



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۱ | فروردین ۱۴۰۱ (ص ۴۵-۵۶)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.335544.669164>

(مقاله علمی - پژوهشی)

The Effects of Calcium and Ammonium Cations on the Kinetics of Non-exchangeable Potassium Release in Some Calcareous Soils

MARZIYE BARATI ZANYANI^{*}, ALIREZA HOSSIENPUR¹, MOHAMMAD HASSAN SALEHI¹

1. Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrood University, Shahrood, Iran.

(Received: Dec. 18, 2021- Revised: Feb. 2, 2022- Accepted: Feb. 5, 2022)

ABSTRACT

The release rate of non-exchangeable potassium (NEK) plays a significant role in supplying K for plants; particularly in soils containing bearing minerals such as micas and feldspars. No study has been conducted on NEK release kinetics influence of cations in calcareous soils of Chaharmahal and Bakhtiari province. Therefore, the purpose of this study was to investigate the impact of cations calcium and ammonium (from two sources of calcium chloride and ammonium chloride) on kinetics of NEK release in 10 calcareous soils. Soil samples of calcium-saturated were extracted using successive extractions with 0.01 M CaCl₂ and NH₄Cl solutions for 2-2017 h at 25±1 °C. The results showed that amount of NEK released have a discontinuity in slope at 168 h. Therefore, curves were divided into two segments, including the first stage (2-168 h) and the second stage (168-2017 h). The results showed that released NEK in the studied soils in the first stage, in the 0.01 M CaCl₂ and NH₄Cl extractors were different in the range of 96.50-220.33 and 189.67-549.50, respectively, and in the second stage, in the range of 172.67-391.33, and 320.67-748.0 mg kg⁻¹ respectively. Based on the coefficients of determination (R²) and standard error (SE), the released NEK described in both segment and in both extractors using the zero order, power function, simplified ellovich, and parabolic diffusion equations. Also, the power function equation in both extractants was able to satisfactorily describe the kinetics of NEK release. The kinetics coefficients of the release of NEK were different in the studied soils. The use of multivariate regression equations in both segments and in both extractors of potassium release showed that the NEK release in soils depended NEK concentration, exchangeable potassium concentration and cation exchange capacity of the soil.

Keywords: Cations, Kinetic Equations, Non-Exchangeable Potassium, Release.

تأثیر کاتیون‌های کلسیم و آمونیوم بر سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در برخی از خاک‌های آهکی

مرضیه براتی زانیانی^{۱*}، علیرضا حسین‌پور^۱، محمدحسن صالحی^۱

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۲۷ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۱۳ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶)

چکیده

سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی، نقش مهمی در عرضه پتاسیم تبادلی برای گیاهان، به‌خصوص در خاک‌های محتوی کانی‌های پتاسیم دار از جمله فلدسپارها و میکاها دارد. مطالعه‌ای در مورد سرعت آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی تحت تأثیر کاتیون‌ها در خاک‌های آهکی استان چهارمحال و بختیاری انجام نشده است، بنابراین هدف از این پژوهش بررسی تأثیر کاتیون‌های کلسیم و آمونیوم (از دو منبع کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم) بر سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در ۱۰ خاک آهکی بود. نمونه‌های خاک اشباع با کلسیم به روش عصاره‌گیری متوالی و با استفاده از کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار در دمای 25 ± 1 درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ تا ۲۰۱۷ ساعت عصاره‌گیری شدند. نتایج نشان داد، نمودارهای مقدار تجمعی پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در زمان ۱۶۸ ساعت ناپیوستگی در شیب را نشان دادند؛ بنابراین نمودارها به دو بخش، شامل مرحله اول (۱۶۸-۲ ساعت) و مرحله دوم (۲۰۱۷-۱۶۸ ساعت) تقسیم شد. نتایج نشان داد که مقدار پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در خاک‌های مورد مطالعه در مرحله اول در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار به ترتیب در دامنه ۲۲۰/۳۳-۹۶/۵۰ و ۵۴۹/۵۰-۱۸۹/۶۷ و در مرحله دوم به ترتیب در دامنه ۳۹۱/۳۳-۱۷۲/۶۷ و ۷۴۸/۰-۳۲۰/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم متفاوت بود. بر اساس ضرایب تبیین و خطای استاندارد، پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در هر دو مرحله و در هر دو عصاره‌گیر با استفاده از معادله‌های مرتبه صفر، الویچ ساده، تابع توانی و انتشار پارابولیکی توصیف شد. همچنین، معادله تابع توانی در هر دو عصاره‌گیر قادر به توصیف رضایت‌بخش سرعت آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی بود. ضرایب سرعت آزاد شدن پتاسیم در خاک‌های مختلف متفاوت بود. استفاده از معادلات رگرسیونی چند متغیره در هر دو مرحله آزادسازی پتاسیم و در هر دو عصاره‌گیر نشان داد که میزان آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌ها به غلظت پتاسیم غیر تبادلی، غلظت پتاسیم تبادلی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بستگی داشت.

واژه‌های کلیدی: آزاد شدن، پتاسیم غیر تبادلی، کاتیون‌ها، معادله‌های سینتیکی.

مقدمه

می‌گیرد (Sparks, 1987). قابلیت استفاده پتاسیم غیر تبادلی به سرعت تبدیل این نوع پتاسیم به شکل‌های محلول و تبادلی بستگی دارد. عوامل مختلفی مانند نوع کانی، فراوانی کانی‌های پتاسیم دار و اندازه آنها، میزان پتاسیم در کانی، مقدار پتاسیم قابل استفاده خاک، غلظت پتاسیم در آب آبیاری و مقدار پتاسیم آزاد شده از بقایای گیاهی در رهاسازی پتاسیم از بخش غیر تبادلی و تأمین پتاسیم مورد نیاز گیاه نقش دارند (Jalali, 2005). یکی از عوامل مؤثر بر قابلیت دسترسی پتاسیم وجود کاتیون‌های مختلف در محلول خاک می‌باشد. براین اساس بررسی سرعت رهاسازی پتاسیم در حضور کاتیون‌های معمول خاک ضروری است. در خاک‌های آهکی کاتیون‌هایی که پتاسیم را از مکان‌های تبادلی جابه‌جا می‌کنند عمدتاً کلسیم، منیزیم و آمونیوم می‌باشند (Jalali, 2006; Mustscher, 1995). یون کلسیم به علت انرژی آب‌پوشی و اندازه بزرگ‌تری که نسبت به یون پتاسیم دارد،

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. در این شرایط، بررسی سرعت آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی در جهت مدیریت و استفاده صحیح از منابع خاکی و همچنین در فراهمی و قدرت تأمین پتاسیم به‌ویژه در خاک‌های حاوی کانی‌های دارای پتاسیم از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است (Bahraini Touhani *et al.*, 2010). پتاسیم در خاک به ترتیب سهولت جذب توسط گیاه، شامل پتاسیم محلول، تبادلی، غیر تبادلی و ساختمانی می‌باشد (Najafi Ghiri *et al.*, 2011). تعادل موجود بین شکل‌های مختلف پتاسیم، باعث تداوم تأمین پتاسیم در خاک می‌شود. پتاسیم محلول و تبادلی سریعاً به تعادل رسیده، درحالی‌که تعادل بین پتاسیم غیر تبادلی با پتاسیم محلول و تبادلی به‌کندی صورت

پتاسیم در خاک‌های آهکی را تحت کوددهی طولانی مدت بررسی کرد و بیان نمود که معادله تابع توانی به‌عنوان مدل مناسب برای توصیف سرعت رهاسازی پتاسیم در این خاک‌ها می‌باشد. Shakeri (2018) تأثیر ظرفیت بافری خاک و کانی‌های رسی را بر سرعت آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و اگزالیک اسید ۰/۰۱ مولار بررسی کرد و گزارش نمود که معادله الوویچ می‌تواند سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌ها را توصیف کند. Zareian et al., (2018) سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌ها را با عصاره‌گیری متوالی با کلرید کلسیم و اگزالیک اسید ۰/۰۱ مولار در خاک‌های آهکی بررسی کردند و گزارش نمودند که معادله‌های الوویچ ساده شده و تابع توانی می‌تواند سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در این خاک‌ها را توصیف کند. Debankur et al., (2019) معادله‌های مرتبه اول، انتشار پارابولیکی، تابع توانی و الوویچ را بر داده‌های حاصل از سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌ها برآزش دادند و بیان کردند که معادله الوویچ می‌تواند رهاسازی پتاسیم در این خاک‌ها را توصیف نماید. نتایج، Baba Ahmadi et al., (2019) نشان داد که معادله‌های مرتبه اول، تابع توانی و انتشار پارابولیک توانست سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌ها را توصیف کند.

