

تأثیر کاربرد کود سوپرفسفات بر سرعت آزادشدن پتاسیم غیرتبادلی در تعدادی از خاک‌های آهکی

علیرضا حسین‌پور، مرضیه براتی زانیانی* و محمدحسن صالحی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۲۴)

چکیده

وقتی کود فسفره در خاک استفاده شود، سرعت آزادشدن پتاسیم ممکن است تحت تأثیر کاربرد فسفر باشد. هدف این پژوهش، تأثیر کود سوپرفسفات بر سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در ۱۰ خاک آهکی است. برای این منظور، مقدار ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر از منبع مونوکلسیم دی‌هیدروژن فسفات به خاک‌ها اضافه شد و خاک‌های تیمار شده و تیمار نشده به مدت ۹۰ روز در انکوباتور با رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت زراعی و دمای $25^{\circ}\text{C} \pm 1$ نگهداری شدند. پس از آن، آزادشدن پتاسیم غیرتبادلی به روش عصاره‌گیری متوالی با محلول کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار در مدت زمان ۲۰۱۷ ساعت در خاک‌های تیمار شده و تیمار نشده مطالعه شد. نتایج نشان داد پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده در خاک‌های تیمار شده از خاک‌های تیمار نشده کمتر بود. میانگین پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده بعد از ۲۰۱۷ ساعت در خاک‌های تیمار شده، ۲۶۰/۶ و در خاک‌های تیمار نشده، ۳۰۳/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی در تمام خاک‌ها در مراحل اولیه سریع بود و در مراحل بعدی با سرعت کمتری تا پایان آزمایش ادامه یافت. سرعت آزادشدن پتاسیم غیرتبادلی با استفاده از معادله‌های سینتیکی ارزیابی شد. با توجه به بالا بودن ضرایب تشخیص و کم بودن خطای استاندارد، سرعت آزادشدن پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌های تیمار شده و خاک‌های تیمار نشده، با معادله تابع توانی توصیف شد. نتایج این پژوهش می‌تواند برای توصیه کودی در خاک‌های آهکی مورد مطالعه مؤثر باشد.

واژه‌های کلیدی: آزادشدن، مونوکلسیم فسفات، پتاسیم غیرتبادلی

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

*. مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: marziehbarati99@yahoo.com

مقدمه

پتاسیم و فسفر از عناصر مورد نیاز گیاه هستند. پتاسیم به ترتیب سهولت جذب برای گیاه در خاک، به چهار شکل شامل پتاسیم محلول، پتاسیم تبادل، پتاسیم غیرتبادلی و پتاسیم ساختمانی وجود دارد. تعادل موجود بین شکل‌های مختلف پتاسیم در خاک، باعث تداوم تأمین پتاسیم برای گیاه می‌شود (۱۷). پتاسیم غیرتبادلی در تعدادی از خاک‌ها، منبع تأمین پتاسیم محسوب می‌شود و می‌تواند بخش قابل توجهی از پتاسیم مورد نیاز گیاه در طول فصل رشد را تأمین کند. قابلیت استفاده پتاسیم غیرتبادلی به مقدار آن بستگی ندارد، بلکه به سرعت آزادسازی و مقداری از آن که می‌تواند به شکل‌های تبادل درآید، بستگی دارد (۱۲).

اثر متقابل بین فسفر و پتاسیم ممکن است بر قابلیت استفاده آن‌ها در خاک تأثیر داشته باشد. تأثیر کاربرد پتاسیم در ترکیب با فسفر، بر رفتار فسفر در خاک به وسیله تعدادی از پژوهشگران بررسی شده است (۳ و ۱۱). همچنین، استفاده از کودهای بدون پتاسیم ممکن است بر شیمی پتاسیم در خاک تأثیر گذارد. توزیع پتاسیم در خاک نزدیک به محل قرارگیری کود، به طور قابل توجهی با افزودن کودهای حاوی فسفر تحت تأثیر قرار می‌گیرد (۴). ماهیت واکنش کودهای فسفره در خاک ممکن است با فاصله از کود، به دلیل تغییر غلظت فسفر و pH، متفاوت باشد. غلظت زیاد فسفر و pH کم می‌تواند باعث تغییرات قابل توجهی در خاک و همچنین آزادسازی پتاسیم از مواد معدنی حاوی پتاسیم در خاک شود (۱۵).

باتوجه به شرایط متفاوت خاک‌ها، از عصاره‌گیرها و روش‌های مختلفی برای مطالعات آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی استفاده شده است؛ از جمله محلول‌های نمکی رقیق، اسیدهای آلی، رزین‌های تبادل کاتیونی، سدیم تترافنیل بورات، الکترواولترافیلتراسیون و اسید نیتریک است (۱۲). مولوی و همکاران (۱۹)، مطالعه‌ای روی رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی با عصاره‌گیر تترافنیل بران سدیم در مدت ۱۴۴ ساعت در خاک‌های آهکی انجام دادند. عبدی و همکاران (۱)، سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی را در خاک‌های تحت کشت پسته با

عصاره‌گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار بررسی کردند و بیان کردند که پتاسیم غیرتبادلی می‌تواند نقش بسزایی در تغذیه گیاه داشته باشد. کار و همکاران (۱۴)، سرعت آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی را با عصاره‌گیر اسید اگزالیک ۰/۰۱ مولار در مدت ۲۰۰ ساعت بررسی کردند و میزان پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده در خاک‌ها را ۸۶ تا ۲۵۳ سانتی‌مول بر کیلوگرم گزارش کردند.

