

## عصاره‌گیری پی در پی پتاسیم غیرتبادلی و رابطه آن با ویژگی‌های خاک، کانی‌شناسی و طبقه‌بندی خاک در برخی خاک‌های آهکی استان فارس

ابوالفضل آزادی<sup>1</sup>، مجید باقرنژاد، نجفعلی کریمیان و سید علی ابطحی

دانشجوی دکتری بخش علوم خاک دانشگاه شیراز؛ Abolfazl\_azadi@yahoo.com

استاد بخش علوم خاک دانشگاه شیراز؛ Majid Baghernejad@yahoo.co.uk

استاد بخش علوم خاک دانشگاه شیراز؛ nkarimian@yahoo.com

استاد بخش علوم خاک دانشگاه شیراز؛ seyedaliabtahi@yahoo.com

دریافت: 94/4/15 و پذیرش: 95/3/9

### چکیده

مطالعه رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی، در جهت مدیریت و استفاده صحیح از منابع خاکی و همچنین در تعیین فراهمی و قدرت تأمین پتاسیم به ویژه در خاک‌های حاوی کانی‌های پتاسیم، از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است. اطلاعات درباره سرعت آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌های آهکی استان فارس محدود است هدف این پژوهش کاربرد معادلات سینتیکی در بررسی سرعت آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در تعدادی از خاک‌های استان فارس به وسیله عصاره‌گیری متوالی با استفاده از اسید اگزالیک یکصدم مولار و بررسی رابطه سرعت آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی با خصوصیات خاک و کانی‌شناسی خاک بود. نتایج این پژوهش نشان داد که آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در ابتدا سریع بوده و سپس کند می‌شود. مقدار پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در پایان آزمایش در دامنه‌ی 91 تا 233 (میانگین 144/3) میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده به روش اگزالیک اسید پس از 1200 ساعت با گنجایش تبادل کاتیونی، پتاسیم غیر تبادلی و درصد کربنات کلسیم معادل هم بستگی معنی‌داری داشت. با توجه به بالا بودن ضرایب تشخیص و کم بودن خطای استاندارد بر آورد، سرعت آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی به وسیله معادلات ایلوویچ، تابع توانی و مرتبه اول تشریح شد. بیشترین آزادسازی پتاسیم در خاک‌های ورتی‌سولز رخ داد که علت اصلی آن احتمالاً وجود مقادیر زیاد تر رس و کانی اسمکتیت و میکا می‌باشد. به‌طور کلی آزادسازی پتاسیم از خاک‌ها براساس تکامل آنها روند ورتی‌سولز < آلفی‌سولز < اینسپتی‌سولز < انتی‌سولز < ایدی‌سولز را نشان داد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که ضرایب سرعت در معادلات مورد استفاده با تعدادی از خصوصیات شیمیایی خاک و درصد اجزای خاک هم بستگی معنی‌داری داشت. نتایج این تحقیق هم‌چنین نشان داد که اگزالیک اسید می‌تواند در بررسی سرعت آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: رهاسازی پتاسیم، اگزالیک اسید، معادله ایلوویچ، ورتی‌سولز

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی علوم خاک

## مقدمه

پتاسیم یکی از عناصر ضروری و پر مصرف برای گیاهان است و اهمیت آن در کشاورزی کاملاً آشکار می‌باشد. چهار شکل مختلف پتاسیم به ترتیب آسانی دسترسی برای گیاهان عبارتند از: پتاسیم محلول، پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیرتبادلی و پتاسیم ساختاری. تعادل موجود بین شکل‌های مختلف پتاسیم در خاک، باعث تداوم تأمین پتاسیم برای گیاه می‌شود. خاک‌های نواحی خشک و نیمه خشک، معمولاً دارای مقادیر زیادی پتاسیم به شکل‌های تبادلی و غیر تبادلی می‌باشند. مطالعه سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی، در جهت مدیریت و استفاده صحیح از منابع خاکی و همچنین در فراهمی و قدرت تأمین پتاسیم به ویژه در خاکهای حاوی کانیهای پتاسیم، از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است. پتاسیم غیرتبادلی که در بین لایه‌های کانی‌های فیلسیلیکاتی نگهداری می‌شود می‌تواند منبع مهم پتاسیم قابل جذب برای گیاهان باشد. فراهمی پتاسیم غیرتبادلی خاک برای گیاه به عوامل مختلفی مانند نوع کانی، میزان پتاسیم در کانی و فراوانی کانی‌های پتاسیم دار و اندازه ذرات آنها، مقدار پتاسیم قابل استفاده خاک و سرعتی که این نوع پتاسیم می‌تواند به شکل‌های قابل جذب تبدیل شود بستگی دارد (جلالی، 2006).

انتظار می‌رود که در بین کانی‌های میکایی فلوگوپیت، مسکویت و بیوتیت کانیهای میکایی با هشت وجهی سه جایی نسبت به کانیهای با هشت وجهی دو جایی سریعتر هواده شده و پتاسیم بین لایه‌ای خود را آزاد کنند. اسمکتیت‌ها به دلیل پیوند بین لایه‌ای ضعیف، به راحتی منبسط شده و پتاسیم غیرتبادلی خود را به راحتی آزاد می‌نمایند (هاولین و همکاران، 1985). آزاد شدن پتاسیم غیرتبادلی 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 پتاسیم تبادلی اندازه گیری می‌شود وقتی تبادل آهسته در بین لایه‌های کانی‌های رسی مانند میکا وجود دارد، یون جانشین پتاسیم باید ابتدا وارد لایه‌های داخلی انبساط نیافته شود، بعد از آن یا به طور هم زمان، این لایه‌های داخلی تحت تأثیر هیدراتاسیون این یون‌ها منبسط خواهد شد و این یون‌ها اجازه می‌یابند که تثبیت یا محبوس شوند و پتاسیم آزاد شده به آهستگی به محل‌های تبادلی در قسمت‌های خارجی ذرات رس انتشار یابند (سانگ و هوانگ، 1988). حسین پور و صفری سنجانی (2007) بیان می‌کنند که در خاک‌های آهکی یون کلسیم معمول‌ترین کاتیون برای تبادل پتاسیم بین لایه‌های میکایی است. سینتیک واژه ای عمومی است که به پدیده‌های غیر تبادلی یا

وابسته به زمان اطلاق می‌شود (اسپارکز، 1999). کاکس و جورن (1997) دریافتند که سرعت آزاد شدن پتاسیم با کاهش اندازه ذرات افزایش یافت که نشان می‌دهد در خاک، ابتدا آزاد شدن سریع پتاسیم از رس ریز و درشت و آزاد شدن کندتر از بخش سیلت وجود دارد. به طور کلی رها سازی زیاد اولیه را می‌توان به آزاد شدن پتاسیم از مناطق لبه‌ای و گوه‌ای شکل کانی‌های پتاسیم دار نسبت داد. با پیش روی رهاسازی، لبه‌های کانی‌های میکایی از هم جدا شده و پتاسیم بین لایه‌ای موجود در ساختمان کانی‌ها آزاد می‌شود. بدلیل افزایش فاصله پتاسیم درونی از لبه‌ها و قدرت جذب پتاسیم، رهاسازی با سرعت و پخشیدگی کمتری صورت می‌گیرد (گول‌دینگ، 1984). تاکنون عصاره‌گیرهای مختلفی جهت بررسی سرعت ورود رهاسازی پتاسیم از خاک‌ها و کانی‌های رسی مورد استفاده قرار گرفته است. از بین فاکتورهای مؤثر در رهاسازی پتاسیم، نقش اسیدهای آلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از بین این اسیدهای آلی، اسیدهای اگزالیک، سیتریک و مالیک معمول‌تر می‌باشند و به مقدار زیادتری نسبت به سایر اسیدها در محلول خاک وجود دارند و روی حرکت و وضعیت پتاسیم در خاک‌ها اثر می‌گذارند (سانگ و هوانگ، 1988).

