

ارزیابی نیاز فسفر گندم در خاک‌های آهکی با استفاده از هم‌دما‌های

جذب فسفر

کریم شهبازی^{۱*} و محمد حسین داودی

استادیار پژوهش موسسه تحقیقات خاک و آب: shahbazikarim@yahoo.com

استادیار پژوهش موسسه تحقیقات خاک و آب: davoodi_mh@yahoo.com

چکیده

جذب فسفر در خاک‌ها یکی از فرآیندهای کلیدی در تعیین قابلیت جذب آن برای گیاهان می‌باشد. تحقیقات گسترده نشان داده است که فسفر توصیه شده را می‌توان بر اساس ویژگی‌های خاک بهبود بخشید. در این مطالعه هم‌دماهای جذب فسفر برای خاک‌های مختلف که تحت کشت گندم بودند رسم گردید. از منحنی‌های جذب برای اضافه کردن کود فسفر به خاک گلدان‌ها بطوریکه غلظت تعادلی فسفر در محلول خاک از ۰/۰۷۵ تا ۱/۲ میلی گرم در لیتر تغییر کند، استفاده شد. گیاه گندم به مدت شش هفته رشد داده شد. رفتار جذب فسفر به خوبی بوسیله معادله‌های فروندلیچ و ون‌های توضیح داده شدند ($R^2 = 0.927-0.997$ و $R^2 = 0.949-0.999$ به ترتیب برای معادله‌های فروندلیچ و ون‌های). در اکثر خاک‌ها هنگامیکه فسفر در محلول خاک در ۰/۳ میلی گرم در لیتر تنظیم شد، عملکرد به بیش از ۸۵ درصد ماکزیم رسید. نیاز استاندارد فسفر (SPR^۲) برای خاک‌ها مورد مطالعه، که به صورت مقدار فسفر جذب شده در غلظت تعادلی ۰/۳ میلی گرم در لیتر تعریف شد، دامنه ای بین ۱۵۷-۱۹ میلی‌گرم در کیلوگرم به دست آمد. همبستگی خطی بین فسفر اضافه شده و فسفر استخراج شده با روش اولسن در تمام خاک‌ها بدست آمد که R^2 آن بین ۰/۹۶ تا ۰/۹۹ با میانگین ۰/۹۸ بود و شیب خط برازش شده به داده‌های فسفر استخراج شده در مقابل فسفر اضافه شده از ۰/۲۳ تا ۰/۴۷ تغییر کرد که متوسط آن ۰/۳۸ بود. بازیافت فسفر از ۱۲ تا ۵۰ درصد تغییر کرد و میانگین آن ۳۷ درصد بود. این بدان معناست که حدوداً ۶۳ درصد فسفر اضافه شده بصورت غیر قابل استفاده در آمده است. تفاوت معنی داری بین میانگین بازیافت در تیمارهای مختلف وجود نداشت. سطح بحرانی فسفر برای عصاره گیر بی‌کربنات سدیم (روش اولسن) به روش ترسیمی و آماری کیت - نلسن برابر با ۱۳ میلی گرم بر کیلوگرم خاک تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: هم‌دما‌های جذب، معادله‌های فروندلیچ و ون‌های، روش ترسیمی و آماری کیت - نلسن، سطح بحرانی

مقدمه

عمدتاً زیر کشت غلات می‌باشند عمده محدودیت‌های شیمیایی برای تولیدات کشاورزی در این خاک‌ها که در مناطق خشک و نیمه خشک نیز واقع شده‌اند، قابلیت جذب پائین فسفر و نیتروژن، کمبود عناصر میکرو

با توجه به اقلیم و وجود کربنات کلسیم در مواد مادری خاک‌ها به نظر می‌رسد قسمت اعظم خاک‌های ایران متأثر از حضور کربنات کلسیم باشد که

^۱ نویسنده مسئول، آدرس: کرج، میدان استاندارد، بعد از رزکان نو، بلوار امام خمینی، موسسه تحقیقات خاک و آب کدپستی ۳۱۱-۳۱۷۸۵

* دریافت: مرداد ۱۳۹۰ و پذیرش: اردیبهشت ۱۳۹۱

^۲ Standard Phosphorus Requirement

مرتبط شود (جو و فوکس ۱۹۷۷، شارپلی و همکاران ۱۹۸۹، سانیا و داتا ۱۹۹۱). لیکن در خاک‌هایی که از نظر این خصوصیات به طور وسیعی متفاوت می‌باشند رابطه

معنی‌داری برقرار نگردیده است.

به نظر می‌رسد جذب سطحی در زمانیکه غلظت فسفات در محلول کمتر از 10^{-4} مولار است، غالب باشد (هالفورد و ماتینگلی ۱۹۷۵، فریمن و راول ۱۹۸۱، هاماد و همکاران ۱۹۹۲). ظرفیت جذب سطحی کلسیت ظاهراً کمتر از $0.3 \mu\text{molPm}^{-2}$ می‌باشد (گریفن و جوریناک ۱۹۷۳، فریمن و راول ۱۹۸۱، بوررو و همکاران ۱۹۸۸) که در حدود یک دهم اکسیدهای آهن طبیعی است (تورنت و همکاران ۱۹۹۲، ۱۹۹۴). این دلیلی برای عدم وجود رابطه یا رابطه ضعیف بین فسفر جذب شده و مقدار کربنات کلسیم خاک در غلظت‌های کم فسفر تعادلی می‌باشد، در چنین شرایطی اکسیدهای آهن و آلومینیم و رس‌های سیلیکاتی احتمالاً جذب کننده اصلی فسفات می‌باشند (سالیز و تورنت ۱۹۸۹، پنا و تورنت ۱۹۹۰).

بسیاری از مطالعات انجام شده روی خاک‌های آهنکی نشان داده‌اند که رفتار فسفر به طور عمده بوسیله حضور مقادیر ناچیز اکسیدهای آهن و آلومینیم کنترل می‌شود. ریان و همکاران (۱۹۸۵) نشان دادند که جذب فسفر در ۲۰ خاک آهنکی لبنان با آهن قابل استخراج با اگزالات آمونیوم (شکل‌های آمورف اکسیدهای آهن) رابطه دارد. به طور مشابه، سالیز و تورنت (۱۹۸۹) نشان دادند که مقدار فسفر جذب شده بعد از ۶ روز در غلظت تعادلی 1mgP/L همبستگی خیلی خوبی با درصد اکسیدهای آهن و رس‌ها در ۲۴ خاک آهنکی در جنوب اسپانیا داشت. صمدی و جیلکز (۱۹۹۸) تشخیص دادند که Fe-P و Al-P در زمره مهمترین شکل‌های فسفر در خاک‌های آهنکی بایر (بکر) و کود داده شده از غرب استرالیا هستند.

به دلیل فرآیندهای جذب سطحی و رسوب، تمام کود فسفره اضافه شده به خاک‌ها قابل جذب برای گیاهان نمی‌باشد. در خاک‌های آهنکی، رسوب Ca-P نامحلول فرض شده که مهمترین فاکتور در زمان کاهش قابلیت استفاده فسفر می‌باشد (سمپل و همکاران ۱۹۸۰). شارپلی و همکاران (۱۹۸۴) گزارش کردند که قسمتی از کود اضافه شده که به صورت لبایل در خاک باقی می‌ماند رابطه معکوس با مقدار کربنات کلسیم در ۲۰ خاک آهنکی مورد مطالعه آنها داشت، و همچنین در گروه دیگر از خاک‌ها آهنکی که متعلق به چند کشور بود شارپلی و همکاران (۱۹۸۹) نشان دادند که قابلیت جذب بین ۳۰ تا ۱۸۰ روز پس از اضافه کردن فسفر با مقدار کربنات کلسیم رابطه

(همانند روی و آهن) می‌باشد. بیشتر خاک‌های تحت کشت کشور دارای غلظت فسفر پائینی هستند، به طوری که تقریباً ۵۰ درصد خاک‌ها دارای فسفر کمتر از ۱۰، ۳۳ درصد بین ۱۰ تا ۲۰ و تنها ۱۷ درصد از خاک‌ها دارای فسفر بیشتر از ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک می‌باشند (شهبازی ۱۳۸۴). برای فائق آمدن بر این کمبود، کودهای فسفره (به طور عمده سوپرفسفات‌ها) برای بیش از ۵۰ سال است که مورد استفاده قرار گرفته است. هرچند در بعضی از مواقع استفاده از فسفر باعث انباشت تدریجی (build up) غلظت فسفر خاک شده است، با این وجود حتی در حال حاضر نیز کارایی کودهای مورد استفاده همانند سوپر فسفات تریپل و غیره در خاک‌های قلیایی ایران به خصوص خاک‌های آهنکی هنوز بسیار پائین می‌باشد. فهم بهتر شیمی فسفر در این خاک‌ها برای بهبود کارایی کودهای فسفره مورد نیاز می‌باشد.

مسائلی از قبیل غنی شدن آب‌های سطحی از فسفر، هزینه کودی و کمبود آهن و روی ناشی از زیادی فسفر قابل استفاده در خاک سبب شده‌اند که نیاز به توصیه‌های کودی دقیق‌تر بیش از پیش احساس شود لذا، کوشش‌های بسیاری به عمل آمده است تا با آگاهی از مقادیر فسفر باقی مانده کودهای فسفر، پیش‌بینی دقیق‌تری از نیاز کودی این عنصر غذایی به عمل آید (اوستان و توفیقی ۱۳۸۳). چنانچه آزمون خاک فسفر به صورت مناسبی کالیبره شود ممکن است پیش‌بینی کند که کود فسفر مورد نیاز است یا نه، غالباً مرتبط نمودن مقادیر آزمون با مقدار کمیت فسفر مورد نیاز مشکل می‌باشد. توانایی برای پیش‌بینی پتانسیل جذب فسفر از روی خصوصیات خاک ابزار با ارزشی می‌باشد برای اینکه از تغذیه مناسب گیاه، کاهش استفاده‌های غیر اقتصادی و حداقل کردن خسارت‌های زیست محیطی مطمئن شویم.

