



## Investigating the quantity-intensity (Q/I) parameters of potassium in soil influenced by the addition of minerals and humic acid

Shabnam Jalilian<sup>1</sup> | Faranak Ranjbar<sup>2</sup>

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail:

[shabnamjalilian77@gmail.com](mailto:shabnamjalilian77@gmail.com)

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail:

[f\\_ranjbar1980@yahoo.com](mailto:f_ranjbar1980@yahoo.com)

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Aug. 18, 2024

**Revised:** Sep. 21, 2024

**Accepted:** Oct. 15, 2024

**Published online:** Feb. 2025

**Keywords:**

Gapon Selectivity Coefficient,  
Labile Potassium,  
Potassium Potential Buffering  
Capacity,  
Zeolite.

### ABSTRACT

This study was conducted to investigate the effect of using bentonite, vermiculite and zeolite saturated by sodium and calcium with and without humic acid on the parameters of potassium quantity-intensity relationship in a loamy soil based on a completely random design. The amendments saturated by calcium and sodium were added separately to 400-g soil samples at the rate of 1% and 2% (w/w). For each treatment containing mineral amendment, two levels of humic acid application (0 and 0.5% w/w) were considered. After the end of a two-month incubation, adsorption isotherm tests were performed using solutions containing concentrations of 0.3, 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 2.7, and 3 mM potassium chloride and 10 mM calcium chloride and Q/I parameters were obtained. The highest and lowest values of  $AR_e^K$  were related to 1% Ca-Z and 2% Na-B + 0.5% HA treatments, respectively. There was a negative and significant correlation between  $AR_e^K$  and  $PBC^K$  and CEC. The  $PBC^K$  varied in the range of 59.4-174.1 ( $\text{cmol}_e \text{kg}^{-1}$ ) ( $\text{mol L}^{-1}$ )<sup>-1.2</sup> and the highest and lowest values were obtained in 2% Na-Z + 0.5% HA and 1% Ca-B treatments, respectively. The highest values of  $K^0$ ,  $K_X$ , and  $K_L$  were obtained in 1% Na-Z + 0.5% HA treatment. The free energy of potassium exchange in treatments containing amendments saturated by sodium along with humic acid was greater than other treatments. The highest and lowest values of Gapon selectivity coefficient were obtained in 2% Na-Z + 0.5% HA and 1% Ca-B treatments, respectively. The  $PBC^K$  decreased in 1% Ca-B, 2% Ca-B, 1% Ca-V, and 1% Ca-Z treatments compared to the control. These treatments have less power than the control in regulating the intensity factor during the discharge of soluble potassium. Therefore, they can be beneficial for the quick supply of potassium to the plant. However, they are weaker than the untreated soil in maintaining and providing potassium in the long term.

Cite this article: Jalilian, Sh. & Ranjbar, F., (2025) Investigating the quantity-intensity (Q/I) parameters of potassium in soil influenced by the addition of minerals and humic acid, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (11), 2075-2090.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.380980.669781>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.380980.669781>



## EXTENDED ABSTRACT

### Background and Purpose

Knowledge of soil potassium status is very important in plant nutrition management. The thermodynamic approach commonly used to describe and evaluate the soil potassium supply capacity is the quantity-intensity (Q/I) isotherm. This relationship provides useful information about the soil fertility status, including the potential buffering capacity of potassium ( $PBC^K$ ), plant usable potassium or labile potassium ( $K_L$ ), potassium adsorbed in the surface places of minerals (non-specific) that is easily exchangeable ( $K^0$ ) and potassium adsorbed in the edge and wedge sites of minerals (specific) that is hardly exchangeable ( $K_X$ ). This study was conducted to investigate the effect of using bentonite, vermiculite and zeolite saturated by sodium and calcium with and without humic acid on the parameters of potassium quantity-intensity relationship in a loamy soil based on a completely random design.

### Materials and Methods

The soil sample was divided into 50 sub-samples of 400 grams: 48 sub-samples were experimental treatments with two replications, and 2 sub-samples were considered as controls (without adding amendments). The amendments saturated by calcium and sodium were added separately to 400-g soil samples at the rate of 1% and 2% (w/w) (4 and 8 grams, respectively). For each treatment containing mineral amendment, two levels of humic acid application (0 and 0.5% w/w) were considered. The control and treated samples were moistened almost as much as the field capacity and placed in an incubator at a temperature of 25°C for two months. After the incubation, adsorption isotherm tests were performed using solutions containing concentrations of 0.3, 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 2.7, and 3 mM potassium chloride and 10 mM calcium chloride and Q/I parameters were obtained.

### Findings

The highest and lowest values of  $AR_e^K$  were related to 1% Ca-Z and 2% Na-B + 0.5% HA treatments, respectively. There was a negative and significant correlation between  $AR_e^K$  and  $PBC^K$  and CEC. The  $PBC^K$  varied in the range of 59.4-174.1 ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) ( $\text{mol L}^{-1}$ )<sup>-1.2</sup> and the highest and lowest values were obtained in the treatments of 2% Na-Z + 0.5% HA and 1% Ca-B, respectively. The parameters  $K^0$ ,  $K_X$ , and  $K_L$  were in the range of 0.14-0.26, 0.05-0.14, and 0.22-0.40  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . The highest values of these parameters were obtained in the treatment of 1% Na-Z + 0.5% HA. The free energy of potassium exchange in treatments containing amendments saturated by sodium along with humic acid was greater than other treatments. The highest and lowest values of Gapon selectivity coefficient were obtained in 2% Na-Z + 0.5% HA and 1% Ca-B treatments, respectively. The  $PBC^K$  decreased in 1% Ca-B, 2% Ca-B, 1% Ca-V, and 1% Ca-Z treatments compared to the control. These treatments have less power than the control in regulating the intensity factor during the discharge of soluble potassium. Therefore, they can be beneficial for the quick supply of potassium to the plant. However, they are weaker than the untreated soil in maintaining and providing potassium in the long term.

### Conclusion

Treatments containing amendments saturated by sodium in companion with humic acid increased the CEC and the potential buffering capacity of potassium. Therefore, these modifiers can be used for the long-term supply of potassium needed by the plant in soils with light texture or depleted of potassium.

### Author contributions

Conceptualization, S.J. and F.R.; Methodology, F.R.; Software, S.J. and F.R.; Validation, F.R.; Formal analysis, S.J.; Investigation; S.J. and F.R.; Resources, F.R.; Data curation, S.J. and F.R.; Writing—original draft preparation, F.R.; Writing—review editing, F.R.; Visualization, S.J. and F.R.; Supervision, F.R.; Project administration, F.R.; Funding acquisition, F.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

### Data availability statement

The datasets analyzed during the current study can be available from the corresponding author on reasonable request.

### Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct. This article does not contain any studies with human participants or animals.

### Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

## بررسی پارامترهای کمیت-شدت (Q/I) پتاسیم در خاک تحت تأثیر افزودن مواد معدنی و اسید هیومیک

شبنم جلیلیان<sup>۱</sup>، فرانک رنجبر<sup>۲</sup><sup>۱</sup> گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [shabnamjalilian77@gmail.com](mailto:shabnamjalilian77@gmail.com)<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [f\\_ranjabr1980@yahoo.com](mailto:f_ranjabr1980@yahoo.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	این مطالعه با هدف بررسی تأثیر کاربرد بنتونیت، ورمی کولیت و ژئولیت اشباع شده با سدیم و کلسیم با و بدون اسید هیومیک بر پارامترهای رابطه کمیت-شدت پتاسیم در یک خاک لومی بر اساس طرح کاملاً تصادفی انجام گرفت. اصلاح کننده‌های اشباع شده با کلسیم و سدیم به طور جداگانه به مقدار ۱ و ۲ درصد جرمی به نمونه‌های ۴۰۰ گرمی خاک اضافه شدند. برای هر تیمار حاوی اصلاح کننده معدنی، دو سطح کاربرد اسید هیومیک (۰ و ۰/۵ درصد جرمی) در نظر گرفته شد. پس از پایان آنکوباسیون دو ماهه، آزمایش‌های همدمای جذب با استفاده از محلول‌های همدمای حاوی غلظت‌های ۰/۳، ۰/۶، ۱/۲، ۱/۸، ۲/۴، ۲/۷ و ۳ میلی‌مولار کلرید پتاسیم و ۱۰ میلی‌مولار کلرید کلسیم انجام شد و پارامترهای Q/I به دست آمدند. بیشترین و کمترین مقدار پارامتر $AR_e^K$ به ترتیب مربوط به تیمارهای ۱٪ Ca-Z و ۲٪ Na-B + 0.5% HA بود. همبستگی منفی و معنی‌داری بین $AR_e^K$ و $PBC^K$ و CEC وجود داشت. پارامتر $PBC^K$ در دامنه ۱۷۴/۱-۵۹/۴ $(mol L^{-1})^{-1/2}$ (cmolc kg <sup>-1</sup> ) متغیر بود و بیشترین و کمترین مقدار به ترتیب در تیمارهای ۲٪ Na-Z + 0.5% HA و ۱٪ Ca-B به دست آمد. بیشترین مقدار $K_x$ ، $K_L$ و $K_0$ در تیمار ۱٪ Na-Z + 0.5% HA به دست آمد. انرژی آزاد تبادل پتاسیم در تیمارهای حاوی اصلاح کننده‌های سدیمی همراه با اسید هیومیک نسبت به سایر تیمارها بزرگتر بود. بیشترین و کمترین مقدار ضریب انتخاب‌پذیری گاپون به ترتیب مربوط به تیمارهای ۲٪ Na-Z + 0.5% HA و ۱٪ Ca-B بود. تیمارهای ۱٪ Ca-B، ۲٪ Ca-B، ۱٪ Ca-V و ۱٪ Ca-Z موجب کاهش $PBC^K$ نسبت به شاهد شدند. این تیمارها قدرت کمتری نسبت به خاک شاهد در تنظیم شدت پتاسیم به هنگام تخلیه پتاسیم محلول دارند. بنابراین، می‌توانند برای تأمین سریع پتاسیم برای گیاه سودمند باشند، اما در تأمین پایدار آن، ضعیف‌تر از خاک تیمار نشده عمل می‌کنند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۲۸	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۶/۳۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۲۴	
تاریخ انتشار: بهمن ۱۴۰۳	
واژه‌های کلیدی:	
پتاسیم فراهم،	
ژئولیت،	
ضریب گاپون،	
ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم.	

استناد: جلیلیان؛ شبنم، رنجبر؛ فرانک، (۱۴۰۳) بررسی پارامترهای کمیت-شدت (Q/I) پتاسیم در خاک تحت تأثیر افزودن مواد معدنی و اسید هیومیک، مجله تحقیقات

آب و خاک ایران، ۵۵ (۱۱)، ۲۰۹۰-۲۰۷۵. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.380980.669781>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.380980.669781>

## مقدمه

پتاسیم یکی از مهمترین عناصر غذایی ضروری و پرمصرف برای رشد گیاهان است. آگاهی از وضعیت پتاسیم خاک‌ها در مدیریت تغذیه گیاهان اهمیت زیادی دارد (Marin & Sparks, 1985). در دسترس بودن پتاسیم در محلول خاک و ظرفیت خاک برای تنظیم این غلظت از جمله پارامترهای مهمی هستند که پتاسیم مؤثر برای تغذیه گیاه را تعیین می‌کنند (Hamed & Abu Zeid Amin, 2017). طیف وسیعی از عصاره‌گیرها برای تعیین پتاسیم قابل دسترس خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد که از جمله رایج‌ترین آن‌ها، استات آمونیوم یک مولار خنثی می‌باشد و می‌توان پتاسیم استخراج شده با آن را به عنوان شاخصی مناسب برای ارزیابی قابلیت استفاده پتاسیم در نظر گرفت (Panda & Patra, 2018). اما در خاک‌هایی که حاوی مقدار زیادی کانی‌های تثبیت‌کننده پتاسیم باشند، روش استات آمونیوم تخمین خوبی از پتاسیم قابل دسترس نیست، زیرا مقدار پتاسیم غیر تبادلی در این‌گونه خاک‌ها زیاد است که می‌تواند نقش مهمی در تأمین پتاسیم گیاه داشته باشد (Khan et al., 2014).

رویکرد ترمودینامیکی که اغلب برای توصیف و ارزیابی ظرفیت تأمین پتاسیم خاک استفاده می‌شود، ایزوترم کمیت-شدت (Q/I) است (Beckett, 1964). در این روش، برای پی بردن به توان تأمین پتاسیم در خاک، تعیین سه فاکتور کمیت (Q) که بیانگر مقدار پتاسیم در فاز تبادلی است، شدت (I) که معرف فعالیت نسبی پتاسیم در محلول خاک است و تحرک که معرف سرعت انتقال مقدار معین پتاسیم در واحد زمان به سطح ریشه می‌باشد، امری ضروری است (ملکوتی و همایی، ۱۳۸۳؛ رنجبر و همکاران، ۱۳۹۸). خاک‌های مختلف که دارای فاکتور شدت یکسان باشند، لزوماً پس از جذب پتاسیم توسط ریشه گیاه توان یکسانی برای حفظ این فاکتور ندارند. بنابراین، تنها اندازه‌گیری شدت پتاسیم در خاک کافی نیست و باید بر اساس رابطه Q/I ارتباط بین پتاسیم محلول و پتاسیم فراهم<sup>۱</sup> مشخص شود. این رابطه اطلاعات مفیدی در رابطه با وضعیت حاصلخیزی خاک‌ها از جمله ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم ( $PBC^K$ )، پتاسیم فراهم ( $K_L$ )، پتاسیم جذب شده در مکان‌های سطحی کانی‌ها (غیر اختصاصی) که به آسانی قابل تبادل است ( $K^0$ ) و پتاسیم جذب شده در مکان‌های لبه‌ای و گوه‌ای کانی‌ها (اختصاصی) که به سختی قابل تبادل است ( $K_X$ ) را ارائه می‌دهد (Martin & Sparks, 1985). پارامترهای به دست آمده از رابطه Q/I می‌توانند به شناخت بهتر از ظرفیت تأمین پتاسیم خاک که تحت تأثیر شیوه‌های مختلف مدیریتی قرار می‌گیرد، کمک کنند (Panda & Patra, 2018; Biliias & Barbayiannis, 2019).

## پیشینه پژوهش

سمواتی و اسکندری (۱۳۹۲) با مطالعه روابط Q/I گزارش کردند که همبستگی معنی‌داری بین  $K^0$  و ظرفیت تبادل کاتیونی و پتاسیم استخراج شده با استات آمونیوم وجود داشت. عبدی و همکاران (۱۳۹۷) با بررسی اشکال شیمیایی و رابطه کمیت-شدت پتاسیم در اراضی تحت کشت پسته مناطق رفسنجان و انار به این نتیجه رسیدند که پارامتر  $K^0$  همبستگی معنی‌داری با پتاسیم محلول، تبادلی و غیر تبادلی داشت، پارامتر نسبت فعالیت پتاسیم در حالت تعادل ( $AR_e^K$ ) همبستگی معنی‌داری با پتاسیم محلول و تبادلی نشان داد، اما پارامتر  $PBC^K$  همبستگی معنی‌داری با اشکال شیمیایی پتاسیم و ویژگی‌های خاک نشان نداد. رنجبر و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی ارتباط اشکال پتاسیم خاک با پارامترهای Q/I پتاسیم و همبستگی آن با برخی خصوصیات خاک در مناطق زیر کشت توتون شمال غرب ایران به این نتیجه رسیدند که همبستگی مثبت و معنی‌دار بین مقدار پتاسیم تبادلی و پتاسیم محلول و همچنین همبستگی معنی‌دار بین پتاسیم تبادلی و پتاسیم غیر تبادلی خاک وجود داشت. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین مقادیر اشکال تبادلی، غیر تبادلی و ساختمانی پتاسیم نیز نشان داد که بخشی از اشکال غیر تبادلی و ساختمانی پتاسیم می‌تواند طی دوره رشد، برای گیاه قابل استفاده باشد. این محققان اظهار داشتند که برای افزایش غلظت پتاسیم برگ توتون لازم است خصوصیات خاک با استفاده از روابط کمیت-شدت در توصیه کودی پتاسیم لحاظ گردند. موسی پور و همکاران (۱۳۹۹) با ارزیابی همبستگی ویژگی‌های خاک با پارامترهای رابطه Q/I پتاسیم در خاک‌های آهکی استان لرستان نشان دادند که بین پارامترهای  $K^0$ ،  $AR_e^K$ ،  $K_L$  و  $K^0$ ،  $AR_e^K$ ،  $K_L$  و  $K^0$  و همچنین، بین  $K_X$  و  $K_L$  همبستگی مثبت و معنی‌دار وجود داشت. بین  $PBC^K$  با درصد رس و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و همچنین بین  $K_L$  و درصد ماده آلی نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد. شارما و همکاران (Sharma et al., 2012) با مطالعه روابط کمیت-شدت پتاسیم در خاک‌های زیر کشت باغ‌های گواوا در هند، رابطه مثبت و معنی‌داری بین  $AR_e^K$  با پتاسیم قابل دسترس و درصد اشباع پتاسیم و نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری بین  $PBC^K$  و محتوای رس به

