



Comparison of calcium and sodium in the release and re-fixation of potassium in various soils with distinct physical, chemical, and mineralogical characteristics in southern Iran

Mahdi Najafi-Ghiri¹ | Hamid Reza Boostani² | Nazanin Soleimani³ | Younes Qarzi⁴

1. Department of Soil and Water Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Iran. E-mail: mnajafighiri@shirazu.ac.ir Corresponding Author, Department of Soil and Water Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Iran. E-mail: mnajafighiri@shirazu.ac.ir

2. Department of Soil and Water Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Iran. E-mail: hrboostani@shirazu.ac.ir

3. Department of Soil and Water Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Iran. E-mail: soleymaninazanin82@gmail.com

4. Department of Soil and Water Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Iran. E-mail: younes.qarzi1226@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Apr. 7, 2025

Revised: May. 12, 2025

Accepted: May. 21, 2025

Published online: Aug. 2025

Keywords:

Smectite,

Equivalent calcium carbonate,

Clay dispersion,

Non-exchangeable potassium

ABSTRACT

The exchange of mineral interlayer potassium (K) with soluble cations in the soil can release this form of K and supply a portion of the potassium required by plants in K-depleted soils. In the present study, the ability of 0.01M CaCl₂, NaCl, and a mixture of CaCl₂ and NaCl to extract non-exchangeable K from four soils with distinct characteristics over twelve 15-minute extraction periods, and the changes in soil's capacity to re-fix K were investigated. The studied soils contained a high amount of smectite in the clay fraction with smaller amounts of chlorite, illite, and palygorskite minerals also present. Overall, NaCl extracted more K than CaCl₂ in all soils, with increases of up to 24, 64, 68, and 83% for soils 1, 2, 3, and 4, respectively. The highest amount of K was extracted from soil 3 (Ustorthents), while the lowest was from soil 4 (Torriorthents). Although, there was no significant difference between CaCl₂ and NaCl in terms of K extraction in the initial three extraction stages, NaCl extracted a greater amount of K from all soils in the subsequent nine stages with increases ranging from 47 to 149%. This enhanced extraction may be attributed to the effect of Na on the clay dispersion, which increases the contact of the solution with the exchange sites and preventing the re-fixation of K by smectites. The capacity to fix K in soil 1 (Haploxerets) was significantly higher than in the other soils, while soils subjected to NaCl extraction exhibited a reduced ability to fix K.

Cite this article Najafi-Ghiri, M., Boostani, H. R., Soleimani, N., Qarzi, Y., (2025) Comparison of calcium and sodium in the release and re-fixation of potassium in various soils with distinct physical, chemical, and mineralogical characteristics in southern Iran, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (6), 1631-1646. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.393016.669917>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.393016.669917>

EXTENDED ABSTRACT

Background and purpose:

The soils of arid and semi-arid regions of Iran contain a large amount of potassium (K) in available forms. However, some plants cultivated in these soils have recently exhibited symptoms of K deficiency. The exchange of mineral interlayer potassium (K) with soluble cations in the soil can release this form of K and supply a portion of the potassium required by plants in K-depleted soils. The ability of different cations to exchange potassium varied across different soils. Although, sufficient information exists regarding the effect of calcium on the release of non-exchangeable K, the influence of Na in the soil solution on the K release process has been less extensively studied.

Materials and methods:

In the present study, the ability of three different salt solutions including 0.01 M CaCl₂, NaCl, and a mixture of CaCl₂ and NaCl to extract non-exchangeable K from four soils with distinct characteristics over twelve 15-minute extraction periods, as well as the changes in soil's capacity to re-fix K were investigated.

Findings:

The results indicated that the studied soils contained a high amount of smectite in the clay fraction with smaller amounts of chlorite, illite, and palygorskite minerals also present. The amounts of clay and lime in the studied soils ranged 9-51 and 3-56%, respectively. The total K content also varied, ranging from 0.58 to 0.92%, with approximately 7.1-18.8% of K present in the non-exchangeable form. Overall, in all soils, NaCl extracted more K than CaCl₂ (up to 24, 64, 68 and 83% for soils 1, 2, 3 and 4, respectively). Conversely, there was no significant difference in K extraction between CaCl₂ and the mixture of CaCl₂ and NaCl over a 180-minute period. The highest amount of K was extracted from soil 3 (Ustorthents), while the lowest was from soil 4 (Torriorthents) as 111 and 274 mg kg⁻¹, respectively. On average, CaCl₂, HCl and CaCl₂+NaCl extracted 155, 246 and 168 mg kg⁻¹ of K from the four soils. Although, there was no significant difference between CaCl₂ and NaCl in terms of K extraction in the initial three extraction stages (rapid stage), NaCl extracted a greater amount of K from all soils in the subsequent nine stages (gradual stage) with increases ranging from 47 to 149%. This enhanced extraction may be attributed to the effect of Na on the clay dispersion, which increases the contact of the solution with the exchange sites, as well as the role of Na in preventing the re-fixation of K by K-fixing minerals, particularly smectites. The extracted soils fixed 77-433 mg kg⁻¹ of added K. The capacity to fix K in soil 1 (Haploxerets) was significantly higher than in the other soils, and this may be due to the dominance of clay and smectite as the main mineral responsible for K fixation in arid soils. Soils subjected to NaCl extraction exhibited a reduced ability to fix K, possibly due to the role of Na in preventing the collapse of smectite and the subsequent fixation of K.

Conclusions:

In general, it can be concluded that in the soils of arid regions, an appropriate concentration of Na in the soil solution or irrigation water can release non-exchangeable soil K into soluble forms that are available for plant uptake or leaching. This factor should be taken into account when managing K fertility in these soils.

Author Contributions

Conceptualization, Mahdi Najafi-Ghiri; methodology, Hamid Reza Boostani; software, Mahdi Najafi-Ghiri; validation, Mahdi Najafi-Ghiri and Hamid Reza Boostani; formal analysis, Mahdi Najafi-Ghiri; investigation, Mahdi Najafi-Ghiri, Hamid Reza Boostani, Nazanin Soleimani and Younes Ghazeri; resources, Mahdi Najafi-Ghiri; data curation, Mahdi Najafi-Ghiri and Hamid Reza Boostani; writing—original draft preparation, Mahdi Najafi-Ghiri; writing—review and editing, Mahdi Najafi-Ghiri and Hamid Reza Boostani; visualization, Mahdi Najafi-Ghiri; supervision, Mahdi Najafi-Ghiri; project administration, Mahdi Najafi-Ghiri; funding acquisition, Mahdi Najafi-Ghiri and Hamid Reza Boostani. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”

Data Availability Statement

Data is available on request from the authors.

Acknowledgements

This work was supported by Shiraz University.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مقایسه کلسیم و سدیم در آزادسازی و تثبیت مجدد پتاسیم در برخی از خاک‌های جنوب ایران با ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و مینرالوژیکی

مهدی نجفی قیری^۱ | حمیدرضا بوستانی^۲ | نازنین سلیمانی^۳ | یونس قارزی^۴

۱. نویسنده مسئول، بخش علوم خاک و آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، داراب، ایران. رایانامه:

mnajafighiri@shirazu.ac.ir

۲. بخش علوم خاک و آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، داراب، ایران. رایانامه: hrboostani@shirazu.ac.ir

۳. بخش علوم خاک و آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، داراب، ایران. رایانامه:

soleymaninazanin82@gmail.com

۴. بخش علوم خاک و آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، داراب، ایران. رایانامه: younes.qarzi1226@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تبادل پتاسیم بین لایه‌های کانی‌ها با کاتیون‌های مختلف محلول خاک می‌تواند سبب آزادسازی این شکل پتاسیم و تأمین بخشی از پتاسیم مورد نیاز گیاه در خاک‌های تخلیه شده از پتاسیم شود. توانایی کاتیون‌های مختلف در تبادل پتاسیم در خاک‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد. در تحقیق حاضر، توانایی محلول‌های ۰/۰۱ مولار کلرید کلسیم، کلرید سدیم و مخلوط کلرید کلسیم و سدیم در عصاره‌گیری پتاسیم غیرتبادلی از چهار خاک با ویژگی‌های مختلف طی ۱۲ بار عصاره‌گیری ۱۵ دقیقه‌ای و تغییرات در توانایی تثبیت مجدد پتاسیم توسط این خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفت. خاک‌های مورد مطالعه دارای مقدار بالایی اسمکتیت در بخش رس بوده و کانی‌های کلریت، ایلیت و پالیکورسکیت نیز به مقدار کمتر یافت می‌شود. در همه خاک‌ها، کلرید سدیم مقدار پتاسیم بیشتری را نسبت به کلرید کلسیم عصاره‌گیری کرد (به ترتیب افزایش ۲۴، ۶۴، ۶۸ و ۸۳ درصدی برای خاک‌های یک، دو، سه و چهار ۱، ۲، ۳ و ۴). بیشترین مقدار پتاسیم از خاک سه (Ustorthents) و کمترین آن از خاک ۴ (Torriorthents) استخراج شد. اگر چه در سه مرحله اولیه عصاره‌گیری، تفاوت معنی‌داری بین کلرید کلسیم و کلرید سدیم از نظر استخراج پتاسیم وجود نداشت اما در ۹ مرحله بعدی، کلرید سدیم مقدار بیشتری پتاسیم را از همه خاک‌ها استخراج کرد (افزایش ۴۷ تا ۱۴۹ درصدی) که این می‌تواند در نتیجه تأثیر سدیم بر پراکندگی رس‌ها و تماس بیشتر محلول با محل‌های تبادلی و جلوگیری از تثبیت مجدد پتاسیم توسط اسمکتیت‌ها باشد. توانایی تثبیت پتاسیم در خاک یک (Haploxerets) بسیار بیشتر از سایر خاک‌ها بود و خاک‌هایی که تحت تأثیر عصاره‌گیری کلرید سدیم قرار گرفته بودند مقدار کمتری پتاسیم را تثبیت کردند.
واژه‌های کلیدی: اسمکتیت، کربنات کلسیم معادل، پراکندگی رس، پتاسیم غیرتبادلی	

استناد: نجفی قیری؛ مهدی، بوستانی؛ حمیدرضا، سلیمانی؛ نازنین، قارزی؛ یونس، (۱۴۰۴) مقایسه کلسیم و سدیم در آزادسازی و تثبیت مجدد پتاسیم در برخی از خاک‌های جنوب ایران با ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و مینرالوژیکی، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۶)، ۱۶۴۶-۱۶۳۱.



