



Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research
(Soil and Water Sci.)

<https://srjournal.areeo.ir/>


Soil Potassium Dynamics and Its Relationship with Clay Mineralogy in Agricultural Soils of the Shahrekord Piedmont Plain

Marzieh Barati Zanyani^{a*} , Alireza Hossienpur^a , Mohammad Hasan Salehi^a , and Azam Jafari^b

^a Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

^b Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Article Info

Article Type

Research Article

Received

September 02, 2025

Revised

October 29, 2025

Accepted

November 08, 2025

Published online

December 20, 2025

Keywords

Available Potassium,
Mica,
Non-exchangeable
Potassium,
Piedmont Plain,
Smectite.

*Corresponding author's email

marziehbarati99@yahoo.com

Extended Abstract

Background and Objectives: The identification of the type and composition of clay minerals in soil is of particular importance, as these minerals play a fundamental role in potassium dynamics and in the soil's capacity to supply this essential element to plants. Clay minerals can influence the uptake, retention, and release of potassium, and therefore play a crucial role in fertilization management and in maintaining soil fertility. The present study aims to investigate the relationship between different forms of soil potassium, including soluble, exchangeable, and non-exchangeable potassium, as well as the amount of released non-exchangeable potassium, in relation to the clay mineral composition of agricultural soils.

Materials and Methods: Fifteen soil samples were collected from the 0–30 cm depth of agricultural soils in the Shahrekord Piedmont Plain, based on variations in exchangeable potassium, non-exchangeable potassium, cation exchange capacity, and clay content. The physical and chemical properties of the soils were analyzed. In addition, the exchangeable potassium of the soils was determined using 1 N ammonium acetate, and the non-exchangeable potassium was determined using 1 M boiling nitric acid. The amount of non-exchangeable potassium released after 2,017 hours was measured using the sequential extraction method with 0.01 M calcium chloride (CaCl₂). The composition of clay minerals was examined. The clay samples were saturated with potassium and magnesium, and to identify the types of clay minerals, Mg, Mg–ethylene glycol, Mg–glycerol, K, and K-heated treatments at 110, 350, and 550 °C were analyzed using an X-ray diffraction (XRD) instrument.

Results: The results showed that the range of soluble, exchangeable, and non-exchangeable potassium concentrations was 11.5–99.7, 108.5–612.7, and 491–2065 mg kg⁻¹, respectively. The range of non-exchangeable potassium released after 2017 hours varied from 225.5 to 479.0 mg kg⁻¹. The dominant soil minerals included: micas, chlorites, kaolinite, smectites, quartz, and a small amount of mixed mica–chlorite minerals, with variations in their relative abundances. In soils with similar clay and silt contents, differences in potassium release behavior are mainly attributed to the type and proportion of clay minerals. Soils with the lowest levels of exchangeable and non-exchangeable potassium exhibited the highest non-exchangeable potassium release, whereas soils with high non-exchangeable potassium content showed

a lower release percentage. The results showed that different forms of potassium had significant relationships with certain soil properties. Soluble and non-exchangeable potassium, as well as the cumulative amount of non-exchangeable potassium released after 2017 hours, were positively correlated with electrical conductivity ($r = 0.54^{**}$, $r = 0.45^{**}$, $r = 0.25^{**}$); soluble and non-exchangeable potassium were negatively correlated with cation exchange capacity ($r = -0.18^*$, $r = -0.26^*$); soluble potassium was positively correlated with organic matter ($r = 0.21^*$); and exchangeable potassium was negatively correlated with calcium carbonate equivalent ($r = -0.34^{**}$). The different forms of potassium and the amount of non-exchangeable potassium released after 2017 hours showed no significant correlation with the total clay content. Moreover, different forms of potassium and the amount of non-exchangeable potassium released after 2017 hours showed no significant correlation with total clay content, indicating that potassium dynamics in these soils are influenced more by the type and composition of clay minerals than by the clay content itself.

Conclusion: The results of this study indicated that potassium dynamics in the agricultural soils of the Shahrekord Piedmont are primarily influenced by the type and composition of clay minerals. In other words, the quantity and rate of non-exchangeable potassium release in soils depend more on the abundance and type of potassium-bearing minerals, such as micas and smectites, rather than on merely the total clay content. Soils with high smectite content exhibited faster non-exchangeable potassium release, whereas mica-rich soils had high non-exchangeable potassium content but a lower release rate. These findings highlight the importance of understanding clay mineralogy and the different forms of potassium for designing optimal potassium fertilization programs. To meet crop potassium requirements and avoid excessive fertilizer application, it is necessary to consider not only exchangeable and non-exchangeable potassium levels but also the clay mineral composition and the behavior of potassium release.

Cite this article: Barati Zanyani, M., Hossienpur, A., Salehi, M.H., And Jafari, A., 2025. Soil Potassium Dynamics and Its Relationship with Clay Mineralogy in Agricultural Soils of the Shahrekord Piedmont Plain. *Journal of Soil Research*, 39 (3), pp 287-302.



DOI: [10.22092/IJSR.2025.370593.786](https://doi.org/10.22092/IJSR.2025.370593.786)

Publisher: Soil Science Society of Iran



نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

<https://srjournal.areeo.ir/>



پویایی پتاسیم خاک و ارتباط آن با کانی‌شناسی رس‌ها در خاک‌های زراعی دشت دامنه‌ای شهرکرد

مرضیه براتی زانیانی^{۱*}، علیرضا حسین‌پور^۱، محمدحسن صالحی^۱ و اعظم جعفری^۲

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

^۲ گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹

واژه‌های کلیدی

اسمکتیت‌ها،

پتاسیم تبادلی،

پتاسیم غیرتبادلی،

دشت دامنه‌ای،

میکاه‌ها.

* ایمیل نویسنده مسئول

marziehbarati99@yahoo.com

شناسایی انواع کانی‌های رسی در خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا نقش تعیین‌کننده‌ای در پویایی پتاسیم و توانایی خاک در تأمین این عنصر برای گیاهان ایفا می‌کند. مطالعه حاضر با هدف بررسی رابطه بین شکل‌های مختلف پتاسیم (محلول، تبادلی و غیرتبادلی) و مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده به‌عنوان تابعی از کانی‌شناسی رس، در خاک‌های زراعی انجام شد. بدین منظور، ۱۵ نمونه خاک براساس تنوع در مقدار پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیرتبادلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و درصد رس، از عمق ۳۰-۵۰ سانتی‌متری خاک‌های زراعی دشت دامنه‌ای شهرکرد جمع‌آوری شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شکل‌های مختلف پتاسیم، مقدار آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی پس از ۲۰۱۷ ساعت به روش عصاره‌گیری متوالی و ترکیب کانی‌های رسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دامنه تغییرات مقدار پتاسیم محلول، تبادلی و غیرتبادلی، به‌ترتیب: ۹۹/۷-۱۱/۵، ۶۱۲/۷-۱۰۸/۵ و ۲۰۶۵-۴۹۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت نیز در دامنه، ۴۷۹/۰-۲۲۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. کانی‌های غالب خاک، شامل؛ میکاه‌ها، کلریت‌ها، کائولینیت، اسمکتیت‌ها، کوارتز و کانی مختلط میکاه-کلریت‌ها بودند که از نظر مقدار نسبی تفاوت‌هایی با یکدیگر داشتند. در خاک‌هایی با مقدار رس و سیلت مشابه، تفاوت در رفتار آزادسازی پتاسیم عمدتاً ناشی از نوع و نسبت کانی‌های رسی است. فراوانی شکل‌های مختلف پتاسیم رابطه معناداری با برخی ویژگی‌های خاک داشت؛ غلظت پتاسیم محلول، غیرتبادلی و مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت، با قابلیت هدایت الکتریکی همبستگی مثبت داشت (به‌ترتیب: $r=0/54^{**}$ ، $r=0/45^{**}$ و $r=0/25^{**}$)، پتاسیم محلول و غیرتبادلی با ظرفیت تبادل کاتیونی همبستگی منفی (به‌ترتیب: $r=0/18^{**}$ و $r=0/26^{**}$)، پتاسیم محلول با ماده آلی همبستگی مثبت ($r=0/21^{**}$) و پتاسیم تبادلی با کربنات کلسیم معادل همبستگی منفی ($r=0/34^{**}$) داشت. شکل‌های مختلف پتاسیم و مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت با مقدار کل رس همبستگی معنی‌داری نداشتند، که نشان می‌دهد دینامیک پتاسیم در این خاک‌ها بیش از آنکه تحت تأثیر میزان رس باشد، تحت تأثیر نوع و ترکیب کانی‌های رسی قرار دارد.