دست آوردند. آن‌ها علت مقدار کم  $AR_e^K$  در خاک مورد مطالعه را برداشت مداوم پتاسیم عنوان کردند. لالیثا و داکشینامورتی (Lalitha & Dhakshinamoorthy, 2015) بیان کردند که ظرفیت بافری خاک در ابتدا به سطوح فراهم برای تبادل یونی و سپس به خصوصیات و چگالی بار سطوح جذب کننده بستگی دارد. از آنجا که سطوح تبادلی عمده در خاک‌ها شامل رس‌ها و مواد آلی هیومیکی است، انتظار می‌رود خاک‌هایی که بقایای آلی بیشتری دریافت می‌کنند،  $PBC^K$  بالاتری داشته باشند. نتایج همبستگی در مطالعه آن‌ها نشان داد که با افزایش جایگاه‌های تبادلی در خاک، قابلیت جذب پتاسیم افزایش یافت و در نتیجه، ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم خاک نیز افزایش پیدا کرد. همچنین، گزارش شده است که حذف ماده آلی از خاک موجب کاهش شدید مقدار و سرعت جذب پتاسیم توسط خاک می‌شود و خاک‌های با ماده آلی بیشتر، مقدار بیشتری پتاسیم جذب کردند (Wang & Huang, 2001). ماده آلی، به ویژه ترکیبات هومیکی، در ترکیب با کانی‌های خاک، کمپلکس‌های آلی-معدنی تشکیل می‌دهد و این پیوند می‌تواند موجب تغییر ویژگی‌های سطح کانی و افزایش تعداد مکان‌های جذب کاتیون‌ها شود (Dumat et al., 2000). ژنگ و همکاران (Zhang et al., 2013) با بررسی تأثیر اسید هومیک بر جذب پتاسیم توسط مواد معدنی خاک به این نتیجه رسیدند که پوشش اسید هومیک به طور قابل توجهی ویژگی‌های سطح مواد معدنی خاک را تغییر داد. همچنین، پوشش اسید هومیک موجب افزایش قابل توجهی در جذب پتاسیم توسط کمپلکس‌های آلی-معدنی شد و این اثر برای کانی‌های رسی با ظرفیت تبادل کاتیونی پایین‌تر، آشکارتر بود.

ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و جذب و رهاسازی انتخابی کاتیون‌ها از جمله ویژگی‌های مهم آلومینوسیلیکات‌های طبیعی است. رضایی و همکاران (۱۳۹۰) با مطالعه رابطه کمیت-شدت پتاسیم خاک در دو منطقه لورک اصفهان و پردیس گرگان نشان دادند که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین  $PBC^K$  و ظرفیت تبادل کاتیونی وجود داشت. همچنین، گزارش کردند که کاربرد زئولیت به مقدار ۲۰ تن در هکتار باعث افزایش  $PBC^K$  و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌ها شد. بیشتر بودن فاکتور شدت در زئولیت نسبت به خاک پردیس گرگان با رس غالب کائولینیت و سپس ایلیت، سبب افزایش سرعت رهاسازی پتاسیم و افزایش مقدار پتاسیم قابل استفاده گیاه گردید. بنابراین، استفاده از زئولیت بدون کاربرد کود پتاسیم موجب کاهش محدودیت جذب پتاسیم و افزایش سرعت آزادسازی پتاسیم در این خاک شد و در نتیجه، عملکرد محصول افزایش یافت.

پاندا و پاترا (Panda & Patra, 2018)، رابطه کمیت-شدت را برای ارزیابی پویایی پتاسیم در دوازده خاک ساحلی شرق هند مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که پارامترهای Q/I مانند پتاسیم فراهم،  $AR_e^K$  و  $PBC^K$  شاخص‌های بهتری برای نشان دادن دسترسی پتاسیم خاک برای گیاه هستند. با این حال، در برخی از خاک‌ها، بخشی از پتاسیم تبادلی (پتاسیم قابل استخراج با استات آمونیوم ۱ مولار خنثی) در معرض تعادل تبادل یونی قرار نگرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که که حدود نیمی از نمونه‌های مورد مطالعه دارای مقادیر زیادی پتاسیم محلول، درصد اشباع پتاسیم در فاز تبادلی و  $PBC^K$  بودند. بر همین اساس، قادر به تأمین پتاسیم مورد نیاز گیاه در یک دوره کشت طولانی می‌باشند. در مقابل، برای نمونه‌هایی که ذخایر پتاسیم فراهم و درصد اشباع پتاسیم پایین بود، کوددهی مکرر برای جبران افت پتاسیم خاک در اثر جذب گیاه پیشنهاد شد. بانگرو و همکاران (Bangroo et al., 2021) با مطالعه رابطه Q/I در ده خاک شمال هند به این نتیجه رسیدند که پارامترهای  $K_x$  و  $K^0$  می‌توانند به طور بالقوه در تصریح پتاسیم تبادلی به عنوان یک شاخص حاصلخیزی به ویژه در خاک‌هایی با مدیریت ضعیف کودهای پتاسیم مفید باشند. نتایج یک مطالعه دیگر نشان داد که رابطه کمیت-شدت بهتر از روش استات آمونیوم ۱ مولار توانست پویایی پتاسیم را در خاک‌های کشاورزی اطراف معادن میکا توصیف نماید (Gosh et al., 2023). رانی و همکاران (Rani et al., 2023) با بررسی روابط کمیت-شدت پتاسیم تحت سیستم کشاورزی حفاظتی بلندمدت در خاک‌های تحت کشت غلات در شمال غرب هند پیشنهاد کردند که حفظ مداوم بقایای گیاهی در خاک می‌تواند عرضه پتاسیم به محصولات را بهبود بخشد و به نوبه خود به کاهش هزینه مصرف کودهای پتاسیم کمک کند. در مقابل، کمترین فاکتور کمیت و شدت در سیستم عملیات خاک‌ورزی رایج به دست آمد که بیانگر نیاز به مصرف مداوم کودهای پتاسیم بود.

