Research Article

Agricultural Engineering., 49(2) (2026) - ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2026.53053.1826 ISSN (E): 2588-5944

The Role of Clay Mineralogy and Potassium Quantity–Intensity Relationships in Explaining Non-Exchangeable Potassium Release Rate and Potassium Supply Capacity in Calcareous Soils

Alireza Hossienpur[1], Mohammad Hasan Salehi[2], Marzieh Barati Zanyani[3]*, Azam Jafari[4]

1. Professor, Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: alirezahosseinpur1347@gmail.com
2. Professor, Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: mehsalehi@yahoo.com
3. ***Corresponding Author:** Ph.D., Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: marziehbarati99@yahoo.com
4. Associate Professo, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman. Kerman, Iran. E-mail: a.jafari@uk.ac.ir

ABSTRACT

Introduction: Potassium (K) is an essential plant nutrient, and its availability in soils is governed by dynamic interactions among soluble, exchangeable, and non-exchangeable forms. In calcareous soils, variations in clay mineralogy can substantially influence K retention, release, and supply capacity. K quantity–intensity (Q/I) relationships provide valuable information on the equilibrium status of K in the soil–solution system; however, their ability to explain the release behavior of non-exchangeable K remains insufficiently understood. Furthermore, clay mineralogy, particularly the type and abundance of 2:1 clay minerals, plays a critical role in controlling K dynamics and availability. Therefore, the objective of this study was to investigate the role of clay mineralogy and K quantity–intensity relationships in explaining non-exchangeable K release and evaluating K supply capacity in selected calcareous soils of the Shahrekord Plain.

Materials and Methods: 30 soil samples (0–30 cm) were collected from agricultural fields in the Shahrekord Plain. Based on clay content, exchangeable K, non-exchangeable K, and cation exchange capacity (CEC), 15 soil samples were selected for further investigation. The physical and chemical properties of the soils, as well as different forms of K, were determined. K quantity–intensity (Q/I) curves were then established for each soil by equilibrating the samples with solutions having different K activity ratios. The K concentration in the equilibrium solution was subsequently measured as a function of the K activity ratio, and Q/I parameters were calculated. Non-exchangeable K release was evaluated after 2017 h using the sequential extraction method, and the clay mineralogical composition of the soils was determined by X-ray diffraction (XRD) analysis.

Results and Discussion: The results showed that soluble K, available K (extracted with 1 N NH_4OAc), and non-exchangeable K ranged from 11.5 to 27.5, 168 to 403, and 527 to 931 mg kg^{-1}, respectively. The K quantity–intensity parameters also exhibited considerable variability among the soils. The equilibrium activity ratio of K

(AR□) ranged from 0.011 to 0.027 (mmol L^{-1})$^{0.5}$, while the potential buffering capacity of K (PBC□) varied from 215.8 to 417.7 (mmol kg^{-1})/(mmol L^{-1})$^{0.5}$. The amount of non-exchangeable K released after 2017 h ranged from 242.5 to 345.0 mg kg^{-1}. Mineralogical analyses revealed that micas, chlorites, smectites, kaolinite, quartz, and mixed-layer mica–chlorite were the dominant clay minerals in the studied soils. The results indicated that differences in K behavior among the soils were mainly related to the type and abundance of 2:1 clay minerals. Soils rich in mica exhibited a greater capacity for K retention and buffering due to the presence of specific K adsorption sites, whereas higher smectite contents enhanced the release of non-exchangeable K. Furthermore, significant correlations and regression relationships between Q/I parameters and non-exchangeable K release demonstrated that these parameters, in addition to describing the equilibrium status of K in the soil–solution system, could explain part of the behavior of non-exchangeable K release.

Conclusion: The findings demonstrated that K quantity–intensity parameters are useful not only for describing the equilibrium status of K in the soil–solution system but also for explaining part of the long-term release behavior of non-exchangeable K. In addition, clay mineralogy, particularly the type and abundance of 2:1 clay minerals, played a decisive role in controlling K dynamics. Therefore, the combined use of quantity–intensity parameters and mineralogical information can provide a more comprehensive assessment of potassium supply capacity and improve K management in calcareous soils.

Keywords: Potassium; Non-exchangeable potassium release kinetics; Quantity–intensity (Q/I) Clay mineralogy; Calcareous soils.

نقش کانی‌شناسی و روابط کمیت–شدت پتاسیم در مطالعه سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی برای تأمین پتاسیم قابل دسترس در خاک‌های آهکی

علیرضا حسین‌پور[1] | محمدحسن صالحی[2] | مرضیه براتی زانیانی*[3] | اعظم جعفری[4]

۱. **استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه:**

alirezahosseinpur1347@gmail.com

۲. **استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه:**

mehsalehi@yahoo.com

۳. ***نویسنده مسئول: دکتر، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.**

رایانامه: marziehbarati99@yahoo.com

٤. **دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه:**

a.jafari@uk.ac.ir

چکیده:

فراهمی پتاسیم برای گیاه در خاک تحت تأثیر برهم‌کنش‌های پویا بین شکل‌های مختلف این عنصر قرار دارد. کانی‌های رسی، به‌عنوان یکی از مخازن مهم پتاسیم در خاک، می‌توانند بر نگهداری، تثبیت و آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی و در نتیجه ظرفیت تأمین پتاسیم خاک تأثیرگذار باشند. با این حال، ارتباط بین ویژگی‌های کانی‌شناسی، پارامترهای کمیت–شدت پتاسیم و آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌های آهکی به‌خوبی تبیین نشده است. بنابراین، به‌منظور بررسی نقش کانی‌شناسی و روابط کمیت–شدت پتاسیم در مطالعه آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی برای تأمین پتاسیم قابل دسترس در خاک‌های آهکی، ۱۵ نمونه خاک کشاورزی (۳۰–۰ سانتیمتر) بر اساس تنوع در درصد رس، پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیرتبادلی و ظرفیت تبادل کاتیونی انتخاب شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شکل‌های مختلف پتاسیم، پارامترهای کمیت–شدت پتاسیم، مقدار آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی پس از ۲۰۱۷ ساعت به روش عصاره‌گیری متوالی با عصاره‌گیر کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار و ترکیب کانی‌های رسی تعیین شد. نتایج نشان داد که نسبت فعالیت پتاسیم در حال تعادل از ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۲۷ $(mmol\ L^{-1})^{0.5}$)، ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم از ۲۱۵/۸ تا ۴۱۷/۷ $(mmol\ kg^{-1})/(mmol\ L^{-1})^{0.5}$)، پتاسیم به‌آسانی قابل تبادل از ۲/۴ تا ۸/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم و پتاسیم سخت قابل تبادل در خاک‌ها از ۰/۷ تا ۲/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم متغیر

بود. مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت نیز در دامنه، ۰/۳۴۵- ۲۴۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. کانی‌های غالب خاک، شامل؛ میکاها، کلریت‌ها، کائولینیت، اسمکتیت‌ها، کوارتز و کانی‌های مختلط میکاها-کلریت‌ها بودند. همبستگی مثبت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی با نسبت فعالیت پتاسیم در حال تعادل و پتاسیم سخت قابل تبادل، و همبستگی منفی آن با ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم، بیانگر ارتباط آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی با ویژگی‌های کمیت–شدت پتاسیم بود. نتایج نشان داد که پارامترهای کمیت–شدت پتاسیم، قادر به توضیح بخشی از رفتار آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی نیز هستند. مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزادشده پس از ۱۶۸ ساعت با نسبت فعالیت پتاسیم در حالت تعادل ارتباط معنی‌داری نداشت، در حالی که این ارتباط پس از ۲۰۱۷ ساعت مثبت و معنی‌دار شد. این تفاوت نشان می‌دهد که ارتباط پارامترهای کمیت–شدت با آزادسازی پتاسیم ممکن است در طول فرایند آزادسازی ثابت نباشد و نقش وضعیت تعادلی خاک در مراحل طولانی‌تر آزادسازی آشکارتر شود. همچنین، کانی‌های رسی ۲:۱ به‌ویژه میکاها و اسمکتیت‌ها، می‌تواند از طریق ویژگی‌های متفاوت نگهداری پتاسیم در ساختار کانی‌ها، با آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی مرتبط باشند. بنابراین، ارزیابی دقیق توان تأمین پتاسیم در خاک‌های آهکی مستلزم استفاده هم‌زمان از پارامترهای کمیت–شدت و اطلاعات کانی‌شناسی است.

