

شاخص‌های پسماند همدماهای جذب - واجذب پتاسیم در برخی خاک‌های آذربایجان شرقی

عرفان خدری، شاهین اوستان¹ و عادل ریحانی تبار

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز؛ erfankhedri@yahoo.com

دانشیار دانشگاه تبریز؛ oustan@hotmail.com

دانشیار دانشگاه تبریز؛ areyhani@tabrizu.ac.ir

دریافت: 94/11/6 و پذیرش: 95/9/17

چکیده

تثبیت پتاسیم در خاک منجر به پدیده پسماند در همدماهای جذب-واجذب پتاسیم می‌شود. لذا، با محاسبه شاخص‌های کمی این پدیده می‌توان شاخصی که بیشترین همبستگی را با میزان تثبیت پتاسیم نشان می‌دهد، به‌عنوان مناسبترین شاخص معرفی کرد. بدین منظور، 12 نمونه خاک با کانی‌شناسی رس مختلف از دشت تبریز و اطراف مرند جمع‌آوری گردید. سپس میزان تثبیت پتاسیم با استفاده از غلظت‌های 250 و 2500 میلی‌گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. آزمایش‌های مربوط به همدمای جذب با اعمال 10 غلظت اولیه 5 تا 250 میلی‌گرم پتاسیم بر لیتر انجام گرفت و همدمای جذب پتاسیم به‌دست آمد. واجذب پتاسیم در غلظت اولیه 250 میلی‌گرم پتاسیم بر لیتر با استفاده از محلول زمینه (0/01 مولار کلرید کلسیم) و طی 10 مرحله انجام گرفت. نتایج نشان داد که میزان تثبیت پتاسیم با افزایش غلظت پتاسیم عصاره اشباع و میزان پتاسیم تبادل‌ی خاک‌ها به شدت کاهش یافت. معادله فروندلیچ برازش خیلی خوبی را به هر دو شاخه جذب و واجذب همدماها نشان داد. شاخص‌های مختلف پسماند همبستگی‌های معنی‌داری را با مقادیر درصد تثبیت پتاسیم به‌ازاء یک درصد رس نشان دادند. همچنین، با کنار گذاشتن خاک‌های با مقادیر بزرگ شاخص پسماند، همبستگی‌های معنی‌داری بین مقادیر شاخص‌های پسماند و درصد تثبیت پتاسیم حاصل شد. بیشترین همبستگی با استفاده از شاخص بر مبنای توان β معادله فروندلیچ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: تثبیت پتاسیم، درصد رس، کانی‌شناسی رس، معادله فروندلیچ

¹ نویسنده مسئول، آدرس: تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی خاک

را از آنچه با کلسیم و منیزیم محلول خاک در تعادل تبادلی است، استخراج می‌کند (بدرائوری و بلوم، 1989؛ شایبو و همکاران 1985؛ مارتین و اسپارکس 1983؛ باربر، 1979؛ متیوس و بکت، 1962). لیو و همکاران (1997) نیز پتاسیم تثبیت شده را بخشی از پتاسیم خاک معرفی می‌کنند که به آسانی توسط تبادل کاتیونی رهاسازی نمی‌شود، ولی توسط روش‌های قوی‌تر قابل رهاسازی می‌باشد. آگاهی از فرایند تثبیت پتاسیم برای فهم بهتر رفتار خاک نسبت به مصرف کود پتاسیم و انجام توصیه‌های کودی معقول ضروری است. از این رو، تأثیر تثبیت پتاسیم بیشتر از بابت کاهش کارایی مصرف کود پتاسیم و نه جلوگیری از آیشویی آن مورد توجه قرار گرفته است (اشنایدر و همکاران، 2013). این فرایند می‌تواند تا 3 تن در هکتار پتاسیم را در خاک ذخیره نماید (بیاره و همکاران، 2007). میزان تثبیت پتاسیم به عواملی مانند نوع کانی رس و چگالی بار آن، مقدار رطوبت، یون‌های رقابت‌کننده و pH بستگی دارد. تثبیت پتاسیم در شرایط خشک و تر عمدتاً توسط کانی‌های در اندازه رس ورمیکولایت و ایلایت (حاوی بار غالب تتراهدروالی) که نیروهای بین لایه‌ای بر نیروهای آبیوشی غلبه دارند، انجام می‌شود (اسپارکس، 1987)، گرچه نقش ذرات سیلت (موراشکینا، 2007) و شن (نجفی-قیری و ابطحی، 2013) نیز گزارش شده است.

همچنین، اسمکتایت‌های حاوی بار غالب اکتاهدروالی قادرند قدری پتاسیم را در شرایط تر تثبیت کنند. ظرفیت تثبیت پتاسیم برای اسمکتایت‌های خاک بیش از اسمکتایت‌های نمونه‌ای است (اسپارکس، 1987). بوعبید و همکاران (1991) 64 و 36 درصد از تثبیت پتاسیم را به ترتیب به بار تتراهدروالی و بار اکتاهدروالی نسبت دادند. در حالی که تثبیت پتاسیم فرایندی نسبتاً سریع است، رهاسازی آن خیلی کند می‌باشد (زورب و همکاران، 2014). گریوال و کانوار (1967) گزارش کردند که تقریباً 90 درصد پتاسیم افزوده شده در یک روز تثبیت گردید. جذب و واجذب پتاسیم به‌طور جداگانه به کرات مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. باین‌حال، مطالعه همزمان این دو فرایند کمتر مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات نشان داده است که مقدار پتاسیم واجذب شده کمتر از پتاسیم افزوده شده بوده است (هوندال و پاسریجا، 1998؛ چودهاری و پاساد، 1997). با این حال، ممکن است پارامترهای همدماهای جذب و واجذب نیز متفاوت از یکدیگر باشند (لیموزین و همکاران، 2007). برگشت ناپذیری واکنش جذب سطحی پتاسیم به واسطه تثبیت پتاسیم (تشکیل نوعی کمپلکس کره درونی) می‌باشد

فراهمی عناصر غذایی در خاک تحت تأثیر پدیده‌های جذب-واجذب که در حد فاصل ذرات و محلول اتفاق می‌افتند، قرار دارد. همدماهای جذب-واجذب نمایش بصری مناسبی از نگهداشت و رهاسازی یون‌ها را فراهم کرده و ابزار مناسبی برای ارزیابی ظرفیت و قدرت نگهداشت در سطح می‌باشند. بدیهی‌ترین استفاده از همدماها، مقایسه مقادیر نسبی ماده جذب شده که خاک می‌تواند تحت شرایط معین آن را نگهداری یا آزاد کند، می‌باشد (سینگ و همکاران، 2006). اغلب مشاهده می‌شود که تمایل به نگهداشت یک ماده از واکنش رفت (جذب) به واکنش برگشت (واجذب) افزایش می‌یابد. این پدیده پسماند نامیده می‌شود که نتیجه عینی آن عدم انطباق شاخه‌های جذب و واجذب همدما است. به‌طور کلی، دو نوع پسماند وجود دارد: پسماند واقعی و پسماند کاذب. پسماند واقعی ناشی از فرایندهای غیرقابل برگشت مانند: تبلور فازهای جامد جدید، تشکیل کمپلکس‌های کره درونی، پخش به درون فاز جامد (لیموزین و همکاران، 2007) بوده و پسماند کاذب ناشی از عوامل آزمایشگاهی کنترل نشده مانند: هدر رفت جرم از ظرف و عدم حصول تعادل در پخشیدگی طی مراحل جذب و یا واجذب یا اتصال ماده حل شده به جزء سومی که غلظت یا ویژگی‌های آن در طی آزمایش تغییر می‌کند (ساندر و همکاران، 2005)، می‌باشد. به‌منظور کمی‌کردن این پدیده، شاخص‌های متعددی مانند مقدار ماده جذب شده، توان معادله فروندلیچ، ضریب توزیع ظاهری، سطح بین شاخه‌های جذب و واجذب همدما و شیب همدمای واجذب نسبت به همدمای جذب، ارائه شده است (ساندر و همکاران، 2005).