در خاک‌های آهنکی، جذب سطحی فسفر بشدت تحت تأثیر واکنش‌های جذب سطحی و رسوب در سطح کربنات کلسیم می‌باشد (کل و همکاران ۱۹۵۳، گریفین و جوریناک ۱۹۷۳، فریمن و راول ۱۹۸۱، آمر و همکاران ۱۹۸۵). فرآیند جذب ممکن است شامل دو واکنش جذب سطحی و رسوب باشد (کول و همکاران ۱۹۵۳، گریفین و جوریناک ۱۹۷۳). این دو فرآیند می‌توانند پشت سرهم یا هم‌زمان اتفاق افتاده، به همین خاطر همیشه قابل تفکیک نیستند. جذب سطحی فسفر عمدتاً به واکنش‌های تبادل لیگاندی بین هیدروکسیل‌های روی سطح کانی‌ها و یون فسفات در محلول خاک نسبت داده می‌شود. میزان جذب فسفر می‌تواند به طور معنی‌داری به بسیاری از خصوصیات خاک از قبیل مقدار رس، سطح ویژه، و کربنات کلسیم

میزان تغییر فسفر قابل عصاره‌گیری با مصرف کود فسفات ضرورت دارد. میزان تغییر فسفر قابل جذب در خاک‌های مختلف متفاوت است. این تفاوت به ظرفیت بافری فسفر خاک در رابطه با مقدار رس و سایر سطوح جذب کننده فسفر در خاک مربوط می‌شود. تحقیقات فسفر در ایران عمدتاً بر روی تعیین مقدار فسفر خاک و حد بحرانی آن متمرکز شده است در حالیکه تعیین مقدار فسفر مورد نیاز برای افزایش آزمون خاک از سطح مورد نظر به سطح بحرانی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

از اهداف این مطالعه (۱) اندازه‌گیری خصوصیات جذب فسفر و شاخص‌های قابلیت جذب فسفر در خاک‌ها آهکی متنوع از مزارع تحت کشت گندم (۲) تعیین مناسبترین غلظت تعادلی فسفر و ارتباط آن با برخی خصوصیات خاک (۳) امکان استفاده از هم دماهای جذب برای تعیین کود فسفر مورد نیاز خاک‌ها برای تولید گندم (۴) تشخیص رابطه بین خصوصیات شیمیایی خاک و شاخص‌های تعیین شده با هدف فهم فاکتورهای شیمیایی عمده‌ای که رفتار فسفر در این خاک‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مواد و روشها

بیست و سه خاک مورد استفاده در این مطالعه از میان ۳۰۰ نمونه خاک برداشت شده از عمق سطحی (۰-۲۵ سانتیمتری) مزارع گندم سراسر کشور طوری انتخاب گردیدند تا محدوده وسیعی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی (به خصوص رس و کربنات کلسیم) را پوشش دهند. خاک‌ها هوا خشک شده و از الک ۲ میلی متری عبور داده شدند. ویژگی‌های خاک شامل بافت خاک با روش هیدرومتری (بایوکاس ۱۹۶۲)، درصد کربن آلی به روش والکی بلک اصلاح شده (نلسون و سومرز ۱۹۸۲)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات سدیم $pH = 8/2$ (چپمن ۱۹۶۵)، کربنات کلسیم معادل به روش خشتی سازی با اسید کلریدریک (آلیسون و مودی ۱۹۶۲)، فسفر قابل استفاده با روش اولسن (کو ۱۹۶۶)، رطوبت ظرفیت مزرعه (کسل و نیلسن ۱۹۸۶)، قابلیت هدایت الکتریکی (رودز ۱۹۶۶)، رطوبت اشباع و pH گل اشباع (آزمایشگاه شوری آمریکا ۱۹۵۴) اندازه‌گیری شد.

هم دماهای جذب فسفر

برای بررسی هم دماهای جذب فسفر، ۳ گرم از هر خاک (در دو تکرار) در لوله‌های سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتر ریخته و پس از اضافه کردن ۳۰ میلی‌لیتر محلول منو کلسیم فسفات (۰، ۰/۳، ۰/۶، ۱، ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۶، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌گرم فسفر در لیتر در کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار) و دو قطره تولوئن در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد در

داشت. ریان و همکاران (b ۱۹۸۵) نشان دادند که قابلیت جذب فسفر بامقدار کربنات کلسیم کل و فعال مرتبط نیست ولی به اکسیدهای آهن ارتباط دارد. احتمال تأثیر اکسیدهای آهن بر قابلیت جذب فسفر در خاک‌های آهکی شایستگی توجه بیشتر می‌باشد زیرا اکسیدهای آهن نشان داده‌اند در جذب فسفر در غلظت‌های تعادلی پائین ($<1mM$) در خاک‌های آهکی منطقه مدیترانه بسیار فعال می‌باشند (ریان و همکاران ۱۹۸۵a، پنا و تورنت ۱۹۹۰).

فاکتورهای زیادی حرکت فسفر به طرف ریشه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. سیستمی که برای پیش بینی مقدار کود فسفر مورد نیاز برای افزایش سطح فسفر خاک‌ها به سطح کفایت برای تولید محصول استفاده می‌شود بایستی فاکتورهای شدت و ظرفیت را در نظر بگیرد. یکی از راه حل‌های این مشکل که بوسیله بک وید (۱۹۶۴) پیشنهاد شد، فسفات جذب شده در یک غلظت استاندارد محلول تعادلی اندازه‌گیری شود. غلظت استاندارد انتخاب شده ۰/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود با فرض اینکه بهترین رشد گیاه در خاک در این غلظت فسفر در محلول خاک اتفاق می‌افتد. بک وایت نشان داد این غلظت بحرانی تا حدودی در بین خاک‌ها و نیز گیاهان متفاوت می‌باشد.

گیاهان از نظر غلظت فسفر مورد نیاز در محلول خاک متفاوت می‌باشند. در بعضی از گیاهان تأمین پیوسته غلظت ۰/۳ میلی‌گرم در لیتر در محلول غذایی موجب حداکثر رشد خواهد شد (آشر و لونراگان ۱۹۶۷). برای گیاهان دیگر ۲۵ برابر این غلظت لازم می‌باشد. غلظت ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر فسفر به عنوان غلظتی که در آن بیشتر گیاهان حداکثر رشد را خواهند داشت پیشنهاد شده است. کاملاً مشخص شده است که فسفر بوسیله پخشیدگی به طرف ریشه گیاهان حرکت می‌کند (اولسن و واتانابه ۱۹۶۳، ویلسن ۱۹۶۸، باربر ۱۹۶۲). بدین ترتیب غلظت فسفر در محلول خاک حیاتی است، زیرا محلول خاک باید حاوی فسفر کافی برای فراهم نمودن شیب غلظتی مورد نیاز برای حرکت خالص به طرف ریشه باشد (فوکس و کمپرات ۱۹۷۰)

به عقیده کریمیان (۱۳۷۱) با توجه به آنکه نگهداری و آزادسازی عناصر غذایی توسط خاک و جذب توسط گیاه تابعی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک می‌باشد. لذا بسیار منطقی است که در تفسیر نتایج آزمون خاک تنها به سطح قابل استفاده عنصر بسنده نشده و خصوصیات از قبیل درصد رس، پ هاش، ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، میزان آهک و حتی سطح آزمون خاک سایر عناصر نیز در تفسیر لحاظ گردد. از دیگر سو برای انجام توصیه کودی فسفر، آگاهی از ارتباط بین

در همه این معادله‌ها q و C همانند اجزاء معادله لانگ مویر تعریف می‌شوند.

آزمایش گلخانه‌ای

آزمایش گلخانه‌ای برای ارزیابی استفاده از هم‌دماهای جذب برای پیش‌بینی کود فسفر مورد نیاز انجام گرفت. این طرح در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با پنج سطح تعادلی فسفر شامل ۰/۰۷۵، ۰/۱۵، ۰/۳، ۰/۶ و ۱/۲ میلی‌گرم در لیتر، همچنین یک سطح شاهد (بدون اضافه کردن فسفر) در سه تکرار انجام گرفت. سطوح تعادلی فسفر بوسیله منحنی‌های جذب تعیین گردیدند. فسفر از منبع منو کلسیم فسفات $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ بصورت محلول به خاک اضافه و کاملاً مخلوط گردید. رطوبت خاک‌ها به سطح ظرفیت مزرعه رسانده شده و به مدت ۱۴ روز گذاشته شد. در این مدت به صورت متناوب بهم زده شد. سرانجام مقادیر مورد نیاز اوره (۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، سولفات پتاسیم (۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، سولفات روی (۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، کلات آهن (۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) به خاک اضافه شده و کاملاً با خاک مخلوط گردید. نمونه‌های خاک در گلدان‌های یک کیلوگرمی قرار داده شده و ده عدد بذر گندم جوانه‌دار شده در هر گلدان کشت گردید و سپس به چهار جوانه تنک گردید. رطوبت خاک با اضافه کردن متناوب آب از طریق وزن کردن در سطح ظرفیت مزرعه نگه داشته شد. گیاهان پس از شش هفته برداشت گردیدند. گیاهان برداشت شده در دمای ۶۵ درجه سانتیگراد به مدت ۷۲ ساعت خشک گردیده و میزان وزن خشک، غلظت فسفر و میزان فسفر جذب شده در آن‌ها اندازه‌گیری شد. هم‌زمان با کشت گلخانه‌ای یک نمونه از هر تیمار به ترتیب بالا آماده شده ولی کشت نگردید و رطوبت در این نمونه‌ها نیز در سطح ظرفیت مزرعه نگه داشته شد. دو ماه بعد از تیمار کردن مقدار فسفر قابل استفاده به روش اولسن اندازه‌گیری شد (کو ۱۹۹۶).

نتایج و بحث

بعضی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک-های مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. خاک‌های مورد بررسی دارای دامنه وسیعی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بودند.

خصوصیات جذب فسفر

رابطه بین فسفر جذب شده توسط خاک و غلظت تعادلی فسفر برای تعدادی از خاک‌های مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. مفهوم فسفر جذب شده که در اینجا استفاده شده در بر گیرنده تمام فرآیندها (عمدتاً جذب سطحی و رسوب) می‌باشد، که نتیجه آن

انکوباتور به مدت ۲۴ ساعت تکان داده شدند. پس از رسیدن به زمان تعادل لوله‌ها از انکوباتور خارج گردیده و پس از سانتریفیوژ کردن، غلظت فسفر در محلول زلال روئی به روش رنگ سنجی اندازه‌گیری شد. مقدار فسفر جذب شده در نمونه‌ها از طریق تفاوت فسفر در محلول‌های اولیه و نهایی اندازه‌گیری و داده‌های حاصل به معادلات خطی لانگ مویر، فروندلیچ، خطی و ون‌های برازش داده شده و مورد مقایسه قرار گرفت.

داده‌ها بوسیله نسخه خطی مدل لانگ مویر (پنت وردی ۲۰۰۱، اسپینگتن ۲۰۰۳) مورد ارزیابی قرار گرفتند هم‌دماهای جذب سطحی لانگ مویر به شکل زیر می‌باشد:

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{K_b} + \frac{C}{b}$$

در این معادله C غلظت فسفر اندازه‌گیری شده بعد از ۲۴ ساعت زمان تعادل (mg L^{-1})، q مقدار ماده جذب شده بر روی فاز جامد (mg kg^{-1})، b حداکثر جذب فسفر (mg kg^{-1})، و K_b ثابتی جذبی که وابسته به انرژی پیوند (L mg^{-1}) می‌باشد.