استناد: براتی زانیانی، م.، حسین‌پور، ع.، صالحی، م.ح.، جعفری، ا.، ۱۴۰۴. پویایی پتاسیم خاک و ارتباط آن با کانی‌شناسی رس‌ها در خاک‌های زراعی

دشت دامنه‌ای شهرکرد. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۳) ۳۹، ص ۲۸۷-۳۰۲.

DOI: 10.22092/IJSR.2025.370593.786



مقدمه

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها تحت تأثیر ترکیب کانی‌های رسی و شرایط محیطی شکل می‌گیرند. نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک عمدتاً تحت تأثیر اقلیم، مواد مادری و عوامل محیطی است و به دلیل دارا بودن بار منفی و سطح ویژه بالا، نقش مهمی در جذب عناصر غذایی موردنیاز گیاه دارند. شناسایی کمی و کیفی و بررسی ترکیب ساختمانی آن‌ها، اطلاعات ارزشمندی درباره ظرفیت جذب، آزادسازی و تثبیت عناصر غذایی در خاک فراهم می‌کند (Dixon and Weed, 1992). کانی‌های رسی در خاک، تحت تأثیر هوازدگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی قرار دارند و بر اساس این تأثیرات، می‌توان آن‌ها را به سه گروه تقسیم کرد: کانی‌هایی که بدون تغییر ساختاری از مواد مادری به ارث رسیده‌اند، کانی‌هایی که تحت تأثیر هوازدگی و شرایط محیطی به کانی‌های دیگر تبدیل شده‌اند و کانی‌هایی که از سنتز مواد تخریب یافته از کانی‌های اولیه مختلف در خاک تشکیل می‌شوند (Gunal and Ransom, 2006). کانی‌های رسی موجود در خاک‌های خشک و نیمه‌خشک ایران شامل؛ اسمکتیت‌ها، کلریت‌ها، ایلیت، کائولینیت، پالی‌گورسکیت و ورمی‌کولایت‌ها هستند (Khormali and Abtahi, 2003).

پتاسیم به عنوان هفتمین عنصر فراوان در پوسته زمین، یکی از عناصر ضروری جهت رشد گیاهان است. این عنصر به چهار شکل محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختمانی در خاک وجود دارد (Jini et al., 2024). پتاسیم محلول، پتاسیم موجود در محلول خاک است که با پتاسیم تبادلی خاک در حال تعادل است. پتاسیم تبادلی پتاسیمی است که توسط بارهای منفی کلوئیدهای آلی و معدنی نگهداری و به راحتی با کاتیون‌های دیگر در فاز محلول تبادل می‌شود (Mouhamad et al., 2016). بخش نسبتاً کوچکی از پتاسیم کل خاک تبادلی بوده و در خاک‌ها از کمتر از ۱۰۰ تا بیش از ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تغییر می‌کند (Knudsen et al., 1982). پتاسیم غیرتبادلی پتاسیمی است که به آسانی قابل تبادل نبوده و در زمان‌های کوتاه توسط محلول‌های نمکی آزاد نمی‌شود، ولی بخشی از آن با اسیدنیتریک مولار جوشان قابل استخراج است (Al-Kanani et al., 1984). نقش پتاسیم غیرتبادلی خاک در تأمین پتاسیم مورد نیاز گیاه به عوامل مختلفی مانند؛ نوع کانی، میزان پتاسیم در کانی، فراوانی کانی‌های پتاسیم‌دار و اندازه ذرات آن‌ها، مقدار پتاسیم قابل استفاده خاک، مقدار پتاسیم آزاد شده از بقایای گیاهی و غلظت پتاسیم در آب آبیاری بستگی دارد (Jalali, 2005). پتاسیم ساختمانی به شکلی از پتاسیم اطلاق می‌شود که جزئی از شبکه کریستالی کانی‌ها است. تعداد زیادی از کانی‌های حاوی پتاسیم شامل فلدسپارها و اغلب سیلیکات‌ها ممکن است حاوی چنین شکلی از پتاسیم باشند (Mustscher, 1995). این

شکل از پتاسیم برای گیاهان غیرقابل استفاده است و آزادسازی آن، تنها از طریق فرآیند هوازدگی امکان‌پذیر است. شدت این فرآیند به عواملی مانند؛ pH خاک، نوع کانی‌های رسی و نوع کاتیون موجود بستگی دارد که در طولانی‌مدت، منجر به انتقال پتاسیم به مخازن با دسترسی کند می‌شود (Kaur, 2019). بالاین‌حال، این فرآیند بسیار کند است و نمی‌تواند به‌تنهایی نیاز پتاسیمی گیاهان زراعی را تأمین کند (Prajapati and Modi, 2012).

در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه به علت وجود کانی‌های حاوی پتاسیم، مقادیر قابل توجهی پتاسیم غیرتبادلی یافت می‌شود (Murrell et al., 2021). حتی حضور مقادیر نسبتاً کم این کانی‌ها، می‌تواند قابلیت دسترسی مؤثر پتاسیم را افزایش دهد. اهمیت این کانی‌ها، ناشی از توانایی آن‌ها در جذب و آزادسازی یون‌های پتاسیم از جایگاه‌های بین‌لایه‌ای است (Barre et al., 2008). در کانی‌های میکایی، بار لایه‌ای توسط کاتیون پتاسیم بین لایه‌ای خنثی می‌شود. این کانی‌ها غیرقابل انبساط و انقباض بوده و واکنش‌های تبادل سطحی آن‌ها محدود به سطوح خارجی یا لبه‌های شکسته کانی است (Bohn et al., 1985). هوازدگی میکاها از کناره‌های جانبی کانی آغاز شده و به مرور زمان به سمت داخل پیشرفت می‌کند که در نتیجه آن پتاسیم بین‌لایه‌ای آزاد می‌شود (Bertsch and Thomas, 1985). با افزایش هوازدگی میکاها، درصد پتاسیم آن کاهش و میزان آب بین لایه‌ای افزایش می‌یابد و کانی‌هایی چون ایلیت‌ها به وجود می‌آیند و با ادامه هوازدگی ورمی‌کولایت‌ها و اسمکتیت‌ها به وجود می‌آیند. کانی ورمی‌کولایت‌ها، دارای بار لایه‌ای بیشتر و پتاسیم بیشتری بوده و خاصیت انبساط‌پذیری کمتری نسبت به اسمکتیت‌ها دارند. کانی اسمکتیت‌ها به علت مقدار نسبتاً کم بار لایه‌ای، دارای خاصیت انبساط‌پذیری نسبتاً بالایی هستند و توانایی تثبیت پتاسیم را ندارند (Sparks, 1987). به همین دلیل، آزادسازی پتاسیم از اسمکتیت‌ها نسبت به میکاها و ورمی‌کولایت‌ها سریع‌تر انجام می‌شود.

توزیع شکل‌های پتاسیم در خاک به ویژگی‌های مختلفی شامل؛ بافت خاک، مقدار و نوع کانی‌های رسی، مقدار ماده آلی خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، نوع کاربری اراضی، رژیم رطوبتی و حرارتی خاک و تکامل خاک بستگی دارد (Srinivasarao et al., 2007). Sadri و همکاران (۲۰۱۶)، ارتباط شکل‌های مختلف پتاسیم با کانی‌های رسی در استان فارس را بررسی کردند و گزارش دادند که غالب کانی‌ها شامل اسمکتیت‌ها، ایلیت، پالی‌گورسیت و کلریت‌ها بودند و حضور اسمکتیت‌ها و ایلیت باعث افزایش پتاسیم قابل دسترسی می‌شود. در مطالعه آن‌ها، دامنه تغییرات مقدار پتاسیم تبادلی، غیرتبادلی و

توسط گیاهان زراعی دارد؛ بنابراین، مطالعه حاضر با هدف بررسی اشکال مختلف پتاسیم و سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌های دشت دامنه‌ای شهرکرد، در ارتباط با کانی‌شناسی رس و سایر ویژگی‌های خاک انجام شد.