از آنجا که مطالعه‌ای در مورد میزان پتاسیم غیر تبادلی و سرعت رهاسازی آن تحت تأثیر کاتیون‌ها در خاک‌های آهکی استان چهارمحال و بختیاری انجام نشده است، این پژوهش با هدف مقایسه اثر کاتیون‌های کلسیم و آمونیوم بر سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در تعدادی از خاک‌های آهکی استان چهارمحال و بختیاری و ارتباط پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده با ویژگی‌های خاک انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی اثر کاتیون‌های کلسیم و آمونیوم بر سرعت آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در خاک، ۳۰ نمونه خاک کشاورزی از دشت شهرکرد از عمق ۳۰ سانتی‌متری در فروردین ماه ۱۴۰۰ تهیه شد. در این نمونه‌های اولیه درصد رس، پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیر تبادلی و کربنات کلسیم معادل تعیین و بر اساس نوع این ویژگی‌ها ۱۰ نمونه خاک جهت انجام پژوهش انتخاب گردید. سپس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها شامل توزیع اندازه ذرات با روش هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۲ به ۱ آب به خاک (Rhoades, 1996)، pH در سوسپانسیون ۲ به ۱ آب به خاک (Thomas, 1996)، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Nelson and

به‌راحتی با پتاسیم بین لایه‌ای تبادلی نمی‌شود. به‌خصوص در خاک‌هایی که کانی غالب آنها ایلیت است، این موضوع اهمیت بیشتری دارد (Pohlman and McColl, 1986; Srinivasarao et al., 1999). درحالی‌که یون آمونیوم اندازه، بار و انرژی آبپوشی مشابه با یون پتاسیم دارد اما شدت قطبیت آمونیوم بیشتر از پتاسیم می‌باشد، بنابراین در تبادلی توانایی خروج پتاسیم را دارا می‌باشد و به‌راحتی با پتاسیم تبادلی می‌شود (Dhillon et al., 1989).

سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی با روش‌های مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است؛ از جمله این روش‌ها می‌توان به روش رزین‌های تبادلی کاتیونی (Martin and Sparks, 1983)، اسیدهای آلی (Sung and Hung, 1988)، اسیدهای معدنی (Gill-Lopez-Pineiro, 1992)، نمک‌های معدنی (Stores and Robio, 1992)، روش الکترواولترافیلتراسیون (and Garcia-Navarro, 1997) اشاره کرد. Robio and Gill-Sotres, (1996) مطالعه‌ای سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌های دلووار را با رزین‌های تبادلی کاتیونی اشباع از هیدرژن بررسی کردند. Molavi et al., (2020) مطالعه‌ای بر روی رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی از عصاره‌گیر تترا فنیل بران سدیم انجام دادند. Abdi et al., (2020) سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی را در خاک‌های تحت کشت پسته با عصاره‌گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار بررسی کردند و بیان نمودند که پتاسیم غیر تبادلی می‌تواند نقش بسزایی در تغذیه گیاه داشته باشد. Bedrossian and Singh (2006) سرعت رهاسازی پتاسیم از خاک‌ها را با دو عصاره‌گیر کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار بررسی کردند و بیان نمودند که در همه خاک‌ها کلرید آمونیوم پتاسیم بیشتری نسبت به کلرید کلسیم عصاره‌گیری کرد. معادله‌های بسیاری برای توصیف سرعت واکنش‌ها در کانی‌های رسی و خاک استفاده شده است (Hossienpur et al., 2000; Jalali, 2006). معادلات سینتیکی استفاده شده در توصیف واکنش‌های شیمیایی شامل معادلات مرتبه صفر، مرتبه اول، الوویچ، الویچ ساده شده، انتشار پارابولیکی و تابع توانی می‌باشند. Jalali (2006) سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی را در تعدادی از خاک‌های آهکی با عصاره‌گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار بررسی کرد و بیان نمود معادله تابع توانی می‌تواند سرعت رهاسازی پتاسیم در این خاک‌ها را توصیف کند. نتایج مطالعات (Hossienpur et al., 2011) نشان داد که سرعت آزاد شدن پتاسیم در خاک‌های آهکی توسط عصاره‌گیر کلرید کلسیم و اسیدسیتریک ۰/۰۱ مولار با معادله‌های تابع توانی، الوویچ ساده و انتشار پارابولیکی قابل توصیف است. Fatemi (2017) سرعت رهاسازی

شدند. نمونه‌ها در زمان‌های ۱، ۴، ۸، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰، ۱۴۴، ۱۶۸، ۳۳۶، ۵۰۴، ۶۷۲، ۸۴۰، ۱۰۰۸، ۱۱۷۶، ۱۳۴۴، ۱۵۱۲، ۱۶۸۰، ۱۸۴۸ و ۲۰۱۷ ساعت پس از اضافه کردن هر یک از محلول‌ها عصاره‌گیری شدند. سپس سوسپانسیون با دستگاه سانتریفیوژ با ۳۰۰۰ دور در دقیقه صاف، محلول رویی جدا و پتاسیم موجود در محلول عصاره‌گیری شده با استفاده از دستگاه فلیم‌فتمتر (مدل کورنینگ ۴۱۰) اندازه‌گیری شد. سپس ۲۰ میلی‌لیتر از محلول‌های عصاره‌گیر به نمونه‌ها اضافه و پس از ۳۰ دقیقه تکان دادن توسط دستگاه تکان‌دهنده برقی، نمونه‌ها به انکوباتور منتقل شد (Hossienpur et al., 2011).

بعد از جمع‌آوری داده‌ها، معادله‌های مرتبه صفر، مرتبه یک، الوویچ ساده، تابع توانی و انتشار پارابولیکی (جدول ۱) بر داده‌ها برازش داده شد (Martin and Sparks, 1983; Havlin et al., 1985). بر اساس بیشترین ضریب تبیین و کمترین خطای استاندارد بهترین مدل جهت توصیف سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی انتخاب گردید. خطای استاندارد با استفاده از رابطه زیر تعیین شد:

$$SE = [\sum (K_t - K^*)^2 / n - 2]^{1/2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در معادله (۱)، K_t و K^* به ترتیب نشان‌دهنده مقدار پتاسیم غیر تبادلی اندازه‌گیری و محاسبه شده به وسیله مدل در زمان t و n تعداد اندازه‌گیری‌ها می‌باشد (Martin and Sparks, 1983). مقایسه میانگین مقدار پتاسیم عصاره‌گیری شده با کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار توسط آزمون t-test انجام شد.

(Sommers, 1996)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با اسید (Loeppert and Suarez, 1996) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به روش استات سدیم یک نرمال (Sumner and Miller, 1996)، تعیین شد. همچنین پتاسیم تبادلی خاک‌ها به روش استات آمونیوم یک نرمال (Knudsen et al., 1982) و پتاسیم غیر تبادلی خاک‌ها به روش اسید نیتریک مولار و جوشان (Al-kanani et al., 1984) عصاره‌گیری و پتاسیم عصاره‌گیری شده با دستگاه فلیم‌فتمتر (مدل کورنینگ ۴۱۰) اندازه‌گیری شد.

قبل از شروع آزمایش‌های سینتیکی برای خارج کردن پتاسیم تبادلی و محلول، خاک‌ها با کلرید کلسیم ۱ مولار اشباع شدند. برای انجام این کار نمونه‌های خاک با کلرید کلسیم ۱ مولار به مدت ۳۰ دقیقه با دستگاه تکان‌دهنده برقی تکان داده شد، سپس نمونه‌ها سانتریفیوژ شده و محلول زلال رویی دور ریخته شد. این عمل سه مرتبه تکرار گردید. کلرید اضافی باقی‌مانده ابتدا با آب مقطر سپس با الکل تا حصول قابلیت الکتریکی ۴۰ میکرو زیمنس بر سانتی‌متر شست‌وشو شد (Badraoui et al., 1992).

برای مطالعه سرعت آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی از روش عصاره‌گیری متوالی استفاده شد. بدین منظور به ۲ گرم از نمونه خاک‌های اشباع شده با کلسیم ۲۰ میلی‌لیتر از محلول کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار یا ۲۰ میلی‌لیتر کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار اضافه و نمونه‌ها به وسیله تکان‌دهنده برقی به مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شدند. نمونه‌ها در دستگاه انکوباتور در دمای 25 ± 1 درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. قبل از پایان هر دوره، نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه به وسیله دستگاه تکان‌دهنده برقی تکان داده

جدول ۱- معادله‌های سینتیکی استفاده شده

نام معادلات	شکل معادلات*	منبع
واکنش مرتبه صفر	$(K_0 - K_t) = a_0 - R_0 t$	Martin and Sparks, 1983
واکنش مرتبه اول	$\ln (K_0 - K_t) = a_1 - R_1 t$	Martin and Sparks, 1983
تابع توانی	$\ln K_t = \ln a_e + b \ln t$	Havlin et al., 1985
انتشار پارابولیک	$K_t = a + R t^{0.5}$	Havlin et al., 1985
الوویچ ساده	$K_t = a + 1/\beta \ln t$	Havlin et al., 1985

*: K_t مقدار پتاسیم تجمعی آزاد شده (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در زمان t ، K_0 حداکثر پتاسیم تجمعی آزاد شده (میلی‌گرم بر کیلوگرم) بعد از ۲۰۱۷ ساعت، t زمان (ساعت) و R_0, R_1, b, R و β ضرایب معادله‌ها هستند.