معادله‌های بسیاری برای توصیف سرعت واکنش‌ها در کانی‌های رسی و خاک استفاده شده است (۹ و ۱۲). معادلات سینتیکی استفاده شده در توصیف واکنش‌های شیمیایی شامل معادلات مرتبه صفر، مرتبه اول، الوویچ، الویچ ساده شده، انتشار پارابولیکی و تابع توانی هستند. فاطمی (۵)، سرعت رهاسازی پتاسیم در خاک‌های آهکی را تحت کوددهی طولانی مدت با عصاره‌گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار بررسی کرد و بیان کرد که معادله تابع توانی، به عنوان مدل مناسب برای توصیف سرعت رهاسازی پتاسیم در این خاک‌ها است. کار و همکاران (۱۳)، معادله‌های مرتبه صفر، مرتبه اول، الوویچ ساده شده، تابع توانی و انتشار پارابولیکی را بر داده‌ها برازش دادند و گزارش کردند بر اساس بالاترین ضریب تشخیص و کمترین خطای استاندارد، معادله الوویچ توانست سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌ها را توصیف کند.

این مطالعه باتوجه به مصرف کودهای فسفره در خاک‌های آهکی به عنوان یکی از کودهای اصلی در تولیدات کشاورزی و احتمال تأثیر آن بر سرعت آزادشدن پتاسیم غیر تبادلی انجام شده است. هدف این مطالعه بررسی اثر کود سوپرفسفات بر سرعت آزادشدن پتاسیم غیرتبادلی در تعدادی از خاک‌های آهکی است.

مواد و روش‌ها

به منظور مطالعه اثر کودهای فسفره بر سرعت آزادشدن پتاسیم غیرتبادلی در خاک، ۳۰ نمونه خاک کشاورزی از دشت شهرکرد از عمق ۳۰ سانتی‌متری تهیه شد. در نمونه‌های اولیه درصد رس، پتاسیم تبادل، پتاسیم غیرتبادلی و کربنات کلسیم معادل تعیین شد و بر اساس تنوع این ویژگی‌ها، ۱۰ نمونه خاک برای

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 کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار عصاره گیری شدند. پتاسیم موجود در محلول عصاره گیری شده با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر (مدل کورنینگ ۴۱۰) اندازه گیری شد. دوباره ۲۰ میلی لیتر از محلول عصاره گیر به نمونه ها اضافه شد و پس از ۳۰ دقیقه تکان دادن توسط دستگاه تکان دهنده برقی، نمونه ها به انکوباتور منتقل شد (۱۰).

بعد از جمع آوری داده ها، معادله های مرتبه صفر، مرتبه یک، الویج ساده، تابع توانی و انتشار پارابولی (جدول ۱) بر داده ها برازش داده شد (۷ و ۱۸). بر اساس بیشترین ضریب تشخیص و کمترین خطای استاندارد، بهترین مدل برای توصیف سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی انتخاب شد. خطای استاندارد با استفاده از رابطه زیر تعیین شد:

$$SE = \left[\frac{\sum (K_t - K^*)^2}{n - 2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

در معادله (۱)، K_t و K^* به ترتیب نشان دهنده مقدار پتاسیم غیرتبادلی اندازه گیری شده و محاسبه شده به وسیله مدل در زمان t و n تعداد اندازه گیری ها است (۱۸).

نتایج و بحث

برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. همه خاک ها دارای pH قلیایی بوده و دامنه تغییرات آن ۷/۷۹ تا ۷/۹۷ بود. قابلیت هدایت الکتریکی خاک ها در دامنه ۰/۳۳ تا ۰/۳۸ دسی زیمنس بر متر هستند. دامنه تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی خاک ها ۱۴/۳۵ تا ۲۵ سانتی مول بار بر کیلوگرم متغیر است. دامنه تغییرات 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 فسفر قابل استفاده در خاک ها ۱۳/۶۲ تا ۳۱/۵۹ میلی گرم بر کیلوگرم بود. مقدار پتاسیم تبادلی و غیر تبادلی خاک ها به ترتیب ۸۵ تا ۴۸۳ و ۹۴۵ تا ۱۵۲۷ میلی گرم بر کیلوگرم متغیر بود که کمترین مقدار مربوط

انجام پژوهش انتخاب شد. سپس ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک ها شامل توزیع اندازه ذرات با روش هیدرومتر (۶)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۲ به ۱ آب به خاک (۲۲)، pH در سوسپانسیون ۲ به ۱ آب به خاک (۲۶)، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (۲۰)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با اسید (۱۶)، فسفر قابل استفاده به روش بی کربنات سدیم نیم نرمال در pH=۸/۵ (۲۱) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به روش استات سدیم یک نرمال (۲۵) تعیین شد. همچنین پتاسیم تبادلی خاک ها به روش استات آمونیوم یک نرمال (۱۴) و پتاسیم غیرتبادلی خاک ها به روش اسید نیتریک مولار جوشان (۲) عصاره گیری شد و پتاسیم عصاره گیری شده با دستگاه فلیم فتومتر (مدل کورنینگ ۴۱۰) اندازه گیری شد.

برای مطالعه تأثیر کود فسفره بر سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک های آهکی، خاک ها در دو گروه تیمار نشده و تیمار شده با کود فسفره بررسی شدند. بدین منظور، به خاک های تیمار شده با کود فسفره، ۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم فسفر از نمک مونو کلسیم فسفات به صورت محلول اضافه شد و کود فسفره با خاک مخلوط شد. سپس، هر دو گروه خاک های تیمار شده و تیمار نشده به مدت سه ماه در رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت زراعی و در دمای 25 ± 1 درجه سانتی گراد در انکوباتور نگهداری شدند. در پایان انکوباسیون نمونه ها هوا خشک شد. همچنین، پتاسیم تبادلی (۱۴) و فسفر قابل استفاده (۲۱)، در این خاک ها اندازه گیری شد.