تو و همکاران (2007)، در آزمایشی با هدف تعیین اثر اسید اگزالیک روی آزاد سازی پتاسیم از خاک‌ها و کانی‌ها از سه خاک متداول در چین شامل مالی سولز 1، اولتی سولز 2 و انتی سولز 3 و چهارکانی پتاسیم دار بیوتیت، فلوگوپیت، موسکویت و میکروکلین نتیجه گرفتند که پتاسیم استخراج شده از خاک با استفاده از اسید اگزالیک 0/2 مولار مشابه استفاده از اسیدنیتریک جوشان یک مولار بوده و ترتیب آزاد شدن پتاسیم از کانی‌ها به صورت: بیوتیت < فلوگوپیت < موسکویت < میکروکلین و برای خاک‌ها به صورت مالی سولز < انتی سولز < اولتی سولز است. لذا هدف این پژوهش کاربرد معادلات سینتیکی در بررسی سرعت آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در تعدادی از خاک‌های استان فارس به وسیله عصاره‌گیری مرحله‌ای با استفاده از اسید اگزالیک و بررسی رابطه سرعت آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی با خصوصیات خاک و کانی شناسی خاک می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

برای بررسی سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی پانزده نمونه خاک سطحی از مناطق مختلف اقلیمی استان فارس جمع‌آوری گردید و جهت اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و وضعیت شکل‌های مختلف پتاسیم به آزمایشگاه منتقل گردیدند. نمونه‌های خاک جمع‌آوری

نمونه‌ها در هوا خشک شدند و در ادامه یک گرم از خاک‌های اشباع شده با کلسیم را با دو تکرار درون لوله سانتریفیوژ ریخته و به هر کدام ده میلی لیتر از عصاره‌گیراسید آگزالیک یک صدم مولار افزوده شد و پس از سی دقیقه تکان دادن نمونه‌ها به انکوباتور با دمای ثابت 27 درجه سلسیوس منتقل شد و پس از گذشت دو ساعت از افزودن عصاره‌گیرها، نمونه‌ها از انکوباتور خارج شده و در 3000 دور در دقیقه به مدت 10 دقیقه سانتریفیوژ شده و عصاره رویی برای اندازه‌گیری میزان پتاسیم رها شده جمع‌آوری گردید. سپس بلافاصله 10 میلی لیتر دیگر از عصاره‌گیرها افزوده و مجدداً به مدت 30 دقیقه تکان داده و سپس به انکوباتور انتقال داده شدند. به طور کلی در فواصل زمانی 2، 6، 12، 24، 48، 72، 120، 168، 168 و 336 ساعت عصاره‌گیری به ترتیبی که ذکر شد، انجام گرفت و غلظت پتاسیم در آنها با استفاده از فلیم فتومتر اندازه‌گیری شد. پنج مدل سینتیکی الوویچ ساده شده، انتشار هذلولی، تابع توانی، مرتبه صفر و مرتبه اول برای برازش داده‌ها، مورد استفاده قرار گرفتند. که این معادلات به شرح زیر می‌باشند.

- (1)  $Elovich\ equation: K = a + b \ln t$
- (2)  $parabolic\ diffusion: K = a + b t^{0.5}$
- (3)  $power\ function: \ln K = \ln a + b \ln t$
- (4)  $zero\ order: (K^0 - K) = a - b t$
- (5)  $first\ order: \ln (K^0 - K) = a - b t$

K مقدار پتاسیم تجمعی آزاد شده (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)، در زمان t (ساعت)،  $K^0$  حداکثر پتاسیم تجمعی آزاد شده (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) و a (عرض از مبدأ) و b (شیب معادلات) ثابت‌های معادلات می‌باشند. یکی از مهم‌ترین بخش‌های این معادله ثابت b بوده که نشان دهنده آهنگ آزادسازی پتاسیم تبادلی می‌باشد. این مدل‌های آماری با آنالیز رگرسیون حداقل مربعات آزموده شد تا بهترین معادله که آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی از خاک را توصیف کند مشخص شود. ضریب تبیین ( $r^2$ ) با رگرسیون حداقل مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده به دست آمد. خطای استاندارد برآورد با معادله زیر تعیین شد:

$$SE = \left[ \frac{\sum (K - K^*)^2}{(n - 2)} \right]^{c.5}$$

شده پس از هوا خشک شدن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و بافت خاک به روش هیدرومتر (جی و بادر، 1986)، اندازه‌گیری کربن آلی به روش سوزاندن تر (نلسون و سومرز، 1996)، پهاش در خمیر اشباع به وسیله دستگاه پهاش‌متر (توماس، 1996)، پتاسیم با دستگاه فلیم فتومتر (هلمکه و اسپارکس، 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از استات سدیم یک نرمال (سومر و میلر، 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع به وسیله دستگاه هدایت سنج الکتریکی (رودز، 1996)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (لوپرت و سوارز، 1996) و جهت انجام مراحل کانی‌شناسی، مرحله خالص‌سازی بخش رس خاک‌ها به روش کیتریک و هوپ (1963) انجام شد و سپس بر روی هر یک از نمونه‌های رس به دست آمده چهار تیمار شامل منیزیم، منیزیم و گلیسرول، پتاسیم در دمای معمولی و پتاسیم در دمای 550 درجه سانتی‌گراد اعمال گردیده و با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس در دانشگاه شیراز انجام گرفت و میزان نیمه کمی کانی‌ها با استفاده از مقایسه سطح زیر هر منحنی در تیمار منیزیم-گلیسرول محاسبه گردید. شکل‌های مختلف پتاسیم شامل محلول، تبادلی، غیرتبادلی و کل به ترتیب در عصاره اشباع، عصاره‌گیری با استات آمونیوم 1 نرمال پهاش 7، عصاره‌گیری با اسید نیتریک جوشان، و هضم با اسید فلوریدریک و تیزاب سلطانی تعیین شد (پرات، 1965).

اندازه‌گیری پتاسیم کل خاک به روش هلمک و اسپارکز (1996) صورت گرفت. و عصاره‌های به دست آمده با روش شعله‌سنجی اندازه‌گیری شد. پتاسیم تبادلی از تفاضل پتاسیم محلول و پتاسیم قابل استخراج با استات آمونیوم، پتاسیم ساختمانی از تفاضل پتاسیم قابل استخراج با اسیدنیتریک و پتاسیم قابل استخراج با اسیدفلوریک، پتاسیم غیرتبادلی از تفاضل پتاسیم قابل استخراج با اسیدنیتریک و پتاسیم قابل استخراج با استات آمونیوم به دست آمدند. جهت بررسی آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی به روش عصاره‌گیری متوالی از عصاره‌گیر آگزالیک اسید 0/01 مولار استفاده شد (جلالی، 2007؛ فرشادی‌راد و همکاران، 2012). ابتدا پتاسیم تبادلی و محلول از خاک‌های مورد مطالعه حذف شدند (مارتین و اسپارکز، 1985). برای انجام این کار نمونه‌های خاک با محلول 1 نرمال کلرید کلسیم به مدت 24 ساعت در تعادل قرار گرفته تا نمونه‌ها کاملاً اشباع از کلسیم گردند. سپس جهت حذف یون کلرید اضافی، نمونه‌ها با الکل و سپس آب مقطر شستشو شدند. برای اطمینان از حذف کامل یون کلرید از آزمون نیترات نقره استفاده شد. سپس

در این معادله K و K\* به ترتیب نشان دهنده مقدار پتاسیم غیرتبادلی اندازه گیری شده و پیش بینی شده و n، تعداد داده های ارزیابی شده می باشد.