باین‌حال، مناسبترین شاخص برای پدیده پسماند معرفی نشده است. تثبیت پتاسیم یکی از مهمترین فرایندهای مؤثر در فراهمی این عنصر غذایی در خاک است. در این فرایند، پتاسیم از شکل فراهم به شکل نسبتاً فراهم تغییر شکل می‌دهد. این تعریف وابستگی زیادی به نوع گیاه و زمان دارد. تعریف دقیق تر بخشی از پتاسیم افزوده شده است که بلافاصله توسط محلول استات آمونیوم نرمال قابل استخراج نیست (گریوال و کنوار، 1973). گرچه برخی محققان تمایزی بین این دو قائل نشده‌اند (پاس و همکاران، 1991). این تعریف حتی در دهه سی میلادی که هنوز مکانیسم تثبیت پتاسیم روشن نبود، در اندازه‌گیری آن لحاظ می‌شد (جوفه و کلودنه، 1936). باین‌حال، تعدادی از محققان محلول کلرید کلسیم را مناسب‌تر می‌دانند، زیرا استات آمونیوم پتاسیم بیشتری

تعیین زمان تعادل جذب و واجذب پتاسیم: قبل از انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری میزان تثبیت پتاسیم و همدماهای جذب- واجذب پتاسیم و به منظور احتراز از پسماند کاذب، سرعت واکنش‌های جذب و واجذب پتاسیم در خاک‌ها تعیین گردید. بدین منظور، 2/5 گرم از هر نمونه خاک به داخل یک لوله سانتریفوژ منتقل شده و به آن 25 میلی‌لیتر محلول 0/01 مولار کلرید کلسیم حاوی بالاترین غلظت اولیه پتاسیم مورد استفاده (250 mg/l) اضافه گردیده و در شش زمان 30 دقیقه، 1، 2، 3، 6 و 16 ساعت به طور متناوب با 120 رفت و برگشت در دقیقه تکان داده شد. به طوری که، لوله‌ها در 20 درصد از مدت زمان‌های یاد شده تکان داده شدند. سپس، به مدت 10 دقیقه و در 4000 دور در دقیقه سانتریفوژ شده و بعد از صاف کردن محلول، غلظت پتاسیم در محلول زلال رویی توسط دستگاه نورسنج‌شعله‌ای با استفاده از استانداردهای 4 و 8 میلی‌گرم پتاسیم بر لیتر مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. نهایتاً، با ترسیم این مقادیر در مقابل زمان، زمان تعادل جذب مشخص شد. برای پیدا کردن زمان تعادل واجذب از میان 12 نمونه خاک دو نمونه خاک با توجه به مقدار جذب پتاسیم به ازای واحد درصد رس در آزمایش تعیین زمان تعادل جذب پتاسیم، انتخاب شدند. زمان تعادل واجذب یکبار برای اولین مرحله واجذب و بار دیگر برای دهمین مرحله واجذب به دست آمد. بدین منظور، برای اولین مرحله واجذب، به 2/5 گرم خاک 25 میلی‌لیتر محلول 0/01 مولار کلرید کلسیم حاوی بالاترین غلظت اولیه پتاسیم مورد استفاده (250mg/l) اضافه شده و تا رسیدن به تعادل عمل تکان دادن با 120 رفت و برگشت در دقیقه انجام گرفت. سپس، به مدت 10 دقیقه و در 4000 دور در دقیقه سانتریفوژ گردید و پس از آن 20 میلی‌لیتر از محلول زلال رویی بیرون کشیده شد و به آن 20 میلی‌لیتر محلول کلرید کلسیم 0/01 مولار اضافه شد و در شش زمان مختلف 30 دقیقه، 1، 2، 3، 6 و 16 ساعت با 120 رفت و برگشت در دقیقه تکان داده شدند. پس از گذشت مدت زمان‌های مقرر، لوله‌ها به مدت 10 دقیقه و در 4000 دور در دقیقه سانتریفوژ شده و غلظت پتاسیم در محلول زلال رویی توسط دستگاه نورسنج شعله‌ای قرائت گردید. بار دیگر، همین مراحل برای دهمین مرحله واجذب تکرار گردید. در نهایت، برای هر دو حالت با ترسیم غلظت پتاسیم در مقابل زمان، زمان تعادل واجذب مشخص شد. اندازه‌گیری میزان تثبیت پتاسیم: در این تحقیق برای اندازه‌گیری میزان تثبیت پتاسیم از روش تر استفاده شد (ون در مارل و ونیکمپ، 1956). بدین منظور، از هر نمونه خاک 2/5 گرم به داخل

(سها و اینوئه، 1998). با پیش فرض وجود همبستگی بین میزان تثبیت پتاسیم و شاخص‌های کمی پدیده پسماند، می‌توان مناسب‌ترین شاخص را برای شبیه‌سازی این پدیده به دست آورد. این تحقیق با هدف بررسی وجود همبستگی بین تثبیت پتاسیم و شاخص‌های پسماند و انتخاب شاخص دارای بیشترین همبستگی انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

انتخاب نمونه‌های خاک و تعیین ویژگی‌های عمومی آنها: در این مطالعه شش نمونه خاک (4، 5، 8، 9، 11 و 12) از دشت تبریز و شش نمونه خاک (1، 2، 3، 6، 7 و 10) از اطراف مرند (افق Ap) با کانی‌شناسی رس مختلف انتخاب شدند. نمونه‌ها پس از هوا خشک شدن و عبور از الک دو میلیمتری برای انجام آزمایش‌های بعدی نگهداری گردیدند. در نمونه‌ها pH گل اشباع و EC عصاره اشباع (ریچاردز، 1954)، بافت به روش هیدرومتری (گی و اور، 2002)، کربن آلی (OC) به روش اکسایش تر (نلسون و سامرز، 1982) و کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش خنثی سازی با اسید و تیتراسیون (آلیسون و مودی، 1965) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات سدیم (چپمن، 1965) تعیین گردید. غلظت پتاسیم محلول در عصاره اشباع (ریچاردز، 1954) و محلول 0/01 مولار کلرید کلسیم (1:10، 2 ساعت) (هوبا و همکاران، 1986) و غلظت پتاسیم تبادل به روش کلرید کلسیم 0/5 مولار (1:10، نیم ساعت) (سادوسکی و همکاران، 1987) اندازه‌گیری شد.

کانی شناسی بخش رس خاک‌ها در چهار مرحله شامل تیمارهای مقدماتی، جداسازی بخش رس، تیمار کردن رس‌ها با منیزیم، منیزیم-اتیلن گلیکول، پتاسیم و پتاسیم-550 درجه سلسیوس به همراه تهیه اسلایدهای مربوطه و در نهایت به دست آوردن دیفرکتوگرام‌ها به انجام رسید (جکسون، 1956). بدین منظور از دستگاه XRD شیمادزو مدل 6000 با تابش $K\alpha_2$ لامپ مسی و فیلتر نیکل (30 کیلوولت و 30 میلی آمپر) در 20 تا 30 درجه با سرعت گونیومتر 2 درجه در دقیقه و ثابت زمانی 2 ثانیه استفاده گردید. به منظور تعیین نیم کمی مقادیر نسبی کانی‌های رس در نمونه‌ها از روش کلاگز و هوپر (1982) که در آن سطح زیر پیک‌های شاخص به روش وزنی تعیین می‌شود، استفاده گردید. در این روش فاکتورهای تصحیح سطح زیر منحنی برای اسمکتایت، ایلات، کلرایت، کائولینایت و کوارتز به ترتیب 5، 1، 5، 2/5 و 4 انتخاب گردید. در نمونه‌های رس ورمیکولایت تشخیص داده نشد.

$$q = \frac{V(C_i - C_e)}{m}$$

که در آن: q : مقدار پتاسیم جذب شده
 $V, (mg/kg)$: حجم محلول $C_e, (L)$: غلظت اولیه
 پتاسیم $C_e, (mg/l)$: غلظت تعادلی پتاسیم $m, (mg/l)$:
 جرم خاک (kg) ، می‌باشد. با ترسیم مقدار پتاسیم
 جذب شده (q) در مقابل غلظت تعادلی (c) همدمای
 جذب پتاسیم به دست آمد.