نتایج و بحث

درصد رس و سیلت به ترتیب ۲۱/۸۴ تا ۵۱/۸۴ و ۱۵/۱۲ تا ۳۷/۱۲ است. مقدار کربنات کلسیم معادل خاک و ماده آلی خاک به ترتیب ۹/۵ تا ۳۶/۵ و ۰/۴۵ تا ۱/۰۵ درصد بود. مقدار پتاسیم تبادلی و غیر تبادلی خاک‌ها به ترتیب بین ۸۵ تا ۴۸۳ و ۹۴۵ تا ۱۵۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود که کمترین مقدار مربوط به خاک ۷ و بیشترین مقدار مربوط به خاک ۱۰ است. بالا بودن مقدار پتاسیم تبادلی و غیر تبادلی در خاک‌ها می‌تواند باعث عدم

برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده است. همه خاک‌ها دارای پ-هش قلیایی بوده و دامنه تغییرات آن ۷/۷۹ تا ۷/۹۷ بود. خاک‌ها دارای قابلیت هدایت الکتریکی در دامنه ۰/۳۳ تا ۰/۳۸ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشند. دامنه تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌ها ۱۴/۳۵ تا ۲۵ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم متغیر است. دامنه تغییرات

نیاز به کاربرد کودهای پتاسیمی شود (Knudsen et al., 1982). همچنین، تغییرات پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌ها نشان‌دهنده تنوع نوع و مقدار کانی‌های رسی در خاک‌ها می‌باشد.

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

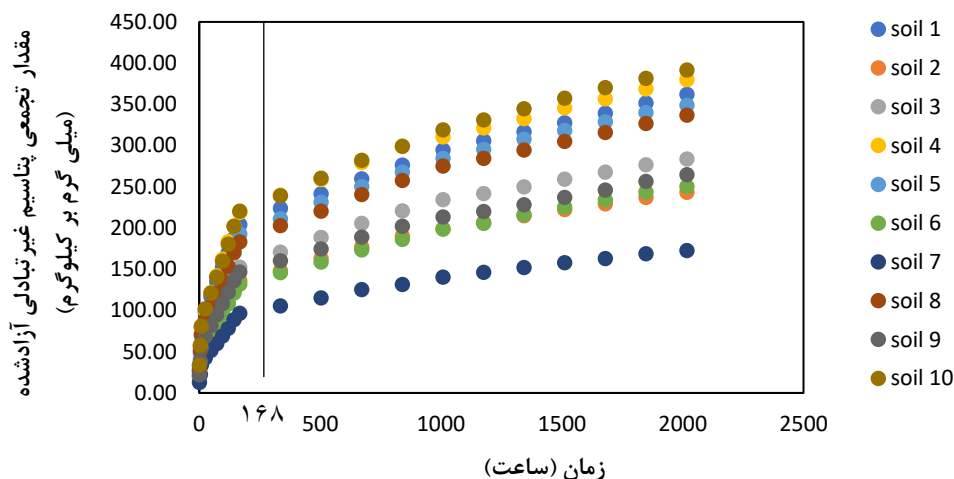
خاک	pH	EC (dS m ⁻¹)	پتاسیم		گنجایش تبادل کاتیونی (Cmol _c kg ⁻¹)	رس	سیلت	شن (%)	کربنات کلسیم معادل ماده آلی	
			تبادلی	پتاسیم غیر تبادلی						
۱ طافانک	۷/۷۹	۰/۳۷	۳۱۸	۱۳۶۴	۱۷/۹۷	۲۹/۸۴	۱۵/۱۲	۵۵/۰۴	۹/۵۰	۱/۰۵
۲ تومانک	۷/۹۱	۰/۳۳	۲۵۰	۱۰۷۲	۲۲/۵۴	۴۵/۸۴	۲۹/۱۲	۲۵/۰۴	۲۰/۲۵	۰/۴۵
۳ مهدیه	۷/۹۱	۰/۳۷	۲۱۰	۱۱۶۰	۲۰/۲۲	۴۷/۸۴	۲۷/۱۲	۲۵/۰۴	۲۹/۵۰	۰/۹۴
۴ سامان	۷/۹۱	۰/۳۸	۳۲۷	۱۲۴۳	۱۹/۵۷	۴۹/۸۴	۲۵/۱۲	۲۵/۰۴	۳۴/۲۵	۰/۵۴
۵ کاکولک	۷/۸۲	۰/۳۳	۲۷۵	۱۴۷۱	۲۰/۵۰	۴۳/۸۴	۲۷/۱۲	۲۹/۰۴	۱۶/۲۵	۰/۶۰
۶ هفشجان	۷/۸۹	۰/۳۵	۱۵۶	۱۰۴۰	۱۷/۶۰	۴۱/۸۴	۲۳/۱۲	۳۵/۰۴	۳۶/۵۰	۰/۶۹
۷ دستگرد	۷/۹۷	۰/۳۶	۸۵	۹۴۵	۱۴/۳۵	۲۱/۸۴	۱۷/۱۲	۶۱/۰۴	۳۶/۰	۰/۵۹
۸ فرخشهر	۷/۸۹	۰/۳۷	۲۸۱	۱۲۳۰	۱۶/۶۵	۲۵/۸۴	۲۵/۱۲	۴۹/۰۴	۳۵/۵۰	۰/۹۱
۹ هرچگان	۷/۸۹	۰/۳۵	۲۲۹	۱۲۴۶	۲۳/۰۷	۵۱/۸۴	۱۹/۱۲	۲۹/۰۴	۱۷/۵۰	۰/۹۷
۱۰ شیخ‌شبان	۷/۸۶	۰/۳۶	۴۸۳	۱۵۲۷	۲۵/۰	۳۹/۸۴	۳۷/۱۲	۲۳/۰۴	۱۲/۵۰	۰/۷۶

نشان‌داده شده است. دامنه تغییرات پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در عصاره‌گیر کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار در مرحله اول (۱۶۸-۲ ساعت) به ترتیب در دامنه ۲۲۰/۳۳-۹۶/۵۰ و ۵۴۹/۵۰-۱۸۹/۶۷ میلی‌گرم در کیلوگرم و در مرحله دوم (۲۰۱۷-۱۶۸ ساعت) به ترتیب در دامنه ۳۹۱/۳۳-۱۷۲/۶۷ و ۳۲۰/۶۷-۷۴۸/۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. در هر دو عصاره‌گیر کمترین و بیشترین مقدار پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده به ترتیب در خاک ۷ و ۱۰ آزاد شد. تفاوت در مقدار کل پتاسیم آزاد شده در خاک‌های مختلف در یک عصاره‌گیر می‌تواند به علت شرایط محیطی و اندازه ذرات کانی‌های حاوی پتاسیم باشد. همچنین تفاوت در ساختار کریستالی کانی، ترکیب شیمیایی و تغییر بار لایه‌ای می‌تواند باعث این تفاوت شود (Sharpley, 1990). بیشتر آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در خاک شماره ۱۰ احتمالاً به دلیل بالا بودن پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیر تبادلی و سیلت و پایین بودن کلسیم معادل آن می‌باشد. پایین بودن مقدار پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در خاک شماره ۷ احتمالاً به علت پایین بودن پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیر تبادلی، رس و سیلت و بالا بودن میزان کربنات کلسیم معادل آن می‌باشد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، عصاره‌گیر کلرید آمونیوم نسبت به عصاره‌گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار در همه خاک‌ها پتاسیم غیر تبادلی بیشتری آزاد کرده است. میانگین پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار به ترتیب در مرحله اول ۱۶۸/۱۸ و ۳۵۲/۱۵ و در مرحله دوم به ترتیب ۳۰۳/۳۳ و ۵۲۲/۳۳ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد (جدول ۳). در خاک‌های آهکی کاتیون‌هایی که پتاسیم را از مکان‌های تبادلی جابه‌جا می‌