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.393016.669917>

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.393016.669917>

مقدمه

پتاسیم غیرتبادلی یکی از منابع مناسب برای تأمین پتاسیم مورد نیاز گیاه در خاک‌هایی است که از پتاسیم محلول و تبادلی تخلیه شده‌اند. این شکل پتاسیم به صورت تدریجی قابل استفاده گیاه بوده و در بین لایه‌های برخی کانی‌ها مانند میکاها، ایلیت‌ها و ورمی‌کولیت‌ها قرار گرفته است (Murrell et al., 2021). آزاد شدن این شکل پتاسیم می‌تواند از طریق جایگزینی آنها با سایر کاتیون‌ها از جمله کلسیم، منیزیم و سدیم و یا انحلال کانی‌های حاوی آنها با اسیدهای آلی و معدنی در خاک باشد (Hashemi & Najafi-Ghiri, 2024). به هر حال، در خاک‌های آهکی و قلیایی، تأثیر انحلال کمتر بوده و بخش عمده پتاسیم غیرتبادلی با جایگزینی سایر کاتیون‌های قلیایی آزاد می‌شود. بیشتر مطالعات آزادسازی پتاسیم معطوف به مقایسه عصاره‌گیرهای مختلف نمکی و اسیدی (آلی و معدنی) در استخراج پتاسیم از خاک‌های مختلف و کانی‌های پتاسیم‌دار مانند انواع میکاها و فلدسپات‌ها و برخی کانی‌های رسی بوده است. با توجه به تأثیر کمتر فرآیند انحلال کانی‌های پتاسیم توسط اسیدها نسبت به تبادل کاتیونی، بررسی نقش کاتیون‌های فراوان خاک‌های مناطق خشک مانند کلسیم، منیزیم و سدیم بر آزادسازی پتاسیم مورد کم‌توجهی قرار گرفته است. به هر حال با توجه به نقش سدیم در انبساط اسمکتیت‌ها و پراکندگی ذرات رس و در نتیجه تماس بهتر سایر کاتیون‌ها با مکان‌های بین‌لایه‌ای کانی‌ها و همچنین تأثیری که سدیم می‌تواند بر تغییر نسبت کاتیون‌ها در محل‌های تبادلی بگذارد بررسی نقش سدیم در آزادسازی پتاسیم از خاک‌های مناطق خشک می‌تواند اهمیت ویژه‌ای داشته باشد.

خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک ایران دارای مقدار قابل توجهی پتاسیم به شکل‌های مختلف از جمله محلول و تبادلی که کاملاً قابل استفاده گیاه است می‌باشند اما در چند دهه گذشته به دلیل کشاورزی فشرده و عدم استفاده از کودهای پتاسیم‌دار، مقدار پتاسیم قابل استفاده در برخی خاک‌ها کاهش یافته است (Golestanifard et al., 2020; Hashemi, 2020). از طرف دیگر، غلظت بالای کلسیم در محلول برخی خاک‌ها سبب شده که جذب پتاسیم توسط ریشه گیاه به دلیل رقابت آن با کلسیم دچار اختلال شده و با وجود مقدار کافی پتاسیم در خاک، گیاه کمبود پتاسیم را احساس کند (Najafi-Ghiri et al., 2017). تاکنون تحقیقات زیادی در ارتباط با نقش کلسیم در آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی خاک صورت گرفته است که تأثیر فوق‌العاده این کاتیون در آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی را به اثبات رسانده است. اما باید توجه داشت که در محلول خاک‌های آهکی، مقدار سدیم نیز زیاد بوده و در بیشتر خاک‌ها، مقدار آن حتی از کلسیم هم بیشتر می‌باشد. سدیم نیز می‌تواند در روابط پتاسیم خاک نقش داشته باشد و این نقش می‌تواند در خاک‌های مختلف متفاوت باشد اما اطلاعات زیادی در مورد آن وجود ندارد.

پیشینه پژوهش

تغییرات مقدار شکل‌های مختلف پتاسیم در خاک‌های ایران بسیار زیاد بوده طوری که مقدار پتاسیم محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختمانی به ترتیب در دامنه ۱-۲۵، ۵۰-۱۳۰، ۵۰-۱۷۰ و ۱۰۰۰-۱۷۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد (Najafi-Ghiri, 2024). با تخلیه پتاسیم محلول و تبادلی، پتاسیم غیرتبادلی می‌تواند آزاد شود. در مطالعات مختلف گزارش شده است که خاک‌های آهکی ایران قادرند از ۳۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای خاک‌های استان کهگیلویه و بویراحمد تا ۲۴۷۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای خاک‌های استان آذربایجان غربی پتاسیم را با عصاره‌گیرهای مختلف آزاد کنند (Najafi-Ghiri, 2024). برای برخی خاک‌های شمال غرب ایران که تحت کشت نیشکر بوده‌اند نشان داده شده که مقدار آزادسازی پتاسیم از ۱۸۱۰ به ۱۶۶۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافته است که این در نتیجه کشاورزی فشرده بدون افزودن کودهای پتاسیم بوده است (Samadi, 2010). مقدار پتاسیم آزاد شده از خاک‌های مختلف استان فارس (با توجه به نوع عصاره‌گیر و مدت زمان عصاره‌گیری) از ۴۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Najafi-Ghiri et al., 2011; Zareian et al., 2018).

بیشتر پژوهشگران جهت مطالعه آزادسازی پتاسیم از خاک‌های آهکی از محلول رقیق کلرید کلسیم استفاده کرده‌اند. در خاک‌های آهکی نیز کلسیم یکی از کاتیون‌های فراوان در محلول خاک بوده و تبادل کلسیم با پتاسیم بین لایه‌ای یکی از فرآیندهای مهم آزادسازی پتاسیم از کانی‌های مختلف در این خاک‌ها می‌باشد (Hashemi & Najafi-Ghiri, 2024; Najafi-Ghiri et al., 2023). اگر چه مقدار سدیم در محلول خاک‌های آهکی بالا می‌باشد اما محلول نمک‌های سدیم برای بررسی آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی مناسب نیستند؛ زیرا یون سدیم فقط پتاسیم جذب سطحی شده بر سطوح بیرونی کانی‌ها را عصاره‌گیری می‌کند که این به علت شعاع آبپوشی بزرگ آن، آبدایی

سخت‌تر و وارد نشدن به محل‌های گوه‌ای شکل رس‌ها است (Morida et al., 2023). با مقایسه توانایی کاتیون‌های کلسیم، منیزیم و سدیم در آزادسازی پتاسیم از پنج خاک آهکی نشان داده شده که با افزایش نسبت جذب سدیم و نسبت کلسیم به منیزیم در آب آبیاری، آزادسازی پتاسیم کاهش یافت (Jalali, 2008). در این پژوهش بیشترین مقدار پتاسیم آزاد شده با کاربرد آب آبیاری با نسبت جذب سدیم پنج و نسبت کلسیم به منیزیم یک به سه (به مقدار ۹۸۵ میلی گرم بر کیلوگرم) و کمترین مقدار آن با کاربرد آب آبیاری با نسبت جذب سدیم ۴۵ و نسبت کلسیم به منیزیم سه به یک به دست آمد. نتایج مشابهی در سایر پژوهش‌ها (Rahmatullah et al., 1994) با کاربرد آب‌های با نسبت جذب سدیم از ۵ تا ۵۰ به دست آمد. در پژوهشی دیگر (Jalali, 2011) نشان داده شده که در خاک‌های شنی نسبت جذب سدیم و نسبت کلسیم به منیزیم می‌تواند بر تبادیل پتاسیم تأثیر گذاشته و آبشویی پتاسیم از خاک‌های شنی را تحت تأثیر قرار دهد. در این پژوهش با افزایش نسبت جذب سدیم و نسبت کلسیم به منیزیم، میزان آبشویی پتاسیم به شدت افزایش یافت (از ۱۶۹ به ۲۷۹ کیلوگرم در هکتار). به هر حال باید در نظر داشت که سدیم بر خلاف کلسیم می‌تواند به صورت غیرمستقیم از طریق انبساط اسمکتیت‌ها (Ohazuruike & Lee, 2023) و جلوگیری از تثبیت پتاسیم و پراکندگی ذرات (Luo et al., 2024) و تماس بهتر محلول و رس‌ها در وضعیت آزادسازی و تثبیت پتاسیم اثر بگذارد.

اگر چه بیشتر مطالعات نشان از اهمیت کم سدیم در استخراج پتاسیم از بین لایه‌های کانی‌ها دارد اما این فرآیند می‌تواند تحت تأثیر ویژگی‌های مختلف خاک‌ها مانند بافت خاک، نوع کانی‌های رسی و مقدار کربنات‌های خاک دارای شدت متفاوتی باشد. بنابراین هدف از این پژوهش، مقایسه کاتیون‌های کلسیم، سدیم و مخلوط آنها در عصاره‌گیری پتاسیم از چهار نوع خاک آهکی استان فارس با ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و مینرالوژیکی در کوتاه مدت و درازمدت بود. همچنین قدرت تثبیت مجدد پتاسیم توسط خاک‌های مورد استفاده پس از تخلیه شدن از پتاسیم به وسیله عصاره‌گیرهای مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفت.

روش‌شناسی پژوهش

نمونه‌برداری و تجزیه خاک‌های مورد استفاده

چهار نمونه خاک مورد استفاده در این پژوهش از مناطق مختلف استان فارس جمع‌آوری شد. سعی شد خاک‌های با ویژگی‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی در مناطق مختلف اقلیمی انتخاب شود. نمونه‌های خاک به صورت مرکب با استفاده از مته نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۲۰ سانتیمتر برداشت و پس از هوا خشک کردن و عبور از الک دو میلی‌متری به آزمایشگاه منتقل شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل درصد ذرات شن، سیلت و رس خاک به روش هیدرومتر (Rowell, 2014)، pH گل اشباع خاک (Thomas, 1996)، کربنات کلسیم معادل با خنثی‌سازی با اسید کلریدریک و تیتراسیون با هیدروکسید سدیم (Loeppert & Suarez, 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (Rhoades, 1996)، ظرفیت تبادیل کاتیونی با جایگزینی کاتیون‌ها با آمونیوم (Sumner & Miller, 1996) و مقدار کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Nelson et al., 1996) اندازه‌گیری شدند.