کلمات کلیدی:

پتاسیم،

سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی،

کمیت-شدت،

کانی‌شناسی،

خاک‌های آهکی

مقدمه:

پتاسیم جزء عناصر پرنیاز گیاه می‌باشد. در اکثر مواقع، مقدار پتاسیمی که جذب گیاه می‌شود، با مقدار نیتروژن مورد استفاده گیاه برابری می‌نماید (Das et al., 2020). گیاهان همانند نیتروژن، نیاز فراوانی به پتاسیم دارند. عمدتا، مقدار برداشت پتاسیم بین ۵۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. پتاسیم به عنوان فراوان‌ترین کاتیون در گیاه، فعال کننده بیش از ۵۰ نوع آنزیم می‌باشد. در فتوسنتز، تنفس، ساخت پروتئین، متابولیسم مواد هیدروکربنه و تنظیم اسمز نقش دارد. همچنین، این عنصر موجب تسریع در تعدادی از واکنش‌های بیوشیمیایی در گیاهان می‌شود و مقاومت گیاهان را در برابر خشکی و حملات آفات افزایش می‌دهد. بنابراین، پتاسیم در بهبود کیفیت محصولات کشاورزی و حفظ رشد ضروری است (Mc Lean and Watson, 1985; Cao et al., 2025).

پتاسیم در خاک به چهار شکل وجود دارد که به ترتیب قابلیت دسترسی برای گیاه شامل؛ پتاسیم محلول، پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیرتبادلی و پتاسیم ساختمانی می‌باشد (Ghosh et al., 2025). این شکل‌ها به طور یکنواخت در خاک توزیع نشده‌اند اما با یکدیگر در تعادل پویا می‌باشند. مقدار هر یک از این شکل‌ها در خاک به عواملی مانند؛ مواد مادری، درجه هوادیدگی، میزان کود مصرفی و تلفات ناشی از آبشویی، فرسایش و برداشت توسط گیاه بستگی دارد. حفظ تعادل بین این شکل‌ها، نقش مهمی در تداوم تأمین پتاسیم برای گیاهان ایفا می‌کند (Sparks, 1987).

در شرایطی که پتاسیم محلول و تبادلی کاهش می‌یابد، بخشی از پتاسیم غیرتبادلی به‌تدریج آزاد شده و در دسترس گیاه قرار می گیرد. میزان آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی و سرعت آن؛ به اندازه و نوع کانی‌های رسی، مقدار رس، سابقه برداشت محصول و نوع گیاه کشت شده بستگی دارد (Sparks, 1985). بنابراین، با وجود نقش پتاسیم غیرتبادلی در پویایی تغذیه‌ای خاک، روش‌های متداول ارزیابی پتاسیم قابل استفاده، نظیر عصاره‌گیر استات آمونیوم ۱ مولار با پ‌هاش خنثی، در بسیاری از خاک‌های حاوی کانی‌های رسی قادر به پیش‌بینی دقیق پاسخ گیاه به کود پتاسیمی نیستند (Amorim et al., 2021)، زیرا نقش کانی‌شناسی و پویایی بین اشکال مختلف پتاسیم را به‌طور کامل در نظر نمی‌گیرند (Gurav et al., 2024). از آنجا که توان تأمین پتاسیم خاک تنها به مقدار پتاسیم تبادلی وابسته نیست، بلکه به تعادل بین پتاسیم محلول و ذخایر پتاسیم موجود در فاز جامد نیز بستگی دارد. استفاده از یک شاخص منفرد برای ارزیابی وضعیت پتاسیم ممکن است کافی نباشد (Lalitha, & Dhakshinamoorthy, 2015). روابط کمیت–شدت پتاسیم برای ارزیابی وضعیت تعادلی پتاسیم در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روابط امکان توصیف هم‌زمان شدت فعالیت پتاسیم در محلول خاک و ظرفیت بافری آن در فاز جامد را فراهم می‌کنند (Beckett, 1964). پارامترهایی مانند نسبت فعالیت پتاسیم (AR_e^K)، ظرفیت بافری پتاسیم (PBC^K)، پتاسیم به آسانی تبادلی (ΔK_0) و پتاسیم در مکان‌های اختصاصی (K_X) از پارامترهای مهم کمیت–شدت پتاسیم در خاک هستند (Das et al., 2018) که اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت تعادلی پتاسیم، ظرفیت بافری خاک و توانایی آن در تأمین پتاسیم برای گیاه فراهم می‌کنند.

منحنی کمیت–شدت پتاسیم عمدتاً بیانگر شرایط تعادلی پتاسیم است و آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی، فرآیندی وابسته به زمان بوده و تحت تأثیر کانی‌شناسی خاک و تاریخچه مدیریت زراعی قرار دارد (Sparks, 2000). با این حال، بیشتر پژوهش‌های پیشین روابط کمیت–شدت پتاسیم و سینتیک آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی خاک را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند (Das et al., 2021). با وجود ارتباط مفهومی میان این دو فرایند، تعامل بین پارامترهای کمیت–شدت پتاسیم، ترکیب کانی‌های رسی و آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی هنوز به‌طور کافی تبیین نشده است. بنابراین، هدف این مطالعه بررسی آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌های آهکی و نقش کانی‌شناسی رس در این فرآیند و همچنین تحلیل روابط کمیت–شدت پتاسیم در این خاک‌ها است. علاوه بر این، ارتباط بین پارامترهای کمیت–شدت پتاسیم و سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا درک دقیق‌تری از توان تأمین پتاسیم در خاک‌های آهکی ارائه شود که می‌تواند برای بهبود مدیریت کوددهی پتاسیم و افزایش کارایی مصرف آن در سیستم‌های زراعی مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

دشت شهرکرد دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک با تابستان‌های معتدل و زمستان‌های سرد می‌باشد. به استناد آمار ایستگاه هواشناسی سینوپتیک شهرکرد، میانگین دما در گرم‌ترین ماه سال (تیر ماه)، ۲۴/۶ درجه سانتی‌گراد و در سردترین ماه سال (دی ماه) بین ۰ تا ۱۳/۲- درجه سانتی‌گراد و متوسط بارش سالانه در این منطقه ۳۱۳/۵ تا ۴۰۸/۷ میلی‌متر می‌باشد (سالنامه هواشناسی، ۱۴۰۳-۱۴۰۲). رژیم حرارتی خاک منطقه مزیک و رژیم رطوبتی آن زریک است. خاک غالب منطقه بر اساس گزارشات موجود در زیرگروه Typic Calcixerepts قرار می‌گیرد (بهمنی و همکاران، ۱۳۹۱). به منظور مطالعه نقش کانی‌شناسی رس و روابط کمیت–شدت پتاسیم در تبیین سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌های آهکی، ۳۰ نمونه خاک زراعی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری در فروردین ماه ۱۴۰۳ خاک‌های دشت دامنه‌ای شهرکرد جمع‌آوری شد. پس از هوا خشک کردن نمونه‌ها و عبور از الک ۲ میلی‌متری، در این نمونه‌های

اولیه درصد رس، پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیرتبادلی و ظرفیت تبادل کاتیونی با ۳ تکرار تعیین و بر اساس تنوع این ویژگی‌ها، ۱۵ نمونه خاک، که حاوی مقادیر مختلف پتاسیم بودند، انتخاب شد (شکل ۱).

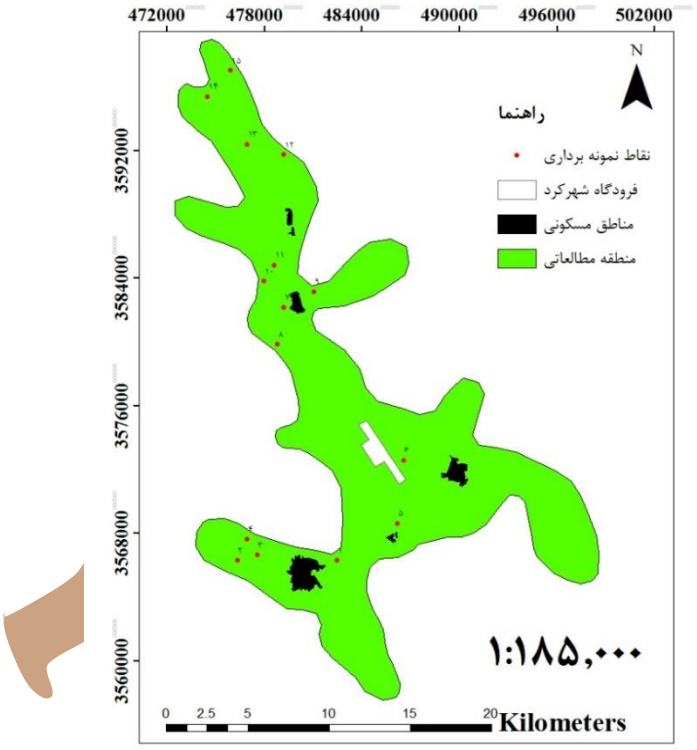


Figure 1. Location of sampling points in the agricultural soils of the Shahrekord plain

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های انتخاب شده، شامل؛ توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری (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, 1982)، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Nelson and Sommers, 1996)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با اسید (Loeppert and Suarez, 1996) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به روش استات سدیم در pH=۷ (Sumner and Miller, 1996)، اندازه‌گیری شد. همچنین، جهت تعیین پتاسیم محلول از سوسپانسیون ۱:۵ آب به خاک استفاده شد. پتاسیم قابل استفاده خاک‌ها به روش استات آمونیوم یک نرمال (Knudsen et al., 1982) تعیین و مقدار پتاسیم تبادلی از تفاضل پتاسیم قابل‌استفاده و پتاسیم محلول محاسبه شد. پتاسیم غیرتبادلی خاک‌ها به روش اسید نیتریک مولار و جوشان (Al-Kanani et al., 1984) استخراج شد و پس از کسر مقدار پتاسیم قابل‌استفاده از پتاسیم استخراج‌شده با اسید نیتریک، مقدار پتاسیم غیرتبادلی محاسبه شد. غلظت پتاسیم در عصاره‌ها با دستگاه فلیم‌فتومتر اندازه‌گیری شد (مدل کورنینگ ۴۱۰).