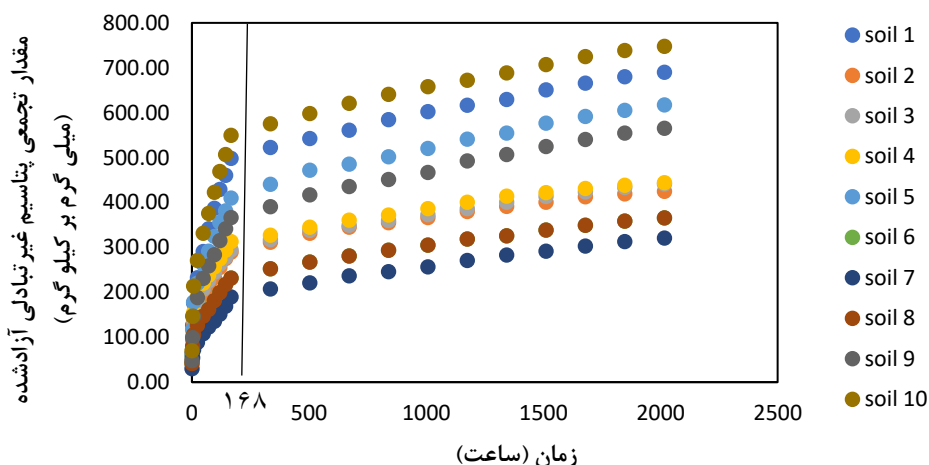
مقدار تجمعی پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در زمان‌های مختلف در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار در خاک‌های مطالعه شده به ترتیب در شکل (۱ و ۲) نشان‌داده شده است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، شیب خط مقدار تجمعی پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده با زمان، در زمان ۱۶۸ ساعت در هر دو عصاره‌گیر متفاوت است؛ بنابراین نمودارها را می‌توان به دو بخش، شامل مرحله اول (۱۶۸-۲ ساعت) و مرحله دوم (۲۰۱۷-۱۶۸ ساعت) تقسیم کرد. نتایج نشان می‌دهد در تمام خاک‌ها سرعت آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی تا ۱۶۸ ساعت با سرعت بیشتری بوده و بعد از این زمان تا پایان ۲۰۱۷ ساعت با سرعت کمتری ادامه یافته است. مشابه این روند نیز توسط سایر محققین گزارش شده است (Hossienpur et al., 2011; Jalali, 2006). طبق نتایج این جدول میانگین پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار بعد از ۱۶۸ ساعت به ترتیب ۱۶۸/۱۸ و ۳۵۲/۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم و بعد از ۱۶۸ ساعت تا پایان ۲۰۱۷ ساعت به ترتیب ۱۳۵/۱۵ و ۱۷۰/۱۸ میلی‌گرم در کیلوگرم است. علت آزادسازی پتاسیم با سرعت بالا در زمان ۱۶۸-۲ ساعت در مرحله اول را می‌توان نتیجه آزاد شدن پتاسیم از مناطق گوه‌ای و لبه‌ای شکل کانی‌ها با انرژی جذب کم دانست، در ادامه با افزایش فاصله پتاسیم از لبه کانی و افزایش فاصله پخشیدگی و همچنین افزایش انرژی جذب پتاسیم در بین لایه‌ها، میزان رهاسازی پتاسیم کاهش پیدا می‌کند (Bolt et al., 1963; Srinivasarao et al., 1999). مقدار تجمعی پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در عصاره‌گیر کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار در جدول (۳)

جانشین شده ولی به سختی با پتاسیم بین لایه‌های تبادل می‌شود که بیانگر توانایی کم این عصاره‌گیر در آزادسازی پتاسیم است (Mustscher, 1995).

کند کلسیم، منیزیم و آمونیوم می‌باشند. یون آمونیوم می‌تواند پتاسیم موجود در لبه و حتی بخشی از پتاسیم جذب شده در بین لایه‌های کانی‌های رسی را جایگزین کند، اما یون کلسیم با پتاسیم جذب شده روی سطوح خارجی رس‌ها و لبه کانی‌های رسی



شکل ۱- مقدار پتاسیم غیر تبدالی آزاد شده توسط عصاره‌گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار در خاک‌های مطالعه‌شده



شکل ۲- مقدار پتاسیم غیر تبدالی آزاد شده توسط عصاره‌گیر کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار در خاک‌های مطالعه‌شده

جدول ۳- مقدار تجمعی پتاسیم غیر تبدالی آزاد شده با استفاده از عصاره‌گیر کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار

خاک	کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار		کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار	
	۱۶۸-۲ ساعت	۲۰۱۷-۲ ساعت	۱۶۸-۲ ساعت	۲۰۱۷-۲ ساعت
۱	۲۰۴/۰	۳۶۱/۸۳	۴۹۸/۳۳	۶۸۹/۸۳
۲	۱۳۶/۰	۲۴۳/۰	۲۸۹/۶۷	۴۲۵/۱۷
۳	۱۵۲/۱۷	۲۸۳/۶۷	۲۹۴/۳۳	۴۴۱/۶۷
۴	۲۱۸/۶۷	۳۷۹/۸۳	۳۱۳/۳۳	۴۴۴/۵۰
۵	۱۹۲/۵۰	۳۸۴/۸۳	۴۰۹/۸۳	۶۱۷/۶۷
۶	۱۳۱/۸۳	۲۵۰/۰	۲۳۲/۰	۳۶۵/۸۳
۷	۹۶/۵۰	۱۷۲/۶۷	۱۸۹/۶۷	۳۲۰/۶۷
۸	۱۸۳/۱۷	۳۳۶/۸۳	۳۷۸/۰	۶۰۴/۵۰
۹	۱۴۶/۶۷	۲۶۴/۶۷	۳۶۶/۸۳	۵۶۵/۵۰
۱۰	۲۲۰/۳۳	۳۹۱/۳۳	۵۴۹/۵۰	۷۴۸/۰
میانگین	۱۶۸/۱۸	۳۰۳/۳۳	۳۵۲/۱۵	۵۲۲/۳۳

کند. (Attar et al., 2016) مطالعه‌ای بر روی سرعت آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در خاکدانه‌هایی با اندازه متفاوت انجام دادند و گزارش نمودند که معادله‌های مرتبه اول، تابع توانی، انتشار پارابولیکی و الوویچ ساده شده می‌تواند سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در این خاک‌ها را توصیف کند.

در جدول‌های (۶ و ۷) ضرایب سرعت معادلات سینتیکی که قابلیت توصیف سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌ها در مرحله اول و مرحله دوم در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار را دارند، نشان داده شده است. در این معادلات شیب ($1/\beta$, b, R, R₀) بیانگر سرعت آزادسازی پتاسیم بین لایه‌ای و عرض از مبدأ آنها (a_0 , a, a_e) نشان‌دهنده سرعت اولیه آزادسازی پتاسیم است. تفاوت در مقدار شیب معادلات نشان می‌دهد که قدرت خاک‌ها در تأمین پتاسیم موردنیاز گیاه متفاوت است. همان‌طور که نتایج جدول‌های (۶ و ۷) نشان می‌دهد، ضرایب سرعت پتاسیم غیر تبادلی در عصاره‌گیر کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار در مرحله اول و مرحله دوم نسبت به عصاره‌گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار بیشتر است. ضریب R₀ در معادله مرتبه صفر در مرحله اول در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم به ترتیب در دامنه ۰/۴۹-۱/۰۱ و ۰/۴۹-۲/۴۸ و ۰/۱۳-۲/۴۸ و در مرحله دوم به ترتیب در دامنه ۰/۳۷-۰/۸۵ و ۰/۳۷-۰/۱۱۳ و ۰/۰۶۳-۰/۱۱۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بر ساعت می‌باشد. ضریب $1/\beta$ در معادله الوویچ در مرحله اول در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم به ترتیب در دامنه ۱۵/۳۸-۳۵/۱۰ و ۲۸/۱۸-۸۹/۰۶ و در مرحله دوم به ترتیب در دامنه ۳۷/۹۴-۸۶/۱۵ و ۳۷/۹۴-۱۱۳/۳۳ و ۶۳/۹۷-۱۱۳/۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بر ساعت متفاوت است.