مواد و روش‌ها

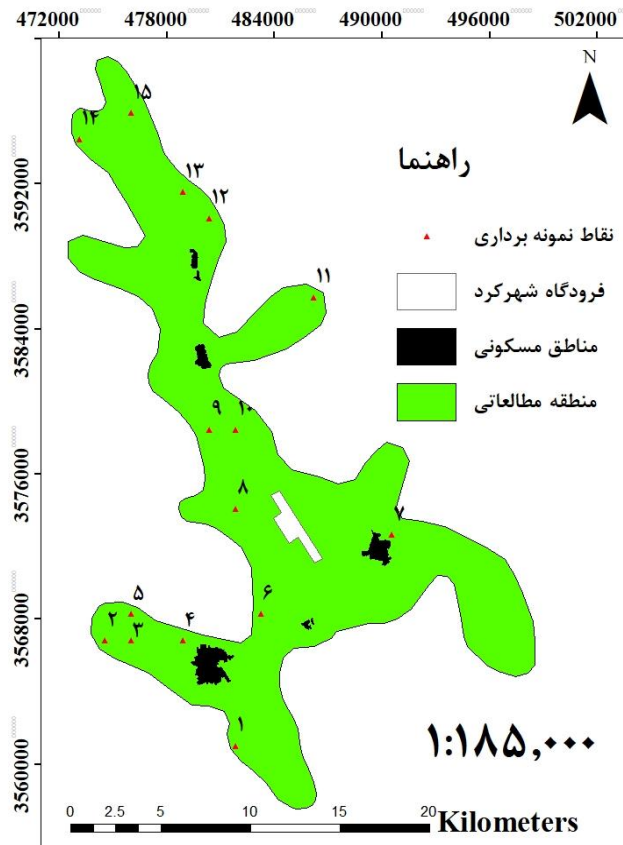
دشت شهرکرد با کاربری زراعی و وسعت ۲۱۴۰۰ هکتار، تحت کشت آبی گندم، یونجه، سیب‌زمینی و ذرت است. به استناد آمار ایستگاه هواشناسی سینوپتیک شهرکرد، میانگین دما در گرم‌ترین ماه سال (تیر ماه)، ۲۴/۶ درجه سلسیوس و در سردترین ماه سال (دی ماه) بین ۰ تا ۴- درجه سلسیوس و متوسط بارش سالانه در این منطقه ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر است. رژیم حرارتی خاک منطقه مزیک و رژیم رطوبتی آن زیریک است. خاک غالب منطقه بر اساس گزارشات موجود در زیرگروه Typic calcixerepts قرار می‌گیرد.

به‌منظور مطالعه دینامیک پتاسیم خاک و ارتباط آن با کانی‌های رسی، ۱۲۰ نمونه خاک زراعی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری در فروردین‌ماه 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). سپس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های انتخاب‌شده، 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، پتاسیم تبادلی خاک‌ها به روش استات آمونیوم یک نرمال (Knudsen et al., 1982) و پتاسیم غیرتبادلی خاک‌ها به روش اسید نیتریک مولار و جوشان (Al-Kanani et al., 1984) استخراج و با دستگاه فلیم‌فتومتر اندازه‌گیری شد (مدل کورنینگ ۴۱۰).

کل در خاک‌ها به‌ترتیب؛ ۴۳۶-۲۳۰، ۱۲۳۵-۲۸۲ و ۹۲۰۱-۲۳۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک گزارش شده است. Najafi-Ghiri و همکاران (۲۰۱۹)، نشان دادند که در خاک‌های آهکی استان کهگیلویه و بویراحمد؛ ایلیت، اسمکتیت‌ها، کلریت‌ها، پالی‌گورسیت و مقادیر کمی ورمیکولیت، کائولینیت و کوارتز یافت می‌شود؛ در مناطق مرطوب‌تر اسمکتیت‌ها و ایلیت و در مناطق خشک‌تر پالی‌گورسیت غالب بود. مقادیر پتاسیم محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختمانی در خاک‌های مورد مطالعه، به‌ترتیب؛ ۱۲/۱-۱/۲، ۵۲۱-۱۱۱، ۱۷۰۵-۱۵۳ و ۴۵۸۴-۱۰۳۷۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. آن‌ها گزارش کردند که شکل‌های پتاسیم با مقدار رس و ظرفیت تبادل کاتیونی همبستگی مثبت و معنی‌داری و با کربنات کلسیم همبستگی منفی و معنی‌داری دارد؛ پتاسیم تبادلی با اسمکتیت و پتاسیم غیرتبادلی با ایلیت مرتبط بود و مقدار پتاسیم ساختمانی و کل در خاک‌های دارای اسمکتیت و ایلیت به‌طور معنی‌داری بالاتر از سایر خاک‌ها بود.

در دشت‌های دامنه‌ای، به‌دلیل پایداری ژئومورفولوژیکی، تغییرات رس و تحول کانی‌های رسی رخ می‌دهد که منجر به تجمع کانی‌هایی مانند ایلیت و اسمکتیت‌ها می‌شود. این کانی‌ها دارای مقادیر متفاوتی پتاسیم هستند، بنابراین مقدار و نوع پتاسیم در این خاک‌ها به تنوع کانی‌های رسی موجود بستگی دارد. همچنین، تفاوت در ریزاقلیم‌ها در دشت دامنه‌ای، تأثیر معنی‌داری بر توزیع اشکال پتاسیم (محلول، تبادلی و غیرتبادلی) دارد. علمداری و همکاران (Alamdari et al., 2015)، با مطالعه ارتباط بین نوع کانی‌های رسی و شکل‌های مختلف پتاسیم، بیان کردند که در واحد فیزیوگرافی دشت دامنه‌ای که کانی ایلیت و اسمکتیت‌های بیشتری دارد، همه شکل‌های پتاسیم نسبت به اراضی پست و دشت رسوبی رودخانه‌ای دارای مقادیر بالاتری هستند.

بررسی نوع کانی‌شناسی رس در خاک‌ها، اشکال مختلف پتاسیم و سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی، برای درک بهتر ارتباط میان کانی‌ها و فرآیندهای تثبیت و آزادسازی پتاسیم و مدیریت کوددهی ضروری است. تبدیل شکل‌های مختلف پتاسیم به یکدیگر، جزئی از دینامیک و پویایی پتاسیم در خاک است؛ به‌طوری که با گذشت زمان بخشی از پتاسیم غیرتبادلی و ساختمانی می‌تواند به پتاسیم محلول و تبادلی تبدیل شود و بالعکس. بررسی وضعیت اشکال مختلف پتاسیم و سرعت رهاسازی پتاسیم غیرتبادلی و ارتباط آن‌ها با کانی‌شناسی خاک، اهمیت زیادی در تعیین ذخایر پتاسیم، پیش‌بینی چرخه آن و جذب



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری خاک مورد مطالعه مناطق زراعی دشت شهرکرد

Figure 1. Geographical location of the soil sampling points in the agricultural areas of the Shahrekord plain

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 فلیم‌فوتومتر (مدل کورنینگ ۴۱۰) اندازه‌گیری شد. سپس ۲۰ میلی لیتر 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 (Hosseinpour, 2004).

کانی‌شناسی بخش رس با روش Kittrick و Hope (۱۹۶۳)، انجام گردید. بدین منظور کربنات کلسیم، ماده آلی و اکسیدهای آهن و آلومینیوم از نمونه‌ها حذف گردید. حذف کربنات کلسیم با استفاده از بافر استات سدیم نرمال با $pH=5$ ، حذف ماده آلی با آب اکسیژنه و حذف اکسیدهای آهن و آلومینیوم با استفاده از بافر سدیم سیترات با $pH=7/3$ و سدیم دی‌تیونات روی حمام بن‌ماری در دمای ۸۰ درجه سلسیوس انجام شد. سپس، برای پراکنده شدن ذرات از بی‌کربنات سدیم ۲ درصد استفاده گردید. برای جداسازی بخش رس، نمونه‌ها به سیلندر منتقل و بعد از گذشت ۷ ساعت و ۴۵ دقیقه، بخش رس نمونه‌ها با استفاده از

قبل از شروع آزمایش‌های سینتیکی برای خارج کردن پتاسیم تبدلی 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 تکان‌دهنده 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 غیرتبدلی از روش عصاره‌گیری متوالی استفاده شد. بدین منظور به ۲ گرم از نمونه خاک‌های اشباع‌شده با کلسیم، ۲۰ میلی‌لیتر محلول کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار اضافه و نمونه‌ها به‌وسیله تکان‌دهنده برقی به مدت ۳۰ دقیقه تکان داده شدند. نمونه‌ها در دستگاه انکوباتور در دمای 25 ± 1 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،

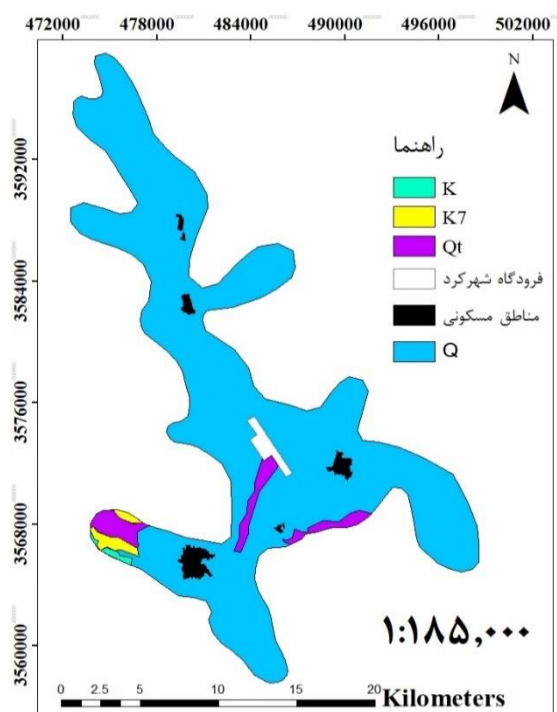
پتاسیم و تیمار پتاسیم با حرارت ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد یکسان باشد، این موضوع نشان‌دهنده عدم وجود کانی ورمی‌کولایت در خاک است (Dixon and Weed, 1992).