برای تعیین منحنی کمیت–شدت پتاسیم، ۲۵ میلی‌لیتر از محلول ۰/۰۱ مولار کلسیم کلرید که غلظت پتاسیم از منبع پتاسیم کلرید در آن‌ها به‌ترتیب؛ ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸، ۱/۶ و ۳/۲ میلی‌مولار بود، به نمونه‌های ۲/۵ گرمی هر خاک در دو تکرار اضافه و به‌مدت ۲ ساعت در دمای ۱±۲۵ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه تکان داده شدند. پس از اتمام زمان تکان‌دهی، سوسپانسیون‌ها با سرعت

۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند (Hosseinpur and Tadayon, 2013). قابلیت هدایت الکتریکی عصاره خاک با دستگاه EC متر، مجموع غلظت کلسیم و منیزیم به‌روش تیتراسیون با EDTA و نیز غلظت پتاسیم عصاره با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر تعیین گردید. ابتدا قدرت یونی محلول‌ها (I)، از رابطه ۱ محاسبه شد. سپس، ضرایب فعالیت یون‌ها با استفاده از معادله دی‌بای هاکل تصحیح شده (رابطه ۲)، محاسبه و فعالیت یون‌ها با استفاده از رابطه ۳ محاسبه گردید. نسبت فعالیت پتاسیم با استفاده از رابطه ۴ تعیین شد.

$$I= 0.013\ EC$$ رابطه (۱)

$$\log\gamma_i= -0.509\times Z_i^{\ 2}\times I^{0.5}/(1+I^{0.5})$$ رابطه (۲)

که در آن، γ_i: ضریب فعالیت یون‌ها، Z_i: ظرفیت کاتیون و I: قدرت یونی می‌باشد.

$$a_i=\gamma_i C_i$$ رابطه (۳)

C_i: غلظت اندازه‌گیری شده هر یون است.

$$(AR^K)= \frac{aK}{(aCa+aMg)0.5}$$ رابطه (۴)

تغییر در پتاسیم تبادلی (ΔK)، از تفاوت غلظت پتاسیم در محلول اولیه و محلول تعادلی به‌دست آمد. سپس با رسم ΔK در مقابل AR^K پارامترهای کمیت–شدت پتاسیم (Q/I)، به دست آمد. برای رسم بهترین خط در معادلات کمیت–شدت پتاسیم از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

قبل از شروع آزمایش‌های سینتیکی برای خارج کردن پتاسیم تبادلی و محلول، خاک‌ها با کلسیم کلرید ۱ مولار اشباع شدند، برای انجام این کار نمونه‌های خاک با کلسیم کلرید ۱ مولار (با نسبت ۵ به ۱) به مدت ۳۰ دقیقه با دستگاه تکان دهنده برقی تکان داده شدند، سپس نمونه‌ها سانتریفیوژ شده و محلول زلال رویی دور ریخته شد. این عمل سه بار تکرار گردید. کلرید اضافی باقی‌مانده ابتدا با آب مقطر و سپس با الکل تا کاهش قابلیت هدایت الکتریکی به ۴۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر شست‌وشو شد (Martin and Sparks, 1983).

برای بررسی سرعت آزاد شدن پتاسیم غیرتبادلی از روش عصاره‌گیری متوالی استفاده شد. بدین منظور به ۲ گرم از نمونه خاک‌های اشباع شده با کلسیم، ۲۰ میلی‌لیتر محلول کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار اضافه و نمونه‌ها به وسیله تکان‌دهنده برقی به‌مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شدند. نمونه‌ها در دستگاه انکوباتور در دمای ۱± ۲۵ درجه‌سانتی‌گراد قرار داده شد و قبل از پایان هر دوره، نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه به‌وسیله دستگاه تکان‌دهنده برقی تکان داده شدند. نمونه‌ها در زمان‌های ۲، ۴، ۸، ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۹۶، ۱۲۰، ۱۴۴، ۱۶۸، ۳۳۶، ۵۰۴، ۶۷۲، ۸۴۰، ۱۰۰۸، ۱۱۷۶، ۱۳۴۴، ۱۵۱۲، ۱۶۸۰، ۱۸۴۸ و ۲۰۱۷ ساعت پس از اضافه‌کردن کلسیم کلرید، عصاره‌گیری شدند. سپس، سوسپانسیون با دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه صاف، محلول رویی جدا و پتاسیم موجود در محلول عصاره‌گیری‌شده با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر (مدل کورنینگ ۴۱۰) اندازه‌گیری شد. سپس ۲۰ میلی‌لیتر محلول کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار به نمونه‌ها اضافه شد و پس از ۳۰ دقیقه تکان‌دادن توسط دستگاه تکان‌دهنده برقی، نمونه‌ها به انکوباتور منتقل گردید (Hosseinpur, 2004).

کانی‌شناسی بخش رس به روش کیتریک و هوپ (Kittrick and Hope, 1963) در ۲ نمونه خاک با مقدار درصد رس و سیلت تقریبا برابر، انجام گردید (Barati et al., 2025).

جهت بررسی ارتباط بین پارامترهای کمیت–شدت پتاسیم و مقدار آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی پس از ۲۰۱۷ ساعت، از ضریب همبستگی پیرسون با استفاده از نرم‌افزار Statistica 8 بهره‌برداری شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های مورد بررسی دامنه نسبتاً گسترده‌ای را نشان دادند (جدول ۱). مقدار pH، ماده آلی، کربنات کلسیم معادل و ظرفیت تبادل کاتیونی به‌ترتیب در دامنه ۷/۸ تا ۸/۲، ۰/۲۳ تا ۱/۰۵ درصد، ۲۰/۰ تا ۴۵/۰ درصد، و ۱۷/۰ تا ۲۵/۰ سانتی‌مول‌بار بر کیلوگرم قرار داشت و بافت خاک‌ها از متوسط تا سنگین متغیر بود.

Table 1. Some physical and chemical properties of the studied soils

Cation Exchange Capacity	Calcium Carbonate Equivalent	Organic Matter	Sand	Silt	Clay	Soil Texture	EC 1:2	pH 1:2	Soil Number
($Cmol_c\ kg^{-1}$)		٪					($dS\ m^{-1}$)		
21.3	23.5	0.65	48.6	26.0	25.4	CL	0.32	7.8	1
25.0	35.0	0.45	44.6	18.0	37.4	CL	0.33	7.9	2
20.0	33.5	0.23	66.6	16.0	17.4	SL	0.31	7.9	3
18.0	43.0	0.82	62.6	20.0	17.4	SL	0.37	7.8	4
17.0	44.5	0.59	42.6	30.0	27.4	CL	0.31	8.1	5
21.7	24.0	1.33	42.6	28.0	29.4	CL	0.34	7.9	6
21.1	36.0	0.72	24.6	28.0	47.4	C	0.33	8.0	7
18.0	44.5	0.41	56.6	12.0	31.4	SCL	0.31	8.0	8
18.4	38.5	0.55	26.6	26.0	47.4	C	0.33	8.0	9
21.7	29.5	0.70	36.6	20.0	43.4	C	0.33	8.1	10
21.7	34.0	0.50	34.6	22.0	43.4	C	0.30	8.2	11
23.0	23.5	0.83	44.6	22.0	33.4	CL	0.31	7.8	12
22.3	20.0	0.48	64.6	16.0	19.4	SL	0.33	7.7	13
24.9	26.5	0.90	26.6	32.0	41.4	C	0.32	8.1	14
21.4	30.0	0.68	26.6	32.0	41.4	C	0.32	8.1	15
21.0	32.4	0.66	43.6	23.0	33.4		0.33	8.0	Mean