کانی‌شناسی بخش رس و سیلت خاک‌ها

در تعیین نوع و میزان کانی‌ها در بخش شن و سیلت، ابتدا کربنات‌ها، مواد آلی و اکسیدهای آهن و منگنز در حمام بخار در درجه حرارت ۸۰ درجه سلسیوس به ترتیب با افزودن استات سدیم نرمال در pH ۵، آب اکسیژنه ۳۰ درصد و بافر سیترات-دیتیونات pH ۷/۳ حذف شدند. پس از آن با سانتریفوژ (دور ۷۵۰ به مدت ۵ دقیقه) بخش رس جدا شد. بخش شن از سیلت نیز با استفاده از الک ۵۰ میکرومتر جدا گردید. سپس هر نمونه رس و سیلت به دو بخش تقسیم شد، یکی با کلرید منیزیم نرمال و دیگری با کلرید پتاسیم نرمال اشباع گردید. نمونه‌های اشباع با منیزیم با گلیسرول و نمونه‌های اشباع با پتاسیم در حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا امکان شناسایی کانی‌ها میسر شود. مقدار کانی‌های رسی به صورت نیمه کمی و با استفاده از مساحت پیک‌ها روی پراش‌نگارهای اشعه ایکس نمونه‌های تیمار شده با گلیسرول طبق روش ارائه شده توسط (Johns et al., 1954) استفاده شد. در این روش فرض بر این است که ارتفاع یا مساحت پیک‌های مشخص برای هر کانی، متناسب با مقدار آن کانی در نمونه است. مقایسه مقدار اسمکتیت، ورمیکلولیت، کلریت، پالیگورسکیت، ایلیت، کوارتز و فلدسپات به ترتیب با مشاهده شدت پیک‌های ۱۸، ۱۶، ۱۴، ۱۰/۲، ۱۰، ۴/۲۶ و ۳/۳۱ آنگستروم انجام شد.

شکل‌های مختلف پتاسیم

شکل‌های مختلف پتاسیم شامل محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختمانی به ترتیب در عصاره اشباع، عصاره‌گیری با استات آمونیوم ۱ نرمال

pH ۷، عصاره‌گیری با اسید نیتریک جوشان و هضم با اسید فلوریدریک و تیزاب سلطانی تعیین شدند (Helmke & Sparks, 2020). جهت اندازه‌گیری پتاسیم تبادلی، ۵ گرم خاک سه بار به‌وسیله ۲۵ میلی‌لیتر استات آمونیوم ۱ نرمال pH ۷ به مدت ۱۰ دقیقه عصاره‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری پتاسیم غیرتبادلی، ۲/۵ گرم خاک و ۲۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۱ نرمال به مدت ۱۰ دقیقه جوشانده شد. با کسر پتاسیم عصاره‌گیری شده در این روش از پتاسیم عصاره‌گیری شده با استات آمونیوم، مقدار پتاسیم غیرتبادلی محاسبه گردید. جهت اندازه‌گیری پتاسیم ساختمانی، به ۰/۵ گرم خاک ۱ میلی‌لیتر از محلول تیزاب سلطانی^۱ (مخلوط یک قسمت اسید نیتریک غلیظ و سه قسمت اسید کلریدریک غلیظ) و ۱۰ میلی‌لیتر از اسید فلوریدریک افزوده شد و در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت حرارت داده شد. با کسر پتاسیم اندازه‌گیری شده در این روش از پتاسیم عصاره‌گیری شده با اسید نیتریک جوشان، مقدار پتاسیم ساختمانی محاسبه گردید. مجموع چهار شکل پتاسیم (پتاسیم عصاره‌گیری شده با تیزاب سلطانی) به‌عنوان پتاسیم کل خاک در نظر گرفته شد. مقدار پتاسیم در عصاره‌های به دست آمده با روش شعله‌سنجی با دستگاه شعله‌سنج (Corning 510, UK) اندازه‌گیری شد.

آزادسازی و تثبیت مجدد پتاسیم خاک‌ها

آزمایش آزادسازی پتاسیم به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو تکرار انجام شد. تیمارها شامل خاک (چهار نوع خاک) و سه عصاره‌گیر (کلرید کلسیم، کلرید سدیم و مخلوط کلرید کلسیم و سدیم) بود. برای مطالعات آزادسازی پتاسیم، ابتدا پتاسیم تبادلی و محلول با اشباع نمونه‌ها با کلرید کلسیم نرمال به مدت ۲۴ ساعت حذف گردیدند (Martin & Sparks, 1985). جهت عصاره‌گیری پتاسیم از محلول‌های ۰/۰۱ مولار کلرید کلسیم، کلرید سدیم و مخلوط کلرید کلسیم و کلرید سدیم (به نسبت مساوی) استفاده شد. در مرحله بعد حدود دو گرم از خاک اشباع با کلسیم با ۲۰ میلی‌لیتر از محلول عصاره‌گیر به مدت ۱۵ دقیقه شیک شد و پس از سانتریفوژ و صاف کردن با کاغذ صافی، غلظت پتاسیم در عصاره زلال رویی اندازه‌گیری گردید. به خاک باقیمانده مجدداً ۲۰ میلی‌لیتر محلول تازه عصاره‌گیر اضافه شد و این مراحل ۱۲ بار تکرار گردید. غلظت پتاسیم در عصاره‌ها با دستگاه شعله‌سنج (Corning 510, UK) اندازه‌گیری گردید.

جهت اندازه‌گیری مقدار تثبیت پتاسیم پس از ۱۲ مرحله عصاره‌گیری، به نمونه‌های باقیمانده، ۲۰ میلی‌لیتر محلول ۵۰ میلی‌گرم پتاسیم بر لیتر از منبع کلرید پتاسیم (Dhaliwal et al., 2006) اضافه شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق به حال تعادل قرار گرفتند. نمونه‌های خاک ۳ بار با استات آمونیوم ۱ نرمال مورد عصاره‌گیری قرار گرفتند و عصاره‌ها به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده و غلظت پتاسیم در آنها اندازه‌گیری گردید. مقدار پتاسیم تثبیت شده با کسر مقدار پتاسیم عصاره‌گیری شده از پتاسیم افزوده محاسبه گردید.

تجزیه آماری

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 20.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) انجام شد و تمامی آزمون‌های آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار در نظر گرفته شدند. برای بررسی اثر نوع خاک و عصاره‌گیر از آنالیز واریانس (ANOVA) و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون Tukey HSD post hoc استفاده شد. همه نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Office Excel 2019 تهیه شدند.

یافته‌های پژوهشی و بحث

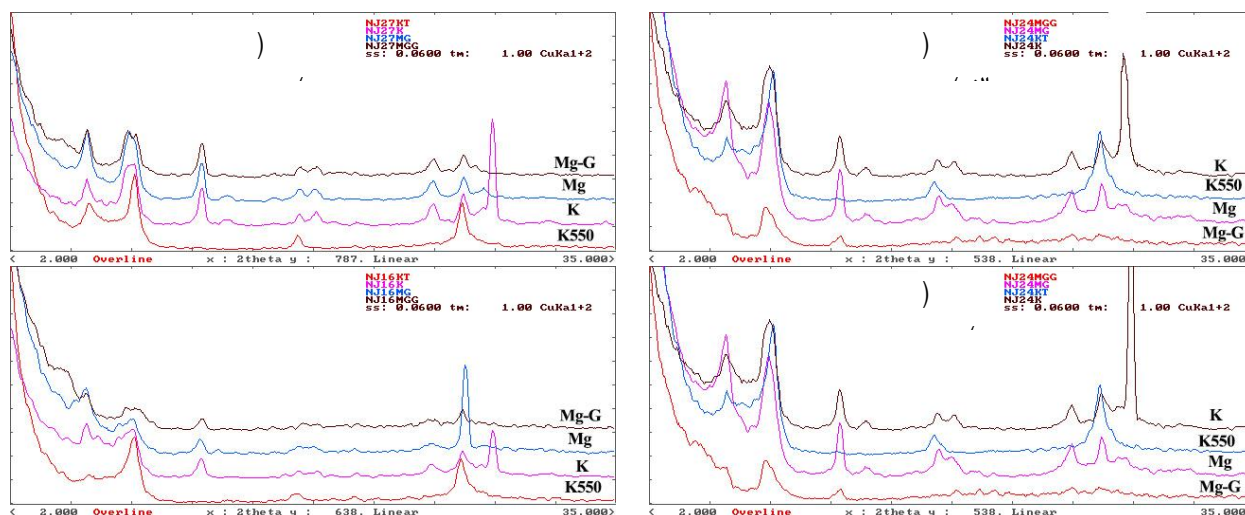
ویژگی‌های خاک‌های مورد استفاده

خاک‌های مورد مطالعه بر اساس تاکسونومی خاک (Soil Survey Staff, 2022) در رده‌های ورتی‌سول، اینسپتی‌سول و انتی‌سول قرار گرفته‌اند (جدول ۱). مطالعات کانی‌شناسی بخش رس به‌روش پراش پرتو ایکس (شکل ۱) نیز نشان داد که اسمکتیت کانی غالب همه خاک‌ها بوده و پس از آن کانی‌های ایلیت، کلریت و پالیکورسکیت نیز بخش عمده‌ای از رس خاک‌ها را تشکیل می‌دهد. بخش سیلت خاک‌های مورد مطالعه نیز از کوارتز غالب بوده و مقدار کمی کانی‌های اسمکتیت، ایلیت و کلریت نیز دیده می‌شود. با توجه به نقش کانی‌هایی مانند ایلیت در آزادسازی پتاسیم و اسمکتیت در تثبیت پتاسیم در بخش‌های مختلف اندازه‌ای ذرات خاک‌های آهکی، مطالعات کانی‌شناسی در تفسیر نتایج مطالعات آزادسازی و تثبیت پتاسیم مهم می‌باشد.