داده‌ها همچنین با استفاده از معادله خطی فروندلیچ مورد ارزیابی قرار گرفت (اسپارکس ۲۰۰۳، اسپینگتن ۲۰۰۳):

$$\log q = \log K_f + n_f \log C$$

در این معادله K_f ضریب جذب فروندلیچ (L kg^{-1}) و n_f فاکتور تصحیح می‌باشد. این دو ثابت، ثابتهای تجربی بوده و مفهوم فیزیکی ندارند، لکن K_f از نظر عددی مساوی q می‌باشد هنگامیکه $C=1$ شود. در مواردی که n_f برابر یک باشد عبارت K_f دلالت بر این دارد که انرژی جذب روی سطح همگن مستقل از پوشش سطح می‌باشد (اسپارکس ۲۰۰۳)، در صورتی که n_f میزان غیر همگنی مکانهای جذبی در خاک را نشان می‌دهد (زو و لی ۲۰۰۱). همانطور که n_f بسمت یک میل می‌کند، همگنی سایتهای سطحی افزایش می‌یابد و نشان دهنده این است که توزیع در تنوع سایتهای جذبی محدود می‌باشد (اسپینگتن ۲۰۰۳). یکی از معایب معادله فروندلیچ این است که ماکزیمم جذب را پیش‌بینی نمی‌کند (اسپارکس ۲۰۰۳).

دو معادله دیگری که برای ارزیابی داده‌ها جذب فسفر بکار رفتند معادلات ون‌های و خطی بودند. معادله ون‌های به صورت (رفرنس):

$$q = m + n\sqrt{C}$$

m و n ثابتهای معادله ون‌های می‌باشند.

و معادله خطی به صورت زیر می‌باشد:

$$q = a + bC$$

کم‌ترین آن در خاک شماره ۵ می‌باشد. مقدار n_f بین ۰/۳۹ تا ۰/۹۳ با میانگین ۰/۵۷ بود و در خاک شماره ۲ کمترین و در خاک شماره ۱۶ بیشترین مقدار را داشت. مقادیر گزارش شده برای K_f ، ۲ تا ۷۷ لیتر بر کیلوگرم برای خاک‌های آهکی همدان بوسیله جلالی (۲۰۰۷)، ۱ تا ۱۶۸۱ لیتر بر کیلوگرم توسط سینها و جیلکز (۱۹۹۱) برای عمده خاک‌های جنوب غربی استرالیا و ۱ تا ۱۵۱ لیتر بر کیلوگرم توسط برترانت و همکاران (۲۰۰۳) برای خاک‌های قلیایی جنوب استرالیا می‌باشد.

در مدل خطی شیب خطوط به دست آمده که سنجشی از توانایی خاک در حفظ شدت فسفر در محلول خاک است، گنجایش بافری تعادلی (کمپلکو و طباطبایی ۱۹۹۷) نامیده می‌شود. این کمیت نشان دهنده تغییرات فاکتور کمیت برای هر واحد تغییر در فاکتور شدت است. به عبارت دیگر در خاک‌هایی با فسفر لبالی یکسان، در خاک‌های با EBC کم، شدت فسفر محلول بیشتر از خاک‌های با EBC بالا می‌باشد. بنابراین پس از خارج شدن فسفر از فاز محلول، جایگزینی فسفر خارج شده و افزایش فسفر در فاز محلول به میزان اولیه در خاک‌هایی با EBC کمتر آسانتر انجام می‌شود تا خاک‌هایی با EBC بالاتر. دامنه تغییرات EBC ۰/۲۶-۳۴۵/۰۴ با میانگین ۵۲/۴۴ لیتر بر میلی گرم می‌باشد. قدر مطلق عرض از مبدا (پارامتر a) در مدل خطی که نشان دهنده فسفر لبالی می‌باشد (کمپلکو و طباطبایی ۱۹۹۷)، در دامنه ۱/۲۷-۲۸/۴۳ با میانگین ۲۰/۰۶ میلی گرم در کیلوگرم بود. کمترین مقدار فسفر لبالی در خاک شماره ۲۱ و بیشترین آن در خاک شماره ۱۴ بود.

پارامترهای برآورد شده معادله لانگ مویر در خاک‌های مطالعه شده دارای تغییرات زیادی می‌باشند. پارامترهای وابسته به انرژی پیوند (k) که نشان دهنده قدرت نگهداری فسفر به وسیله ذرات خاک می‌باشد در دامنه ۰/۲۶-۱۱/۱۴ با میانگین ۲/۰۳ لیتر بر میلی گرم بود. این ویژگی می‌تواند بر مقدار فسفر جذب شده بوسیله گیاه تأثیر داشته باشد. در خاک‌های مطالعه شده در خاک ۱۴ پارامتر وابسته به انرژی پیوند بیشترین و در خاک ۸ کمترین مقدار را داشت. حداکثر جذب فسفر (b) در دامنه ۵۳/۸۵-۳۰۹/۰۱ با میانگین ۱۸۹/۷۳ میلی گرم بر کیلوگرم بود. این نتیجه نشان دهنده تفاوت توان خاک‌ها در جذب فسفر می‌باشد. بیشترین آن در خاک ۷ و کمترین آن در خاک ۵ وجود داشت.

به منظور مشخص کردن ارتباط خصوصیات خاک با ثابت‌های معادله های جذب فسفر از هم بستگی ساده (در مورد همبستگی‌های مربوط به پارامترهای معادل لانگ مویر و خصوصیات خاک، خاک‌هایی که معادله لانگ

خارج کردن فسفات از محلول است (جلالی ۲۰۰۷، کاسترو و تورنت ۱۹۹۸). همانطور که مشاهده می‌شود مقدار فسفر جذب شده با افزایش غلظت افزایش یافت. در خاک‌های آهکی، جذب فسفر بشدت تحت تأثیر واکنش-های جذب سطحی و رسوب در سطح کربنات کلسیم می‌باشد (فریمن و راول ۱۹۸۱، آمو و همکاران ۱۹۸۵). به نظر می‌رسد فرآیند جذب سطحی در کمتر از ۳/۱ میلی گرم در لیتر فسفر محلول، غالب باشد (هالفورد و مالینگلی ۱۹۷۵b، فریمن و راول ۱۹۸۱، پنا و تورنت ۱۹۹۰). تحت چنین شرایطی، اکسیدهای آهن و لبه سطوح کانی‌های رس تأمین کننده مکان‌های جذب بوده که تمایل آن‌ها خیلی بیشتر از $CaCO_3$ می‌باشد (هالفورد و مالینگلی ۱۹۷۵a، پنا و تورنت ۱۹۹۰). وقتی که فسفر به محلول کلسیت اضافه می‌شود، همچنانکه غلظت فسفر در محلول به بیش از ۳/۱ میلی گرم در لیتر افزایش می‌یابد نسبت به Ca-P غیر محلول فوق اشباع شده و باعث کاهش مقدار فسفر حل شده در اثر رسوب می‌شود (فریمن و راول ۱۹۸۱، آمو و همکاران ۱۹۸۵).

نتایج به دست آمده از برازش چهار مدل لانگ مویر، فروندلیچ، ون‌های و خطی برای جذب فسفر در هر خاک در جدول ۲ آمده است. مقادیر ضرایب تعیین نشان می‌دهند که سه مدل خطی، ون‌های و فروندلیچ (جدول ۲ و شکل‌های ۲ و ۳) در تمام خاک‌ها جذب فسفر به وسیله خاک را توصیف می‌کنند. ولی معادله لانگ مویر در تمام خاک‌ها قادر به توصیف جذب فسفر نبود.

معادله فروندلیچ برازش خوبی به داده‌ها داشت به طوری که ضریب تعیین (R^2) دامنه‌ای بین ۰/۹۲۷ تا ۰/۹۹۷ (میانگین ۰/۹۷۶) بود (جدول ۲). محققان زیادی نشان داده‌اند که معادله فروندلیچ می‌تواند جذب سطحی فسفر توسط خاک را توصیف کند (فیتز و ساتن ۱۹۷۵، مید ۱۹۸۱، پلی زو پولس و همکاران ۱۹۸۵، زو و همکاران ۱۹۹۷، جلالی ۲۰۰۷، لالیتانجانادهانان و داروب ۲۰۱۰). اگرچه پارامترهای فروندلیچ مفهوم فیزیکی ندارند، K_f مقدار فسفر جذب شده در غلظت تعادلی یک میلی گرم فسفر در لیتر می‌باشد (اسینگتن ۲۰۰۳) که مقداری برای ظرفیت جذب سطحی فسفر خاک می‌باشد (زو و لی ۲۰۰۱). توان این معادله (n_f) نشان دهنده میزان خمیدگی منحنی جذب می‌باشد که هر چه به سمت یک میل کند همگنی در سایت‌های جذبی بیشتر می‌شود (اسینگتن ۲۰۰۱). همانطور که نتایج نشان می‌دهند پارامترهای برآورد شده معادله فروندلیچ در خاک‌های مورد مطالعه متفاوت می‌باشد. ضریب توزیع (K_f) در معادله فروندلیچ در دامنه ۳۸/۲۸-۲۴۵/۷۵ با متوسط ۸۱/۱۹ لیتر بر کیلوگرم و

آزمایش‌های گلخانه‌ای

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر اضافه کردن کود فسفره بر عملکرد در سطح کمتر از یک درصد معنی‌دار می‌باشد و تقریباً تمام خاک‌ها نسبت به اضافه کردن فسفر پاسخ نشان دادند. میزان عملکرد در غلظت تعادلی (EPC) ۰/۳ میلی گرم بر لیتر، در تقریباً اکثر خاک‌ها ۸۵ تا ۱۰۰ درصد حداکثر عملکرد بود (شکل‌های ۴ و ۵).

شکل ۵ میانگین عملکرد در خاک‌های مختلف با اعمال غلظت‌های تعادلی فسفر در محلول خاک را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تا غلظت تعادلی ۰/۳ میلی گرم در لیتر میزان عملکرد به طور معنی‌داری ($P < 0.05$) افزایش یافته و پس از آن تغییرات عملکرد معنی‌دار نگردید.

این نتایج با نتایج بدست آمده توسط سایر محققان همخوانی دارد (فوکس و کمپرات ۱۹۷۰، ازان و شاو ۱۹۶۸). غلظت فسفر مورد نیاز برای رشد گونه‌های مختلف گیاهی متفاوت است. غلظت ۰/۲ میلی گرم بر لیتر بوسیله برخی محققان به عنوان میزان فسفر لازم برای حداکثر رشد گیاه پیشنهاد شده است. مهدی و همکاران (۱۹۹۰) مقادیر ۰/۳۱ و ۰/۴۵ میلی گرم بر لیتر و اوزان و شاو (۱۹۶۸) ۰/۳ میکروگرم بر میلی لیتر را به عنوان شدت مناسب فسفر در محلول خاک در نظر گرفتند. نیاز استاندارد فسفر در واقع نشان دهنده مقدار فسفری است که باید بوسیله یک خاک جذب شود تا غلظت ۰/۳ میلی گرم فسفر در لیتر را در محلول خاک ایجاد کند (فوکس و کمپرات ۱۹۷۰). تعیین غلظت تعادلی مناسب برای رشد گیاهان نیز مورد پژوهش بسیاری از محققان واقع گردیده است. صمدی (۲۰۰۳) پس از بررسی هم‌دماهای جذب فسفر در ۳۶ نمونه خاک از منطقه ارومیه در آزمایشی گلخانه‌ای بر روی ۱۴ نمونه خاک وبا پنج سطح فسفر (غلظت فسفر از ۰/۲ تا ۱/۲ میلی گرم در لیتر که مقدار فسفر مورد نیاز از هم‌دماهای جذب محاسبه و مصرف گردید) بهترین غلظت تعادلی برای رشد گندم را ۰/۴ میلی گرم فسفر در لیتر بدست آورد. براساس آزمایش‌های مختلف انجام شده هر چند این غلظت متفاوت است اما مقدار ۰/۲ میلی گرم در لیتر برای اکثر گیاهان به منظور حصول حداکثر رشد پیشنهاد شده است. برای گندم ۰/۳ میلی گرم در کیلوگرم به عنوان یک استاندارد عمومی به کار برده می‌شود.