SL: Sandy Loam ،SCL: Sandy Clay Loam ،CL: Clay Loam ،C: Clay

غلظت اشکال مختلف پتاسیم در نمونه‌های خاک مورد مطالعه تفاوت قابل‌توجهی داشت (جدول ۲). دامنه تغییرات پتاسیم محلول ۲۷/۵۰- ۱۱/۵۰، پتاسیم قابل استفاده با عصاره‌گیر استات آمونیوم ۱ نرمال ۴۰۳/۰- ۱۶۸/۰ و پتاسیم غیرتبادلی ۹۳۱- ۵۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. کمترین مقدار پتاسیم قابل استفاده در خاک شماره ۵ و پتاسیم غیرتبادلی در خاک شماره ۴ است و بیشترین مقدار پتاسیم قابل استفاده در خاک شماره ۱۳ و پتاسیم غیرتبادلی در خاک شماره ۹ می‌باشد. بالا بودن مقدار پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی در خاک‌ها می‌تواند باعث عدم پاسخ گیاه به کاربرد کودهای پتاسیمی شود (Knudsen et al., 1982). همچنین، تغییرات پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌ها نشان‌دهنده تنوع نوع و مقدار کانی‌های رسی در خاک‌ها می‌باشد. به‌عنوان مثال، خاک شماره ۱۱ با درصد رس بالاتر (۴۳/۴ درصد) دارای ۶۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مقدار پتاسیم غیرتبادلی و خاک شماره ۱۳ با درصد رس ۱۹/۴ دارای پتاسیم غیرتبادلی ۸۵۱

میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک‌های مطالعه شده بود. این امر نشان می‌دهد که صرفاً درصد رس، تعیین‌کننده مقدار پتاسیم غیرتبادلی نیست، بلکه نوع کانی‌های رسی نقش تعیین‌کننده‌تری دارد.

Table 2. Amounts of potassium forms and the non-exchangeable potassium released (mg kg^{-1}) in the studied soils

release of non-exchangeable potassium after 2017 hours	release of non-exchangeable potassium after 168 hours	Non-Exchangeable Potassium	Available potassium	Soluble Potassium	Soil Number
314.0 (40.8)*	190.0 (24.7)*	769	206	13.0	1
308.5 (42.3)	181.5 (24.9)	729	195	11.5	2
325.5 (41.8)	200.0 (25.7)	778	242	16.7	3
242.5 (46.0)	130.5 (24.8)	527	168	11.7	4
297.0 (40.0)	169.0 (22.6)	748	187	27.5	5
322.5 (36.9)	185.5 (21.2)	875	230	13.2	6
270.0 (32.0)	142.5 (16.7)	845	218	13.5	7
246.5 (32.0)	125.0 (16.3)	770	184	11.5	8
345.0 (37.0)	180.5 (19.4)	931	283	15.5	9
289.5 (33.8)	151.0 (17.6)	857	258	12.0	10
263.0 (38.7)	134.0 (19.7)	680	250	18.5	11
249.5 (35.6)	128.0 (18.3)	700	251	25.2	12
322.0 (37.8)	184.5 (21.7)	851	403	18.7	13
276.0 (31.0)	151.0 (16.8)	897	308	21.0	14
322.5 (41.6)	184.5 (23.8)	775	343	16.2	15
293.0 (37.5)	162.5 (20.8)	782	248.4	16.4	Mean

*: Numbers in parentheses represent the percentage of non-exchangeable potassium released after 168 and 2017 h, respectively.

نتایج مربوط به پارامترهای کمیت–شدت پتاسیم در خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. نسبت فعالیت پتاسیم در حال تعادل در خاک‌ها از ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۲۷ با میانگین ۰/۰۱۵ (mmol L^{-1})$^{0.5}$ متفاوت است. کمترین مقدار آن در خاک شماره ۱ و ۴، و بیشترین مقدار آن در خاک شماره ۱۳ مشاهده شد. اسپارکس و لیبهارت (Sparks and Liebhardt, 1981) گزارش نمودند در خاک‌هایی که نسبت فعالیت پتاسیم در حال تعادل از ۰/۰۰۱ (mol L^{-1})$^{0.5}$کمتر باشد، جذب پتاسیم از موقعیت لبه‌های کانی‌های رسی صورت می‌گیرد و اگر بیشتر از ۰/۰۱ (mol L^{-1})$^{0.5}$ باشد، پتاسیم جذب سطوح کانی‌های رسی می‌شود. بنابراین در همه خاک‌ها پتاسیم جذب لبه‌های کانی‌های رسی می‌باشد.

شیب بخش خطی نمودار کمیت–شدت پتاسیم، ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم می‌باشد که سنجشی از توانایی خاک در حفظ فعالیت پتاسیم در محلول خاک می‌باشد و مقدار آن از ۲۱۵/۸ در خاک شماره ۱ تا ۴۱۷/۷ در خاک شماره ۴، با میانگین (mmol kg^{-} ^{1})/(mmol L^{-1})$^{0.5}$ ۳۰۹/۰ متفاوت بود (جدول ۳). این نتیجه نشان می‌دهد که در خاک‌های مطالعه شده با افزایش ۱ واحد در نسبت فعالیت پتاسیم، مقدار ۳۰۹ واحد پتاسیم تبادلی افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که در خاک شماره ۴ که کمترین مقدار پتاسیم محلول، پتاسیم قابل استفاده و پتاسیم غیرتبادلی را دارد، بیشترین مقدار ظرفیت بالقوه بافری پتاسیم مشاهده شد که می‌تواند ناشی از حضور بیشتر

کانی‌های رسی ۲:۱، ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر و یا اشباع کمتر پتاسیم در این خاک باشد، که باعث می‌شود این کانی‌ها توانایی بالایی در جذب و نگهداری پتاسیم داشته باشند (Beckett, 1964; Sparks and Liebhardt, 1981; Bangroo et al., 2021). وانگ و همکاران (Wang et al., 2004) گزارش نمودند که تفاوت‌های کانی‌شناسی رس و عوامل مؤثر بر پویایی پتاسیم غیرتبادلی ممکن است عامل اصلی کنترل‌کننده تفاوت‌های مقدار ظرفیت بالقوه بافری پتاسیم باشد. دلیل اصلی تفاوت در ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم بین خاک‌های مورد مطالعه، به نوع و مقدار کانی‌های رسی به ویژه کانی‌های گروه ۲:۱، درصد رس و ظرفیت تبادل کاتیونی مربوط می‌شود (Seema Sharma et al., 2017). دو خاک با نسبت فعالیت پتاسیم در حال تعادل مشابه اما، ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم متفاوت، توانایی متفاوتی در حفظ غلظت پتاسیم در محلول خاک هنگام برداشت توسط گیاه دارند. خاکی با ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم بالاتر، می‌تواند شدت پتاسیم را در سطح مطلوب‌تری برای مدت زمان طولانی‌تری حفظ کند، در حالی که خاک با ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم پایین‌تر با شدت بیشتری دچار افت پتاسیم شده و نیاز به کوددهی مکرر دارد (Panda & Patra, 2018).

دامنه تغییرات پتاسیم به‌آسانی قابل تبادل از ۲/۴ در خاک شماره ۱ تا ۸/۵ در خاک شماره ۱۳ با میانگین ۴/۶ میلی‌مول بر کیلوگرم متفاوت بود. مقادیر بیشتر پتاسیم به‌آسانی قابل تبادل به معنای پتاسیم آزاد شده بیشتر به محلول خاک است که از مخازن بیشتر پتاسیم سهل‌الوصول ناشی می‌شود (Le Roux and Sumner, 1968). بنابراین، خاک شماره ۱۳ دارای بیشترین ذخیره پتاسیم به‌آسانی قابل تبادل بوده و ظرفیت بیشتری برای تأمین پتاسیم محلول در کوتاه‌مدت دارد. مقدار پتاسیم به‌آسانی قابل تبادل همیشه کمتر از پتاسیم تبادلی (پتاسیم عصاره‌گیری شده با استات آمونیوم) و در شرایطی برابر پتاسیم تبادلی است. در کانی‌هایی با مواضع اختصاصی برای جذب پتاسیم، به دلیل نزدیکی شعاع یون آمونیوم به پتاسیم، یون آمونیوم قادر به استخراج پتاسیم جذب‌شده به‌طور اختصاصی می‌باشد؛ در نتیجه ممکن است مقدار پتاسیم عصاره‌گیری‌شده با استات آمونیوم بیشتر از مقدار پتاسیم به‌آسانی قابل تبادل باشد. مقدار پتاسیم به‌آسانی قابل تبادل به نوع کانی‌های رسی، مقدار پتاسیم تبادلی و مقدار کود پتاسه مصرف شده بستگی دارد (Sparks and Huang, 1985; McLean and Watson, 1985; Sparks, 1987).

پتاسیم سخت قابل تبادل در خاک‌ها از ۰/۷ در خاک شماره ۴ تا ۲/۵ در خاک شماره ۱ با میانگین ۱/۵ میلی‌مول بر کیلوگرم در خاک‌ها متغیر بود. پتاسیم سخت قابل تبادل به نوع کانی‌های رسی بستگی دارد. در خاک‌هایی که دارای کانی‌هایی با محل‌های جذب اختصاصی پتاسیم بیشتر باشند، پتاسیم جذب شده با انرژی بالا بیشتر است که به‌راحتی قابل تبادل نمی‌باشد. حداقل مقدار پتاسیم سخت قابل تبادل در خاک شماره ۴ بود که بیشترین مقدار ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم را داشت. همچنین، بیشترین مقدار پتاسیم سخت قابل تبادل در خاک شماره ۱ بود که کمترین مقدار ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم را داشت.