جدول ۱. رده‌بندی و کانی‌شناسی بخش رس و سیلت خاک‌های مورد مطالعه

خاک	رده‌بندی (USDA, 2023)	کانی‌شناسی رس (< دو میکرومتر)	کانی‌شناسی سیلت (۵۰-۲ میکرومتر)
یک	Fine, smectitic, mesic, Typic Haploxererts	S>>I	Q>>S>C>I
دو	Fine, carbonatic, thermic, Typic Calcustepts	S=I=C=P	Q>>S>I=C
سه	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Aridic Ustorthents	S=P>I>C	Q>C>I=S
چهار	Coarse-loamy, carbonatic, hyperthermic, Typic Torriorthents	S>C=I>>P	Q>I=C=S

Q: کوآرتز؛ S: اسمکتیت؛ I: ایلیت؛ P: پالیکورسکیت؛ C: کلریت



شکل ۱. نمودار پراش پرتو ایکس مربوط به ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر خاک‌های ۱ (الف)، ۲ (ب)، ۳ (ج) و ۴ (د)

نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی چهار خاک مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است. خاک‌های مورد مطالعه دارای pH کمی قلیایی (Schoeneberger et al., 2012) می‌باشند. خاک‌های یک، دو و سه دارای شوری کم (EC کمتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر) و خاک چهار دارای شوری متوسط (EC بین ۴ تا ۸ دسی‌زیمنس بر متر) می‌باشد. غلظت سدیم در چهار خاک مورد مطالعه از ۰/۷ تا ۴۵/۸ میلی‌اکی‌والان بر لیتر، غلظت کلسیم از ۱/۹ تا ۲۱/۲ میلی‌اکی‌والان در لیتر و غلظت منیزیم از ۱/۵ تا ۱۴/۱ میلی‌اکی‌والان بر لیتر متغیر بوده است. مقدار کربنات‌ها از ۳ درصد در خاک یک تا ۵۶ درصد در خاک سه متغیر می‌باشد. دامنه تغییرات مقدار ماده آلی نیز از ۰/۵ تا ۲/۷ درصد است. خاک‌های مورد مطالعه دارای تنوع مقدار رس می‌باشند به‌طوری‌که خاک یک دارای ۵۱ درصد و خاک چهار دارای ۹ درصد رس می‌باشند. ظرفیت تبادل کاتیونی خاک یک بیشترین (۳۴ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم) بوده که به دلیل مقدار رس بالا، غالبیت کانی اسمکتیت و مقدار ماده آلی بالا می‌باشد. خاک چهار دارای کمترین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی (۵ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم) بوده که به دلیل بافت درشت‌تر و مقدار ماده آلی کم می‌باشد. نتایج مطالعات تعادل و پویایی پتاسیم در خاک‌های آهکی نشان می‌دهد که هر ویژگی خاص خاک در مناطق مختلف می‌تواند بر فرآیندهای پتاسیم تأثیر داشته باشد. تأثیر عوامل متعددی مانند وضعیت اقلیمی، تکامل خاک‌ها، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (مانند مقدار آهک، بافت خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی و ماده آلی)، کانی‌شناسی، وضعیت فیزیوگرافی و کاربری اراضی توسط پژوهشگران گردآوری شده است (Najafi-Ghiri, 2024).

جدول ۲. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

خاک	pH	قابلیت هدایت الکتریکی (dS m ⁻¹)	کربنات کلسیم معادل (%)	ماده آلی (%)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بار بر کیلوگرم)	کلسیم منیزیم سدیم mEq L ⁻¹
یک	۷/۳۱	۰/۴	۳	۲/۰	۱۳	۳۶	۵۱	۳۴	۱/۵، ۱/۹، ۰/۷
دو	۷/۷۰	۱/۲	۴۹	۱/۲	۱۰	۴۳	۴۷	۱۲	۱/۷، ۲/۲، ۶/۶
سه	۷/۵۵	۰/۹	۵۶	۲/۷	۱۷	۵۴	۲۹	۱۲	۱/۹، ۲/۳، ۵/۲
چهار	۷/۵۸	۷/۱	۵۴	۰/۵	۵۷	۳۴	۹	۵	۱۴/۱، ۲۱/۲، ۴۵/۸



شکل‌های مختلف پتاسیم

مقدار شکل‌های مختلف پتاسیم و درصد نسبی آنها در جدول ۳ نشان داده شده است. مقدار پتاسیم کل در خاک‌های مورد استفاده از ۰/۶ تا ۰/۹ درصد متغیر بود. مقدار پتاسیم محلول در خاک‌ها کمتر از ۱۵/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. مقدار پتاسیم تبدلی در خاک چهار کمترین (۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در خاک یک بیشترین (۴۱۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. پتاسیم غیرتبدلی نیز از ۴۱۲ تا ۱۳۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌ترتیب در خاک‌های چهار و یک متغیر بود. پتاسیم محلول کمتر از ۰/۳ درصد از مقدار کل پتاسیم خاک‌های مورد استفاده را تشکیل می‌دهد. درصد پتاسیم تبدلی از ۱/۳ درصد در خاک چهار تا ۵/۹ درصد در خاک سه متغیر می‌باشد. کمترین و بیشترین درصد پتاسیم غیرتبدلی نیز در خاک‌های چهار و سه به ترتیب با ۷/۱ و ۱۸/۸ درصد مشاهده شد. درصد پتاسیم ساختمانی نیز در خاک‌های مورد استفاده از ۷۵/۰ درصد در خاک سه تا ۹۱/۵ درصد در خاک چهار متغیر بود. به طور کلی، مقدار پتاسیم کل در خاک‌های ایران از کمتر از ۰/۱ درصد در برخی خاک‌های بافت‌درشت استان هرمزگان تا حدود ۱/۷ درصد برای برخی خاک‌های استان‌های خوزستان و کردستان گزارش شده است که با نتایج به‌دست آمده مطابقت دارد. توزیع پتاسیم بین شکل‌های مختلف از مواردی است که می‌تواند روابط تعادلی پتاسیم را با توجه به ویژگی‌های خاک بهتر توصیف کند. درصد بالایی از پتاسیم خاک‌ها در ساختار کانی‌های اولیه و ثانویه قرار دارد که به تدریج با هوادهی این کانی‌ها آزاد می‌شود. از بین سه شکل دیگر نیز درصد پتاسیم محلول بسیار کم بوده و این در نتیجه تأثیر عوامل مختلف مانند جذب توسط ریشه و آبشویی بر این شکل پتاسیم می‌باشد. پتاسیم محلول و تبدلی شکل‌های قابل استفاده گیاه می‌باشند. دامنه تغییرات پتاسیم محلول در خاک‌ها بسیار زیاد است و این شکل پتاسیم از نظر سهولت جذب توسط ریشه، رقابت با دیگر کاتیون‌ها و پتانسیل آبشویی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. افزایش درصد پتاسیم تبدلی نسبت به محلول، نشان‌دهنده ظرفیت بالاتر خاک در بافر کردن پتاسیم محلول می‌باشد و در واقع نشان می‌دهد که با تخلیه پتاسیم محلول در نتیجه جذب گیاهی، پتاسیم تبدلی می‌تواند آن را برای مدت طولانی جایگزین کند؛ از طرف دیگر، بالاتر بودن درصد پتاسیم محلول می‌تواند رقابت موفق‌تر این کاتیون را با دیگر کاتیون‌ها برای جذب توسط ریشه تضمین کند (Najafi-Ghiri, 2024).

جدول ۳. مقدار شکل‌های مختلف پتاسیم و درصد نسبی آنها در خاک‌های مورد استفاده

شکل‌های پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	توزیع نسبی پتاسیم (درصد)				محل	محل	محل	محل	محل
	کل	ساختمانی	غیر تبدلی	تبدلی	محل	محل	محل	محل	
یک	۹۱۶۸	۷۴۳۶	۱۳۱۶	۴۱۳	۳/۲	۱۴/۴	۴/۵	۰/۰۳	۸۱/۱
دو	۷۱۲۹	۵۸۰۲	۱۰۹۸	۲۲۶	۳/۵	۱۵/۴	۳/۲	۰/۰۵	۸۱/۴
سه	۶۰۲۹	۴۵۲۶	۱۱۳۴	۳۵۴	۱۵/۴	۱۸/۸	۵/۹	۰/۲۶	۷۵/۰
چهار	۵۸۳۲	۵۳۳۷	۴۱۲	۷۵	۸/۰	۷/۱	۱/۳	۰/۱۴	۹۱/۵

آزادسازی پتاسیم از خاک‌های مورد استفاده

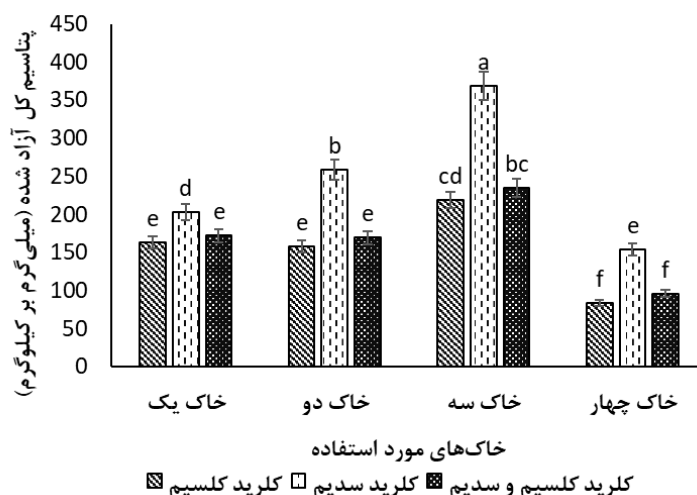
نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع خاک و عصاره‌گیر بر برخی ویژگی‌های آزادسازی پتاسیم در جدول ۴ آورده شده است. پتاسیم آزاد شده در مراحل اولیه عصاره‌گیری (۳ مرحله اول یا مرحله سریع) تحت تأثیر نوع خاک و عصاره‌گیر قرار گرفت. پتاسیم آزاد شده در مراحل آخر عصاره‌گیری (۹ مرحله آخر یا مرحله تدریجی)، پتاسیم کل آزاد شده، نسبت پتاسیم آزاد شده در مرحله اول به کل و تثبیت مجدد پتاسیم تحت تأثیر برهمکنش خاک و عصاره‌گیر قرار گرفت.