قبل از شروع آزمایش های سینتیکی برای خارج کردن پتاسیم تبادلی و محلول، خاک ها با کلرید کلسیم ۱ مولار اشباع شدند (۴). سپس برای مطالعه سرعت آزاد شدن پتاسیم غیرتبادلی از روش عصاره گیری متوالی استفاده شد. برای این منظور به ۲ گرم از نمونه خاک های اشباع شده با کلسیم، ۲۰ میلی لیتر از محلول کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار اضافه شد و نمونه ها به وسیله تکان دهنده برقی به مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شدند. سپس، نمونه ها در دستگاه انکوباتور در دمای 25 ± 1 درجه سانتی گراد قرار داده شد. نمونه ها در زمان های ۱،

جدول ۱. معادله‌های سینتیکی استفاده شده

منبع	شکل معادلات*	نام معادلات
۱۷	$(K_0 - K_t) = a_0 - R_0t$	واکنش مرتبه صفر
۱۷	$\ln(K_0 - K_t) = a_1 - R_1t$	واکنش مرتبه اول
۷	$\ln K_t = \ln a_e + b \ln t$	تابع توانی
۷	$K_t = a + R_0t^{0.5}$	انتشار پارابولیک
۷	$K_t = a + 1/\beta \ln t$	الوویج ساده

* K_t : مقدار پتاسیم تجمعی آزاد شده (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در زمان t , K_0 بیشترین 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.

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

خاک	pH	EC ($dS m^{-1}$)	پتاسیم تبادلی	پتاسیم غیرتبادلی	پتاسیم فسفر قابل استخراج	گنجایش تبادل کاتیونی ($Cmolc kg^{-1}$)	رس	سیلت	کربنات کلسیم معدل	ماده آلی
۱ طاقانک	۷/۷۹	۰/۳۷	۳۱۸	۱۳۶۴	۲۱/۵۹	۱۷/۹۷	۲۹/۸۴	۱۵/۱۲	۹/۵۰	۱/۰۵
۲ تومانک	۷/۹۱	۰/۳۳	۲۵۰	۱۰۷۲	۱۵/۲۶	۲۲/۵۴	۴۵/۸۴	۲۹/۱۲	۲۰/۲۵	۰/۴۵
۳ مهدیه	۷/۹۱	۰/۳۷	۲۱۰	۱۱۶۰	۱۳/۶۲	۲۰/۲۲	۴۷/۸۴	۲۷/۱۲	۲۹/۵۰	۰/۹۴
۴ سامان	۷/۹۱	۰/۳۸	۳۲۷	۱۲۴۳	۱۴/۹۱	۱۹/۵۷	۴۹/۸۴	۲۵/۱۲	۳۴/۲۵	۰/۵۴
۵ کاکولک	۷/۸۲	۰/۳۳	۲۷۵	۱۴۷۱	۱۶/۳۸	۲۰/۵۰	۴۳/۸۴	۲۷/۱۲	۱۶/۲۵	۰/۶۰
۶ هفشجان	۷/۸۹	۰/۳۵	۱۵۶	۱۰۴۰	۱۴/۹۲	۱۷/۶۰	۴۱/۸۴	۲۳/۱۲	۳۶/۵۰	۰/۶۹
۷ دستگرد	۷/۹۷	۰/۳۶	۸۵	۹۴۵	۱۵/۲۸	۱۴/۳۵	۲۱/۸۴	۱۷/۱۲	۳۶/۰	۰/۵۹
۸ فرخشهر	۷/۸۹	۰/۳۷	۲۸۱	۱۲۳۰	۱۷/۵۹	۱۶/۶۵	۲۵/۸۴	۲۵/۱۲	۳۵/۵۰	۰/۹۱
۹ هرچگان	۷/۸۹	۰/۳۵	۲۲۹	۱۲۴۶	۱۴/۰۱	۲۳/۰۷	۵۱/۸۴	۱۹/۱۲	۱۷/۵۰	۰/۹۷
۱۰ شیخ‌شبان	۷/۸۶	۰/۳۶	۴۸۳	۱۵۲۷	۱۸/۷۳	۲۵/۰	۳۹/۸۴	۳۷/۱۲	۱۲/۵۰	۰/۷۶

۱۵۲ تا ۵۳۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و مقدار فسفر قابل استفاده، ۱۹/۵۷ تا ۴۲/۷۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. مقایسه نتایج پتاسیم تبادلی قبل و بعد از انکوباسیون خاک‌ها (جدول ۲ و ۳)، نشان می‌دهد که پتاسیم تبادلی پس از اضافه کردن کود فسفره و انکوباسیون خاک‌ها افزایش یافته است. این نتیجه ممکن است به دلیل تأثیر واکنش کودهای فسفره در خاک و تبدیل پتاسیم ساختمانی و غیرتبادلی به پتاسیم تبادلی بوده است. در این رابطه به تحقیقات بیشتری نیاز است. مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده در زمان‌های

به خاک ۷ و بیشترین مقدار مربوط به خاک ۱۰ است. این نتایج نشان داد که وضعیت حاصل‌خیزی پتاسیم در خاک‌های مورد مطالعه متفاوت است. همچنین زیادبودن مقدار پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی در خاک‌ها می‌تواند باعث عدم نیاز به کاربرد کودهای پتاسیمی شود (۱۴).