Table 3. Values of Quantity–Intensity (Q/I) Parameters of the Studied Soils

R^2	Linear equation of the Q/I curve	PBC^K	AR_0^K	K_X	ΔK^0	Soil Number
		$(mmol\ kg^{-1})/(mmol\ L^{-1})^{0.5}$	$(mmol\ L^{-1})^{0.5}$	$(mmol\ kg^{-1})$	$(mmol\ kg^{-1})$	
0.99	y= 215.8x – 2.4	215.8	0.011	2.5	2.4	1
0.99	y= 360.5x – 4.2	360.5	0.012	0.9	4.2	2
0.98	y= 230.7x – 3.8	230.7	0.016	2.0	3.8	3
0.98	y = 417.7x – 4.0	417.7	0.011	0.7	4.0	4
0.99	y = 266.5x - 3.2	266.5	0.012	1.1	3.2	5
0.99	y =240.7x - 4.0	240.7	0.017	1.6	4.0	6
0.99	y =343.7x – 4.0	343.7	0.012	1.4	4.0	7
0.98	y = 277.3x – 3.5	277.3	0.013	1.1	3.5	8
0.97	y =253.8x – 5.0	253.8	0.020	2.0	5.0	9
0.99	y = 349.5x – 5.3	349.5	0.015	1.1	5.3	10

0.97	y = 262.2x – 3.9	262.2	0.015	2.0	3.9	11
0.99	y = 370.3x – 4.7	370.3	0.013	1.2	4.7	12
0.97	y = 320.4x – 8.5	320.4	0.027	1.6	8.5	13
0.97	y = 403.5x – 6.3	403.5	0.016	1.2	6.3	14
0.97	y = 322.5x – 6.8	322.5	0.021	1.7	6.8	15
		309.0	0.015	1.5	4.6	Mean

مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده با عصاره‌گیری متوالی با کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار در خاک شماره ۱ در شکل ۲، نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در تمام خاک‌ها، سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی تا ۱۶۸ ساعت سریع بوده، درحالی‌که پس از ۱۶۸ ساعت، روند آزادسازی آهسته‌تر شد و تا انتهای دوره آزمایش ادامه یافت. مشابه این روند نیز توسط سایر محققین گزارش شده است (Abdi et al., 2021). این الگوی دو مرحله‌ای نشان‌دهنده آزادسازی اولیه پتاسیم از جایگاه‌های با انرژی نگهداری کمتر و سپس مشارکت تدریجی جایگاه‌های با انرژی نگهداری بیشتر در ساختمان کانی‌هاست (Hosseinpur et al., 2012).

نتایج مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده با عصاره‌گیر کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار بعد از ۱۶۸ ساعت و ۲۰۱۷ ساعت در جدول ۲ نشان داده شده است. دامنه تغییرات مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده با عصاره‌گیر کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار در خاک‌های زراعی دشت شهرکرد بعد از ۱۶۸ ساعت ۲۰۰/۰– ۱۲۵/۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و پس از ۲۰۱۷ ساعت ۳۴۵/۰– ۲۴۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. کمترین مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده بعد از ۱۶۸ و ۲۰۱۷ ساعت به‌ترتیب در خاک شماره ۸ و ۴ و بیشترین مقدار آن در خاک شماره ۳ و ۹ بود. در خاک شماره ۱۳ با ۱۹/۴ درصد رس و خاک شماره ۱۰ با ۴۳/۴ درصد رس، با مقدار پتاسیم غیرتبادلی تقریبا برابر، مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت در خاک ۱۳، ۳۲۲/۰ و در خاک ۱۰، ۲۸۹/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. این اختلاف نشان می‌دهد که مقدار پتاسیم غیرتبادلی اولیه به‌تنهایی تعیین‌کننده میزان آزادسازی آن نیست و ویژگی‌های کانی‌شناسی خاک نیز می‌توانند در قابلیت رهاسازی پتاسیم نقش داشته باشند. بنابراین، تفسیر رفتار پتاسیم غیرتبادلی مستلزم توجه هم‌زمان به مقدار ذخیره این عنصر و ویژگی‌های کانی‌های رسی و پتاسیم‌دار است (Sparks and Huang, 1985).

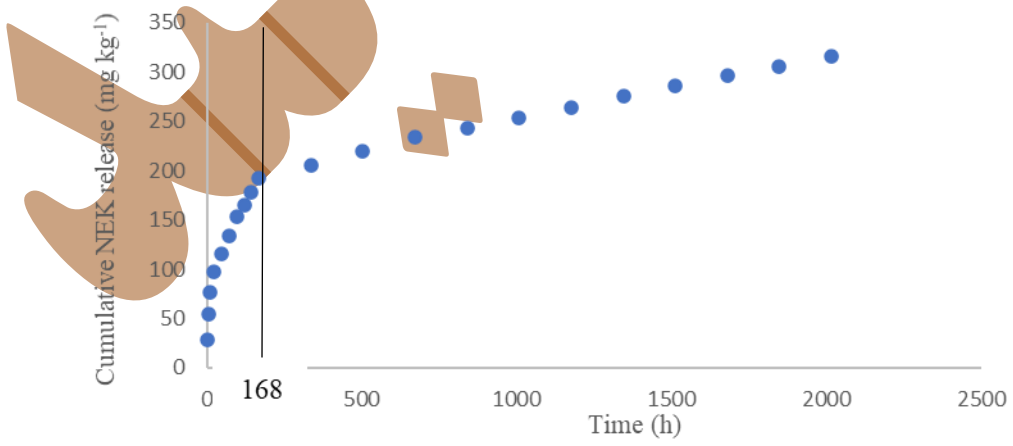
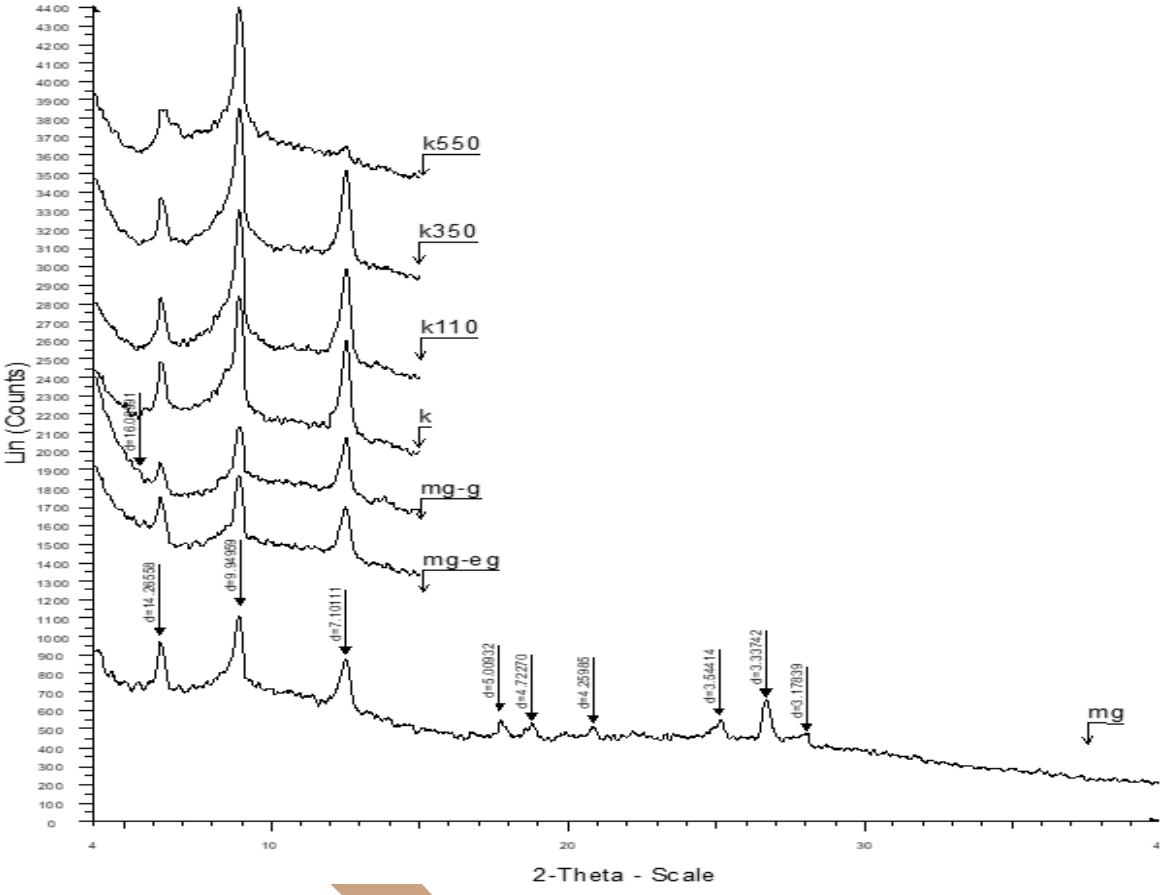


Figure 2- The amount of non-exchangeable potassium released by 0.01 M $CaCl_2$ extractant of the Studied Soils

به منظور بررسی تفاوت در سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی و ارتباط آن با کانی‌شناسی رس، خاک شماره ۷ و ۱۵ با درصد رس و سیلت تقریبا برابر و مقدار پتاسیم غیرتبادلی متفاوت، انتخاب شدند و دیفرکتوگرام‌های بخش رس این دو نمونه خاک تحلیل شد (شکل‌های ۲-الف و ۲-ب). کانی‌های غالب در این نمونه‌ها شامل میکاها، کلریت‌ها، اسمکتیت‌ها، کائولینیت، کوارتز و کانی‌های مخلوط میکا-کلریت بودند، اگرچه فراوانی نسبی آن‌ها متفاوت بود.