با آنکه در مطالعات متعددی برای ارزیابی فراهمی پتاسیم در خاک از مفهوم Q/I استفاده شده است (Samadi, 2012; Lalitha & Dhakshinamoorthy, 2015; Panda & Patra, 2018; Bangroo et al., 2021)، اما اطلاعات محدودی در مورد تأثیر کاربرد اصلاح‌کننده‌ها بر ظرفیت بافری پتاسیم خاک‌ها وجود دارد. استفاده از مواد اصلاح‌کننده در خاک که دارای پتاسیم هستند و یا شرایط را برای جذب آن توسط گیاه فراهم می‌کنند، می‌تواند بر فاکتورهای شدت و کمیت تأثیرگذار باشد. فاکتور شدت تحت تأثیر ارتباط بین پتاسیم و سایر کاتیون‌ها به ویژه کلسیم و منیزیم قرار دارد. از سوی دیگر، ترجیح‌پذیری پتاسیم نسبت به کاتیون‌های رقیب مانند کلسیم، منیزیم و سدیم برای جذب توسط سطوح جاذب بر فاکتور کمیت تأثیرگذار است. وانگ و همکاران (Wang et al., 2011) نشان دادند که شدت



رها سازی پتاسیم به محلول خاک، به نوع کانی رسی غالب و حضور کاتیون‌های کلسیم و سدیم در خاک وابسته است. همچنین، تبدیل پتاسیم غیر تبادلی به پتاسیم تبادلی در درجه اول به رقابت پتاسیم با کاتیون‌های دیگر مانند کلسیم و منیزیم برای جذب توسط ذرات خاک بستگی دارد. کاهش غلظت این کاتیون‌ها می‌تواند در دسترس بودن مکان‌های جذب برای پتاسیم را افزایش دهد و در نتیجه پتاسیم تبادلی افزایش یابد (Gosh et al., 2023). از سوی دیگر،  $K^0$  که یکی از اجزای پتاسیم فراهم در خاک است، عمدتاً در مکان‌های تبادلی سطوح خارجی رس‌ها و سطوح قاعده‌ای ورمی‌کولیت و مونت‌موریلونیت و نیز در لایه پخشیده دوگانه اطراف کلوتیدهای آلی جذب می‌شود (Panda & Patra, 2018). بنابراین، علاوه بر ذرات معدنی، کلوتیدهای آلی نیز می‌توانند در جذب و رها سازی پتاسیم در خاک مؤثر باشند. بر این اساس، این مطالعه با هدف بررسی تأثیر کاربرد بنتونیت، ورمی‌کولیت و زئولیت‌های اشباع شده با سدیم و کلسیم با و بدون اسید هیومیک بر تغییر پارامترهای رابطه کمیت-شدت پتاسیم در خاک انجام گرفت.

## روش‌شناسی پژوهش

### آماده سازی اصلاح کننده‌ها

اسید هیومیک مورد استفاده در این مطالعه از شرکت Sigma-Aldrich (کد محصول: ۵۳۶۸۰) تهیه شد. اصلاح کننده‌های معدنی از معادن استان مرکزی تهیه شدند. بنتونیت مورد استفاده عمدتاً حاوی مونت‌موریلونیت و زئولیت مورد استفاده از نوع کلینوپتیلولیت طبیعی بود. ظرفیت تبادل کاتیونی اصلاح کننده‌ها به روش اشباع با استات سدیم یک مولار با  $pH = 8/2$  (Bower et al., 1952) اندازه‌گیری گردید. اشباع کردن آن‌ها با کلسیم و سدیم با استفاده از روش لین و همکاران (Lin et al., 2011) انجام شد. نمونه‌های ۴۰۰ گرمی از اصلاح کننده‌ها با یک لیتر از محلول‌های کلرید کلسیم و کلرید سدیم یک مولار به طور جداگانه به مدت ۷ روز در حالت اشباع قرار داده شدند. در این مدت، سوسپانسیون‌ها به طور متناوب در طی سه مرحله و هر مرحله به مدت ۲ ساعت در روز (جمعاً ۶ ساعت در روز) روی دستگاه شیکر دورانی با ۱۵۰ دور در دقیقه قرار گرفتند. سپس، اصلاح کننده‌های اشباع شده چندین بار با مخلوط آب مقطر و اتانول شسته شدند. در نهایت، نمونه‌ها در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت در آون خشک شدند (Lin et al., 2011).

### تهیه نمونه خاک و تعیین ویژگی‌های پایه

یک نمونه خاک مرکب از عمق ۳۰-۰ سانتی متری یک زمین کشاورزی واقع در طول جغرافیایی  $34/39^\circ$  شمالی و عرض جغرافیایی  $47/08^\circ$  شرقی به روش تصادفی پس از برداشت محصول (گندم) برداشته شد. پس از انتقال نمونه به آزمایشگاه، به مدت ۴۸ ساعت، هوا خشک و سپس، از الک ۲ میلی متری عبور داده شد. ویژگی‌های اولیه خاک مورد مطالعه شامل بافت به روش هیدرومتر (Gee & Bauder, 1986)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (Loeppert & Sparks, 1996) و ماده آلی به روش هضم تر با دی کرومات (Walkley & Black, 1934) تعیین شدند.

### آماده سازی خاک‌های تیمار شده و تعیین برخی ویژگی‌های شیمیایی

نمونه خاک به ۵۰ زیرنمونه ۴۰۰ گرمی تقسیم شد: ۴۸ زیرنمونه، تیمارهای آزمایش را با دو تکرار تشکیل دادند و ۲ زیرنمونه نیز به عنوان شاهد (بدون افزودن اصلاح کننده) در نظر گرفته شدند. اصلاح کننده‌های اشباع شده با کلسیم و سدیم به طور جداگانه به مقدار ۱ و ۲ درصد جرمی (به ترتیب ۴ و ۸ گرم) به هر نمونه ۴۰۰ گرمی خاک اضافه شدند. برای هر تیمار حاوی اصلاح کننده معدنی، دو سطح کاربرد اسید هیومیک (۰ و ۰/۵ درصد جرمی) در نظر گرفته شد. نمونه‌های شاهد و تیمار شده با رطوبتی نزدیک ظرفیت زراعی و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت دوماه در انکوباتور قرار گرفتند. پس از دوره انکوباسیون، خاک‌ها هوا خشک شدند و  $pH$ ، هدایت الکتریکی (EC)، پتاسیم محلول و کاتیون‌های تبادلی در آن‌ها اندازه‌گیری شدند. برای تعیین  $pH$ ، EC و کاتیون‌های محلول از عصاره ۱ به ۲/۵ خاک به آب مقطر (Rowell, 1994) و برای استخراج کاتیون‌های تبادلی (کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم) از روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم یک مولار خنثی استفاده شد (Thomas, 1982).  $pH$  و EC به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های  $pH$  متر و EC متر، کلسیم و منیزیم به روش کمپلکس‌سنجی با EDTA و سدیم و پتاسیم با استفاده از فلیم فتومتر اندازه‌گیری شدند (Jones, 2001). مقدار کاتیون‌های محلول در عصاره آب مقطر از مقدار آن‌ها در عصاره استات آمونیوم کسر شد تا مقدار کاتیون‌های تبادلی به دست آمد. مجموع کاتیون‌های تبادلی به عنوان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های شاهد و تیمار شده در نظر گرفته شد (Rowell, 1994).

### رابطه کمیت-شدت و تعیین پارامترهای آن

محلول‌های همدم (۱ ± ۲۵ درجه سلسیوس) حاوی غلظت‌های ۰/۳، ۰/۶، ۱/۲، ۱/۸، ۲/۴، ۲/۷ و ۳ میلی‌مولار پتاسیم از نمک کلرید پتاسیم بودند. الکترولیت زمینه در این محلول‌ها، کلرید کلسیم با غلظت ۱۰ میلی‌مولار بود (Beckett, 1964). به ۲ گرم از خاک‌های شاهد و تیمار شده، ۲۰ میلی‌لیتر از محلول‌های مذکور اضافه شد. سوسپانسیون‌ها به مدت یک ساعت، تکان داده شدند و پس از گذشت ۲۲ ساعت، مجدداً یک ساعت تکان داده شدند. سوسپانسیون‌ها به مدت ۵ دقیقه با ۳۰۰۰ دور در دقیقه، سانتریفیوژ شدند و غلظت پتاسیم، کلسیم و منیزیم در آن‌ها اندازه‌گیری شد.

مقدار پتاسیم جذب شده یا فاکتور کمیت (Q) با استفاده از رابطه ۱ (جدول ۱) محاسبه شد (Beckett, 1964). در این رابطه،  $\Delta K$  مقدار پتاسیم جذب شده ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ )،  $K_i$  غلظت اولیه پتاسیم ( $\text{meq L}^{-1}$ )،  $K_f$  غلظت نهایی (تعادلی) پتاسیم ( $\text{meq L}^{-1}$ )،  $V$  حجم محلول (mL) و  $S$  جرم خاک (g) هستند. فاکتور شدت (I) یا نسبت فعالیت پتاسیم ( $AR^K$ ) بر حسب  $(\text{mol L}^{-1})^{1/2}$  بر اساس رابطه ۲ محاسبه شد (Beckett, 1964) که  $aCa$ ،  $aMg$  و  $aK$  به ترتیب فعالیت پتاسیم، کلسیم و منیزیم ( $\text{mol L}^{-1}$ ) در محلول تعادلی هستند. برای محاسبه ضریب فعالیت از معادله دیویس و برای محاسبه قدرت یونی از رابطه  $I = 0.013 EC$  استفاده شد.