جدول ۳، میزان پتاسیم تبادلی و فسفر قابل استفاده در خاک‌های تیمار شده بعد از سه ماه انکوباسیون را نشان می‌دهد. دامنه تغییرات مقدار پتاسیم تبادلی در خاک‌های تیمار شده،

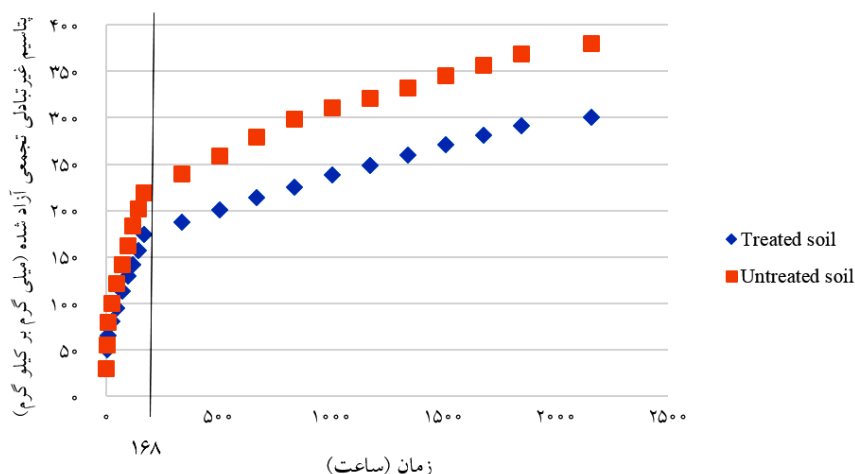
جدول ۳. برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های تیمار شده بعد از انکوباسیون

خاک	پتاسیم تبدالی	فسفر قابل استخراج
(mg kg ⁻¹)		
۱	۴۶۲	۴۲/۷۷
۲	۳۷۹	۳۰/۴۳
۳	۳۳۶	۲۲/۶۰
۴	۴۸۲	۲۳/۸۷
۵	۴۹۲	۲۵/۰۵
۶	۲۷۰	۲۴/۹۸
۷	۱۵۲	۲۴/۱۸
۸	۴۳۵	۲۶/۰۱
۹	۳۳۴	۱۹/۵۷
۱۰	۵۳۸	۲۶/۵۸

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 (۲۴).

همان‌طور که نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد، پتاسیم غیرتبدالی آزاد شده در خاک‌های تیمار شده در مقایسه با خاک‌های تیمار نشده کمتر است. در خاک‌های تیمار شده با کود فسفره در اثر انحلال مونوکلسیم فسفات، اسید فسفریک تشکیل می‌شود. این اسید با کانی‌های خاک واکنش می‌دهد که باعث حل شدن کانی و آزاد شدن پتاسیم غیرتبدالی از کانی‌های حاوی پتاسیم به محلول خاک و به احتمال زیاد افزایش پتاسیم تبدالی می‌شود (۱۵). به احتمال زیاد تیمار خاک‌ها با مونوکلسیم فسفات باعث آزاد شدن پتاسیم غیرتبدالی که با انرژی کمتری نگهداری شده است، می‌شود. در نتیجه در خاک‌های تیمار شده با فسفر پس از خارج کردن پتاسیم تبدالی، پتاسیم غیرتبدالی باقیمانده در خاک با انرژی بیشتری نگهداری می‌شود. وانگ و همکاران (۲۸)، کاهش رهاسازی پتاسیم در اثر کاربرد مونوکلسیم فسفات در خاک‌های آهکی را تحت تأثیر کاهش غلظت کلسیم در محلول خاک به دلیل رسوب فسفات و ایجاد رسوب $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ و تبدیل آن به ترکیبات کم‌محلول‌تر مانند

مختلف در خاک‌های تیمار شده و خاک‌های تیمار نشده با عصاره‌گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار به‌عنوان نمونه در خاک شماره ۴ در شکل ۱، نشان داده شده است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، شیب خط مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبدالی آزاد شده با زمان، در زمان ۱۶۸ ساعت در خاک‌های تیمار شده و تیمار نشده متفاوت است. نتایج نشان می‌دهد در تمام خاک‌ها، سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبدالی تا ۱۶۸ ساعت با سرعت بیشتری بوده است 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 (۸ و ۱۲). در جدول ۴، مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبدالی آزاد شده با عصاره‌گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار در خاک‌های تیمار شده و خاک‌های تیمار نشده نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، دامنه تغییرات پتاسیم غیرتبدالی آزاد شده در خاک‌های تیمار نشده و خاک‌های تیمار شده بعد از ۲۰۱۷ ساعت به ترتیب ۶/۱۷۲-۳/۳۹۱ و ۱۵۲-۳۳۰/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. بیشترین مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبدالی آزاد شده در خاک‌های تیمار نشده در خاک شماره ۱۰ و در خاک تیمار شده در خاک شماره ۱ و کمترین مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبدالی آزاد شده در خاک تیمار شده و خاک تیمار نشده در خاک شماره ۷ است. تفاوت در مقدار کل پتاسیم آزاد شده در خاک‌های مختلف می‌تواند به علت



شکل ۱. مقدار پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در خاک شماره ۴ تیمار نشده و تیمار شده

جدول ۴. مقدار تجمع پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در خاک‌های تیمار نشده و خاک‌های تیمار شده