خاک‌های شماره ۷ و ۱۵ به‌ترتیب دارای ۴۷/۴ و ۴۱/۴ درصد رس و ۲۸/۰ و ۳۲/۰ درصد سیلت بودند. در خاک شماره ۷، ۳۲/۰ درصد پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده است، در حالی‌که در خاک شماره ۱۵ این مقدار ۴۱/۶ درصد می‌باشد. با وجود شباهت نسبی در بافت این دو خاک، مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزادشده پس از ۲۰۱۷ ساعت در خاک شماره ۱۵ بیشتر از خاک شماره ۷ بود. این تفاوت را می‌توان با تفاوت در ترکیب و فراوانی نسبی کانی‌های رسی مرتبط دانست. در خاک شماره ۷، سهم بیشتر کانی‌های میکایی می‌تواند موجب نگهداری بیشتر پتاسیم در جایگاه‌های بین‌لایه‌ای و در نتیجه کاهش آزادسازی آن شود؛ در مقابل، حضور بیشتر کانی‌های انبساط‌پذیر در خاک شماره ۱۵ می‌تواند شرایط مناسب‌تری برای تبادل و آزادسازی پتاسیم فراهم کند. بنابراین، نتایج دو نمونه مورد بررسی نشان می‌دهد که در خاک‌هایی با مقدار رس و سیلت نسبتاً مشابه، تفاوت در نوع و فراوانی نسبی کانی‌های رسی می‌تواند در تعیین میزان آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی نقش مهمی داشته باشد (Srinivasarao et al., 2006). تفاوت مشاهده‌شده در آزادسازی پتاسیم با رفتار کمیت–شدت پتاسیم نیز مطابقت داشت؛ به‌طوری‌که خاک شماره ۷، با وجود آزادسازی کمتر پتاسیم غیرتبادلی، ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم بیشتری نسبت به خاک شماره ۱۵ نشان داد. این رفتار می‌تواند به وجود جایگاه‌های اختصاصی جذب پتاسیم در کانی‌های میکایی و توانایی بیشتر این کانی‌ها در نگهداری پتاسیم نسبت داده شود (Sparks and Liebhardt, 1981).

(a


k550
k350
k110
k
mg-g
mg-eg
mg
d=14.26558
d=9.94989
d=7.10111
d=5.00832
d=4.72270
d=4.25985
d=3.54414
d=3.33742
d=3.17839
Lin (Counts)
2-Theta - Scale

(b

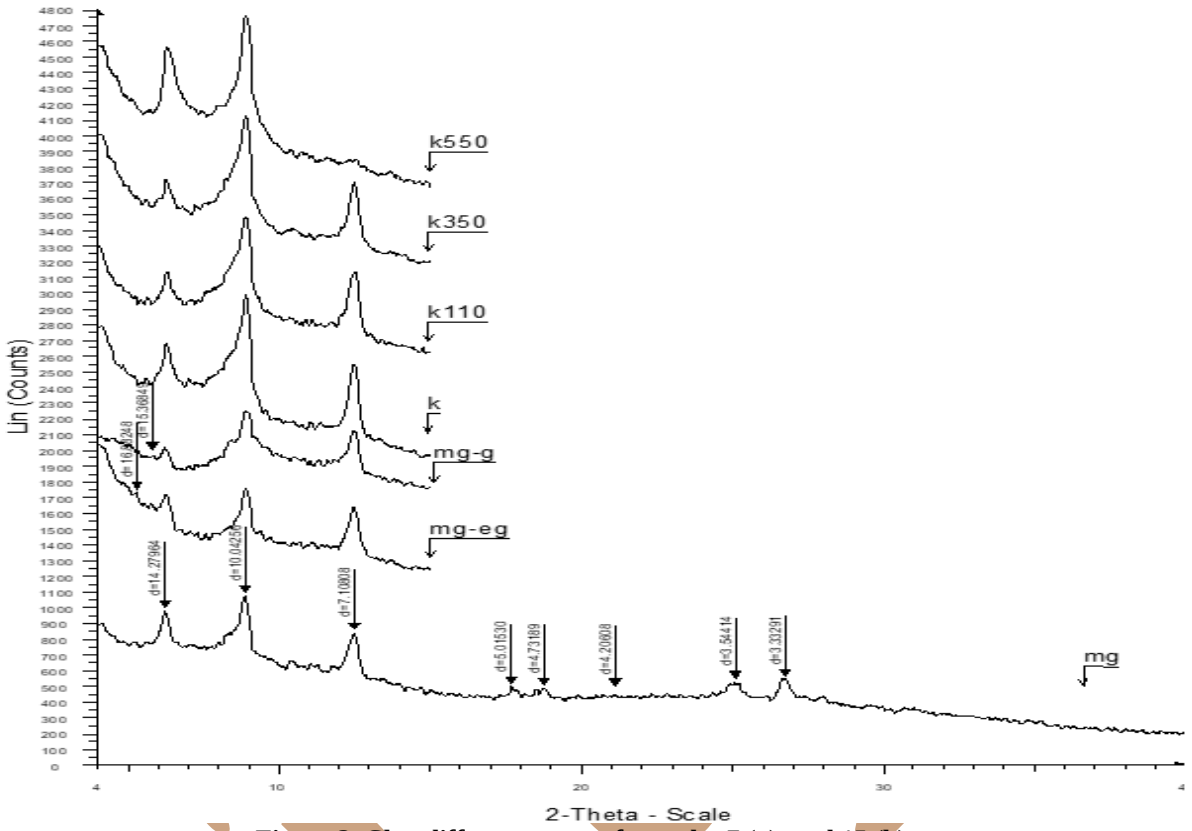


Figure 2. Clay diffractograms of samples 7 (a), and 15 (b).

Mg: magnesium-saturated sample; Mg-eg: magnesium-saturated sample treated with ethylene glycol; Mg-g: magnesium-saturated sample treated with glycerol; K: potassium-saturated sample; K110: potassium-saturated sample heated at 110 °C; K350: potassium-saturated sample heated at 350 °C; K550: potassium-saturated sample heated at 550 °C.

به‌منظور بررسی نقش روابط کمیت–شدت در تبیین رفتار سینتیکی پتاسیم، نتایج همبستگی بین پارامترهای کمیت–شدت پتاسیم و مقدار آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که کربنات کلسیم معادل با پتاسیم آسان قابل تبادل و ظرفیت بافری باقوه پتاسیم همبستگی معنی‌داری دارد. این امر بیانگر آن است که افزایش کربنات کلسیم معادل با کاهش قابلیت دسترسی و بافری پتاسیم در خاک‌ها همراه است که می‌تواند ناشی از رقابت کاتیون‌های کلسیم و منیزیم با پتاسیم در سطوح تبادلی و کاهش فعالیت پتاسیم در محلول خاک باشد.

ظرفیت تبادل کاتیونی با پتاسیم سخت قابل تبادل همبستگی منفی و معنی‌دار و با ظرفیت بافری باقوه پتاسیم همبستگی مثبت و معنی‌داری دارد. این نتایج نشان داد که ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نه تنها بر ظرفیت نگهداری پتاسیم اثر دارد، بلکه در توزیع آن بین فازهای تبادلی و غیرتبادلی نیز نقش دارد. در همین راستا، نتایج کانی‌شناسی نشان داد که تفاوت در رفتار پتاسیم عمدتاً ناشی از حضور کانی‌های ۲:۱ است؛ به‌طوری‌که کانی‌های میکایی به‌عنوان مخزن نگهدارنده و تثبیت‌کننده پتاسیم عمل کرده، درحالی‌که، اسمکتیت‌ها به دلیل ساختار انبساط‌پذیر، سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، امکان تبادل و آزادسازی آسان‌تر پتاسیم را فراهم می‌کنند.