جدول ۱. روابط مورد استفاده در بررسی پارامترهای Q/I

شماره رابطه	شکل رابطه
۱	$\Delta K = [(K_i - K_f) \times V/S] / 10$
۲	$AR^K = aK / \sqrt{(aCa + aMg)}$
۳	$\Delta G^0 = 2.303 RT \log AR^K$
۴	$K_G = PBC^K / CEC$

با پلات کردن فاکتور کمیت روی محور  $y$  در مقابل فاکتور شدت روی محور  $x$ ، رابطه Q/I برای هر خاک به دست آمد. چنانچه مقدار  $y$  در معادله Q/I برابر صفر در نظر گرفته شود ( $\Delta K = 0$ )، پاسخ به دست آمده برای  $x$  بیانگر  $AR_e^K$  می‌باشد. عرض از مبدأ معادله Q/I نشان دهنده پتاسیم فراهم ( $K_L$ ) است. با برون‌یابی بخش خطی معادله Q/I روی محور  $y$ ، پتاسیم جذب شده در مکان‌های غیر اختصاصی ( $K^0$ )، به دست می‌آید. پتاسیم جذب شده در مکان‌های اختصاصی ( $K_x$ )، از تفاوت بین مقادیر  $K_L$  و  $K^0$  محاسبه می‌شود. شیب معادله Q/I بیانگر ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم ( $PBC^K$ ) می‌باشد.

انرژی آزاد تبادل پتاسیم در دمای ۲۵ درجه سلسیوس (۲۹۸ درجه کلوین) با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد (Beckett, 1972) که در  $\Delta G^0$  انرژی آزاد تبادل ( $\text{cal mol}^{-1}$ )،  $R$  ثابت جهانی گازها برابر با  $1/987 (\text{cal mol}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1})$  و  $T$  دمای مطلق ( $^\circ\text{K}$ ) هستند. ضریب انتخاب‌پذیری گاپون ( $K_G$ ) نیز با استفاده از رابطه ۴ به دست آمد (Evangelou & Karathanasis, 1986).

### تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه واریانس داده‌ها بر اساس طرح کاملاً تصادفی و مقایسه میانگین بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن با استفاده از نرم افزار SAS انجام گرفت.

### نتایج و بحث

#### بررسی برخی ویژگی‌های مهم شیمیایی در خاک‌های شاهد و تیمار شده

خاک مورد مطالعه از نوع آهکی (۲۷ درصد کربنات کلسیم معادل) با ۱/۴۱ درصد کربن آلی، ۳۵/۴ درصد شن، ۲۲/۶ درصد رس و دارای کلاس بافتی لوم بود. سایر ویژگی‌های شیمیایی اندازه‌گیری شده در خاک‌های شاهد و تیمار شده پس از دو ماه انکوباسیون در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر pH در خاک‌های تیمار شده تفاوت معنی‌داری با خاک شاهد نداشتند ( $p > 0.05$ ). افزایش اندک pH در خاک‌های تیمار شده با زئولیت سدیمی می‌تواند به دلیل هیدرولیز قلیایی ناشی از ورود سدیم به خاک باشد. به طور کلی، با توجه به ظرفیت بافری بالای خاک مورد مطالعه به دلیل ماهیت آهکی و وجود ۱/۴۱ درصد کربن آلی، عدم تغییر قابل توجه pH در خاک‌های تیمار شده دور از انتظار نبود (Sparks et al., 2023). هدایت الکتریکی خاک‌های شاهد و تیمار شده در دامنه ۰/۳۹-۰/۲۹ دسی زیمنس در متر قرار داشت. با این حال، اثر تیمارها بر مقدار EC خاک، معنی‌دار نبود. به دلیل تخلیه شدن فاز محلول اصلاح‌کننده‌های معدنی با استفاده از مخلوط آب





و اتانول در انتهای مراحل اشباع‌سازی، افزودن آن‌ها به خاک با افزایش قابل توجه EC و ایجاد مشکل شوری همراه نبود. مقادیر پتاسیم محلول در خاک‌های شاهد و تیمار شده تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند ( $p \leq 0.01$ ). مقدار پتاسیم محلول خاک‌ها در دامنه  $0.14 - 0.07$  میلی‌مولار قرار داشت. بیشترین و کمترین مقدار به ترتیب مربوط به شاهد و تیمار  $2\% \text{ Na-Z} + 0.5\% \text{ HA}$  بود. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که به دلیل ورود بخشی از پتاسیم محلول به فاز تبادلی، مقدار پتاسیم محلول در خاک‌های تیمار شده نسبت به شاهد، کاهش و مقدار پتاسیم تبادلی افزایش پیدا کرده است (Marin & Sparks, 1985; Sparks et al., 2023) (جدول ۲).

کلسیم و منیزیم، کاتیون‌های غالب در فاز تبادلی خاک شاهد بودند، مقدار پتاسیم تبادلی آن برابر  $0.49$  سانتی‌مول بار در کیلوگرم (معادل  $191$  میلی‌گرم در کیلوگرم) بود و سدیم، کمترین سهم را میان کاتیون‌های تبادلی داشت. کلسیم در خاک‌های تیمار شده نیز کاتیون غالب در فاز تبادلی بود و مقدار آن نسبت به خاک شاهد به طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد ( $p \leq 0.01$ ), در حالی که اثر تیمارها بر مقدار منیزیم و پتاسیم تبادلی، معنی‌دار نبود ( $p > 0.05$ ) (جدول ۲). بیشترین افزایش کلسیم تبادلی در تیمار  $2\% \text{ Ca-Z} + 0.5\% \text{ HA}$  مشاهده شد و کمترین مقدار کلسیم تبادلی مربوط به شاهد بود. به طور کلی، مقدار کلسیم تبادلی در تیمارهای حاوی اصلاح‌کننده‌های اشباع شده با کلسیم نسبت به انواع اشباع شده با سدیم، بیشتر بود. سدیم تبادلی در تیمارهای حاوی اصلاح‌کننده سدیمی به طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد و بیشترین مقدار این افزایش مربوط به تیمار  $2\% \text{ Na-Z} + 0.5\% \text{ HA}$  بود. با این حال، افزایش سدیم تبادلی در این تیمارها به اندازه‌ای نبود که منجر به سدیمی شدن خاک شود. اثر تیمارها بر ظرفیت تبادل کاتیونی، معنی‌دار بود ( $p \leq 0.01$ ) و مقدار آن در خاک‌های تیمار شده در دامنه  $0.06 - 0.08$  واحد نسبت به شاهد افزایش پیدا کرد. کمترین و بیشترین مقدار افزایش CEC به ترتیب مربوط به تیمارهای  $1\% \text{ Ca-B}$  و  $2\% \text{ Na-Z} + 0.5\% \text{ HA}$  بود. ظرفیت تبادل کاتیونی بنتونیت، ورمی‌کولیت و زئولیت مورد استفاده در این مطالعه به ترتیب برابر  $126$ ،  $146$  و  $188$  سانتی‌مول بار در کیلوگرم بود. اسید هیومیک یکی از اجزای بسیار مهم و تأثیرگذار ماده آلی خاک است که ظرفیت تبادل کاتیونی آن می‌تواند بین  $200$  تا  $600$  سانتی‌مول بار در کیلوگرم متغیر باشد (Harada & Inoko, 1975). با توجه به اینکه pH خاک مورد مطالعه، قلیایی بود، تفکیک گروه‌های عاملی کربوکسیلی و فنولی منجر به ایجاد بار منفی وابسته به pH و افزایش CEC شد (Strawn et al., 2020). به دلیل سطح ویژه و چگالی بار سطحی زیاد اسید هیومیک، مقدار کم آن در خاک نیز می‌تواند افزایش قابل توجهی در CEC ایجاد نماید.