جهت بررسی ارتباط بین شکل‌های پتاسیم و مقدار آزادسازی پتاسیم غیرتبدلی پس از ۲۰۱۷ ساعت، با ویژگی‌های خاک از ضریب همبستگی پیرسون با استفاده از نرم‌افزار Statistica 8 بهره‌برداری شد.

نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی بر اساس رقومی سازی مرزهای نقشه زمین‌شناسی پایه با مقیاس (۱:۱۰۰۰۰۰) و جدول راهنمای آن به ترتیب در شکل ۲ آورده شده است. براین اساس، خاک‌های این منطقه به‌طور عمده بر روی رسوبات رسی و سیلتی مربوط به دوران چهارم زمین‌شناسی (دوره‌ی کواترنری) تشکیل شده‌اند. از لحاظ واحد فیزیوگرافی، در دشت دامنه‌ای شهرکرد، خاک‌ها در اثر انتقال و ته‌نشست مواد دانه ریز انتقالی از ارتفاعات در قسمت‌های نسبتاً مسطح تشکیل شده که شیب آن‌ها، از ۵-۸ درصد تجاوز ننموده و پستی و بلندی در آن‌ها کم تا نسبتاً کم می‌باشند.

سیفون از سایر اجزاء جدا گردید. نمونه‌های رس توسط پتاسیم و منیزیم اشباع شدند و به‌منظور تشخیص نوع کانی‌ها، تیمارهای منیزیم، منیزیم-اتیلن گلیکول، منیزیم-گلیسرول، پتاسیم و پتاسیم با حرارت ۱۱۰، ۳۵۰ و ۵۵۰ درجه سلسیوس، توسط دستگاه پراش اشعه ایکس مدل D8 ADVANCE با ولتاژ ۴۰ کیلو وات و شدت جریان ۳۰ میلی‌آمپر، مورد تجزیه قرار گرفت. نمونه‌های اشباع با کلرید منیزیم تحت زاویه ۲θ، ۴-۴۰ و سایر تیمارها در زاویه ۲θ، ۴-۱۵ مطالعه شدند.

پس از تهیه و اشباع نمونه‌های رس با پتاسیم و منیزیم، به‌منظور تمایز اسمکتیت‌ها و ورمی‌کولایت‌ها از کلریت‌ها، نمونه‌ها تحت تیمارهای تکمیلی قرار گرفتند. ابتدا نمونه‌ها پس از تیمار منیزیم، با گلیسرول تیمار شدند. در صورت وجود اسمکتیت‌ها، بخشی از پیک ۱۴ آنگستروم به ۱۷-۱۸ آنگستروم تغییر می‌یابد و پهنای آن افزایش می‌یابد، در حالی که پیک مربوط به کلریت‌ها بدون تغییر باقی می‌ماند. کاهش شدت پیک ۱۴ آنگستروم در تیمار منیزیم اشباع با اتیلن گلیکول نسبت به تیمار منیزیم نیز نشان‌دهنده حضور اسمکتیت‌ها در خاک است. همچنین، در صورتی که نقطه فراز پیک ۱۰ آنگستروم در تیمار



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی دشت شهرکرد (مبنای این نقشه، نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استان است).

Q: رسوبات سیلابی و تراس‌های جوان (ترکیبی از رس، سیلت و شن درشت)، Qt: رسوبات مخروط‌افکنه، K: آهک اوربئین‌دار در بخش پایین به‌طور محلی دارای رسوبات تبخیری، K7: آهک مارنی فسیل‌دار و لایه‌های نازک آهک رسی ماسه‌ای.

Figure 2. Geological map of the Shahrekord plain (based on the 1:100,000-scale geological map of the province).

Q: Floodplain deposits and young terraces (a mixture of clay, silt, and coarse sand), Qt: Alluvial fan deposits

K: Orbitolina-bearing limestone in the lower part, locally containing evaporitic deposits

K7: Fossiliferous marly limestone and thin layers of sandy clayey limestone.

نتایج و بحث

مواد آلی ۱/۵۲-۰/۲۳ درصد، کربنات کلسیم معادل ۴۶/۰-۲۴/۰ درصد، ظرفیت تبادل کاتیونی ۲۳/۷-۱۳/۳ سانتی‌مول‌بار بر کیلوگرم و بافت خاک‌ها سبک تا سنگین بودند.

نتایج برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خاک‌ها دارای pH ۸/۲-۷/۷،

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در خاک‌های مطالعه شده

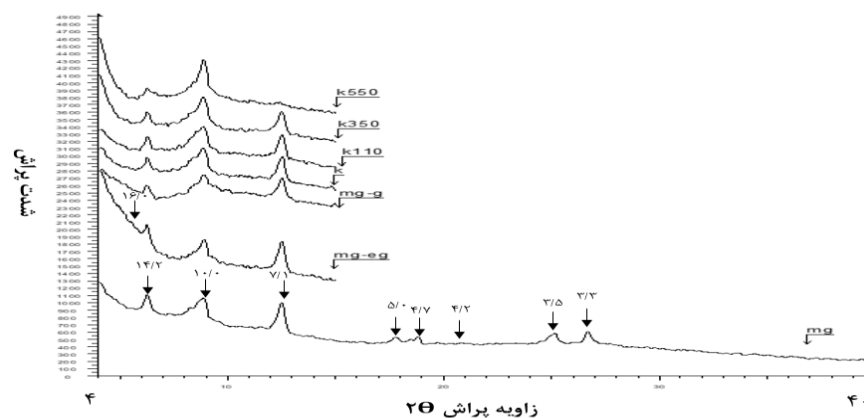
Table 1. Some physical and chemical properties of the studied soils

شماره نمونه	pH _{1:2}	EC _{1:2}	رس	سیلت	ماده آلی	کربنات کلسیم معادل	ظرفیت تبادل کاتیونی
Sample No.			Clay	Silt	OM	ECC	CEC
		دسی‌زیمنس بر متر dS.m ⁻¹			درصد %		سانتی‌مول‌بار بر کیلوگرم خاک Cmol ⁺ .kg ⁻¹
1	7.8	0.40	17.4	26.0	0.68	24.0	13.3
2	7.9	0.31	17.4	16.0	0.23	33.5	20.0
3	7.8	0.37	17.4	20.0	0.82	43.0	18.0
4	8.1	0.38	17.4	22.0	1.28	46.0	22.0
5	8.0	0.31	41.4	28.0	0.51	38.2	23.7
6	8.0	0.35	43.4	34.0	0.98	29.3	21.0
7	8.1	0.35	17.4	20.0	0.68	27.8	16.8
8	8.0	0.39	19.4	34.0	1.52	33.2	21.2
9	8.0	0.32	33.4	24.0	0.87	28.3	19.7
10	8.0	0.33	47.4	28.0	0.72	36.2	21.2
11	7.9	0.31	17.4	18.0	0.62	29.0	21.4
12	7.7	0.34	19.4	14.0	0.87	24.5	21.3
13	8.0	0.33	17.4	16.0	1.02	24.5	22.1
14	8.1	0.31	35.4	38.0	0.40	34.2	18.2
15	8.1	0.32	41.4	32.0	0.65	30.0	21.4
میانگین (average)	8.0	0.34	27.0	25.0	0.79	32.1	20.0

