زیادی کود فسفر به‌وسیله کشاورزان استفاده می‌شود. افزون بر این، به‌نظر

فسفر در غلظت‌های خیلی کم در محلول خاک (طبق گزارش ملکوتی و همائی (۱۳۸۳) مقدار فسفر محلول در بیش از ۵۰ درصد خاک‌های ایران کمتر از ۰/۶ میلی‌گرم بر لیتر است) وجود دارد و جذب آن به‌وسیله گیاه منجر به کاهش بیشتر این عنصر در ناحیه نزدیک ریشه می‌شود (باتاچاریا و همکاران ۲۰۰۳). سرعت انتقال مجدد فسفر به محلول خاک از فاز جامد هم به غلظت فسفر در فاز محلول و هم به زمان وابسته است (بارو ۱۹۷۸، بارو و همکاران ۲۰۰۰). آزادسازی فسفر و به دنبال آن غلظت فسفر نیز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر غذایی موردنیاز گیاه در منطقه ریزوسفر به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم متأثر از فعالیت ریشه‌ها هست. ریشه‌ها از طریق تغییر ترکیب جمعیت و افزایش فعالیت ریزجانداران در محیط پیرامون خود می‌توانند به‌طور غیرمستقیم بر فراهمی فسفر اثرگذار باشند. گیاهان و ریزجانداران می‌توانند حل‌پذیری ترکیب‌های معدنی فسفر را از طریق آزادسازی پروتون، هیدروکسیل، دی‌اکسید کربن و آنیون‌های آلی (مارشنر و همکاران ۲۰۱۱) افزایش داده و همچنین آن‌ها می‌توانند فسفر آلی را از طریق آزادسازی آنزیم‌های فسفاتاز مختلف معدنی کنند (نوروزمان و همکاران ۲۰۰۶، بالیک و همکاران ۲۰۰۷، والدربپ و همکاران ۲۰۱۱). بنابراین، در ریزوسفر، فسفر به‌وسیله ترکیب‌های منشأ گرفته از گیاه و یا ریزجانداران متحرک و آزاد می‌شود. از سوی دیگر، ریشه گیاه با جذب فسفر از فاز محلول خاک سبب ایجاد یک شیب غلظت و انتقال مجدد فسفر از فاز جامد از طریق پخشیدگی و یا انحلال به فاز محلول می‌شود (باتاچاریا و همکاران ۲۰۰۳) و بدین طریق به‌طور مستقیم فراهمی فسفر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. طبق نظر دارا (۱۹۹۳) مقدار این شیب غلظت به سه عامل سرعت جذب یا آزادسازی عناصر غذایی، تحرک عناصر غذایی در خاک و سرعت تبدیل شکل‌های غیرقابل‌دسترس به شکل‌های قابل دسترس‌تر بستگی دارد. بنابراین، تغییرات اعمال‌شده به‌وسیله ریشه گیاه، خاک ریزوسفر را محیطی با ویژگی‌های زیستی، شیمیایی و فیزیکی متفاوت از خاک ریزوسفیری خواهد کرد و این امر ضرورت

قسمت‌های غیرریزوسفری به ترتیب با یک و سه کیلوگرم 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 (K_2SO_4) و ۵ میلی‌گرم آهن به صورت سکوسترین ۱۳۸ در کیلوگرم خاک و ۲ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک از منبع سولفات روی ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) اضافه شد. همچنین، به هر ریزوباکس مقدار ۲۰ میلی‌گرم نیتروژن در کیلوگرم خاک از منبع اوره ($CO(NH_2)_2$) در ابتدای کشت برای تأمین فسفر مورد نیاز گیاه در مراحل اولیه رشد و تا قبل از تشکیل گره‌ها اضافه شد (زارع‌نیا ۱۳۹۰). برای کشت گیاه، بذره‌های لوبیا قرمز (*Phaseolus vulgaris* L.) رقم صیاد پس از ضدعفونی کردن با هیپوکلریت سدیم، جوانه زدن و تلقیح با باکتری ریزوبیوم 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 گردید و سعی شد گیاهان دچار تنش خشکی نشوند. بخش هوایی گیاهان ۸ هفته بعد از کاشت برداشت شد. بخش هوایی گیاهان با آب مقطر شسته شده و به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۶۵ درجه سلسیوس خشک و وزن خشک بخش هوایی تعیین شد. نمونه‌های خشک‌شده در آون (بخش هوایی) به روش خشک خاکسترسازی هضم و مقدار فسفر موجود در نمونه‌های هضم شده به روش رنگ‌سنجی آبی (مورفی و رایلی ۱۹۶۲) با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل ۱۰۱ CINTRA تعیین شد. همچنین، ریزوباکس‌ها در پایان فصل رشد باز شدند و از هر ریزوباکس دو نمونه خاک، یکی از قسمت مرکزی و دیگری از بخش‌های کناری ریزوباکس‌ها برداشت شد و بلافاصله به آزمایشگاه خاکشناسی منتقل گردید. مقداری از خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری هر ریزوباکس هوا خشک و برای بررسی سینتیک آزادسازی فسفر استفاده گردید. این دو نمونه خاک در هر ریزوباکس به ترتیب معرف خاک ریزوسفری و خاک غیرریزوسفری بودند.

می‌رسد داشتن اطلاعات در مورد سرعت آزاد شدن فسفر، به‌ویژه در ناحیه اطراف ریشه می‌تواند به بهبود مدیریت فسفر کمک کند. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی اثر ریزوسفر لوبیا بر مقدار و سرعت آزادسازی فسفر از خاک‌های استان چهارمحال و بختیاری در ریزوباکس اجرا شد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش ۳۰ نمونه خاک سطحی 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 نه نمونه خاک بر اساس مقادیر درصد رس، کربنات کلسیم معادل و مقدار فسفر قابل استفاده عصاره‌گیری شده با روش اولسن (اولسن و سامرز ۱۹۸۲) انتخاب شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منتخب به روش‌های معمول آزمایشگاهی تعیین شدند. pH نمونه‌های خاک در سوسپانسیون ۲ به ۱ محلول به خاک (توماس ۱۹۹۶)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره‌های صاف شده با نسبت ۲ به ۱ محلول به خاک (روادز ۱۹۹۶)، کربنات کلسیم معادل خاک به روش خنثی‌سازی با اسیدکلریدریک (لوپرت و اسپارکس ۱۹۹۶)، کربن آلی خاک به روش اکسایش تر (نلسون سامرز ۱۹۹۶) و بافت خاک به روش هیدرومتر دو زمانه (جی و بادر ۱۹۸۶) تعیین شد.