اثر تیمارها بر غلظت فسفر قابل جذب خاک

نتایج تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که اثر تیمارها بر غلظت فسفر قابل جذب خاک کاملاً معنی‌دار

مؤثر قادر به توصیف جذب فسفر در آنها نبود حذف گردید) استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که ثابت K معادله لانگ مویر با هیچکدام از ویژگی‌های خاک همبستگی معنی‌داری ندارد. در مطالعه حسین پور و عنایت ضمیر (۱۳۸۱) نیز رابطه‌ای بین این شاخص‌ها و درصد رس مشاهده نشد. دلیل آن را احتمالاً تفاوت نوع رس در خاک‌ها و تعیین درصد رس بدون حذف کربنات کلسیم دانستند که این می‌تواند باعث خطا در تعیین رس خاک گردد. شیروانی و شریعتمداری (۱۳۸۱) بیان کردند که ثابت K معادله لانگ مویر با درصد رس، کربنات کلسیم معادل و CEC خاک هم بستگی معنی‌داری دارند. ثابت فروندلیچ به جز رس با هیچکدام از ویژگی‌های خاک همبستگی معنی‌داری نداشت. در مطالعه زو و لی (۲۰۰۱) K_f فروندلیچ و حداکثر جذب لانگ مویر همبستگی معنی‌داری با رس غیرکربناتی داشتند. ضریب n معادله ون‌های همبستگی معنی‌داری در سطح پنج درصد با کربن آلی، رس و فسفر اندازه‌گیری شده به روش اولسن داشت، ولی رابطه آن با دیگر ویژگی‌های خاک بررسی شده معنی‌دار نبود. شیروانی و شریعتمداری (۱۳۸۱) گزارش کردند که شیب خط معادله ون‌های که شاخص دیگری برای شاخص بافری خاک می‌باشد، رابطه قوی با درصد رس و CEC خاک دارد ولی با CCE ارتباط معنی‌داری ندارد.

رایان و همکاران (۱۹۸۵) گزارش کردند که جذب فسفر در خاک‌ها بیشتر در ارتباط با مقدار اکسید آهن می‌باشد تا مقدار کربنات کلسیم. سولیز و تورنت (۱۹۸۹) دریافتند که گنجایش بافری فسفر خاک شدیداً در ارتباط با مقدار رس و اکسید آهن می‌باشد و کربنات کلسیم نقش کمتری در جذب فسفر دارد. هر چند شارپلی و اسمیت (۱۹۸۵) دریافتند که غلظت فسفر لبایل خاک‌ها در خاک‌های آهکی بعد از کوددهی همبستگی معکوسی با مقدار کربنات کلسیم داشت. افیف و همکاران (۱۹۹۳) گزارش کردند که نسبت فسفر عصاره‌گیری شده به روش اولسن با فسفر به کار رفته در مقادیر کم کاربرد فسفر با مقدار کربنات کلسیم همبستگی معکوسی داشتند.

بررسی وجود همبستگی معنی‌دار بین پارامترهای معادله‌های مختلف جذب نشان داد که همبستگی معنی‌دار بین پارامترهای K_f و EBC، $R^2=0.88$ و K_f ، $(p < 0.001)$ و $(R^2=0.92, p < 0.001)$ و EBC و $(R^2=0.90, p < 0.001)$ وجود دارد. شیروانی و شریعتمداری (۱۳۸۱) و حسین پور و عنایت ضمیر (۱۳۸۵) نتایج مشابهی گزارش کردند.

قابل استخراج می‌باشد. همچنین با گذشت زمان فسفر اضافه شده به خاک به طور فزاینده‌ای غیر محلول یا بوسيله انتشار در منافذ ریز خاک که برای عصاره‌گیرها کمتر قابل دسترس هستند وارد می‌شود. همچنین ممکن است باقی مانده در سایت‌های جذبی تشکیل پیوندهای قوی داده که در فرآیند تشکیل کانی‌های فسفر دخالت می‌کند (فریدمن و راول ۱۹۸۱، باراملی و همکاران ۱۹۹۲، جاوید و راول ۲۰۰۲). پس از افزایش مقدار فسفر خاک، زمان قابل توجهی مورد نیاز است تا به مقدار معنی داری تخلیه شود. برای مثال، مک کالوم (۱۹۹۱) تخمین زد که بدون اینکه فسفر بیشتری اضافه گردد، ۱۶-۱۸ سال کشت ذرت و سویا برای کاهش مقدار فسفر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تا حد آستانه کشاورزی ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم لازم است.

پیش بینی ضریب بافری فسفر از روی خصوصیات خاک

تجزیه آماری نتایج نشان داد که ضریب بافری با مقادیر رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، اسیدیته، ماده آلی، درصد رطوبت اشباع رابطه معنی‌داری ندارد. این نتایج، مشابه نتایج بدست آمده بوسیله ونگ و همکاران (۲۰۰۰) بود. آن‌ها نشان دادند که ضریب بافری فسفر با پتانسیل جذب فسفر، اندازه خاکدانه‌ها، و توده واکنش دهنده، و لگاریتم SP_{site} (soil P sorption site density) رابطه معنی‌داری دارد. این رابطه نشان از پیچیدگی تأثیر فاکتورهای مختلف فیزیکی، شیمیایی و مینرالوژیکی بر جذب فسفر و فرآیندهای استخراج دارد. نوع و مقدار کانی‌های خاک تعیین کننده تعداد مکان‌های جذبی، که رابطه نزدیکی با کل پتانسیل جذب فسفر دارد می‌باشد (جکمن و همکاران ۱۹۹۷). به عبارت دیگر خصوصیات فیزیکی، انتشار فسفر به داخل خاکدانه‌ها را از طریق نگهداری رطوبت، اندازه خاکدانه، و پایداری تحت تأثیر قرار می‌دهد. توده واکنش دهنده ممکن است نشان دهنده چنین تأثیرات فیزیکی روی جذب فسفر باشد. بدین ترتیب جنبه‌های فیزیکی و شیمیایی جذب به نظر می‌رسد برای تخمین ضریب بافری مهم باشد (ونگ و همکاران ۲۰۰۰). مقایسه بین ضریب بافری با مقادیر $PS_{0.3}$ (مقدار فسفر جذب شده در غلظت تعادلی ۰/۳ میلی‌گرم در لیتر) نشان داد که اندازه‌گیری جذب فسفر با روش‌های انکوباسیونی و منحنی‌های هم‌دماهای جذب مشابه نمی‌باشد.

درصد بازیابی فسفر از رابطه $R = [Q_{ex} - Q_a] \times 100 / Q_{ex}$ محاسبه گردید (اوستان و توفیقی ۱۳۸۳) که در آن R درصد بازیابی، Q_a مقدار فسفر اضافه شده به خاک، Q_{ex} مقدار فسفر استخراج شده از تیمارهای کودی و Q_{ex0} مقدار فسفر استخراج شده از تیمار شاهد است. میانگین بازیافت فسفر برای تیمارهای مختلف از ۱۲ تا ۵۰

بود ($P \leq 0.01$). همستگی خطی بین فسفر اضافه شده و فسفر استخراج شده با روش اولسن در تمام خاک‌ها وجود داشت که R^2 آن بین ۰/۹۶ تا ۰/۹۹ با میانگین ۰/۹۸ بود (شکل ۶، جدول ۳) بود. شیب خط برازش شده به داده‌های فسفر استخراج شده در مقابل فسفر اضافه شده از ۰/۲۳ تا ۰/۴۷ تغییر کرد که متوسط آن ۰/۳۸ بود. مطالعات زیادی نیز رابطه خطی بین فسفر اضافه شده و فسفر استخراج شده را نشان داده‌اند (جلالی ۲۰۰۶، بارو ۱۹۷۴، مک‌لین و همکاران ۱۹۸۳، شارپلی و آجا ۱۹۸۳، شارپلی و همکاران ۱۹۸۴). همچنین عرض از مبدا این خط بین ۱/۸ تا ۳۱/۵ تغییر کرد. رابط بین عرض از مبدا خط برازش شده و فسفر اولسن بومی خاک خطی بود با $R^2 = 0.97$ (شکل ۷). این نشان می‌دهد که اگر چنانچه شیب خاک مورد نظر را با تقریب قابل قبولی از روی خصوصیات خاک تخمین زده شود می‌توان با داشتن فسفر بومی خاک مقدار فسفر مورد نیاز برای رساندن فسفر اولسن خاک به سطح مورد نظر را با تقریب قابل قبولی تخمین زد. نتایج این مطالعه نشان داد که برای افزایش ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر اولسن خاک‌های مورد مطالعه، بایستی بین ۳۱ تا ۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر به این خاک‌ها اضافه گردد (با میانگین ۴۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و انحراف معیار ۱۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم). اگر چنانچه وزن یک هکتار خاک را ۲۰۰۰ تن در نظر بگیریم این مقدار بین ۶۲ تا ۱۴۷ کیلوگرم فسفر در هکتار یا ۳۱۸ تا ۷۴۵ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل در هکتار خواهد بود. جانستون (۲۰۰۱) و جانستون و همکاران (۲۰۰۱) نشان دادند که برای اینکه فسفر اولسن خاک ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اضافه شود بسته به سال‌هایی که تعادل اتفاق افتاده بین ۲۹ تا ۷۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر مورد نیاز است. آزمایش‌های جاوید و راول (۲۰۰۲) نشان داد که ۳۰ تا ۱۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر برای چنین افزایشی مورد نیاز است. جلالی، ۲۰۰۶ گزارش کرد برای این افزایش ۲۳-۵۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر مورد نیاز می‌باشد. جلالی با مطالعه چهار خاک نشان داد که شیب خط برازش شده پس شصت روز از اضافه کردن فسفر به خاک بین ۰/۱۸ تا ۰/۲۷ تغییر می‌کند. ال خطیب و همکاران (۱۹۸۶) نشان دادند که واکنش‌های فسفر اضافه شده به خاک‌ها کاملاً سریع بوده و در زمان بسیار کوتاه، در زمان اضافه شدن، هنگامی که فسفر به خاک اضافه می‌شود فسفر محلول در آب را به ترکیبات کم محلول تبدیل می‌کند.

