

## تأثیر کربن آلی، کربنات کلسیم فعال و رس بر فسفر قابل جذب در برخی خاک‌های آهکی استان کرمان

هدی حسینی<sup>1</sup>، مجید فکری، محمد هادی فرپور و مجید محمودآبادی

دانشجوی دکتری علوم و مهندسی خاک دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ h.hosseini@agr.uk.ac.ir

استاد گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ mjdfekri@yahoo.com

استاد گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ farpoor@uk.ac.ir

دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ mahmoodabadi@uk.ac.ir

دریافت: 97/12/18 و پذیرش: 98/4/12

### چکیده

قابلیت جذب فسفر در خاک توسط واکنش‌های جذب و رهاسازی کنترل می‌شود. این واکنش‌ها تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک هستند. برای بررسی اثرات کربنات کلسیم فعال، رس و کربن آلی بر رفتار جذب فسفر در خاک‌های آهکی استان کرمان از خاک‌های ردیف‌های پستی و بلندی نگار - لاله‌زار و بافت - ارزوئیه نمونه‌برداری انجام گرفت. هم‌دمای جذب فسفر در خاک با استفاده از روش تعادلی تعیین و ارتباط فسفر جذب شده با غلظت تعادلی فسفر به‌وسیله معادلات لانگمویر، فروندلیچ و ون‌های مطالعه شد. نتایج نشان داد معادله لانگمویر با بیشترین ضرایب تبیین (0/978) و کمترین خطای استاندارد تخمین (0/027) بهترین برازش را بر داده‌های جذب فسفر نشان داد. حداکثر جذب فسفر ( $q_{max}$ ) و حداکثر ظرفیت بافری فسفر با افزایش میزان کربنات کلسیم فعال افزایش پیدا کردند به طوری که با افزایش کربنات کلسیم فعال از 7/68 درصد به 18/25 درصد،  $q_{max}$  از 655 به 1025 (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و حداکثر ظرفیت بافری فسفر از 114 به 243 لیتر بر کیلوگرم افزایش یافت. در حالیکه با افزایش کربن آلی در خاک‌های مورد مطالعه از 1/74 درصد به 7/8 درصد،  $q_{max}$  از 701 به 535 میلی‌گرم بر کیلوگرم و حداکثر ظرفیت بافری فسفر از 90 به 44 لیتر بر کیلوگرم کاهش پیدا کرد. نیاز استاندارد فسفر محاسبه شده در غلظت تعادلی 0/3 میلی‌گرم فسفر در لیتر با استفاده از معادله ون‌های با مقدار رس ( $r=0/80^*$ ) و کربنات کلسیم فعال ( $r=0/77^*$ ) همبستگی مثبت و با کربن آلی ( $r=-0/63^*$ ) و فسفر قابل استفاده خاک ( $r=-0/61^*$ ) همبستگی منفی و معنی‌دار نشان داد. حداکثر ظرفیت بافری و نیاز استاندارد فسفر مربوط به خاک‌های مناطق ارزوئیه و نگار با بیشترین درصد کربنات کلسیم فعال و رس بود، در حالیکه در خاک‌های مناطق لاله‌زار و بافت به علت دارا بودن کربن آلی بیشتر و کربنات کلسیم فعال کمتر، کمترین نیاز استاندارد فسفر به‌دست آمد. به طور کلی، جذب فسفر در خاک‌های مورد مطالعه تحت تأثیر مقدار رس، کربنات کلسیم فعال و کربن آلی است.

واژه‌های کلیدی: هم‌دمای جذب، ظرفیت بافری، نیاز استاندارد

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: کرمان، دانشگاه شهید باهنر - دانشکده کشاورزی، گروه علوم خاک

## مقدمه

فسفر یکی از عناصر مهم برای تمام اشکال زندگی و همچنین یک عنصر غذایی مهم برای رشد گیاهان و تولید محصولات کشاورزی است (دالی و همکاران، 2015 و سوتر و همکاران، 2012). گیاهان فسفوری را که از طریق هوادیدگی مواد مادری یا کوددهی وارد فاز محلول خاک شده است جذب می‌کنند (ووگی و همکاران، 2015). قابلیت دسترسی فسفر در خاک به طور قابل ملاحظه‌ای به غلظت آن در محلول خاک بستگی دارد (وهبا، 2013). قابلیت دسترسی کم فسفر در خاک‌ها از جمله فاکتورهای اصلی محدود کننده رشد محصولات کشاورزی است (مارچنر، 2012). کارایی کودهای فسفره برای محصولات کشاورزی در حدود 10-25 درصد یافت شده است (یانگ و همکاران، 2013). گودس و همکاران (2016) تأکید کردند که بازیابی کم کودهای فسفره در خاک‌های شدیداً هوازده به دلیل جذب اختصاصی فسفر است که به ندرت به محلول خاک بازگردانده می‌شود.

واکنش‌های جذب و رهاسازی، رسوب و حل شدن فسفر در خاک از جمله فرآیندهای مهمی می‌باشند که، فراهمی فسفر در محلول خاک را کنترل می‌کنند (سویی و تامسون، 2000). این واکنش‌ها نقش مهمی در عرضه فسفر برای گیاهان، تعیین نیاز کودی و همچنین تعیین سرنوشت زیست‌محیطی فسفر و کیفیت آب‌های سطحی و زیر زمینی دارند (وانگ و همکاران، 2011). اجزای مختلف خاک که در واکنش‌های فسفر نقش دارند، شامل مواد آلی، کربنات کلسیم، اکسیدهای آهن و آلومینیوم، و کانی‌های سیلیکاته خاک می‌باشند (اولسن و خازوانه، 1980).

استفاده از هم‌دماهای جذب تکنیکی است که توسط پژوهشگران زیادی جهت بررسی وضعیت فسفر در خاک به کار می‌رود (صمدی و سپهر، 1392؛ شهبازی و داوودی، 1391 و میهنوب و دراویی، 2014). هم‌دماهای جذب مقدار جذب ماده جذب شونده بر روی سطح یک جاذب را به عنوان تابعی از غلظت تعادلی ماده جذب شونده در دمای ثابت نشان می‌دهد. به طور کلی جذب شامل سه فرآیند اصلی جذب سطحی، رسوب سطحی و تثبیت است. جذب سطحی یک تجمع دو بعدی از ماده در سطح مشترک محلول و سطح جامد است. رسوب فرآیندی است که به موجب آن یک مکانیسم

سه بعدی رشد بر روی یک جامد اتفاق می‌افتد. سومین مکانیسم اصلی جذب، تثبیت است که شامل انتشار ماده جذب شونده به داخل فاز جامد می‌شود و ماهیت سه بعدی دارد (اسپوزیتو، 1984 و برادی 2004).

معادلات مختلفی جهت توصیف کمی هم‌دماهای جذب توسعه یافته‌اند که از پرکاربردترین آن‌ها می‌توان معادلات، فروندلیچ (دونالد، 2003) و لانگمویر (دوسا و همکاران، 2008) را نام برد. ارزیابی ظرفیت تثبیت فسفر در خاک به کمک شاخص‌های بافیری به دست آمده از پارامترهای معادلات جذب صورت می‌گیرد. در واقع شاخص‌های بافیری خاک، توانایی خاک را در مقابله با تغییر غلظت فسفر در محلول خاک را نشان می‌دهند. این شاخص‌ها برای محاسبه باقیمانده مقدار کود مصرفی در محلول خاک و تخمین احتمال پاسخ گیاه به کودها مورد استفاده قرار می‌گیرند (پولی‌زاپلوس و همکاران، 1985).

پژوهش‌های مختلفی در زمینه بررسی ویژگی‌های جذب و شاخص‌های بافیری فسفر در خاک و ارتباط آن‌ها با خصوصیات خاک در نقاط مختلف جهان صورت گرفته است و نتایج مختلفی گزارش شده است (شیروانی و شریعتمداری، 2002؛ نادری-پیکام و جلالی، 1388؛ تانگ و همکاران، 2014؛ حسین‌پور و عنایت ضمیر، 1384؛ چرم و احمدپور داشلی‌برون، 1386 و توفیقی و شیرمردی، 1394). هادجو و همکاران (2014) ظرفیت جذب فسفر را در پنج نوع خاک در منطقه‌ی تیگاری در شمال اتیوپی مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که حداکثر جذب فسفر بدست آمده از معادله لانگمویر با درصد رس، کربنات کلسیم و ظرفیت تبادل کاتیونی ارتباط مثبت و معنی‌دار نشان داد. در حالیکه معادله همکاران (2010) دریافتند که اختلاف در ظرفیت جذب فسفر در خاک‌های مختلف در امیدیه خوزستان به دلیل اختلاف در مقدار ماده آلی، کلسیم و آلومینیوم قابل تبادل و pH خاک می‌باشد.