خاک	تیمار نشده		تیمار شده	
	بعد از ۱۶۸ ساعت	بعد از ۲۰۱۷ ساعت	بعد از ۱۶۸ ساعت	بعد از ۲۰۱۷ ساعت
۱	۲۰۴/۰	۳۶۱/۸	۱۹۲/۵	۳۳۰/۵
۲	۱۳۶/۰	۲۴۳/۰	۱۱۴/۵	۲۱۰/۵
۳	۱۵۲/۱	۲۸۳/۶	۱۳۰/۵	۲۳۲/۵
۴	۲۱۸/۶	۳۷۹/۸	۱۷۴/۰	۳۰۱/۰
۵	۱۹۲/۵	۳۸۴/۸	۱۷۰/۵	۲۹۹/۵
۶	۱۳۱/۸	۲۵۰/۰	۱۱۴/۰	۲۱۲/۰
۷	۹۶/۵	۱۷۲/۶	۸۳/۵	۱۵۲/۰
۸	۱۸۳/۱	۳۳۶/۸	۱۶۸/۰	۲۹۵/۵
۹	۱۴۶/۶	۲۶۴/۶	۱۳۴/۵	۲۴۳/۵
۱۰	۲۲۰/۳	۳۹۱/۳	۱۸۵/۰	۳۲۹/۵
میانگین	۱۶۸/۱	۳۰۳/۳	۱۴۶/۷	۲۶۰/۶

معادله‌های سینتیکی (جدول ۱)، بر داده‌های آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌های مختلف در عصاره‌گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار در خاک‌های تیمار نشده و خاک‌های تیمار شده برآزش داده شد. معادله‌ای که دارای بیشترین ضریب تشخیص (R^2) و کمترین خطای استاندارد (SE) باشد، می‌تواند سرعت رهاسازی پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌ها را توصیف کند (۱۸). بر این اساس معادلات تابع توانی، الوویچ ساده شده و انتشار پارابولیکی در خاک‌های تیمار نشده (جدول ۵) و تیمار شده (جدول ۶) می‌توانند

هیدروکسی آپاتیت در خاک دانستند. همچنین تران (۲۷)، کاهش آزادسازی پتاسیم در خاک‌ها را ناشی از رسوب فسفات‌های حاوی پتاسیم در غلظت زیاد فسفات بیان کرد. فاطمی (۵)، بیان کرد که آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌های کوددهی شده با سوپرفسفات تریپل به پتانسیل تثبیت و ظرفیت جذب فسفر در خاک‌ها بستگی دارد. وی بیان کرد که کمترین آزادسازی پتاسیم در خاک‌های منطقه گکی و ققلستان بود که بیشترین تثبیت فسفر در این خاک‌ها دیده شد.

جدول ۵. ضرایب تشخیص (R^2) و خطای استاندارد (SE) ($mg\ kg^{-1}$) در معادله‌های سینتیکی استفاده شده در خاک‌های تیمارنشده

خاک	مرتبۀ صفر		مرتبۀ اول		الوویج ساده شده		تابع توانی		انتشار پارابولیکی	
	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE
۱	۰/۸۲۴	۴۳/۷۰	۰/۸۶۸	۰/۵۰۲	۰/۹۳۵	۲۶/۱۵	۰/۹۹۳	۸/۴۲	۰/۹۵۴	۲۱/۹۳
۲	۰/۸۱۹	۳۰/۶۲	۰/۹۱۱	۰/۴۰۴	۰/۹۳۰	۱۹/۱۰	۰/۹۹۲	۶/۳۹	۰/۹۵۶	۱۵/۰۸
۳	۰/۸۳۳	۳۴/۰۰	۰/۹۰۲	۰/۴۳۰	۰/۹۲۳	۲۳/۰۶	۰/۹۹۵	۵/۶۸	۰/۹۸۵	۶/۴۳
۴	۰/۷۹۸	۴۹/۴۷	۰/۸۶۸	۰/۵۰۵	۰/۹۴۵	۲۵/۶۵	۰/۹۹۰	۱۱/۰۴	۰/۹۴۲	۲۶/۳۴
۵	۰/۸۲۶	۴۳/۰۳	۰/۸۸۵	۰/۴۷۶	۰/۹۲۷	۲۷/۷۹	۰/۹۹۳	۸/۶۰	۰/۹۵۹	۲۰/۷۷
۶	۰/۸۴۸	۲۸/۴۵	۰/۸۸۷	۰/۴۵۲	۰/۹۱۶	۲۱/۰۸	۰/۹۹۴	۵/۴۴	۰/۹۶۹	۱۲/۸۸
۷	۰/۸۱۶	۲۱/۹۴	۰/۹۲۳	۰/۳۶۱	۰/۹۳۲	۱۳/۲۹	۰/۹۹۰	۴/۹۴	۰/۹۵۳	۱۱/۰۵
۸	۰/۸۳۰	۴۰/۲۶	۰/۸۷۵	۰/۴۸۵	۰/۹۳۰	۲۵/۷۳	۰/۹۹۴	۷/۱۸	۰/۹۶۰	۱۹/۳۵
۹	۰/۸۲۱	۳۲/۰۹	۰/۸۷۴	۰/۴۶۸	۰/۹۳۸	۱۱/۷۳	۰/۹۹۲	۶/۶۴	۰/۹۵۵	۱۶/۰۹
۱۰	۰/۸۲۱	۴۸/۱۰	۰/۸۷۷	۰/۴۹۸	۰/۹۳۲	۲۹/۷۱	۰/۹۹۲	۹/۸۸	۰/۹۵۵	۲۳/۹۳
میانگین	۰/۸۲۳	۳۷/۱۶	۰/۸۸۷	۰/۴۵۸	۰/۹۳۰	۲۲/۳۲	۰/۹۹۲	۷/۴۲	۰/۹۵۸	۱۷/۳۸