همدمای واجذب پتاسیم: آزمایش واجذب در
 هشت نمونه خاک که در همدمای جذب آنها جذب بر
 واجذب غالب بود، انجام شد. برای این آزمایش از غلظت
 اولیه 250 میلی‌گرم پتاسیم برلیتر استفاده شد. از انجام
 آزمایش واجذب در غلظت اولیه 25 میلی‌گرم بر لیتر به
 دلیل ناکافی بودن تعداد نقاط جذبی برای ترسیم همدمای
 صرف نظر گردید. آزمایش واجذب بلافاصله بعد از
 آزمایش جذب انجام گرفت. بدین ترتیب که بعد از اتمام
 مراحل همدمای جذب، 20 میلی‌لیتر از محلول زلال رویی
 بیرون کشیده شد و 20 میلی‌لیتر محلول 0/01 مولار
 کلریدکلسیم اضافه شده و با 120 رفت و برگشت در
 دقیقه تا حصول حالت تعادل تکان داده شد. سپس، به
 مدت 10 دقیقه در 4000 دور در دقیقه سانتریفوژ شده و
 غلظت پتاسیم در محلول زلال رویی توسط دستگاه
 نورسنج شعله‌ای مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. واجذب
 پتاسیم طی هشت مرحله انجام گرفت. در نهایت،
 همدماهای جذب - واجذب پتاسیم ترسیم شد و شاخص -
 های پسماند (جدول 1) محاسبه گردید. سپس، همبستگی
 بین میزان تثبیت پتاسیم و مقدار عددی این شاخص‌ها
 بررسی شد و شاخص دارای بیشترین همبستگی به عنوان
 مناسب‌ترین شاخص برای کمی کردن پدیده پسماند
 معرفی گردید. تمامی آزمایش‌ها در دو تکرار انجام شدند.
 همچنین، برای ترسیم همدماهای جذب و واجذب از
 Excel، برای برازش معادله همدماهای جذب و واجذب
 از نرم افزار Statgraphics plus 2.1 و برای محاسبه سطح
 بین شاخه‌های جذب و واجذب همدمای (شاخص D) از
 نرم‌افزار Matlab استفاده گردید.

لوله‌های سانتریفوژ 50 میلی لیتری منتقل شده و به هریک
 از آن‌ها 25 میلی‌لیتر محلول کلرید کلسیم 0/01 مولار
 حاوی صفر، 250 و 2500 میلی‌گرم پتاسیم بر کیلوگرم از
 منبع کلرید پتاسیم اضافه شده و با 120 رفت و برگشت
 در دقیقه تا برقراری حالت تعادل تکان داده شد. سپس، به
 مدت 10 دقیقه در 4000 دور دقیقه سانتریفوژ شده و
 محلول زلال رویی دور ریخته شد. قبل از آن، حجم
 محلول دور ریخته شده و غلظت پتاسیم آن مورد اندازه-
 گیری قرار گرفت (اشنایدر، 1997). سپس، 25 میلی‌لیتر
 محلول کلرید کلسیم 0/5 مولار اضافه شده (مارتین و
 اسپارکس، 1983) با 120 رفت و برگشت در دقیقه به
 مدت نیم ساعت تکان داده شده و در 2000 دور در دقیقه
 به مدت پنج دقیقه سانتریفوژ گردید. بعد از آن، محلول
 زلال رویی در یک بالن 100 میلی‌لیتری جمع‌آوری شد.
 این کار دو بار دیگر انجام شد و بعد از به حجم رساندن
 بالن، غلظت پتاسیم در محلول استخراج شده توسط
 دستگاه نورسنج شعله‌ای اندازه‌گیری گردید. نهایتاً، از
 رابطه زیر میزان تثبیت پتاسیم تعیین شد (شایو و
 همکاران، 1985):

$$K_f = (K_c + K_a - K_i) - K_l$$

که در آن: K_f : مقدار پتاسیم تثبیت شده $K_a, (mg/kg)$:
 مقدار پتاسیم افزوده شده $K_i, (mg/kg)$: مقدار پتاسیم دور
 ریخته شده $K_c, (mg/kg)$: مقدار پتاسیم قابل استخراج از
 شاهد $K_l, (mg/kg)$: مقدار پتاسیم قابل استخراج از نمونه -
 ای که به آن پتاسیم افزوده شده است (mg/kg) ، می‌باشد.
 درصد تثبیت پتاسیم (F) از رابطه زیر به دست آمد:

$$F = \frac{K_f}{K_a - K_l} \times 100$$

که در آن: $K_a - K_l$: مقدار پتاسیم ابقاء شده در خاک،
 می‌باشد.

همدمای جذب پتاسیم: به 2/5 گرم نمونه خاک
 25 میلی‌لیتر محلول 0/01 مولار کلرید کلسیم که حاوی
 غلظت‌های 5، 20، 25، 50، 75، 100، 125، 150، 200 و
 250 میلی‌گرم پتاسیم بر لیتر از منبع کلرید پتاسیم می‌باشد
 اضافه و تا حصول حالت تعادل با 120 رفت و برگشت
 در دقیقه تکان داده شدند، برای خاک‌های شماره پنج و نه
 غلظت‌های 500 و 750 میلی‌گرم پتاسیم بر لیتر نیز اضافه
 شدند. سپس، به مدت 10 دقیقه در 4000 دور در دقیقه
 سانتریفوژ شده و غلظت پتاسیم در محلول زلال رویی
 توسط دستگاه نورسنج شعله‌ای اندازه‌گیری گردید. از
 تفاضل غلظت اولیه و غلظت تعادلی طبق رابطه زیر مقدار
 جذب پتاسیم (q) به دست آمد (سینگ و جونز، 1975):

جدول 1- شاخص‌های کمی (HI) پدیده پسماند جذب - واجذب

ردیف	شاخص‌ها	معادله‌ها	علائم و اختصارات	منابع
A(1,2)	مقدار ماده جذب شده	$HI = \frac{Max(q_{desorb} - q_{sorb})}{q_{sorb}}$	$Max(q_{desorb} - q_{sorb})$: حداکثر اختلاف بین شاخه های جذب و واجذب	ما و همکاران (1993)
B	توان β معادله فروندلیچ	$HI = \frac{\beta^{desorb}}{\beta^{sorb}}$	$\beta^{sorb}, \beta^{desorb}$: به ترتیب توان معادله فروندلیچ در شاخه های واجذب و جذب	باریوسو و همکاران (1994)
C	ضریب توزیع ظاهری	$HI = \frac{\sum_{i=1}^n K_d^{sorb} - K_d^{desorb}}{K_d^{desorb}}$	K_d^{sorb}, K_d^{desorb} (L/kg): به ترتیب ضریب توزیع ظاهری در شاخه های واجذب و جذب n : تعداد مراحل واجذب	زیانگی و همکاران (2000)
D	سطح بین شاخه‌های جذب و واجذب	$HI = \frac{A^{desorb} - A^{sorb}}{A^{sorb}}$	A^{desorb}, A^{sorb} : به ترتیب سطح زیر شاخه های جذب و واجذب	زو و سلیم (2000)
E	شیب همدمای واجذب نسبت به جذب	$HI = \frac{f_{sorb}(C) - f_{desorb}(C)}{f_{sorb}(C)}$	$f_{sorb}(C), f_{desorb}(C)$: به ترتیب مشتق اول معادله‌های توصیف شاخه های واجذب و جذب	برایدا و همکاران (2003)

نتایج و بحث

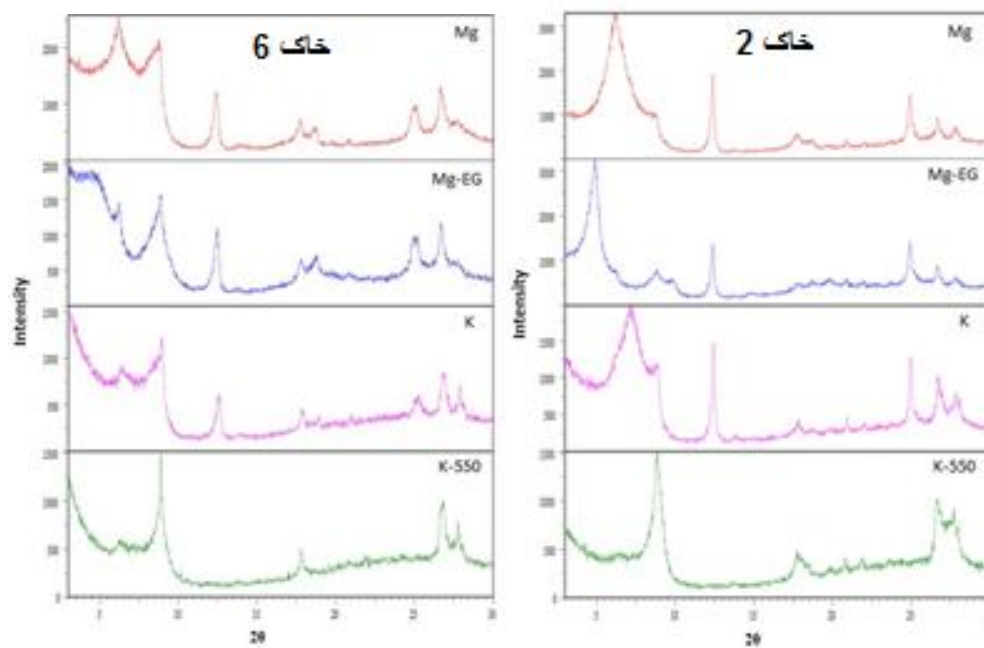
ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها: شاخص - های آماری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها در جدول 2 ارائه شده است. خاک‌های مورد مطالعه در پنج کلاس بافتی رس، لوم رسی، لوم رس شنی، لوم سیلتی و لوم قرار گرفتند. خاک‌ها حاوی مقادیر متوسطی از کربنات‌ها بوده و pH آن‌ها قلیایی متوسط بود. همچنین، مقدار مواد آلی خاک‌ها کم بوده و کلیه خاک‌ها به استثنای خاک‌های 1 و 3 غیرشور بودند. با توجه به اینکه غلظت 2 تا 10 mg/1 پتاسیم محلول برای رشد اغلب گونه‌های گیاهی کافی است (سینگ و جونز، 1975)، فقط سه خاک (شماره‌های 2، 6 و 7) دارای غلظت کمتر از 2 mg/1 بودند. همچنین، درصد پتاسیم تبدلی (EPP) برای چهار خاک (شماره‌های 3، 6، 7 و 10) به‌طور قابل ملاحظه‌ای کوچکتر از 2 بوده و برای سه خاک (1، 4 و 12) تقریباً 2