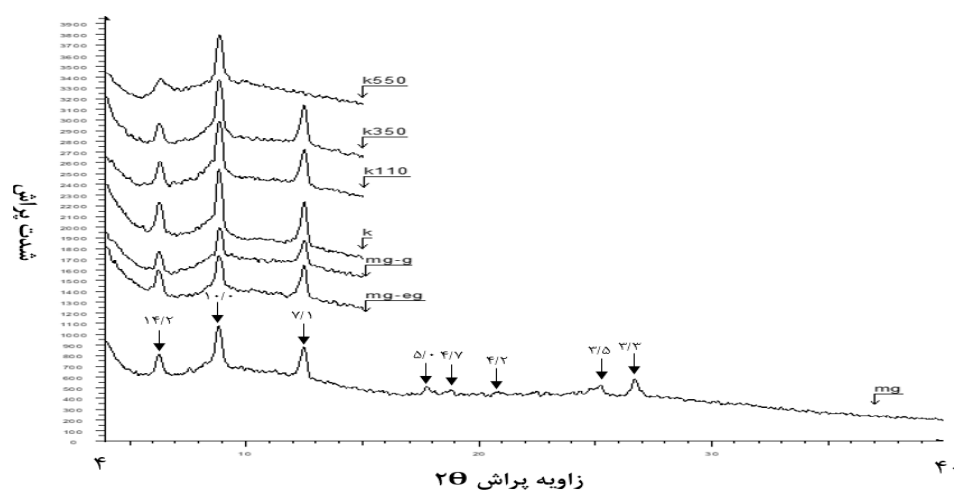
معمولاً نشان‌دهنده وجود شرایط اقلیمی گرم و مرطوب در گذشته منطقه می‌باشد (Khormali and Abtahi, 2003). منشأ کانی کلریت‌ها می‌تواند مربوط به مواد مادری غنی از کلریت و رسوبات اولیه در خاک باشد. در دشت دامنه‌ای شهرکرد که زمین‌شناسی غالب آن را رسوبات سیلابی و تراس‌های جوان تشکیل می‌دهد، احتمالاً وجود کلریت‌ها، بیشتر ناشی از منشأ مواد مادری و رسوبات اولیه در خاک است (Salehi et al., 2003). همچنین، افزایش شدت پیک رده اول کلریت (۱۴ آنگستروم) در تیمار پتاسیم با دمای ۱۱۰ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، نشان‌دهنده تری اکتاهدرال بودن این کانی است (Dixon and Weed, 1992). وجود کانی میکاها در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، عمدتاً ناشی از منشأ مواد مادری می‌باشد.

شکل ۳ دیفرکتوگرام‌های مربوط به رس را در نمونه‌های ۱، ۶ و ۷ نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که کانی‌های غالب در نمونه‌های ۱ و ۷، شامل؛ میکاها، کلریت‌ها، کائولینیت، اسمکتیت‌ها، کوارتز و مقدار کمی کانی مخلوط میکاها- کلریت‌ها هستند. نوع کانی‌ها در همه نمونه‌های مورد مطالعه، یکسان بود، ولی از لحاظ مقدار تا حدی با هم تفاوت داشتند (سایر دیفرکتوگرام‌ها ارائه نشده است). دیفرکتوگرام‌های بخش رس نمونه خاک شماره ۶ نشان می‌دهد که کانی‌های غالب در این نمونه، شامل؛ میکاها، کلریت‌ها، کائولینیت، کوارتز و کانی مخلوط میکاها- کلریت‌ها هستند.

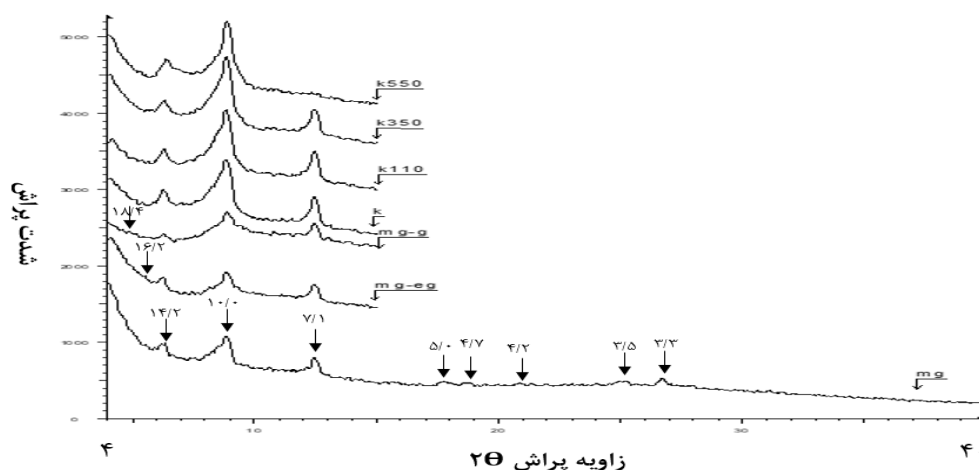
تشکیل کانی کائولینیت نیازمند اقلیم گرم و مرطوب با زهکشی مناسب است؛ بنابراین، حضور این کانی در خاک‌ها



الف)
نمونه رس ۱



ب)
نمونه رس ۶



ج)
نمونه رس ۷

شکل ۳- دیفرکتوگرام رس مربوط به نمونه ۱ (الف)، ۶ (ب) و ۷ (ج). Mg: نمونه اشباع با منیزیم، Mg-eg: نمونه منیزیم اشباع با اتیلن گلیکول، Mg-g: نمونه منیزیم اشباع با گلیسرول، K: نمونه اشباع با پتاسیم، K110: نمونه اشباع با پتاسیم و حرارت ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد، K350: نمونه اشباع با پتاسیم و حرارت ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، K550: نمونه اشباع با پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد.

Figure 3. Clay diffractograms of samples 1 (a), 6 (b), and 7 (c). 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.

نتایج مقادیر شکل‌های مختلف پتاسیم و مقدار آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در جدول ۲، نشان داده شده است. دامنه تغییرات مقدار پتاسیم محلول، تبادلی و غیرتبادلی به ترتیب؛ ۹۹/۷-۱۱/۵، ۶۱۲/۷-۱۰۸/۵ و ۴۹۱-۲۰۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. دامنه تغییرات مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزادشده پس از ۲۰۱۷ ساعت، ۴۷۹/۰-۲۲۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. کمترین مقدار پتاسیم محلول، تبادلی، غیرتبادلی و مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزادشده پس از ۲۰۱۷ ساعت در خاک شماره ۱ می‌باشد. بیشترین مقدار پتاسیم محلول و غیرتبادلی در خاک شماره ۷، بیشترین پتاسیم تبادلی در خاک شماره ۱۲ و بیشترین مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزادشده پس از ۲۰۱۷ ساعت در خاک شماره ۱۱ بود.

مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده با عصاره‌گیری متوالی با کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار در خاک‌ها در شکل ۴، نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در تمام خاک‌ها، سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی تا ۱۶۸ ساعت سریع بوده،

سپس کند شده و با سرعت نسبتاً ثابتی تا پایان ۲۰۱۷ ساعت ادامه یافته است. مشابه این روند نیز توسط سایر محققین گزارش شده است (Zareian et al., 2018). آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی با سرعت بالا پس از ۱۶۸ ساعت را می‌توان به علت آزاد شدن پتاسیم از مناطق لبه‌ای و گوه‌ای شکل کانی‌ها با انرژی جذب کم دانست. در ادامه با افزایش فاصله پتاسیم از لبه کانی‌ها و افزایش فاصله پخشیدگی، پتاسیم‌های بین لایه‌ای در ساختمان کانی آزاد می‌شوند که رهاسازی با سرعت کمتری صورت می‌گیرد. تفاوت در مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده می‌تواند به علت نوع و اندازه کانی‌های پتاسیم‌دار و شرایط محیطی باشد (Han et al., 2024). همچنین، ویژگی‌های کانی‌های پتاسیم‌دار شامل؛ منشأ بار لایه‌ای، ساختمان بلور و ترکیب شیمیایی کانی، جهت‌گیری هیدروکسیل ساختمانی، تغییر بار لایه‌ای و درجه تخلیه کانی از پتاسیم، نقش مهمی در آزاد کردن پتاسیم غیرتبادلی دارند (Gurav et al., 2024).