برای مطالعه اثر نوع خاک بر شاخص‌های گیاه لوبیا، یک آزمایش گلخانه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی در نه نوع خاک و در سه تکرار انجام شد. برای مطالعه ریزوسفر لوبیا از ریزوباکس استفاده شد (یوسف و چینو ۱۹۸۸). ارتفاع، عرض و طول ریزوباکس‌ها به ترتیب ۱۶۰، ۱۳۲ و ۱۸۰ میلی‌متر بود. ریزوباکس به سه بخش، شامل بخش مرکزی یا قسمت ریزوسفری (طول ۳۲ میلی‌متر) و قسمت‌های غیرریزوسفری (به‌طول ۵۰ میلی‌متر در دو طرف خاک ریزوسفری) تقسیم شد. دو قسمت خاک غیرریزوسفری از قسمت ریشه و خاک ریزوسفری به‌وسیله یک پوشش نایلونی با قطر منافذ حدود ۲۴ میکرومتر جدا شدند. قسمت ریزوسفری و

پایان دوره آزمایش و جمع‌آوری داده‌ها (در این تحقیق عصاره‌گیری تا زمانی ادامه یافته که تغییرات مقدار فسفر آزادشده در دو دوره زمانی متوالی کم گردد و منحنی آزادسازی به سمت مجانب افقی تمایل پیدا کند)، معادله‌های مرتبه صفر، مرتبه اول، الوویچ ساده شده، تابع توانی و پخشیدگی پارابولیک (جدول ۱) بر مقدار تجمعی فسفر آزادشده برازش و ثابت‌های معادله‌ها برآورد شد. سپس، بر اساس ضریب تعیین و خطای استاندارد تخمین، بهترین مدل یا مدل‌ها برای توصیف آزاد شدن فسفر انتخاب و ضرایب این معادله‌ها گزارش شد. خطای استاندارد تخمین از رابطه ۱ محاسبه شد (دنگ و همکاران ۱۹۹۴):

$$SE = (\sum (P_t - P^*)^2 / n - 2)^{0.5} \quad [1]$$

که در آن: P_t و P^* به ترتیب مقدار فسفر آزادشده و برآورد شده به وسیله مدل در زمان t و n تعداد نقاط آزمایشی است. در نهایت اثر ریزوسفر بر مقدار فسفر آزادشده با آزمون تی جفت شده و اثر نوع خاک بر شاخص‌های گیاه توسط تجزیه واریانس یک‌طرفه بررسی شد. کلیه تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار STATISTICA 10 انجام شد.

بررسی آزاد شدن فسفر در نمونه خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری لوبیا با استفاده از روش عصاره‌گیری متوالی با محلول اولسن (تور و باهل ۱۹۹۹) انجام شد. بدین منظور در سه تکرار، ۱ گرم خاک هوا خشک از هر نمونه، همراه با ۲۰ میلی‌لیتر بی‌کربنات سدیم ۰/۵ نرمال با $pH=8/5$ در لوله‌های سانتریفیوژ به صورت جداگانه ریخته شدند. نمونه‌ها داخل انکوباتور در دمای 25 ± 1 درجه سلسیوس قرار داده شدند. 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، ۰/۴، ۰/۸، ۰/۲۴، ۰/۴۸، ۰/۷۲، ۰/۹۶، ۱/۲۰، ۱/۴۴، ۱/۶۸، ۲/۴۰، ۳/۳۶، ۵/۰۴، ۶/۷۲، ۸/۴۰ و ۱۰/۰۸ 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 یک ورتکس ۵ ثانیه‌ای شدید به منظور رها شدن خاک چسبیده به دیواره لوله‌های سانتریفیوژ و پس از ۱۵ دقیقه تکان دادن به وسیله دستگاه تکان‌دهنده برقی، نمونه‌ها مجدداً به انکوباتور منتقل شدند. غلظت فسفر عصاره‌ها به روش رنگ‌سنجی (مورفی و رایلی ۱۹۶۲) تعیین شد. پس از

جدول ۱- معادله‌های سینتیکی مورداستفاده در این تحقیق (دنگ و همکاران ۱۹۹۴).

مدل سینتیکی	فرمول
مرتبه صفر	$(P_0 - P_t) = a - k_0 t$
مرتبه اول	$\ln(P_0 - P_t) = a - k_1 t$
پخشیدگی پارابولیک	$P_t = a + R t^{0.5}$
تابع توانی	$P_t = a \times t^b$
الوویچ ساده‌شده	$P_t = 1/\beta \ln(\alpha\beta) + 1/\beta \ln t$

P_t : مقدار فسفر آزادشده در زمان t ($mg\ kg^{-1}$); P_0 : مقدار فسفر آزادشده پس از $10.08\ h$ ($mg\ kg^{-1}$); k_0 ($mg\ kg^{-1}\ h^{-1}$); k_1 ($mg\ kg^{-1}\ h^{-1}$); R ($mg\ kg^{-1}\ h^{-0.5}$); b ($(mg\ kg^{-1})^{-1}$) و $1/\beta$ ($mg\ kg^{-1}$) ثابت‌های سرعت معادله‌های سینتیکی؛ a : عرض از مبدأ معادله‌های سینتیکی و t : زمان (h). $1/\beta \ln(\alpha\beta)$ در معادله الوویچ ساده‌شده معادل با a در نظر گرفته شده است

نتایج و بحث

درصد، دامنه کربنات کلسیم معادل از ۱۶ تا ۴۸ درصد و مقدار کربن آلی از ۰/۳۱ تا ۱/۳۹ درصد بود. خاک‌های مورد مطالعه قلیایی (دامنه pH از ۷/۹ تا ۸/۱)

دامنه مقدار رس و سیلت در خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب از ۱۳/۳ تا ۵۵ و از ۲۵ تا ۵۶

بررسی شده دارای دامنه وسیعی از نظر فسفر اولسن، کربنات کلسیم معادل و درصد رس می باشند (جدول ۲).

و غیرشور (دامنه هدایت الکتریکی از ۰/۲۶ تا ۰/۶۱ دسی‌زیمنس بر متر) بودند. همچنین، دامنه فسفر استخراج شده با روش اولسن از ۱۵/۹ تا ۷۱/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. بنابراین، می‌توان گفت خاک‌های

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اولیه خاک‌ها.