پتاسیم تبادلی با پتاسیم آسان قابل تبادل و نسبت فعالیت پتاسیم در حال تعادل همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد. این نتایج بیانگر آن است که افزایش پتاسیم در فاز تبادلی موجب افزایش فعالیت آن در محلول خاک می‌شود. همچنین، پتاسیم غیرتبادلی با پتاسیم سخت قابل تبادل همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت که نشان می‌دهد، بخش عمده ذخایر پتاسیم در خاک‌های مورد مطالعه در

ساختارهای بین‌لایه‌ای کانی‌ها قرار داشته و در شرایط کاهش غلظت پتاسیم محلول، به‌عنوان منبع تأمین تدریجی عمل می‌کند. علاوه‌براین، همبستگی مثبت و معنی‌دار بین مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۲۰۱۷ ساعت و پتاسیم سخت قابل تبادل، نشان می‌دهد که بخش مهمی از پتاسیم آزادشده از ذخایر ساختاری و بین‌لایه‌ای کانی‌ها تأمین می‌شود و بیانگر نقش پتاسیم سخت قابل تبادل به‌عنوان مخزن فعال پتاسیم در فرآیند آزادسازی تدریجی آن در خاک است. نتایج بیلیاس و باربایانیس (Bilias and Barbayiannis, 2018) نشان داد پتاسیم غیرتبادلی نقش مهمی در پویایی پتاسیم خاک داشته و پتاسیم استخراج‌شده با ترا فنیل بوران سدیم به‌عنوان شاخصی از ذخایر پتاسیم غیرتبادلی، ارتباط بیشتری با پارامتر AR_0^K و ΔK^0 در خاک‌های تخلیه‌شده از پتاسیم داشت. در مقابل، همبستگی منفی بین پتاسیم غیرتبادلی آزادشده و ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم نشان می‌دهد که افزایش ظرفیت بافری موجب کاهش نرخ انتقال پتاسیم از فازهای ذخیره‌ای به محلول خاک می‌شود. در خاک‌هایی با قدرت بافری بالاتر، توانایی سیستم خاک در حفظ پتاسیم در فاز تبادلی بیشتر بوده و در نتیجه، آزادسازی پتاسیم از فازهای غیرتبادلی کاهش می‌یابد. همچنین، نبود همبستگی مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۱۶۸ ساعت با نسبت فعالیت پتاسیم در حال تعادل نشان می‌دهد که آزادسازی کوتاه‌مدت پتاسیم عمدتاً تحت تأثیر عوامل سینتیکی، سرعت نفوذ و دسترسی فیزیکی ذخایر پتاسیم قرار دارد. درحالی‌که، همبستگی مثبت و معنی‌دار مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت با نسبت فعالیت پتاسیم در حال تعادل بیانگر آن است که آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی بیشتر تحت تأثیر وضعیت تعادلی سیستم خاک–محلول قرار می‌گیرد. این یافته حاکی از آن است که با نزدیک‌تر شدن سیستم به شرایط تعادلی، نقش ذخایر غیرتبادلی در جبران کاهش فعالیت پتاسیم محلول آشکارتر شده و ارتباط بین پارامترهای کمیت–شدت و آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی تقویت می‌شود.

درصد رس، سیلت، شن و ماده آلی و نیز پتاسیم محلول با هیچ کدام از پارامترهای کمیت–شدت پتاسیم همبستگی نداشتند. این موضوع بیانگر آن است که پارامترهای کمیت–شدت پتاسیم صرفاً تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات قرار ندارند، بلکه بیشتر توسط ویژگی‌های کانی‌شناسی و فازهای ذخیره‌ای پتاسیم در خاک کنترل می‌شوند. همچنین، نبود همبستگی معنی‌دار بین پتاسیم محلول و پارامترهای کمیت–شدت نشان می‌دهد که فعالیت لحظه‌ای پتاسیم در محلول خاک به‌تنهایی بیانگر وضعیت تعادلی سیستم نیست. این امر بیانگر آن است که پویایی پتاسیم در خاک‌های آهکی بیش از آنکه تحت کنترل فاز محلول باشد، توسط مخازن ذخیره‌ای و به‌ویژه کانی‌های رسی ۲:۱ کنترل می‌شود.

نتایج حاصل از رگرسیون چند متغیره نشان داد که پارامترهای کمیت–شدت پتاسیم قادر به تبیین بخشی از رفتار آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در طول زمان هستند. به‌طوری‌که حدود ۵۰ درصد از تغییرپذیری آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی پس از ۲۰۱۷ ساعت توسط نسبت فعالیت پتاسیم در حال تعادل و پتاسیم آسان قابل تبادل توضیح داده شد. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه روابط کمیت–شدت پتاسیم عمدتاً بیانگر شرایط تعادلی هستند، اما می‌توانند شاخص مناسبی برای تبیین رفتار سینتیکی آزادسازی پتاسیم نیز در این خاک‌ها فراهم کنند. با این حال، بخش قابل توجهی از تغییرپذیری آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی نیز توسط این پارامترها توضیح داده نشد که احتمالاً ناشی از تفاوت در ویژگی‌های کانی‌شناسی، به‌ویژه نوع و فراوانی کانی‌های رسی ۲:۱، و نحوه توزیع پتاسیم در جایگاه‌های مختلف جذب در خاک است. بنابراین، رفتار آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌های آهکی حاصل برهم‌کنش ویژگی‌های ترمودینامیکی و کانی‌شناسی خاک است.

$$\text{Release}_{2017h} = ۹۲۵۳\ AR_0^K - ۱۶/۸۲\ \Delta K^0 \qquad SE = ۲۳/۶۰ \qquad R^2 = ۵۰$$

Table 4. Correlation Coefficients between Potassium Quantity–Intensity (Q/I) Parameters, Selected Soil Properties, and Non-Exchangeable Potassium Release

PBC^K	AR_0^K	K_X	ΔK^0	
0.40 ^{ns}	-0.24^{ns}	-0.30 ^{ns}	-0.02^{ns}	**Clay**
-0.10 ^{ns}	-0.11^{ns}	0.12 ^{ns}	-0.16 ^{ns}	**Silt**
-0.22 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.11 ^{ns}	**Sand**
-0.28 ^{ns}	-0.04^{ns}	0.11 ^{ns}	-0.20 ^{ns}	**Organic Matter**
-0.59*	-0.48 ^{ns}	0.13 ^{ns}	-0.81**	**Calcium Carbonate Equivalent**
0.77**	0.02 ^{ns}	-0.56*	0.43 ^{ns}	**Cation Exchange Capacity**
0.02 ^{ns}	0.13 ^{ns}	-0.01 ^{ns}	0.16 ^{ns}	**Soluble Potassium**
0.09 ^{ns}	0.94**	0.30 ^{ns}	0.92**	**Exchangeable potassium**
-0.27 ^{ns}	0.53*	0.33 ^{ns}	0.36 ^{ns}	**Non- Exchangeable potassium**
-0.52*	0.48 ^{ns}	0.53*	0.14 ^{ns}	**Cumulative amount of the NEK release after 168 h**
-0.53*	0.61*	0.56*	0.25 ^{ns}	**Cumulative amount of the NEK release after 2017 h**

**: significant at the 1% level, *: significant at the 5% level, and ns: not significant

نتیجه گیری

نتایج مطالعه نشان داد که پارامترهای کمیت–شدت پتاسیم در خاک‌های آهکی مورد بررسی دارای تغییرات قابل توجهی بوده و بیانگر تفاوت در توان تأمین و نگهداری پتاسیم در این خاک‌ها هستند. مقادیر نسبت فعالیت پتاسیم در حال تعادل نشان داد که پتاسیم عمدتاً در موقعیت‌های لبه‌ای کانی‌های رسی جذب شده است، در حالی که ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم دامنه تغییرات گسترده‌ای داشته و تفاوت توان خاک‌ها در حفظ شدت پتاسیم محلول و جبران کاهش آن در اثر جذب گیاه را منعکس می‌کند. آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در تمامی خاک‌ها تا ۱۶۸ ساعت سریع بوده، سپس کند شده و با سرعت نسبتا ثابتی تا پایان ۲۰۱۷ ساعت ادامه یافته است. نتایج کانی‌شناسی نشان داد که تفاوت در رفتار پتاسیم میان خاک‌ها عمدتاً به نوع و فراوانی کانی‌های رسی ۲:۱ مربوط است. خاک‌های غنی از میکا به دلیل وجود جایگاه‌های اختصاصی جذب پتاسیم، ظرفیت بیشتری برای نگهداری و بافر کردن پتاسیم نشان دادند، در حالی که حضور بیشتر اسمکتیت‌ها موجب افزایش آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی گردید. همچنین، همبستگی و روابط رگرسیونی معنی‌دار بین پارامترهای کمیت–شدت و آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی نشان داد که این پارامترها علاوه بر توصیف وضعیت تعادلی پتاسیم در سیستم خاک–محلول، قادر به تبیین بخشی از رفتار آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی نیز هستند. با این حال، کانی‌شناسی خاک می‌تواند یکی از عوامل مؤثر بر تفاوت در نگهداری و آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی باشد؛ با این حال، تفاوت در ظرفیت تبادل کاتیونی و سایر ویژگی‌های شیمیایی خاک نیز در کنترل رفتار پتاسیم نقش دارند. بنابراین، ارزیابی دقیق وضعیت پتاسیم و مدیریت بهینه کودهای پتاسه در این خاک‌ها مستلزم استفاده هم‌زمان از پارامترهای کمیت–شدت، مطالعات آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی و اطلاعات کانی‌شناسی است.