### نتایج و بحث

جدول 1 برخی مشخصات عمومی خاک های مطالعه شده در مناطق مختلف اقلیمی استان فارس را نشان می دهد. براساس نتایج این جدول خاک های مورد مطالعه در پنج راسته ای سولز، اینسپتی سولز، اریدیسولز، آلفی سولز و ورتی سولز قرار داشتند. جدول 2 برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد مطالعه را نشان می دهد و همانطور که ملاحظه می شود همه خاک ها دارای واکنش خنثی تا کمی قلیایی هستند. تمام خاک ها آهکی بوده و مقدار کربنات کلسیم معادل در آنها در دامنه 9/9-62/9 درصد می باشد (جدول 2) دامنه ی تغییرات رس، 8/1-48/1 درصد، و دامنه تغییرات درصد سیلت و شن به ترتیب 14/6-55/8 و 2-70/5 درصد می باشد. ظرفیت تبادل کاتیونی خاک های مورد بررسی در دامنه

ی 29-6/5 سانتی مول بار بر کیلوگرم با میانگین 17/1 می باشد، ظرفیت تبادل کاتیونی با مقدار رس همبستگی داشت ( $r=0/588^*$ ). مقدار پتاسیم محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختمانی به طور کامل در جدول 3 آورده شده است. که در خاک های مورد مطالعه پتاسیم محلول کمترین و پتاسیم تبادلی، غیر تبادلی و ساختمانی به ترتیب بیشترین مقدار شکل های پتاسیم را تشکیل می دهند. بیشتر بودن درصد پتاسیم ساختمانی به پتاسیم کل در خاک مناطق خشک و نیمه خشک نشان دهنده کمتر بودن هوادیدگی این خاک هاست به گونه ای که عمده پتاسیم کل در شکل ساختمانی قرار داشته اند (بیشتر بودن مقدار ایلیت موروثی و تکامل پروفیلی کمتر)، در حالی که در خاک های مناطق مرطوب این نسبت کاهش یافته و نشان دهنده سهم بیشتر شکل های تبادلی و غیر تبادلی از پتاسیم کل بوده که ناشی از تبدیل بیشتر ایلیت به اسمکتیت و ورمی کولیت بوده است.

جدول 1- برخی مشخصات عمومی خاک های مطالعه شده در استان فارس

شماره پروفیل	طبقه بندی خاک	رژیم رطوبتی	رژیم حرارتی
1	Calci Ustorthents	یوستیک	هایپرترمیک
2	Aquic Haploustepts	یوستیک	هایپرترمیک
3	Aquic Calciustalfs	یوستیک	هایپرترمیک
4	Aquic Calciustepts	یوستیک	هایپرترمیک
5	Aquic Calciustepts	یوستیک	هایپرترمیک
6	Typic Torriorthents	اریدیک	مزیک
7	Typic Haplogypsis	اریدیک	مزیک
8	Typic Haplocambids	اریدیک	مزیک
9	Typic Calcigypsis	اریدیک	مزیک
10	Typic HaploCambids	اریدیک	مزیک
11	Typic Xerorthents	زریک	مزیک
12	Typic Calcixerepts	زریک	مزیک
13	Calcic Haploxeralfs	زریک	مزیک
14	Typic Calcixerepts	زریک	مزیک
15	Typic Haploxererts	زریک	مزیک

مقادیر نیمه کمی کانی های رسی غالب در خاک های مورد مطالعه در جدول 4 نشان داده شده است. بر این اساس کانی های عمده ی شناسایی شده شامل ایلیت، کلریت، اسمکتیت و پالیگورسکیت می باشند. در برخی نمونه ها مقادیر اندکی از کانی های مخلوط و کانی کوارتز در اندازه رس نیز مشاهده شد. ترتیب فراوانی نسبی کانی های رسی در خاک های مناطق مورد مطالعه به صورت زیر می باشد: ایلیت < کلریت < اسمکتیت < پالیگورسکیت <

کانی های مخلوط. خرمالی و ابطجی، (2003) وجود کانی های کلریت، ایلیت و کائولینیت را در خاک های مناطق خشک گزارش کرده و منشاء ارثی را عامل اصلی وجود آنها در خاک می دانند. کانی پالیگورسکیت به مقدار زیاد در رژیم اریدیک که دارای افق کلسیک و جیپسیک می باشد مشاهده گردید، و در رژیم رطوبتی زریک و یوستیک به مقدار خیلی کم مشاهده شد و با توجه به افزایش رطوبت و کانی اسمکتیت که با کاهش مقدار کانی

دارای سطح آب زیرزمینی کم عمق می‌باشند میزان این کانی به به نسبت بالا است که می‌تواند ناشی از تشکیل خاکزایی این کانی از کلریت و میکا باشد که کاهش مقادیر این کانی‌ها در این اراضی مؤید این موضوع است و یا حاصل نو تشکیلی آن از محلول خاک باشد که با وجود آب زیرزمینی کربناته و غنی از منیزیم و کلسیم در این اراضی نیز دلیلی بر تأیید این ادعا می‌باشد. نوسازی این کانی در خاک‌ها نیازمند شرایط خاص مانند وضعیت زهکشی ضعیف، پهاش بالا، فعالیت بالای یون سیلیسیم در محلول خاک و فراوانی کاتیون‌های بازی می‌باشد (بورچارت، 1989). مقادیر تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده با عصاره‌گیری دنباله‌ای خاک با محلول‌اسید اگزالیک 0/01 مولار برای خاک‌های مورد مطالعه در جدول 3 نشان داده شده است. این مقادیر، مجموع مقادیر پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده طی 11 مرتبه عصاره‌گیری خاک در مدت زمان حدود 1028 ساعت می‌باشد.

پالیکورسکیت همراه می‌باشد می‌تواند به دلیل تبدیل پالیکورسکیت به اسمکتیت در این مناطق باشد. در منطقه با رژیم آریدیک با توجه به وجود کانی پالیکورسکیت در مواد مادری و با توجه به جوان بودن خاک‌ها، پس مقداری از کانی موجود حاکی از ارث رسیدن از مواد مادری می‌باشد، و همچنین فراوانی این کانی در افق‌هایی با آهک و گچ بالا نیز نمایانگر ایجاد شرایط مناسب جهت تشکیل مجدد این کانی می‌باشد. از بررسی نتایج تحزیه نیمه کمی کانی‌های رس نیز کاملاً مشخص است که میزان مونت موریلونیت در خاک‌های جوان و فاقد تکامل پروفیلی ناچیز است و با توجه به وجود این کانی در مواد مادری خاک‌های مورد مطالعه بیانگر به ارث رسیدن این کانی از مواد مادری می‌باشد.

همچنین ملاحظه می‌گردد که با افزایش تکامل پروفیلی میزان این کانی افزایش می‌یابد که این نشان دهنده تشکیل خاکزایی این کانی می‌باشد از طرفی در اراضی که دارای شرایط زهکشی نامناسب می‌باشند و یا

جدول 2- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

شماره نمونه	شن	سیلت	رس	کلاس بافت	پهاش	ماده آلی	کربنات کلسیم معادل (%)	گچ	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol <sup>(c)</sup> /kg)	شوری (dS/m)
1	19	43	38	silty clay loam	7/9	1/4	47/1	0/5	14/9	0/77
2	2	56	42	silty clay	7/4	2/8	55/2	0/6	19/2	2/17
3	11	45	44	silty clay	7/9	1/7	57/0	0/5	19/2	0/93
4	15	45	40	silty clay	7/0	0/7	59/4	1/1	19/2	1/40
5	9	43	48	silty clay	7/7	0/8	56/7	0/6	19/2	1/01
6	63	21	16	sandy loam	8/1	0/3	62/9	1/3	7/7	0/69
7	52	26	22	sandy clay loam	8/0	0/3	50/8	1/1	11/3	6/12
8	47	38	15	loam	8/2	0/8	54/7	1/1	8/8	0/43
9	71	21	8	sandy loam	8/1	0/2	60/9	0/7	6/5	0/43
10	65	17	18	sandy loam	8/1	0/7	58/2	1/2	11/3	0/75
11	57	15	28	sandy clay loam	8/0	0/4	9/9	0/9	20/5	0/26
12	59	22	19	sandy loam	7/9	0/6	31/2	0/9	20/5	0/48
13	23	48	29	clay loam	8/0	1/6	15/4	1/1	24/9	0/5
14	27	29	44	clay	7/4	5/2	58/2	1/3	24/9	3/91
15	20	54	26	silt loam	7/3	3/9	39/6	1/1	29/4	3/60