شناخت عوامل مؤثر بر جذب و قابلیت استفاده‌ی عناصر در خاک برای توصیه کودی مناسب و کاهش استفاده از کودهای شیمیایی جهت کاهش آلودگی منابع آبی و خاکی امری ضروری است. با توجه به این که استان کرمان یکی از استان‌های مهم کشور در زمینه تولید محصولات باغی و زراعی است، اطلاعات منتشر شده‌ای در مورد تأثیر

### مواد و روش‌ها

به منظور تهیه نمونه‌های خاک با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مختلف (درصد رس، ماده آلی و کربنات کلسیم) 42 نمونه مرکب خاک سطحی از عمق 0-30 سانتی‌متری به صورت تصادفی از ردیف‌های پستی و بلندی نگار- لاله‌زار و بافت - ارزوئیه برداشت شد (شکل 1). اطلاعات اقلیمی و جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در جدول 1- به طور خلاصه گزارش شده است.

خصوصیات خاک بر ویژگی‌های جذب فسفر و نیاز استاندارد فسفر در خاک‌های مختلف این استان وجود ندارد. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی هم‌ماه‌های جذب فسفر، شاخص حداکثر ظرفیت باف‌ری و نیاز استاندارد فسفر و ارتباط آن‌ها با خصوصیات خاک در برخی از خاک‌های آهکی استان کرمان انجام گرفت.

جدول 1- اطلاعات اقلیمی و جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

ارتفاع (متر)	میانگین سالانه بارندگی (میلی‌متر)	میانگین سالانه دما (درجه سانتی‌گراد)	موقعیت جغرافیایی	منطقه
2050	91/95	14/9	57° 07' تا 56° 47' طول شرقی 30° 01' تا 29° 44' عرض شمالی	نگار (بردسیر)
2775	209/8	10	56° 51' تا 56° 32' طول شرقی 29° 23' تا 29° 42' عرض شمالی	لاله‌زار
2280	249/84	14/2	57° 16' تا 56° 03' طول شرقی 29° 36' تا 28° 06' عرض شمالی	بافت
1067	90	22/9	57° 01' تا 56° 00' طول شرقی 28° 35' تا 28° 06' عرض شمالی	ارزوئیه

دمای  $1 \pm 25$  درجه سلسیوس تکان داده شدند. پس از تعادل، محلول‌ها سانتریفیوژ شده و بعد از صاف کردن محلول رویی، غلظت فسفر در این محلول‌ها به روش آبی آسکوربیک اسید و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل CECIL SERES2 در طول موج 880 نانومتر تعیین شد. مقدار فسفر جذب شده از تفاوت بین غلظت اولیه این عنصر و غلظت نهایی موجود در محلول محاسبه و پارامترهای جذب به وسیله معادلات لانگمویر، فروندلیچ و ون-های که در ادامه آورده شده‌اند مورد محاسبه قرار گرفت.

معادله لانگمویر:

(1)

$$q = \frac{q_{\max} k_1 C_e}{1 + k_1 C_e} \quad (mg \cdot g^{-1})$$

$q$  = مقدار فسفر جذب شده  
 $q_{\max}$  = حداکثر ظرفیت جذب فسفر  
 $K_1$  = انرژی پیوند  
 $C_e$  = غلظت فسفر در محلول تعادلی

نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن از الک 2 میلی‌متر عبور داده شدند. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی همانند pH (توسط pH متر در گل اشباع)، EC (توسط هدایت سنخ در عصاره اشباع)، کربن آلی به روش (والکی و بلک، 1934)، مقدار کربنات کلسیم معادل به روش خشتی سازی با اسید کلریدیک (آلیسون و مودی، 1965)، کربنات کلسیم فعال به روش اگزالات آمونیوم (لئوپرت و سوارز، 1996)، بافت خاک به روش هیدرومتر (گی و بودر، 2002)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات سدیم در pH = 7 (روود، 1986) و فسفر قابل استفاده با عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم (اولسن و سومر، 1982) اندازه‌گیری شد. کربنات کلسیم غیر فعال از تفاضل کربنات کلسیم معادل و کربنات کلسیم فعال برآورد شد. هم‌ماه‌های جذب فسفر در خاک با استفاده از روش تعادلی تعیین گردید، در این روش 2 گرم از نمونه خاک با 25 میلی‌لیتر از محلول 0/01 مولار سدیم کلرید حاوی غلظت‌های مشخص فسفر از منبع پتاسیم دی‌هیدروژن فسفات ( $KH_2PO_4$ ) به لوله‌های سانتریفیوژ اضافه شد. برای متوقف کردن فعالیت میکروبی، به هر لوله آزمایش دو قطره تولوئن اضافه شد. لوله‌های سانتریفیوژ، جهت رسیدن به حالت تعادل 24 ساعت در

های (1 تا 4) نمونه‌برداری شده از مناطق لاله‌زار و بافت، از نظر کربن آلی (7/8-1/74 درصد) متفاوت و در دیگر خصوصیات خاک همانند pH، کربنات کلسیم فعال (ACC) و درصد رس (C) تقریباً مشابه بودند. خاک‌های (5 تا 8) در گروه (ب)، از نظر میزان کربنات کلسیم فعال (7/68-18/25 درصد) متفاوت و به لحاظ مقدار رس و کربن آلی تقریباً مشابه‌اند. در گروه (ج) خاک‌ها (9 تا 12) به‌گونه‌ای انتخاب شدند که در مقدار رس (12-47 درصد) متفاوت اما در خصوصیات دیگر مشابه باشند.

#### هم‌دماهای جذب فسفر

داده‌های جذب فسفر با معادلات لانگمویر، فروندلیچ و ون‌های برازش داده شدند. نتایج نشان داد که هر سه مدل استفاده شده در این مطالعه توانستند ارتباط بین فسفر محلول و فسفر جذب شده را به خوبی توصیف کنند. ضرایب تشخیص و پارامترهای این معادلات در خاک‌های مطالعه شده در جدول 3 آورده شده است.

برازش داده‌های جذب فسفر بر روی معادله لانگمویر نشان داد که میانگین ضرایب تبیین و خطای استاندارد (SE) این معادله در خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب 0/978 و 0/027 می‌باشد. نتایج نشان داد که در خاک‌های گروه (الف) با افزایش کربن آلی از 1/74 درصد به 7/8 درصد، شاخص حداکثر جذب فسفر ( $q_{max}$ ) از 701 به 535 گرم بر کیلوگرم (معادل 23/68 درصد) کاهش پیدا کرد، اما در خاک‌های گروه (ب) بیشترین  $q_{max}$  مربوط به خاک شماره 5 با بیشترین درصد کربنات کلسیم فعال است. روند  $q_{max}$  در خاک‌های گروه (ج) به این ترتیب است: خاک 9 < خاک 10 < خاک 11 < خاک 12 و با افزایش درصد رس در خاک ظرفیت جذب فسفر افزایش نشان داد. ثابت  $q_{max}$  با مقدار رس ( $r=0/82^{**}$ ) و کربنات کلسیم فعال ( $r=0/74^{**}$ ) همبستگی مثبت و با کربن آلی ( $r=-0/60^*$ ) و فسفر قابل استفاده ( $r=-0/60^*$ ) خاک همبستگی منفی و معنی‌دار نشان داد. ثابت KI معادله لانگمویر نشان دهنده تمایل خاک به جذب فسفر است. کمترین این پارامتر 0/068 لیتر بر میلی‌گرم مربوط به خاک شماره 3 با بیشترین درصد کربن آلی و بیشترین مقدار این پارامتر 0/218 لیتر بر میلی‌گرم مربوط به خاک شماره 9 با 47 درصد رس و 13/2 درصد کربنات کلسیم فعال است. این پارامتر نیز با درصد رس خاک همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد (جدول 4).