ضریب b در معادله تابع توانی در مرحله اول به ترتیب در دامنه ۰/۳۴۲-۰/۳۹۹ و ۰/۳۷۴ - ۰/۲۲۱ و در مرحله دوم به ترتیب در دامنه ۰/۳۰۹ - ۰/۲۴۸ و ۰/۲۴۸-۰/۲۵۳ و ۰/۱۵۱-۰/۲۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بر ساعت در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم می‌باشد. ضریب b در معادله تابع توانی در همه خاک‌ها در هر دو عصاره‌گیر کمتر از یک است و نشان می‌دهد سرعت آزاد شدن پتاسیم با زمان کاهش می‌یابد. همچنین در معادله تابع توانی پارامتر a_eb که حاصل ضرب دو ثابت این معادله می‌باشد، به‌عنوان سرعت ویژه در زمان واحد در نظر گرفته می‌شود و می‌تواند شاخصی از سرعت در این معادله باشد (Serrano et al., 2005). مقادیر این پارامتر در مرحله اول در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم به ترتیب در دامنه ۴/۶۹-۱۱/۵۹ و ۵/۶۷-۳۰/۷۷ و ۱۰/۳۸-۳۰/۷۷ و در مرحله دوم به ترتیب در دامنه ۵/۶۷-۱۳/۹۲ و ۱۱/۵۸-۳۵/۲۲ متفاوت است. ضریب R در معادله انتشار پارابولیکی در مرحله اول در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید

کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار تعیین کردند و به این نتیجه رسیدند که کلرید آمونیوم بیشتر از کلرید کلسیم در همه این خاک‌ها پتاسیم را آزاد می‌کند. میزان آزادسازی پتاسیم از عصاره‌گیر کلرید کلسیم در دامنه ۱/۶ تا ۱۷/۶۵ و در عصاره‌گیر کلرید آمونیوم در دامنه ۲/۴۹ تا ۱۹/۹۸ میلی‌مول بر کیلوگرم بود. (Movahedi Naeni and Rezaei, 2009) با مطالعه تأثیر کاتیون‌های آمونیوم و کلسیم بر سرعت رهاسازی پتاسیم در خاک اعلام کردند که در حضور یون آمونیوم، میزان رهاسازی پتاسیم بیشتر می‌شود.

چنانچه در بخش قبلی اشاره شد شیب نمودارهای جمععی آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در ۱۶۸ ساعت دچار شکستگی شد، بنابراین معادله‌های سینتیکی (جدول ۱) بر داده‌های آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌های مختلف در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار در مرحله اول (۲-۱۶۸ ساعت) و در مرحله دوم (۱۶۸-۲۰۱۷ ساعت) برازش داده شد. معادله‌های سینتیکی که بیشترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین خطای استاندارد (SE) را داشته باشند، می‌توانند سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌ها را توصیف کنند (Martin and Sparks, 1983). طبق نتایج جدول (۴ و ۵)، معادله‌های مرتبه صفر، الوویچ ساده، تابع توانی و انتشار پارابولیکی قابلیت توصیف سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌ها در هر دو مرحله در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار را دارند. توانایی معادله‌های مختلف در توصیف سرعت رهاسازی پتاسیم توسط محققان گزارش شده است. Singh (2006) گزارش کردند که سرعت رهاسازی پتاسیم در خاک‌های رتی‌سول در نیوساوت‌ولزشمالی با عصاره‌گیر کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار در مدت زمان ۶۰ ساعت با معادله الوویچ و تابع توانی توصیف شد. (Jalali 2005) در بررسی سینتیکی آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در ۱۰ خاک استان همدان از عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار و اسیدسیتریک ۰/۰۱ مولار در مدت زمان ۲ تا ۲۷۵۹ ساعت استفاده کرد. نتایج نشان داد که معادله‌های تابع توانی، مرتبه اول، پخشیدگی و الوویچ به بهترین نحو رهاسازی پتاسیم را توجیه می‌نمایند. (Singh et al., 2002) سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌های رتی‌سول در هندوستان را بررسی کردند و بیان نمودند که از بین معادلات مرتبه صفر، مرتبه اول، الوویچ و انتشار پارابولیکی، معادله انتشار پارابولیکی دارای بیشترین ضریب تبیین و کمترین خطای استاندارد بود. (Havlin et al., 1985) بیان کردند که معادله‌های الوویچ، تابع توانی و انتشار پارابولیکی می‌تواند سرعت رهاسازی پتاسیم در خاک‌های آهکی را توصیف



آمونیم به ترتیب در دامنه ۱۴/۶۰-۶/۴۵ و ۳۶/۴۰-۱۱/۷۲ و در مرحله دوم به ترتیب در دامنه ۱۰/۴۰-۲/۳۷ و ۴/۲۱-۷/۴۵ میلی گرم بر کیلوگرم بر جذر ساعت متفاوت است. برازش معادله

انتشار پارابولیکی نشان می‌دهد که رها شدن پتاسیم در خاک‌ها تحت تأثیر انتشار است (Martin and Sparks, 1983).

جدول ۴- ضرایب تبیین (R^2) و خطای استاندارد (SE) (mg kg^{-1}) در معادله‌های سینتیکی مورد استفاده در مرحله اول (۱۶۸-۲ ساعت) در عصاره‌گیریهای کلرید

کلسیم و کلرید آمونیم ۰/۰۱ مولار در خاک‌های مورد مطالعه

مرحله اول		SE		مدل
R^2	دامنه	میانگین	دامنه	
کلرید کلسیم				
۰/۹۴۴	۰/۹۳۵ - ۰/۹۵۲	۱۰/۷۸	۶/۱۱ - ۱۵/۳۱	مرتبۀ صفر
۰/۸۷۵	۰/۸۷۰ - ۰/۸۷۹	۰/۰۳۶	۰/۰۳۴ - ۰/۰۳۸	مرتبۀ اول
۰/۸۹۷	۰/۸۸۴ - ۰/۹۱۱	۱۵/۱۴	۹/۵۲ - ۲۰/۲۳	الویج ساده شده
۰/۹۷۶	۰/۹۷۱ - ۰/۹۸۰	۷/۱۳	۴/۳۰ - ۹/۵۱	تابع توانی
۰/۹۸۳	۰/۹۷۹ - ۰/۹۹۴	۵/۷۳	۲/۸۸ - ۷/۸۵	انتشار پارابولیکی
کلرید آمونیم				
۰/۸۸۹	۰/۸۳۴ - ۰/۹۳۹	۳۲/۱۶	۱۲/۶۱ - ۴۷/۷۸	مرتبۀ صفر
۰/۸۵۶	۰/۸۲۶ - ۰/۸۸۴	۰/۰۶۵	۰/۰۴۴ - ۰/۰۹۰	مرتبۀ اول
۰/۹۴۷	۰/۹۰۱ - ۰/۹۸۱	۲۲/۱۰	۱۰/۷۳ - ۳۹/۱۱	الویج ساده شده
۰/۹۸۳	۰/۹۷۲ - ۰/۹۹۵	۱۰/۵۸	۵/۵۷ - ۱۷/۲۴	تابع توانی
۰/۹۷۱	۰/۹۴۸ - ۰/۹۹۶	۱۴/۸۷	۶/۰۷ - ۲۱/۰۹	انتشار پارابولیکی

جدول ۵- ضرایب تبیین (R^2) و خطای استاندارد (SE) (mg kg^{-1}) در معادله‌های سینتیکی مورد استفاده در مرحله دوم (۲۰۱۷-۱۶۸ ساعت) در عصاره‌گیریهای

کلرید کلسیم و کلرید آمونیم ۰/۰۱ مولار در خاک‌های مورد مطالعه

مرحله دوم		SE		مدل
R^2	دامنه	میانگین	دامنه	
کلرید کلسیم				
۰/۹۶۸	۰/۹۵۵ - ۰/۹۷۷	۶/۸۱	۳/۸۶ - ۸/۸۷	مرتبۀ صفر
۰/۸۱۵	۰/۷۸۸ - ۰/۸۷۱	۰/۵۹۵	۰/۴۵۷ - ۰/۶۶۹	مرتبۀ اول
۰/۹۸۵	۰/۹۷۸ - ۰/۹۹۳	۴/۵۸	۲/۷۱ - ۶/۲۵	الویج ساده شده
۰/۹۹۵	۰/۹۹۴ - ۰/۹۹۸	۲/۲۵	۱/۳۴ - ۳/۲۲	تابع توانی
۰/۹۹۳	۰/۹۸۵ - ۰/۹۹۷	۲/۷۵	۱/۶۶ - ۴/۵۹	انتشار پارابولیکی
کلرید آمونیم				
۰/۹۳۰	۰/۹۰ - ۰/۹۵۱	۱۰/۹۴	۵/۴۸ - ۱۵/۶۴	مرتبۀ صفر
۰/۸۱۰	۰/۷۷۴ - ۰/۸۵۱	۰/۶۳۹	۰/۵۲۲ - ۰/۷۱۷	مرتبۀ اول
۰/۹۲۰	۰/۸۹۵ - ۰/۹۴۹	۱۱/۲۹	۵/۱۴ - ۱۵/۷۹	الویج ساده شده
۰/۹۸۵	۰/۹۷۱ - ۰/۹۹۱	۴/۰۳	۱/۸۷ - ۵/۲۳	تابع توانی
۰/۹۷۴	۰/۹۲۰ - ۰/۹۹۳	۴۷/۲۲	۲/۱۴ - ۶/۳۲	انتشار پارابولیکی