هیدروژن جدا شده و تشکیل کمپلکس لیگاندهای آلی در محلول اسیدی آلی نسبت داده می‌شود. اسمکتیت به علت مقدار نسبتاً کم بار لایه‌ای دارای خاصیت انبساط پذیری نسبتاً بالایی می‌باشد و معمولاً توانایی تثبیت پتاسیم را ندارد (اسپارکس، 1987). رابطه بین مقدار پتاسیم آزاد شده به وسیله عصاره‌گیر در زمان‌های مختلف

به طور میانگین مقدار پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده برای اسید اگزالیک 0/01 مولار در خاک‌های مورد مطالعه 144/3 میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. اسیدهای آلی در آزاد کردن پتاسیم در کانی‌ها بسیار مؤثر عمل می‌کنند، بیشترین تأثیر اسیدهای آلی در آزادسازی پتاسیم و سایر کاتیون‌های ساختمانی، به یون‌های

در برخی خاک‌های مورد مطالعه در شکل 1 ارائه شده است. به طور کلی مقدار تجمعی پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده بوسیله اگزالیک اسید در خاک‌های مورد بررسی در مراحل اولیه عصاره‌گیری با شیب و سرعت بیشتر افزایش یافته و با گذشت زمان با آهنگ کندتری دنبال شده است و در نهایت این شیب به مقدار ثابتی رسیده که در خاک‌های مختلف متفاوت است. به عبارتی منحنی تجمعی پتاسیم آزاد شده در خاک‌ها شامل دو بخش می‌گردد، بخش اول که حالت منحنی دارد و مربوط به رهاسازی پتاسیم لبه‌ای بوده و بخش دوم که خطی است مربوط به رهاسازی پتاسیم از مکان‌های بین لایه‌ای می‌باشد.

رهاسازی با سرعت بالا در مراحل اولیه را می‌توان به رهاسازی با سرعت بالا در مراحل اولیه را می‌توان به رهاسازی پتاسیم از مناطق لبه‌ای و گوه‌ای شکل کانی‌ها نسبت داد و در مرحله دوم با پیشرفت رهاسازی و بالا رفتن انرژی جذب پتاسیم در بین لایه‌ها و از طرفی افزایش فاصله پتاسیم از لبه‌های کانی و افزایش فاصله پتاسیم از لبه‌های کانی و افزایش فاصله پخشیدگی، سرعت رهاسازی کاهش می‌یابد (سرنیواساراتو و همکاران 1999). به دلیل عدم وجود همبستگی بین میزان رس با پتاسیم عصاره‌گیری شده با اگزالیک اسید می‌توان اظهار داشت که علاوه بر میزان رس خاک‌ها احتمالاً نوع کانی‌ها و مرحله هوادیدگی کانی‌ها نیز در رهاسازی پتاسیم از خاک‌ها مؤثر می‌باشد. (ضرابی و همکاران،

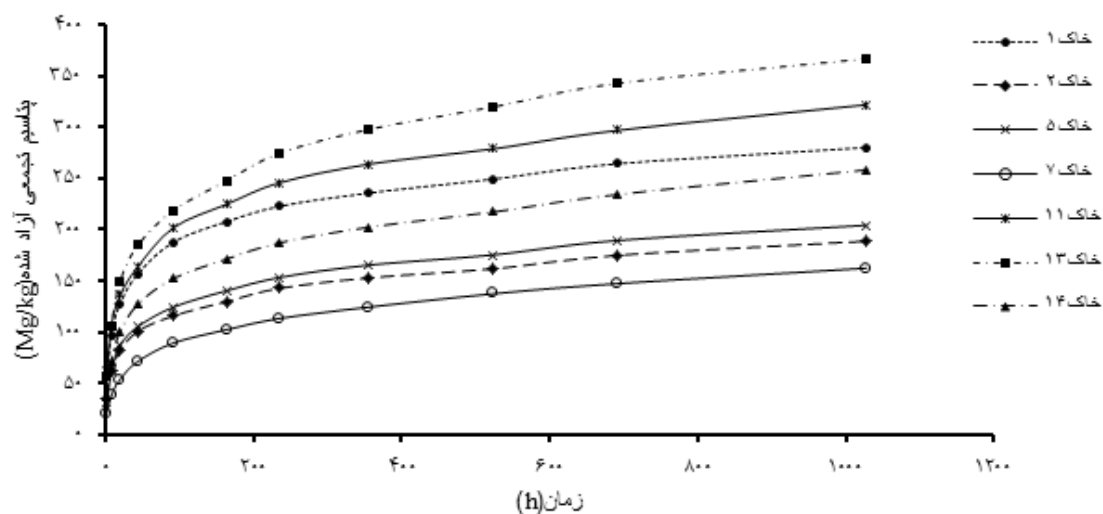
1385). با مطالعه اثر مالیک اسید بر سرعت آزاد سازی پتاسیم غیر تبادلی در ده سری از خاک‌های زراعی استان همدان، نشان دادند که رها سازی در مراحل اولیه در تمام خاک‌ها سریع است و در مراحل بعدی با سرعت کمتری تا انتهای آزمایش ادامه دارد و عواملی مانند اندازه ذرات کانی‌های حاوی پتاسیم و شرایط محیطی خاک بر روی رها سازی پتاسیم تأثیر می‌گذارد. عوامل زیادی بر آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی تأثیر دارند. خصوصیات کانی‌های حاوی پتاسیم که نقش مهمی در آزاد کردن پتاسیم غیر تبادلی دارند شامل: ساختمان بلور و ترکیب شیمیایی کانی، درجه تخلیه کانی از پتاسیم و تغییر بار لایه‌ای در کانی‌هاست (اسپارکس، 1987). به دلیل تفاوت درصد رس و سیلت و همچنین تفاوت نوع و مقدار کانی‌های رسی در بخش رس و سیلت خاک‌های بررسی شده، مقدار پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در خاک متفاوت می‌باشد. سرنیواساراتو و همکاران (2000) گزارش کردند که اگر میکا در بخش سیلت و رس خاک زیاد باشد، میزان پتاسیم رها شده نیز بیشتر خواهد بود. خاک‌های مختلف رهاسازی متفاوتی در عصاره‌گیری پی در پی توسط عصاره‌گیرها از خود نشان دادند. رهاسازی پتاسیم در تمام خاک‌ها در مراحل اولیه سریع بود و در مراحل بعدی با سرعت کمتری تا پایان آزمایش ادامه یافت. بیشترین رهاسازی پتاسیم در خاک شماره 13 و کمترین مقدار را در خاک شماره 10 می‌توان مشاهده نمود.