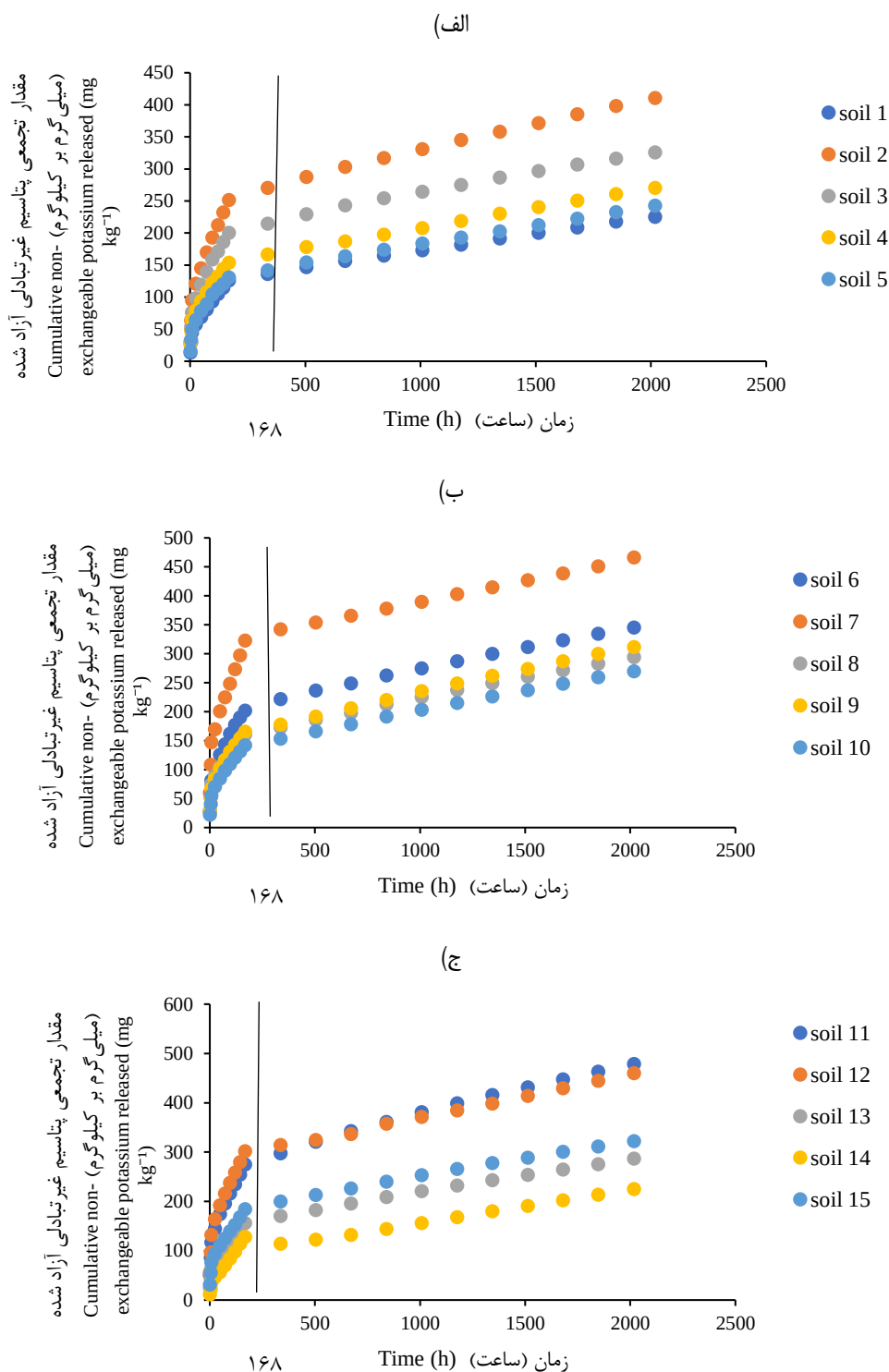
جدول ۲- مقادیر شکل‌های پتاسیم و مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۱۶۸ و ۲۰۱۷ ساعت (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در خاک‌های مطالعه شده

Table 2. Amounts of potassium forms and the non-exchangeable potassium released after 168 and 2017 hours (mg kg⁻¹) in the studied soils

شماره نمونه	پتاسیم محلول	پتاسیم تبادلی	پتاسیم غیرتبادلی	مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۱۶۸ ساعت	مقدار تجمعی پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت
Sample No.	Soluble Potassium	Exchangeable Potassium	Non-Exchangeable Potassium	Cumulative release of non-exchangeable potassium after 168 hours	Cumulative release of non-exchangeable potassium after 2017 hours
			میلی‌گرم بر کیلوگرم mg.kg ⁻¹		
1	11.5	108.5	491	126.0	225.0 (46)*
2	22.7	355.3	1212	251.5	410.5 (34)
3	16.7	225.3	778	200.0	325.5 (42)
4	19.3	120.7	1305	153.5	270.5 (21)
5	11.7	156.3	527	130.5	242.5 (46)
6	30.7	307.3	1007	202.0	361.0 (36)
7	99.7	585.3	2065	323.0	466.5 (23)
8	18.7	439.3	822	160.5	294.5 (36)
9	16.0	466.0	700	166.0	312.0 (45)
10	13.5	441.5	845	142.5	270.0 (32)
11	53.7	595.3	1291	275.0	479.0 (37)
12	65.3	612.7	1382	302.0	460.5 (33)
13	29.5	462.5	1028	156.0	287.0 (28)
14	12.7	413.3	575	128.0	226.5 (39)
15	16.3	498.7	775	184.5	322.5 (42)
میانگین	29.2	385.9	986.9	191.5	330.2 (33)

*: پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت به روش عصاره‌گیری متوالی

*: Non-exchangeable potassium released after 2017 hours by the sequential extraction method



شکل ۴- مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده توسط عصاره‌گیر کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار در خاک‌های مطالعه شده (الف، ب و ج)
Figure 4. Amount of non-exchangeable potassium released by 0.01 M calcium chloride extractant in the studied soils

دارای مقدار پتاسیم غیرتبادلی بالایی (۲۰۶۵ میلی گرم بر کیلوگرم) بود، اما کمترین درصد آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی (۲۳ درصد) را نشان داد؛ این امر عمدتاً ناشی از نوع و فراوانی کانی‌های رسی است. در خاک شماره ۱، حضور اسمکتیت‌ها باعث آزادسازی

در نمونه خاک شماره ۱ و خاک شماره ۷، درصد رس یکسان و محتوای سیلت نیز تقریباً برابر بود. در نمونه ۱، با وجود کمترین مقدار پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی، بیشترین آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی (۴۶ درصد) مشاهده شد. در مقابل، خاک شماره ۷،

اسمکتیت‌های با بار لایه‌ای زیاد، قابلیت انبساط کمتری دارند در حالی‌که اسمکتیت‌های دارای با لایه‌ای کم، بیشتر منبسط شده و پیک‌های قوی بیشتر از ۱۷ آنگستروم دارند (Fanning et al., 1992).

دو شکل پتاسیم تبادلی و محلول، اشکال قابل دسترس پتاسیم برای گیاهان تلقی می‌شوند، با این وجود، مطالعات نشان داده است که دو شکل پتاسیم غیرتبادلی و ساختمانی می‌توانند در تغذیه گیاه موثر باشند (Wang et al., 2000). کشت طولانی مدت گیاهان با تقاضای بالای پتاسیم، در خاک‌هایی که کود پتاسه دریافت نکرده‌اند یا به میزان اندکی دریافت کرده‌اند، سبب رها سازی پتاسیم از مکان‌های بین لایه‌ای و تخریب ساختار کانی می‌گردد و باعث افزایش فاصله بین لایه‌ای در کانی‌های رسی می‌شود. Barre و همکاران (۲۰۰۸)، گزارش نمودند که در اثر کشت مداوم و عدم مصرف کودهای پتاسه، مقدار کانی‌های میکا کاهش یافته و کانی‌های انبساط‌پذیر مانند اسمکتیت‌ها فراوانی بیشتری پیدا کردند. Murrell و همکاران (۲۰۲۱)، گزارش نمودند که کوددهی طولانی مدت با پتاسیم، محتوای پتاسیم تثبیت شده در کانی‌های میکایی و شبه میکایی خاک را افزایش می‌دهد، اگرچه این کانی‌ها ویژگی‌های کامل میکای اولیه را ندارند و نمی‌توان آن‌ها را به عنوان میکای اولیه طبقه‌بندی کرد. Ross و همکاران (۱۹۸۹) چنین مشاهداتی را پس از چهار سال کوددهی زیاد پتاسیم در خاک‌های منطقه نی‌آگارا در جنوب انتاریو گزارش نمودند و بیان کردند که با مصرف زیاد کود پتاسه، تثبیت پتاسیم در خاک افزایش یافت و ورمی‌کولایت خصوصیات ساختاری شبیه میکا پیدا کرد. Bhonsle و همکاران (۱۹۹۲)، گزارش نمودند که بالاترین مقدار پتاسیم تبادلی، در خاک‌هایی با رس غالب اسمکتیت وجود دارد.