#### بررسی پارامترهای Q/I در خاک‌های شاهد و تیمار شده

نمودارهای کمیت-شدت که جهت استخراج پارامترهای مختلف مورد استفاده قرار گرفتند، در مقاله نمایش داده نشدند. با این حال، در این بخش به نتیجه کلی که در نگاه اول از این نمودارها به دست آمد، اشاره می‌شود و پس از آن، پارامترهای مختلف به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند. در بالاترین سطح کاربرد پتاسیم در محلول‌های همدم (۳ میلی‌مولار)، فاکتور شدت در خاک‌های شاهد و تیمار شده در دامنه  $0.02 - 0.11$  ( $\text{mol L}^{-1}$ )<sup>1/2</sup> متغیر بود. بیشترین و کمترین مقدار به ترتیب در تیمارهای  $1\% \text{ Ca-B}$  و  $2\% \text{ Na-Z} + 0.5\% \text{ HA}$  مشاهده شد. در این شرایط، فاکتور کمیت در دامنه  $0.10 - 0.37$  سانتی‌مول بار در کیلوگرم قرار داشت و بیشترین و کمترین مقدار به ترتیب مربوط به تیمارهای  $2\% \text{ Na-Z} + 0.5\% \text{ HA}$  و  $1\% \text{ Ca-B}$  بود. در ادامه، به پارامترهای به دست آمده از رابطه Q/I در خاک‌های شاهد و تیمار شده پرداخته می‌شود که در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

#### نسبت فعالیت پتاسیم در حالت تعادل

اثر تیمارها بر پارامتر  $\text{AR}_e^{\text{K}}$  معنی‌دار بود ( $p \leq 0.01$ ). نسبت فعالیت پتاسیم تعادلی در برخی خاک‌های تیمار شده با افزایش و در برخی دیگر با کاهش نسبت به شاهد همراه بود. بیشترین و کمترین مقدار این پارامتر به ترتیب در تیمارهای  $1\% \text{ Ca-Z}$  و  $2\% \text{ Na-B} + 0.5\% \text{ HA}$  به دست آمد (جدول ۳). پارامتر  $\text{AR}_e^{\text{K}}$ ، شدت پتاسیم محلول در شرایط تعادل که جذب و دفع پتاسیم در مکان‌های تبادلی رخ نمی‌دهد را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، تیمار  $1\% \text{ Ca-Z}$  در زمان برقراری تعادل بین فازهای محلول و تبادلی می‌تواند بیشترین مقدار پتاسیم محلول را در اختیار گیاه قرار دهد. به طور کلی، مقدار این پارامتر در تیمارهای حاوی اصلاح‌کننده‌های سدیمی نسبت به تیمارهای حاوی اصلاح‌کننده‌های کلسیمی کاهش پیدا کرد. این می‌تواند به دلیل سهولت بیشتر جایگزینی سدیم با پتاسیم نسبت به جایگزینی کلسیم با پتاسیم و در نتیجه، جذب بیشتر پتاسیم در فاز تبادلی و کاهش آن در فاز محلول تیمارهای حاوی اصلاح‌کننده‌های سدیمی باشد.



جدول ۲. ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های شاهد و تیمار شده با اصلاح کننده‌های معدنی با و بدون اسید هیومیک

CEC	Ex. Na	Ex. Mg	Ex. Ca	Ex. K	پتاسیم محلول mmol L <sup>-1</sup>	EC dS m <sup>-1</sup>	pH	تیمارها
cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>								
۱۵/۰	۰/۲۲	۱/۹	۱۲/۴	۰/۴۹	۰/۱۴	۰/۲۹	۷/۱۸	شاهد
k	g	a	j	a	a	a	abc	
۱۵/۸	۰/۱۳	۱/۶	۱۳/۶	۰/۵۰	۰/۱۲	۰/۳۵	۷/۲۰	1% Ca-B
jk	g	a	hij	a	b	a	abc	
۱۸/۳	۰/۲۰	۱/۸	۱۵/۸	۰/۵۳	۰/۱۱	۰/۳۱	۷/۱۶	1% Ca-B + 0.5% HA
def	g	a	b-d	a	bc	a	bc	
۱۶/۸	۰/۱۸	۱/۴	۱۴/۷	۰/۴۹	۰/۱۲	۰/۳۹	۷/۲۱	2% Ca-B
g-j	g	a	e-h	a	b	a	abc	
۱۹/۴	۰/۲۲	۲/۰	۱۶/۶	۰/۵۶	۰/۱۱	۰/۳۶	۷/۱۸	2% Ca-B + 0.5% HA
cd	g	a	b	a	bc	a	abc	
۱۶/۰	۱/۱۳	۱/۸	۱۲/۵	۰/۵۳	۰/۱۲	۰/۳۶	۷/۲۴	1% Na-B
ijk	f	a	j	a	b	a	abc	
۱۸/۲	۱/۲۰	۲/۰	۱۴/۴	۰/۵۷	۰/۱۱	۰/۳۳	۷/۲۰	1% Na-B + 0.5% HA
def	f	a	fgh	a	bc	a	abc	
۱۷/۰	۱/۸۳	۱/۹	۱۲/۸	۰/۵۰	۰/۱۱	۰/۳۸	۷/۳۰	2% Na-B
ghi	e	a	j	a	bc	a	abc	
۱۹/۳	۱/۹۷	۲/۱	۱۴/۷	۰/۵۳	۰/۱۰	۰/۳۵	۷/۲۵	2% Na-B + 0.5% HA
cd	de	a	e-h	a	cd	a	abc	
۱۶/۱	۰/۱۴	۱/۸	۱۳/۶	۰/۵۳	۰/۱۲	۰/۳۴	۷/۱۸	1% Ca-V
ijk	g	a	hij	a	b	a	abc	
۱۸/۶	۰/۱۸	۱/۸	۱۶/۱	۰/۵۶	۰/۱۰	۰/۳۰	۷/۱۵	1% Ca-V + 0.5% HA
de	g	a	bcd	a	cd	a	c	
۱۷/۳	۰/۱۷	۱/۵	۱۵/۱	۰/۵۴	۰/۱۰	۰/۳۷	۷/۲۰	2% Ca-V
fgh	g	a	d-g	a	cd	a	abc	
۱۹/۸	۰/۲۱	۲/۲	۱۶/۸	۰/۵۶	۰/۰۹	۰/۳۵	۷/۱۸	2% Ca-V + 0.5% HA
c	g	a	ab	a	de	a	abc	
۱۶/۳	۱/۱۳	۱/۹	۱۲/۷	۰/۵۷	۰/۰۹	۰/۳۵	۷/۲۵	1% Na-V
hij	f	a	j	a	de	a	abc	
۱۸/۴	۱/۱۶	۲/۰	۱۴/۶	۰/۶۰	۰/۰۹	۰/۳۱	۷/۲۱	1% Na-V + 0.5% HA
def	f	a	fgh	a	de	a	abc	
۱۷/۶	۲/۰۲	۲/۰	۱۳/۰	۰/۵۶	۰/۰۹	۰/۳۶	۷/۳۳	2% Na-V
efg	cd	a	ij	a	de	a	a	
۲۰/۰	۲/۱۷	۲/۲	۱۵/۰	۰/۶۰	۰/۰۸	۰/۳۴	۷/۲۵	2% Na-V + 0.5% HA
bc	bc	a	d-g	a	ef	a	abc	
۱۶/۵	۰/۱۶	۱/۸	۱۴/۰	۰/۵۳	۰/۰۸	۰/۳۵	۷/۱۸	1% Ca-Z
g-j	g	a	ghi	a	ef	a	abc	
۱۹/۲	۰/۲۶	۱/۹	۱۶/۴	۰/۶۰	۰/۱۰	۰/۳۰	۷/۱۵	1% Ca-Z + 0.5% HA
cd	g	a	bc	a	cd	a	c	
۱۸/۳	۰/۱۸	۱/۶	۱۶/۰	۰/۵۰	۰/۰۸	۰/۳۶	۷/۱۸	2% Ca-Z
def	g	a	bcd	a	ef	a	abc	
۲۱/۰	۰/۲۳	۲/۴	۱۷/۸	۰/۵۶	۰/۰۹	۰/۳۴	۷/۱۶	2% Ca-Z + 0.5% HA
ab	g	a	a	a	de	a	bc	
۱۶/۷	۱/۳۱	۱/۹	۱۳/۰	۰/۵۳	۰/۰۹	۰/۳۵	۷/۳۲	1% Na-Z
g-j	f	a	ij	a	de	a	ab	
۱۹/۲	۱/۳۱	۲/۰	۱۵/۴	۰/۵۲	۰/۰۸	۰/۳۰	۷/۲۹	1% Na-Z + 0.5% HA
cd	f	a	c-f	a	ef	a	abc	
۱۸/۴	۲/۲۶	۲/۱	۱۳/۵	۰/۵۶	۰/۰۸	۰/۳۷	۷/۳۴	2% Na-Z
def	ab	a	hij	a	ef	a	a	
۲۱/۲	۲/۳۸	۲/۳	۱۶/۰	۰/۵۵	۰/۰۷	۰/۳۳	۷/۳۰	2% Na-Z + 0.5% HA
a	a	a	bcd	a	f	a	abc	