شماره خاک	طول و عرض جغرافیایی	رده‌بندی خاک	pH	هدایت الکتریکی (EC)	سیلت	رس	کربنات کلسیم معادل (%)	کربن آلی	فسفر اولسن (mg kg ⁻¹)
۱	۵۸°E ۸°N	Typic Haploxerepts	۸/۰	۰/۳۸	۴۰	۴۸	۱۶	۰/۵۰	۱۵/۹
۲	۵۰°E ۱۹°N	Typic Haploxerepts	۸/۰	۰/۴۶	۳۳	۲۵	۴۱	۰/۴۲	۱۷/۵
۳	۵۹°E ۶°N	Typic Haploxeralfs	۸/۰	۰/۴۲	۵۶	۴۹	۴۸	۰/۳۱	۱۹/۱
۴	۵۸°E ۹°N	Typic Haploxerepts	۸/۰	۰/۴۶	۴۳	۵۲	۳۹	۰/۵۴	۱۸/۱
۵	۳۳°E ۱۵°N	Typic Calcixerpts	۷/۹	۰/۵۹	۳۰	۵۵	۲۷	۰/۸۴	۲۲/۴
۶	۴۴°E ۳۲°N	Typic Haploxerepts	۸/۱	۰/۳۶	۴۴	۳۷	۳۳	۰/۵۱	۴۰/۱
۷	۵۶°E ۱۷°N	Typic Haploxerepts	۸/۱	۰/۵۹	۳۹	۴۹	۲۷	۱/۳۹	۳۲/۰
۸	۵۱°E ۱۵°N	Typic Calcixerpts	۸/۰	۰/۶۱	۴۷	۳۷	۲۱	۱/۰۴	۷۱/۹
۹	۵۸°E ۱۵°N	Typic Calcixerpts	۸/۰	۰/۲۶	۲۵	۱۳	۱۹	۰/۷۰	۱۶/۸
	(%) تغییرات	-	۰/۷۱	۲۶	۲۴	۳۴	۳۶	۴۷	۶۲

مقدار فسفر تجمعی آزاد شده از خاک ریزوسفری

و غیرریزوسفری شماره ۱ به وسیله عصاره‌گیری متوالی با بی‌کربنات سدیم به‌عنوان تابعی از زمان در شکل ۱ نشان داده شده است. بقیه خاک‌ها نیز روندی مشابه با خاک شماره ۱ را نشان دادند. روند

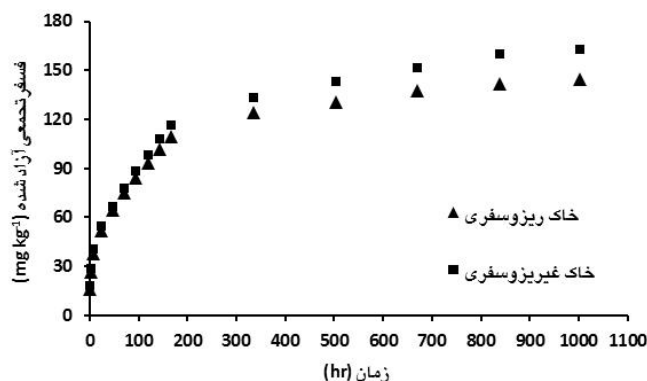
آزاد شدن تجمعی فسفر با زمان شامل دو بخش بود. بررسی نمودار آزاد شدن تجمعی فسفر به‌وسیله عصاره-گیر بی‌کربنات سدیم نشان داد که سرعت آزاد شدن فسفر از این خاک‌ها (چه ریزوسفری و چه غیرریزوسفری) در مراحل اولیه سریع و سپس کند بود.

مطابق نظر آرنیوس^۲ سد انرژی بین ماده اولیه و بالاترین نقطه مسیر واکنش انرژی فعال‌سازی (Ea) نامیده می‌شود (پارسافر و همکاران ۱۳۸۰):

$$k = A \exp(-E_a/RT) \quad [2]$$

در این رابطه A ثابت آرنیوس، k ثابت سرعت، Ea انرژی فعال‌سازی، R ثابت عمومی گازها و T دما نامیده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود که با افزایش Ea، k کوچک می‌شود و لذا سرعت واکنش با افزایش انرژی فعال‌سازی کاهش می‌یابد (پارسافر و همکاران ۱۳۸۰).

² Arrhenius



شکل ۱- مقدار تجمعی فسفر آزادشده با زمان.

می‌شود و دیگری به‌کندی آزاد می‌شود. هر دو شکل به‌طور هم‌زمان در مراحل اولیه (۶-۱۲ ساعت) آزاد می‌شوند اما در زمان‌های بعدی تنها شکلی از فسفر که سرعت آزادسازی آن آرام است آزاد می‌شود. بیابانکی و حسین‌پور (۱۳۸۶) و مک‌دول و شارپلی (۲۰۰۳) نیز گزارش کردند که سرعت آزادسازی فسفر از خاک‌های مورد مطالعه در ابتدا سریع و سپس به آهستگی ادامه یافت. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود شیب منحنی تجمعی فسفر آزادشده از خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری در زمان ۱۶۸ ساعت تغییر کرد. بنابراین، مقادیر فسفر آزادشده پس از ۱۶۸ ساعت و ۱۰۰۸ ساعت از شروع آزمایش در جدول ۳ آورده شده است.

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، نتایج مقایسه میانگین‌ها برای اثر ریزوسفر نشان داد که مقدار فسفر استخراج‌شده به‌وسیله عصاره‌گیری متوالی با بی‌کربنات سدیم از خاک‌های ریزوسفری پس از ۱۶۸ ساعت و ۱۰۰۸ ساعت به‌طور معنی‌داری ($p < 0.01$) کمتر از مقدار فسفر آزادشده از خاک‌های غیرریزوسفری بود. دامنه مقدار فسفر استخراج‌شده در پایان بخش اول (۱۶۸-۲ ساعت) از خاک‌های ریزوسفری از ۹۹ تا ۲۸۰ و از خاک‌های غیرریزوسفری از ۱۰۲ تا ۳۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. همچنین، دامنه مقدار فسفر استخراج‌شده در بخش دوم از خاک‌های ریزوسفری از ۳۴ تا ۱۰۸ و از خاک‌های غیرریزوسفری از ۳۵ تا ۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم

شارپلی و آهوجا (۱۹۸۳) گزارش کردند که آزادسازی فسفر در طول دوره‌های کوتاه، فرآیندی با انرژی فعال‌سازی پایین بود. این پژوهشگران پیشنهاد کردند که به‌دلیل پایین بودن انرژی فعال‌سازی در طول دوره‌های کوتاه، احتمالاً مرحله تعیین‌کننده سرعت آزادسازی فسفر در این دوره‌ها، سرعت پخشیدگی فسفر آزادشده از غشاءهای آبی احاطه‌کننده ذرات خاک به خارج است. 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 آزاد می‌شود. علاوه‌براین، مک‌دول و شارپلی (۲۰۰۳) پیشنهاد کردند که در بازه‌های زمانی طولانی‌مدت، انحلال گونه‌های فسفر مرحله محدودکننده سرعت در آزادسازی فسفر و در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت فرآیند واچربی احتمالاً غالب است. به‌علت مشکل بودن جداسازی این دو فرآیند، سینتیک آزادسازی فسفر به‌صورت ترکیبی از دو فرآیند رهاسازی و انحلال در نظر گرفته می‌شود. سرعت واچربی فسفر می‌تواند بسته به سطح کانی و سازوکار جذب متفاوت باشد (گرگین و همکاران ۲۰۱۱). همچنین، سرعت انحلال کانی‌های فسفر نیز می‌تواند بسته به نوع گونه، درجه تبلور کانی و اندازه ذره متفاوت باشد (بیابانکی و حسین‌پور ۱۳۸۶). الرشیدی و همکاران (۱۹۷۵) پیشنهاد کردند که در خاک‌های شدیداً آهکی دو شکل از فسفر وجود دارد: یک شکل که سریعاً آزاد

متغیر بود. نتایج نشان داد که دامنه مقدار فسفر استخراج شده بعد از ۱۰۰۸ ساعت از خاک‌های ریزوسفری از ۱۳۳ تا ۳۷۱ و از خاک‌های غیرریزوسفری از ۱۳۷ تا ۴۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود.