بود (لانندن، 1991). شکل 1 نیز دو نمونه از دیفرکتوگرام- های خاک‌ها را نشان می‌دهد. خاک 2 دارای بیشترین میزان نسبی اسمکتایت و کمترین میزان نسبی ایلیت و برعکس خاک 6 دارای بیشترین میزان نسبی ایلیت و کمترین میزان نسبی اسمکتایت بود. ایلیت کانی رس غالب در کلیه خاک‌ها (به استثنای خاک 2) بود. همان- طورکه در شکل 2 نشان داده شده است، رابطه معکوسی بین مقادیر نسبی اسمکتایت و ایلیت در 12 خاک مورد مطالعه مشاهده شد. چنین رابطه‌ای با منشاء ژئولوژیکی قبلاً برای رسوبات گزارش شده است. محققان ایلیتی شدن اسمکتایت در محیط‌های رسوبی یا به عبارت دیگر رقیق شدن اسمکتایت را علت مشاهده چنین رابطه‌ای می‌دانند (ورما و همکاران، 2014؛ هروی و همکاران، 2003؛ مالیسنون و همکاران، 2003؛ جورجتی و همکاران، 2009).

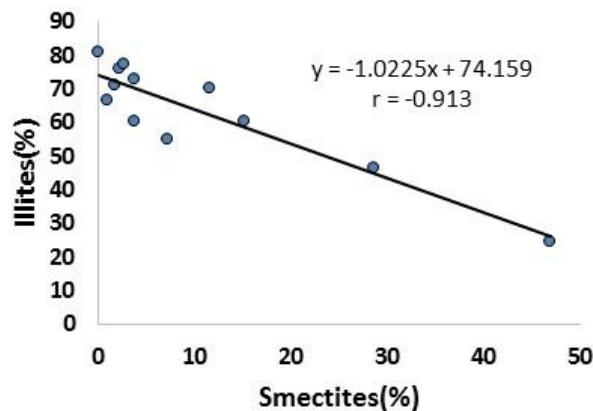
جدول 2- شاخص‌های آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

ویژگی	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)
شن (%)	23	67	40	13	32
سیلت (%)	18	47	33	9	27
رس (%)	15	46	27	7	26
pH _e	7/46	8/18	7/79	0/23	3
EC _e (dS/m)	0/42	10/55	2/39	2/69	112
OC(%)	0/01	1/90	0/75	0/54	72
CCE(%)	10/0	33/0	19/9	6/8	34
CEC (cmolc/kg)	9/2	28/0	16/8	5/4	32
K _e (mg/l)	0/26	74/28	15/31	24/42	159
K (0/01 M CaCl ₂) (mg/kg)	16	485	116	133	115
K (0/5 M CaCl ₂) (mg/kg)	66	828	254	148	58
K _{ex} (mg/kg)	34	343	138	105	76
EPP(%)	0/70	4/18	2/00	1/08	54

K_e: پتاسیم عصاره اشباع. K (0/01 M CaCl₂): پتاسیم قابل استخراج با محلول 0/01 مولار کلرید کلسیم (1:10). K (0/5 M CaCl₂): پتاسیم قابل استخراج با محلول 0/5 مولار کلرید کلسیم (1:10). K_{ex}: پتاسیم تبدلی (تفاضل دو مقدار فوق الذکر). EPP: درصد پتاسیم تبدلی



شکل 1- دیفرکتوگرام خاک‌های 2 و 6



شکل 2- رابطه مقادیر نسبی ایلیت و اسمکتایت در خاک‌های مورد بررسی

درجه اشباع مکان‌های تبادلی از پتاسیم، از فراوانی مکان‌های پر انرژی برای جذب این یون کاسته شده و لذا میزان جذب کاهش یافت. بر اساس نتایج به دست آمده زمان تعادل جذب پتاسیم در خاک‌های مورد مطالعه شش ساعت در نظر گرفته شد.

زمان تعادل واجذب پتاسیم

تغییرات غلظت پتاسیم محلول در مقابل زمان بعد از یک مرحله واجذب برای خاک‌های شماره دو و نه در شکل 4 نشان داده شده است. همچنین تغییرات غلظت پتاسیم محلول در مقابل زمان برای همین خاک‌ها بعد از ده مرحله واجذب در شکل 5 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بین یک و ده مرحله واجذب تفاوتی حاصل نشد، لذا زمان تعادل واجذب پتاسیم برای خاک‌های مورد مطالعه در هر دو حالت شش ساعت در نظر گرفته شد. هر چند ملاحظه می‌شود که در ده مرحله واجذب در مقایسه با یک مرحله واجذب، غلظت تعادلی پتاسیم برای خاک‌های نه و دو به ترتیب 15 و 27 برابر کاهش یافته و تغییرات این غلظت نیز به ترتیب 3 و 6 برابر کم شده است. سیننگ و جونز (1975) زمان تعادل واجذب پتاسیم را یک ساعت به دست آوردند.

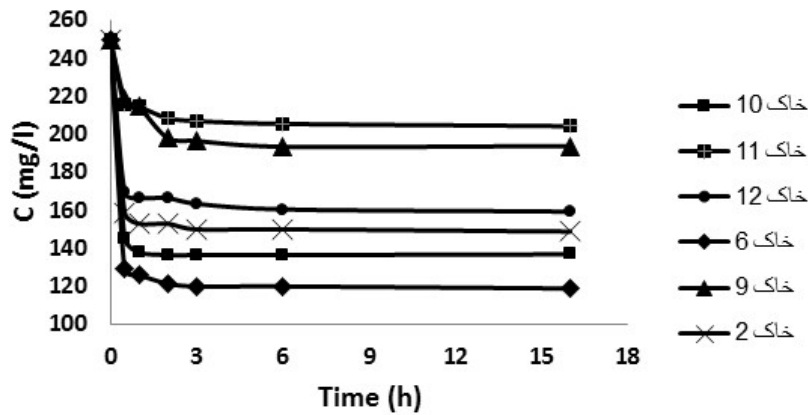
تثبیت پتاسیم

مقدار تثبیت پتاسیم برای 12 نمونه خاک در دو غلظت 250 و 2500 میلی‌گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک در جدول 3 ارائه شده است.