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های مرتبط با آزادسازی و تثبیت پتاسیم

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		پتاسیم آزاد شده کل	پتاسیم آزاد شده مرحله سریع	پتاسیم آزاد شده مرحله تدریجی	نسبت پتاسیم آزاد شده تثبیت مجدد پتاسیم
خاک	۳	۲۶۸/۲**	۵۷/۸***	۷۷/۷***	۲۸/۷**
عصاره‌گیر	۲	۱۹۱/۲**	۰/۸۴۵**	۱۸۸/۳***	۶۸۲/۸***
خاک*عصاره‌گیر	۶	۱۳/۹**	۰/۱۷۷ns	۱۲/۱**	۱۵/۸*
خطا	۱۲	۰/۴۵۲	۰/۱۱۵	۰/۳۴۷	۳/۷۵

** و * به ترتیب سطح معنی‌داری ۰/۰۱ و ۰/۰۵ و ns تفاوت غیرمعنی‌دار را نشان می‌دهد.

مقدار آزادسازی پتاسیم در ۱۲ مرحله ۱۵ دقیقه‌ای تحت تأثیر نوع خاک و عصاره‌گیر قرار گرفت. به طور کلی، در همه خاک‌ها، کلرید سدیم مقدار پتاسیم بیشتری را نسبت به کلرید کلسیم عصاره‌گیری کرد (به ترتیب افزایش ۲۴، ۶۴، ۶۸ و ۸۳ درصدی برای خاک‌های یک، دو، سه و چهار، شکل ۲). از طرف دیگر تفاوت معنی‌داری بین کلرید کلسیم و مخلوط کلرید کلسیم و سدیم در عصاره‌گیری پتاسیم در ۱۸۰ دقیقه وجود نداشت. همه عصاره‌گیرها پتاسیم بیشتری را از خاک سه استخراج کردند در حالی که کمترین مقدار پتاسیم در خاک چهار توسط هر سه عصاره‌گیر استخراج شد. بین خاک‌های یک و دو تفاوت معنی‌داری از نظر مقدار پتاسیم استخراج شده با کلرید کلسیم و مخلوط کلرید کلسیم و سدیم وجود نداشت در حالی که کلرید سدیم پتاسیم بیشتری را از خاک دو عصاره‌گیری کرد.



شکل ۲. مقدار پتاسیم کل آزاد شده در مدت ۱۸۰ دقیقه تحت تأثیر برهمکنش خاک و عصاره‌گیر (میانگین‌های دارای حروف متفاوت در سطح پنج درصد با آزمون توکی معنی‌دار هستند)

به طور کلی می‌توان گفت توانایی آزادسازی پتاسیم در خاک‌های آهکی به عوامل مختلفی بستگی داشته و مهمترین این عوامل، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها مانند بافت خاک، کربنات کلسیم معادل، ظرفیت تبادل کاتیونی، مقدار شکل‌های مختلف پتاسیم و درصد نسبی آنها و ویژگی‌های مینرالوژیکی مانند مقدار و نوع کانی‌های اسمکتیت و ایلیت و میزان هوادهی آنها می‌باشد (Molavi et al., 2020; Najafi-Ghiri, 2024). خاک یک دارای کمترین مقدار کربنات کلسیم (سه درصد) و بیشترین مقدار رس (۵۱ درصد) می‌باشد اما نسبت به خاک سه که مقدار کربنات کلسیم بیشتر و رس کمتر دارد مقدار پتاسیم کمتری را آزاد کرد که این می‌تواند به دلیل توانایی بالای این خاک در تثبیت مجدد پتاسیم آزاد شده باشد. اسمکتیت‌ها مهمترین کانی‌های مسئول تثبیت پتاسیم در خاک‌های آهکی می‌باشند (Shakeri & Abtahi, 2020) و غالبیت این کانی در خاک یک نشان از قدرت تثبیت پتاسیم بالای آن می‌باشد. از طرفی خاک سه اگرچه دارای مقدار پتاسیم کل کمی بوده اما در بین خاک‌های مورد استفاده بیشترین درصد پتاسیم غیرتبادلی (۱۸/۸ درصد) را دارا می‌باشد که می‌تواند توسط عصاره‌گیرها استخراج شود. خاک چهار به دلیل مقدار بالای کربنات‌ها (۵۴ درصد) و مقدار کم رس (نه درصد) کمترین توانایی را در آزادسازی پتاسیم داشتند. باید در نظر داشت که خاک چهار دارای کمترین مقدار پتاسیم کل (۵۸۳۲ میلی گرم بر کیلوگرم) بوده که حدود ۹۱/۵ درصد پتاسیم آن به شکل ساختمانی است و در کوتاه‌مدت نمی‌تواند آزاد شود.

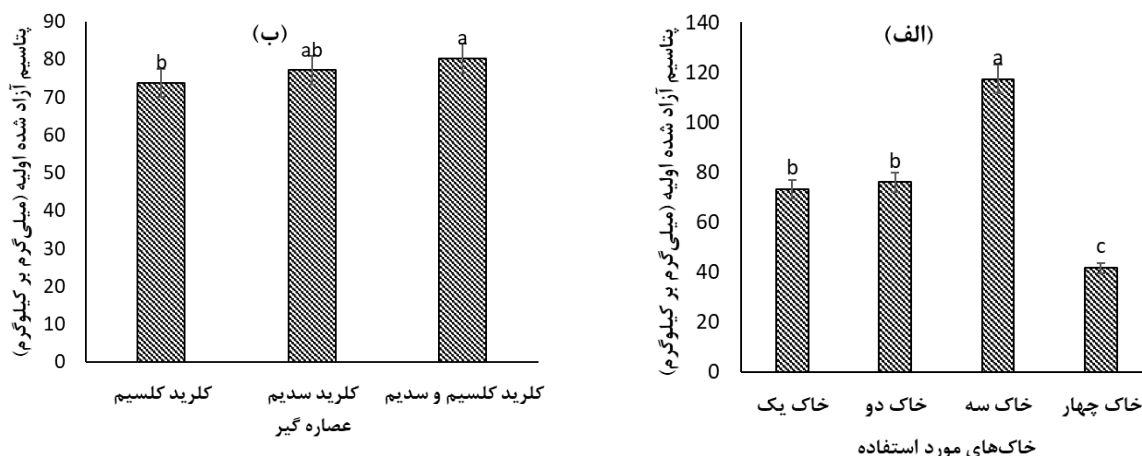
با در نظر گرفتن دو مکانیسم غالب در آزادسازی پتاسیم از کانی‌های خاک (تبادل کاتیونی و انحلال کانی‌ها) و با توجه به گزارش‌های مختلفی که نشان می‌دهد محلول‌های نمکی از طریق تبادل کاتیونی سبب آزادسازی پتاسیم بین لایه‌ای کانی‌ها می‌شوند (Bray et al., 2015; Li et al., 2015; Najafi-Ghiri et al., 2019) می‌توان بیان کرد که میزان آزادسازی پتاسیم تحت تأثیر ویژگی‌های دو کاتیون کلسیم و سدیم مانند شعاع هیدراته، انرژی آبگیری، غلظت و ... می‌تواند متغیر باشد. در مطالعه حاضر، سدیم توانست مقدار بیشتری پتاسیم را از هر چهار خاک مورد استفاده استخراج کند. اگرچه مطالعات نشان می‌دهد که سدیم به دلیل شعاع آپیوشیده بزرگ‌تر توانایی کمتری در ورود به محل‌های بین لایه‌ای دارد (Carmo et al., 2021). نتایج متفاوت به‌دست آمده می‌تواند مربوط به توانایی سدیم در پراکندگی ذرات رس و تماس بیشتر کاتیون‌های محلول با محل‌های بین لایه‌ای رس‌ها باشد. با جدا شدن ذرات از یکدیگر، فاصله پخشیدگی کاتیون‌های بین لایه‌ای نیز کاهش یافته و آزادسازی می‌تواند با سرعت بیشتری اتفاق افتد. از طرف دیگر در خاک‌های آهکی بخشی از

کانی‌های پتاسیم‌دار حبس شده در کلسیت و مگنیزیت (Farsang et al., 2022; Najafi-Ghiri et al., 2023) نیز می‌تواند در نتیجه پراکندگی ذرات آزاد شود. بین دو عصاره‌گیر کلرید کلسیم و مخلوط کلرید کلسیم و سدیم تفاوت معنی‌داری وجود نداشته و به نظر می‌رسد کاهش غلظت کلسیم به نصف در عصاره‌گیر مخلوط کلرید کلسیم و سدیم (۰/۰۰۵ مولار) تأثیر معنی‌داری بر آزاد شدن پتاسیم نداشته و از طرف دیگر وجود سدیم در این عصاره‌گیر نیز در حضور کلسیم تأثیری بر پراکندگی ذرات نداشته است. نتایج برخی پژوهش‌ها (Najafi-Ghiri et al., 2022) نیز بیانگر تأثیر اندک غلظت کلسیم بر مقدار پتاسیم آزاد شده در خاک‌های آهکی می‌باشد.

مقدار پتاسیم آزاد شده در مرحله سریع اولیه تحت تأثیر نوع خاک و عصاره‌گیر قرار گرفت. بین خاک‌های مورد استفاده تفاوت معنی‌داری از نظر مقدار پتاسیم آزاد شده وجود داشت (شکل ۳ الف). بیشترین مقدار پتاسیم از خاک سه استخراج شد (۱۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در حالی که خاک چهار کمترین مقدار پتاسیم را آزاد کرد (۴۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم). خاک‌های یک و دو به ترتیب ۷۶ و ۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم پتاسیم آزاد کردند و تفاوت معنی‌داری بین آنها مشاهده نشد. مخلوط کلرید پتاسیم و سدیم، مقدار پتاسیم بیشتری را نسبت به کلرید کلسیم استخراج کرد (۸۰ در مقابل ۷۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم)؛ اما کلرید سدیم تفاوت معنی‌داری با دو عصاره‌گیر دیگر نشان نداد (۷۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) (شکل ۳ ب).

در مراحل اولیه عصاره‌گیری، خاک‌های یک و دو تفاوت معنی‌داری نشان ندادند. خاک یک اگر چه مقدار پتاسیم غیرتبادلی بیشتری نسبت به خاک دو دارد اما باید در نظر داشت که بخشی از پتاسیم می‌تواند مجدداً توسط اسمکتیت موجود در بخش رس این خاک‌ها تثبیت شود. بنابراین توانایی آزادسازی خالص پتاسیم در خاک یک کاهش می‌یابد. خاک سه در مراحل اولیه، بیشترین مقدار پتاسیم را آزاد کرد که این می‌تواند به دلیل تمرکز بیشتر پتاسیم خاک در فاز غیرتبادلی (۱۸/۸ درصد) و همچنین مقدار کمتر اسمکتیت جهت تثبیت مجدد پتاسیم باشد. خاک چهار به دلیل مقدار کمتر پتاسیم غیرتبادلی، قابلیت کمتری در آزادسازی پتاسیم در مراحل اولیه دارد.