جدول ۶. ضرایب تشخیص (R^2) و خطای استاندارد (SE) ($mg\ kg^{-1}$) در معادله‌های سینتیکی استفاده شده در خاک‌های تیمارنشده

خاک	مرتبۀ صفر		مرتبۀ اول		الوویج ساده شده		تابع توانی		انتشار پارابولیکی	
	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE	R^2	SE
۱	۰/۷۹۸	۴۱/۴۸	۰/۸۵۷	۰/۵۰۹	۰/۹۵۳	۲۰/۵۴	۰/۹۸۹	۹/۶۵	۰/۹۳۸	۲۲/۸۸
۲	۰/۸۴۹	۲۲/۷۲	۰/۸۷۲	۰/۴۵۳	۰/۹۱۸	۱۶/۷۱	۰/۹۹۱	۵/۳۴	۰/۹۶۵	۱۰/۹۳
۳	۰/۸۳۱	۲۶/۲۹	۰/۸۵۵	۰/۴۸۸	۰/۹۳۰	۱۶/۸۵	۰/۹۹۰	۶/۴۲	۰/۹۵۴	۱۳/۶۲
۴	۰/۸۲۰	۳۵/۹۶	۰/۸۶۱	۰/۴۹۶	۰/۹۴۲	۱۲/۵۵	۰/۹۹۰	۸/۲۶	۰/۹۸۱	۷/۱۱
۵	۰/۸۱۸	۳۵/۹۹	۰/۸۵۶	۰/۵۰۰	۰/۹۴۱	۱۲/۶۷	۰/۹۹۰	۸/۳۹	۰/۹۵۰	۱۸/۷۸
۶	۰/۸۵۰	۲۳/۲۷	۰/۸۷۵	۰/۴۵۲	۰/۹۱۷	۱۷/۲۷	۰/۹۹۲	۵/۱۶	۰/۹۶۶	۱۰/۹۷
۷	۰/۸۳۶	۱۷/۳۵	۰/۹۰۰	۰/۳۸۶	۰/۹۲۵	۱۱/۷۳	۰/۹۹۳	۳/۴۹	۰/۹۶۱	۸/۳۹
۸	۰/۸۱۸	۳۵/۰۴	۰/۸۵۸	۰/۵۰۰	۰/۹۳۸	۲۰/۴۸	۰/۹۹۱	۷/۵۰	۰/۹۵۱	۱۸/۲۱
۹	۰/۸۳۴	۲۸/۶۸	۰/۸۷۷	۰/۴۶۰	۰/۹۱۷	۲۰/۲۴	۰/۹۹۰	۶/۸۶	۰/۹۶۰	۱۳/۹۹
۱۰	۰/۸۲۴	۳۹/۲۴	۰/۸۵۳	۰/۵۲۰	۰/۹۳۹	۱۴/۳۱	۰/۹۸۹	۹/۵۱	۰/۹۸۳	۷/۵۲
میانگین	۰/۸۲۷	۳۰/۶۰	۰/۸۶۶	۰/۴۷۶	۰/۹۳۲	۱۶/۳۳	۰/۹۹۰	۷/۰۵	۰/۹۶۱	۱۳/۲۴

بود. مولوی و همکاران (۱۹)، بیان کردند که سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌های آهکی با معادله‌های تابع توانی و مرتبه دوم توصیف شد.

همان‌طور که نتایج نشان داد، معادله‌های الوویج ساده شده، انتشار پارابولیکی و تابع توانی سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی در

سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌ها را توصیف نماید. عبدی و همکاران (۱)، گزارش کردند که از بین معادله‌های سینتیکی مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، مرتبه سوم، تابع توانی، انتشار پارابولیکی و الوویج ساده شده، معادله تابع توانی قادر به توصیف سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌ها

جدول ۷. ضرایب معادله تابع توانی سینتیکی توصیف کننده آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی در خاک‌های تیمارنشده و تیمار شده

خاک	خاک تیمار نشده		خاک تیمار شده		خاک
	a _e	b	a _e	b	
	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹) h ⁻¹	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹) h ⁻¹	
۱	۴۳/۷۹	۰/۲۷۵	۴۳/۹۳	۰/۲۶۲	۱۱/۵۱
۲	۲۶/۲۵	۰/۲۹۲	۲۳/۸۶	۰/۲۸۱	۶/۷۰
۳	۳۰/۵۶	۰/۲۹۲	۲۸/۶۱	۰/۲۷۰	۷/۷۲
۴	۴۶/۳۹	۰/۲۷۵	۳۷/۰۷	۰/۲۷۲	۱۰/۰۸
۵	۳۶/۷۳	۰/۲۹۵	۳۵/۹۰	۰/۲۷۵	۹/۸۷
۶	۲۴/۷۸	۰/۳۰۱	۲۲/۳۴	۰/۲۹۱	۶/۵۰
۷	۱۸/۴۹	۰/۲۹۳	۱۷/۲۸	۰/۲۸۲	۴/۸۷
۸	۳۷/۶۱	۰/۲۸۶	۳۷/۲۵	۰/۲۶۸	۹/۹۸
۹	۳۰/۱۰	۰/۲۸۳	۲۵/۳۵	۰/۲۹۴	۷/۴۵
۱۰	۴۴/۵۴	۰/۲۸۴	۳۷/۸۸	۰/۲۸۰	۱۰/۶۰