جدول ۳- مقدار فسفر آزاد شده (میلی‌گرم بر کیلوگرم) از خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری.

خاک	۱۰۰۸-۱۶۸ ساعت (بخش دوم)		۱۰۰۸-۲ ساعت		۱۶۸-۲ ساعت (بخش اول)	
	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر	غیرریزوسفر	ریزوسفر
۱	۴۶	۳۵	۱۶۳	۱۴۴	۱۱۶	۱۰۹
۲	۵۵	۵۷	۲۱۶	۲۱۱	۱۶۱	۱۵۴
۳	۳۹	۳۴	۱۷۱	۱۷۲	۱۳۲	۱۳۸
۴	۴۸	۴۶	۱۸۶	۱۷۷	۱۳۸	۱۳۱
۵	۴۲	۳۹	۱۶۶	۱۵۰	۱۲۳	۱۱۱
۶	۹۸	۱۰۸	۳۶۴	۳۶۰	۲۶۶	۲۵۱
۷	۴۰	۴۱	۲۲۷	۲۱۳	۱۸۷	۱۷۲
۸	۹۳	۹۱	۴۰۷	۳۷۱	۳۱۴	۲۸۰
۹	۳۵	۳۴	۱۳۷	۱۳۳	۱۰۲	۹۹
میانگین	۵۵a	۵۴a	۲۲۶a	۲۱۵b	۱۷۱a	۱۶۱b

حروف متفاوت در سطر پایانی نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار بین میانگین مقدار فسفر آزاد شده از خاک‌های ریزوسفر و غیرریزوسفری در سطح

احتمال پنج درصد به‌وسیله آزمون تی جفت شده هست؛

هر کدام از داده‌های ارائه شده در جدول میانگین سه تکرار هستند.

بررسی نتایج نشان داد که به‌طور کلی مقدار فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۱۰۰۸ ساعت از خاک‌های ریزوسفری لوبیا کمتر از مقدار فسفر آزاد شده از خاک‌های غیرریزوسفری بود. در مطالعه حاضر ریزوسفر لوبیا منجر به افزایش فعالیت فسفاتاز اسیدی (ترشح شده توسط ریشه گیاه و ریزجانداران)، فسفاتاز قلیایی (ترشح شده توسط ریزجانداران)، کربن آلی محلول، کربن و فسفر زیست‌توده میکروبی و کاهش فسفر قابل استخراج با روش اولسن شد (نتایج آورده نشده است). بنابراین، همان‌طور که ویژگی‌های بیولوژیکی تحت تأثیر ریزوسفر قرار گرفته، احتمالاً خصوصیات شیمیایی خاک از جمله آزادسازی فسفر نیز تحت تأثیر محیط ریزوسفر قرار می‌گیرند. علاوه بر این در مطالعه‌ای مجزا در خاک‌های مطالعه شده، اثر ریزوسفر بر جزءبندی فسفر به‌روش اولسن و سامرز (۱۹۸۲) نیز بررسی شده است (نتایج آورده نشده است) که در ادامه به‌منظور آگاهی از شکل‌های از فسفر که در آزادسازی این عنصر از خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری مؤثرند، همبستگی شکل‌های فسفر با مقدار فسفر آزاد شده از این خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج همبستگی مقدار فسفر آزاد شده در دو بخش منحنی آزادسازی فسفر با شکل‌های مختلف فسفر نشان داد در بخش اول، احتمالاً شکل‌های فسفر مرتبط با اکسیدهای آهن و آلومینیم ($r=0/66^*$)، فسفر مرتبط با کلسیم ($r=0/76^*$) و فسفر آلی ($r=0/68^*$) در آزادسازی فسفر از خاک‌های ریزوسفری و شکل‌های فسفر مرتبط با کلسیم ($r=0/80^{**}$) و فسفر آلی ($r=0/75^*$) در آزادسازی فسفر از خاک‌های غیرریزوسفری نقش مهمی داشته‌اند. لیکن در بخش دوم، احتمالاً فسفر مرتبط با کلسیم در آزادسازی فسفر از خاک‌های ریزوسفری ($r=0/83^{**}$) و غیرریزوسفری ($r=0/68^*$) نقش مهمی داشته‌اند. همچنین در بخش اول، مقدار فسفر آزاد شده همبستگی معنی‌داری با فسفر استخراج شده با روش اولسن ($r=0/66^{**}$) و $r=0/61^*$ به ترتیب در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری داشت. لیکن در بخش دوم همبستگی معنی‌داری بین دو ویژگی ذکر شده

بررسی نتایج نشان داد که به‌طور کلی مقدار فسفر آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۱۰۰۸ ساعت از خاک‌های ریزوسفری لوبیا کمتر از مقدار فسفر آزاد شده از خاک‌های غیرریزوسفری بود. در مطالعه حاضر ریزوسفر لوبیا منجر به افزایش فعالیت فسفاتاز اسیدی (ترشح شده توسط ریشه گیاه و ریزجانداران)، فسفاتاز قلیایی (ترشح شده توسط ریزجانداران)، کربن آلی محلول، کربن و فسفر زیست‌توده میکروبی و کاهش فسفر قابل استخراج با روش اولسن شد (نتایج آورده نشده است). بنابراین، همان‌طور که ویژگی‌های بیولوژیکی تحت تأثیر ریزوسفر قرار گرفته، احتمالاً خصوصیات شیمیایی خاک از جمله آزادسازی فسفر نیز تحت تأثیر محیط ریزوسفر قرار می‌گیرند. علاوه بر این در مطالعه‌ای مجزا در خاک‌های مطالعه شده، اثر ریزوسفر بر جزءبندی فسفر به‌روش اولسن و سامرز (۱۹۸۲) نیز بررسی شده است (نتایج آورده نشده است) که در ادامه به‌منظور آگاهی از شکل‌های از فسفر که در آزادسازی این عنصر از خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری مؤثرند، همبستگی شکل‌های فسفر با مقدار فسفر آزاد شده از این خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج همبستگی مقدار فسفر آزاد شده در دو بخش منحنی آزادسازی فسفر با شکل‌های مختلف فسفر نشان داد در بخش اول، احتمالاً شکل‌های فسفر مرتبط با اکسیدهای آهن و آلومینیم ($r=0/66^*$)، فسفر مرتبط با کلسیم ($r=0/76^*$) و فسفر آلی ($r=0/68^*$) در آزادسازی فسفر از خاک‌های ریزوسفری و شکل‌های فسفر مرتبط با کلسیم ($r=0/80^{**}$) و فسفر آلی ($r=0/75^*$) در آزادسازی فسفر از خاک‌های غیرریزوسفری نقش مهمی داشته‌اند. لیکن در بخش دوم، احتمالاً فسفر مرتبط با کلسیم در آزادسازی فسفر از خاک‌های ریزوسفری ($r=0/83^{**}$) و غیرریزوسفری ($r=0/68^*$) نقش مهمی داشته‌اند. همچنین در بخش اول، مقدار فسفر آزاد شده همبستگی معنی‌داری با فسفر استخراج شده با روش اولسن ($r=0/66^{**}$) و $r=0/61^*$ به ترتیب در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری داشت. لیکن در بخش دوم همبستگی معنی‌داری بین دو ویژگی ذکر شده