حداکثر ظرفیت بافری فسفر<sup>1</sup> (PMBC)، بر پایه پارامترهای معادله لانگمویر ( $K_f$  و  $q_{max}$ ) تعیین شد (هالفورد، 1979). معادله فروندلیچ:

$$q = k_f c_e^{1/n}$$

$q$  و  $C_e$  همان مفاهیم معادله لانگمویر را دارند.  $K_f$  و  $n$  ضرایب مدل فروندلیچ که به ترتیب نشان دهنده ظرفیت جذب و شدت جذب هستند. معادله ون‌های:

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

$m$  و  $n$  ثابت‌های مدل ون‌های هستند. نیاز استاندارد فسفر<sup>2</sup> (SPR) در غلظت 0/3 میلی‌گرم بر لیتر با استفاده از معادله ون‌های محاسبه شد. خطای استاندارد تخمین در این پژوهش با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (q - q^*)^2}{n - 2}}$$

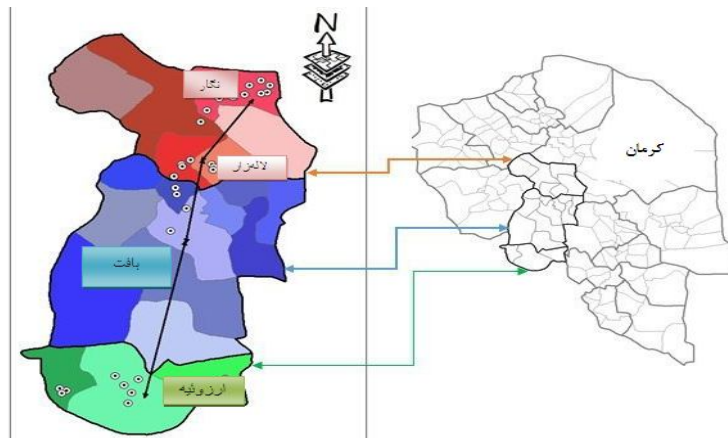
$q$  = مقدار جذب اندازه‌گیری شده  
 $q^*$  = مقدار جذب پیش‌بینی شده با استفاده از معادلات  
 $n$  = تعداد اندازه‌گیری‌ها

#### نتایج

خاک‌های مورد مطالعه از لحاظ بافت و خصوصیات شیمیایی متنوع می‌باشند. pH خاک‌های مورد مطالعه، از نزدیک خنثی تا قلیایی ضعیف متغیر بود (جدول 2). بیشترین مواد آلی در خاک‌های منطقه لاله‌زار و بافت مشاهده شد. بارندگی و ارتفاع بیشتر و همچنین دمای کمتر این مناطق سبب تجمع ماده آلی در خاک شده است. میزان کربنات کلسیم معادل و درصد رس در خاک‌های مناطق ارزوئیه و نگار به علت تبخیر و تعرق زیاد، بارندگی کم و همچنین قرار گرفتن در موقعیت دشت، زیادتر بود. طبق پژوهش‌های پیشین خاک‌های مورد مطالعه در سه رده اریدی سول (ارزوئیه و نگار)، مالی سول (لاله-زار و بافت) و اینسپتی سول (بافت) قرار گرفتند (کشتکار، 1395 و ملک‌پور، 1394). خاک‌های مورد مطالعه از نظر تفاوت و تشابه در خصوصیات شیمیایی و فیزیکی به سه گروه تقسیم شدند (جدول 2). گروه (الف)، خاک-

1. Phosphorus Maximum Buffering Capacity (PMBC)

2. Standard Phosphorus Requirement (SPR)



شکل 1- استان کرمان و نقاط نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه

جدول 2- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه شده

گروه	location	Soil order	sand	clay	silt	pH	EC(ds/m)	%NACC	%ACC	%OC	CEC (meq/100gsoil)	p Available (mg/kg soil)
(الف)												
1	29°30'24"N 56°49'0"E	مالی- سول	50/5	19	30/5	7/2	1/49	3/71	3/04	4/09	25/04	12/25
2	29°29'32"N 56°48'54"E	مالی- سول	50/5	19	30/5	7/1	1/07	1/81	3/69	3/12	20/12	12/9
3	29°27'32"N 56°37'36"E	مالی- سول	41	19	40	6/96	1/56	2/35	3/90	7/8	38/49	17/02
4	29°32'36"N 56°42'28"E	اینسپتی- سول	43/5	18	38/5	7/12	1/64	2/33	3/92	1/74	13/63	11/5
(ب)												
5	28°18'14"N 56°54'34"E	اریدی- سول	36/5	23	40/5	7/5	0/589	22/2	18/25	0/54	18/35	7/08
6	29°10'21"N 56°36'52"E	اینسپتی- سول	36/8	22/4	40/8	7/6	0/669	10/6	7/68	0/73	13/54	7/4
7	28°18'29"N 56°55'26"E	اریدی- سول	42/5	23	34/5	7/62	0/558	15/4	14/6	0/43	12/5	9/9
8	29°23'55"N 56°38'0"E	اینسپتی- سول	41	25/5	36/5	7/6	0/653	12/6	11/44	0/66	12/52	8/8
(ج)												
9	29°48'21"N 56°47'08"E	اریدی- سول	9	47	44	7/96	4/59	10/5	13/2	0/03	25/82	7/27
10	28°19'19"N 56°25'56"E	اریدی- سول	11	37	52	7/97	4/28	10/1	13/6	0/03	19/68	8/7
11	28°23'30"N 56°27'53"E	اریدی- سول	44/5	19	36/5	8/1	3/75	13/06	12/44	0/06	12/52	9/8
12	28°20'04"N 56°59'50"E	اریدی- سول	42	12	46	8/1	4/12	14/9	12/7	0/27	7/6	7/8

به ترتیب نشان دهنده: کربنات کلسیم غیر فعال، کربنات کلسیم فعال، کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی. CEC و OC, ACC, NACC

جدول 3- پارامترها و ضرایب تشخیص معادلات برازش داده شده توسط هم‌دماهای مختلف بر داده‌های جذب فسفر

شماره خاک گروه (الف)	معادله لانگمویر			معادله فروندلیچ				معادله ون-های			گروه (ب)	
	SEE	R <sup>2</sup>	K <sub>f</sub>	SEE	R <sup>2</sup>	K <sub>f</sub>	1/n	SEE	R <sup>2</sup>	n		m
1	0/029	0/97	0/084	0/017	0/98	66	0/536	0/029	0/97	0/073	-8	0/019
2	0/020	0/98	0/115	0/032	0/96	90	0/483	0/020	0/98	0/085	7	0/036
3	0/023	0/99	0/068	0/030	0/96	58	0/535	0/023	0/99	0/061	0	0/030
4	0/026	0/98	0/109	0/023	0/98	108	0/495	0/026	0/98	0/105	13/8	0/037
5	0/017	0/98	0/105	0/034	0/98	125	0/607	0/017	0/98	0/173	-9/8	0/052
6	0/028	0/97	0/078	0/013	0/99	85	0/525	0/028	0/97	0/096	-8	0/037
7	0/013	0/99	0/083	0/029	0/98	99	0/604	0/013	0/99	0/162	-11	0/057
8	0/024	0/98	0/090	0/023	0/98	93	0/535	0/024	0/98	0/113	-18	0/036
9	0/026	0/99	0/217	0/020	0/99	215	0/613	0/026	0/99	0/206	-7	0/051
10	0/026	0/98	0/193	0/030	0/98	175	0/575	0/026	0/98	0/272	-34	0/027
11	0/103	0/97	0/098	0/033	0/97	97	0/526	0/103	0/97	0/107	-1/8	0/036
12	0/033	0/96	0/072	0/024	0/97	71	0/511	0/033	0/96	0/083	5/8	0/038

فعال از 7/68 به 18/25 درصد، این پارامتر 32 درصد افزایش نشان داد. همچنین در خاک‌های گروه (ج) با افزایش درصد رس ثابت K<sub>f</sub> افزایش یافت. پارامتر K<sub>f</sub> با درصد رس (r=0/74\*\*) و کربنات کلسیم فعال (r=0/59\*) همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد (جدول 5). ثابت n معادله فروندلیچ که نشان دهنده شدت جذب است نیز با درصد کربنات کلسیم غیر فعال و کربنات کلسیم فعال همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد (جدول 5).

داده‌های جذب فسفر با میانگین ضرایب تبیین 0/974 و خطای استاندارد تخمین 0/034 به معادله فروندلیچ برازش نشان دادند. پارامتر K<sub>f</sub> در معادله فروندلیچ در واقع میزان جذب در غلظت تعادلی است. مقدار این پارامتر در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه 58 تا 215 لیتر بر کیلوگرم متغیر بود. با افزایش کربن آلی از 1/74 درصد به 7/8 درصد در خاک‌های گروه (الف) K<sub>f</sub> از 108 به 58 لیتر بر کیلوگرم (حدود 46 درصد) کاهش یافت. در خاک‌های گروه (ب) با تغییر کربنات کلسیم

جدول 4- مقادیر همبستگی ضرایب معادله لانگمویر با برخی از

خصوصیات خاک

ویژگی خاک	q <sub>max</sub>	k <sub>f</sub>
رس	0/82**	0/91**
کربنات کلسیم غیر فعال	0/56 <sup>ns</sup>	0/06 <sup>ns</sup>
کربنات کلسیم فعال	0/74**	0/36 <sup>ns</sup>
ظرفیت تبادل کاتیونی	0/40 <sup>ns</sup>	0/26 <sup>ns</sup>
فسفر قابل دسترس	-0/60*	-0/39 <sup>ns</sup>
کربن آلی	-0/60*	-0/35 <sup>ns</sup>

\*\* معنی‌دار در سطح احتمال 1%، \* معنی‌دار در سطح احتمال 5%

و <sup>ns</sup> عدم معنی‌داری.