جدول 3- وضعیت شکل‌های پتاسیم در خاک‌های مورد مطالعه

شماره نمونه	شکل‌های مختلف پتاسیم (mg kg <sup>-1</sup> )					درصد اشباع پتاسیم	شکل‌های مختلف پتاسیم (%)					تجمعی آزاد شده
	محلول	تبادلی	غیرتبادلی	ساختمانی	کل		محلول	تبادلی	غیرتبادلی	ساختمانی	درصد حلالیت	
1	1/60	224/94	246/81	6288/03	6761/39	2/32	0/024	3/3	3/7	93/0	0/7	131
2	11/61	284/24	480/94	5737/38	6514/18	3/81	0/178	4/4	7/4	88/1	3/9	143
3	5/28	255/45	452/38	5437/27	6150/38	3/42	0/086	4/2	7/4	88/4	2/0	137
4	3/41	389/36	566/87	5311/07	6270/71	5/21	0/054	6/2	9/0	84/7	0/9	190
5	0/87	225/99	566/08	4769/84	5562/78	3/03	0/016	4/1	10/2	85/7	0/4	123
6	1/72	175/31	536/09	4508/35	5221/46	6/63	0/072	4/0	10/3	85/6	1/8	105
7	10/67	303/09	732/74	6414/02	7460/52	6/89	0/143	4/1	9/8	86/0	3/4	124
8	4/62	327/29	679/57	6000/86	7012/34	9/50	0/066	4/7	9/7	85/6	1/4	142
9	3/57	197/95	511/59	4230/35	4943/46	6/93	0/033	3/4	10/3	86/3	1/0	97
10	2/09	174/93	551/87	4949/54	5678/43	3/98	0/037	3/1	9/7	87/2	1/2	91
11	3/37	564/18	1431/53	13109/92	15109/35	4/92	0/025	3/7	9/5	86/8	0/7	185
12	3/06	423/08	876/02	11559/65	12861/81	5/28	0/024	3/3	6/8	89/9	0/7	180
13	9/45	792/61	1446/14	12861/16	15109/35	8/17	0/063	5/2	9/6	85/1	1/2	233
14	3/52	141/66	415/28	3792/00	4352/45	1/46	0/081	3/3	9/5	87/1	2/4	95
15	37/11	605/98	973/72	7537/98	9154/79	7/56	0/405	6/6	10/6	82/3	5/8	209

جدول 4- مقدار و نوع کانی‌های تشکیل دهنده خاک‌های مورد مطالعه

شماره پروفیل	ایلیت	کلریت	اسمکتیت	پالیکورسکیت	کوارتز	مخلوط	ورمی کولیت	کائولینیت
1	+++	++++	+++	-	++	+	-	-
2	++	++	++++	++	+	++	-	-
3	++++	++	++++	-	++	-	-	-
4	+++	+++	++++	-	+	-	-	+
5	++	++	+++	+++	+	-	-	-
6	++++	++	-	++	++	-	-	-
7	++++	+++	++	-	++	-	-	-
8	++++	++++	-	++	+	-	-	-
9	+++	+++	-	++++	+	-	-	-
10	++++	++++	-	++	++	-	-	-
11	+++	+++	++	+++	++	-	-	-
12	++++	++++	++	-	++	++	-	-
13	++++	++	++++	+++	++	+++	+	-
14	++	++	++++	+++	++	+++	-	-
15	++	+++	++++	-	++	-	+	-



شکل 1- مقادیر جمعیتی پتاسیم آزاد شده نسبت به زمان با عصاره‌گیر اگزالیک اسید 0/01 مولار

بوده و درصد کربنات کلسیم آن نیز پایین می‌باشد هم چنین کانی غالب آن میکا و اسمکتیت می‌باشد و کمترین مقدار نیز که مربوط به خاک راسته اربیدی سولز می‌باشد که دارای مقدار پتاسیم غیرتبادلی پایینی بوده و ظرفیت

که رهاسازی بیشتر در خاک شماره 13 که راسته آلفی سولز نیز می‌باشد احتمالاً به این دلیل است که این خاک دارای حداکثر مقدار پتاسیم غیرتبادلی بوده و ظرفیت تبادلی کاتیونی آن نسبت به اغلب خاک‌ها بیشتر

تبادل کاتیونی آن پایین است و دارای درصد زیادی کربنات کلسیم بوده و هم چنین دارای کانی کلریت بالایی می‌باشد که دارای بین لایه بروسیت حاوی منیزیم می‌باشد. دیلون و دیلون (1992)، سیستیک آزادسازی پتاسیم را در راسته‌های مختلف خاک‌های هند مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که خاک‌های آلفی سولز و اینسپتی سولز به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار پتاسیم را بر اثر تیمار با رزین اشباع با یون هیدروژن آزاد می‌کنند در خاک‌های مورد مطالعه بطور میانگین راسته ورتی سولز بیشترین آزادسازی و راسته اریدی سولز کمترین آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی را داشت. دیلون و دیلون (1991)، بیان کردند که میزان واجذب پتاسیم از خاک بستگی به نوع و مقدار کانی‌های رسی در خاک دارد، به طوری که خاک‌های ورتی سولز دارای کانی غالب اسمکتیت حداکثر مقدار و خاک‌های انتی سولز و اینسپتی سولز حاوی رس ایلیت حداقل مقدار پتاسیم را واجذب می‌کنند. اما از نظر قدرت بافر کردن غلظت پتاسیم در محلول خاک ترتیب کانی‌های رسی به صورت ایلیت < اسمکتیت < کائولینیت می‌باشد.

#### انتخاب بهترین مدل

ضریب تبیین ( $R^2$ ) و خطای معیار برآورد (SE) مدل‌های آماری استفاده شده جهت بررسی سیستیک آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در جدول 5 نشان داده شده است. مقادیر ضریب تبیین برای اسید اگزالیک 0/01 مولار در معادلات مرتبه صفر از 0/683-0/820 (میانگین 0/748)، در معادلات مرتبه اول از 0/870-0/957 (میانگین 0/924)، در معادلات ایلوویچ از 0/969-0/997 (میانگین 0/985)، در معادلات پخشیدگی پارابولیک از 0/881-0/951 (میانگین 0/922) و در معادلات تابع توانی از 0/915-0/990 (میانگین 0/974) متغیر می‌باشد. در این موارد برای انتخاب بهترین معادله، با مقایسه ضریب تبیین و خطای معیار تخمین محاسبه شده برای هر معادله، معادله‌ای که بیشترین ضریب تبیین و کمترین خطای معیار تخمین را داشت به عنوان بهترین معادله در توجیه رهاسازی پتاسیم از خاک شناخته شد. نتایج نشان داد که در روش عصاره‌گیری با اگزالیک اسید، معادلات الوویچ، توانی و مرتبه اول دارای ضریب تبیین بیشتر و خطای معیار تخمین کمتری بوده و در نتیجه به طور رضایت بخشی روند رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی را توجیه کردند. به طور کلی نتایج مطالعات روی سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌های مورد مطالعه با استفاده اسید اگزالیک نشان داد که معادلات الوویچ، توانی و مرتبه اول به بهترین نحو رهاسازی پتاسیم را توجیه می‌نمایند. جلالی (2007) در بررسی رهاسازی پتاسیم با استفاده از محلول کلرید