کشت لوبیا، به‌نظر می‌رسد جذب فسفر به‌وسیله ریشه گیاه منجر به تخلیه مخازن لبایل در خاک‌های ریزوسفری شده و در نتیجه مقدار آزادسازی فسفر در خاک‌های ریزوسفر پایین‌تر از خاک‌های غیرریزوسفری است. در تحقیقات گذشته نیز به تخلیه فسفر لبایل در ریزوسفر لوبیا اشاره شده است (مارشور و همکاران ۲۰۰۵، هینسینگر ۲۰۰۱، باتاچاریا و همکاران ۲۰۰۳). در بخش دوم تفاوت معنی‌داری بین مقادیر فسفر آزادشده از خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری مشاهده نشد. همان‌طور که اشاره شده در بازه زمانی ۱۰۰۸-۱۶۸ ساعت چه در خاک‌های ریزوسفری و چه در خاک‌های غیرریزوسفری همبستگی معنی‌داری بین فسفر آزادشده و شکل فسفر مرتبط با کلسیم مشاهده شد. لیکن، در این بازه زمانی همبستگی بین فسفر استخراجی با روش اولسن و مقدار فسفر آزادشده در این بازه زمانی مشاهده نشد. مارل و هینسینگر (۱۹۹۹) 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 به‌طور معنی‌داری بین خاک ریزوسفری و خاک غیرریزوسفری متفاوت بود.

در ادامه معادله‌های سینتیکی بر داده‌های آزادسازی فسفر با زمان برازش داده شدند. دامنه تغییرات r^2 و SE معادله‌های سینتیکی مورد مطالعه در جدول ۴ آورده شده است. نتایج نشان دادند که در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری، معادله‌های الوویچ ساده، تابع نمایی و مرتبه اول می‌توانند سرعت آزاد شدن فسفر را به‌خوبی، تشریح کنند. روابط رگرسیونی برازش شده به‌وسیله معادله‌های الوویچ ساده، تابع نمایی و مرتبه اول بر تغییرات مقدار فسفر تجمعی آزادشده با زمان در شکل ۲ نشان داده شده است. تشریح موفقیت‌آمیز سینتیک آزادسازی فسفر به‌وسیله معادله الوویچ ساده (استفنز ۱۹۹۴، تور و باهل ۱۹۹۹، شریعتمداری و همکاران ۲۰۰۶، گرگین و همکاران ۲۰۱۱)، تابع توانی (بیابانکی و حسین‌پور ۱۳۸۶

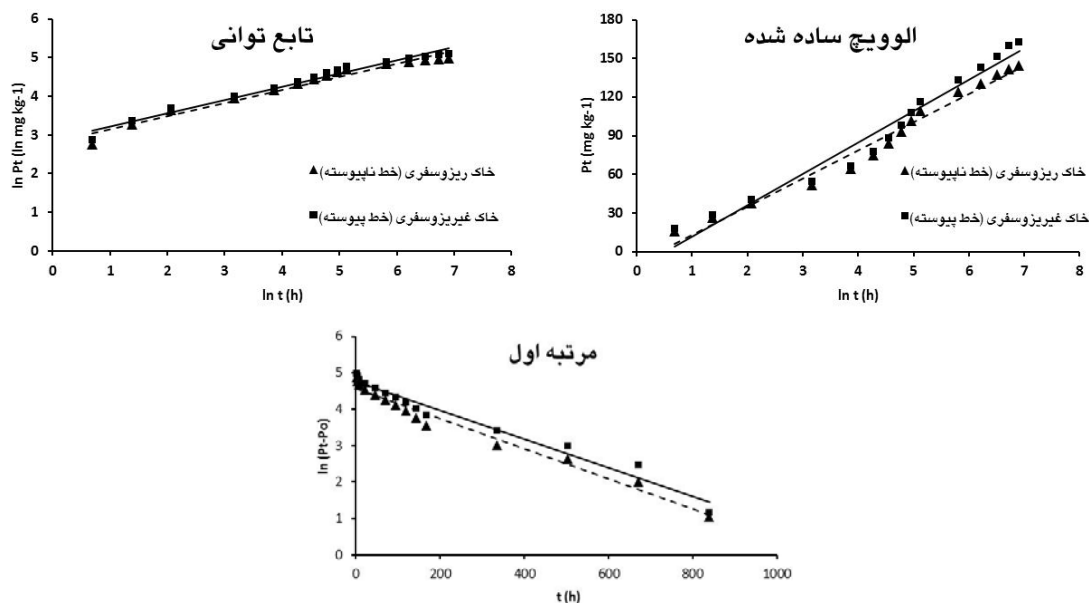
مشاهده نشد ($r^2=0/43$ و $r^2=0/30$ به‌ترتیب در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری). بنابراین در بخش اول فسفر از مخازن لبایلی که به‌وسیله عصاره‌گیر تک‌مرحله‌ای اولسن قابل استخراج هست آزاد شده است اما در بخش دوم با بر هم خوردن تعادل، واکنش‌های انحلال‌رسوب وارد عمل شده و بخش‌هایی از فسفر غیرلبایل آزاد شده است. سرعت آزادسازی فسفر از خاک‌ها می‌تواند به چند فرآیند ربط داده شود. احتمالاً سه سازوکار معمول آزادسازی فسفر که در خاک‌ها مطالعه شده، شامل انحلال کانی‌های فسفر، آزادسازی فسفر از سطح کانی‌ها و آزادسازی فسفر از مواد آلی هست. بنابراین، ویژگی‌های آزادسازی فسفر مشاهده شده در این خاک‌ها احتمالاً ناشی از چندین فرآیند است که به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهند که باعث می‌شود تشخیص فرآیند اختصاصی برای رفتار آزادسازی مشاهده شده مشکل‌تر شود. بررسی نتایج الرشیدی و همکاران (۱۹۷۵) نشان داد که فسفر محلول در کلرید آمونیوم همبستگی معنی‌داری با فسفر استخراج شده به‌وسیله رزین در دوره‌های تعادل ۱، ۲، ۴، ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته داشت. هم‌چنین شکل فسفر مرتبط با آلومینیم همبستگی ضعیفی با فسفر استخراج شده به‌وسیله رزین در همه دوره‌های بررسی شده داشت. این در حالی بود که مجموع این دو شکل فسفر همبستگی بالا و معنی‌داری با فسفر استخراج شده با رزین در همه دوره‌های تعادل به‌ویژه در دوره تعادل ۷۲ ساعته داشت. بنابراین این محققان فرض کردند که در خاک‌های آهکی مطالعه شده این دو شکل فسفر می‌توانند به‌عنوان مقدار فعال فسفر معدنی خاک یا به‌عنوان فاکتور ظرفیت فسفر در خاک‌های مطالعه شده در نظر گرفته شوند.