در مراحل اولیه عصاره‌گیری، سدیم نمی‌تواند به اندازه کلسیم در آزادسازی پتاسیم مؤثر باشد و شاید مکانیسم اصلی آزادسازی مربوط به تبادل کلسیم تبادلی (با توجه به اشباع بودن خاک از کلسیم) و سدیم محلول و در مرحله بعد تبادل کلسیم با پتاسیم بین لایه‌ای باشد. از طرفی انحلال کربنات‌های کلسیم نیز در افزایش غلظت کلسیم محلول باید در نظر گرفت. به هر حال مخلوط کلرید کلسیم و سدیم توانسته ۴ درصد پتاسیم بیشتری را استخراج کند.

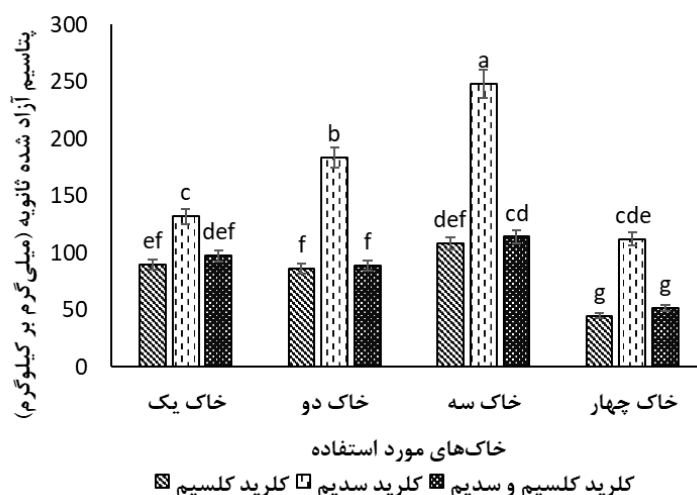


شکل ۳. مقدار پتاسیم آزاد شده در مدت ۴۵ دقیقه اولیه (مرحله سریع) تحت تأثیر خاک (الف) و عصاره‌گیر (ب) (میانگین‌های دارای حروف متفاوت برای هر ویژگی در سطح پنج درصد با آزمون توکی معنی‌دار هستند)

شکل ۴ مقدار پتاسیم آزاد شده در مرحله تدریجی تحت تأثیر برهمکنش نوع خاک و عصاره‌گیر را نشان می‌دهد. اگر چه بین دو عصاره‌گیر کلرید کلسیم و مخلوط کلرید کلسیم و سدیم تفاوت معنی‌داری از نظر مقدار پتاسیم استخراج شده وجود نداشت اما کلرید سدیم، مقدار پتاسیم بیشتری را نسبت به دو عصاره‌گیر دیگر استخراج کرد. به طور کلی می‌توان گفت مقدار پتاسیم استخراج شده با کلرید سدیم نسبت به کلرید کلسیم در خاک‌های یک، دو، سه و چهار به ترتیب ۴۷، ۱۱۴، ۱۳۰ و ۱۴۹ درصد بیشتر بود. خاک سه مقدار پتاسیم بیشتری را نسبت به سایر خاک‌ها به عصاره‌گیر کلرید سدیم آزاد کرد در حالی که کمترین مقدار در خاک‌های یک و چهار (بدون تفاوت معنی‌دار) مشاهده شد. مقدار پتاسیم استخراج شده با عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و مخلوط کلرید کلسیم و سدیم در خاک‌های یک، دو و سه اختلاف

معنی‌داری نداشتند.

اگرچه در مراحل اولیه آزادسازی پتاسیم، تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین کلسیم و سدیم مشاهده نشد اما در مراحل بعدی این تفاوت نمایان شده و در خاک‌های با مقدار رس کمتر و کربنات کلسیم بیشتر، این تفاوت برجسته‌تر می‌شود. دلایل مختلفی را می‌توان برای این فرآیند در نظر گرفت. شاید مهمترین دلیل، تأثیر سدیم بر پراکندگی ذرات رس و تماس بهتر کاتیون‌های محلول با پتاسیم بین لایه‌ای رس‌ها باشد. می‌توان بیان کرد که با تبادل سدیم با کلسیم در رس‌ها، غلظت کلسیم محلول افزایش می‌یابد و قرار گرفتن سدیم روی نقاط تبدیلی سبب افزایش درصد سدیم تبدیلی و در نتیجه پراکندگی رس‌ها می‌شود. از طرفی انحلال کربنات‌های کلسیم نیز سبب افزایش غلظت کلسیم محلول جهت تبادل بیشتر با پتاسیم بین لایه‌ای می‌شود. نتایج اندازه‌گیری کلسیم محلول در عصاره‌های مرحله اول نشان می‌دهد که غلظت آن در عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم، کلرید سدیم و مخلوط کلرید کلسیم و سدیم به ترتیب ۱۶۱۴، ۱۵۸۴ و ۱۶۸۰ میلی‌گرم بر لیتر بدون اختلاف معنی‌دار بوده است اما در عصاره‌گیری‌های ۴ تا ۱۲ به ترتیب به ۵۴۳، ۲۵۶ و ۴۰۵ میلی‌گرم بر لیتر با اختلاف معنی‌دار می‌رسد. از طرف دیگر غلظت سدیم در مرحله اولیه در سه عصاره‌گیر به ترتیب ۷، ۳۵۷ و ۲۰۲ میلی‌گرم بر لیتر بوده و در مراحل بعدی به طور میانگین به ترتیب به ۲، ۴۱۵ و ۲۱۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. یکی دیگر از دلایلی که می‌تواند بر آزادسازی پتاسیم با سدیم قابل توجه باشد تأثیر احتمالی سدیم بر کاهش تثبیت مجدد پتاسیم آزاد شده از بین لایه‌ها باشد.

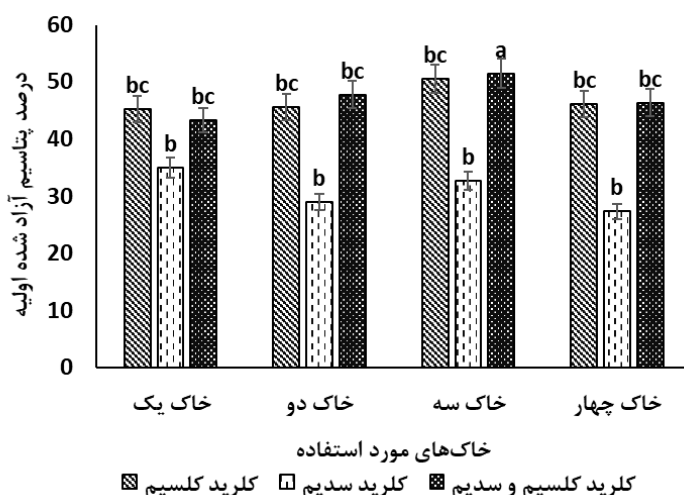


شکل ۴. مقدار پتاسیم آزاد شده مرحله تدریجی در مدت ۱۳۵ دقیقه تحت تأثیر برهمکنش خاک و عصاره‌گیر (میانگین‌های دارای حروف متفاوت برای هر ویژگی در سطح پنج درصد با آزمون توکی معنی‌دار هستند)

یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی پتاسیم آزاد شده با عصاره‌گیرهای مختلف در خاک‌های با ویژگی‌های متفاوت، سهولت آزادسازی پتاسیم می‌باشد. در واقع هر چه نسبت پتاسیم عصاره‌گیری شده در مراحل اولیه بیشتر باشد نشان دهنده سرعت بالاتر و سهولت آزادسازی پتاسیم می‌باشد؛ در حالی که کمتر بودن تفاوت پتاسیم آزاد شده در مراحل اولیه و آخر نشان از تدریجی بودن و پیوستگی آزادسازی پتاسیم می‌باشد. در حقیقت خاک‌هایی که نسبت پتاسیم آزاد شده در مراحل اولیه بالاتری دارند می‌توانند پتاسیم را در کوتاه مدت در اختیار گیاه قرار دهند در حالی که مقدار کمتر این شاخص نشان دهنده تأمین پتاسیم در درازمدت می‌باشد. شکل ۵، درصد پتاسیم آزاد شده در سه مرحله اول را نشان می‌دهد. بین چهار خاک مورد استفاده تفاوت معنی‌داری از این نظر در عصاره‌گیر کلرید کلسیم و کلرید سدیم مشاهده نشد در حالی که خاک سه درصد بالاتری را نسبت به سه خاک دیگر در عصاره‌گیر مخلوط کلرید کلسیم و سدیم نشان داد. به طور کلی در همه خاک‌ها، درصد پتاسیم آزاد شده اولیه با عصاره‌گیر کلرید سدیم (۲۷ تا ۳۵ درصد) به طور معنی‌داری کمتر از دو عصاره‌گیر دیگر (۴۳ تا ۵۱ درصد) بود اما بین دو عصاره‌گیر دیگر (بجر برای خاک سه) تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. این بدان معنی است که سدیم می‌تواند در درازمدت تأثیر بیشتری بر آزادسازی پتاسیم در همه خاک‌ها داشته باشد اما با گذشت زمان از توانایی کلسیم در استخراج پتاسیم به شدت کاسته می‌شود. از طرف دیگر، بخش بیشتری از آزادسازی پتاسیم به وسیله کلسیم در مراحل اولیه اتفاق می‌افتد که این می‌تواند در تأمین پتاسیم برای گیاه در کوتاه مدت مؤثر باشد.