جلالی (۲۰۰۷) نشان داد که ۹۸-۹۹/۷ درصد فسفر اضافه شده به خاک‌های مورد مطالعه جذب شده یا رسوب می‌کنند که تنها قسمتی از آن توسط روش اولسن

بیشتر باشد به مصرف کود فسفره عکس‌العمل مثبتی نشان می‌دهد. فرقانی (۱۳۷۰) این سطح را برای گیاه ذرت در خاک‌های آهکی منطقه اصفهان ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و نوایی و همکاران (۱۳۷۷) سطح بحرانی فسفر برای محصول پنبه را ۱۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آوردند. کریمیان و قنبری (۱۹۹۰) سطح بحرانی فسفر در خاک را ۱۸ میلی‌گرم در کیلوگرم اعلام کردند.

اثر تیمارها بر غلظت و جذب فسفر در گیاه

نتایج تجزیه و تحلیل آماری نشان داد که با افزایش سطوح کودی فسفر، غلظت فسفر گیاه به طور کاملاً معنی‌داری افزایش می‌یابد ($P \leq 0.01$). بیشترین مقدار غلظت فسفر در گیاه در تیمار غلظت تعادلی ۱/۲ میلی‌گرم در لیتر اعمال شده بود. همچنین اگرچه با افزایش غلظت تعادلی اعمال شده درصد فسفر در گیاه افزایش یافت ولی این افزایش خطی نبوده و با افزایش غلظت تعادلی، شیب آن کاهش می‌یابد. (شکل ۱۰).

همبستگی معنی‌داری در سطح یک درصد بین فسفر استخراج شده به روش اولسن و غلظت فسفر و همچنین جذب کل فسفر وجود داشت (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). عطاردی و نادری (۱۳۸۸) پنج عصاره‌گیر را مورد مقایسه قرار دادند و با مقایسه ضرایب همبستگی بین مقدار فسفر استخراج شده توسط هر عصاره‌گیر و با پاسخ گیاه سورگوم به این نتیجه رسیدند که بالاترین همبستگی بین فسفر کل جذب شده و عصاره‌گیری به روش اولسن وجود دارد.

نتیجه‌گیری

هم‌دها‌های جذب اطلاعات مفیدی در مورد توانایی خاک‌ها برای جذب فسفر و عوامل موثر بر آن‌ها ارائه می‌دهند. معادله‌های فروندلیچ و ون‌های به خوبی جذب فسفر توسط خاک‌ها را توضیح دادند. می‌توان با داشتن فسفر بومی خاک مقدار فسفر مورد نیاز برای رساندن فسفر اولسن خاک به سطح مورد نظر را با تقریب قابل قبولی تخمین زد. نتایج این مطالعه نشان داد که برای افزایش ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر اولسن خاک‌های مورد مطالعه، بایستی بین ۳۱ تا ۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر به این خاک‌ها اضافه گردد. به نظر می‌رسد سطح فسفر در محلول خاک، کنترل‌کننده جذب فسفر بوسیله گیاه باشد و با افزایش غلظت فسفر در محلول خاک تا ۰/۳ میلی‌گرم بر لیتر عملکرد افزایش می‌یابد و پس از آن افزایش، معنی‌دار نمی‌باشد. پیش‌بینی بازایی کود فسفر در خاک‌های قلیایی بسیار پیچیده بوده و حتی گاهی پنج ویژگی خاک برای برآورد نسبتاً دقیق بازایی کود فسفر در این خاک‌ها کافی نمی‌باشد.

درصد برای خاک‌های مختلف تغییر می‌کرد و میانگین آن ۳۷ درصد بود این بدان معناست که حدوداً ۶۳ درصد فسفر اضافه شده در این زمان به صورت غیر قابل استفاده در آمده است. تفاوت معنی‌داری در سطح پنج درصد بین میانگین بازیافت در تیمارهای مختلف وجود نداشت (شکل ۸).

جلالی (۲۰۰۶) گزارش کرد که به طور متوسط ۷۹ درصد فسفر اضافه شده بعد از ۹۰ روز به صورت غیر قابل تبادل در می‌آید. در مطالعه‌ای دیگر جلالی و کلاچی (۲۰۰۴) متوجه شدند که ۷۵ و ۸۲ درصد فسفر اضافه شده به خاک‌های آهکی بعد از ۲۱ روز از انکوباسیون غیر قابل استخراج می‌شوند. جاوید و راول (۲۰۰۲) نشان دادند که بین ۴۵ تا ۸۰ درصد فسفر اولسن بعد از ۱۰۰ روز در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد بصورت غیر قابل استخراج در می‌آید. آن‌ها نتیجه گرفتند که در مزرعه کاهش سریع در فسفر اولسن بین زمانی که کود فسفره اضافه می‌شود و زمانی که گیاه کشت شده و حداکثر نیاز به فسفر را دارد اتفاق می‌افتد و به دلیل جذب قوی خاک‌ها قسمت زیادی از فسفر اضافه شده به صورت غیر قابل استخراج در می‌آید. اوستان و توفیقی (۱۳۸۳) نشان دادند که کاهش بازایی کود فسفر در تمام خاک‌های مورد مطالعه در ابتدا شدید بوده و سپس کند می‌شود و آن‌ها بیان کردند که پیش‌بینی بازایی کود فسفر در خاک‌های قلیایی بسیار پیچیده بوده و حتی گاهی پنج ویژگی خاک برای برآورد نسبتاً دقیق بازایی کود فسفر در این خاک‌ها کافی نمی‌باشد.

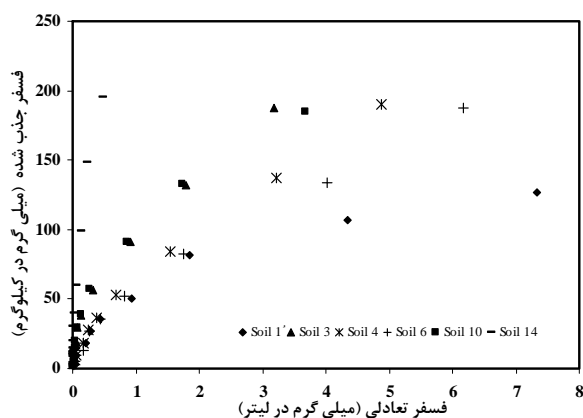
رابطه بین فسفر اولسن و شاخصهای گیاهی (سطح بحرانی)

نتایج این بررسی نشان داد که سطح بحرانی فسفر برای عصاره‌گیر بی‌کربنات سدیم (روش اولسن) به روش ترسیمی و آماری کیت - نلسن (۱۹۷۱) برابر با ۱۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک می‌باشد (شکل ۹). این سطح نشان می‌دهد که احتمال مشاهده پاسخ معنی‌دار به کود و یا افزایش قابل ملاحظه در عملکرد در خاک‌هایی که مقدار آزمون خاک در آنها کمتر از ۱۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است بسیار بیشتر از گروهی است که این مقدار بیشتر از ۱۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است. حد بحرانی بسته به نوع گیاه، اقلیم و نوع خاک فرق می‌کند و تعیین آن برای یک نوع گیاه و در یک خاک خاص یک قدم اساسی در کاربرد آزمون خاک در توصیه کودی می‌باشد. مالارنیو و بلکمر (۱۹۹۲) حد بحرانی فسفر برای گیاه ذرت در ایالت ایوا را ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش کردند. جیمز و همکاران (۱۹۹۷) در خاک‌های آهکی با pH بالا گزارش کردند که سورگوم تحت شرایطی که غلظت فسفر عصاره‌گیری شده به روش اولسن از ۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم هم

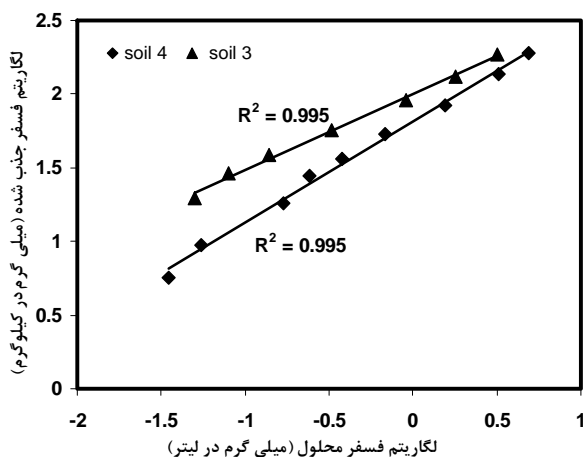
اعتبارات این طرح از محل طرح خود کفایی گندم تأمین شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاکهای مورد مطالعه

خصوصیت	واحد	کمترین	بیشترین	میانگین	انحراف معیار
قابلیت هدایت الکتریکی	dSm^{-1}	۰/۷	۳/۴	۱/۴	۰/۷
کربنات کلسیم معادل	$g\ kg^{-1}$	۱۲	۵۶۸	۲۰۴	۱۸۳
pH گل اشباع		۷/۰	۸/۲	۷/۶	۰/۲
رطوبت ظرفیت مزرعه	$g\ kg^{-1}$	۶۹	۴۳۵	۳۱۴	۸۳
کربن آلی	$g\ kg^{-1}$	۱	۱۷	۹	۵
سیلت	$g\ kg^{-1}$	۱۶۰	۵۴۰	۳۸۲	۱۱۳
رس	$g\ kg^{-1}$	۸۰	۵۲۰	۳۳۲	۱۲۵
فسفر قابل استفاده	$mg\ kg^{-1}$	۱/۲	۳۴/۸	۹/۳	۷/۸
ظرفیت تبادل کاتیونی	$cmol_c\ kg^{-1}$	۲/۵	۴۴/۴	۲۰/۶	۸/۲



شکل ۱- هم‌دمای جذب فسفر در تعدادی از خاکهای مورد مطالعه

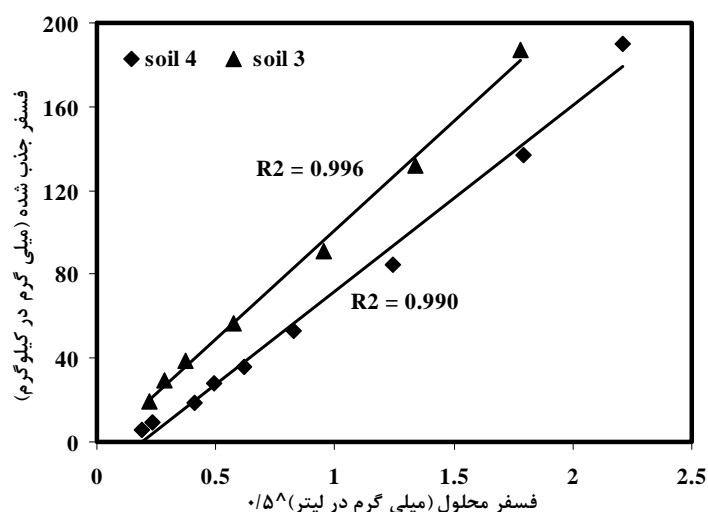


شکل ۲- برازش فرم خطی معادله فروندلیچ بر داده جذب فسفر در خاکهای ۳ و ۴

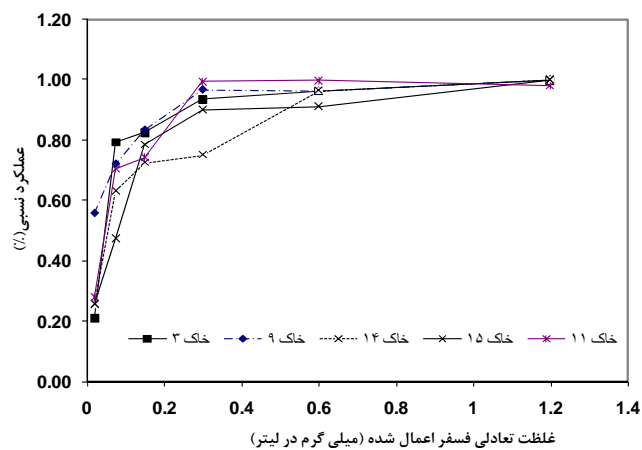
جدول ۲- پارامترها و ضرایب تعیین مربوط به معادلات برازش شده بر داده‌های جذب فسفر