کلسیم در خاک‌های آهکی جنوب ایران نتیجه‌گیری کرد که سیستیک آزادسازی پتاسیم از خاک‌ها دو مرحله‌ای بوده و به طور قابل قبولی توسط مدل‌های الوویچ، تابع توانی، پخشیدگی پارابولیک و مرتبه‌ی اول توصیف می‌شود. هاولین و همکاران (1985)، در بررسی مدل‌های ریاضی بر روی سیستیک آزادسازی پتاسیم در خاک‌های آهکی نتیجه گرفتند که سه معادله‌ی الوویچ، تابع توان و پخشیدگی پارابولیک به نحو قابل قبولی بر داده‌ها تطبیق نمودند که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارند. رحمت الله و منگل (2000) بیان کردند که توجیه شدن رهاسازی تجمعی پتاسیم به غیر از معادله مرتبه صفر، بیانگر این است که با گذشت زمان، سرعت رهاسازی کاهش می‌یابد. نتایج مطالعات روی سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در برخی از خاک‌های استان همدان با استفاده از اسید سیتریک و کلرید کلسیم نشان داد که معادلات توانی، مرتبه اول، پخشیدگی و الوویچ به بهترین نحوه رهاسازی پتاسیم را توجیه می‌کند. (ضرابی و همکاران، 1385). اگر سرعت واکنش به غلظت مواد واکنش دهنده بستگی نداشته باشد مرتبه واکنش صفر خواهد بود. در خاک‌هایی که سرعت آزاد شدن پتاسیم غیرتبادلی از معادله مرتبه اول و پخشیدگی پیروی می‌کند، آزاد شدن پتاسیم غیرتبادلی از فرآیند پخشیدگی پیروی می‌نماید سربینواسارائو و همکاران، 2000 و جلالی و کلاهچی، 2004)، شیب معادله الوویچ بیانگر سرعت رهاسازی پتاسیم بین لایه ای و عرض از مبدأ آن نشان دهنده سرعت اولیه و فوری رهاسازی پتاسیم می‌باشد (منگل و همکاران، 1998)، معادله توانی نیز یکی از معادلات نشان دهنده فرآیندهای کنترل شونده با پخشیدگی است (هاولین و همکاران، 1985).

#### ثابت سرعت آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی

همچنین مقادیر شیب (b) و عرض از مبدأ (a) مدل‌های آماری استفاده شده جهت بررسی سیستیک آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در جدول 6 نشان داده شده است. ثابت b (مقادیر شیب معادلات) که شاخصی از آهنگ آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی می‌باشد در معادلات ایلوویچ و توانی که همبستگی بیشتری را با سیستیک آزادسازی پتاسیم نشان می‌دهند حایز اهمیت است. میانگین مقادیر ثابت b در معادلات ایلوویچ برای خاک‌های مورد مطالعه با عصاره‌گیر اگزالیک اسید 30/326 و در معادله توانی 0/276 میلی‌گرم بر کیلوگرم در ساعت می‌باشد. و همچنین ثابت a نشان دهنده آهنگ اولیه آزاد سازی پتاسیم بوده و می‌تواند به عنوان مقدار پتاسیم اولیه قابل استفاده برای گیاه در نظر گرفته شود



همکاران (1995) با استفاده از محلول کلرید کلسیم یک صدم مولار، رهاسازی پتاسیم را در خاک‌های با رس منبسط شونده مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده نمودند که روند رهاسازی از معادلات مرتبه اول تبعیت کرد. آنها همچنین نتیجه‌گیری کردند که به دلیل شباهت کانی شناسی، ثابت رهاسازی در تمامی خاک‌های مورد مطالعه تفاوت زیادی با یکدیگر نداشتند. البته ارتباط مثبت و معنی‌داری بین پتاسیم غیرتبادلی و پتاسیم آزاد شده در خاک‌های مورد مطالعه وجود داشت. چون سرعت آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی از معادلات مرتبه اول، الویوچ، و تابع توانی پیروی می‌کند، فرایند آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی از خاک‌ها می‌تواند متأثر از پدیده پخشیدگی باشد، به عبارت دیگر پخشیدگی پتاسیم به خارج توده کانی یا نواحی هوادیده، کنترل کننده سرعت آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در این خاک‌ها می‌باشد. نتایج تجزیه‌های آماری مطالعه‌ی حاضر نشان داد که پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از 1028 ساعت همبستگی معنی داری با درصد سیلت و رس ندارد.

(جلالی، 2007). مقدار پارامتر  $a$  (عرض از مبدا معادله) در معادلات ایلووچ برای خاک‌های مورد مطالعه با عصاره‌گیر اگزالیک اسید 6/462 و در معادله توانی برای عصاره‌گیر در خاک‌های مورد مطالعه 37/231 میلی گرم بر کیلوگرم می‌باشد. در بین معادلاتی که آزادسازی پتاسیم را توجیه می‌کنند معادله مرتبه اول دارای کمترین آهنگ اولیه آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی (a) بوده و می‌توان چنین توجیه کرد که مقدار پتاسیم اولیه قابل استفاده کمتری را نسبت به بقیه معادلات برای گیاه تأمین می‌کند و تابع توانی بیشترین مقدار آهنگ اولیه آزادسازی (a) را دارا بوده که می‌تواند نشان دهنده فراهم کردن پتاسیم قابل استفاده بیشتر برای گیاه در مراحل اولیه آزادسازی باشد. و در مقایسه میانگین آهنگ آزادسازی پتاسیم (شیب معادلات)، با عصاره‌گیر اگزالیک اسید معادله ایلووچ و مرتبه اول به ترتیب بیشترین و کمترین آهنگ آزادسازی پتاسیم را دارند و می‌توان پیش‌بینی کرد که معادله ایلووچ بیشترین آهنگ آزادسازی (b) و معادله مرتبه اول دارای کمترین آهنگ آزادسازی (b) نسبت به معادلاتی است که آزادسازی پتاسیم را بهتر توجیه می‌کنند. سرینوآسارائو و

جدول 5- ضریب تبیین ( $R^2$ ) و خطای معیار برآورد (SE) مدل‌های استفاده شده

شماره نمونه	مرتبه صفر		مرتبه اول		ایلووچ		پخشیدگی پارابولیک		تابع توانی	
	SE	$R^2$	SE	$R^2$	SE	$R^2$	SE	$R^2$	SE	$R^2$
1	30/056	0/728	0/401	0/931	5/035	0/992	17/349	0/909	0/111	0/965
2	29/607	0/709	0/425	0/920	3/918	0/995	17/801	0/895	0/076	0/975
3	25/810	0/778	0/540	0/870	8/204	0/978	14/459	0/933	0/065	0/982
4	42/964	0/683	0/400	0/938	3/860	0/997	26/290	0/881	0/090	0/969
5	26/358	0/735	0/380	0/934	5/060	0/990	14/960	0/915	0/080	0/977
6	25/414	0/750	0/373	0/938	7/334	0/979	13/573	0/929	0/072	0/987
7	27/435	0/775	0/470	0/905	8/410	0/979	14/448	0/938	0/087	0/980
8	32/304	0/745	0/400	0/935	7/486	0/986	17/547	0/925	0/078	0/982
9	22/900	0/780	0/390	0/931	7/740	0/975	11/440	0/945	0/080	0/986
10	21/089	0/820	0/308	0/957	7/996	0/969	10/118	0/951	0/064	0/990
11	43/430	0/752	0/439	0/930	10/859	0/985	23/246	0/929	0/093	0/979
12	37/000	0/748	0/500	0/901	8/153	0/988	20/591	0/922	0/107	0/970
13	54/653	0/734	0/468	0/925	10/801	0/990	30/544	0/916	0/101	0/972
14	21/170	0/757	0/370	0/933	5/610	0/983	11/240	0/932	0/080	0/983
15	45/564	0/731	0/486	0/913	9/157	0/989	25/544	0/915	0/068	0/915
جداقل	21/089	0/683	0/308	0/870	3/860	0/969	10/118	0/881	0/064	0/915
حداکثر	54/653	0/820	0/540	0/957	10/859	0/997	30/544	0/951	0/111	0/990
میانگین	32/743	0/749	0/425	0/924	7/477	0/985	18/087	0/923	0/084	0/974