تحقیقات اندکی در مورد مقایسه کاتیون‌های مختلف از جمله سدیم در تعادل و پویایی پتاسیم خاک بخصوص در خاک‌های آهکی انجام شده است. در پژوهشی (Jalali, 2008) تأثیر سدیم و منیزیم بر آهنگ آزادسازی پتاسیم از برخی خاک‌های غرب ایران بررسی شد

و نشان داده شد که بیشترین مقدار آزادسازی پتاسیم با کاربرد آب با نسبت جذب سدیم ۵ و کمترین مقدار با کاربرد آب با نسبت جذب سدیم ۴۵ به مقدار به ترتیب ۹۸۵ و ۳۸۷ میلی گرم بر کیلوگرم به دست آمد. باید در نظر داشت که در این تحقیقات، پتاسیم محلول و تبدلی خاک اولیه حذف نشده و فرآیند اصلی، تبادل کاتیون‌های محلول در آب مورد استفاده با پتاسیم تبدلی خاک بوده است و شاید نقش کاتیون‌ها در آزادسازی پتاسیم غیرتبدلی را نتوان به دقت مورد بررسی قرار داد. نتایج متفاوتی با خاک‌های شنی (Jalali, 2011) به دست آمد و گزارش شد که در خاک‌های شنی با افزایش نسبت جذب سدیم، میزان آبشویی پتاسیم نیز افزایش می‌یابد. پژوهشگران (Gul et al., 2016) با مطالعه دو خاک شنی و رسی قلیایی نشان دادند که افزایش نسبت جذب سدیم به ۲۰ و ۳۰ سبب افزایش آزادسازی پتاسیم از هر دو خاک گردید اما این افزایش برای خاک رسی بیشتر بود در حالی که خاک شنی در مراحل اولیه مقدار پتاسیم بیشتری را آزاد کرد. باید در نظر داشت که با توجه به توانایی سدیم در استخراج پتاسیم از خاک، عصاره‌گیرهای مختلفی نیز بر پایه سدیم برای خاک‌های آهکی توسعه یافته است که برخی عبارتند از استات سدیم یک مولار، سدیم تترافیتل بور و استات سدیم ۰/۷۳ مولار. در خاک‌های ایران نیز عصاره‌گیرهای حاوی سدیم برای ارزیابی حاصلخیزی پتاسیم خاک برای گندم (Zarrabi & Jalali, 2010)، ذرت (Fathi et al., 2014)، زیتون (Ahrari et al., 2017) و برنج (Owliaie et al., 2017) با توجه به همبستگی مناسب آنها با میزان جذب پتاسیم گیاه پیشنهاد شده است.



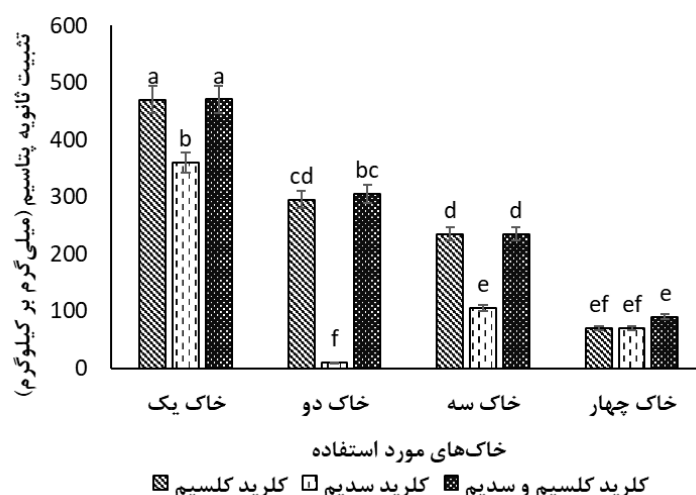
شکل ۵. درصد پتاسیم آزاد شده اولیه نسبت به مقدار کل پتاسیم آزاد شده در مدت ۱۳۵ دقیقه تحت تأثیر برهمکنش خاک و عصاره‌گیر (میانگین‌های دارای حروف متفاوت برای هر ویژگی در سطح پنج درصد با آزمون توکی معنی‌دار هستند)

تثبیت مجدد پتاسیم در خاک‌های مورد استفاده

توانایی تثبیت پتاسیم خاک‌های مورد استفاده پس از ۱۲ بار عصاره‌گیری پیوسته با سه عصاره‌گیر مختلف نشان داد که خاک یک صرف‌نظر از نوع عصاره‌گیر، مقدار بیشتری پتاسیم را تثبیت کرد و این مقدار برای خاک یک که با کلرید سدیم عصاره‌گیری شده بود به‌طور معنی‌داری کمتر از دو عصاره‌گیر دیگر بود (۳۶۰ در مقابل ۴۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم در شکل ۶). خاک چهار کمترین مقدار پتاسیم را تثبیت کرد (۷۰ تا ۹۰ میلی گرم بر کیلوگرم) و نوع عصاره‌گیر تأثیری بر توانایی تثبیت پتاسیم آن نداشت. مقدار پتاسیم تثبیت شده در خاک دو تحت تأثیر عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و مخلوط کلرید کلسیم و سدیم به ترتیب ۲۹۵ و ۳۰۵ میلی گرم بر کیلوگرم و به‌طور معنی‌داری بیشتر از عصاره‌گیر کلرید سدیم (۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم) بود. این مقدار در خاک سه نیز تحت تأثیر عصاره‌گیرهای کلرید کلسیم و مخلوط کلرید کلسیم و سدیم، ۲۳۵ میلی گرم بر کیلوگرم و به‌طور معنی‌داری بیشتر از عصاره‌گیر کلرید سدیم (۱۰۵ میلی گرم بر کیلوگرم) بود.

به طور کلی می‌توان بیان کرد که اسمکتیت‌ها مسئول اصلی تثبیت پتاسیم در خاک‌های آهکی می‌باشند (Najafi-Ghiri et al., 2024; Shakeri & Abtahi, 2020). خاک یک با توجه به مقدار بالای رس و غالبیت کانی اسمکتیت، بیشترین مقدار پتاسیم را تثبیت کرد. خاک سه با وجود اینکه بالاترین مقدار پتاسیم را آزاد کرد اما تثبیت پتاسیم توسط آن کمتر از خاک‌های یک و دو بود که این به دلیل مقدار اسمکتیت و رس کمتر می‌باشد. به طور کلی، عصاره‌گیر کلرید سدیم، توانایی تثبیت پتاسیم خاک را کاهش داد که این می‌تواند در نتیجه جذب شدن سدیم در بین لایه‌های اسمکتیت و جلوگیری از ورود و تثبیت پتاسیم توسط آنها باشد. در واقع نمی‌توان ارتباط خوبی را

بین مقدار آزادسازی پتاسیم و مقدار تثبیت مجدد آن یافت. در مطالعه‌ای (Najafi-Ghiri et al., 2024) نشان داده شد که اگر چه سرکه چوب در عصاره‌گیری پتاسیم از برخی خاک‌های آهکی بهتر از کلرید کلسیم عمل کرد اما تثبیت مجدد پتاسیم در این خاک‌ها تفاوت معنی‌داری نداشت مگر برای خاک‌های ورتی‌سول که تثبیت پتاسیم در خاک‌هایی که با کلرید کلسیم عصاره‌گیری شده بودند افزایش یافت. در تحقیق دیگری مشخص شد که خاک‌های آهکی که توسط کلرید کلسیم، اسید کلریدریک و اسید سیتریک از پتاسیم تخلیه شده بودند توانستند از ۳۲۴ تا ۴۷۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم از پتاسیم افزوده شده را تثبیت کنند اما این مقدار تثبیت تحت تأثیر نوع عصاره‌گیرها قرار نگرفت.



شکل ۶. مقدار پتاسیم تثبیت شده پس از ۱۳۵ دقیقه عصاره‌گیری خاک تحت تأثیر برهمکنش خاک و عصاره‌گیر (میانگین‌های دارای حروف متفاوت برای هر ویژگی در سطح پنج درصد با آزمون توکی معنی‌دار هستند)

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی توسط کاتیون‌های محلول خاک می‌تواند بخشی از پتاسیم مورد نیاز گیاه را در خاک‌های تخلیه شده از پتاسیم تأمین کند. اگرچه تحقیقات زیادی در مورد تأثیر عصاره‌گیرهای مختلف نمکی و اسیدی بر آزادسازی پتاسیم انجام شده اما نقش سدیم به عنوان یک کاتیون غالب در محلول خاک‌های مناطق خشک کمتر مورد توجه و پژوهش قرار گرفته است. در مطالعه حاضر مشخص شد که سدیم هم می‌تواند به اندازه کلسیم و حتی در درازمدت بیشتر از کلسیم در آزادسازی پتاسیم خاک نقش داشته باشد. اگر چه یون هیدراته سدیم بزرگ‌تر از کلسیم بوده و به راحتی وارد محل‌های بین لایه‌ای نمی‌شود اما سدیم از طریق پراکندگی ذرات خاک و تماس بیشتر کاتیون‌های محلول با پتاسیم بین لایه‌ای، آزاد شدن بخشی از پتاسیم محبوس در نتیجه پراکندگی ذرات درشت و قرار گرفتن سدیم در بین لایه‌های اسمکتیت‌ها و جلوگیری از تثبیت مجدد پتاسیم آزاد شده می‌تواند نسبت به کلسیم موفق‌تر عمل کند. به هر حال خاک‌های تیمار شده با عصاره‌گیر سدیم توانایی تثبیت پتاسیم کمتری نیز دارند و این نشان می‌دهد که در خاک‌های تحت تأثیر سدیم، بخش بیشتری از پتاسیم اضافه شده به خاک‌ها می‌تواند به شکل‌های قابل استفاده گیاه قرار گیرد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در خاک‌های مناطق خشک وجود مقدار مناسب سدیم در محلول خاک و یا آب آبیاری می‌تواند پتاسیم غیرتبادلی خاک را جهت استفاده گیاه و یا آبشویی به شکل‌های محلول درآورد و این باید در مدیریت حاصلخیزی پتاسیم در این خاک‌ها مد نظر قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در پایش وضعیت پتاسیم خاک‌های کشاورزی، نقش پتاسیم غیرتبادلی در تأمین بخشی از نیاز گیاه با توجه به پارامترهای مؤثر بر آن مانند کیفیت آب آبیاری (وجود سدیم و کلسیم و نسبت آنها) و همچنین ظرفیت خاک‌های تخلیه شده از پتاسیم در تثبیت مجدد پتاسیم افزوده شده در نظر گرفته شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

منابع

احراری، مهری؛ اولیایی، حمید رضا؛ ادهمی، ابراهیم و نجفی قیری، مهدی. (۲۰۱۷). مطالعه وضعیت پتاسیم و ارزیابی عصاره گیرهای شیمیایی برای



استخراج پتاسیم قابل جذب در برخی خاک‌های زیتون کاری استان فارس. آب و خاک، ۳۱(۳)، ۸۳۵-۸۴۵.