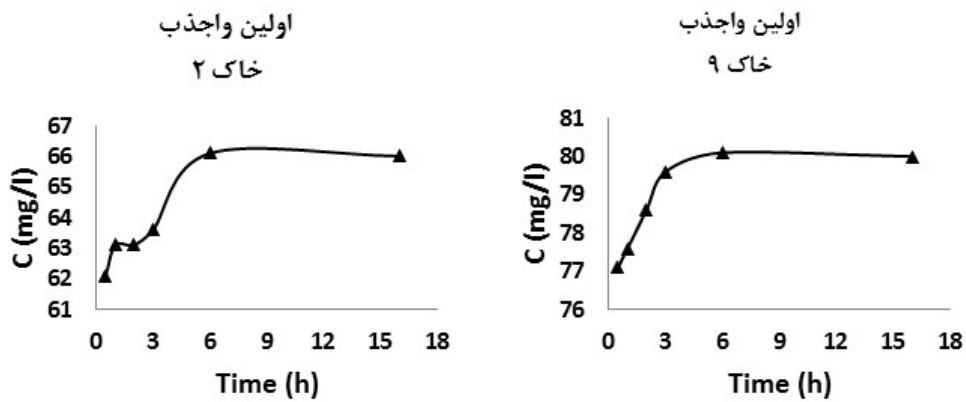
زمان تعادل جذب پتاسیم

تغییرات غلظت پتاسیم محلول در مقابل زمان برای خاک‌ها در شکل 3 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جذب پتاسیم در همه خاک‌ها ابتدا خیلی سریع بوده و سپس کند گردید. کمترین میزان جذب اولیه پتاسیم (در نیم ساعت) مربوط به خاک شماره نه (62 mg/l.h) و بیشترین آن مربوط به خاک شماره شش (242 mg/l.h) بود. به طوری که ملاحظه می‌شود، میزان جذب اولیه پتاسیم در خاک شش حدود چهار برابر خاک نه بود. خاک‌های نه و شش به ترتیب دارای 3/14 و 0/72 درصد پتاسیم تبادلی بودند. با علم بر این موضوع که هرچه درجه اشباع مکان‌های تبادلی از پتاسیم بیشتر باشد، تمایل خاک به جذب پتاسیم کاهش می‌یابد (باربر 1995) لذا، میزان جذب اولیه پتاسیم در خاک نه کمتر از خاک شش بود. میزان جذب پتاسیم در فاصله زمانی نیم تا دو ساعت در هر دو خاک به شدت کاهش یافت. با این حال، این میزان در خاک نه (14/3 mg/l.h) حدود سه برابر خاک شش (4/9 mg/l.h) بود. بافت خاک‌های شش و نه به ترتیب رسی و لوم رسی بود. لذا، یکی از دلایل احتمالی کاهش شدید میزان جذب در خاک شش می‌تواند ریزتر بودن بافت آن باشد. حنان و همکاران (2007) زمان تعادل جذب پتاسیم را برای خاک‌هایی با بافت لوم، لوم رس شنی و لوم سیلتی 12 ساعت و برای یک خاک لوم رسی 18 ساعت گزارش نمودند. به نظر می‌رسد در خاک‌های مورد مطالعه اهمیت درجه اشباع مکان‌های تبادلی از پتاسیم در میزان اولیه جذب پتاسیم بیشتر از ظرفیت مکان‌های تبادلی بود. به عبارت دیگر، با افزایش

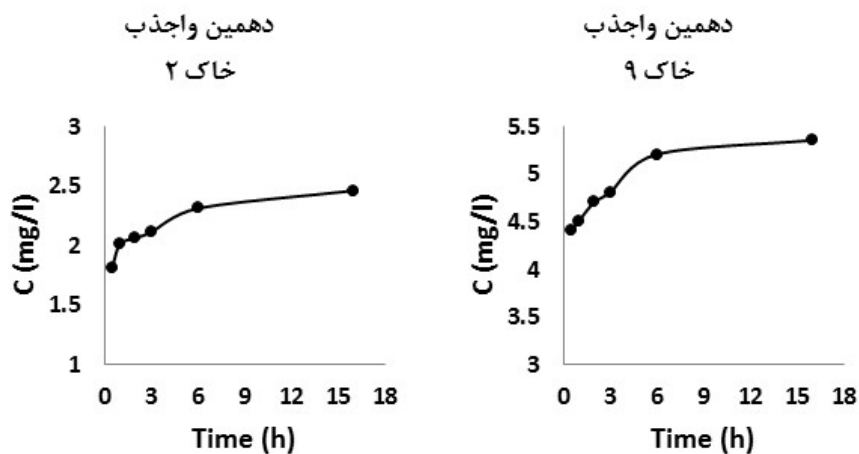
جذب



شکل 3- تغییرات غلظت پتاسیم محلول در مقابل زمان برای شش خاک مورد بررسی



شکل 4- تغییرات غلظت پتاسیم محلول در مقابل زمان بعد از یک مرحله واجذب برای خاک‌های 2 و 9



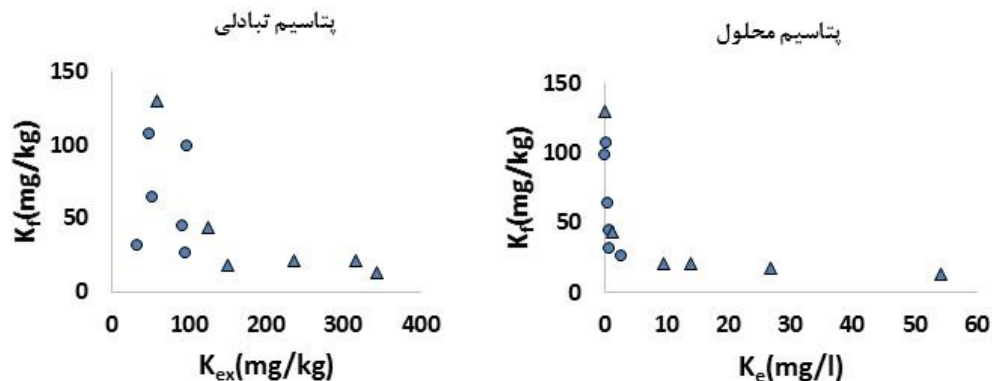
شکل 5- تغییرات غلظت پتاسیم محلول در مقابل زمان بعد از ده مرحله واجذب برای خاک‌های 2 و 9

جدول 3- مقدار و درصد تثبیت پتاسیم در دو غلظت 250 و 2500 میلی گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک

شماره خاک	250 (mg K/kg)		2500 (mg K/kg)	
	مقدار	درصد	مقدار	درصد
1	45	41	285	34
2	99	62	545	51
3	32	32	132	19
4	44	42	376	35
5	21	33	204	30
6	130	71	834	58
7	107	56	581	41
8	21	50	454	44
9	13	38	397	47
10	64	40	427	35
11	18	38	167	30
12	26	28	212	23
میانگین	51	44	384	37

کلسیم و منیزیم با کاهش نسبت پتاسیم تبدالی به شدت افزایش می‌یابد. لذا، می‌توان علت تشدید تثبیت پتاسیم در غلظت‌های کم پتاسیم محلول و تبدالی را به تمایل زیاد کانی‌های رس به جذب پتاسیم در این شرایط نسبت داد. داهلیوال و همکاران (2006) گزارش کرد که خاک‌های غنی از پتاسیم حداقل تثبیت (18-24 درصد) و خاک‌های فقیر از نظر پتاسیم حداکثر تثبیت (6/44-86/4 درصد) را نشان دادند. موراشکینا و همکاران (2007) نیز یک رابطه خطی معکوس را بین میزان تثبیت پتاسیم و میزان پتاسیم قابل استخراج با استات آمونیوم را گزارش کردند. بستانی و ثواقبی (1390) نیز همبستگی منفی معنی‌داری را بین این دو ملاحظه کردند. همچنین، رویو و خیل سوترس (1995) نتایج مشابهی را گزارش کردند. بالین‌حال، حسین پور و پناهی (1389) همبستگی مثبت معنی‌داری را بین درصد تثبیت پتاسیم و میزان پتاسیم تبدالی و غیر تبدالی گزارش کردند. خاک‌های حاوی اسمکتایت (به عنوان کانی رس غالب) دارای حداقل پتاسیم محلول و تبدالی بوده و بیشترین میزان تثبیت پتاسیم در آن‌ها اتفاق افتاد. مقادیر تثبیت پتاسیم در خاک‌های حاوی ایلیت (به عنوان کانی رس غالب) در غلظت‌های بیش از 5 میلی گرم بر لیتر پتاسیم محلول و 100 میلی گرم بر کیلوگرم خاک حداقل و حدود 20 میلی گرم بر کیلوگرم خاک بود. گرچه، در این خاک‌ها نیز با کاهش غلظت پتاسیم محلول و تبدالی میزان تثبیت پتاسیم به شدت افزایش یافت.