جدول 6- شیب و عرض از مبدا مدل‌های استفاده شده

تابع توانی		پخشیدگی پارابولیک		ایلوویج		مرتبه اول		مرتبه صفر		شماره نمونه
b (mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	a (mg kg <sup>-1</sup> )	b (mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1/2</sup> )	a (mgkg <sup>-1</sup> )	b (mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	a (mg kg <sup>-1</sup> )	b*10 (mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	a (mg kg <sup>-1</sup> )	b (mg kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	a (mgkg <sup>-1</sup> )	
0/279	33/036	5/129	59/487	27/377	5/856	0/0042	5/008	0/140	114/200	1
0/228	46/442	4/847	75/241	26/112	23/453	0/0041	4/937	0/131	107/980	2
0/232	43/515	4/952	69/949	25/894	18/633	0/0040	5/082	0/138	119/610	3
0/246	56/328	6/695	96/541	36/391	23/549	0/0044	5/222	0/179	142/750	4
0/253	35/054	4/578	58/799	24/335	11/390	0/0041	4/886	0/125	102/320	5
0/302	22/961	4/577	40/906	24/010	5/034	0/0041	4/885	0/125	102/320	6
0/290	28/936	5/235	50/602	27/327	1/325	0/0041	5/100	0/145	122/090	7
0/278	35/396	5/749	61/446	30/333	2/947	0/0043	5/125	0/157	127/590	8
0/319	19/420	4/427	34/895	22/974	-8/393	0/0041	4/893	0/123	101/610	9
0/311	19/074	4/167	32/982	21/491	-7/164	0/0041	4/810	0/153	99/744	10
0/305	40/752	7/849	75/199	41/285	-4/080	0/0046	5/473	0/215	174/220	11
0/291	37/424	6/610	68/093	34/956	0/466	0/0043	5/320	0/181	150/910	12
0/286	56/053	9/483	101/220	50/332	3/367	0/0047	5/660	0/258	207/870	13
0/278	23/665	3/879	40/626	20/353	1/667	0/0040	4/724	0/106	87/928	14
0/251	60/407	7/856	100/060	41/721	18/883	0/0045	5/461	0/213	173/890	15
0/228	19/074	3/879	32/982	20/353	-8/393	0/004	4/724	0/106	87/928	حداقل
0/319	60/407	9/483	101/220	50/332	23/549	0/005	5/660	0/258	207/870	حداکثر
0/278	37/225	5/628	64/557	30/730	5/835	0/004	5/122	0/161	130/803	میانگین

جدول 7- همبستگی بین ضرایب معادلات با خصوصیات خاک

مرتبه اول	تابع توان		ایلوویج		خصوصیات خاک	
	b	a	b	a		
0/847**	0/881**	0/188	0/500	0/862**	0/159	پتاسیم کل
0/398	0/447	-0/375	0/621*	0/461	0/693**	پتاسیم محلول
0/942**	0/933**	0/054	0/543*	0/706**	0/534**	پتاسیم تبدلی
0/874**	0/857**	0/235	0/458	0/863**	0/205	پتاسیم غیر تبدلی
0/819**	0/862**	0/197	0/473	0/837**	0/125	پتاسیم ساختمانی
0/456	0/505	0/503	0/706**	0/556**	0/612**	ظرفیت تبادلی کاتیونی
0/821**	-0/843**	0/214	-0/450	-0/826**	-0/109	کربنات کلسیم معادل
0/178	0/230	-0/850**	0/741**	0/291	0/793**	سیلت
0/154	-0/103	-0/756**	0/376	0/054	0/396	رس
-0/022	-0/079	0/906**	-0/638**	-0/142	-0/680**	شن

### نتیجه گیری

خاک‌های مختلف رفتارهای متفاوتی در عصاره-گیری پی‌درپی توسط عصاره‌گیر نشان دادند نوع کانی‌های خاک در روند رهاسازی مؤثر بود. آزادسازی پتاسیم غیرتبدلی از خاک‌های مورد مطالعه در مراحل اولیه سریع و پس از آن روند کندتری را دنبال کرد. مقادیر پتاسیم آزادشده در دامنه 233-91 میلی‌گرم در کیلوگرم بود نتایج نشان داد که سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبدلی، همبستگی معنی‌داری با درصد رس و سیلت ندارد و این نتیجه می‌تواند نشان دهنده ماهیت متفاوت و خصوصیات مختلف منابع و سطوح مختلف رهاسازی پتاسیم باشد. آزادسازی پتاسیم از خاک‌های مورد مطالعه توسط مدل‌های الوویج، تابع توان و مرتبه اول به خوبی توصیف شد. بنابر این می‌توان نتیجه گرفت که فرایند آزاد شدن پتاسیم غیرتبدلی توسط فرایند پخشیدگی غیر بکنواخت کنترل می‌گردد. به طوریکه سرعت آزادسازی پتاسیم در مراحل اولیه سریع است و پس از آن به تدریج کاهش می‌یابد. خاک‌های مورد مطالعه متعلق به پنج راسته- Vertisols, Alfisols, Inceptisols, Aridisols و Entisols بودند. با این حال، اگر چه تمام خاک‌های مورد مطالعه از لحاظ نوع کانی شناسی رسی تقریباً مشابه بودن اما فراوانی کانی‌های رسی در خاک متفاوت بود. به طوریکه سرعت آزادسازی پتاسیم از راسته‌های خاک روند: ورتی سولز < آلفی سولز < اینسپتی سولز < انتی سولز < اریدی سولز را نشان داد. رهاسازی بیشتر در خاک‌های ورتی سولز را می‌توان به درصد بالای سیلت، ماده آلی و حضور غالب کانی انبساط پذیر اسمکتیت در این سری که امکان تبادل بیشتر یون کلسیم را با پتاسیم فراهم می‌کند نسبت داد و رهاسازی پایین در خاک‌های راسته اریدی سولز را

که این نتیجه می‌تواند نشان دهنده ماهیت متفاوت و خصوصیات مختلف منابع و سطوح مختلف رهاسازی پتاسیم باشد که این نتیجه با نتایج مطالعه‌ی حسین پور و کاووسی (1383) در بررسی سرعت آزاد شدن پتاسیم غیرتبدلی در تعدادی از خاک‌های گیلان و اولیایی و همکاران (1393) در سیتیک آزادسازی پتاسیم غیرتبدلی در ارتباط با کانی شناسی رس برخی از خاک‌های آهکی استان کهگیلویه مطابقت دارد. آزادسازی پتاسیم از خاک‌ها با عصاره‌گیر اسید اگزالیک با کربنات کلسیم (به دلیل اثر رقت) همبستگی منفی و معنی‌دار ( $r = -0/725**$ ) و با پتاسیم غیرتبدلی و ظرفیت تبادل کاتیونی همبستگی مثبت و معنی‌دار ( $r = 0/645**$ ,  $0/744**$ ) نشان داد. مقدار آزادسازی پتاسیم غیرتبدلی نشان می‌دهد که تعیین مقدار پتاسیم تبدلی به تنهایی نمی‌تواند معیاری از کفایت یا عدم کفایت پتاسیم خاک این منطقه برای تأمین نیاز گیاه باشد. بلکه در این ارتباط باید مقدار پتاسیم غیرتبدلی که در طول دوره رشد گیاه می‌تواند آزاد گردد، نیز در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر در توصیه‌ی کودهای پتاسیمی باید توان خاک در آزاد کردن پتاسیم غیرتبدلی در نظر گرفته شود. نتایج این پژوهش نشان داد که بین ضریب سرعت آزادسازی پتاسیم در معادله‌ی ایلوویج با عصاره‌گیر اسید اگزالیک با درصد کربنات کلسیم، ظرفیت تبادل کاتیونی، پتاسیم تبدلی، غیرتبدلی، ساختمانی و کل همبستگی معنی‌داری وجود دارد جدول (7). و بین ضریب سرعت رهاسازی معادله تابع توان و خصوصیات خاک در عصاره‌گیر اسید اگزالیک همبستگی معنی‌داری بین درصد سیلت، رس و شن با با ضریب رهاسازی وجود داشت ولی با شکل‌های مختلف پتاسیم همبستگی معنی‌داری وجود نداشت.