معادله خطی			معادله ون های			معادله فرندلیچ			معادله لانگمیر			شماره خاک
R ²	b(EBC) (L kg ⁻¹)	a (mg kg ⁻¹)	R ²	n (L kg ⁻¹) ^{0.5}	m (mg kg ⁻¹)	R ²	n _f	k _f (L kg ⁻¹)	R ²	b (mg kg ⁻¹)	K (L mg ⁻¹)	
۰/۸۷	۱۷/۰۹	۱۹/۳۰	۰/۹۸	۵۰/۳۵	-۰/۵۴	۰/۹۳	۰/۶۲	۴۸/۶۴	۰/۹۸	۱۴۳/۰۶	۰/۸۲	۱
۰/۹۱	۱۰۵/۶۸	۳۵/۷۲	۰/۹۹	۱۲۴/۸۶	۱۴/۵۳	۰/۹۸	۰/۳۹	۱۳۹/۹۸	۰/۹۸	۱۴۸/۷۱	۹/۱۲	۲
۰/۹۷	۵۱/۹۰	۳۱/۲۷	۱/۰۰	۱۰۳/۹۹	-۲/۸۷	۱/۰۰	۰/۵۲	۱۰۰/۲۸	۰/۹۴	۹۲/۵۳	۳/۰۳	۳
۰/۹۸	۳۶/۹۸	۱۶/۴۴	۰/۹۹	۸۸/۷۷	-۱۶/۵۷	۱/۰۰	۰/۶۹	۶۵/۲۴	۰/۹۱	۲۴۳/۹۹	-/۴۹	۴
۰/۹۶	۲۹/۸۸	۶/۸۷	۰/۹۹	۴۰/۰۲	-۲/۸۷	۰/۹۷	۰/۵۸	۳۸/۲۸	۰/۹۰	۵۳/۸۵	۲/۴۲	۵
۰/۹۷	۲۹/۳۱	۱۴/۴۷	۰/۹۹	۷۶/۴۶	-۱۲/۹۹	۰/۹۹	۰/۶۷	۵۵/۹۴	۰/۸۹	۲۲۵/۲۱	-/۴۸	۶
۰/۹۸	۶۲/۸۷	۱۳/۶۸	۰/۹۷	۱۲۱/۵۵	-۲۷/۰۳	۰/۹۸	۰/۷۷	۸۶/۰۱	۰/۸۴	۳۰۹/۰۱	-/۴۵	۷
۰/۹۹	۲۹/۵۷	۹/۷۹	۰/۹۸	۷۷/۰۳	-۲۰/۱۷	۰/۹۹	۰/۶۸	۵۴/۴۱	۰/۸۵	۲۷۳/۸۵	-/۲۶	۸
۰/۹۵	۵۷/۲۹	۱۷/۵۸	۱/۰۰	۱۱۰/۰۶	-۱۲/۳۴	۰/۹۵	۰/۷۷	۱۰۰/۹۸	۰/۹۲	۲۴۳/۶۹	-/۸۳	۹
۰/۹۳	۴۵/۷۹	۳۲/۰۷	۱/۰۰	۹۷/۱۱	۱/۸۸	۰/۹۸	۰/۵۲	۱۰۰/۹۹	۰/۹۶	۲۰۳/۴۲	۱/۶۴	۱۰
۰/۹۶	۳۱/۷۴	۳۵/۲۲	۱/۰۰	۷۸/۹۸	۶/۶۵	۱/۰۰	۰/۴۳	۸۷/۹۸	۰/۹۴	۲۰/۰/۸۰	۱/۳۰	۱۱
۰/۹۷	۳۰/۳۸	۱۸/۰۶	۰/۹۸	۷۵/۶۳	-۶/۳۲	۰/۹۹	۰/۵۸	۶۵/۹۶	۰/۸۶	۱۹۹/۲۴	-/۸۱	۱۲
۰/۹۳	۵۱/۵۴	۲۳/۰۶	۱/۰۰	۱۰۳/۳۷	-۶/۰۶	۰/۹۳	۰/۷۲	۱۰۰/۳۲	۰/۹۴	۲۲۳/۰۷	۱/۰۷	۱۳
۰/۹۳	۳۴۵/۰۴	۴۳/۲۸	۰/۹۸	۲۷۱/۵۱	۸/۱۱	۰/۹۷	۰/۴۱	۲۴۵/۷۵	۰/۹۲	۲۱۹/۰/۸	۱۱/۱۴	۱۴
۰/۸۳	۱۸/۴۶	۲۷/۰۱	۰/۹۵	۴۶/۳۳	۱۱/۶۱	۰/۹۹	۰/۳۹	۶۲/۴۴	۰/۹۸	۱۰۹/۷۷	۳/۰۰	۱۵
۰/۹۹	۴۴/۰۵	۵/۷۹	۰/۹۸	۱۰۰/۴۷	-۳۴/۶۱	۰/۹۹	۰/۹۳	۵۲/۷۰	-	-	-	۱۶
۰/۹۷	۲۶/۶۱	۱۴/۹۳	۰/۹۸	۶۷/۵۶	-۵/۶۶	۰/۹۷	۰/۶۲	۵۸/۷۱	۰/۸۹	۱۸۵/۳۹	-/۷۳	۱۷
۰/۹۸	۲۹/۰۲	۱۳/۶۴	۰/۹۹	۶۵/۰۹	-۸/۹۷	۱/۰۰	۰/۶۱	۵۲/۵۱	۰/۸۷	۱۵۹/۶۲	-/۷۱	۱۸
۰/۹۷	۳۵/۱۰	۲۴/۴۸	۰/۹۹	۷۹/۹۶	-/۹۶	۰/۹۹	-/۴۶	۸۰/۵۹	۰/۹۲	۱۸۶/۳۸	۱/۴۴	۱۹
۰/۹۶	۳۵/۱۳	۱۹/۳۶	۰/۹۹	۸۱/۷۰	-۶/۳۸	۰/۹۴	۰/۵۷	۷۰/۶۷	۰/۹۰	۲۰۰/۲۶	-/۸۹	۲۰
۰/۸۶	۰/۲۶	۱/۲۷	۰/۹۹	۴۵/۴۳	-۰/۵۷	۱/۰۰	۰/۵۰	۴۴/۵۸	۰/۹۳	۹۰/۶۷	۱/۲۷	۲۱
۰/۹۹	۲۸/۸۸	۷/۰۲	۰/۹۶	۷۲/۹۸	-۲۰/۵۴	۰/۹۶	۰/۸۰	۴۲/۳۲	-	-	-	۲۲
۰/۹۳	۶۳/۴۹	۳۱/۰۳	۰/۹۸	۱۲۷/۸۰	-۱۵/۹۴	۰/۹۵	۰/۶۸	۱۱۰/۱۳	۰/۹۵	۲۷۲/۶۳	-/۸۰	۲۳

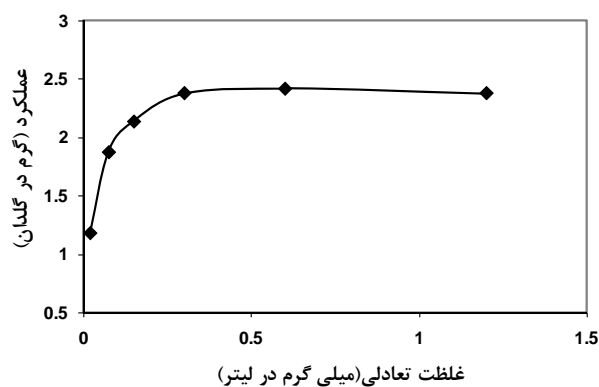
R² در سطح کمتر از یک درصد معنی دار می باشد



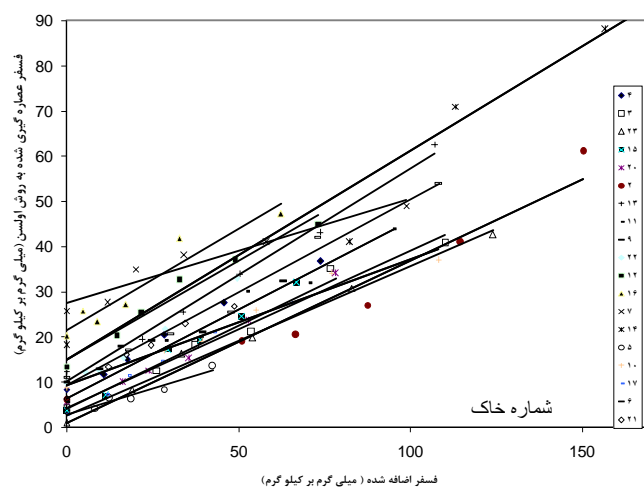
شکل ۳- برازش معادله ون های بر داده جذب فسفر در خاکهای ۳ و ۴



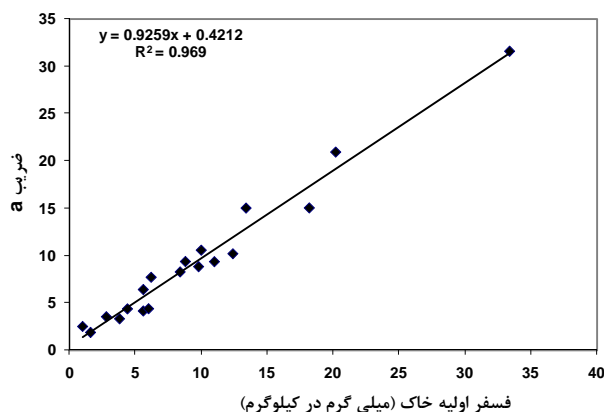
شکل ۴- رابطه بین عملکرد گندم و غلظت تعادلی فسفر اعمال شده در محلول خاک



شکل ۵- رابطه بین مقدار عملکرد و غلظت تعادلی اعمال شده در محلول خاک (هر نقطه میانگین ۵۷ گلان کشت شده می باشد)