جذب فسفر شناخته شده است، با درصد رس و کربنات کلسیم فعال خاک همبستگی مثبت و با مقدار کربن آلی و فسفر قابل دسترس خاک همبستگی منفی و معنی‌دار نشان داد.

میانگین ضرایب تبیین و خطای استاندارد تخمین در خاک‌های مورد مطالعه برای معادله ون‌های به ترتیب 0/965 و 0/045 بود. در بررسی همبستگی بین ضرایب مدل ون‌های با خصوصیات خاک مشخص شد که ضریب n (شیب) معادله ون‌های که به عنوان شاخص ظرفیت

جدول 5- مقادیر همبستگی ضرایب معادلات فروندلیچ و ون-های با برخی از خصوصیات خاک

ون‌های		فروندلیچ		ویژگی خاک
n	m	1/n	K <sub>f</sub>	
0/78**	-0/60*	0/50 <sup>ns</sup>	0/92**	رس
0/50 <sup>ns</sup>	-0/22 <sup>ns</sup>	0/60*	0/28 <sup>ns</sup>	کربنات کلسیم غیر فعال
0/74**	-0/34 <sup>ns</sup>	0/65*	0/59*	کربنات کلسیم فعال
-0/62*	0/15 <sup>ns</sup>	-0/28 <sup>ns</sup>	-0/58*	کربن آلی
-0/58*	0/29 <sup>ns</sup>	-0/42 <sup>ns</sup>	-0/58*	فسفر قابل دسترس
0/10 <sup>ns</sup>	0/20 <sup>ns</sup>	0/54 <sup>ns</sup>	0/45 <sup>ns</sup>	ظرفیت تبادل کاتیونی

\*\* معنی‌دار در سطح احتمال 1%، \* معنی‌دار در سطح احتمال 5% و <sup>ns</sup> عدم معنی‌داری.

#### حداکثر ظرفیت بافیری فسفر (PMBC) و نیاز استاندارد فسفر (SPR)

حداکثر ظرفیت بافیری فسفر (PMBC) یک شاخص مهم برای ارزیابی ظرفیت تثبیت فسفر در خاک است که با استفاده از پارامترهای معادله لانگمویر محاسبه می‌شود. PMBC در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه 44 تا 412 لیتر فسفر بر کیلوگرم خاک برآورد شد (جدول 6). بیشترین مقدار این شاخص در خاک شماره 9 (گروه ج) با بیشترین درصد رس و کمترین مقدار این پارامتر در خاک شماره 3 (گروه الف) با بیشترین درصد کربن آلی به دست آمد. ضرایب همبستگی این شاخص با خصوصیات خاک در جدول 7 ارائه گردیده است.

هم‌دماهای جذب فسفر در خاک‌های مورد مطالعه از طریق رسم مقدار فسفر جذب شده توسط خاک (q) در مقابل مقدار فسفر باقی مانده در محلول خاک (Ce) تعیین شدند. هم‌دماهای جذب نشان دادند که میزان جذب فسفر به وسیله خاک‌های مختلف با افزایش غلظت اولیه فسفر در محلول افزایش یافت. شیب منحنی‌های جذب نشان می‌دهد که توان جذب فسفر در خاک‌های مختلف متغیر است (شکل 2).

جدول 6- مقادیر PMBC و SPR در خاک‌های مورد مطالعه

SPR(mg.kg <sup>-1</sup> )	PMBC(L.kg <sup>-1</sup> )	شماره خاک
		گروه(الف)
34	60	1
42	78	2
22	44	3
49	90	4
		گروه(ب)
97	243	5
44	114	6
88	217	7
44	119	8
		گروه(ج)
121	412	9
99	345	10
61	113	11
48	97	12

121 میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. در خاک‌های گروه (الف) با افزایش کربن آلی SPR کاهش یافت. کمترین مقدار آن در خاک شماره 3 با 7/8 درصد کربن آلی به دست آمد. در خاک‌های گروه (ب) و (ج) با افزایش میزان کربنات کلسیم فعال و رس مقدار SPR افزایش نشان داد و بیشترین مقدار این شاخص در خاک 9 با بیشترین درصد رس به دست آمد.

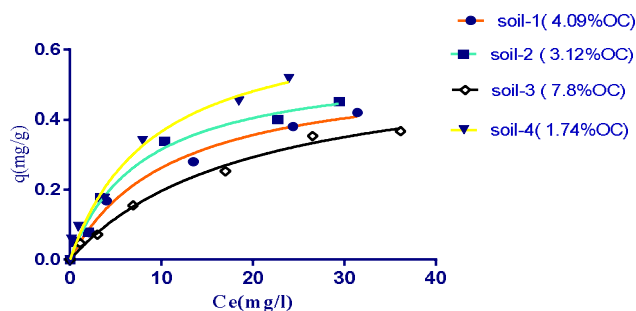
غلظت فسفر مورد نیاز برای حداکثر رشد گیاه در محلول خاک را نیاز استاندارد فسفر (SPR) دانسته‌اند. در منابع مختلف مقادیر متفاوتی برای آن ذکر شده است. هاولین و همکاران (2005) پیشنهاد کردند که دامنه 0/005 تا 0/3 میلی‌گرم فسفر در لیتر محلول خاک، برای رشد محصولات مختلف مناسب است. در این مطالعه غلظت 0/3 میلی‌گرم بر لیتر برای محاسبه نیاز استاندارد فسفر با استفاده از معادله ون‌های مورد استفاده قرار گرفت. SPR در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه 22 تا

جدول 7- مقادیر همبستگی شاخص PMBC و SPR با برخی از خصوصیات خاک

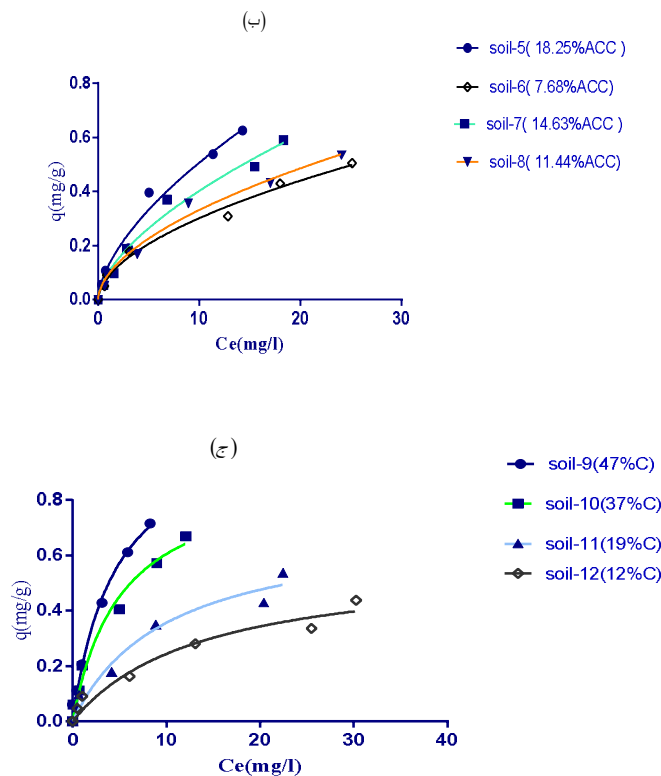
ویژگی خاک	PMBC	SPR
رس	0/91 <sup>**</sup>	0/80 <sup>**</sup>
کربنات کلسیم غیر فعال	0/44 <sup>ns</sup>	0/57 <sup>ns</sup>
کربنات کلسیم فعال	0/67 <sup>*</sup>	0/77 <sup>**</sup>
ظرفیت تبادل کاتیونی	0/24 <sup>ns</sup>	0/14 <sup>ns</sup>
فسفر قابل دسترس	-0/59 <sup>*</sup>	-0/61 <sup>*</sup>
کربن آلی	-0/58 <sup>*</sup>	-0/63 <sup>*</sup>

\*\*معنی‌دار در سطح احتمال 1%، \*معنی‌دار در سطح احتمال 5% و <sup>ns</sup>عدم معنی‌داری.