دامنه تغییرات مقادیر تثبیت پتاسیم خاک‌ها در غلظت 250 میلی گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک بین 13 تا 130 میلی گرم پتاسیم بر کیلوگرم (به‌طور متوسط 51 میلی گرم پتاسیم بر کیلوگرم) و در غلظت 2500 میلی گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک بین 132 تا 834 میلی گرم پتاسیم بر کیلوگرم (به‌طور متوسط 384 میلی گرم پتاسیم بر کیلوگرم) به دست آمد. بیشترین مقدار تثبیت پتاسیم در غلظت‌های 250 و 2500 میلی گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک در خاک شش و کمترین آن به ترتیب در خاک‌های شماره نه و سه اتفاق افتاد. دامنه تغییرات درصد تثبیت پتاسیم خاک‌ها در غلظت 250 میلی گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک بین 32 تا 71 درصد (به‌طور متوسط 44 درصد) و در غلظت 2500 میلی گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک بین 19 تا 58 درصد (به‌طور متوسط 37 درصد) به دست آمد. بیشترین درصد تثبیت پتاسیم در غلظت‌های 250 و 2500 میلی گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک در خاک شش و کمترین درصد تثبیت پتاسیم نیز در غلظت‌های 250 و 2500 میلی گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک در خاک سه اتفاق افتاد. نتایج نشان می‌دهد که میزان تثبیت پتاسیم با افزایش غلظت پتاسیم عصاره اشباع (K_e) و میزان پتاسیم تبدالی (K_{ex}) خاک‌ها به‌شدت کاهش یافت (شکل‌های 6 و 7). این روابط مشابه روابطی است که توسط شایو و همکاران (1985) گزارش شده است. آنان نشان دادند که ضریب گزینش پذیری گاپون (K_G) برای تبادل پتاسیم با



شکل 7- رابطه میزان تثبیت پتاسیم و میزان پتاسیم تبدالی (●: رس غالب اسمکتایت ▲: رس غالب ایلیت)

شکل 6- رابطه میزان تثبیت پتاسیم و غلظت پتاسیم عصاره اشباع (●: رس غالب اسمکتایت ▲: رس غالب ایلیت)

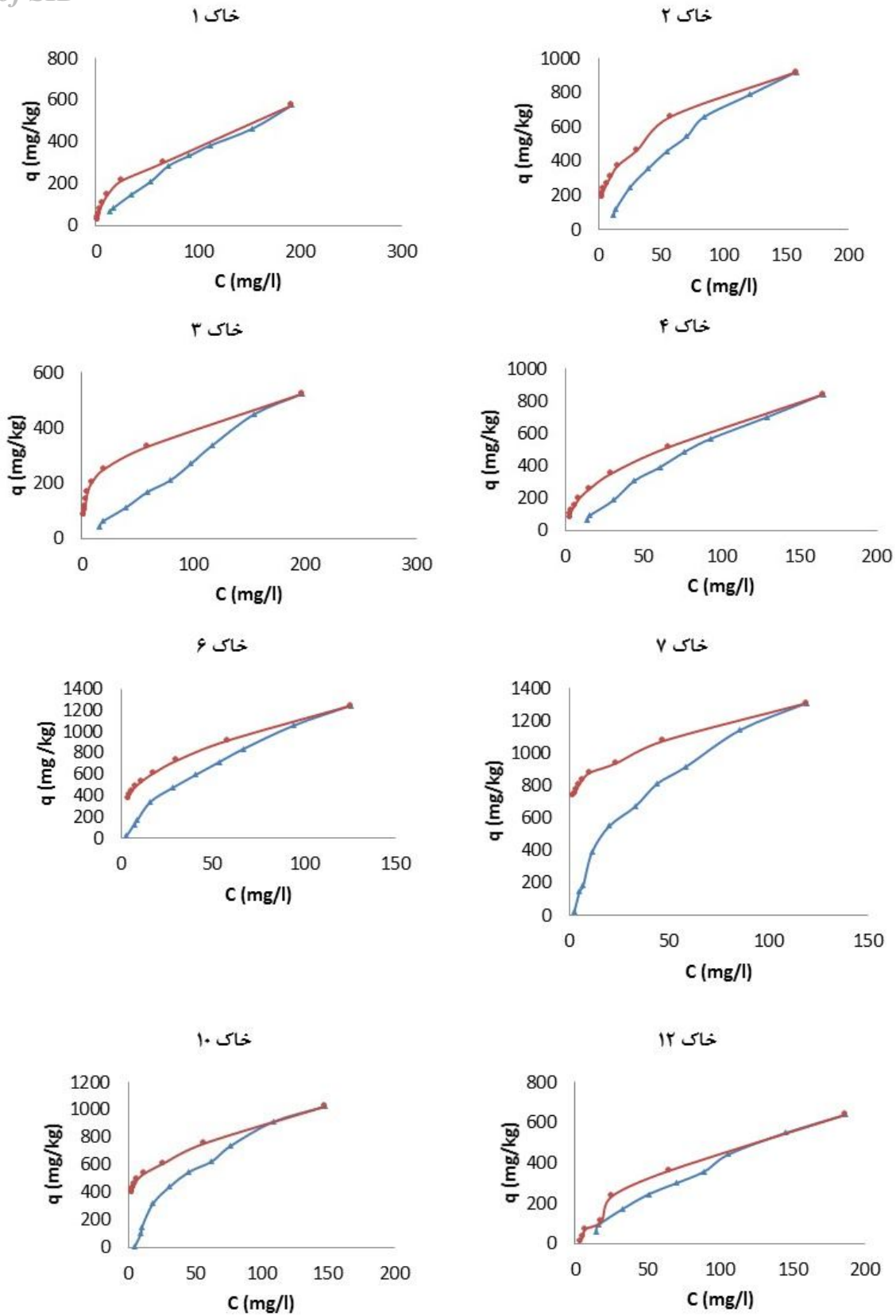
همدمای جذب و واجذب پتاسیم

همدماهای جذب-واجذب پتاسیم برای هشت نمونه خاک مورد مطالعه در شکل 8 نشان داده شده است. داده‌های جذبی غلظت اولیه 5 میلی‌گرم بر لیتر، برای خاک‌های شماره ۱، ۲، ۳، ۴ و ۱۲، به دلیل قرار گرفت در ناحیه واجذب، کنار گذاشته شدند. برازش معادله فروندلیچ به داده‌های جذب و واجذب پتاسیم در خاک‌های مورد مطالعه به روش رگرسیون غیرخطی انجام گرفت. ضریب تبیین، خطای معیار تخمین و ثابت‌های این معادله در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. به طوری که از مقادیر ضرایب تبیین و خطاهای معیار تخمین بر می‌آید، این معادله به هر دو شاخه جذب و واجذب همدمای برازش خیلی خوبی یافته است. میانگین ثابت K این معادله برای شاخه واجذب بیش از شش برابر شاخه جذب بود که حاکی از برگشت پذیری کم پتاسیم جذب شده است. همچنین، میانگین ثابت β معادله فروندلیچ برای شاخه واجذب حدود نصف شاخه جذب بود که می‌تواند نشان دهنده تاثیر تثبیت پتاسیم جذب شده بر افزایش ناهمگنی سطح جذب کننده باشد. حداقل میزان واجذب پتاسیم در ۲۹ خاک شماره ۷ (۴۴ درصد) با درصد اسمکتایت و حداکثر آن در خاک شماره ۱۲ (۹۸ درصد) با حدود ۱ درصد اسمکتایت مشاهده شد. میانگین میزان واجذب پتاسیم در هشت نمونه خاک ۷۷ درصد بود.

شاخص‌های پسماند

مقادیر شش شاخص پسماند برای هشت خاک مورد مطالعه در جدول ۶ ارائه شده است. همبستگی میزان تثبیت پتاسیم با هیچ‌یک از شاخص‌های پسماند معنی‌دار نبود. با این حال، با کنار گذاشتن خاک‌های سه، هفت و ده

که دارای بیشترین مقادیر شاخص‌های پسماند A1، B، D و E (به ترتیب بیشتر از 1، 2، 0/2 و 1) بودند، همبستگی‌های معنی‌داری برای شاخص‌های A1 ($r=0/878^*$)، D ($r=0/905^*$) و E ($r=0/839^*$) به دست آمد. این همبستگی برای شاخص B ($r=0/989^{***}$) بسیار معنی‌دار بود. برای شاخص‌های A2 و C نیز ضرایب همبستگی تا حد زیادی افزایش یافتند، ولی همبستگی‌های به دست آمده، معنی‌دار نبودند. همچنین، نتایج نشان داد که با کنار گذاشتن خاک سه که دارای درشت‌ترین بافت در بین هشت خاک بود، همبستگی‌های معنی‌داری بین میزان تثبیت پتاسیم به ازای یک درصد رس و شاخص‌های A2، C، D و E به دست آمد (شکل ۹). یافته‌ها حاکی از آن است که رابطه میزان تثبیت پتاسیم و پسماند همدماهای جذب و واجذب صرفاً در دامنه معینی از مقادیر شاخص‌های پسماند برقرار بوده و در این بین درصد رس خاک نقش تعیین کننده‌ای دارد. عدم وجود رابطه بین مقادیر تثبیت پتاسیم و شاخص پسماند همدماهای جذب و واجذب در مقادیر بزرگ این شاخص ممکن است حاکی از کاذب بودن این شاخص‌های بزرگ باشد. همچنین، خاک‌های سه، هفت و ده که در آنها حلقه پسماند تا حد زیادی باز می‌ماند، مهم‌ترین نقش را در عدم ایجاد رابطه بین میزان تثبیت پتاسیم و شاخص‌های پسماند به عهده دارند. ساندر و همکاران (2005) معتقدند که پسماند در غلظت‌های کم تعادلی که این حلقه بسته نمی‌شود، قابل کمی‌سازی نیست. این نتیجه بر انجام کامل مراحل واجذب تا حصول غلظت‌های غیر قابل اندازه‌گیری تأکید دارد.