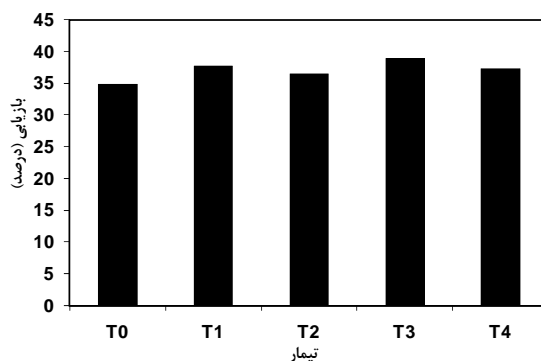
شکل ۶- رابطه بین فسفر اضافه شده و فسفر اندازه‌گیری شده به روش اولسن



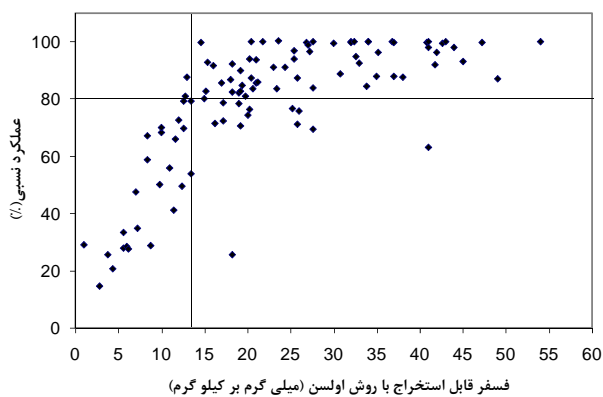
شکل ۷- رابطه بین فسفر اولیه خاک و صریب a معادلات خطی

جدول ۳- رابطه بین فسفر اضافه شده (mg/kg) با فسفر اولسن (mg/kg) و مقایسه صریب بافری فسفر با فسفر جذب شده در غلظت تعادلی ۳/۰ (mg/L)

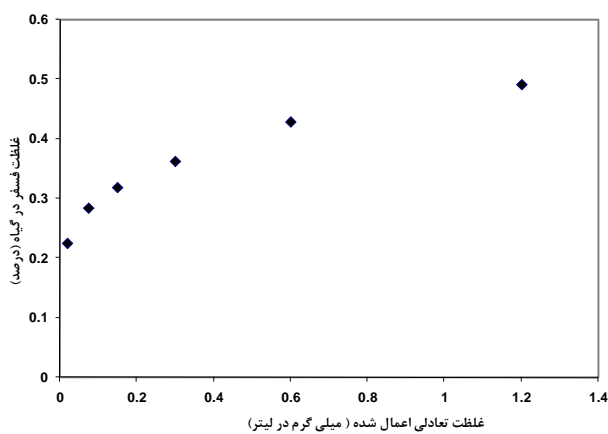
شماره خاک	R ²	شیب	عرض لمبدا	P value	PS _{0.3}
۴	۰/۹۹	۰/۳۹۷	۸/۲۶	۱/۶۰×۱۰ ^{-۵}	۲۸/۵
۳	۰/۹۷	۰/۳۴۸	۴/۳۶	۲/۸۲×۱۰ ^{-۴}	۵۳/۹
۲۳	۰/۹۹	۰/۳۳۱	۲/۵۰	۳/۵۷×۱۰ ^{-۵}	۵۴/۱
۱۵	۰/۹۹	۰/۴۲۳	۳/۳۰	۱/۹۵×۱۰ ^{-۵}	۳۸/۹
۲۰	۰/۹۹	۰/۳۶۸	۴/۱۳	۷/۷۸×۱۰ ^{-۵}	۳۵/۷
۲	۰/۹۹	۰/۳۷۶	۴/۳۷	۶/۳۵×۱۰ ^{-۴}	۸۷/۵
۱۳	۰/۹۹	۰/۴۷۱	۱۰/۱۷	۳/۱۷×۱۰ ^{-۵}	۵۰/۶
۱۱	۰/۹۸	۰/۳۹۳	۶/۳۹	۱/۸۵×۱۰ ^{-۴}	۵۲/۴
۹	۰/۹۸	۰/۴۱۱	۹/۳۴	۱/۳۳×۱۰ ^{-۴}	۴۸/۰
۲۲	۰/۹۹	۰/۴۷۲	۸/۸۱	۴/۴۳×۱۰ ^{-۵}	۱۶/۶
۱۲	۰/۹۷	۰/۴۳۵	۱۴/۹۹	۳/۲۴×۱۰ ^{-۴}	۳۲/۸
۱۶	۰/۹۹	۰/۴۲۰	۲۰/۹۱	۲/۱۰×۱۰ ^{-۴}	۱۷/۲
۷	۰/۹۹	۰/۱۷۴	۳۱/۵۵	۳/۵۰×۱۰ ^{-۴}	۳۴/۲
۱۴	۰/۹۷	۰/۴۶۳	۱۵/۰۱	۲/۸۳×۱۰ ^{-۴}	۱۵۶/۸
۵	۰/۹۶	۰/۲۶۳	۱/۸۷	۵/۴۰×۱۰ ^{-۴}	۱۸/۹
۱۰	۰/۹۶	۰/۳۷۸	۹/۳۵	۴/۶۷×۱۰ ^{-۴}	۵۵/۱
۱۷	۰/۹۹	۰/۳۸۳	۳/۵۳	۶/۰۷×۱۰ ^{-۵}	۲۷/۸
۶	۰/۹۸	۰/۳۵۰	۱۰/۵۵	۹/۹۱×۱۰ ^{-۴}	۲۵/۰
۲۱	۰/۹۸	۰/۴۱۸	۷/۶۹	۲/۰۱×۱۰ ^{-۴}	۲۴/۵



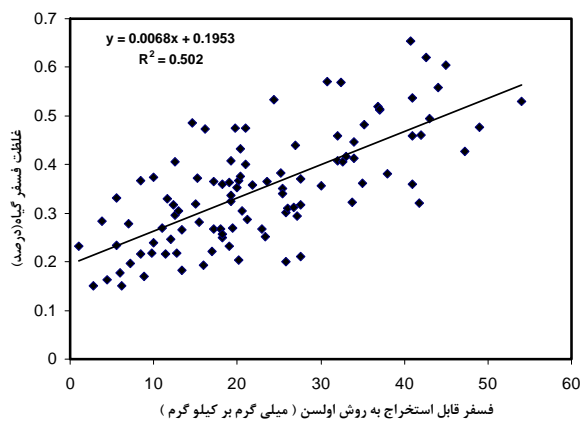
شکل ۸- درصد بازایی فسفر در تیمارهای مختلف فسفر تعادلی اعمال شده



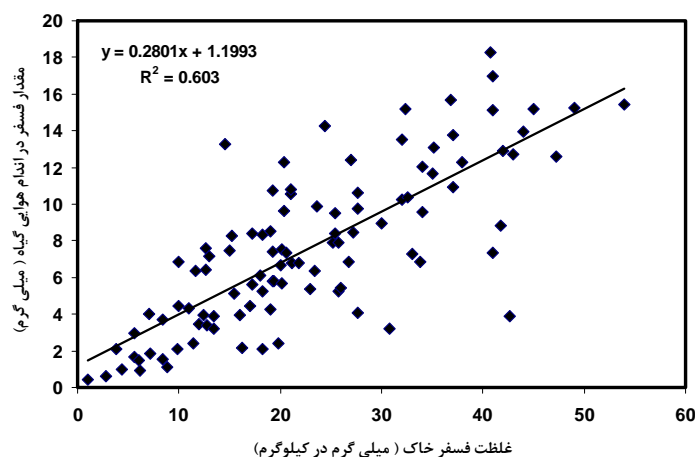
شکل ۹- نمودار پراکندگی درصد محصول گندم نسبت به مقدار فسفر قابل استخراج با روش اولسن و تعیین سطح بحرانی به روش تصویری و آماری



شکل ۱۰- رابطه بین غلظت تعادلی اعمال شده و غلظت فسفر در گیاه



شکل ۱۱- رابطه بین فسفر اولسن و غلظت فسفر در گیاه



شکل ۱۲- رابطه بین فسفر قابل استفاده و مقدار فسفر جذب شده در اندام هوایی گیاه گندم

فهرست منابع

۱. اوستان، ش. و ح. توفیقی. ۱۳۸۳. برآورد فسفر قابل استفاده باقیمانده در برخی از خاکهای ایران. مجله علوم کشاورزی ایران. جلد ۳۵، شماره ۳-۵۳۱-۵۴۰.
۲. حسین پور، ع. و خ. عنایتضمیر. ۱۳۷۷. مشخصات جذب سطحی فسفر و رابطه آن با ویژگی‌های خاک در شماری از خاک‌های همدان. مجله علوم کشاورزی ایران. جلد ۲۹، شماره ۴.
۳. شهبازی، ک. ۱۳۸۶. تهیه بانک اطلاعات مکاندار حاصلخیزی خاک در کشور. گزارش نهایی، شماره ۱۳۵۴، موسسه تحقیقات خاک و آب.
۴. شیروانی، م. و ح. شریعتمداری. ۱۳۸۱. استفاده از هم‌دماهای جذب در تعیین شاخص‌های ظرفیت بافری و نیاز استاندارد فسفر برخی خاک‌های آهکی استان اصفهان. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. جلد ۶، شماره ۱، ۱۲۹-۱۲۱.
۵. عطاردی، ب. م. نادری. ۱۳۸۸. تعیین عصاره‌گیر مناسب و حد بحرانی فسفر برای سورگوم در خاک آهکی منطقه بیرجند. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. سال سیزدهم. شماره ۵۰، ۱۴۵-۱۳۳.
۶. فرقانی، ا. ۱۳۷۰. تعیین حد بحرانی فسفر برای گیاه ذرت در خاکهای آهکی منطقه اصفهان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۷. کریمیان، ن. ۱۳۷۲. تفسیر نتایج آزمون خاک بر اساس خصوصیات فیزیکی و شیمیایی. گزیده مقالات ارائه شده در سومین کنگره علوم خاک ایران. کرج ۶۵-۷۶.
۸. نوایی، ف. ۱۳۷۷. تعیین نقطه بحرانی فسفر و پتاسیم برای محصول پنبه. وزارت جهاد کشاورزی، موسسه تحقیقات خاک و آب.
9. Afif, E., A. Matar, & J. Torrent. 1993. Availability of phosphate applied to calcareous soils of west Asia, and North Africa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:756-760
10. Al-Khateeb IK, Rajhan MJ, Asker SR. 1986. Phase equilibria and kinetics of orthophosphate in some Iraqi soils. *Soil Sci* 141:31 – 37.
11. Allison, L. E. and C. D. Moodi. 1962. Carbonates. PP 1379-1396. In: C. A. Black et al. (ed), *Methods of Soil Analysis. Part 2*, Am. Soc Agron., Madison, WI.
12. Amer F, Mahmoud AA, Sabet V (1985) Zeta potential and surface area of calcium carbonate as related to phosphate sorption. *Soil Sci Soc Am J* 49:1137-1142