(الف)







شکل 2- هم‌دمای جذب فسفر در خاک‌های مورد مطالعه، در سه گروه‌بندی (الف، ب، و ج) با مقادیر مختلف کربن آلی (OC) کربنات کلسیم فعال (ACC) و رس (C)

### بحث

(2016) دریافتند که معادلات لانگمویر (0/99-0/96) و فروندلیچ (0/99-0/95) برازش خوبی با هم‌دماهای جذب سطحی فسفر در چهار رده خاک نشان داد. شجاع و همکاران (2017) با مطالعه اجزاء فسفر و هم‌دماهای آن در رسوبات سد اکتان دریافتند که معادلات لانگمویر، فروندلیچ و تمکین قادر به توصیف داده‌های جذب سطحی فسفر هستند، اما معادله لانگمویر با حداقل میانگین مربعات خطا (RMSE) و حداکثر ضریب تشخیص ( $R^2=0/98$ ) برازش بهتری به داده‌های جذب فسفر داده است. در مطالعه حاضر، معادله لانگمویر با بیشترین میانگین ضرایب تبیین (0/978) و کمترین خطای استاندارد (0/027) برازش بهتری را به داده‌های جذب فسفر نشان دادند. برازش داده‌های آزمایش با معادله لانگمویر به تمایل بالای جاذب به جذب شونده در محلول خاک اشاره می‌کند (اسپوزیتو 2008).

در مطالعه حاضر تأثیر میزان رس بر جذب فسفر در خاک‌هایی مطالعه شد که خصوصیات دیگر همانند کربنات کلسیم فعال و کربن آلی تقریباً مشابه باشد. در نتیجه اختلاف در رفتار جذب فسفر در خاک‌ها را

همان‌طور که در قسمت نتایج بیان شد هر سه مدل استفاده شده در این پژوهش توانستند به خوبی داده‌های جذب فسفر را توصیف نمایند. تناسب مدل‌های برازش یافته با داده‌های جذب سطحی را می‌توان با توجه به مقادیر ضرایب تشخیص ( $R^2$ ) و خطای استاندارد تخمین (SEE) ارزیابی کرد. هر چه مقدار  $R^2$  بیشتر و مقدار SEE کمتر باشد، تناسب مدل برازش یافته با داده‌های جذب بیشتر است. در خاک‌های مورد مطالعه برای سه مدل لانگمویر، فروندلیچ و ون‌های، میانگین  $R^2$  و SEE به ترتیب (0/974، 0/978 و 0/965) و (0/027، 0/034 و 0/045) به دست آمد. در مطالعه‌ای مشابه هادجو و همکاران (2014) دریافتند که هم‌دماهای لانگمویر و فروندلیچ با ضرایب تشخیص در دامنه 0/991-0/951 توصیف خوبی با داده‌های جذب سطحی فسفر در خاک‌های منطقه تیگاری در شمال ایتوبی نشان دادند. نتایج مطالعه ولد و هایل (2015) نشان داد که دو مدل لانگمویر و فروندلیچ توانستند توصیف خوبی از داده‌های جذب سطحی فسفر داشته باشند. همچنین راشمی و همکاران

در مطالعه حاضر به واکنش‌پذیری کربنات‌ها توجه شده و کربنات کلسیم فعال مورد بررسی قرار گرفته است. زیرا ممکن است دو خاک دارای کربنات کلسیم یکسان باشند اما کربنات کلسیم فعال متفاوت داشته باشند در نتیجه رفتار شیمیایی دو خاک متفاوت است. پارامترهای نشان دهنده ظرفیت جذب  $(n, k_f, q_{max})$  در معادلات مختلف با کربنات کلسیم فعال همبستگی مثبت نشان دادند. رفتار جذب فسفر در خاک‌هایی با میزان کربنات کلسیم فعال متفاوت، در شکل 2- (ب) نشان داده شده است. افزایش میزان کربنات کلسیم فعال، به طور قابل ملاحظه‌ای منجر به افزایش ظرفیت جذب فسفر گردیده است. کربنات کلسیم فعال بخشی از کربنات کلسیم معادل است که در جزء رس و رس ریز خاک قرار دارد. به دلیل اینکه واکنش‌های جذب و واجذب فسفر در سطح کانی-های رسی، اکسیدهای آهن و آلومینیوم و کربنات‌ها رخ می‌دهند، افزایش سطح ویژه این اجزا باعث افزایش جذب فسفر در خاک می‌شود. مطالعات نشان داده است که سطح ویژه کربنات کلسیم فعال بیشتر از کربنات کلسیم معادل است. ریحانی‌تبار (1389) سطح ویژه کربنات کلسیم معادل و فعال را در 20 نمونه خاک اندازه‌گیری کرد و بیان داشت که سطح ویژه نسبت داده شده به کربنات کلسیم معادل از 21 تا 403 با میانگین 103 متر مربع بر گرم متغیر می‌باشد. اما برای کربنات کلسیم فعال بین 13 تا 682 با میانگین 122/1 متر مربع بر گرم متغیر است. در مطالعه مشابه هادجو (2014) دریافت که ماکزیمم جذب سطحی لانگمویر با مقدار رس، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربنات کلسیم همبستگی مثبت نشان داد.

کاهش شاخص‌های جذب فسفر (جدول 3) با افزایش کربن آلی در خاک‌های گروه (الف) مشاهده شد. حضور مواد آلی ظرفیت جذب فسفر را به دلیل اشغال فضاهای جذب فسفر توسط آنیون‌های آلی کاهش می‌دهد (حسینی و تالش‌میکائیلی، 2013). مطالعات نشان داده است افزایش مواد آلی به خاک باعث کاهش حداکثر جذب فسفر، و افزایش قابلیت دسترسی آن برای گیاه می‌شوند (بو و همکاران، 2013؛ گرگین و همکاران، 2011). سدیکو و راینسون (2003) گزارش کردند افزایش کود مرغی و لجن فاضلاب به خاک  $q_{max}$  و  $kl$  را به ترتیب 7 تا 41 و 11 تا 30 درصد کاهش داد. در مطالعه حاضر افزایش کربن آلی در خاک‌های مورد مطالعه از 1/74 درصد به 7/8 درصد،  $q_{max}$  از 701 به 535 میلی‌گرم بر کیلوگرم (23/68 درصد) و  $kl$  را از 109 به 68 لیتر بر گرم (37/61 درصد) کاهش داد. در حالیکه حذف مواد آلی از خاک باعث افزایش ظرفیت جذب فسفر در خاک می‌شود

می‌توان به اختلاف در مقدار رس نسبت داد. ارتباط مثبت شاخص‌های ظرفیت جذب فسفر  $(n, k_f, q_{max})$  بدست آمده از معادلات مختلف با مقدار رس ممکن است مرتبط با سطح ویژه بیشتر رس‌ها باشد. ظرفیت جذب فسفر خاک ارتباط نزدیکی با مقدار ذرات ریز خاک دارد. سطح ویژه اجزای فاز جامد خاک، یکی از عوامل مؤثر بر ظرفیت جذب فسفر در خاک است. رس‌ها به دلیل داشتن تعداد زیادی گروه‌های عاملی با بار مثبت در سطح خود تمایل زیادی به جذب یون‌های با بار منفی فسفات  $(H_2PO_4^-)$  و  $(HPO_4^{2-})$  از محلول خاک دارند (هادجو، 2014). ارتباط معنی‌دار بین مقدار رس خاک و ضریب جذب تخمین زده شده از معادلات فروندلیچ و لانگمویر در مطالعات پیشین گزارش شده است (بایبری و همکاران، 2013؛ زانگ و همکاران، 2012 و اولیویرا و همکاران، 2014). مویندی و همکاران (2015) در بررسی جذب سطحی فسفر و ارتباط آن با برخی خصوصیات خاک‌های کنیا دریافتند که شاخص حداکثر جذب فسفر با مقدار رس خاک همبستگی مثبت و معنی‌دار دارد. در مطالعه صورت گرفته بر ظرفیت جذب سطحی فسفر خاک‌های سودان مشخص شد که ظرفیت جذب فسفر تحت تأثیر مقدار رس خاک است (آمل ادریس و سرخاتم احمد، 2012). در شکل 2-ج، مشاهده می‌شود که با افزایش میزان رس خاک (سایر خصوصیات همانند درصد ماده آلی و کربنات کلسیم فعال و ... مشابه باشد)، ظرفیت جذب فسفر افزایش یافت. وانگ و همکاران (2011) جذب بیشتر فسفر در خاک‌های با مقدار رس بیشتر را به بیشتر بودن سطح ویژه فعال رس‌ها نسبت دادند. جذب یک پدیده سطحی است و ارتباط مستقیم با سطح ویژه جاذب دارد. این نتایج با مطالعه پارکاش و همکاران (2017) مطابقت دارد. یافته‌های مطالعه آمل ادریس و سرخاتم احمد (2012) نشان داد که بیشترین مقدار پارامتر  $K_f$  معادله فروندلیچ در خاک اتی‌سول با 65 درصد رس است. صمدی (2006) گزارش کرد که شاخص‌های جذب فسفر به دست آمده از معادله لانگمویر با افزایش مقدار رس افزایش یافتند.