شکل 8- همدماهای جذب-واجذب پتاسیم برای 8 خاک مورد بررسی (●: جذب ▲: واجذب)

جدول 4- مشخصه‌های برازش معادله فروندلیچ به داده‌های جذب پتاسیم در خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	β	$K(mg^{1-\beta} L^{\beta} kg^{-1})$	r^2	SE
1	0/76	10/60	0/99	11
2	0/73	23/63	0/98	38
3	0/95	3/50	0/99	13
4	0/83	12/53	0/98	31
6	0/69	44/36	0/99	38
7	0/58	83/83	0/98	68
10	0/65	42/70	0/97	61
12	0/78	10/86	0/99	17
میانگین	0/75	29/00	0/98	35

جدول 5- مشخصه‌های برازش معادله فروندلیچ به داده‌های واجذب پتاسیم

شماره خاک	β	$K(mg^{1-\beta} L^{\beta} kg^{-1})$	r^2	SE
1	0/52	36/85	0/99	17
2	0/39	131/15	0/99	16
3	0/34	86/90	0/98	17
4	0/51	60/43	0/99	12
6	0/34	232/50	0/99	19
7	0/14	641/55	0/97	35
10	0/23	314/22	0/98	31
12	0/64	22/75	0/97	40
میانگین	0/39	190/79	0/98	23

جدول 6- مقادیر شاخص پسماند برای خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	شاخص پسماند (HI)					
	E	D	C	B	A(2)	A(1)
1	0/82	0/15	0/67	0/69	0/29	0/62
2	0/91	0/21	0/75	0/53	0/37	0/71
3	0/99	0/41	0/94	0/36	1/04	2/98
4	0/88	0/17	0/71	0/62	0/31	0/67
6	0/91	0/22	0/69	0/49	0/26	0/91
7	0/97	0/27	0/82	0/24	0/39	3/46
10	0/96	0/21	0/80	0/35	0/36	1/59
12	0/61	0/08	0/43	0/82	0/16	0/16
میانگین	0/88	0/21	0/73	0/51	0/39	1/38

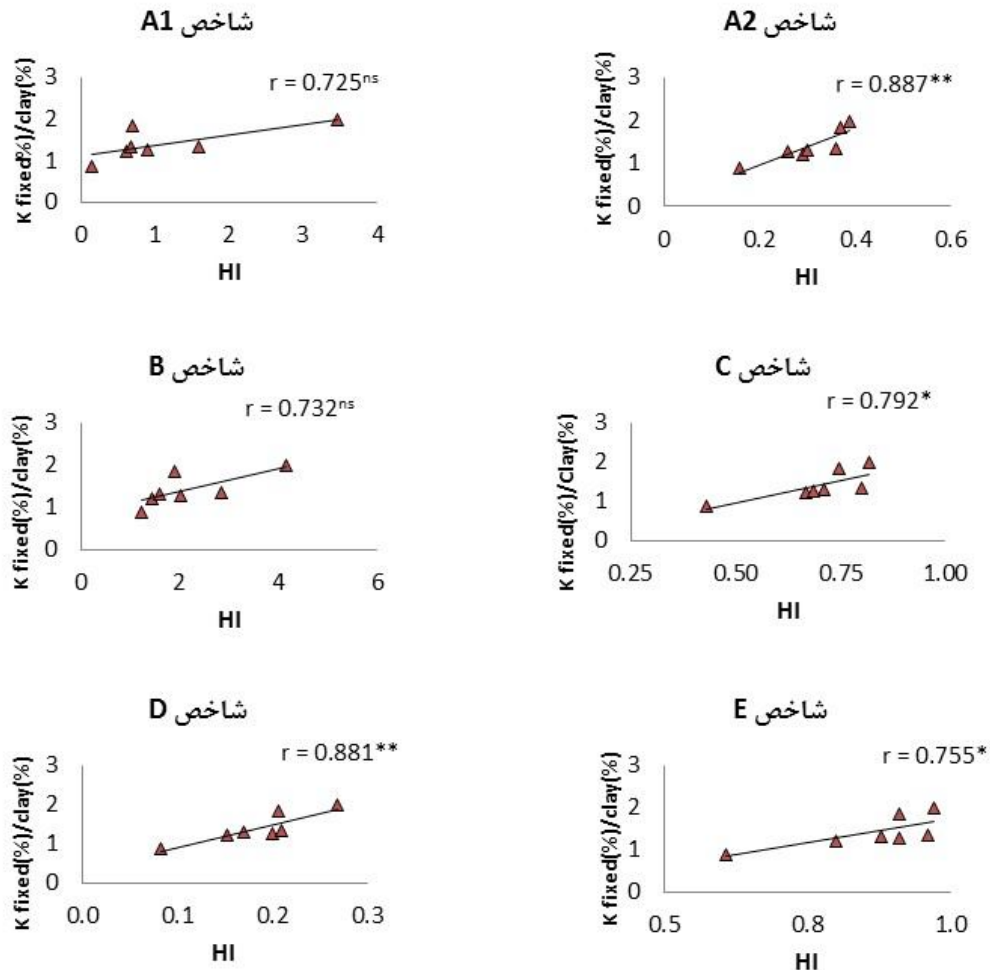
نتیجه‌گیری

پدیده پسماند بین شاخه‌های جذب و واجذب همدما، برای انتخاب مناسب‌ترین شاخص پسماند استفاده شد. نتایج نشان داد که رابطه میزان تثبیت پتاسیم و پسماند همدماهای جذب و واجذب در دامنه معینی از مقادیر

در این تحقیق از برگشت ناپذیری واکنش جذب سطحی پتاسیم به واسطه تثبیت و پیش فرض وجود همبستگی بین میزان تثبیت پتاسیم و شاخص‌های کمی

آزمایش تأثیر داشته باشد. در این تحقیق شاخص بر مبنای توان β معادله فروندلیچ بیشترین همبستگی را با درجه برگشت ناپذیری واکنش جذب سطحی پتاسیم نشان داد.

شاخص‌های پسماند برقرار است. علت ممکن است پسماند کاذب در اثر عوامل معلوم (عدم برقراری حال تعادل در جذب یا واجذب) یا مجهول باشد. همچنین، ممکن است عدم کامل کردن مراحل واجذب نیز بر نتیجه



شکل 9- رابطه میزان تثبیت پتاسیم به ازای یک درصد رس و شاخص پسماند در 8 خاک مورد بررسی

فهرست منابع:

1. بستانی ع و ثوابی غ، 1390. بررسی ظرفیت تثبیت پتاسیم در تعدادی از خاک‌های زیر کشت نیشکر خوزستان. نشریه آب و خاک. جلد 25، شماره 5، صفحه‌های: 933 تا 982.
2. حسین پورع و پناهی م، 1389. گنجایش تثبیت پتاسیم و ویژگی‌های بار در شماری از خاک‌های آهکی استان همدان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، شماره 52، صفحه‌های 65 تا 73.
3. Allison, L.E., and C.D. Moodie. 1965. Carbonate. p.1379-1400. In C.A. Black et al.(ed). Methods of Soil Analysis. Part 2. 1st ed. Soil Science Society of America, Madison, WI.
4. Badraouri, M., and P. R. Bloom. 1989. The effects of wetting and drying cycles, temperature