13. Asher, C. J., and J. F. Loneragan. 1967. Response of plants to phosphate concentration in solution culture I. Growth and phosphate concentration in solution culture. *Soil Sci.* 103:225-233.
14. Barber, S. A. 1962. A diffusion and mass flow concept of soil nutrient availability. *Soil Sci.* 94:409-412.
15. Barrow NJ. 1974. Effect of previous additions of phosphate on phosphate adsorption by soil. *Soil Sci* 118:82 – 89.
16. Beckwith, R. S. 1964. Sorbed phosphate at standard supernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soils. *Aust. J. Exp. Agr. And An Hus.* 5: 52-58.
17. Bertrand I, Holloway RE, Armstrong RD, McLaughlin MJ (2003) Chemical characteristics of phosphorus in alkaline soils from southern Australia. *Aust J Soil Res* 41:61-76
18. Borrero, C., F. Pena, and J. Torrent. 1988. Phosphate sorption by calcium carbonate in some soils of the Mediterranean part of Spain. *Geoderma*, 42:261-269.
19. Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54: 464-465
20. Bramley RGV, Barrow NJ, Shaw TC (1992) The reaction between phosphate and dry soil. I. The effect of time, temperature and dryness. *J Soil Sci* 43:749-758
21. Cassel, D. K. & D. R. Nielsen. 1986. Field capacity and available water capacity. P. 901-926. In A. Klute (ed) *Methods of soil analysis*. Part 1, 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI.
22. Castro B, Torrent J (1998) Phosphate sorption by calcareous Vertisols and Inceptisols as evaluated from extended P-sorption curves. *Eur J Soil Sci* 49:661-667
23. Cate, R. B., and L. A. Nelson. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into classes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35:658-660.
24. Chapman, H. D. 1965. Cation exchange capacity. P.891-902. In C. A. Black et al. (ed). *Methods of soil analysis*, part 2, ASA, Madison, WI.
25. Cole CV Olsen SR & Scott CO 1953. The nature of phosphate sorption by calcium carbonate. *Soil Science Society of America Proceedings* 17, 352 -353
26. Essington, M.E. 2003. *Soil and water chemistry: An integrative approach*. CRC Press, Boca Raton, FL.
27. Fitter AH, Sutton CD (1975) The use of the Freundlich isotherm for soil phosphate sorption data. *J Soil Sci* 26:241-246
28. Fox, R.L., and E.J. Kamprath. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34:902-907.
29. Freeman JS, Rowell DL (1981) The adsorption and precipitation of phosphate onto calcite. *J Soil Sci* 32:75-84
30. Griffin, R. A. and J. J. Jurinak. 1973. The interaction of phosphate with calcite. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37:847-850.
31. Hamad ME, Rimmer DL, Syers JK (1992) Effect of iron oxide on phosphate sorption by calcite and calcareous soils. *J Soil Sci* 43:273-281
32. Holford ICR, Mattingly GEG (1975a) The high-and low-energy phosphate adsorbing surfaces in calcareous soils. *J Soil Sci* 26:407-417
33. Holford ICR, Mattingly GEG (1975b) Phosphate sorption by Jurassic oolitic limestones. *Geoderma* 13:257-264
34. Jackman JM, Jones RC, Yost RS, Babock CJ (1997) Rietveld estimates of mineral percentages to predict phosphorous sorption by selected Hawaiian soils. *Soil Sci Soc Am J* 61:618-629
35. Jalali M (2006) Soil phosphorus buffer coefficient as influenced by time and rate of P addition. *Archives Agron Soil Sci* 52:1-11.

36. Jalali, M. 2007. Phosphorus status and sorption characteristics of some calcareous soils of Hamadan, western Iran. *Environ Geol.* 53:365–374
37. Jalali M, Kolahchi Z. 2004. Phosphorus supply characteristics of ten calcareous soils as influenced by different rates of phosphorus addition. *Proceeding of the Agroenviron Congress; 2004 Oct; Udin, Italy.*
38. James, W. Bauder., J. S. Jacobsen and E. Skogley. 1997. Effect of phosphorus soil test level on sorghum-sudangrass response to phosphorous fertilizer. *Agron. J.* 89:9-16.
39. Javid S, Rowell DL. 2002. A laboratory study of the effect of time and temperature on the decline in Olsen P following phosphate addition to calcareous soils. *Soil Use Manage* 18:127 – 134.
40. Johnston AE, Poulton PR, Syers JK. 2001. Phosphorous, potassium and sulfur cycles in agricultural soils. *Proceeding No. 465 International Fertilizer Society, York.* pp 1 – 44.
41. Johnston AE. 2001. Principles of crop nutrition for sustainable food production. *Proceeding No. 459. International Fertilizer Society, York.* pp 1 – 38.
42. Juo, A. S. R., and R. L. Fox. 1977. Phosphate sorption characteristics of some benchmark soils of West Africa. *Soil Sci.* 124:370-376
43. Karimian, N., and A. Ghanbari. 1990. Evaluation of different extractants for prediction of plant response to applied P fertilizer in highly calcareous soils. *Abst. 10th World fert. Cong. CIEC* p. 25.
44. Kpombrekou-A, K., & M. A. Tabatabai. 1997. Effect of cropping systems on quantity-intensity relationships of soil phosphorus. *Soil Sci.* 162:56-68.
45. Kuo, S. 1996. Phosphorus. p.869-919. In D. Sparks (ed.) *Methods of soil analysis. Part 3.* 3rd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI.
46. Lalitha Janardhanan, L., and Samira H. Daroub. 2010. Phosphorus Sorption in Organic Soils in South Florida. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74:1597–1606
47. Mallarino A. P. and A. M. Blakmer. 1992. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn. *Agron. J.* 84:850-856.
48. McCollum RE (1991) Build up and decline in soil phosphorous: 30-year trends on a typic umprabuult. *Agron J* 83:77–85
49. McLean EO, Arscott TG, Hannan MA. 1983. An evaluation of soil solution and chemical extraction methods for assessing phosphorus availability to wheat plants grown in Ohio and Bangladesh soils. *Commun Soil Sci Plant Anal* 14:1 – 13.
50. Mead JA (1981) A comparison of the Langmuir, Freundlich and Temkin equations to describe phosphate adsorption properties of soils. *Aust J Soil Res* 19:333–342
51. Mehdi, A. A, R. W. Taylor and J. W. shuford. 1990. Prediction of fertilizer phosphate requirement using the Langmuir adsorption maximum. *Plant Soil.* 122:267-270.
52. Nelson, D.W., and L.E. Sommer. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p.539-579. In A.L. Page (ed.) *Methods of Soil Analysis. 2nd Ed. ASA Monogr. 9(2).* Amer. Soc. Agron. Madison, WI.
53. Olsen, S. R., and F. S. Watanabe. 1963. Diffusion of phosphorus as related to soil texture and plant uptake. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 27:648-653
54. Ozanne, P. G. and T. C. Shaw. 1968. Advantages of the recently developed phosphate sorption test over the older extractant methods for soil phosphate. *Int. Cong. Soil Sci. Trans. 2:* 273-280
55. Pant, H.K., and K.R. Reddy. 2001. Phosphorus sorption characteristics of estuarine soils under different redox conditions. *J. Environ. Qual.* 30:1474–1480.
56. Pena F, Torrent J (1990) Predicting phosphate sorption in soils of Mediterranean regions. *Fertil Res* 23:173–179
57. Polyzopoulos NA, Keramidas VZ, Kiosse H (1985) Phosphate sorption by some Alfisols of Greece as described by commonly used isotherms. *Soil Sci Soc Am J* 49:81–84

58. 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.
59. Ryan, J., D. Curtin, & M. A. Cheeman. 1985 or 1985a. Significance of iron oxides and calcium carbonate particle size in phosphate sorption by calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:74-76.
60. Ryan, J., H. M. Hasan, M. Baasiri, and H. S Tabbara. 1985b. Availability and transformation of applied phosphorus in calcareous Lebanese soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1215-1220.
61. Samadi, A. 2003. Predicting phosphate fertilizer requirement using sorption isotherm in selected calcareous soils of Western Azarbaijan province, Iran. *Communication in soil science and plant analysis*. Vol.34, Nos. 19 & 20, pp. 2885-2889.
62. Samadi, A. and Gilkes, R.J. 1998. Forms of phosphorus in virgin and fertilized calcareous soils of Western Australia. *Aust. J. Soil Res.* 36:586-601.
63. Sample, E. C, R. J. Soper, And G. J. Racz. 1980. Reaction of phosphate fertilizers in soils. P. 263-310. in F. E. Khasawneh et al.(ed) *The role of phosphorus in agriculture*. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI.
64. Sanyal, S. K., and S. K. De Datta .1991. *Chemistry of phosphorus transformations in soil*. *Adv. Soil Sci.* 16:1-120.
65. Sharpley AN, Ahuja LR. 1983. A diffusion interpretation of soil phosphorus desorption. *Soil Sci* 135:322 – 326.
66. Sharpley AN, Jones CA, Gray C, Cole CV. 1984. A simplified soil and plant phosphorus model: Prediction of labile, organic, and sorbed phosphorus. *Soil Sci Soc Am J* 48:805 – 809.
67. Sharpley, A. N., & S. J. Smith. 1985. Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:127-130.
68. Sharpley, A. N., U. Singh, G. Uehara, and J. Kimble. 1989. Modeling soil and plant phosphorus dynamics in calcareous and highly weathered soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:153-158.
69. Singh B, Gilkes RJ (1991) Phosphorus sorption in relation to soil properties for the major soil types of south-western Australia. *Aust J Soil Res* 29:603–618
70. Solis P, Torrent J (1989) Phosphate sorption by calcareous Vertisols and Inceptisols of Spain. *Soil Sci Soc Am J* 53:456– 459
71. Sparks, D.L. 2003. *Environmental soil chemistry*. Academic Press, San Diego.
72. Torrent J, Schwertman U, Barrow V. 1992. Fast and slow phosphate sorption by goethite-rich natural minerals. *Clays Clay Miner* 40:14 – 21.
73. Torrent, J., U. Schwertman, V. Barrow. 1994. Phosphate sorption by natural hematites. *European Journal of Soil Science*, 45: 45-51.
74. U.S. Salinity Laboratory Staff.1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. U.S. Dep. Of Agriculture Handbook no. 60, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
75. Wang XJM, Jackman RS Yost, Linquist BA (2000) Predicting soil phosphorous buffer coefficients using potential sorption site density and soil aggregation. *Soil Sci Soc Am J* 64:240– 246
76. Wilson, A. T. 1968. The chemistry underlying the phosphate problem in Agriculture. *Aust. J. Sci.* 31:55-61.
77. Zhou M, Rhue RD, Harries WG (1997) Phosphorus sorption characteristics of Bh and Bt horizons from sandy coastal plain soils. *Soil Sci Soc Am J* 61:1364–1369
78. Zhou, M., and Y. Li. 2001. Phosphorus-sorption characteristics of calcareous soils and limestone from the southern Everglades and adjacent farmlands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1404–1412.