اولیایی، حمید رضا؛ بارونی، فاطمه؛ ادیمی، ابراهیم و نجفی‌قیری، مهدی. (۲۰۱۷). مقایسه چند عصاره‌گیر برای استخراج پتاسیم قابل جذب برنج در برخی از خاک‌های استان کهگیلویه و بویر احمد. تحقیقات کاربردی خاک، ۵(۱)، ۱۳-۲۴.

ضرابی، محبوبه و جلالی، محسن. (۲۰۱۰). مقایسه چند عصاره‌گیر برای استخراج پتاسیم قابل جذب گندم در برخی از خاک‌های استان همدان. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۰(۲)، ۱۴۹-۱۵۵.

فتحی، سامان؛ صمدی، عباس؛ داوری، مسعود و اسدی‌کیپورچال، صفورا. (۲۰۱۴). ارزیابی عصاره گیرهای مختلف برای تعیین پتاسیم قابل استفاده ذرت در خاک‌های آهکی استان کردستان. تحقیقات غلات، ۴(۳)، ۲۵۳-۲۶۶.

هاشمی، سهیلاسادات. (۲۰۲۰). مطالعه اثر کشت طولانی مدت انگور بر روی کانی‌شناسی اجزاء خاک و شکل‌های مختلف پتاسیم در دو منطقه ملایر. پژوهش‌های خاک، ۳۴(۲)، ۱۸۳-۱۹۷.

نجفی‌قیری، مهدی. (۱۴۰۳). تعادل و پویایی پتاسیم در خاک‌های ایران. انتشارات دانشگاه تهران، ۱۷۲ صفحه.

REFERENCES

- Ahrari, M., Owliaie, H. R., Adhami, A., & Najafi-Ghiri, M. (2017). Study of Potassium Status and Evaluating Chemical Extractants for Estimating Available K in Some Soils of Olive Orchards of Fars Province. *Iranian Journal of Soil and Water*, 31(3), 835-845. (in Persian)
- Bray, A. W., Oelkers, E. H., Bonneville, S., Wolff-Boenisch, D., Potts, N. J., Fones, G., & Benning, L. G. (2015). The effect of pH, grain size, and organic ligands on biotite weathering rates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 164, 127-145.
- Carmo, A., Angélica, R., & Paz, S. (2021). Ageing characteristics related to cation exchange and interlayer spacing of some Brazilian bentonites. *Heliyon*, 7(2), e06192.
- Dhaliwal, A., Gupta, R., Yadvinder-Singh, & Bijay-Singh. (2006). Potassium Fixation and Release Characteristics of Some Benchmark Soil Series under Rice-Wheat Cropping System in the Indo-Gangetic Plains of Northwestern India. *Communications in soil science and plant analysis*, 37(05-06), 827-845.
- Farsang, S., Pekker, P., Lampronti, G. I., Molnár, Z., Milovský, R., Pósfai, M., Ozdín, D., Raub, T. D., & Redfern, S. A. (2022). Inclusions in calcite phantom crystals suggest role of clay minerals in dolomite formation. *American Mineralogist*, 107(7), 1369-1377.
- Fathi, S., Samadi, A., Darvari, M. & Asadi-Kapourchal, S. (2014). Evaluating different extractants for determining corn available potassium in some calcareous soils of Kurdistan province. *Cereal Research*, 4(3), 253-266. (in Persian)
- Golestanifard, A., Santner, J., Aryan, A., Kaul, H. P. & Wenzel, W. W. (2020). Potassium fixation in northern Iranian paddy soils. *Geoderma*, 375, 114475.
- Gul, M., Wakeel, A., Saqib, M., & Wahid, A. (2016). Effect of NaCl-induced saline sodicity on the interpretation of soil potassium dynamics. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(4), 523-532.
- Hashemi, S. S. (2020). Study on the Effect of Long Term Cultivation of Grape on Mineralogy of Soil Fractions and Different Potassium Forms in Two Regions of Malayer. *Iranian Journal of Soil Research*, 34(2), 183-198. (in Persian)
- Hashemi, S. S., & Najafi-Ghiri, M. (2024). Kinetic of Potassium Release from Vermiculite Clay Soil to Calcium Chloride and Citric Acid Solutions (Emphasis on Clay Mineralogy Changes). *Communications in soil science and plant analysis*, 55(6), 782-795.
- Helmke, P. A., & Sparks, D. L. (2020). Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. In D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, & R. H. Loeppert (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 3-chemical methods*. (Pp. 551-574). Madison.
- Jalali, M. (2008). Effect of sodium and magnesium on kinetics of potassium release in some calcareous soils of western Iran. *Geoderma*, 145(3-4), 207-215.
- Jalali, M. (2011). Effect of saline-sodic solutions on column leaching of potassium from sandy soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 57(4), 377-390.
- Johns, W. D., Grim, R. E., & Bradley, W. F. (1954). Quantitative estimations of clay minerals by diffraction methods. *Journal of Sedimentary Research*, 24(4), 242-251.
- Kittrick, J., & Hope, E. (1963). A procedure for the particle-size separation of soils for X-ray diffraction analysis. *Soil Science*, 96(5), 319-325.
- Li, T., Wang, H., Zhou, Z., Chen, X., & Zhou, J. (2015). A nano-scale study of the mechanisms of non-exchangeable potassium release from micas. *Applied Clay Science*, 118, 131-137.

- Loeppert, R., & Suarez, D. (1996). Carbonate and gypsum. In D. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods* (pp. 437-474). SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison.
- Luo, X., Zhang, X., Zhang, L., Guo, L., Nie, Z., Zhou, J., Wang, R., Zhang, T., Miao, Y., & Ma, L. (2024). Characteristics of clay dispersion and its influencing factors in saline-sodic soils of Songnen Plain, China. *Agricultural Water Management*, 303, 109033.
- Martin, H., & Sparks, D. (1985). On the behavior of nonexchangeable potassium in soils. *Communications in soil science and plant analysis*, 16(2), 133-162.
- Molavi, R., Baghernejad, M., Ghasemi-Fasaei, R., & Zarei, M. (2020). Release characteristics of potassium from native reserves of some calcareous soils of Iran and their relationship with yield and potassium uptake by ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Soil Research*, 58(8), 770-778.
- Morida, K., Fukushima, K., Sakuma, H., & Tamura, K. (2023). Systematic comparison of the hydration and dehydration of Na⁺-, K⁺-, and NH₄⁺-saturated montmorillonite, nontronite, hectorite, saponite, and Fe-saponite by in situ X-ray diffraction measurements. *Applied Clay Science*, 237, 106898.
- Murrell, T. S., Mikkelsen, R. L., Sulewski, G., Norton, R., & Thompson, M. L. (2021). *Improving potassium recommendations for agricultural crops*. Springer Nature.
- Najafi-Ghiri, M. (2024). *Potassium Equilibration and Dynamics in the Soils of Iran* (Vol. 1). Tehran University Press. (in Persian)
- Najafi-Ghiri, M., Abtahi, A., Karimian, N., Owliaie, H., & Khormali, F. (2011). Kinetics of non-exchangeable potassium release as a function of clay mineralogy and soil taxonomy in calcareous soils of southern Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 57(4), 343-363.
- Najafi-Ghiri, M., Boostani, H. R., & Hardie, A. G. (2022). Investigation of biochars application on potassium forms and dynamics in a calcareous soil under different moisture conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 68(3), 325-339.
- Najafi-Ghiri, M., Boostani, H. R., & Hardie, A. G. (2023). Release of potassium from some heated calcareous soils to different solutions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(1), 90-103.
- Najafi-Ghiri, M., Boostani, H. R., & Hashemi, S. S. (2024). Effect of Low Temperature Heating of Potassium-Depleted Soils on Secondary Potassium Release to Calcium Chloride and Wood Vinegar and Fixation. *Eurasian Soil Science*, 57(10), 1698-1708.
- Najafi-Ghiri, M., Mirsoleimani, A., & Amin, H. (2017). Nutritional status of washington Navel orange orchards in arid lands of southern iran. *Arid Land Research and Management*, 31(4), 431-445.
- Najafi-Ghiri, M., Rezabigi, S., Hosseini, S., Boostani, H. R., & Owliaie, H. R. (2019). Potassium fixation of some calcareous soils after short term extraction with different solutions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(7), 897-910.
- Nelson, D. W., Sommers, L. E., Sparks, D., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., Soltanpour, P., Tabatabai, M., Johnston, C., & Sumner, M. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis. Part 3-chemical methods.*, 961-1010.
- Ohazuruike, L., & Lee, K. J. (2023). A comprehensive review on clay swelling and illitization of smectite in natural subsurface formations and engineered barrier systems. *Nuclear Engineering and Technology*, 55(4), 1495-1506.
- Owliaie, H. R., Barooni, F., Adhami, E., & Najafi-Ghiri, M. (2017). Comparison of some extractants for extracting available potassium for rice in some soils of Kohgiluyeh Province. *Iranian Journal of Applied Soil Research*, 5(1), 13-24. (in Persian)
- Rahmatullah, B. S., Gill, M., & Salim, M. (1994). Bioavailable potassium in river-bed sediments and release of interlayer potassium in irrigated arid soils. *Soil Use and Management*, 10(1), 43-46.
- Rhoades, J. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In D. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods* (pp. 417-435). Madison.
- Rowell, D. L. (2014). *Soil Science: Methods and Applications*. Routledge.
- Samadi, A. (2010). Long-term cropping on potassium release and fixation behaviors. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 56(5), 499-512.
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A. & Benham, E. C. (2012). *Field book for describing and sampling soils*. Government Printing Office.
- Shakeri, S., & Abtahi, A. (2020). Potassium fixation capacity of some highly calcareous soils as a function of clay minerals and alternately wetting-drying. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(4), 445-457.
- Soil Survey Staff. (2022). *Keys to Soil Taxonomy* (Vol. 14). USDA-NRCS.
- Sumner, M., & Miller, W. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. In D. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods* (pp. 1201-1229). Madison.



- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3—Chemical Methods* (pp. 475-490). Madison.
- Zareian, G., Farpoor, M. H., Hejazi-Mehrizi, M., & Jafari, A. (2018). Kinetics of Non-exchangeable Potassium Release in Selected Soil Orders of Southern Iran. *Soil & Water Research*, 13(4), 200-207.
- Zarrabi, M., & Jalali, M. (2010). A Comparison of Some Extractants Used for the Assessment of Available Potassium in Some Hamadan Soils. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 40(2), 149-155. (in Persian)