جدول ۶- ضرایب معادلات سینتیکی توصیف‌کننده آزادسازی پتاسیم غیر تبادل‌پذیر در عصاره‌گیریهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیم ۰/۰۱ مولار در مرحله اول

(۱۶۸-۲ ساعت) در خاک‌های مورد مطالعه

انتشار پارابولیکی		تابع توانی		الویج ساده شده		مرتبۀ صفر		خاک
R	a	$a_e = b$	b	a_e	$1/\beta$	a	R_0	
(mg kg^{-1}) $\text{h}^{-1/2}$	(mg kg^{-1})		(mg kg^{-1}) h^{-1}	(mg kg^{-1})	(mg kg^{-1}) h^{-1}	(mg kg^{-1})	(mg kg^{-1}) h^{-1}	
کلرید کلسیم								
۱۲/۳۵	۳۶/۸۴	۱۱/۳۴	۰/۳۴۵	۳۲/۸۸	۳/۱۳۰	۱۶/۰۲	۰/۸۹۹	۳۰۰/۲۴
۸/۷۹	۱۵/۰۴	۶/۸۶	۰/۳۸۰	۱۸/۰۵	۲۰/۹۶	۶/۴۵	۰/۶۱۳	۲۰۶/۷۷
۹/۵۶	۲۲/۶۳	۸/۴۵	۰/۳۴۲	۲۴/۷۳	۲۳/۰۱	۱۲/۶۰	۰/۶۶۳	۲۳۷/۷۱
۱۴/۶۰	۲۴/۲۳	۱۱/۳۴	۰/۳۷۸	۳۰/۰۱	۳۵/۱۰	۹/۰۴	۱/۰۱	۳۱۹/۸۶
۱۲/۴۳	۲۱/۶۹	۹/۷۷	۰/۳۷۶	۲۵/۹۹	۲۹/۷۲	۹/۲۵	۰/۸۶۵	۲۹۷/۰۸

۸/۴۷	۱۶/۹۰	۶/۹۸	-۰/۳۶۲	۱۹/۳۰	۲۰/۲۵	۸/۴۰	-۰/۵۸۹	۲۱۲/۵۸	۶
۶/۴۵	۸/۹۹	۴/۶۹	-۰/۳۹۹	۱۱/۷۷	۱۵/۳۸	۲/۷۲	-۰/۴۴۹	۱۴۸/۰۹	۷
۱۱/۸۳	۲۵/۴۱	۱۰/۰۹	-۰/۳۵۱	۲۸/۷۵	۲۸/۵۳	۱۲/۷۴	-۰/۸۱۷	۲۸۲/۴۰	۸
۹/۵۷	۱۸/۴۰	۷/۸۱	-۰/۳۶۵	۲۱/۴۰	۲۲/۹۵	۸/۶۳	-۰/۶۶۴	۲۲۲/۹۵	۹
۱۴/۲۴	۲۷/۳۷	۱۱/۵۹	-۰/۳۶۶	۳۱/۶۷	۳۴/۰۴	۱۳/۱۳	-۰/۹۹۰	۳۲۹/۴۵	۱۰
کلرید آمونیوم									
۳۲/۵۳	۷۲/۳۹	۲۶/۶۲	-۰/۳۷۴	۷۱/۱۸	۸۲/۵۹	۱۸/۰	۲/۳۳	۵۴۸/۹۴	۱
۱۸/۱۸	۵۸/۸۷	۱۸/۳۷	-۰/۲۹۸	۶۱/۶۶	۴۵/۳۲	۳۴/۳۴	۱/۲۲	۳۱۹/۶۳	۲
۱۸/۰۷	۶۸/۶۹	۲۰/۰۵	-۰/۲۲۱	۹۰/۷۶	۴۵/۶۳	۴۲/۲۹	۱/۲۰	۳۲۵/۶۲	۳
۱۸/۴۹	۷۸/۵۴	۲۰/۸۰	-۰/۲۶۵	۷۸/۴۹	۴۶/۷۶	۵۱/۳۰	۱/۲۳	۳۱۷/۶۸	۴
۲۶/۴۰	۷۰/۲۲	۲۲/۹۰	-۰/۳۶۲	۶۳/۲۷	۶۵/۵۱	۳۵/۶۷	۱/۷۸	۴۸۰/۰۳	۵
۱۴/۰۲	۴۸/۸۹	۱۴/۵۱	-۰/۲۹۱	۴۹/۸۹	۳۴/۵۳	۳۱/۴۱	-۰/۹۵۶	۲۸۱/۷۱	۶
۱۱/۷۲	۲۷/۹۶	۱۰/۳۸	-۰/۳۴۱	۳۰/۴۶	۲۸/۱۸	۱۵/۶۸	-۰/۸۱۳	۲۶۴/۱۷	۷
۲۳/۵۷	۶۴/۱۰	۲۲/۱۰	-۰/۳۲۱	۶۸/۸۷	۵۷/۶۵	۳۶/۰۸	۱/۶۱	۴۸۱/۷۷	۸
۲۴/۲۵	۵۳/۷۱	۲۱/۲۰	-۰/۳۴۰	۶۲/۳۰	۵۹/۷۹	۲۳/۲۷	۱/۶۴	۴۵۰/۲۴	۹
۳۶/۴۰	۷۴/۲۲	۳۰/۷۷	-۰/۳۵۱	۸۷/۶۸	۸۹/۰۶	۳۰/۸۵	۲/۴۸	۵۸۲/۴۷	۱۰

جدول ۷- ضرایب معادلات سینتیکی توصیف‌کننده آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار در مرحله دوم (۲۰۱۷-۱۶۸ ساعت) در خاک‌های مورد مطالعه

انتشار پارابولیکی		تابع توانی		الوویج ساده شده		مرتبه صفر		خاک	
R (mg kg^{-1}) ^h	a (mg kg^{-1})	a _e * b	b (mg kg^{-1}) ^h	a _e (mg kg^{-1})	1/β (mg kg^{-1}) ^h	a (mg kg^{-1})	R ₀ (mg kg^{-1}) ^h		
کلرید کلسیم									
۴/۸۵	۱۳۸/۲۳	۱۲/۰۶	-۰/۲۷۴	۴۴/۰۴	۷۷/۶۳	-۲۳۹/۶۱	-۰/۰۷۷	۱۵۳/۹۹	۱
۳/۴۶	۸۶/۸۶	۸/۱۴	-۰/۲۷۵	۲۹/۶۲	۵۳/۰۱	-۱۶۵/۶۰	-۰/۰۵۲	۱۰۲/۳۴	۲
۱۰/۴	۹۸/۸۰	۹/۶۲	-۰/۲۷۱	۳۵/۵۰	۶۲/۹۶	-۲۰۱/۲۸	-۰/۰۶۱	۱۲۰/۹۵	۳
۵/۰۸	۱۴۷/۳۴	۱۳/۹۲	-۰/۲۴۸	۵۶/۱۵	۷۷/۴۳	-۲۲۰/۶۵	-۰/۰۷۶	۱۵۳/۹۶	۴
۵/۰۷	۱۱۹/۵۸	۱۱/۳۲	-۰/۲۸۳	۴۰/۰۲	۷۷/۵۲	-۲۴۹/۲۷	-۰/۰۷۶	۱۵۰/۵۷	۵
۳/۸۸	۷۳/۴۳	۷/۱۹	-۰/۳۰۹	۲۳/۲۷	۵۹/۰۵	-۲۰۶/۹۳	-۰/۰۵۸	۱۱۶/۶۵	۶
۲/۳۷	۶۴/۴۰	۵/۶۷	-۰/۲۸۰	۲۰/۲۵	۳۷/۹۴	-۱۲۰/۲۶	-۰/۰۳۷	۷۴/۰۴	۷
۴/۹۱	۱۱۳/۶۰	۱۰/۷۷	-۰/۲۸۵	۳۷/۸۲	۷۵/۰۸	-۲۴۳/۵۷	-۰/۰۷۴	۱۴۷/۰۴	۸
۳/۷۸	۱۱۳/۶۰	۸/۵۵	-۰/۲۸۰	۳۰/۵۵	۵۷/۵۰	-۱۸۲/۱۶	-۰/۰۵۷	۱۱۵/۴۷	۹
۵/۶۵	۱۳۶/۰۱	۱۲/۸۱	-۰/۲۸۰	۴۵/۷۷	۸۶/۱۵	-۲۷۳/۵۹	-۰/۰۸۵	۱۶۷/۸۹	۱۰
کلرید آمونیوم									
۶/۳۱	۴۰۲/۲۵	۳۲/۰۸	-۰/۱۶۲	۱۹۸/۰۸	۹۵/۶۳	-۵۰/۹۸	-۰/۰۹۶	۱۹۰/۵۷	۱
۴/۲۱	۲۳۵/۵۸	۱۹/۳۸	-۰/۱۷۷	۱۰۹/۵۰	۶۴/۱۱	-۶۸/۹۸	-۰/۰۶۳	۱۲۴/۵۳	۲
۴/۶۱	۲۳۰/۷۸	۱۹/۳۵	-۰/۱۸۹	۱۰۲/۴۰	۶۹/۸۵	-۱۰۰/۰۹	-۰/۰۷۰	۱۴۰/۰۵	۳
۴/۳۳	۲۵۰/۳۰	۲۰/۳۳	-۰/۱۷۸	۱۱۴/۳۲	۶۷/۶۸	-۷۵/۲۹	-۰/۰۶۷	۱۲۹/۱۵	۴
۶/۵۳	۳۱۸/۹۳	۲۶/۹۰	-۰/۱۹۲	۱۴۰/۱۵	۹۸/۷۳	-۱۴۸/۷۲	-۰/۰۹۹	۱۹۸/۶۵	۵
۴/۲۳	۱۷۲/۷۰	۱۵/۰۳	-۰/۲۱۴	۷۰/۲۶	۶۴/۱۷	-۱۳۱/۵۳	-۰/۰۶۴	۱۲۸/۰۴	۶
۴/۲۳	۱۲۶/۹۳	۱۱/۵۸	-۰/۲۵۳	۴۵/۷۹	۶۳/۹۷	-۱۷۶/۰۱	-۰/۰۶۴	۱۲۸/۸۵	۷
۷/۴۵	۲۶۹/۸۶	۲۳/۹۴	-۰/۲۲۹	۱۰۴/۵۴	۱۱۳/۳۳	-۲۶۸/۲۵	-۰/۱۱۳	۲۱۹/۵۸	۸
۶/۵۴	۲۶۷/۲۱	۲۳/۲۸	-۰/۲۱۴	۱۰۸/۸۰	۹۹/۰	-۲۰۱/۸۱	-۰/۰۹۹	۱۹۷/۸۸	۹
۶/۴۶	۴۵۴/۳۶	۳۵/۲۲	-۰/۱۵۱	۲۳۳/۲۵	۹۷/۹۴	-۱۰/۱۲	-۰/۰۹۸	۱۹۴/۳۰	۱۰