جدول ۸. همبستگی بین ثابت سرعت معادله تابع توانی و مقدار تجمعی پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در خاک‌های تیمارنشده و تیمار شده

ماده آلی	پتاسیم تبادلی	EC	pH	پتاسیم غیر تبادلی	گنجایش تبادل کاتیونی	رس	سیلت	شن	کربنات کلسیم معادل
۰/۳۵ ^{ns}	۰/۸۷ ^{**}	۰/۲۵ ^{ns}	-۰/۶۸ ^{**}	۰/۸۹ ^{**}	۰/۳۴ ^{ns}	۰/۰۹ ^{ns}	۰/۲۹ ^{ns}	-۰/۲۰ ^{ns}	-۰/۵۳ ^{**}
۰/۲۳ ^{ns}	۰/۸۸ ^{**}	۰/۲۸ ^{ns}	-۰/۵۹ ^{**}	۰/۸۶ ^{**}	۰/۳۶ ^{ns}	۰/۱۷ ^{ns}	۰/۴۰ [*]	-۰/۳۱ ^{ns}	-۰/۴۲ [*]

*: اختلاف معنی دار در سطح اطمینان ۵ درصد، **: اختلاف معنی دار در سطح اطمینان ۱ درصد و ^{ns}: اختلاف غیر معنی دار

تیمار شده با عصاره گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار کمتر از یک است و نشان می‌دهد، سرعت آزاد شدن پتاسیم با زمان کاهش می‌یابد. همچنین در معادله تابع توانی پارامتر $a_e \times b$ که حاصل ضرب دو ثابت این معادله است، به عنوان سرعت ویژه در زمان واحد در نظر گرفته می‌شود و می‌تواند شاخصی از سرعت در این معادله باشد (۲۳).

در جدول ۸، همبستگی بین مقدار پتاسیم غیر تبادلی آزاد شده در خاک‌های تیمار نشده و تیمار شده در عصاره گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نشان داده

خاک‌های تیمار شده و تیمار نشده را توصیف کردند. اما معادله تابع توانی در خاک‌های تیمار شده و تیمار نشده قادر به توصیف بهتر سرعت آزادسازی پتاسیم غیر تبادلی بود. در جدول ۷ ضرایب سرعت معادله تابع توانی در خاک‌های تیمار شده و تیمار نشده نشان داده شده است. ضریب b بیانگر سرعت آزادسازی پتاسیم بین لایه‌ای است. این ضریب در معادله تابع توانی در خاک‌های تیمار نشده در دامنه ۰/۳۰۱-۰/۲۷۵ و در خاک‌های تیمار شده در دامنه ۰/۲۹۴-۰/۲۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بر ساعت است. ضریب b در معادله تابع توانی در خاک‌های تیمار نشده و

میزان پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده در خاک‌های تیمار شده از خاک‌های تیمار نشده کمتر بود که می‌تواند به علت واکنش کودهای فسفره در خاک‌های آهکی باشد. همچنین، روند رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌های تیمار شده و تیمار نشده مشابه بود. سرعت رهاسازی پتاسیم در ابتدا زیاد شد و سپس با سرعت کمتری تا پایان آزمایش ادامه داشت. با توجه به زیاد بودن ضرایب تبیین و کم بودن خطای استاندارد، معادله تابع توانی توانست به‌طور رضایت‌بخشی سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌ها را توصیف کند.

شده است. همان‌طور که نتایج جدول نشان می‌دهد، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی با مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده در خاک‌های تیمار شده و تیمار نشده وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد که پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی بیشترین تأثیر را بر رهاسازی مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی داشت. پس می‌توان بیان کرد که پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی نقش مهمی در فراهم کردن پتاسیم خاک دارند.

نتیجه‌گیری

کود سوپرفسفات تریپل می‌تواند بر سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌های آهکی مؤثر باشد. نتایج نشان داد که

منابع مورد استفاده

1. Abdi, S., A. Taj-Abadipur and H. Shirani. 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).
2. Al-kanani, T., A. F. Mackenzie and G. L. Ross. 1984. Potassium status of some Quebec Soils: K release by nitric and sodium tetrateraphenyl boran as related to particle size and mineralogy. *Canadian Journal of Soil Science*. 64:99-106.
3. Bouldin, D. R., J. R. Lehr and E. C. Sample. 1960. The effects of associated salts on transformations of monocalcium phosphate monohydrate at the site of application. *Soil Science Society of America Journal*. 24: 464-468.
4. Du, Z. Y., J. M. Zhou, H. Y. Wang, C. W. Du and X. Q. Chen. 2006. Potassium movement and transformation in an acid soil as affected by phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*. 70: (6): 2057-2064.
5. Fatemi, A. 2017. Kinetics of soil potassium release under long-term imbalanced fertilization in calcareous soils. *Pedosphere*. 27 (6): 1105-1115.
6. Gee, G.W. and J. W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. In: Klute A. (ed.) *Methods of Soil Analysis: Part I-Physical and mineralogy methods*. Agron. Monogr. 9. 2nd ed. *American Society of Agronomy and Soil Science Society of America*, Madison, Wisconsin. pp. 383-412.
7. Havlin, J. L., D. G. Westfall and S. R. Olsen. 1985. Mathematical model for potassium release kinetics in calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal*. 49: 371-376.
8. Hosseinpour, A. R., M. Kalbasi and H. Khademi. 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).
9. Hosseinpour, A. R. and M. Kalbasi. 2002. Kinetics of non-exchangeable potassium from soil and separates in some central region soils of Iran. *Proceedings of 17th world congress of Soil Science*. Bangkok, Thailand. 14-21 August.
10. Hosseinpour, A. R., H. R. Motaghian and M. H. Salehi. 2012. Potassium release kinetics and its correlation with pinto bean (*Phaseolous vulgaris*) plant indices. *Plant, Soil and Environment*. 58: 328-333.
11. Isensee, A.R. and L. M. Walsh. 1972. Influence of banded fertilizer on the chemical environment surrounding the band. II. Effect on soilsolution cations, cation-anion balance and solution phosphorus. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 23(4):509-516.
12. Jalali, M. 2006. Kinetics of non-exchangeable potassium release and availability in some calcareous soils of western Iran. *Geoderma*. 135: 63-71.
13. Kaur, H., R. S. Gill and G. S. Dheri. 2021. Kinetics of non-exchangeable potassium release in representative soils of Punjab. *Agricultural Research Journal*. 58 (3): 419-424.
14. Knudsen, D., G. A. Peterson and P. F. Pratt. 1982. Lithium, Sodium and Potassium. In: Page, A.L. Miller R.H. and Keeney D.R. (eds.) *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. (2nd ed.). *American Society of Agronomy and Soil Science Society of America*, Madison, Wisconsin. pp. 225-246.
15. Lindsay, W. L. and H. F. Stephenson. 1959. Nature of the reactions of monocalcium phosphate monohydrate in soils. I: The solution that reacts with the soil. *Soil Science Society of America Journal*. 23: 12-18.