در خاک‌های آهکی، واکنش‌های فسفر با خاک تحت تأثیر کربنات کلسیم به عنوان کربنات غالب در خاک است. در خاک نقش کربنات کلسیم در جذب فسفر بیشتر به سطح ویژه (واکنشگری) و درصد این کانی کربناتی بستگی دارد (توفیقی و شیرمردی، 1394). مطالعات پیشین ارتباط ظرفیت جذب فسفر با کربنات کلسیم معادل را بررسی نموده‌اند و گزارش کرده‌اند که با افزایش کربنات کلسیم معادل ظرفیت جذب فسفر افزایش یافته است. اما

داده شد. نیاز استاندارد فسفر (SPR) که با استفاده از معادله ون‌های محاسبه شد، به عنوان غلظتی از فسفر محلول تعریف می‌شود که محدود کننده برای رشد گیاه نباشد. با افزایش کربن آلی SPR کاهش یافت اما افزایش کربنات کلسیم فعال و رس در خاک باعث افزایش نیاز استاندارد فسفر شد. مطالعات نشان داده است که نیاز استاندارد فسفر تحت تأثیر میزان رس، آهک و ظرفیت بافری خاک است. به عبارت دیگر خاک‌های حاوی مقادیر بیشتر رس و کربنات کلسیم، به‌منظور نگهداری غلظت فسفر در محلول خاک در یک حد مطلوب برای گیاه، نیاز به افزودن فسفر بیشتری به ازای واحد وزن خاک دارند. چنین خاک‌هایی توانایی زیادی در جذب فسفر دارند و حداکثر جذب ( $q_{max}$ ) و انرژی پیوند ( $k_i$ ) بیشتری دارند. در پژوهش حاضر SPR با  $q_{max}$  ( $r=0/94^{**}$ ) و  $k_i$  ( $r=0/76^{**}$ ) همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد.

جعفری و همکاران (1394) در مطالعه خود SPR را در دامنه 27/3 تا 132/1 میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک برآورد کردند. در مطالعه حاضر شاخص SPR با مقدار رس ( $r=0/80^{**}$ ) و کربنات کلسیم فعال ( $r=0/77^{**}$ ) همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد (جدول 7). این نتایج با مطالعات پیشین مطابقت دارد (شیروانی و شریعتمداری، 2002؛ اگنبن و تیسن، 1994). راشمیو همکاران (2016) با مطالعه نیاز استاندارد فسفر در چهار رده خاک دریافتند که بیشترین نیاز استاندارد فسفر در رده ورتی‌سول با 55/5 درصد رس به‌دست آمد.

با توجه به وقت‌گیر و مشکل بودن تعیین شاخص‌های ظرفیت جذب با استفاده از هم‌دهماهای جذب و رهاسازی فسفر، می‌توان با به‌کارگیری مدل‌های رگرسیون چند متغیره، آنها را با استفاده از ویژگی‌های خاک برآورد کرد. برای این منظور، شاخص‌های ظرفیت جذب و خصوصیات خاک با نرم‌افزار آماری SPSS بررسی گردید. استفاده از روش رگرسیون گام به گام نشان داد که شاخص‌های  $q_{max}$ ، PMBC و SPR را می‌توان با دقت زیاد به وسیله میزان رس و کربنات کلسیم فعال تخمین زد. با وارد کردن خصوصیات دیگر خاک به این رگرسیون افزایش معنی‌داری در ضرایب تبیین ایجاد نشد. بنابراین این ویژگی‌ها وارد مدل‌های مربوطه نشدند. برای برآورد  $K_F$  با استفاده از رگرسیون گام به گام، درصد رس و کربن آلی خاک وارد مدل گردید.

(مهدی‌زاده و همکاران، 1393). به‌طور کلی می‌توان گفت مواد آلی از طریق مکانیسم‌هایی مانند پوشش ذرات سزکویی اکسیدها توسط هوموس، جایگزینی آنیون فسفات به‌وسیله یون هومات، تشکیل کمپلکس‌های پایدار بین آنیون‌های آلی حاصل از تجزیه مواد آلی خاک با آهن و آلومینیوم که از واکنش آنها با فسفر ممانعت می‌کند باعث کاهش تثبیت فسفر در خاک و افزایش قابلیت دسترسی آن برای گیاه می‌شوند (هاولین 2005).

ظرفیت جذب فسفر با افزایش فسفر قابل دسترس در خاک به دلیل کاهش مکان‌های فعال جذب کاهش یافته است. زیرا این مکان‌ها قبلاً به وسیله فسفر اشغال شده‌اند. پرکاش و همکاران (2017) با مطالعه ظرفیت جذب فسفر در خاک‌هایی با فسفر قابل دسترس مختلف دریافتند که افزایش فسفر قابل دسترس در خاک، ظرفیت جذب فسفر را کاهش داد.

حداکثر ظرفیت بافری فسفر (PMAC) یکی از شاخص‌های ظرفیت بافری است که با استفاده از پارامترهای هم‌دمای جذب لانگمویر تعیین شد. مقدار این پارامتر به‌طور میانگین در خاک‌های گروه (ب) و (ج) بیشتر بود، که می‌تواند به بالاتر بودن مقادیر کربنات کلسیم فعال و رس در این خاک‌ها نسبت داده شود. در بررسی همبستگی حداکثر ظرفیت بافری فسفر با خصوصیات خاک مشخص شد که PMBC با مقدار رس ( $r=0/91^{**}$ ) و کربنات کلسیم فعال ( $r=0/67^{**}$ ) همبستگی مثبت و معنی‌دار دارد. جلالی و جلالی (2015) گزارش کردند که ظرفیت بافری فسفر به‌طور معنی‌داری در خاک‌های رسی بیشتر بود. در خاک‌های آهکی شاخص ظرفیت بافری جذب فسفر در ارتباط با کلسیم قابل عصاره‌گیری می‌باشد (مکلارن و همکاران، 2014). فینک و همکاران (2014) دریافتند که شاخص حداکثر ظرفیت بافری جذب فسفر اساساً تحت تأثیر پ‌هاش خاک، توزیع اندازه ذرات خاک، کانی‌شناسی رس، مقدار و نوع اکسیدهای آهن و آلومینیوم و انواع اکسیدهای بلورین خاک می‌باشد. جعفری و همکاران (1394) با مطالعه شاخص‌های ظرفیت بافری فسفر در چهار ردیف ارضی در مناطق خشک و نیمه خشک مشاهده کردند که تمام این شاخص‌ها در موقعیت پایین شیب بیشتر هستند که به بالاتر بودن مقادیر رس، ظرفیت تبادل کاتیونی و اکسیدهای آهن و آلومینیوم در موقعیت پایین شیب نسبت

جدول 8- معادلات رگرسیون گام به گام به منظور تخمین شاخص‌های بافری با

شاخص بافری	معادله رگرسیون	R <sup>2</sup>
q <sub>max</sub>	=12/85(C%) + 17/68(Acc%) + 271/178	0/87
PMBC	=9/64(C%) + 7/31(Acc%) - 137/8	0/93
SPR	=1/94(C%) + 2/72(Acc%) - 9/3	0/85
k <sub>f</sub>	=3/93(C%) - 5/91(OC%) + 25/6	0/93

C (رس)، Acc (کربنات کلسیم فعال) و OC (کربن آلی)

### نتیجه‌گیری

ظرفیت جذب (q<sub>max</sub>، k<sub>f</sub> و n) در مناطق ارزوئیه و نگار بیشتر از مناطق بافت و لاله‌زار بود که می‌تواند ناشی از بالاتر بودن مقادیر کربنات کلسیم فعال و رس در این مناطق باشد، به طوری که همبستگی بالایی بین این پارامترها با مقدار کربنات کلسیم فعال و رس خاک مشاهده شد. کمترین نیاز استاندارد فسفر در خاک‌های لاله‌زار و بافت با بیشترین میزان کربن آلی به‌دست آمد.