حروف نامشابه در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن ( $p \leq 0.05$ ) هستند

EC: هدایت الکتریکی، Ex. Na و Ex Mg: به ترتیب پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم تبادل، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی



جدول ۳. پارامترهای رابطه Q/I در خاک‌های شاهد و تیمار شده با اصلاح کننده‌های معدنی با و بدون اسید هیومیک

$K_G$ (mol L <sup>-1</sup> ) <sup>-1/2</sup>	$-\Delta G^0$ cal mol <sup>-1</sup>	$K_L$	$K_X$ cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	$K^0$	$PBC^K$ (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) (mol L <sup>-1</sup> ) <sup>-1/2</sup>	$AR_e^K$ $\times 10^{-3}$ (mol L <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>	تیمارها
۴/۸۹	۳۴۲۵	./۲۳	./۰۹	./۱۴	۷۳/۴	۳/۰۸	شاهد
h	h	fg	b-e	g	p	k	
۳/۷۶	۳۲۵۴	./۲۴	./۰۷	./۱۷	۵۹/۴	۴/۱۱	1% Ca-B
l	o	efg	cde	efg	t	d	
۴/۲۲	۳۳۰۰	./۲۹	./۱۰	./۱۹	۷۷/۳	۳/۸۰	1% Ca-B + 0.5% HA
i	m	b-f	a-d	c-g	o	f	
۴/۱۱	۳۲۸۶	./۲۷	./۰۸	./۱۹	۶۹/۱	۳/۸۹	2% Ca-B
ijk	n	c-g	b-e	c-g	q	e	
۵/۲۲	۳۴۳۴	./۳۱	./۱۲	./۱۹	۱۰۱/۲	۳/۰۳	2% Ca-B + 0.5% HA
fg	h	bcd	ab	c-g	i	k	
۴/۹۳	۳۳۱۳	./۲۹	./۰۹	./۲۰	۷۸/۸	۳/۷۲	1% Na-B
h	lm	b-f	b-e	b-f	n	g	
۶/۴۴	۳۶۴۶	./۲۵	./۰۸	./۱۷	۱۱۷/۲	۲/۱۲	1% Na-B + 0.5% HA
c	d	d-g	b-e	efg	f	o	
۵/۳۴	۳۳۱۹	./۳۳	./۱۱	./۲۲	۹۰/۸	۳/۶۸	2% Na-B
efg	l	bc	abc	a-e	l	g	
۷/۱۳	۳۷۹۸	./۲۳	./۰۵	./۱۸	۱۳۷/۶	۱/۶۴	2% Na-B + 0.5% HA
b	a	fg	e	d-g	c	q	
۳/۸۳	۳۲۲۴	./۲۷	./۰۸	./۱۹	۶۱/۷	۴/۳۲	1% Ca-V
kl	p	c-g	b-e	c-g	s	c	
۴/۸۴	۳۳۸۹	./۲۹	./۱۰	./۱۹	۰/۹۰	۳/۲۷	1% Ca-V + 0.5% HA
h	j	b-f	a-d	c-g	l	i	
۴/۲۱	۳۲۲۸	./۳۱	./۰۷	./۲۴	۷۲/۹	۴/۲۹	2% Ca-V
i	p	bcd	cde	abc	p	c	
۵/۴۴	۳۴۶۷	./۳۱	./۰۹	./۲۲	۱۰۷/۷	۲/۸۷	2% Ca-V + 0.5% HA
ef	g	bcd	b-e	a-e	h	l	
۵/۳۱	۳۵۴۴	./۲۲	./۰۷	./۱۵	۸۶/۶	۲/۵۲	1% Na-V
efg	f	g	cde	fg	m	m	
۶/۵۱	۳۶۰۰	./۲۷	./۰۹	./۱۸	۱۱۹/۷	۲/۲۹	1% Na-V + 0.5% HA
c	e	c-g	b-e	d-g	e	n	
۵/۵۶	۳۳۴۲	./۳۵	./۱۲	./۲۳	۹۷/۹	۳/۵۴	2% Na-V
e	k	ab	ab	a-d	j	h	
۷/۱۵	۳۷۱۷	./۲۷	./۰۶	./۲۱	۱۴۲/۹	۱/۸۸	2% Na-V + 0.5% HA
b	b	c-g	de	a-e	b	p	
۳/۹۱	۳۱۵۰	./۳۲	./۱۰	./۲۲	۶۴/۵	۴/۹۰	1% Ca-Z
ijkl	r	bc	a-d	a-e	r	a	
۴/۸۹	۳۴۰۰	./۳۰	./۱۰	./۲۰	۹۳/۹	۳/۲۱	1% Ca-Z + 0.5% HA
h	ij	b-e	a-d	b-f	k	ij	
۴/۱۶	۳۱۸۶	./۳۵	./۱۲	./۲۳	۷۶/۲	۴/۶۱	2% Ca-Z
ij	q	ab	ab	a-d	o	b	
۵/۳۸	۳۴۳۸	./۳۴	./۱۰	./۲۴	۱۱۳/۰	۳/۰۱	2% Ca-Z + 0.5% HA
efg	h	b	a-d	abc	g	k	
۵/۱۳	۳۲۵۵	./۳۵	./۱۱	./۲۴	۸۵/۷	۴/۱۰	1% Na-Z
gh	o	ab	abc	abc	m	d	
۶/۴۵	۳۴۰۴	./۴۰	./۱۴	./۲۶	۱۲۳/۹	۳/۱۹	1% Na-Z + 0.5% HA
c	i	a	a	a	d	j	
۶/۱۰	۳۴۲۷	./۳۵	./۱۱	./۲۴	۱۱۲/۳	۳/۰۷	2% Na-Z
d	h	ab	abc	abc	g	k	
۸/۲۱	۳۶۹۸	./۳۴	./۰۹	./۲۵	۱۷۴/۱	۱/۹۴	2% Na-Z + 0.5% HA
a	c	b	b-e	ab	a	p	

حروف نامشابه در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن ( $p \leq 0.05$ ) هستند

$AR_e^K$ : نسبت فعالیت پتاسیم در حالت تعادل،  $PBC^K$ : ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم،  $K^0$ : پتاسیم جذب شده در مکان‌های غیر اختصاصی،  $K_X$ : پتاسیم جذب شده در مکان

های اختصاصی،  $K_L$ : پتاسیم فراهم،  $-\Delta G^0$ : انرژی آزاد تبادلی،  $K_G$ : ضریب انتخاب‌پذیری گاپون