عصاره‌گیر اسید اگزالیک ۰/۰۱ مولار پس از ۱۰۲۸ ساعت با پتاسیم غیر تبادلی همبستگی مثبت و معنی‌دار و با درصد رس و سیلت همبستگی معنی‌داری ندارد. Bahraini Touhani et al., 2010 گزارش کردند که پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده با عصاره‌گیر اسیدسیتریک ۰/۰۱ مولار با سیلت، رس و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک همبستگی ندارد و بیان کردند که علاوه بر مقدار رس و سیلت خاک‌ها احتمالاً نوع کانی‌ها و هواپدگی آنها در رهاسازی پتاسیم از خاک‌ها مؤثر است.

در جدول (۸)، همبستگی بین مقدار پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در پایان مرحله اول و دوم در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج جدول نشان می‌دهد همبستگی بالایی بین پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیر تبادلی و گنجایش تبادل کاتیونی با مقدار پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در پایان مرحله اول و دوم در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار وجود دارد. نتایج (Azadi et al., 2016) نشان داد که پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده با استفاده از

جدول ۸- همبستگی بین ثابت سرعت معادلات انتخابی و مقدار تجمعی پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در عصاره‌گیر کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

ماده	کربنات کلسیم	شن	سیلت	رس	پتاسیم غیر گنجایش تبادل	پتاسیم تبادلی	EC	pH	
آلی	معادل				کاتیونی	تبادلی			
کلرید کلسیم									
۰/۱۹	-۰/۴۳*	-۰/۳۰	۰/۳۸*	۰/۱۷	۰/۳۶*	۰/۸۵**	۰/۲۹	-۰/۵۷**	پتاسیم آزاد شده در پایان مرحله اول
۰/۲۳	-۰/۴۳*	-۰/۳۱	۰/۴۰*	۰/۱۷	۰/۳۵	۰/۸۶**	۰/۲۸	-۰/۵۹**	پتاسیم آزاد شده در پایان مرحله دوم
کلرید آمونیوم									
۰/۴۴*	-۰/۷۹**	-۰/۱۵	۰/۳۲	۰/۰۰۴	۰/۴۹**	۰/۹۲**	۰/۰۹	-۰/۶۸**	پتاسیم آزاد شده در پایان مرحله اول
۰/۴۹**	-۰/۷۵**	-۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۰۴	۰/۴۴*	۰/۹۱**	۰/۰۶	-۰/۶۸**	پتاسیم آزاد شده در پایان مرحله دوم

*: اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۵ درصد و **: اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۱ درصد

در عصاره‌گیر کلرید آمونیوم، هر چه میزان پتاسیم تبادلی و غیر تبادلی بیشتر باشد، آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی بیشتر است. در بررسی ضرایب همبستگی و معادلات رگرسیونی چند متغیره بین خصوصیات خاک و مقدار تجمعی پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده مشاهده شد که پتاسیم تبادلی و غیر تبادلی بیشترین تأثیر را بر رهاسازی مقدار تجمعی پتاسیم غیر تبادلی داشت. پس می‌توان بیان کرد که پتاسیم تبادلی و غیر تبادلی نقش مهمی در فراهم کردن پتاسیم خاک دارند.

نتیجه‌گیری

میزان آزادسازی پتاسیم در خاک‌های مختلف توسط عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار متفاوت است. نتایج نشان داد که به دلیل تفاوت در خصوصیات خاک‌ها و نوع عصاره‌گیر، مقدار پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۲۰۱۷ ساعت در خاک‌ها متفاوت است. در همه خاک‌ها و در هر دو عصاره‌گیر روند رهاسازی پتاسیم، مشابه بود. سرعت رهاسازی پتاسیم در ابتدا زیاد و سپس با سرعت کمتری تا پایان آزمایش ادامه داشت. همچنین باتوجه به بالا بودن ضرایب تبیین و کم بودن خطای استاندارد، معادلات مرتبه صفر، الویج ساده شده، تابع توانی و انتشار پارابولیکی در هر دو مرحله و در هر دو عصاره‌گیر، سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌ها را توصیف نمود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌ها توسط فرآیند پخشیدگی غیریکنواخت کنترل می‌شود. همچنین مقدار تجمعی پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده بعد از ۱۶۸ و ۲۰۱۷ ساعت را می‌توان باتوجه به ویژگی‌های خاک برآورد نمود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

باتوجه به اینکه تعیین مقدار پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در خاک‌ها یک فرایند وقت‌گیر است، می‌توان از طریق رگرسیون چند متغیره، بین مقدار پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در خاک به‌عنوان متغیر وابسته و خصوصیات شیمیایی خاک به‌عنوان متغیر مستقل معادله‌ای به دست آورد و مقدار پتاسیم غیر تبادلی رهاسده در خاک‌ها را تخمین زد.

براین اساس؛ در عصاره‌گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار مقدار پتاسیم غیر تبادلی رهاسده در خاک‌ها پس از ۱۶۸ و ۲۰۱۷ ساعت به‌صورت زیر است:

(رابطه ۲)

$$Y_{168h} = 0.29 EK + 0.079 NEK - 3.53 CEC + 62.40 R^2 = 0.87$$

(رابطه ۳)

$$Y_{2017h} = 0.47 EK + 0.48 NEK - 6.11 CEC + 106.11 R^2 = 0.86$$

همچنین، در عصاره‌گیر کلرید آمونیوم ۰/۰۱ مولار مقدار پتاسیم غیر تبادلی رهاسده در خاک‌ها پس از ۱۶۸ و ۲۰۱۷ ساعت به‌صورت زیر می‌باشد:

(رابطه ۴)

$$Y_{168h} = 0.35 EK + 0.38 NEK - 21.04 R^2 = 0.87$$

(رابطه ۵)

$$Y_{2017h} = 0.59 NEK - 266.32 R^2 = 0.83$$

در این معادلات، Y_{168h} و Y_{2017h} به ترتیب مقدار تجمعی پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم بعد از ۱۶۸ و ۲۰۱۷ ساعت، EK و NEK مقدار پتاسیم تبادلی و غیر تبادلی بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم و CEC ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بر حسب سانتی مول بر کیلوگرم می‌باشد. بر طبق معادلات، در عصاره‌گیر کلرید کلسیم هر چه میزان پتاسیم تبادلی و غیر تبادلی بیشتر و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک کمتر باشد، مقدار پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده بیشتر است. همچنین