### تشکر و قدردانی

از آقای دکتر اکبر سلیمان‌زاده به دلیل راهنمایی‌های بی‌دریغ، سپاسگزاری می‌کنم.

استفاده از هم‌دماهای جذب می‌تواند اطلاعات مهمی در رابطه با جذب فسفر، شاخص‌های بافری، نیاز استاندارد فسفر و عوامل مؤثر بر آنها را ارائه دهند. معادلات استفاده شده در این مطالعه توانستند روند جذب فسفر را در خاک‌های با ویژگی‌های مختلف به خوبی توصیف نمایند. بر اساس ضرایب تبیین (R<sup>2</sup>) و خطای استاندارد (SE) معادله لانگمویر بهترین برازش را به داده‌های جذب نشان داد. جذب فسفر در خاک‌ها به شدت تحت تأثیر خصوصیات خاک همانند مقدار رس، کربنات کلسیم فعال و کربن آلی است. پارامترهای نشان دهنده

### فهرست منابع:

- توفیقی، ح. و م. شیرمردی. 1394. اثر کربنات کلسیم و pH بر سینتیک تثبیت فسفر در خاک‌های مختلف. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، جلد 46، شماره 4، ص 748-739.
- جعفری، ا.، ح. شریعتمداری، و م. حجازی مهریزی. 1394. تعیین شاخص‌های بافری و نیاز استاندارد فسفر در چهار ردیف ارضی مناطق خشک و نیمه خشک با استفاده از هم‌دماهای جذب سطحی (مطالعه موردی: اصفهان و شهرکرد). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد 22، شماره 3، ص 103-89.
- چرم، م. و ع. احمدپور داشلی برون. 1386. بررسی ویژگی‌های جذب سطحی فسفر در خاک‌های تحت کشت نیشکر در منطقه شعبیه خوزستان. مجله پژوهش در کشاورزی: آب، خاک و گیاه در کشاورزی. جلد 7، شماره 3، ص 114-103.
- حسین‌پور، ع. و خ. عنایت‌ضمیر. 1384. مشخصات جذب سطحی فسفر و رابطه آن با ویژگی‌های خاک در شماری از خاک‌های همدان. مجله علوم کشاورزی ایران. جلد 37، شماره 3، ص 516-509.
- ریحانی‌تبار، ع. 1389. بررسی خصوصیات واکنش‌پذیری کربنات‌ها در برخی خاک‌های آهکی ایران. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. جلد 41، شماره 2، ص 209-201.
- کشتکار، س. 1394. مطالعه شاخص‌های تفرق خاک در اشکال اراضی مختلف در مناطق کرمان - لاله‌زار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- ملک‌پور، ا. 1394. نحوه تشکیل و میکرومورفولوژی خاک‌های برش طولی دشتاب - اسلام‌آباد شهرستان بافت استان کرمان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- مهدی‌زاده، م. ع. ریحانی‌تبار و ش. اوستان. 1393. تأثیر حذف ماده آلی خاک بر جذب فسفر در برخی از خاک‌های آهکی استان آذربایجان شرقی. نشریه تحقیقات کاربردی خاک. جلد 2، شماره 1، ص 14-1.

9. صمدی، ع و ا. سپهر. 1392. استفاده از هم‌دماهای جذب فسفر در تعیین نیاز کودی غلات. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). سال 17. شماره 65. 173-184.
10. شهبازی، ک. و م. ح. داوودی. 1391. ارزیابی نیاز فسفر گندم در خاک‌های آهکی با استفاده از هم‌دماهای جذب فسفر. نشریه پژوهش‌های خاک (علوم آب و خاک). جلد 26. شماره 1. ص 1-17.
11. شیروانی، م. و ح. شریعتمداری. 1381. استفاده از هم‌دماهای جذب سطحی در تعیین شاخص‌های ظرفیت بافری و نیاز استاندارد فسفر برخی خاک‌های آهکی استان اصفهان. نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. جلد 6. شماره 1. ص 121-129.
12. نادری‌پیکام، ا. و م. جلالی. 1388. جذب سطحی فسفر و ارتباط آن با خواص فیزیکی و شیمیایی برخی از رسوبات رودخانه‌ای همدان. یازدهمین کنگره علوم خاک ایران. دانشگاه گرگان.
13. Agbenin, J.O., and H. Tiessen. 1994. The effects of soil properties on the differential phosphate sorption by semiarid soils from northeast Brazil. *Soil Science Society American Journal*. 157: 36-45.
14. Allison, L.E., and C.D. Moodie. 1965. Carbonates. In: Black, C. A. (ED). *Methods of Soil Analysis*. Pares, ASA: Madison, WI. 1379-1396.
15. Amel Idris, O.A., and H. Sirelkhathim Ahmed. 2012. Phosphorus sorption capacity as a guide for phosphorus availability of selected Sudanese soil series. *African Crop Science Journal*. 20(1): 59-65.
16. Barbieri, D.M., J. Marques, G.T. Pereira, N. La Scala, D.S. Siqueira, and A.R. Panosso. 2013. Comportamento dos óxidos de ferro da fração Argila e do fósforo adsorvido, em diferentes Sistemas de colheita de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Cienciado solo*. 37: 1557-1568.
17. Bradl, H.B. 2004. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Colloid and Interface Science Journal*. 277: 1-18.
18. Daly, K., D. Styles, S. Lalor, and D.P. Wall. 2015. Phosphorus sorption, supply potential and availability in soils with contrasting parent material and soil chemical properties. *Soil Science European. Journal*. 66: 792-801.
19. Dhillon, N.S., and G. Dev. 1988. Transformation of soil inorganic phosphorus reactions under various crop rotations. *Soil Science Society Indian Journal*. 39: 709-713.
20. Donald, L.S. 2003. *Environmental soil chemistry*. San Diego, USA: Academic Press.
21. Dossa, E.L., J. Bakam, and M. Kkouma. 2008. Phosphorus sorption and desorption in semiarid soils of Senegal amended with native shrub residues. *Soil Science Society American Journal*. 173: 669-82.
22. Fink, J.R., A.V. Inda, J. Bavaresco, V. Barrón, J. Torrent, and C. Bayer. 2016. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. *Soil & Tillage Research*. 155: 62-68.
23. Fink, J. R., A.V. Inda, C. Bayer, J. Torrent, and V. Barrón. 2014. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. *Acta Scientiarum Agronomy*. 36(3): 379-387.
24. Gee, G.W., and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. Pp.201-214. In: HD Jacob and G Clarke Topp. (Eds) . *Methods of Soil Analysis*. Part 4. Physical Methods. SSSA. Madison, WI.
25. Gorgin, N., M. Fekri, and L. Sadegh. 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.