به‌طور کلی، در مطالعه حاضر به‌نظر می‌رسد که کاهش غلظت فسفر در خاک مجاور ریشه، نیروی لازم برای پخشیدگی فسفر به‌سمت ریشه را تأمین نموده و علاوه‌براین تعادل جذب-واجذبی و رسوب-انحلال را بر هم زده و منجر به دسترسی بیشتر گیاه به منابع فسفر کمتر قابل‌دسترس گردیده است. در بخش اول در

، گرگین و همکاران (۲۰۱۱) و معادله مرتبه اول (بیابانکی و حسین پور ۱۳۸۶) در گذشته گزارش شده است.

جدول ۴- دامنه ضرایب تشخیص و خطای استاندارد برآورد (میلی گرم بر کیلوگرم) در معادله های مورد استفاده.

خاک	مرتبه صفر	مرتبه اول	تابع توانی	پخشیدگی پارابولیک	الویج ساده شده
ریزوسفر	R^2	۰/۶۲-۰/۷۴	۰/۹۶-۰/۹۸	۰/۸۴-۰/۹۲	۰/۹۷-۰/۹۹
	SE	۲۱-۵۵	۱۰-۳۰	۱۲-۳۰	۵-۱۷
غیرریزوسفر	R^2	۰/۶۰-۰/۷۰	۰/۹۵-۰/۹۸	۰/۸۲-۰/۹۲	۰/۹۶-۰/۹۹
	SE	۲۸-۵۸	۱۰-۳۴	۱۲-۳۴	۵-۱۴



شکل ۲- مقدار تجمعی فسفر آزاد شده (میلی گرم بر کیلوگرم) توصیف شده به وسیله سه معادله ریاضی.

ثابت های معادله های الویج ساده شده می توانند برای مقایسه سرعت آزادسازی فسفر در خاک های مختلف استفاده شوند. با افزایش مقدار پارامتر α و کاهش مقدار پارامتر β سرعت آزادسازی فسفر افزایش می یابد. در معادله توانی، دامنه تغییر پارامتر a در معادله در حالی که دامنه مقادیر ضریب سرعت b در خاک های مطالعه شده نسبتاً کوچک هستند (جدول ۵). بنابراین، احتمالاً یک افزایش در مقدار a و یک کاهش در مقدار b نشان دهنده افزایش در سرعت آزادسازی فسفر هست (دنگ و همکاران ۱۹۹۴). در معادله تابع توانی، در صورتی که از معادله $q_t = at^b$ نسبت به زمان مشتق گرفته شود و $t=1$ باشد، $dq/dt = ab$ خواهد بود، در این

ثابت های برآورد شده معادله های سینتیکی انتخاب شده در خاک های ریزوسفری و غیرریزوسفری در جدول ۵ آورده شده است. میانگین ثابت سرعت معادله مرتبه اول ($k_1 \times 10^3$) در هر دو محیط (خاک های ریزوسفری و غیرریزوسفری) ۴/۵ میلی گرم در کیلوگرم بر ساعت بود. میانگین ثابت سرعت معادله الویج ساده در خاک های ریزوسفری و غیرریزوسفری به ترتیب ۳۱ و ۳۲ میلی گرم در کیلوگرم بود. معادله الویج یک معادله تجربی و نیمه لگاریتمی است و توضیحی در مورد یک سازوکار مشخص نمی دهد. لیکن در برخی از منابع گزارش شده است که معادله الویج قادر است تعدادی از فرآیندهای مختلف از قبیل پخشیدگی سطحی را توضیح دهد (تور و باهل ۱۹۹۹).

آزادسازی فسفر با استفاده از نوارهای کاغذی در ماتریکس کلرید کلسیم در طول یک دوره ۲۴۶۰ دقیقه‌ای به‌عنوان تابعی از غلظت اولیه فسفر آزمون خاک (اولسن و کلرید کلسیم) پرداختند. آنان معادله تابع توانی را بر داده‌های آزادسازی فسفر برازش دادند و مشاهده کردند که ضریب سرعت این معادله با افزایش فسفر استخراج‌شده به‌روش اولسن (P-اولسن) و فسفر استخراج‌شده به‌وسیله کلرید کلسیم (CaCl₂-P) کاهش یافت.

حالت، پارامتر ab را می‌توان به‌عنوان سرعت رهاسازی اولیه فسفر در نظر گرفت (دنگ و همکاران ۱۹۹۴). بنابراین در نظر گرفتن سرعت آزادسازی فسفر به‌صورت $a \times b$ مناسب‌تر است. بررسی نتایج نشان داد که مقدار $a \times b$ در خاک‌های ریزوسفیری کمتر از خاک‌های غیرریزوسفیری بود. میانگین ثابت سرعت تابع توانی ($a \times b$) در خاک‌های ریزوسفیری و غیرریزوسفیری به‌ترتیب ۱۰ و ۱۱ (میلی‌گرم در کیلوگرم بر ساعت)^b بود. مک‌دول و شارپلی (۲۰۰۳) به بررسی سینتیک

جدول ۵- ضرایب معادله‌های استفاده‌شده برای تشریح سینتیک آزادسازی فسفر از خاک‌های ریزوسفیری و غیرریزوسفیری.

خاک	الویج ساده شده				تابع توانی				مرتبه اول	
	ریزوسفر		غیرریزوسفر		ریزوسفر		غیرریزوسفر		ریزوسفر	غیرریزوسفر
	A	1/β	a	b	a	b	a	b	a	k _t × 10 ³
۱	۱۵	۲۲	۴/۷	۴/۰	۲۳	۰/۲۸	۶	۲۲	۴/۰	۴/۰
۲	۱۷	۳۳	۵/۰	۴/۵	۲۹	۰/۳۰	۹	۳۱	۴/۶	۴/۵
۳	۲۰	۲۶	۴/۷	۵/۱	۳۰	۰/۲۷	۸	۳۱	۵/۱	۵/۰
۴	۱۹	۲۶	۴/۹	۴/۷	۲۸	۰/۲۸	۸	۲۸	۴/۷	۴/۵
۵	۱۵	۲۲	۴/۷	۴/۴	۲۳	۰/۲۸	۷	۲۸	۴/۴	۴/۴
۶	۳۱	۵۴	۵/۵	۴/۱	۴۹	۰/۳۰	۱۵	۵۹	۴/۱	۴/۰
۷	۴۵	۳۰	۴/۸	۵/۰	۵۰	۰/۲۲	۱۱	۵۹	۵/۰	۴/۸
۸	۶۷	۵۰	۵/۴	۴/۲	۷۵	۰/۲۴	۱۸	۹۸	۴/۲	۴/۳
۹	۱۶	۱۹	۴/۵	۴/۶	۲۳	۰/۲۷	۶	۲۴	۴/۶	۴/۷
میانگین	۲۷	۳۱	۴/۹	۴/۵	۳۷	۰/۲۷	۱۰	۴۲	۴/۵	۴/۵

جدول ۶- اثر نوع خاک بر شاخص‌های گیاه لوبیا.