REFERENCES

Al-Kanani, T., Mackenzie, A. F., & Ross, G. J. (1984). Potassium status of some Quebec soils: K released

by nitric acid and sodium tetraphenylboron as related to particle size and mineralogy. *Canadian*

- Journal of Soil Science*, 64(1), 99-106.
- Abdi, S., Taj Abadipur, A., & Shirani, H. (2020). Kinetics of non-exchangeable potassium release in some soils under pistachio cultivation in Rafsanjan. *Journal of Pistachio Science and Technology*. 5(9), 106-121. (In Farsi)
- Azadi, A., Baghernezhad, M., Karimian, N.A., & Abtahi, S.A. (2016). Sequential extraction of non-exchangeable potassium and its relationship with soil properties, mineralogy And soil classification in some calcareous soils of Fars province. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*. 30(2),187-199. (In Farsi)
- Badraoui, M., Bloom, P. R., & Delmaki, A. (1992). Mobilization of non-exchangeable K by ryegrass in five Moroccan soils with and without mica. *Plant and Soil*, 140(1), 55-63.
- Baba Ahmadi, M., Owliaie, H.R., Adhami, E., Mehnatkesh, A.m., & Najafi Ghiri, M. (2019). Kinetics of nonexchangeable potassium release in relation to clay mineralogy and Soil evolution in dominant soils orders of Chaharmahal and Bakhtiyary Province. *16th Iranian Soil Science Congress. University of Zanjan, Iran, August 27-29, 2019.* (In Farsi)
- Bedrossian, S., & Singh, B. (2006). Kinetics of potassium release from Vertosols from northern NSW. In *3rd Australian New-Zealand Soils Conference*, University of Sydney, Australia (pp. 1-7).
- Bolt, G. H., Sumner, M. E., & Kamphorst, A. (1963). A study of the equilibria between three categories of potassium in an illitic soil. *Soil Science Society of America Journal*, 27(3), 294-299.
- Cox, A. E., & Joern, B. C. (1997). Release kinetics of nonexchangeable potassium in soils using sodium tetraphenylboron. *Soil Science*, 162(8), 588-598.
- Dhillon, S. K., Sidhu, P. S., & Bansal, R. C. (1989). Release of potassium from some benchmark soils of India. *Journal of Soil Science*, 40(4), 783-797.
- Debankur, S., Brar, B.S., & Dheri, G.S. (2019). Organic and inorganic integrated fertilization improves non-exchangeable potassium release and potassium availability in Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 50(1), 1-10.
- Fatemi, A. (2017). Kinetics of soil potassium release under long-term imbalanced fertilization in calcareous soils. *Pedosphere*, 27(6), 1105-1115.
- Gee, G. W., and Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. Methods of soil analysis: In: Klute A. (ed.) *Methods of Soil Analysis: Part I-Physical and mineralogy methods*. Agron. Monogr. 9. 2nd ed. *American Society Agronomy and Soil Science Society of America*, Madison, Wisconsin. pp. 383-412.
- Ghiri, M. N., Abtahi, A., Karimian, N., Owliaie, H. R., & 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. (In Farsi)
- Gil-Sotres, F., & Rubio, B. (1992). Kinetics and structural effects of the extraction of non-exchangeable potassium from the clay fraction of soils of Galicia (NW Spain). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 23(1-2), 143-156.
- Havlin, J. L., Westfall, D. G., & Olsen, S. R. (1985). Mathematical models for potassium release kinetics in calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal*, 49(2), 371-376.
- Hosseinpur, A. R., Kalbasi M. & Khademi H. (2000). Kinetics of nonexchangeable potassium release in soil and soil components of Guilan province. *Journal of Soil and Water Sciences*, 14(2), 99-113. (In Farsi)
- Hosseinpur, A.R., Motaghian H. & Raeisi T. (2011). Evaluation of potassium release properties using calcium chloride and dilute citric acid solutions in some calcareous soils. *Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources*, 17(64), 221-236. (In Farsi)
- Jalali, M. (2005). Release kinetics of nonexchangeable potassium in calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(13-14), 1903-1917.
- Jalali, M. (2006). Kinetics of non-exchangeable potassium release and availability in some calcareous soils of western Iran. *Geoderma*, 135, 63-71.
- Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum In: Sparks D.L. (ed.) *Chemical Methods of Soil Analysis*. *Soil Science Society of America Madison* pp. 437-447.
- Lopez-Pineiro, A., & Navarro, A. G. (1997). Potassium release kinetics and availability in unfertilized Vertisols of southwestern Spain. *Soil Science*, 162(12), 912-918.
- Martin, H. W., & Sparks, D. L. (1983). Kinetics of nonexchangeable potassium release from two coastal plain soils. *Soil Science Society of America Journal*, 47(5), 883-887.
- Molavi, R., Baghernejad M., Ghasemi-Fasaei R. & Zarei M. (2020). Release characteristics of potassium from native reserves of some calcareous soils of Iran and their relationship with yield and potassium uptake by ryegrass. *Soil Research*, 58(8), 770-778.
- Mutscher, H. (1995). Measurement and assessment of soil potassium. International potash institute Research Topics Number 4”.
- Naeini, S. M., & Rezaei, M. (2009). Effect of calcium and ammonium cations on potassium release kinetics in soil, zeolite and soil and zeolite mixtures. *11th Iranian Soil Science Congress, July 21-23, Gorgan.* (In Farsi)
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks D.L. (ed) *Methods of Soil Analysis*. *Soil Science Society of America*, Madison. pp. 961-1010.
- Pratt, P. F. (1982). K: Chemical and microbiological properties. In *Methods of soil analysis*, ed. A. L. Page, R. H. Miller., and D. R. Kenney. *American Society Agronomy*. Madison, Wisconsin, pp 225-



- 46,
- Pohlman, A. A., & Mccoll, J. G. (1986). Kinetics of metal dissolution from forest soils by soluble organic acids. *Journal of Environmental Quality*, 15(1), 86-92.
- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D.L.,(Eds.), *Methods of soil analysis, Part 3- Chemical Methods. Agronomy Monograph, vol. 9. American Society Agronomy and Soil Science Society of America*, Madison, Wisconsin, pp 417-435.
- Rubio, B., & Gil-Sotres, F. (1996). Determination of K forms in K-fertilized soils by electro-ultrafiltration. *Plant and soil*, 180(2), 303-310.
- Singh, M., Singh, V. P., & Reddy, D. D. (2002). Potassium balance and release kinetics under continuous rice-wheat cropping system in Vertisol. *Field Crops Research*, 77(2-3), 81-91.
- Song, S. K., & Huang, P. M. (1988). Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. *Soil Science Society of America Journal*, 52(2), 383-390.
- Sparks, D. L. (1987). Potassium dynamics in soils. In *Advances in Soil Science* (pp. 1-63). Springer, New York, NY.
- Shahraki, S. Z. A., Hosseinpour, A. R., Motaghian H. R., & Ghorbani, SH. (2016). Kinetics of non-exchangeable potassium release in aggregates of different sizes A number of calcareous soils. *Journal of Soil and Water Sciences*, 22(1), 267-278. (In Farsi)
- Sakeri, S. (2018). Effect of soil buffering capacity and clay minerals on the rate coefficient of non-Exchangeable potassium release. *Malaysian Journal of Soil Science*, 22:59-75.
- Sharpley, A. N. (1990). Reaction of fertilizer potassium in soils of different mineralogy.
- Srinivasarao, C., A. Swarup, A. Subba Rao & Raja Gopal, V. (1999). Kinetics of nonexchangeable potassium release from a tropaepts as influenced by long-term cropping, fertilization and manuring. *Australia Journal of Soil Research*, 37, 317- 328.
- Serrano, S., Garrido, F., Campbell, C. G., & Garcia-González, M. T. (2005). Competitive sorption of cadmium and lead in acid soils of Central Spain. *Geoderma*, 124(1-2), 91-104.
- Sumner, M. E., & Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 1201-1229.
- Tawhani, M. B., Dordipur, E., & Movahedi Naini, A. (2010). Release rate of nonexchangeable potassium using citric acid and dilute calcium chloride in the arable soils of the dominant series of Golestan province. *Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources*. 14, 113-126. (In Farsi)
- Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil activity. In: Sparks, D.L.,(Eds), *Methods of soil analysis, Part 3- Chemical Methods. Agronomy Monograph, vol. 9. American Society Agronomy and Soil Science Society of America*, Madison, Wisconsin, pp 475-490.
- Zareian, Gh.R., Hadi Farpoor, M., Hejazi-Mehrizi, M., & Jafari, A. (2018). Kinetics of non-exchangeable potassium release in selected soil orders of southern Iran. *Soil and Water Research*. 13(4), 200-207. (In Farsi)