26. Guedes, R.S., L.C.A. Melo, L. Verguts, A. Rodríguez-Vila, E.F. Covelo and A.R. Fernandes. 2016. Adsorption and desorption kinetics and phosphorus hysteresis in highly weathered soil by stirred flow chamber experiment. *Soil & Tillage Research*. 162: 46-54.
27. Hadgu, F., H. Gebrekidan, K. Kibret, and B. Yitaferu. 2014. Study of Phosphorus adsorption and its relationship with soil Properties, analyzed with Langmuir and Freundlich models. *Agriculture Forestry and Fisheries*. 3(1): 40-51.
28. Havlin, J.L., S.L. Tisdale, J.D. Beaton, and W.L. Nelson. 2005. *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management*. 7.ed. Pearson Education, Upper Saddle River, NJ.
29. Holford, I.C.R., and G.E.G. Mattingly. 1976. Phosphate adsorption and availability plant of phosphate. *Plant and Soil*. 44(2): 377-389.
30. Hoseini, Y., and R.D. Taleshmikael. 2013. Comparison of phosphorus adsorption isotherms in soil and its relation to soil properties. *International Journal of Agricultural: Reserch and Reviews*. 3(1): 163-171.
31. Jalali, M., and M. Jalali. 2015. Relation between various soil phosphorus extraction methods and sorption parameters in calcareous soils with different texture. *Science of Total Environment*. 1-14.
32. Leoppert, R.H., and D.L. Suarez. 1996. *Methods of Soil Analysis . part3.Chemical Methods*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy Madison.WI.
33. Liu, J. Z., Z.S. Li, and J.Y. Li. 1994. Utilization of plant potentialities to enhance the bio-efficiency of phosphorus in soil. *Ecoagriculture Research*. 2: 16–23.
34. Maluf, H.J.G.M., C.A. Silva, N. Curi, L.D. Norton, and S.D. Rosa. 2018. Adsorption and availability of phosphorus in response to humic acid rates in soils limed with CaCO<sub>3</sub> or MgCO<sub>3</sub>. *Ciência e Agrotecnologia*. 42(1): 7-20.
35. Marschner, P. 2012. *Mineral Nutrition of Higher Plants, Chapter 5 .Mineral Nutrition, Yield and Source- Sink Relationship*. Elsevier. 85-133.
36. McLaren, T., C. Guppy, M. Tighe, P. Moody, and M. Bell. 2014. Dilute acid extraction is a useful indicator of the supply of slowly available phosphorus in Vertisols. *Soil Science Society American Journal*. 78. 139–146.
37. Mihoub, A., and B.N. Deraoui. 2014. Performance of different phosphorus fertilizer types on wheat grown in calcareous sandy soil of El-Menia, Southern Algeria. *Asian Journal of Crop Science*. 6: 383–391.
38. Moazed, H., Y. Hoseini, A.A. Naseri, and F. Abbasi. 2010. Determining phosphorus adsorption isotherm in soil and its relation to soil characteristic. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 8(2): 1153-1157.
39. Novais, R. F., and T.J. Smyth. 1999. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: Editora UFV, 399p.
40. Oliveira, C.M.B., L.C. Gatiboni, D.J. Miquelluti, T.J. Smyth, and J.A. Almeida. 2014. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia de ligação em Latossolo Bruno em razão de diferentes ajustes do modelo de Langmuir. *Revista Brasileira de Cienciado solo*. 38: 1805–1815.
41. Olsen, S. R., and F.E. Khasawneh. 1980. Use and limitations of physical- chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. 361-410.
42. Olsen, S. R., and L.E. Sommer, 1982. Phosphorus. In: Klute, A. (Ed). *Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties, part2*. 2nd Ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA and SSSA, Madison WI. 403-430.
43. Polyzopoulos, N.A., V.Z. Ceramidas, and H. Kiosse. 1985. Phosphate sorption by some Alfisols of Greece as described by commonly used isotherms. *Soil Science Society American Journal*. 49: 81-84.

44. Rashmi, I., V.R.R. Parama, and A.K. Biswas. 2016. Phosphate sorption parameters in relation to soil properties in some major agricultural soils of India. *SAARC Journal of Agriculture*. 14(1): 01-09.
45. Rhoads, J. W. 1986. Cation exchange capacity. Pp. 149- 158. In A. C. Page (Ed). *Methods of soil analysis. Part 2*. American Society of Agronomy.
46. Samadi, A. 2006. Phosphorus sorption characteristics in relation to soil properties in some calcareous soils of western Azarbaijan Province. *Journal of Agriculture Science. Technology*. 8: 251-264.
47. Shoja.H., G. Rahimi, M. Fallah, and E. Ebrahimi. 2017. Investigation of phosphorus fractions and isotherm equation on the lake sediments in Ekbatan Dam (Iran). *Environmental Earth Sciences*. 76: 235-250.
48. Siddique. M.T., and J.S. Robinson. 2003. Phosphorus sorption and availability in soils amended with animal manures and sewage sludge. *Journal of Environmental Quality*. 32: 1114- 1121.
49. Sposito, G., 2008. *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press, Oxford, p 10016.
50. Stutter, M.I., Shand, C.A. George, T.S. Blackwell, M.S.A. Bol, R. Mackay, R.L. Richardson A.E. Condon, L.M. Turner, B.L. Haygarth, P.M. 2012. Recovering phosphorus from soil a root solution? *Environmental. Soil Science of Technology*. 46: 1977-1978.
51. Sui. Y., and M.L. Thompson. 2000. Phosphorus Sorption, Desorption, and Buffering Capacity in a Biosolids-Amended Mollisol. *Soil Science Society of American Journal*. 64: 164-169.
52. Tang, X., M.Wue, X. Daia, P. Chaia. 2014. Phosphorus storage dynamics and adsorption characteristics for sediment from a drinking source reservoir and its relation with sediment compositions. *Ecological Engineering*. 64: 276-284.
53. Tisdale, S.I., W.L. Nelson, J.D Beaton, and B.Tames. 1984. *Soil Fertility and fertilizers*, fourth edition Collier Macmillan publishers London, Macmillan Publishing Company.
54. Wahba M. M. 2013. Influence of Soil Components on Phosphorus availability in some soils of Egypt. *Research Journal of Chemistry Environment*. 17(9): 58-65.
55. Walkey, A., and I.A. Black. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29-38.
56. Wang, L., T.Liang, P.J.A. Kleinman, H.Cao. 2011. An experimental study on using rare earth elements to trace phosphorous losses from nonpoint sources. *Chemosphere Journal*. 85: 1075-1079.
57. Wogi, L., J.J. Msaky, F.B.R. Rwehumbize, and K. Kibret. 2015. Phosphorus adsorption isotherm: a key aspect for soil phosphorus fertility management. *American Journal of Experimental Agriculture*. 6(2): 74-82.
58. Wolde, Z., and W. Haile. 2015. Phosphorus sorption isotherms and external phosphorus requirements of some soils of southern Ethiopia. *African Crop Science Journal*. 23(2): 89-99.
59. YANG, S., Z. Zang, L. Cong, X. Wang, and S. Shi. 2013. Effect of fulvic acid on the phosphorus availability in acid soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 13(3): 526-533.
60. YU, W., X. Ding, S. Xue, S. Li, X. Liao, and R. Wang. 2013. Effects of organic-matter application on phosphorus adsorption of three soil parent materials. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 13(4):1003-1017.
61. Zhang, B., F. Fang, J. Guo, Y. Chen, Z. Li, and S. Guo. 2012. Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics relevant to the soil composition water-level-fluctuating zone of three Gorges reservoir. *Ecological Engineering*. 40: 153-59.

## Effects of Organic Carbon, Active Calcium Carbonate, and Clay on Phosphorus Sorption Properties in Some Calcareous Soils of Kerman Province

**H. Hosseini<sup>1</sup>, M. Fekri, M. H. Farpoor, and M. Mahmoodabadi**

Ph.D. student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran; E-mail: h.hosseini@agr.uk.ac.ir

Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran; E-mail: mjdfekri@yahoo.com

Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran; E-mail: farpoor@uk.ac.ir

Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran; E-mail: mahmoodabadi@uk.ac.ir

Received: March, 2019 and Accepted: July, 2019

### Abstract

Phosphorus availability in soils is controlled by sorption/desorption reactions. These reactions are also affected by the physical and chemical properties of the soil. In this research, effects of organic carbon, active calcium carbonate and clay on the phosphorus sorption behavior of calcareous soils were studied along Negar-Lalezar and Baft Orzouyeh transects in Kerman Province, Iran. The phosphorus sorption in soil was determined using batch experiment and Langmuir, Freundlich and Van Hay isotherms. The results showed that, based on the coefficient of determination (0.978) and standard error of estimate (0.027), Langmuir model fitted well with experimental data. Maximum sorption of phosphorus ( $q_{max}$ ) and maximum buffering capacity of P increased when the active calcium carbonate increased. Results showed that  $q_{max}$  increased from 655 to 1025 mg.kg<sup>-1</sup>, and the maximum buffering capacity of P increased from 114 to 243 L.kg<sup>-1</sup> when calcium carbonate increased from 7.68% to 18.25%. However,  $q_{max}$  decreased from 701 to 535 mg.kg<sup>-1</sup> and maximum buffering capacity of P decreased from 90 to 44 L.kg<sup>-1</sup> with increasing organic carbon in the studied soils (from 1.74% to 7.8%). Using the equation of Van Hay, the required standard phosphorus calculated at a concentration of 0.3 mg P.L<sup>-1</sup> showed a significantly positive correlation with clay ( $r = 0.80^{**}$ ) and active calcium carbonate ( $r = 0.77^{**}$ ) contents, but significantly negative correlations with organic carbon ( $r = -0.63^{*}$ ) and available phosphorus ( $r = -0.61^{*}$ ). The maximum buffering capacity and the required standard phosphorus were found in the soils of Orzouyeh and Negar regions due to their highest percentage of active calcium carbonate and clay. However, in the soils of Lalezar and Baft regions, due to the presence of more organic carbon and less active calcium carbonate, the lowest standard phosphorus requirement was obtained. It could be concluded that phosphorus sorption in soils is influenced by soil properties such as clay, active calcium carbonate, and organic carbon contents.

**Keywords:** Sorption isotherm, Buffer capacity, Standard requirement

---

<sup>1</sup> Corresponding author: Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman