

## بررسی سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی توسط کلرید کلسیم در ارتباط با برخی ویژگی‌های خاک‌های استان کهگیلویه و بویراحمد

شبنم صادقی بانیانی<sup>۱</sup>، حمیدرضا اولیایی<sup>۲\*</sup>، ابراهیم ادهمی<sup>۲</sup>، مهدی نجفی قیری<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۱۳)

### چکیده

تکامل خاک و نوع و مقدار کانی‌های رسی، از عوامل مؤثر بر سینتیک رهاسازی پتاسیم در خاک می‌باشند. سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی، نقش مهمی در عرضه پتاسیم تبادلی برای گیاهان، به خصوص در خاک‌های محتوی کانی‌های پتاسیم‌دار از جمله میکا و فلدسپار ایفا می‌کند. در این مطالعه، سینتیک رهاسازی پتاسیم توسط عصاره‌گیری متوالی با کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار، در ۱۴ نمونه خاک سطحی (صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) مناطق مختلف اقلیمی استان کهگیلویه و بویراحمد، جنوب غرب ایران، بررسی گردید. نتایج کانی‌شناسی نشان داد که اسمکتیت، ایلیت، کلریت و پالی‌گورسکیت کانی‌های غالب خاک‌های این استان می‌باشند. میزان رهاسازی پتاسیم در پایان آزمایش (۶۵۶ ساعت) در دامنه ۳۸/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک Typic Xerorthents تا ۳۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک Calcic Haploxeralfs خاک متغیر بود. این پژوهش نشان داد که میزان رهاسازی پتاسیم، همبستگی بالایی با ویژگی‌هایی چون مقدار رس، پتاسیم غیر تبادلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و همچنین مقدار کانی‌های ایلیت و اسمکتیت دارد. به‌طور کلی رهاسازی پتاسیم از خاک‌ها بر اساس تیپ آن‌ها روند آلفی سولز (۲۲۲/۳) < اینسپتی سولز (۱۱۱/۳) < انتی سولز (۱۰۵/۰) میلی‌گرم بر کیلوگرم) را نشان داد. داده‌های حاصل از مطالعات سینتیکی با مدل‌های سینتیکی مختلف برازش داده شد که معادلات تابع توان، مرتبه اول و الوویچ، رها شدن پتاسیم از خاک‌های منطقه را به نحو قابل‌قبولی توصیف نمودند. انطباق داده‌های سینتیکی با این معادلات نشان می‌دهد که رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی از خاک‌های منطقه، به طور عمده توسط فرآیند پخشیدگی کنترل می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** تکامل خاک، رهاسازی پتاسیم، سینتیک، کانی رسی، کلرید کلسیم

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج

۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج (مکاتبه‌کننده)

۳- دانشیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز

\* پست الکترونیک: [owliaie@yu.ac.ir](mailto:owliaie@yu.ac.ir)

## مقدمه

پتاسیم از عناصر ضروری برای رشد گیاه می‌باشد. امروزه به دلیل کشاورزی فشرده و عدم استفاده کافی از کودهای حاوی پتاسیم، بسیاری از خاک‌ها در حال تبدیل شدن به خاک‌های در معرض کمبود پتاسیم می‌باشند (Balali & Malakouti, 1998). این عنصر در خاک به چهار شکل وجود دارد که به ترتیب سهولت جذب برای گیاه شامل پتاسیم محلول، تبادلی، غیر تبادلی و ساختمانی می‌باشد (Najafi *et al.*, 2011).

کانی‌های رسی دارای موقعیت‌های مختلفی برای نگهداری پتاسیم هستند که شامل سطح، لبه‌ها و لایه‌های داخلی می‌باشند. قدرت رهاسازی پتاسیم از هر کدام از این موقعیت‌ها با توجه به نوع عصاره‌گیر متفاوت است. پتاسیم موجود در روی سطوح با عمل تبادل به راحتی خارج می‌شود، در حالی که پتاسیم موجود روی لبه‌ها و لایه‌های داخلی کانی‌ها به انرژی بیشتری جهت خارج شدن نیاز دارند (Cox *et al.*, 1999; Mengel & Rahmatullah, 1994). دو فرآیند معمول رهاسازی پتاسیم از کانی‌های رسی شامل: ۱- انحلال میکا و تشکیل محصولات هودیدگی از آن و ۲- خروج پتاسیم بین‌لایه‌ای میکا و تبدیل آن به سایر کانی‌ها مانند اسمکتیت و ورمیکولیت می‌باشند (Sparks, 2000).

سینتیک، واژه‌ای کلی است که به واکنش‌های وابسته به زمان اشاره دارد. سینتیک شیمیایی طبق تعریف به مطالعه سرعت واکنش‌های شیمیایی و فرآیندهای مولکولی در محیطی که نقل و انتقال مواد و محصولات واکنش در آن محدودکننده نباشد، گفته می‌شود. در محیط خاک، واکنش‌های سینتیکی ترکیبی از سینتیک کنترل‌شده توسط انتقال<sup>۱</sup> و سینتیک کنترل‌شده توسط واکنش<sup>۲</sup> می‌باشد (Sparks, 2000). به‌طور کلی دو دلیل عمده جهت انجام مطالعات سینتیکی در خاک به شرح زیر است: ۱- پی‌بردن به زمانی که یک واکنش خاص در خاک به حالت تعادل یا شبه‌تعادل می‌رسد و ۲- پی‌بردن به سازوکار واکنش. در مطالعه سینتیک رهاسازی پتاسیم، از روش‌های مختلفی برای پایین نگه داشتن غلظت پتاسیم استفاده می‌شود. شستشوی پی‌درپی کانی یا خاک با محلول‌های الکتروولیت و استفاده از رزین‌های تبادل کاتیونی از آن جمله‌اند (Scott *et al.*, 1960). در این مطالعه برای رفع این

مشکل، از عصاره‌گیری متوالی استفاده شد (Martin & Sparks, 1983). منبع اصلی پتاسیم غیرقابل تبادل در خاک‌ها، سیلیکات‌هایی مانند فلدسپار و کانی‌های رسی ۲:۱ پتاسیم‌دار، مانند میکا و ورمیکولیت هستند (Moritsuka *et al.*, 2004; Rezaei & Movahedi Naeni, 2009).

با توجه به شرایط متفاوت خاک‌ها، از عصاره‌گیرها و روش‌های مختلفی از جمله محلول‌های نمکی رقیق، رزین‌های تبادل کاتیونی، اسیدهای آلی، سدیم تترافیل بران، اسید نیتریک و الکتروولت‌رافیلتراسیون برای مطالعات رهاسازی پتاسیم استفاده شده است (Najafi *et al.*, 2011). محققان زیادی برای مطالعه سینتیک رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی از عصاره‌گیر محلول رقیق کلرید کلسیم استفاده کرده‌اند (Owliaie *et al.*, 2014; Jalali, 2007; Hosseinpour & Safari Sinigani, 2007). جلالی (Jalali, 2006) و حسین‌پور و صفری سنجان (Hosseinpour & Safari Sinigani, 2007) بیان می‌کنند که در خاک‌های آهکی، یون کلسیم معمول‌ترین کاتیون برای تبادل پتاسیم بین‌لایه‌ای می‌باشد. بنابراین عصاره‌گیری متوالی پتاسیم با کلسیم یکی از روش‌های مناسب برای ارزیابی سینتیک رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در این خاک‌ها می‌باشد. مدل‌های سینتیکی مختلفی برای توصیف روند رهاسازی پتاسیم استفاده شده است. این مدل‌ها شامل معادلات الویچ، پخشیدگی پارابولیک، تابع توان، مرتبه صفر و مرتبه اول می‌باشند. به‌طور کلی استفاده از معادله‌های مختلف برای بررسی سینتیک رهاسازی پتاسیم و تعیین بهترین معادله بستگی به سازوکار اصلی مؤثر در رهاسازی پتاسیم، ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی خاک، نوع روش آزمایشگاهی استفاده شده و تیمار یا عدم تیمار خاک قبل از شروع آزمایش دارد (Sparks, 2000).

حسین‌پور و کلباسی (Hosseinpour & Kalbasi, 2002) با مطالعه سینتیک رهاسازی پتاسیم از خاک‌های ناحیه مرکزی ایران نتیجه‌گیری کردند که معادله مرتبه اول، پارابولیک و تابع توانی، سرعت رهاسازی پتاسیم از خاک‌های این منطقه را بهتر توصیف می‌کنند. رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی به طور قطع نتیجه حل شدن کانی‌های شامل پتاسیم نیست، بلکه ممکن است یک واکنش تبادلی باشد. این تبادل آهسته است و با روش‌های معمول تعیین

مطالعات قبلی (Owliaie, 2005) موجود بود. نمونه‌ها پس از خشک شدن، کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. بافت خاک به روش هیدرومتر (Bouyoucos, 1951)، پهاش در گل اشباع و هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع اندازه‌گیری شدند. کربن آلی به روش سوزاندن تر (Jackson, 1975)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات سدیم ۱ نرمال (Chapman, 1965) و کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون (Richards, 1954) اندازه‌گیری شدند. شکل‌های مختلف پتاسیم خاک شامل محلول، تبادل، غیرتبادلی و کل به ترتیب در عصاره‌ی اشباع، عصاره‌گیری با استات آمونیوم ۱ نرمال (۵ گرم خاک و ۲۵ میلی‌لیتر عصاره‌گیر، ۱۰ دقیقه تکان دادن و سه بار تکرار)، عصاره‌گیری با اسید نیتریک جوشان (۲/۵ گرم خاک و ۲۵ میلی‌لیتر عصاره‌گیر و ۱۰ دقیقه جوشاندن) و هضم با اسید فلوریدر یک و تیزاب سلطانی (۵/۰ گرم خاک و یک میلی‌لیتر مخلوط اسید نیتریک و اسید کلریدریک و ۱۰ میلی‌لیتر اسید فلوریدریک و دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت) اندازه‌گیری و پتاسیم استخراج شده توسط دستگاه شعله‌سنجی Jenway مدل PFP7 تعیین گردیدند (Pratt, 1965).

**رها سازی پتاسیم غیرتبادلی:** برای مطالعه‌های سینتیک رها سازی پتاسیم، از روش معمول که توسط پژوهشگران زیادی بیان شده است (Martin & Sparks, 1983; Srinivasarao *et al.*, 2006; Jalali 2005 & 2006; Najafi Ghiri *et al.*, 2011) استفاده گردید. ابتدا پتاسیم تبادل و محلول خاک‌ها با محلول ۱ نرمال کلریدکلسیم خارج گردید. پس از هوا خشک شدن نمونه‌ها، ۳ گرم از نمونه را در لوله سانتریفوژ ریخته و ۳۰ میلی‌لیتر از محلول کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار به آن اضافه گردید و به مدت ۲ ساعت تکان داده شد. سپس نمونه سانتریفوژ شده و محلول زلال رویی صاف و جهت اندازه‌گیری غلظت پتاسیم نگهداری گردید. مجدداً محلول تازه کلریدکلسیم به نمونه خاک اضافه گردید و تکان دادن با شیکر رفت و برگشتی با سرعت ۲۰۰ مرتبه در دقیقه، سانتریفوژ و اندازه‌گیری غلظت پتاسیم صورت گرفت. زمان‌های تکان دادن به صورت تجمعی شامل ۲، ۴، ۷، ۱۱، ۱۶، ۳۰، ۵۴، ۷۸، ۱۰۲، ۱۵۰، ۲۴۶، ۳۴۲، ۴۸۸ و ۶۵۶ ساعت بود. پتاسیم رها شده نسبت به زمان با معادلات مختلف سینتیکی برازش داده شد و ضریب تبیین ( $R^2$ ) با رگرسیون حداقل مربعات و

پتاسیم تبدالی اندازه‌گیری می‌شود (Song & Huang, 1998).

عبدی و همکاران (Abdi *et al.*, 2014) در مطالعه سینتیک رها سازی پتاسیم غیرتبادلی تعدادی از خاک‌های استان فارس اظهار نمودند که روند رها سازی به طور رضایت بخشی با مدل‌های توانی، مرتبه اول، الوویچ و پخشیدگی توصیف می‌گردد. جلالی (Jalali, 2007)، با مطالعه رها سازی پتاسیم با استفاده از عصاره‌گیر کلریدکلسیم ۰/۰۱ مولار بر روی ۴۰ نمونه خاک سطحی استان همدان، مقدار شیب و عرض از مبدأ معادله پارابولیک را برای کاربرد و فراهمی مقدار پتاسیم کافی برای گیاه مورد استفاده قرار داد. مهدوی (Mahdavi, 1991)، در مطالعات خود در استان همدان، پایین بودن میزان پتاسیم رها شده توسط کلریدکلسیم ۰/۰۱ مولار را به نوع کانی غالب آن، که ایلیت دی‌اکتاهدرال بود، نسبت داد و از طرفی بالا بودن میزان پتاسیم رها شده را به بالا بودن میزان کانی‌های انبساط‌پذیر در خاک که امکان تبادل بیشتر یون کلسیم را با پتاسیم فراهم می‌کنند، مربوط دانست.

اطلاع از سینتیک رها سازی پتاسیم غیرتبادلی و معادلات آن برای محققان تغذیه گیاه این امکان را فراهم می‌آورد که با آگاهی بیشتر نسبت به نوع، میزان و دفعات کوددهی اقدام نمایند. با توجه به اهمیت عنصر پتاسیم در کشاورزی و موارد ذکر شده، و پژوهش‌های اندکی که در خاک‌های استان کهگیلویه و بویراحمد با توجه به تنوع آنها صورت گرفته است، مطالعه حاضر به منظور آگاهی از موارد یاد شده انجام گرفت.

### مواد و روش‌ها

۴۰ نمونه خاک سطحی (صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) از خاک‌های مناطق مختلف اقلیمی استان کهگیلویه و بویراحمد جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شدند. بر اساس برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از جمله بافت، میزان کربنات کلسیم معادل، ظرفیت تبادل کاتیونی و میزان پتاسیم تبدالی و غیرتبادلی، ۱۴ نمونه خاک که به لحاظ این ویژگی‌ها دارای پراکندگی نسبتاً زیادی بودند (شامل ۴ خاک انتی‌سول، ۴ خاک اینسپیتی‌سول و ۶ خاک آلفی‌سول) برای انجام آزمایش‌های سینتیک رها سازی پتاسیم غیرتبادلی انتخاب شدند. نمونه‌برداری از مناطقی صورت گرفت که اطلاعات کانی‌شناسی آنها بر اساس

۲۷۳/۳ تا ۴۲۵/۹، ۶۱۶/۲ تا ۱۸۳۹/۳، ۱۳۳۷/۶ تا ۴۶۲۰ و ۲۰۰۰ تا ۶۴۵۹/۷ میلی گرم بر کیلوگرم می باشد (جدول ۲). مقادیر کمینه و بیشینه پتاسیم تبادلی در خاک های ۱۲ و ۶ به ترتیب به میزان ۲۷۳/۳ و ۴۲۵/۹ میلی گرم بر کیلوگرم بوده است. میزان پتاسیم عصاره گیری شده با اسید نیتریک جوشان نیز در دامنه ۶۱۶ (خاک ۱۳) در راسته انتی سول با رس غالب پالی گورسکیت) تا ۱۸۳۹ (خاک ۶) در راسته آلفی سول با رس غالب ایلیت و اسمکتیت) میلی گرم بر کیلوگرم بوده است. سهم نسبی پتاسیم تبادلی به پتاسیم کل در خاک های مطالعه شده در دامنه ۶/۷ (خاک ۱۲) تا ۱۵ درصد (خاک ۱۰) می باشد (جدول ۲ و ۳). میزان پتاسیم تبادلی در خاک های تکامل یافته تر آلفی سول بیشتر از سایر خاک های با تکامل کمتر (انتی سول و اینسپتی سول) بود (۳۷۶ در برابر ۳۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم). این روند در مورد پتاسیم کل نیز صادق بوده است (۳۹۸۸ در برابر ۲۹۲۸ میلی گرم بر کیلوگرم). با توجه به نتایج جدول شماره ۳، کانی های رسی موجود در خاک های مورد مطالعه به ترتیب فراوانی نسبی شامل کانی های کلریت، اسمکتیت، ایلیت و پالی گورسکیت (فقط در ۴ نمونه خاک مناطق خشک تر استان) و در مقادیر کم کائولینیت و کوارتز بوده است. مطالعات کانی شناسی رس صورت گرفته در خاک های استان نشان داد که کانی های میکا و کلریت به طور عمده دارای منشأ توارثی بوده در حالیکه دو کانی اسمکتیت و پالی گورسکیت دارای هر دو منشأ پدوژنیک و توارثی بوده اند (Owliaie, 2005).

**روند رهاسازی پتاسیم:** مقدار پتاسیم تجمعی رها شده توسط کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار از خاک ها طی ۶۵۶ ساعت عصاره گیری از ۳۸/۱ (خاک ۱۳) تا ۳۲۰/۲ (خاک ۶) و به طور میانگین ۱۳۱ میلی گرم بر کیلوگرم متغیر بود (جدول ۲ و شکل ۱). فراهمی پتاسیم غیر تبادلی، بستگی به سرعتی دارد که این نوع پتاسیم می تواند به شکل های قابل جذب تبدیل شود. روند رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی با زمان نشان داد که تقریباً در تمامی خاک ها سرعت رهاسازی تا ۲۴۲ ساعت پس از شروع آزمایش زیاد بود و پس از این مرحله رهاسازی با سرعت کمتری ادامه یافت. مشابه این روند توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Hatami et al., 2013; Owliaie et al., 2014; jalali, 2006).

خطای استاندارد برای ارزیابی معادلات مختلف استفاده گردید (Jalali, 2007). این معادلات عبارتند از معادله لوییچ  $(Y = a + b \ln t)$ ، پخشیدگی پارابولیک  $(Y = a + b t^{1/2})$ ، تابع توان  $(\ln Y = \ln a + b \ln t)$ ، مرتبه صفر  $(Y = a - b t)$  و مرتبه اول  $(\ln(Y - Y_0) = a - b t)$ ؛ که در آن  $Y$  مقدار پتاسیم تجمعی رها شده (میلی گرم بر کیلوگرم خاک)، در زمان  $t$  (ساعت)،  $Y_0$  حداکثر پتاسیم تجمعی رها شده (میلی گرم بر کیلوگرم خاک) و  $a$  و  $b$ ، ثابت های معادله ها می باشند. یکی از مهم ترین بخش های این معادله ثابت  $b$  است که نشان دهنده آهنگ رهاسازی پتاسیم تبادلی می باشد. این مدل های آماری با آنالیز رگرسیون حداقل مربعات آزموده شدند تا بهترین معادله ای که رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی از خاک را توصیف کند، مشخص شود. ضریب تبیین  $R^2$  با رگرسیون حداقل مربعات مقادیر اندازه گیری شده در مقابل مقادیر پیش بینی شده به دست آمد. خطای استاندارد برآورد با معادله زیر تعیین شد.

$$SE = \{(q-q^*)^2/(n-2)\}^{1/2} \quad (1)$$

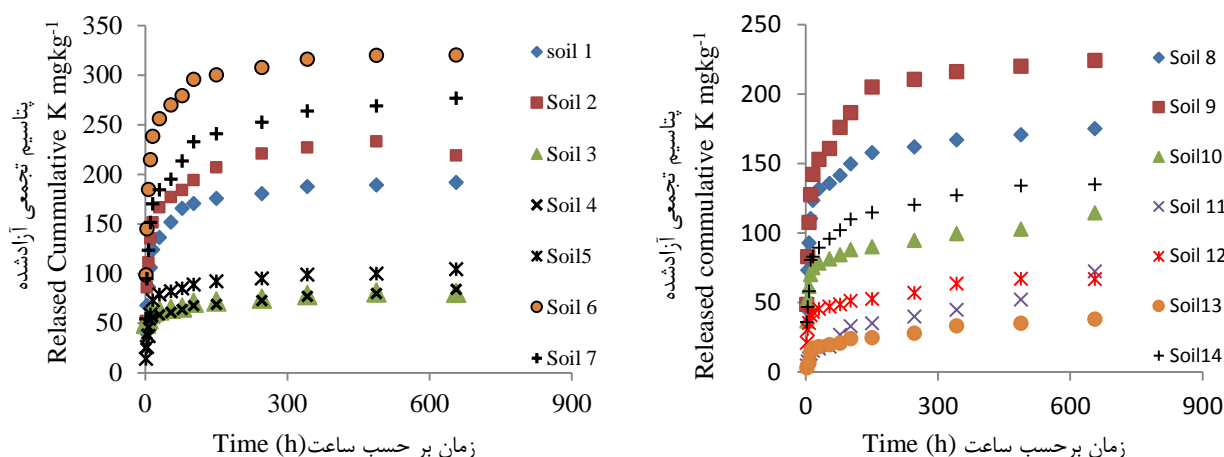
در این معادله  $q^*$ ،  $q$  به ترتیب نشان دهنده مقدار پتاسیم غیر تبادلی پیش بینی شده و اندازه گیری شده و  $n$  تعداد داده های ارزیابی شده می باشد.

## نتایج و بحث

ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. این خاک ها در راسته های انتی سولز، اینسپتی سولز و آلفی سولز رده بندی شده اند (Owliaie, 2005). خاک ها به طور عمده آهکی بوده و میانگین کربنات کلسیم معادل و پ هاش آنها به ترتیب ۴۱ درصد و ۷/۶۲ می باشد. میانگین مقدار رس، سیلت و شن به ترتیب ۳۲، ۳۵ و ۳۳ درصد بوده و گروه بافتی در دامنه لومی رسی تا لومی رسی شنی متغیر بوده است. میانگین قابلیت هدایت الکتریکی ۱/۶۷ دسی زیمنس بر متر بود. میانگین کربن آلی ۱/۵۱ درصد و ظرفیت تبادل کاتیونی در دامنه ۱۰/۸ تا ۴۶/۲ سانتی مول بر کیلوگرم می باشد. پتاسیم محلول، تبادلی، قابل استخراج با اسید نیتریک جوشان، ساختمانی و کل به ترتیب در دامنه ۱/۳ تا ۸/۴،

جدول ۱- مشخصات عمومی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه  
Table 1. General characteristics and physico-chemical properties of studied soils

رده‌بندی خاک Classification (Taxonomy, 2014)	هدایت الکتریکی خاک EC dS m <sup>-1</sup>	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	کربنات کلسیم معادل CCE (%)	کربن الی OC (%)	پ هاش pH	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	طول جغرافیایی Longitude (m)	عرض جغرافیایی Latitude (m)	شماره خاک Soil no.
Typic Calcixerepts	1.08	20.8	38.2	2.96	7.71	32.6	33.4	34.0	551226	3398740	1
Typic Xerorthents	0.84	27.3	16.6	0.98	7.8	30.6	31	37.4	550313	3398666	2
Typic Xerorthents	1.02	28.3	33.5	2.17	7.62	28.6	30	41.4	546745	3401557	3
Lithic Haplaquents	2.58	19.0	65.7	2.46	7.35	26.6	44	29.4	541144	3406144	4
Calcic Haploxeralfs	2.7	26.3	49.8	0.59	7.46	36.6	18	45.4	540352	3406263	5
Calcic Haploxeralfs	1.08	41.4	41.0	0.39	7.65	43.6	30	26.4	549172	3380597	6
Calcic Haploxeralfs	1.02	46.2	5.9	1.58	7.69	42.6	27	30.4	554320	3385293	7
Calcic Haploxeralfs	1.08	34.6	45.9	2.17	7.64	34.6	32	33.4	556623	3387913	8
Typic Haploxeralfs	1.44	35.7	17.2	0.75	7.60	32.0	38.6	29.4	556396	3391272	9
Typic Calcixerepts	2.04	15.8	79.3	2.56	7.74	18.6	50	31.4	481821	3357678	10
Typic Calcixerepts	3.66	37.43	42.8	0.39	7.57	36.6	27.4	36	493396	3353820	11
Gypsic Calcixerepts	2.82	10.8	35.1	1.67	7.46	12.6	50	37.4	470634	3363762	12
Typic Xerorthents	1.14	27.3	36.7	1.08	7.63	37.2	24	38.8	573821	3366691	13
Typic Haploxeralfs	0.9	43.8	6.65	1.38	7.87	36.6	36	4.27	576607	3389878	14
-	1.37	38.00	27.7	1.14	7.65	41.0	30.8	28.2	-	-	Alfisols Mean
-	2.4	21.20	48.8	1.89	7.62	25.1	40.2	34.7	-	-	Inceptisols Mean
-	1.39	25.47	38.12	1.67	7.6	30.7	32.2	37.1	-	-	Entisols Mean
-	1.67	29.1	41.0	1.51	7.62	32	35	33	-	-	Mean



شکل ۱- مقدار پتاسیم غیر تبادلی رها شده خاک‌های مورد مطالعه به روش عصاره‌گیری متوالی با کلرید کلسیم  
 Figure 1. The amount of released non-exchangeable K in the studied soils using CaCl<sub>2</sub> continuous extracting

جدول ۲- شکل‌های مختلف پتاسیم و درصد نسبی آنها در خاک‌های مورد مطالعه و میزان رهاسازی پتاسیم تجمعی با استفاده از کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار

Table 2. Potassium forms and their relative amounts in studied soils and the cumulative K release using 0.01M CaCl<sub>2</sub>

پتاسیم تجمعی رها شده Cumul. K (mg kg <sup>-1</sup> )	شکل‌های مختلف پتاسیم Potassium forms (%)					شکل‌های مختلف پتاسیم Potassium forms (mg kg <sup>-1</sup> )					شماره خاک Soil no.
	ساختمانی Structural	غیر تبادلی Non-exch.	تبادلی Exch.	محلول Solution	کل Total	ساختمانی Structural	اسید نیتریک HNO <sub>3</sub>	استات آمونیم Ammonium acetate	محلول Solution		
191.7	70.4	18.4	11.1	0.06	2721	1917	804.7	303.5	1.7	1	
218.9	71.2	18.0	10.8	0.04	3323	2356	957.9	359.9	1.3	2	
80.4	65.6	22.8	11.6	0.06	2770	1817	952.8	322.0	1.6	3	
84.2	63.2	27.1	9.6	0.17	2934	1855	1079.1	285.3	1.5	4	
204.4	73.8	14.1	12.0	0.18	3066	2261	804.7	372.8	4.5	5	
320.2	71.5	20.9	7.6	0.03	6459	4620	1839.3	425.9	1.7	6	
276.8	74.1	18.8	7.1	0.03	5118	3792	1326.1	366.3	1.6	7	
175.3	69.6	17.0	13.4	0.07	2486	1729	756.7	334.5	1.7	8	
224.2	64.1	24.7	11.1	0.09	2818	1806	1012.3	315.8	2.4	9	
114.7	66.9	18.0	15.0	0.19	2000	1337	662.4	313.5	3.7	10	
72.5	69.0	15.9	14.7	0.38	2171	1499	672.4	328.5	8.4	11	
66.8	75.4	17.7	6.7	0.15	3977	2999	978.1	273.3	5.8	12	
38.1	82.6	8.9	8.5	0.50	3535	2919	616.2	303.5	1.8	13	
135.2	65.8	24.5	9.7	0.30	2398	2621	631.7	385.9	1.4	14	
222.3	69.82	20.0	10.1	0.12	3325	2805	1062	366.8	2.22	Alfisols Mean	
111.3	70.43	17.5	11.8	0.20	2717	1938	779.4	304.7	4.90	Inceptisols Mean	
105.1	70.65	19.2	10.1	0.19	3140	2237	901.5	317.6	1.55	Entisols Mean	
131.0	70.2	19.1	10.6	0.11	3383.3	2395	987.4	334.3	3.1	Mean	

جدول ۳- مقادیر نسبی کانی‌های رسی موجود در خاک‌های مورد مطالعه

Table 3. Relative amounts of clay minerals in studied soils

Relative sequence of clay minerals ترتیب نسبی کانی‌های رسی	Soil no.
Kaolinite<Quartz<Illite<<Smectite<Chlorite	1
Quartz<<Illite<Smectite<<Chlorite	2
Quartz<<Illite=Illite< Smectite	3
Quartz<<Illite<Smectite<<Chlorite	4
Kaolinite=Quartz<< Smectite<Chlorite<<Illite	5
Kaolinite<<Chlorite<= Smectite<Illite	6
Quartz<<Chlorite<Illite< Smectite	7
Kaolinite<<Illite<< Smectite<Chlorite	8
Quartz<<Illite< chlorite<= Smectite	9
Quartz<<Illite<=Chlorite<Smectite<< Palygorskite	10
Quartz<Smectite<Illite<=Chlorite<< Palygorskite	11
Quartz <Illite<Smectite=Chlorite<<Palygorskite	12
Quartz<<Smectite<Illite<Chlorite< Palygorskite	13
Kaolinite<<Illite<Chlorite<<Smectite	14

فارس گزارش نمودند. ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و خطای معیار (SE) برآورد مدل‌های سینتیکی استفاده شده جهت توصیف سینتیک رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی در جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر  $R^2$  در معادله مرتبه اول از ۰/۹۶-۰/۷۸ (میانگین ۰/۸۶)، در معادله مرتبه اول از ۰/۹۴-۰/۷۴ (میانگین ۰/۸۸)، در معادله الویچ از ۰/۸۳-۰/۹۸ (میانگین ۰/۹۵)، در معادله تابع توان از ۰/۸۳-۰/۹۸ (میانگین ۰/۸۹) و در معادله پخشیدگی پارابولیک از ۰/۹۷-۰/۷۲ (میانگین ۰/۸۳) متغیر بودند. گرچه ضریب همبستگی معادله الویچ بیشتر از معادلات تابع توان و مرتبه اول است (۰/۹۵ در برابر ۰/۸۹ و ۰/۸۸)، اما به دلیل تفاوت نسبتاً زیاد بین خطای معیار این معادلات (به ترتیب، ۶/۳۴، ۰/۱۶ و ۰/۲۴)، معادلات تابع توان، مرتبه اول و الویچ به ترتیب رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی را به نحو قابل قبول تری در خاک‌های مورد مطالعه توصیف کردند (جدول ۴). این نتایج کاملاً با نتایج به دست آمده توسط حسین‌پور و کلباسی (Hosseinpur & Kalbasi, 2002) در خاک‌های ایران مرکزی همخوانی دارد. در نتیجه به نظر می‌رسد که رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی از خاک‌های منطقه نیز به طور عمده توسط فرآیند پخشیدگی کنترل می‌شود. بر اساس نظر هاولین و همکاران (Havlin et al., 1985)، در صورتی

به‌طور کلی رهاسازی سریع اولیه را می‌توان به رها شدن پتاسیم از مناطق لبه‌ای و گوه‌ای شکل کانی‌های پتاسیم‌دار نسبت داد. با پیش‌روی رهاسازی، لبه‌های کانی از هم جدا شده و پتاسیم‌های بین لایه‌ای موجود در ساختمان کانی رها می‌شوند. به علت افزایش فاصله پتاسیم‌های درونی از لبه‌ها و قدرت جذب پتاسیم، رهاسازی با سرعت و پخشیدگی کم‌تری صورت می‌گیرد (Goulding, 1984). حاتمی و همکاران (Hatami et al., 2013) در مطالعه سینتیک رهاسازی پتاسیم از کانی‌های سیلیکاته پتاسیم‌دار نتیجه گرفتند که کانی‌های بیوتیت، فلوگوپیت، فلدسپار و موسکویت به ترتیب بیشترین رهاسازی پتاسیم را با کلردباریم ۰/۰۵ مولار داشته و کاهش اندازه ذرات، منجر به افزایش رهاسازی پتاسیم شده است. مقادیر پتاسیم تجمعی رها شده توسط کلریدکلسیم ۰/۰۱ مولار، در راسته-های آلفی سول (۶ خاک)، اینسپتی سول (۴ خاک) و انتی-سول (۴ خاک) به ترتیب ۲۲۲/۳، ۱۱۱/۳ و ۱۰۵/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که بیانگر ارتباط مستقیم میزان رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی با میزان تکامل و تیپ خاک می‌باشد (جدول ۲).

صدری و همکاران (Sadri et al., 2016) و نجفی و همکاران (Najafi et al., 2011) نتایج مشابهی را در خاک‌های استان

تجمعی پتاسیم غیرتبادلی در برخی از خاک‌های همدان نشان داد که معادلات تابع توان، مرتبه اول، پخشیدگی پارابولیک و الوویچ به بهترین نحو رهاسازی پتاسیم را توجیه می‌نمایند (Jalali & Kolahchi, 2006).

ثابت‌های سرعت معادلات در خاک‌ها متفاوت بود. این تغییرات به اختلاف در ویژگی‌هایی چون توزیع اندازه ذرات، میزان کربنات کلسیم، نوع و مقدار کانی‌های رسی نسبت داده شدند. مقادیر  $b$  که شاخصی از آهنگ رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی می‌باشند، در معادلاتی که همبستگی بیشتری با سینتیک رهاسازی پتاسیم نشان می‌دهند، حائز اهمیت هستند. شیب معادله الوویچ (پارامتر  $b$ ) بیانگر سرعت رهاسازی پتاسیم بین‌لایه‌ای و عرض از مبدا آن بیان‌کننده سرعت اولیه و فوری رهاسازی پتاسیم می‌باشد (Abdi *et al.*, 2014).

که معادلات تابع توان، الوویچ و انتشار پارابولیک به دلیل بالا بودن ضرایب تبیین و پایین بودن خطای معیار برآورد، بتوانند رها شدن پتاسیم را در خاک‌ها توصیف نمایند، رها شدن پتاسیم یک فرایند انتشار است. به بیانی دیگر، انتشار پتاسیم به خارج توده کانی یا نواحی هوا دیده، کنترل‌کننده سرعت رهاسازی پتاسیم در این خاک‌ها می‌باشد. نتایج مشابه توسط سایر محققان گزارش شده است (Cox & Joern, 1997; Najafi *et al.*, 2011., Owliaie *et al.*, 2014). هاولین و همکاران (Havlin *et al.*, 1985)، در مطالعه‌ای که در مورد سرعت رهاسازی تجمعی پتاسیم توسط رزین کلسیمی در خاک‌های آهکی کارولینای شمالی انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که معادلات الوویچ، توانی و پخشیدگی پارابولیکی به خوبی می‌توانند رهاسازی پتاسیم را توجیه کنند. نتایج پژوهش‌های مرتبط با سرعت رهاسازی

جدول ۴- ضریب تبیین و خطای استاندارد مدل‌های استفاده شده جهت بررسی سینتیک رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی  
Table 4. Coefficient of determination and standard error of studied models for evaluating kinetics of release of non-exchangeable K

الوویچ		مرتبه اول		پارابولیک		تابع توان		مرتبه صفر		شماره خاک
Ellovich		First order		Parabolic		Power function		Zero order		Soil no.
R <sup>2</sup>	SE	R <sup>2</sup>	SE	R <sup>2</sup>	SE	R <sup>2</sup>	SE	R <sup>2</sup>	SE	
0.95	10.02	0.74	0.32	0.75	22.04	0.84	0.18	0.56	29.09	1
0.96	11.54	0.84	0.35	0.75	28.34	0.85	0.17	0.55	37.8	2
0.97	1.83	0.96	0.15	0.93	2.97	0.94	0.15	0.78	5.29	3
0.96	3.3	0.91	0.23	0.8	7.59	0.88	0.12	0.63	10.46	4
0.94	5.83	0.83	0.18	0.9	7.72	0.89	0.17	0.78	11.49	5
0.98	2.98	0.92	0.23	0.89	7.47	0.93	0.21	0.7	12.16	6
0.98	11.23	0.92	0.3	0.78	33.91	0.87	0.18	0.57	47.19	7
0.94	9.52	0.90	0.32	0.72	21.33	0.83	0.16	0.52	27.91	8
0.97	9.84	0.85	0.33	0.77	26.05	0.85	0.17	0.56	35.48	9
0.96	4.47	0.83	0.23	0.82	9.24	0.89	0.1	0.65	12.67	10
0.86	7.54	0.95	0.09	0.97	3.41	0.98	0.11	0.92	5.73	11
0.96	3.07	0.94	0.16	0.89	4.85	0.9	0.12	0.76	7.24	12
0.97	2.04	0.95	0.17	0.9	3.57	0.89	0.27	0.75	5.69	13
0.97	5.58	0.85	0.32	0.77	15.99	0.86	0.18	0.57	22.01	14
0.95	6.34	0.88	0.24	0.83	13.89	0.89	0.16	0.66	19.3	Mean

۳۶/۸ (خاک ۶) و ضریب  $a$  نیز در دامنه ۲/۰۵ (خاک ۱۳) تا  $52/2 \text{ mg kg}^{-1}$  (خاک ۶) بود. بنابراین هم آهنگ رهاسازی پتاسیم و هم مقدار اولیه پتاسیم رها شده، در خاکهای مشابه

تفاوت بین مقادیر  $b$  نشان می‌دهد که قدرت خاک‌ها در تأمین پتاسیم برای گیاه متفاوت است. مقادیر ضریب  $b$  معادله الوویچ در دامنه ۵/۸ (خاک ۱۳) تا  $\text{mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1/2}$



ثابت این مدل می‌باشد، به عنوان سرعت ویژه در واحد زمان<sup>۳</sup> در نظر گرفته می‌شود و می‌تواند شاخصی از سرعت در این معادله باشد. بر این اساس، مقدار حداکثر این پارامتر طبق معادله تابع توان در خاک ۶ (مقدار ۱/۹۳) و مقدار حداقل در خاک ۱۳ (مقدار ۰/۲۴) می‌باشد که مشابه نتایج به دست آمده ضرایب a و b به تفکیک می‌باشد. نوع کانی رسی در میزان و سرعت رها سازی پتاسیم در خاک اهمیت زیادی دارد. کوونگ و راماساومی (Kwong & Ramasawmi, 2006)، نتیجه گرفتند به دلیل باندهای ضعیف تر پتاسیم درون لایه‌ای کانی‌های میکایی به خصوص بیویت، در خاک‌های لسی، نسبت به خاک‌های آلوویال و بازالتی، کانی‌های این بخش، جزء اصلی رهاکننده پتاسیم در این خاک‌ها هستند.

دارای مقادیر حداقلی و حداکثری بودند که بیانگر ارتباط نزدیک این دو مشخصه در خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد (جدول ۵). نتایج جدول‌های ۱ تا ۳ نیز بیانگر این است که در خاک ۶ مقدار رس، حداکثر (۴۳/۶ درصد)، ظرفیت تبادل کاتیونی نزدیک به حداکثر (۴۱/۳ سانتی مول بر کیلوگرم)، پتاسیم غیرتبادلی، حداکثر (۱۸۳۹ میلی گرم بر کیلوگرم) و رس غالب آن ایلیت و اسمکتیت می‌باشند. این خاک در راسته آلفی سول طبقه‌بندی شده است. خاک ۱۳ نیز بر اساس نتایج ارائه شده خاکی با تکامل حداقلی (انتی سولز)، بافت سبک تا متوسط و پتاسیم‌های تبادلی و غیرتبادلی آن در مقادیر حداقلی در بین خاک‌های مورد مطالعه بود. کانی غالب این خاک پالی گورسکیت بود که نقش چندانی در تثبیت پتاسیم ندارد (جدول‌های ۱، ۲ و ۳).

سرانو و همکاران (Serrano et al., 2005) همچنین بیان نمودند که در مدل تابع توان، پارامتر ab که حاصل ضرب دو

جدول ۵- شیب (b) و عرض از مبدا (a) مدل‌های استفاده شده جهت بررسی سینتیک رها سازی پتاسیم غیرتبادلی

Table 5. Slope (b) and Intercept (a) of models used for evaluating kinetics of release of non-exchangeable K

الووچ		مرتبه اول		پارابولیک		تابع توان		مرتبه صفر		شماره خاک
Elovich		First order		Parabolic		Power function		Zero order		Soil no.
b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	
mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	(mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup> h	mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1/2</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	(mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup> h	
22.28	43.71	-0.0034	4.42	4.67	84.18	0.21	3.99	-0.15	85.25	1
28.63	45.29	-0.0051	4.54	5.95	107.72	0.21	4.23	-0.2	94.14	2
5.82	5.48	-0.0043	3.31	1.34	8.87	0.32	1.7	-0.05	25.53	3
8.71	26.87	-0.0046	3.55	1.87	42.21	0.16	3.43	-0.06	33.22	4
12.33	9.06	-0.0025	4.14	2.84	28.91	0.26	2.94	-0.1	63.02	5
78.36	52.23	-0.0048	3.87	2.57	13.98	0.39	4.96	-0.09	45.3	6
49.11	51.05	-0.0064	4.87	7.73	117.61	0.23	4.27	-0.25	121.73	7
20.24	51.88	-0.0061	4.23	4.15	89.46	0.19	4.09	-0.13	65.53	8
27.46	50.97	-0.0049	4.58	5.75	100.81	0.21	4.17	-0.19	95.65	9
10.96	38.04	-0.0032	3.85	2.38	57.07	0.15	3.76	-0.08	46.66	10
9.8	10.37	-0.0024	4.09	2.45	3.48	0.42	1.43	-0.09	58.88	11
7.44	13.95	-0.004	3.57	1.69	26.14	0.2	2.93	-0.06	33.14	12
5.81	2.05	-0.0047	3.29	1.32	7.47	0.18	1.32	-0.05	24.67	13
17.28	25.46	-0.0047	4.13	3.63	56.7	0.23	3.55	-0.12	61.02	14
34.13	40.11	-0.0049	4.30	4.45	67.91	0.25	4.00	-0.15	75.38	Alfisols Mean
12.62	26.52	-0.0033	3.98	2.80	42.72	0.25	3.03	-0.10	55.98	Inceptisols Mean
12.24	19.92	-0.0047	3.67	2.62	41.57	0.22	2.67	-0.09	44.39	Entisols Mean
16.07	24.87	0	4.03	3.45	53.19	0.26	3.13	-0.12	60.98	Mean

3-special rate at unit time

مثبت و معنی‌داری نشان داده است که بیانگر نقش بیشتر بخش رس خاک در رهاسازی پتاسیم از این خاک‌ها بوده است. مقدار شن فقط با ضریب  $b$  معادله تابع توان همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد. کربنات کلسیم معادل خاک با تمامی ضرایب معادلات رابطه منفی و با ضریب  $b$  معادلات الوویچ، مرتبه اول، پارابولیک و مرتبه صفر، همبستگی معنی‌دار بوده است. همبستگی معنی‌داری بین ظرفیت تبادل کاتیونی، هدایت الکتریکی و شکل‌های پتاسیم با ضرایب معادلات بدست نیامد (جدول ۶). ضرابی و همکاران (Zarrabi *et al.*, 2006) در مطالعه سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی و قابلیت جذب آن با استفاده از اسید مالیک در خاک‌های همدان بین ویژگی‌های خاکی از جمله مقادیر رس، سیلت، سیلت+رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، پتاسیم عصاره‌گیری شده با استات آمونیم و استات سدیم با ثابت‌های رهاسازی معادلات مورد استفاده همبستگی معنی‌داری مشاهده نکردند.

نجفی قیری (Najafi Ghiri, 2010) نیز در مطالعه جامعی، سینتیک رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی را در خاک‌های استان فارس بررسی نمود. نامبرده برای خاک کامل، معادلات ایلوویچ و مرتبه اول و برای اجزای شن، سیلت و رس، معادلات پارابولیک و تابع توان را پیشنهاد نمود. بین ضریب  $b$  پارابولیک اجزای سه‌گانه خاک و ویژگی‌های خاک ارتباطی معنی‌داری توسط وی گزارش نگردید.

فرشادی‌راد و همکاران (Farshadirad *et al.*, 2003)، بر اساس نتایج کانی‌شناسی، رهاسازی بیش‌تر در برخی خاک‌ها را به درصد بالای رس و حضور غالب کانی انبساط‌پذیر اسمکتیت در آنها که امکان تبادل بیش‌تر یون کلسیم را با پتاسیم فراهم می‌کند، نسبت دادند. رهاسازی پایین در بخش رس می‌تواند به دلیل نوع کانی‌های موجود در این بخش باشد. در کانی‌های کائولینیت و اسمکتیت‌ها سرعت تبادل یون سریع است. در رس‌های کائولینیت، لایه‌های رس به وسیله پیوندهای محکم هیدروژنی به یکدیگر متصل شده‌اند. بنابراین فقط سطوح خارجی برای تبادل در دسترس می‌باشند. در رس‌های اسمکتیت به علت پیوندهای ضعیف بین‌لایه‌ای و آب‌پوشی یون‌های جذب شده در بین لایه‌ها، کانی قادر به انبساط بوده و عبور سریع یون‌ها از داخل لایه‌ها امکان‌پذیر می‌باشد. صدری و همکاران (Sadri *et al.*, 2016) در مطالعه خود در خاک‌های استان فارس بیان نمودند که بیشترین مقدار تمام شکل‌های پتاسیم به جز پتاسیم محلول در خاک‌های تکامل‌یافته‌تر آلفی‌سول با کانی غالب اسمکتیت و ایلیت مشاهده شد. همچنین نامبردگان رابطه معنی‌داری بین تمام شکل‌های پتاسیم به جز محلول با مقدار کانی ایلیت گزارش نمودند. نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که اکثر ضرایب  $a$  و  $b$  معادلات سینتیکی ۵ گانه با یکدیگر همبستگی معنی‌داری دارند (به جز ضریب  $b$  معادله مرتبه اول). همچنین میزان رس خاک با ضریب  $b$  معادلات الوویچ، پارابولیک و تابع توان همبستگی

جدول ۶- همبستگی بین ضرایب سرعت a و b با خصوصیات خاک

Table 6- Correlation between (a) and (b) coefficients with soil properties

(b) Elovich	(a) Elovich	(b) first order	(a) first order	(b) parabolic	(a) parabolic	(b) power function	(a) power function	(b) zero order	(a) zero order	EC	CEC	CCE	Clay	Silt	Sand	
1	0.805*	-0.388	0.933**	0.999**	0.929**	-0.371	0.767**	-0.994**	0.969**	-0.468	0.464	-0.607*	0.355	-0.207	-0.145	(b) Elovich
	1	-0.359	0.700**	0.780**	0.967**	-0.798**	0.961**	-0.751**	0.716**	-0.422	0.006	-0.231	-0.111	-0.188	0.281	(a) Elovich
		1	-0.197	-0.367	-0.397	0.172	-0.284	0.337	-0.244	0.686*	-0.442	0.499	-0.281	0.303	0.003	(b) first order
			1	0.945**	0.830**	-0.294	0.715**	-0.947**	0.980**	-0.238	0.476	-0.493	0.389	-0.199	-0.197	(a) first order
				1	0.912**	-0.34	0.745**	-0.998**	0.979**	-0.436	0.479	-0.609*	0.373	-0.193	-0.169	(b) parabolic
					1	-0.655**	0.925**	-0.891**	0.857**	-0.476	0.205	-0.41	0.086	-0.211	0.112	(a) parabolic
						1	-0.865**	0.301	-0.287	0.101	0.418	-0.127	0.541*	0.171	-0.614*	(b) power function
							1	-0.715**	0.703**	-0.309	-0.017	-0.195	-0.144	-0.277	0.336	(a) power function
								1	-0.982**	0.421	-0.491	0.627*	-0.385	0.174	0.196	(b) zero order
									1	-0.302	0.462	-0.557*	0.387	-0.135	-0.223	(a) zero order
										1	-0.357	0.502	-0.365	0.269	0.174	EC
											1	-0.616*	-0.85**	-0.395	-0.54**	CEC
												1	-0.417	0.124	0.307	CCE
													1	-0.176	-0.817*	Clay
														1	-0.434	Silt
															1	Sand

\* در سطح ۵ درصد و \*\* در سطح ۱ درصد معنی دار می باشد.

\* Significant at 5% and \*\* 1% probability level

## نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، خاک‌های مختلف رفتارهای متفاوتی را در ارتباط با رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی توسط عصاره‌گیر کلریدکلسیم ۰/۰۱ مولار نشان دادند. نتایج نشان دادند که سرعت رهاسازی تا ۲۴۲ ساعت پس از شروع آزمایش زیاد بود و پس از این مرحله، رهاسازی با سرعت کم‌تری ادامه یافت. همچنین پس از ۶۵۶ ساعت، در خاک‌های با بافت سنگین‌تر، با مقادیر بیشتر رس‌های ایلیت و اسمکتیت و ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر، هنوز بخش قابل توجهی از پتاسیم غیرتبادلی رها نشده باقی مانده است که این ذخیره پتاسیم غیرتبادلی می‌تواند در اثر هوادیدگی به تدریج رها و در اختیار گیاه قرار گیرد. این نتیجه‌گیری می‌تواند در

مدیریت کاربرد کودهای پتاسیم مورد استفاده قرار گیرد و مقدار کود پتاسیمی مورد نیاز با اطلاع از این ذخیره جهت گیاه محاسبه شود. ضریب همبستگی و خطای معیار برآورد مدل‌های سینتیکی نشان داد که معادلات تابع توان، مرتبه اول و الویج، رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی را به نحو قابل-قبول‌تری در خاک‌های مورد مطالعه توصیف می‌نمایند که در مجموع بیانگر نقش فرآیند پخشیدگی در تأمین پتاسیم وارد شده به فاز محلول خاک می‌باشد. ضرایب b (آهنگ رهاسازی) و a (مقدار رهاسازی در مرحله اول) و حاصلضرب این دو (ab) همگی ارتباط مستقیمی با میزان رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، مقدار ایلیت و اسمکتیت و میزان تکامل خاک‌ها داشتند.

## References

- Abdi S., Ghasemi Fasaei R., Karimian N., and Feyzian M. 2014. Availability and release kinetics of nonexchangeable potassium in some calcareous soils of Fars Province. *Journal of Water and Soil*, 28(4):766-777. (In Persian)
- Balali M.R., and Malakouti M.J. 1998. Study of changes of exchangeable potassium in Iranian agricultural soils. *Journal of Soil and Water*, 12(3): 59-70. (In Persian)
- Bouyoucos G.J. 1951. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. *Agronomy Journal*, 43: 434-438.
- Chapman H.D. 1965. Cation exchange capacity. In: Black CA, (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, Part 2. *American Society of Agronomy*, Madison, WI, pp. 891-901
- Cox A.E., and Joern B.C. 1997. Release kinetics of nonexchangeable potassium in soil using sodium tetraphenyl boron. *Soil Science*, 162: 588-596.
- Cox A.E., Joern B.C., Brouder S.M., and Gao D. 1999. Plant-available potassium assessment with a modified sodium tetraphenylboron method. *Soil Science Society American Journal*, 63: 902-911.
- Farshadirad A., Dordipur A., and Khormali F. 2003. Release kinetics of nonexchangeable potassium using  $\text{CaCl}_2$  in some soils. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 3(1): 113-129. (In Persian)
- Goulding K.W.T. 1984. The availability of potassium in soil to crops as measured by its release to a calcium-saturated cation exchange resin. *Journal of Agricultural Science*, 103: 265-275.
- Hatami H., Karimi A., Fotovat A., and Khademi H. 2013. Effect of  $\text{BaCl}_2$  on K release in some K-silicate minerals and evaluation of release of potassium. *Water and Soil*, 27: 732-741. (In Persian)
- Havlin J.L., Westfall D.G., and Olsen S.R. 1985. Mathematical models for potassium release kinetics in calcareous soil. *Soil Science Society of America Journal*, 49:371-376.
- Hosseinpour A.R., and Safari Sinegani A.A. 2007. Soil Potassium-Release Characteristics and the Correlation of its Parameters with Garlic Plant Indices. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38: 107-118.
- Hosseinpour A., and Kalbasi M. 2002. Kinetics of nonexchangeable potassium release from soils and soil separates in some central region soils of Iran. 17<sup>th</sup> WCSS. 14-21 August, Thailand.
- Jackson M.L. 1975. *Soil Chemical Analysis: Advanced Course*; University of Wisconsin, College of Agriculture, Department of Soils: Madison, WI, 187 p.
- Jalali M. 2007. Spatial variability in potassium release among calcareous soils of western Iran. *Geoderma*, 140: 42-51.
- Jalali M. 2006. Kinetics of non-exchangeable potassium release and availability in some calcareous soils of western Iran. *Geoderma*, 135: 63-71.
- Jalali M. 2005. Release kinetics of non-exchangeable potassium in calcareous soils. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 36: 1903-1917.

- Jalali M., and Kolahchi Z. 2006. Release kinetics of nonexchangeable potassium in some soils of Hamedan province, 8<sup>th</sup> Iran Soil Science Congress, Guilan University. (In Persian)
- Kwong K.F.N.G., and Ramasawmi G. 2006. Potassium in Soils Cropped with Sugarcane in Mauritius. *Sugar Technology*, 8 (4): 239-245.
- Mahdavi S.H. 1991. Study of release kinetics of nonexchangeable potassium and its correlation with plant adsorption in dominant soil series of Hamedan Province. MSc. thesis, College of Agriculture, Tehran University. (In Persian)
- Martin H.W., and Sparks D.L. 1983. Kinetics of non-exchangeable potassium release from two coastal plain soils. *Soil Science Society America Journal*, 47: 883-887.
- Mengel K., and Rahmatullah H. 1994. Exploitation of potassium by various crop species from primary minerals in soil rich in mica. *Biology and Fertility of Soils*, 17: 75-79.
- Moritsuka N., Yana D.L., and Kosak T. 2004. Possible processes releasing nonexchangeable potassium from the rhizosphere of maize. *Plant and Soil*, 258: 261-268.
- Najafi Ghiri M. 2010. Morphological and mineralogical characteristics of soil potassium status of the province. PhD thesis. Shiraz University. (In Persian)
- Najafi M., Abtahi A., Karimian A., Owliaie H.R., and Khormali F. 2011. Kinetics of non-exchangeable potassium release as a function of clay mineralogy and soil taxonomy in calcareous soils of southern Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 57(4): 343-363.
- Owliaie H.R. 2005. Clay mineralogy, micromorphology and genesis of the soils of Kohgilouye Province, Southwestern Iran. Ph.D. dissertation. Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University. 235p. (In Persian)
- Owliaie H.R., Heydarmah S., Adhami E., and Najafi Ghiri M. 2014. Kinetics of nonexchangeable potassium release in calcareous soils of Kohgilouye Province. *Journal of Water and Soil Science*, 68(2): 99-109. (In Persian)
- Pratt P.F. 1965. Potassium. In: Black CA, (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 1022-1030.
- Rezaei M., and Movahedi Naeini S.A.R. 2009. Kinetics of potassium desorption from the loess soil, soil mixed with zeolite and the clinoptilolite zeolite as influenced by calcium and ammonium. *Journal of Applied Science*, 9(18): 3335-3342.
- Richards L.A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. U.S. Salinity Laboratory Staff. USDA. Hand book No. 60. Washington, D C, USA. 160 pp.
- Sadri N., Owliaie H.R., Adhami E., and Najafi M. 2016. Relationship between Different potassium forms and soil evolution in some soils of Fars province. *Journal of Water and Soil*, 30(1): 172-185 (In Persian)
- Scott A.D., Hunziker R.R. and Hanway J.J. 1960. Chemical extraction of potassium from soils and micaceous minerals with solutions containing sodium tetra-phenyl boron. I. Preliminary experiments. *Soil Science Society America Proceeding*, 51: 912-917.
- Serrano S., Garrido F., Campbell C.G., and Garcia-Gonzalez M.T. 2005. Competitive sorption of cadmium and lead in acid soils of central Spain. *Geoderma*, 124: 91-104.
- Srinivasarao C., Rupa T.R., Subba-Rao A., Ramesh G., and Bansal S.K. 2006. Release kinetics of nonexchangeable potassium by different extractants from soils of varying mineralogy and depth. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 37(3): 473-491.
- Song S.K., and Huang P.M. 1998. Dynamic of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. *Soil Science Society American Journal*, 52: 383-390.
- Sparks D.L. 2000. Bioavailability of soil potassium, In: Sumner, M.E. (Ed.), *Handbook of soil science*, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 38-52.
- Zarabi M., Jalali M., and Mahdavi-Hajylvy Sh. 2006. Study of non-exchangeable potassium release rate and absorption capability by using acid malic in some soils of Hamadan province. *Journal of Agricultural Sciences of Iran*, 37(6): 951-964. (In Persian)

## Release Kinetics of non-Exchangeable Potassium Using CaCl<sub>2</sub> in Relation to Some Properties of soils of Kohgilouye Province

Shabnam Sadeghi Baniani<sup>1</sup>, HamidReza Owliaie<sup>2\*</sup>, Ebrahim Adhami<sup>2</sup> and Mehdi Najafi Ghiri<sup>3</sup>

(Received: September 2016

Accepted: January 2017)

### Abstract

Degree of soil evolution, type and amount of clay minerals are among the factors affecting potassium release from the soils. The release rate of non-exchangeable K (NEK) plays a significant role in supplying K for plants; particularly in soils that they are rich in K bearing minerals such as mica and feldspar. Kinetics of K<sup>+</sup> release was studied by extraction with 0.01 M CaCl<sub>2</sub> in 14 surface soils of different climatic regions of Kohgilouye Province, southwestern Iran. Mineralogical analyses revealed that smectite, illite, chlorite and palygorskite are major clay minerals of the soils studied. The release rate of NEK at the end of extraction (656h) was in the range of 38.1 (Typic Xerorthents) to 320 mg kg<sup>-1</sup> (Calcic Haploxeralfs). In addition, the release rate of K showed higher correlation with the properties such as clay content, NEK, CEC as well as illite and smectite contents. The amount of K release was in the sequence: Alfisols (222.3 mg kg<sup>-1</sup>) > Inceptisols (111.3 mg kg<sup>-1</sup>) > Entisols (105.0 mg kg<sup>-1</sup>). Power function, first order and parabolic diffusion equations could reasonably describe the K release kinetics. Fit of the data to these equations indicated that K release is controlled mainly by diffusion process.

**Keywords:** CaCl<sub>2</sub>, Clay minerals, K release, Kinetics, Soil evolution

1- MSc. Graduate of Soil Science, College of Agriculture, Yasouj University, Iran.

2- Associate Professor of Soil Science, College of Agriculture Yasouj University, Iran.

3- Associate Professor of Soil Science, College of Agriculture and Natural Res., Shiraz Univ. Darab, Iran.

\* Corresponding Author Email: [Owliaie@yu.ac.ir](mailto:Owliaie@yu.ac.ir)