شماره خاک	جذب فسفر در بخش هوایی (mg rhizobox ⁻¹)	ماده خشک بخش هوایی (g rhizobox ⁻¹)	غلظت فسفر بخش هوایی (mg kg ⁻¹)
۱	۱۵/۸۶	۷/۴۷	۲۱۹۴
۲	۱۵/۱۳	۶/۶۱	۲۲۳۳
۳	۱۹/۲۳	۹/۳۷	۲۰۵۶
۴	۲۷/۳۴	۹/۸۲	۲۷۷۲
۵	۲۸/۴۸	۸/۵۵	۳۳۷۵
۶	۴۹/۰۹	۱۱/۴۷	۴۲۸۱
۷	۴۳/۳۶	۱۱/۰۴	۳۹۲۲
۸	۴۹/۸۷	۱۳/۴۱	۳۷۳۳
۹	۳۴/۰۲	۹/۰۷	۳۷۵۶
LSD (1%)	۸/۸۲	۲/۳۵	۸۲۰

٪ معنی‌دار در سطح احتمال ۹۹ درصد (**)

معنی-داری با عملکرد خشک بخش هوایی و فسفر جذب‌شده به‌وسیله بخش هوایی لوبیا داشتند. همبستگی ثابت‌های سرعت معادلات سینتیکی با شاخص‌های گیاهی در مطالعات گذشته نیز گزارش شده است (بیابانکی و حسین‌پور ۱۳۸۶، کوک ۱۹۶۶، استنز ۱۹۹۴، تور و باهل ۱۹۹۹). بیابانکی و حسین‌پور (۱۳۸۶) گزارش کردند که ثابت‌های معادلات پخشیدگی پارابولیک، تابع توانی و فسفر آزادشده به‌وسیله عصاره‌گیری متوالی با بی‌کربنات سدیم پس از ۱۷۵۲ ساعت همبستگی معنی‌داری با شاخص‌های گیاه نرت داشتند.

نتایج نشان داد که شاخص‌های گیاه لوبیا شامل غلظت فسفر، عملکرد خشک ساقه و مقدار فسفر جذب‌شده به‌وسیله بخش هوایی (ساقه) لوبیا به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع خاک است (جدول ۶). کمترین و بیشترین جذب فسفر به‌وسیله لوبیا به‌ترتیب مربوط به خاک ۲ (۱۵/۱۳ میلی‌گرم در ریزوباکس)؛ و خاک ۹ (۴۹/۸۷ میلی‌گرم در ریزوباکس) بود (جدول ۶).

ضرایب همبستگی شاخص‌های گیاه لوبیا با ضرایب سرعت آزاد شدن فسفر از خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری در جدول ۷ آورده شده است. نتایج نشان داد مقدار فسفر آزادشده بعد از ۱۰۰۸ ساعت و سرعت رهاسازی اولیه تابع توانی در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری همبستگی

جدول ۷- ضرایب همبستگی بین شاخص‌های گیاهی و ثابت‌های معادلات سینتیکی در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری.

ویژگی	محیط	جذب فسفر در بخش هوایی	ماده خشک بخش هوایی	غلظت فسفر بخش هوایی
فسفر آزاد شده	ریزوسفر	۰/۶۳*	۰/۷۰*	۰/۴۲n.s
۲-۱۰۰۸ ساعت	غیرریزوسفر	۰/۶۳*	۰/۷۰*	۰/۴۲n.s
الووچ ساده شده	ریزوسفر	۰/۳۹n.s	۰/۵۷n.s	۰/۳۴n.s
	غیرریزوسفر	۰/۳۹n.s	۰/۵۸n.s	۰/۳۶n.s
تابع توانی	ریزوسفر	۰/۶۲*	۰/۶۸*	۰/۳۷n.s
	غیرریزوسفر	۰/۶۲*	۰/۶۸*	۰/۳۷n.s
مرتبه اول	ریزوسفر	-۰/۱۵n.s	-۰/۰۵n.s	-۰/۱۲n.s
	غیرریزوسفر	-۰/۲۲	۰/۰۲n.s	-۰/۲۲n.s

* معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و n.s یعنی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار نیست.

نتیجه‌گیری کلی

می‌شود (فسفر مرتبط با کلسیم). هر سه شکل به‌طور همزمان در مراحل اولیه (۱۶۸-۲ ساعت) آزاد می‌شوند اما در زمان‌های بعدی تنها شکلی از فسفر که سرعت آزادسازی آن آرام است آزاد می‌شود. لیکن در خاک‌های آهکی غیرریزوسفری، احتمالاً فسفر آلی و فسفر مرتبط با کلسیم به‌طور همزمان در مراحل اولیه (۱۶۸-۲ ساعت) آزاد می‌شوند اما در زمان‌های بعدی تنها فسفر مرتبط با کلسیم آزاد می‌شود. همچنین در بخش اول، مقدار فسفر آزادشده همبستگی معنی‌داری با فسفر استخراج‌شده با روش اولسن در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری داشت.

بررسی نمودار آزاد شدن تجمعی فسفر به‌وسیله عصاره‌گیر بی‌کربنات سدیم نشان داد که سرعت آزاد شدن فسفر از این خاک‌ها (چه ریزوسفری و چه غیرریزوسفری) در مراحل اولیه سریع (۱۶۸-۲ ساعت) و سپس کند (۱۰۰۸-۱۶۸ ساعت) بود. با توجه به نتایج همبستگی مقدار فسفر آزادشده در دو بخش منحنی آزادسازی فسفر با شکل‌های مختلف فسفر به‌نظر می‌رسد که در خاک‌های آهکی ریزوسفری سه شکل از فسفر در رهاسازی فسفر دخالت دارند: دو شکل که سریعاً آزاد می‌شود (فسفر مرتبط با اکسیدهای آهن و آلومینیم و فسفر آلی) و یک شکل که به‌کندی آزاد

همچنین در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری، معادله‌های تابع نمایی، الویچ ساده و مرتبه اول می‌تواند روند آزادشدن فسفر را به خوبی، تشریح کنند. علاوه بر این مقدار فسفر آزاد شده بعد از ۱۰۰۸ ساعت و سرعت رهاسازی اولیه تابع توانی در خاک‌های ریزوسفری و غیرریزوسفری همبستگی معنی‌داری با عملکرد خشک بخش هوایی و فسفر جذب شده به وسیله بخش هوایی لوبیا داشتند. بنابراین به نظر می‌رسد، سرعت آزادسازی فسفر از خاک‌ها فاکتور مهمی در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه هست.