5. and extracting solutions on measured potassium fixation in soils of two regions of morocco. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 20(13-14): 1353-1375.
6. Barber, S. A. 1995. *Soil Nutrient Bioavailability: A mechanistic approach*. Wiley, New York.
7. Barber, R.G. 1979. Potassium fixation in some Kenyan soils. *Journal of Soil Science*. 30:785-792.
8. Barriuso, E., D.A. Laird, W.C. Koskinen, and R.H. Dowdy. 1994. Atrazine desorption from smectites. *Soil Science Society American Journal*. 58:1632-1638.
9. Barre, P., Velde B., N.Catel 2007. Soil-plant potassium transfer: Impact of plant activity on clay minerals as seen from X-ray diffraction. *Plant and Soil*. 292:137-146.
10. Bouabid, R, Badraoui M and Bloom PR, 1991. Potassium fixation and charge characteristics of soil clays. *Soil Science society of America Journal*. 55: 1493-1498.
11. Braida, W.J., J.J. Pignatello, Y. Lu, P.I. Ravikovitch, A.V. Neimark, and B. Xing. 2003. Sorption hysteresis of benzene in charcoal particles. *Environmental Science and Technology*. 37:409-417.
12. Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity. p. 891-901. In C. A. Black (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. 1st ed. Soil Science Society of America, Madison, WI.
13. van der Marel H. W. 1959. Potassium fixation, a beneficial soil characteristic for crop production. *Z. Pflanzenernahr., Dung., Bodenkunde*. 84:51-62.
14. Choudhary, K., and B.Pasad. 1997. Kinetics of potassium desorption from Inceptisols and Entisols. *Journal of the Indian Society of Soil Science*. 45(3):460-464.
15. Dhaliwal A.K., R.K.Gupta, Y.Singh, and B.Singh. 2006. Potassium fixation and release characteristics of some benchmark soil series under rice-wheat cropping system in the indo-gangatic plains of northwestern India. *Soil Science of Plant Analysis*. 37(5&6): 827-845.
16. Gee G.W., and D.Or 2002. Particle size analysis. p. 255-293. In J.H. Dane and G.C. Topp (eds). *Methods of Soil Analysis*. Part 4. 3rd ed. Soil Science Society of America, Madison, WI.
17. Grewal, J.S., and J.S. Kanwar. 1975. Potassium and Ammonium Fixation in Indian Soils (A review). *Indian Council of Agricultural Research*. New Delhi, India.
18. Grewal, J.S., and J.S. Kanwar. 1967. Potassium fixation in some soils of Punjab, Haryana and Himachal Pradesh. *Journal of the Indian Society of Soil Science*. 15: 237-244.
19. Giorgetti G., F. Talarico, S. Sandroni, and A. Zeoli. 2009. Provenance of Pleistocene sediments in the ANDRILL AND-1B drillcore: Clay and heavy mineral data. *Global and Planetary Change*. 69(3): 94-102.
20. Hannan A, A.M. Ranjha, Rahmatullah, M. Waqas, and A. Niaz. 2007. Potassium adsorption characteristics of four different textured alkaline calcareous soils. *Pakistan Journal Agricultural Sciences*. 44: 242-247.
21. Heroy D. C., S. A. Kuehl, S. L. Goodbred Jr. 2003. Mineralogy of the Ganges and Brahmaputra Rivers: implications for river switching and Late Quaternary climate change. *Sedimentary Geology*. 155: 343-359.
22. Houba, V.J.G., I. Novozamsky, A.W.M. Huijbregts, and J.J. van der Lee. 1986. Comparison of soil extractions by 0.01 M CaCl₂, by EUF and by some conventional extraction procedures. *Plant and Soil*. 96:433-437.
23. Hundal L.S., N.S. Pasricha. 1998. Adsorption-desorption kinetics of potassium as influenced by temperature and background anions. *Geoderma*. 83: 2 15-225.
24. Huang, W., H. Yu, and W.J. Weber. 1998. Hysteresis in the sorption and desorption of hydrophobic organic contaminants by soils and sediments. 1. A comparative analysis of experimental protocols. *Journal of Contamination Hydrology*. 31:129-148.

25. Jackson, M.L. 1956. Soil Chemical Analysis - advanced course. Published by the author, Dep. of Soil Science, Univ. of Wisconsin, Madison, WI.
26. Joffe J. S. and L. Kolodny. 1936. Fixation of Potassium in soils. Soil Science Society American Proceedings. 1:187-191.
27. Klages M.G. and R.W. Hopper. 1982. Clay minerals in Northern Plains Coal Overburden as measured by X-ray diffraction. Soil Science Society American Journal. 46: 415-419.
28. Limousin G., J.P. Gaudet, L. Charlet, S. Sznknect, V. Barthe's and M. Krimissa. 2007. Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. Applied Geochemistry. 22: 249-275.
29. Liu Y. J., D. A. Laird, and P. Barak. 1997. Release and fixation of ammonium and potassium under long-term fertility management. Soil Science Society American Journal. 61:310-314.
30. London, J. R. 1991. Booker Tropical Soil Manual: A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics. Booker Agriculture International Ltd. New York.
31. Ma, L., L.M. Southwick, G.H. Willis, and H.M. Selim. 1993. Hysteretic characteristics of atrazine adsorption-desorption by a sharkey soil. Weed Science. 41:627-633.
32. Mallinson D. J., B. Flowerb, A. Hineb, G. Brooks, R. M. Garzad. 2003. Paleoclimate implications of high latitude precession-scale mineralogic fluctuations during early Oligocene Antarctic glaciation: the Great Australian Bight record. Global and Planetary Change. 39: 2003 257-269.
33. Martin H. W. and D. L. Sparks .1983. Kinetics of nonexchangeable potassium release from two coastal plain soils. Soil Science Society American Journal. 47:883-887.
34. Matthews B. C. and P. H. T. Beckett. 1962. A new procedure for studying the release and fixation of potassium ions in soil. The Journal of Agricultural Science. 58(1):59-64.
35. Murashkina M.A., R.J. Southard, and G.S. Pettygrove. 2007. Silt and fine sand fractions dominate K fixation in soils derived from granitic alluvium of the San Joaquin Valley, California. Geoderma, 141: 283-293.
36. Najafi-Ghiri, M. and A. Abtahi. 2013. Potassium fixation in soil size fractions of arid soils. Soil & Water Research. 8(2): 49-55.
37. Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p.539-579. In A.L. Page et al. (eds). Methods of Soil Analysis. Part 2. 2nd ed. Soil Science Society of America, Madison, WI.
38. Poss R., J. C. Fardeau, H. Saragoni, and P. Quantin. 1991. Potassium release and fixation in Ferralsols (Oxisols) from Southern Togo. Journal of Soil Science. 42:649-660.
39. Richards, L.A. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline Alkali Soils, Agriculture, 160, Handbook 60. US Department of Agriculture, Washington DC.
40. Rubio B. and F. Gil-Sotres. 1995. Potassium fixation in suspensions of soils of Galicia (N.W. SPAIN). Communications in Soil Science and Plant Analysis. 26(3&4): 577-591.
41. Sadosky M. C., D. L. Sparks, M. R. Noll, and G. J. Hendricks. 1987. Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy Middle Atlantic Coastal Plain soils. Soil Science Society American Journal. 51:1460-1465.
42. Saha, U.K. and K. Inoue. 1998. Hydroxy-interlayers in expansible layer silicates and their relation to potassium fixation. Clays and Clay Minerals 46(5): 556-566.
43. Sander M, Lu Y. and J.J. Pignatello. 2005. A thermodynamically based method to quantify true sorption hysteresis. Journal of Environmental Quality. 34: 1063-1072.
44. Schneider A., R. Tesileanu, R. Charles and R. Sinaj. 2013. Kinetics of soil potassium sorption-desorption and fixation. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 44:837-849.

45. Schneider A.1997. Release and fixation of potassium by a loamy soil as affected by initial water content and potassium status of soil samples. *European Journal of Soil Science*. 48: 263-271.
46. Shaviv A., S. V. Mattigod, P. F. Pratt, and H. Joseph.1985.Potassium exchange in five Southern California Soils with high potassium fixation capacity. *Soil Science Society American Journal*. 49:1128-1133.
47. Singh B. B. and J. P. Jones .1975.Use of sorption-isotherms for evaluating potassium requirements of plants. *Soil Science Society American Proceedings*. 39:881-886.
48. Singh D., R.G. McLaren, and K.C. Cameron. 2006. Zinc sorption–desorption by soils: Effect of concentration and length of contact period. *Geoderma*. 137: 117–125.
49. Sparks, D.L.1987. Potassium Dynamics in Soils. p.1-63. In Stewart, B.A.(ed.). *Advances in Soil Sciences*. Vol. 6. Springer-Verlag, New York.
50. Verma K., S. Bhattacharya, P. Biswas, P. K. Shrivastava, M. Pandey, and N. C. Pant. 2014. Clay mineralogy of the ocean sediments from the Wilkes Land margin, east Antarctica: implications on the paleoclimate, provenance and sediment dispersal pattern. *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*. 103:2315-2326.
51. Xiangke, W., Wenming, D., Zhi, L., Jinzhou, D., Zuyi, T., 2000. Sorption and desorption of radiocesium on red earth and its solid components: relative contribution and hysteresis. *Applied Radiation and Isotopes*. 52: 813–819.
52. Zhu, H., and H.M. Selim. 2000. Hysteretic behavior of metolachlor adsorption-desorption in soils. *Soil Science*. 165:632–645.
53. Zörb C., Senbayram M., E. Peiter.2014. Potassium in agriculture–Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*. 171(9):656-669.