16. Loeppert, R. H. and D. L. Suarez. 1996. Carbonate and gypsum. In: Sparks D.L. (ed.) *Chemical Methods of Soil Analysis. Soil Science Society of America*. Madison, Wisconsin. pp. 437-447.
17. Malakuti, M.J., A. A. Shahabi and K. Bazargan. 2015. Potassium in agriculture: the role of potassium in the production of healthy agricultural products. *Publication of missionaries*, second edition. Tehran. (In Farsi).
18. Martin, H. W. and D. L. Sparks. 1983. Kinetics of non-exchangeable potassium release from two coastal plain soils. *Soil Science Society of America Journal*. 47: 883-887.
19. Molavi, R., M. Baghernejad, R. Ghasemi-Fasaei and M. Zarei. 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.
20. Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1996. Carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks D.L. (ed) *Methods of Soil Analysis. Soil Science Society of America*. Madison, Wisconsin. 961-1010.
21. Olsen, S. R. and L. E. Sommers. 1982. Phosphorus, In: Klute A (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Chemical and Biological Properties. Soil Science Society of America*. Madison, Wisconsin, USA. pp. 413-430.
22. Rhoades, J. D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks D.L. (ed) *Methods of Soil Analysis. Soil Science Society of America*. Madison, Wisconsin. pp. 417-435.
23. Sadeghi-Baniani, Sh., H. R. Owliaie, E. Adhami and M. Najafi-Ghiri. 2017. Release kinetics of non-exchangeable potassium using CaCl_2 in relation to some properties of soils of Kohgilouye Province. *Applied Soil Research*. 5 (2): 81-94. (In Farsi).
24. Sharpley, A. N. 1990. Reaction of fertilizer potassium in soils of different mineralogy. *Soil Science*. 149 (1): 44-51.
25. Sumner, M. E. and W. P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. In D. L. Sparks et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis Part III, Soil Science Society of America*. Madison, Wisconsin. 1201-1229.
26. Thomas, G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks D.L. (ed.). *Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America*. Madison, Wisconsin. 1309p.
27. Tran, A. M. 2012. Potassium fixation by oxidized and reduced forms of different phyllosilicates. *Doctoral dissertation, Kansas State University*. pp. 133.
28. Wang, L., E. n. Ruiz-Agudo, C. V. Putnis, M. Menneken and A. Putnis. 2011. Kinetics of calcium phosphate nucleation and growth on calcite: implications for predicting the fate of dissolved phosphate species in alkaline soils. *Environmental Science and Technology*. 46 (2): 834-842.

The Effect of Superphosphate Fertilizer Application on the Kinetics of Non-Exchangeable Potassium Release in Some Calcareous Soils

A. R. Hossienpur, M. Barati Zanyani* and M. H. Salehi¹

(Received: January 21-2023 ; Accepted: October 16-2023)

Abstract

The kinetics of potassium release may be affected by P. When phosphorus (P) fertilizer is applied to soils. The objective of this study was to the effect of $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ fertilizer on the kinetics of non-exchangeable potassium (NEK) release in 10 calcareous soils. The amount of 100 mg kg^{-1} of P as $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ was added to the soils. Treated and untreated soils were incubated at 70% of field capacity and $25 \pm 1^\circ\text{C}$ for 90 days. After that, the NEK release was studied by 0.01 M CaCl_2 extractant in 2017 hours by successive extraction methods in the treated and untreated soils. The results showed the NEK released in treated soils less than in untreated soils. The mean cumulative NEK released after 2017 h in the treated and untreated soils was 260.6 and 303.3 mg kg^{-1} , respectively. The release of NEK in all soils was fast in the initial stages and continued at a lower speed in the later stages until the end of the experiment. The kinetics of NEK release was evaluated using kinetic equations. Based on the highest coefficients of determination (R^2) and the lowest standard error (SE), the kinetics of NEK release in treated and untreated soils were described by the power function equation. The results of this research could be helpful for the precise fertilizer recommendation for the study in calcareous soils.

Keywords: Release, Mono-calcium phosphate, Non-exchange potassium

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran.

*: Corresponding author, Email: marziehbarati99@yahoo.com