پتاسیم در میکاها بستگی به نوع و ساختمان آن دارد. هم چنین میزان کربنات کلسیم، پتاسیم غیرتبادلی و ظرفیت تبادل کاتیونی در آزادسازی پتاسیم از خاک مؤثر است. ثابت سرعت نیز در نمونه‌ها متفاوت است که این اختلاف به تفاوت در پراکنش اندازه ذرات، میزان رس و نوع کانی خاک مربوط می‌شود.

می‌توان به دلیل غالب بودن ایلیت دی اکتا هدرال دانست. نتایج این مطالعه نشان داد که سرعت آزادسازی پتاسیم از خاک‌ها توسط کلرید کلسیم به مقدار زیاد بستگی به کانی‌شناسی رس‌ها دارد و میزان آزادسازی پتاسیم از خاک‌های دارای کانی غالب میکا و اسمکتیت، بیشتر از سایر خاک‌ها می‌باشد. این نکته را باید در نظر داشت که تبادل

#### فهرست منابع:

1. Borchardt, G. 1989. Smectites. P 75-718, In: Dixon, J.B. and Weed, S.B. (eds.), Minerals in Soil Environments, Second edition. SSSA Book Ser., Vol. 1. SSSA, Madison, WI.
2. Cox, A. E., and B.C. Joern. 1997. Release kinetics of non-exchangeable potassium in soils using sodium tetraphenylboron. J. Soil Sci. 162: 588-598.
3. Dhillon, S.K., and K.S. Dhillon. 1991. Kinetics of release of nonexchangeable potassium by cation saturated resins from red (Alfisols), Black (Vertisols) and Alluvial (Inceptisols) soils of India. Geoderma, 47: 283-300.
4. Dhillon, S.K., and K.S. Dhillon. 1992. Kinetics of release of potassium by sodium tetraphenylboron from some top soil samples red (Alfisol), black (Vertisol), and alluvial (Inceptisols and Entisol) soils of Indian. Fertil. Res. 32: 135-138.
5. Farshadirad, A., E. Dordipour, F. Khormali. 2012. Kinetics of Non-Exchangeable Potassium Release from Soil and its Components in Some Soils of Golestan Province. JWSS - Isfahan University of Technology. 16 (59): 273-285
6. Gee, G. W., and J. W. Bauder. 1986. Particle of size analysis, hydrometer method. p. 404-408. In A. Klute et al. (ed.) Methods of Soil Analysis, Part I, Am. Soc. Agron., Madison, WI.
7. 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. J. Agric. Sci. Camb. 103: 256-27.
8. Havlin, J. L., D. J. Westfal., and S. R. Olsen. 1985. Mathematical models for potassium release kinetics in calcareous soils. Soil Sci. Soc. Amer. J. 49: 371-376.
9. Helmke, P. A., and D. L. Sparks. 1996. Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. p. 551-574. In D. L. Sparks et al. (ed.) Method of Soil Analysis. Part III. 3rd Ed. Am. Soc. Agron., Madison, WI.
10. Hosseinpour, A. R., and M. Kavusi. 2004. Kinetics of Release Rate of Nonexchangeable K along with Plant Responses in Some Soils of Gilan Province. Iranian, J. Agric. Sci. 35(2):347-355.
11. Hosseinpour, A. R. and, A. A. Safari Sinigani. 2007. Soil Potassium-Release Characteristics and the Correlation of its Parameters with Garlic Plant Indices. Communications in Soli Sci., and Plant Anal. 38: 107-118.
12. Jackson, M. L. 1975. Soil Chemical Analysis—advanced course. Univ. of Wisconsin, College of Agric., Dept. of Soil Sci., Madison, WI.
13. Jalali, M., and Z. Kolahchi. 2004. Kinetics of non-exchangeable potassium release in selected soils of Hamadan Province. 8th Iran Soil Conference. Gilan University.
14. Jalali, M. 2006. Kinetics of non-exchangeable potassium release and availability in some calcareous soils of western Iran. Geoderma 135: 63 – 71.
15. Jalali, M. 2007. Spatial variability in potassium release among calcareous soils of western Iran. Geoderma. 140: 42-51.
16. Khormali, F., and A. Abtahi. 2003. Origin and distribution of clay minerals in calcareous arid and semiarid soils of Fars Province, Southern Iran. Clay Miner, 38: 511-527.

17. Kittrick, J. A., and Hope, E. W. 1963. A procedure for the particle size separation of soil for X-ray diffraction analysis. *Soil Sci.* 96: 312-325.
18. Loppert, R. H., and D. L. Suarez. 1996. Carbonate and gypsum. p. 437-474. In D. L. Sparks et al. (ed.) *Method of Soil Analysis. Part III.* 3rd Ed. Am. Soc. Agron., Madison, WI.
19. Martin, H. W., and D. L. Sparks. 1985. on the behavior of non-exchangeable potassium in soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal* 16: 133-162.
20. Mehra, O.P., and M.L. Jackson. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionate citrate system with sodium bicarbonate. *Clay Miner.* 7: 317-327.
21. Mengel, K., Rahmtullah., and H. Dou. 1998. Release of potassium from the silt and sand fraction of loess-driven soils. *Soil Sci.* 163: 805-813.
22. Nelson, D. W., and L. E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. P. 961-1010. In D. L. Sparks et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part III,* 3rd Ed., Am. Soc. Agron., Madison, WI.
23. Owliaie, H., S. Heydarmah., E. Adhami., and M. Najafi Ghiri. Kinetics of Nonexchangeable Potassium Release in Relation to Clay Mineralogy in Some Calcareous Soils of Kohgilouye Province. *JWSS - Isfahan University of Technology.* 2014; 18 (68) :99-110
24. Pratt, P. F. 1965. Potassium. 1022–1030. In: C. A. Black. *Methods of Soil Analysis, part 2.* American Society of Agronomy, Madison, WI.
25. Rhoades, J. D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. P. 417-436. In D. L. Sparks et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part III,* 3rd Ed., Am. Soc. Agron., Madison, WI.
26. Song, S.K., and P.M. Huang. 1988. Dynamic of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 383-390.
27. Sparks, D.L. 1987. Potassium dynamics in soils. *Advances in Soil Science* 6: 1- 63.
28. Sparks, D.L. 1999. Kinetics and mechanism of chemical reactions at the soil mineral/water interface, In: Sparks, D.L. (ed.), *Soil Physical Chemistry,* 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, Fl. pp. 135–191.
29. Srinivasarao, C., A. Subba Rao., and A. N. Ganeshamurthy. 1995. Status and desorption kinetics of potassium in some Swell- Shrink soils. *J. Ind. Soc. Soil Sci.* 43: 356-360.
30. Srinivasarao, C., A. Swarup., A. Subba Rao., and V. Raja Gopal. 1999. Kinetics of non-exchangeable potassium release from a Tropaepts as influenced by long-term cropping, fertilization, and manuring. *Aust. J. Soil Res.* 37: 317- 328
31. Srinivasarao, C., A. Subba Rao., and T.R. Rupa. 2000. Plant mobilization of soil reserve potassium from fifteen smectitic soils in relation to soil test potassium and mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 165:7. 578-586.
32. Sumner, M. E., and W. P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. P. 1201-1229. In D. L. Sparks et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis Part III,* 3rd Ed., Am. Soc. Agron., Madison, WI.
33. Thomas, G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. P. 475-490. In D. L. Sparks et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part III,* 3rd Ed., Am. Soc. Agron., Madison, WI.
34. Tu, S. X., Z. F. Guo., and J. H. Sun. 2007. Effect of oxalic acid on potassium release from typical Chinese soils and minerals. *Pedosphere* 17: 1-10.
35. Zarabi M. M., M. Jalali., and Sh. Mahdavi hajilouei. Kinetics of Nonexchangeable Potassium Release through Malic acid and supplying power of some soils of Hamadan Province. *journal of agriculture Science.* 2007:37 (6):951-964.