با توجه به اینکه نوع و ترکیب کانی‌های رس بر رفتار آزادسازی پتاسیم و تثبیت آن در خاک تأثیر می‌گذارد، بررسی ارتباط بین اشکال مختلف پتاسیم و ویژگی‌های خاک می‌تواند درک بهتری از دسترسی پتاسیم برای گیاهان فراهم کند. جدول ۳، همبستگی شکل‌های پتاسیم و مقدار آزادسازی تجمعی پتاسیم غیرتبادلی پس از ۲۰۱۷ ساعت با ویژگی‌های خاک را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که غلظت پتاسیم محلول، غیرتبادلی و مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت، با قابلیت هدایت الکتریکی همبستگی مثبت داشت (به ترتیب: $r=0.54^{***}$ ، $r=0.45^{**}$ و $r=0.25^{**}$ ، پتاسیم محلول و غیرتبادلی با ظرفیت تبادل کاتیونی همبستگی منفی (به ترتیب: $r=-0.18^{*}$ و $r=-0.26^{*}$ ، $r=0.21^{*}$)، پتاسیم محلول با ماده آلی همبستگی مثبت ($r=0.34^{***}$) و پتاسیم تبادلی با کربنات کلسیم معادل همبستگی منفی ($r=-0.34^{***}$)

سریع‌تر پتاسیم غیرتبادلی شد، در حالی که در خاک شماره ۷، فراوانی میکاها و ظرفیت بالای آن‌ها برای تثبیت پتاسیم غیرتبادلی، موجب کاهش درصد آزادسازی پتاسیم شد. Srinivasarao و همکاران (۲۰۰۶)، گزارش نمودند که مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده در خاک‌های اسمکتیتی ۳۵۳ میلی گرم بر کیلوگرم و در خاک‌های ایلیتی، ۱۵۱ میلی گرم بر کیلوگرم خاک بود. سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌های اسمکتیتی بیشتر است، در حالی که در خاک‌های ایلیتی، مقدار پتاسیم تبادلی سطح رس کم و مقدار پتاسیم غیرتبادلی بیشتر است.

در خاک‌هایی که مصرف کودهای پتاسه زیاد است، کانی‌های ورمی‌کولایت و اسمکتیت می‌توانند تحت تأثیر پتاسیم اضافی و فرآیندهای تبادل به کانی‌هایی با رفتار مشابه میکا تبدیل شوند (Ross et al., 1989). علاوه بر این، شست‌وشوی زیاد، شرایط را برای آزادسازی پتاسیم از میکاها فراهم کرده و باعث هوادیدگی آن به سایر کانی‌های سیلیکاته ۲:۱ می‌شود (Dixon and Weed, 1992).

Simonsson و همکاران (۲۰۰۹)، گزارش نمودند که مدیریت بلندمدت پتاسیم، چه از طریق کوددهی و چه برداشت مستمر، بر ظرفیت تثبیت پتاسیم در خاک تأثیر می‌گذارد و این تغییرات با تغییر شدت پیک میکا (پیک ۱۰ آنگستروم) قابل مشاهده است. در شرایط کوددهی زیاد پتاسیم، یون‌های پتاسیم وارد فضای بین‌لایه‌ای ایلیت می‌شوند و تثبیت پتاسیم موجب افزایش شدت پیک ۱۰ آنگستروم در نمونه‌های تیمار شده با پتاسیم می‌شود. بر این اساس، در دیفرکتوگرام‌های مطالعه شده، افزایش شدت پیک ۱۰ آنگستروم در تیمار پتاسیم نشان دهنده کاربرد طولانی مدت کود پتاسه و تثبیت پتاسیم در این خاک‌هاست. وجود پیک‌های حد واسط، پله‌ای و شانه‌ای، بیانگر حضور کانی‌های مخلوط و حد واسط بوده و نشان‌دهنده‌ی تداوم فرآیند هوادیدگی در خاک‌های مورد مطالعه است. وجود کانی‌های مخلوط میکاها-کلریت‌ها، ممکن است به دلیل هوادیدگی کلریت‌ها و خارج شدن لایه‌های هیدروکسی بین لایه‌ای و تغییر بار و تبدیل آن به کانی‌های دیگر باشد. کانی اسمکتیت‌ها در همه نمونه‌ها به جز خاک شماره ۶، وجود دارد. این کانی در خاک‌ها، دارای سه منشأ می‌باشد؛ منشأ تخریبی یا توارثی، تبدیل سایر کانی‌ها به اسمکتیت‌ها و نوتشکیلی از محلول خاک. در حالت نوتشکیلی، به دلیل افزایش غلظت عناصر و چرخه‌های متناوب خشک و تر شدن خاک ناشی از آبیاری زمین‌های زراعی، شرایط برای تشکیل اسمکتیت‌ها فراهم می‌شود. منشأ اسمکتیت‌ها در خاک‌های مورد مطالعه، عمدتاً شامل تبدیل سایر کانی‌ها و نوتشکیلی از محلول خاک است. همچنین، در بیشتر نمونه‌های مطالعه شده، اسمکتیت دارای بار لایه‌ای متفاوت مشاهده شد.

$r=$ داشت. اشکال پتاسیم با سایر ویژگی‌ها از جمله مقدار رس، همبستگی ندارد.

عدم وجود همبستگی بین اشکال پتاسیم و مقدار رس نشان می‌دهد که میزان پتاسیم بیش از آنکه تحت تأثیر درصد کل رس باشد، تحت تأثیر نوع و ترکیب کانی‌های رس قرار دارد. با وجود اینکه نوع کانی‌های رس در همه نمونه‌ها مشابه است و شامل میکاها، کلریت‌ها، کائولینیت، اسمکتیت‌ها، کوارتز و مقادیری از کانی مخلوط میکاها-کلریت‌ها می‌باشد، تفاوت در مقادیر نسبی این کانی‌ها می‌تواند رفتار آزادسازی و تثبیت پتاسیم را تحت تأثیر قرار دهد. به همین دلیل، همبستگی مستقیمی بین اشکال مختلف پتاسیم و مقدار کل رس مشاهده نمی‌شود. برای مثال، خاک شماره ۱ با مقدار رس و سیلت مشابه خاک شماره ۷، پتاسیم غیرتبادلی کمتری دارد، اما سرعت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی در آن بیشتر است، همچنین، همان‌طور که دیفرکتوگرام رس نمونه ۷ نشان می‌دهد، این نمونه با کمترین مقدار

اسمکتیت‌ها، پتاسیم غیرتبادلی بالایی دارد که عمدتاً ناشی از حضور بالای میکاها است و نشان می‌دهد که نسبت بالای میکاها می‌تواند ظرفیت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی را کاهش دهد. این موضوع نشان می‌دهد که ترکیب کانی‌های رسی می‌تواند ظرفیت آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی را تحت تأثیر قرار دهد و صرفاً مقدار کل رس تعیین‌کننده آن نیست. در خاک شماره ۶ که کانی اسمکتیت‌ها مشاهده نشده است، میزان پتاسیم غیرتبادلی و تبادلی هنوز تحت تأثیر نسبت بالای میکاها قرار دارد. خاک‌هایی که دارای مقادیر بیشتری میکاها هستند، ممکن است آزادسازی آرام‌تر پتاسیم غیرتبادلی را نشان دهند؛ بنابراین، میزان نسبی کانی‌ها در خاک و نه صرفاً مقدار کل رس، عامل تعیین‌کننده رفتار پتاسیم در خاک‌های مطالعه شده است.