منابع

1. Amorim, M. B., Rogeri, D. A., & Gianello, C. (2021). Potassium available to corn plants extracted by ammonium acetate, ammonium chloride, Mehlich-1 and Mehlich-3 solutions in

southern Brazilian soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *52*(15), 1790-1797. https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1892736

2. Abdi, S., Tajabadi Pour, A., & Shirani, H. (2021). Release Kinetics of Nonexchangeable Potassium in Some Soils under Pistachio of Rafsanjan Region. *Journal of Pistachio Science and Technology*, *5*(10), 106-121. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20084757.1393.28.4.11.3. In Persian with English Abstract.
3. Beckett, P. H. T. (1964). Studies on soil potassium II. The 'immediate'Q/I relations of labile potassium in the soil. *Journal of soil science*, *15*(1), 9-23.
4. Bangroo, S. A., Kirmani, N. A., Bhat, M. A., Wani, J. A., Iqbal, A. M., Dar, Z. A., Mahdi, S. S. & Malik, A. A. (2021). Potassium isotherm partitioning based on modified quantity-intensity relation and potassium buffering characterization of soils of North India. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *184*(1), 112-122.https://doi.org/10.1002/jpln.202000406
5. Bilias, F., & Barbayiannis, N. (2018). Contribution of non-exchangeable potassium on its quantity-intensity relationships under K-depleted soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *64*(14), 1988-2004. https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1472376
6. Barati Zanyani, M., Hossienpur, A., Salehi, M. H., & Jafari, A. (2025). Soil Potassium Dynamics and its Relationship with Clay Mineralogy in Agricultural Soils of Shahrekord Piedmont Plain. *Iranian Journal of Soil Research*, *39*(3), 287-302. https://doi.org/10.22092/ijsr.2025.370593.786. In Persian with English Abstract.
7. Bahmani, M., Salehi, M. H., & Esfadiarpoor, I. (2014). Comparison of Soil Taxonomy and WRB for description of soil properties in some arid and semiarid regions of Central Iran. *JWSS-Isfahan University of Technology*, *18*(67), 11-21. http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-2096-fa.html. In Persian
8. Cao, W., Sun, H., Shao, C., Wang, Y., Zhu, J., Long, H., ... & Zhang, Y. (2025). Progress in the study of plant nitrogen and potassium nutrition and their interaction mechanisms. Horticulturae, 11(8), 930.https://doi.org/10.3390/horticulturae11080930
9. Das, D., Nayak, A. K., Thilagam, V. K., Chatterjee, D., Shahid, M., Tripathi, R., Mohanty, S., Kumar, A., Lal, B., Gautam, P & Biswas, S. S. (2018). Measuring potassium fractions is not sufficient to assess the long-term impact of fertilization and manuring on soil's potassium supplying capacity. Journal of Soils and Sediments, 18(5), 1806-1820.
10. Das, D., Dwivedi, B. S., Datta, S. P., Datta, S. C., Meena, M. C., & Datta, S. C. (2020). Intensive cropping with varying nutrient management options alters potassium dynamics in soil. Indian J Fert, 16, 690-704.
11. Das, D., Dwivedi, B. S., Datta, S. P., Datta, S. C., Meena, M. C., Dwivedi, A. K., ... & Jaggi, S. (2021). Long-term differences in nutrient management under intensive cultivation alter potassium supplying ability of soils. *Geoderma*, *393*, 114983. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114983
12. Ghosh, S., Mondal, G., Chakraborty, S., Banerjee, S., Kumar, S., Basu, R. & Bhattacharyya, P. (2025). Geogenic perspectives on potassium dynamics and plant uptake: insights from natural and submerged conditions across different soil types with machine learning predictions. *Frontiers in Soil Science*, *5*, 1539477.https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1539477
13. Gurav, P. P., Ray, S. K., Datta, S. C., Choudhari, P. L., & Hartmann, C. (2024). Role of clay cation exchange capacity, location of charge, and clay mineralogy on potassium availability in Indian Vertisols. Clays and Clay Minerals, 72, e3. https://doi.org/10.1017/cmn.2024.6
14. Gee, G.W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, *5*, pp.383-411.

15. Hosseinpur, A. R. (2004). Evaluation of Several Extractants for Determining Available Potassium Garlic in some Soils of Hamedan. *Journal of Water and Soil Science*, *8*(2), 45-57. http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-424-fa.html. In Persian.
16. Hosseinpur, A. R., & Tadayon, M. R. (2013). Potassium quantity–intensity parameters and their correlation with bean plant indices in some calcareous soils. Communications in soil science and plant analysis, 44(9), 1480-1488. https://doi.org/10.1080/00103624.2012.760570
17. Hosseinpur, A. R., Motaghian, H. R., & Salehi, M. H. (2012). Potassium release kinetics and its correlation with pinto bean (Phaseolus vulgaris) plant indices. http://dx.doi.org/10.17221/70/2012-PSE
18. Knudsen, D., Peterson, G. A., & Pratt, P. F. (1982). Lithium, sodium, and potassium. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, *9*, pp.225-246.
19. Kittrick, J. A., & Hope, E. W. (1963). A procedure for the particle-size separation of soils for X-ray diffraction analysis. *Soil Science*, *96*(5), pp.319-325.
20. Lalitha, M., & Dhakshinamoorthy, M. (2015). Quantity-intensity characteristics of Potassium (K) in relation to potassium availability under different cropping system in alluvial soils. *African Journal of Agricultural Research*, *10*(19), 2097-2103. https://doi.org/10.5897/AJAR2014.8947
21. Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum. *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods*, *5*, pp.437-474.
22. Le Roux, J., & Sumner, M. E. (1968). Labile potassium in soils I: factors affecting the quantity-intensity (Q/I) parameters. *Soil Science*, *106*(1), pp.35-41.
23. Mc Lean, E. O., & Watson, M. E. (1985). Soil measurements of plant-available potassium. *Potassium in agriculture*, pp.277-308. https://doi.org/10.2134/1985.potassium.c10
24. 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), pp.883-887. https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700050008x
25. Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, *9*, pp.539-579.
26. Panda, R., & Patra, S. K. (2018). Quantity-intensity relations of potassium in representative coastal soils of eastern India. *Geoderma*, *332*, 198-206. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.014
27. Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, *5*, pp.417-435.
28. Sparks, D. L. (1987). Potassium dynamics in soils. In *Advances in soil science* (pp. 1-63). New York, NY: Springer New York.
29. Sparks, D. L. (2000). 1.4 bioavailability of soil potassium. *Handbook Of Soil. CRC Press, New York*.
30. Sparks, D. L., & Huang, P. M. (1985). Physical chemistry of soil potassium. *Potassium in agriculture*, pp.201-276. https://doi.org/10.2134/1985.potassium.c9
31. Sparks, D. L., & Liebhardt, W. C. (1981). Effect of long-term lime and potassium applications on quantity-intensity (Q/I) relationships in sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, *45*(4), pp.786-790. 10.2136/sssaj1981.03615995004500040022x
32. Sumner, M. E., & Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, *5*, pp.1201-1229.

33. Sharma, S., Sharma, V., & Arora, S. (2017). Potassium supplying capacity of some citrus orchard soils in foothill Himalayas through quantity-intensity approach. Journal of the Indian Society of Soil Science, 65(4), 393-400. http://epubs.icar.org.in/ejournal/index.php/JISSS/article/view/76916
34. Srinivasarao, C., Rupa, T. R., Subba Rao, A., Ramesh, G., & Bansal, S. K. (2006). Release kinetics of nonexchangeable potassium by different extractants from soils of varying mineralogy and depth. Communications in soil science and plant analysis, 37(3-4), 473-491. https://doi.org/10.1080/00103620500449351
35. Thomas, G. W. (1982). Exchangeable cations. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, *9*, pp.159-165.
36. Wang, J. J., Harrell, D. L., & Bell, P. F. (2004). Potassium buffering characteristics of three soils low in exchangeable potassium. *Soil Science Society of America Journal*, *68*(2), 654-661. https://doi.org/10.2136/sssaj2004.6540


زود آزمون