لیکن در بخش دوم همبستگی معنی‌داری بین دو ویژگی ذکر شده چه در خاک‌های ریزوسفری و چه در خاک‌های غیرریزوسفری مشاهده نشد. بنابراین در بخش اول فسفر از مخازن لبایی که به وسیله عصاره‌گیر تک‌مرحله‌ای اولسن قابل استخراج می‌باشد آزاد شده است اما در بخش دوم با بر هم خوردن تعادل واکنش‌های انحلال-رسوب وارد عمل شده و بخش‌هایی از فسفر غیرلبایل آزاد شده است. مقدار فسفر استخراج شده به وسیله عصاره‌گیری متوالی با بی‌کربنات سدیم بعد از سپری شدن ۱۰۰۸ ساعت از خاک‌های ریزوسفری به طور معنی‌داری کمتر از خاک‌های غیرریزوسفری بود.

منابع مورد استفاده

- بیابانکی ف و حسین پورع 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، جلد ۱۱، صفحه-های ۴۹۱ تا ۵۰۳.
- پارسا فرخ، جلالی هروی م، سعیدی م ر و غیاثی م. ۱۳۸۰. شیمی عمومی برای رشته‌های مهندسی. مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
- زارع‌نیا م، ۱۳۹۰. ارزیابی عصاره‌گیرهای شیمیایی مختلف برای تعیین پتاسیم قابل استفاده لوبیا چیتی در برخی از خاک‌های استان چهارمحال و بختیاری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
- ملکوتی م.ج. و همائی م. ۱۳۸۳. حاصلخیزی خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک: مشکلات و راه‌حل‌ها. مرکز نشر دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- Balik J, Pavlikova D, Vanek V, Kulhanek M and Kotkova B, 2007. The influence of long-term sewage sludge application on the activity of phosphatases in the rhizosphere of plants. *Plant, Soil and Environment Journal* 53: 375-381.
- Barrow NJ, 1978. The description of phosphate adsorption curves. *Journal of Soil Science*, 29: 447-462.
- Barrow NJ, Hansen HC, Hansen PE and Magid J, 2000. A note on the description of the kinetics of phosphate sorption. *European Journal of Soil Science* 51: 531-535.
- Bhattacharyya P, Datta SC 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.
- Chien SH and Clayton WR, 1980. Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils. *Soil Science Society of America Journal* 44:265-268.
- Cooke IJ, 1966. Kinetic approach to the description of soil phosphate status. *Journal of Soil Science* 17: 56-64.
- Dang YP, Dalal RC, Edwards DG and Tiller KG, 1994. Kinetics of zinc desorption from Vertisols. *Soil Science Society of America Journal* 58:1392-1399.
- Darrah PR, 1993. The rhizosphere and plant nutrition: a quantitative approach. *Plant and Soil* 155: 1-20.
- Elrashidi MA, Van Diest A and El-Damaty AH, 1975. Phosphorus determination in highly calcareous soils by the use of an anion exchange resin. *Plant and Soil* 42:273-286.
- Gee GH and Bauder JW, 1986. Particle size analysis. Pp. 383-409. In: Klute A (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 2 Physical Properties*. SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- 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.
- 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
- Khater AH and Zaghoul AM, 2002. Copper and zinc desorption kinetics from soil: effect of pH. Pp.1–9. Proceedings of the Seventeen World Congress of Soil Science. 14–21 August, Bangkok, Thailand.
- Kuo S and Lotse EG, 1974. Kinetics of phosphorus adsorption and desorption by hematite and gibbsite. *Journal of Soil Science* 116 400-406.
- Larsen S, 1967. Soil phosphorus. *Advances in Agronomy* 19: 151–210.
- Loeppert RH and Sparks DL, 1996. Carbonate and gypsum. Pp. 437-474. In: Sparks DL (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Marschner P, Solaiman ZM 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.
- Marschner P, Crowley D and Rengel Z, 2011. Rhizosphere interactions between microorganisms and plants govern iron and phosphorus acquisition along the root axis: a model and research methods. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 883-894.
- McDowell RW and Sharpley AN, 2003. Phosphorus solubility and release kinetics as a function of soil test P concentration. *Geoderma* 112: 143-154.
- 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.
- Murphy J and Riley JP, 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analysis Chemical Acta* 27: 31-36.
- Nelson DW and Sommers LE, 1996. Total carbon organic carbon and organic matter. Pp. 961-1011. In: Sparks DL (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Nishanth D and Biswas DR, 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.
- Nuruzzaman M, Lambers H, Bolland MDA and Veneklaas EJ, 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.
- Olsen SR and Sommers LE, 1982. Phosphorus. Pp. 4013-430. In: Klute A (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1 Chemical and Biological Properties*. SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Rhoades JD, 1996. Salinity electrical conductivity and total dissolved solids. Pp. 417-437. In: Sparks DL (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- 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.
- Sharpley AN and Ahuja LR, 1983. A diffusion interpretation of soil phosphorus desorption. *Journal of Soil Science* 135: 322– 326.
- StatSoft, Inc. 2010. STATISTICA (data analysis software system), Version 10. www. Statsoft.com.
- Steffens D, 1994. Phosphorus release kinetics and extractable phosphorus after long-term fertilization. *Soil Science Society of America Journal* 58: 1702-1708.
- Thomas GW, 1996. Soil pH and soil acidity. Pp. 475-491. In: Sparks DL (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3 Chemical Methods*. SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Toor GS and Bahl GS, 1999. Kinetics of phosphate desorption from different soils as influenced by application of poultry manure and fertilizer phosphorus and its uptake by soybean. *Bio-resource Technology* 69: 117-121.
- Uren NC, 2007. Types, amounts, and possible functions of compounds released into the rhizosphere by soil-grown plants. Pp. 1-23. In: Pinton R, Varanini Z and Nannipieri P (eds.), *The Rhizosphere: Biochemistry and Organic Substances at the Soil-Plant Interface*. CRC Press, London.
- Waldrip-Dail H, He Z, Erich MS and Honeycutt CW, 2011. Effects of poultry manure amendment on phosphorus uptake by ryegrass, soil phosphorus fractions and phosphatase activity. *Biology and Fertility of Soils* 47: 407–418.
- Youssef RA and Chino M, 1988. Development of a new rhizobox system to study the nutrient status in the rhizosphere. *Soil Science and Plant Nutrition* 34: 461–465.