جدول ۳- همبستگی شکل‌های پتاسیم با ویژگی‌های خاک

Table 3. Correlation of potassium forms with soil properties

فرم‌های پتاسیم Forms of potassium	pH	EC	رس	سیلت	شن	CEC	ماده آلی	کربنات کلسیم معادل
پتاسیم محلول Soluble potassium	0.16 ^{ns}	0.54**	-0.08 ^{ns}	0.11 ^{ns}	-0.02 ^{ns}	-0.18*	0.21*	-0.01 ^{ns}
پتاسیم تبادلی Exchangeable potassium	0.06 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.16 ^{ns}	-0.16 ^{ns}	0.0004 ^{ns}	0.13 ^{ns}	-0.04 ^{ns}	-0.34**
پتاسیم غیرتبادلی Non-exchangeable potassium	0.11 ^{ns}	0.45**	-0.14 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.07 ^{ns}	-0.26*	-0.10 ^{ns}	0.11 ^{ns}
مقدار پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت Amount of non-exchangeable potassium released after 2017 hours	0.10 ^{ns}	0.25**	-0.09 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.001 ^{ns}	-0.12 ^{ns}	0.07 ^{ns}	-0.15 ^{ns}

** : معنی‌دار در سطح ۱ درصد، * : معنی‌دار در سطح ۵ درصد و ^{ns} : غیر معنی‌دار

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

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر نشان داد که مقادیر پتاسیم محلول، تبادلی، غیرتبادلی و پتاسیم غیرتبادلی آزاد شده پس از ۲۰۱۷ ساعت، در خاک‌های مختلف، متفاوت بود. کانی‌های غالب در این خاک‌ها شامل میکاها، کلریت‌ها، کائولینیت، اسمکتیت‌ها، کوارتز و مقادیر اندکی کانی‌های مختلط میکا-کلریت بودند که از نظر سهم نسبی با یکدیگر متفاوت بودند. اسمکتیت‌ها با بار لایه‌ای متغیر و میکاها به‌عنوان منابع مهم پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی در این خاک‌ها نقش داشتند. دینامیک پتاسیم در خاک‌های زراعی

دشت شهرکرد عمدتاً تحت تأثیر نوع و ترکیب کانی‌های رسی قرار داشت، بر این اساس، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌ریزی بهینه کوددهی پتاسیمی در این خاک‌ها، با در نظر گرفتن ترکیب کانی‌های رسی و وضعیت پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی انجام شود تا نیاز گیاهان به طور مؤثر تأمین و از مصرف غیرضروری کود جلوگیری شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

References

1. Alamdari, p., Kamrani, V., and Mohammadi, M. H. 2015. Clay Mineralogy Relationships with Potassium Forms in Different Physiographic Units. *Water and Soil*, 29(6): 1578-1589. <https://doi.org/10.22067/jsw.v29i6.34905> (In Persian).
2. Al-Kanani, T., Mackenzie, A. F., and 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.
3. Barre, P., Montagnier, C., Chenu, C., Abbadie, L., and Velde, B. 2008. Clay minerals as a soil potassium reservoir: observation and quantification through X-ray diffraction. *Plant and Soil*, 302(1): 213-220. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-007-9471-6>
4. Bohn, H. L., McNeal, B. L., and Connor, A. O. 1985. *Soil Chemistry*. John Wiley and Sons, New York.
5. Bertsch, P. M., and Thomas, G. W. 1985. Potassium status of temperate region soils. *Potassium in agriculture*, 129-162.
6. Bhat, M. A., Tomar, D., Grewal, K. S., Sahoo, J., & Dar, E. A. (2023). Non-exchangeable potassium release and supplying power of soils of Haryana, Northwest India. *Journal of Plant Nutrition*, 46(17), 4140-4155. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2221683>
7. Bhonsle, N. S., Pal, S. K. and Sekhon, G. S. 1992. Relationship of K forms and release characteristics with clay mineralogy. *Geoderma*. 54(1): 285-293. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(92\)90110-S](https://doi.org/10.1016/0016-7061(92)90110-S)
8. Dixon, J. B., and Weed, S.B. 1992. *Minerals in soil environments*. 2nd ed. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, U.S.A. 1244p.
9. Fanning, D. S., Keramidas, V. Z., and El-Desokey, M. A. 1992. Micas. PP. 552-634. In: Dixon, J. B, Weed, S. B. (Eds.) *Minerals in Soil Environments*, Soil Science Society of America Book Ser 1. Soil Science Society of America, Madison, WI.
10. Gunal, H. and Ransom, M. D. 2006. Genesis and micromorphology of loess-derived soils from central Kansas. *Catena*, 65(3): 222-236. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2005.11.018>
11. Gee, G. W., and Bauder, J. W. 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.
12. Gurav, P. P., Ray, S. K., Datta, S. C., Choudhari, P. L., & and 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>
13. Hosseinpour, 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).
14. Han, G. Z., Fan, H. Z., Han, B. S., Huang, L. M., Cao, X. M., & Yang, F. (2024). Paddy management controls potassium release from minerals in purple soils after 40 years of cultivation. *European Journal of Soil Science*, 75(3), e13492. <https://doi.org/10.1111/ejss.13492>
15. Jalali, M. 2005. Release kinetics of nonexchangeable potassium in calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(13-14):1903-1917. <https://doi.org/10.1081/CSS-200062490>
16. Jini, D., Ganga, V. S., Greeshma, M. B., Sivashankar, R., and Thirunavukkarasu, A. 2024. Sustainable agricultural practices using potassium-solubilizing microorganisms (KSMs) in coastal regions: a critical review on the challenges and opportunities. *Environment*,

- Development and Sustainability, 26(6), 13641-13664.
17. Kittrick, J. A., and Hope, E. W. 1963. A procedure for the particle-size separation of soils for X-ray diffraction analysis. *Soil Science*, 96(5): 319-325.
18. Knudsen, D., Peterson, G. A., and Pratt, P. F. 1982. Lithium, Sodium and Potassium. *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.
19. Khormali, F., and Abtahi, A. 2003. Origin and distribution of clay minerals in calcareous arid and semi-arid soils of Fars Province, southern Iran. *Clay minerals*, 38(4): 511-527. <http://dx.doi.org/10.1180/0009855023740112>
20. Kaur, H. 2019. Forms of potassium in soil and their relationship with soil properties: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(10): 15801586. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.810.184>
21. Loeppert, R. H., and 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.
22. 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.
23. Mustscher, H. 1995. Measurement and assessment of soil potassium. *International potash institute Research Topics Number 4*.
24. Mouhamad, R., Alsaede, A., and Iqbal, M. 2016. Behavior of potassium in soil: a mini review. *Chemistry International*, 2(1): 58-69.
25. Murrell, T. S., Mikkelsen, R. L., Sulewski, G., Norton, R., and Thompson, M. L. 2021. Improving potassium recommendations for agricultural crops (p. 455). Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7>
26. Nelson, D. W., and 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.
27. Najafi-Ghiri, M., Owliaie, H. R., and Boostanic, H. R. 2019. Factors affecting potassium pools distribution in some calcareous soils of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province. *Applied Soil Research*, 7(2), 196-207. (In Persian).
28. Prajapati, K., and Modi, H. A. 2012. The importance of potassium in plant growth—a review. *Indian journal of plant sciences*, 1(02-03): 177-186.
29. 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.
30. Ross, G. J., Gamble, D. S., and Cline, R. A. 1989. Potassium exchange and fixation in some southern Ontario soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 69(3): 649-661
31. 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>
32. Srinivasarao, C., R. N. Singh, A. N. Ganeshamurthy, G. Singh and A. Masood. 2007. Fixation and recovery of added phosphorus and potassium in different soil types of pulse growing regions of India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 38: 449-460. <http://dx.doi.org/10.1080/00103620601174080>
33. Sumner, M. E., and Miller, W. P. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5: 1201-1229.
34. Sparks, D. L. 1987. Potassium dynamics in soils. In *Advances in soil*

- science (pp. 1-63). New York, NY: Springer New York.
35. Simonsson, M., Hillier, S., and Oborn, I. 2009. Changes in clay minerals and potassium fixation capacity as a result of release and fixation of potassium in long-term field experiments. *Geoderma*, 151(3-4), 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.018>
36. Sadri, N., Owliaie, H. R., Adhami, E., and Najafi Ghiri, M. 2016. Investigation of Different Forms of Potassium as a Function of Clay Mineralogy and Soil Evolution in Some Soils of Fars Province. *Water and Soil*.30(1):172-185. <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i1.38048> (In Persian).
37. Salehi, M. H., Khademi, H., and Karimian Egbal, M. 2003. Identification and formation processes of clay minerals in the soils of Farrokhsahr region, Chaharmahal and Bakhtiari Province. *Journal of Agricultural Science and Natural Resources*, 7(1), 73–89. (In Persian).
38. 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
39. Wang, J. G., Zhang, F. S., Cao Y. P., and Zhang, X. L. 2000. Effect of plant types on release of mineral potassium from gneiss. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*56:3744. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009826111929>
40. Zareian, Gh. R., HadiFarpoor, M., Hejazi-Mehrizi, M., and Jafari, A. 2018. Kinetics of Non-exchangeable Potassium Release in Selected Soil Orders of Southern Iran. *Soil and Water Research*.13(4):200-207. <https://doi.org/10.17221/138/2017-SWR>.