افزودن اسید هیومیک موجب کاهش پارامتر  $AR_e^K$  شد که می‌تواند به دلیل افزایش CEC و افزایش جذب پتاسیم در فاز جامد باشد. هرچه مقدار این پارامتر در خاک بیشتر باشد، بیانگر دسترسی سریع پتاسیم برای گیاه است (Beckett, 1964). باید توجه داشت که این دسترسی سریع اگر با ظرفیت بافری بالای پتاسیم همراه نباشد، تنها در یک بازه زمانی کوتاه می‌تواند برای تأمین پتاسیم گیاه مؤثر و مفید واقع شود. ون شاونبرگ و شوفلن (van Schouwenburg & Schuffelen, 1963) بیان کردند اگر  $AR_e^K$  کمتر از  $0.001 \text{ (mol L}^{-1}\text{)}^{1/2}$  باشد، پتاسیم عمدتاً در مکان‌های لبه‌ای و گوه‌ای، اگر بیشتر از  $0.01$  باشد، عمدتاً در مکان‌های سطحی و اگر بین  $0.01$  تا  $0.001$  باشد، هم در مکان‌های سطحی و هم در مکان‌های لبه‌ای و گوه‌ای کانی‌های رسی جذب شده است. صمدی (Samadi, 2012) با مقایسه پارامترهای Q/I در ۵ خاک تحت کشت و ۵ خاک بکر، دامنه‌های  $0.001-0.013$  و  $0.0001-0.036$  و  $0.0018-0.036$   $(\text{mol L}^{-1})^{1/2}$  را به ترتیب برای  $AR_e^K$  در خاک‌های کشت شده و بکر گزارش نمود. پاندا و پاترا (Panda & Patra, 2018) با مطالعه رابطه کمیّت-شدت پتاسیم در ۱۲ خاک ساحلی در هند نشان دادند که پارامتر  $AR_e^K$  در دامنه  $10^{-3} \times 0.09-7/5$  با میانگین  $10^{-3} \times 4/2$   $(\text{mol L}^{-1})^{1/2}$  قرار داشت. ظرفیت تبادل کاتیونی این خاک‌ها بین  $12/3$  تا  $21/4$  سانتی‌مول بار در کیلوگرم متغیر بود. دامنه  $10^{-3} \times 1/0.2-3/28$   $(\text{mol L}^{-1})^{1/2}$  برای پارامتر  $AR_e^K$  توسط رانی و همکاران (Rani et al., 2023) گزارش شده است و کمترین مقدار، مربوط به خاکی بود که تحت خاکورزی رایج قرار داشت. نتایج آن‌ها نشان داد که برگرداندن بقایای محصول به خاک در سیستم کشاورزی پایدار موجب افزایش این پارامتر شد. ضرایب همبستگی بین پارامترهای Q/I (جدول ۴) نشان داد که همبستگی منفی و معنی‌داری بین  $AR_e^K$  و  $PBC^K$  و CEC وجود داشت. به عبارت دیگر، با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، جذب پتاسیم در فاز تبدالی (فاکتور کمیّت) افزایش و فعالیت پتاسیم در فاز محلول (فاکتور شدت) کاهش یافت. صمدی (Samadi, 2012) همبستگی منفی و معنی‌دار بین  $PBC^K$  و  $AR_e^K$  را گزارش و بیان کرد خاک‌های با مقادیر  $PBC^K$  بالا دارای  $AR_e^K$  پایین اما پایدارتری نسبت به خاک‌های با  $PBC^K$  پایین‌تر بودند و پتاسیم محلول از نوسان کمتری برخوردار بود و بهتر بافر شد. در یک مطالعه، روابط Q/I در ۶۳ نمونه خاک که با فواصل مختلف از معادن میکا در هند جمع‌آوری شده بودند، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار  $AR_e^K$  در دامنه  $10^{-4} \times 1/4-3/2$   $(\text{mol L}^{-1})^{1/2}$  قرار داشت. همچنین، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین  $AR_e^K$  و  $K^0$  مشاهده شد، در حالی که همبستگی منفی و معنی‌داری بین  $AR_e^K$  و  $K_x$  و  $PBC^K$  وجود داشت (Gosh et al., 2023).

#### ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم

نتیجه تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارها بر پارامتر ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم معنی‌دار بود ( $p \leq 0.01$ ). این پارامتر در دامنه  $174/1-59/4$   $(\text{mol L}^{-1})^{-1/2}$   $(\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1})$  متغیر بود و بیشترین و کمترین مقدار به ترتیب در تیمارهای  $1\% \text{ Ca-Z} + 2\% \text{ Na-Z} + 0.5\% \text{ HA}$  و  $1\% \text{ Ca}$  به دست آمد (جدول ۳). به عبارت دیگر، با افزودن کود پتاسیم (آزمایش Q/I)، بیشترین مقدار جذب پتاسیم در فاز تبدالی تیمار  $2\% \text{ Na-Z} + 0.5\% \text{ HA}$  رخ داد. مقدار پارامتر  $PBC^K$  در تیمارهای  $1\% \text{ Ca-B}$ ،  $2\% \text{ Ca-B}$ ،  $1\% \text{ Ca-V}$  و  $1\% \text{ Ca-Z}$  به طور معنی‌داری نسبت به شاهد کاهش یافت که ناشی از کاهش نسبت پتاسیم جذب شده به پتاسیم فاز محلول در این تیمارها بود. به عبارت دیگر، این تیمارها قدرت کمتری نسبت به خاک شاهد در تنظیم شدت پتاسیم به هنگام تخلیه پتاسیم محلول دارند. بنابراین، می‌توانند برای تأمین سریع پتاسیم برای گیاه سودمند باشند، اما در نگهداری و تأمین پایدار آن، ضعیف‌تر از خاک تیمار نشده عمل می‌کنند. عباسلو و ابطحی (۲۰۰۸) با مطالعه پارامترهای رابطه کمیّت-شدت پتاسیم در برخی از خاک‌های ایران، مقدار  $PBC^K$  را در دامنه  $100/6-31/1$  به دست آوردند. مقدار  $PBC^K$  در دامنه  $48$  تا  $150$  برای خاک‌های کشت شده و  $33$  تا  $143$  برای خاک‌های بکر شمال غرب ایران توسط صمدی (Samadi, 2012) گزارش شده است. پاندا و پاترا (Panda & Patra, 2018)، مقدار  $PBC^K$  در خاک‌های تحت مطالعه خود را در دامنه  $85/7-16/2$  گزارش کردند. بیلایس و بارابیانیس (Bilias & Barbayannis, 2019)، رابطه کمیّت-شدت پتاسیم را در ۲۰ خاک مختلف در شمال یونان مورد بررسی قرار دادند و دامنه  $203/2-24/0$  را برای  $PBC^K$  گزارش نمودند. هرچه مقدار  $PBC^K$  در خاک بیشتر باشد، نشان دهنده افزایش قدرت خاک برای تأمین پتاسیم مورد نیاز گیاه در بازه زمانی طولانی‌تر است (عباسلو و ابطحی، ۲۰۰۸). افزایش این پارامتر در تیمار  $2\% \text{ Na-Z} + 0.5\% \text{ HA}$  می‌تواند به دلیل افزایش قابل توجه CEC خاک در اثر حضور زئولیت و اسید هیومیک باشد. جدول ۴ نیز همبستگی مثبت و معنی‌دار بین  $PBC^K$  و CEC را نشان می‌دهد. همچنین، امکان جذب پتاسیم توسط زئولیت سدیمی بیشتر از زئولیت کلسیمی است. صمدی (Samadi, 2006) نشان داد که  $PBC^K$  و CEC خاک‌های غرب ایران همبستگی بالایی با هم دارند. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین  $PBC^K$  و CEC توسط عباسلو و ابطحی (۲۰۰۸) نیز گزارش شده است. رضایی و همکاران (۱۳۹۰)، پارامترهای رابطه Q/I را در دو خاک مختلف مورد بررسی قرار دادند و مقادیر  $69/6$  و  $60/5$  را برای  $PBC^K$  به دست آوردند. با اضافه کردن ۲۰ تن در هکتار زئولیت به این خاک‌ها، مقدار این پارامتر به ترتیب به  $75/8$  و  $61/6$  افزایش پیدا کرد. ظرفیت تبادل کاتیونی زئولیت مورد



استفاده در آن مطالعه برابر ۷۴/۸ سانتی‌مول بار در کیلوگرم بود. صمدی (Samadi, 2012) نشان داد که بالاترین مقدار برای  $PBC^K$  مربوط به خاک‌هایی بود که بیشترین مقدار رس را داشتند، چون  $PBC^K$  در درجه اول به سطوح موجود برای تبادل یونی بستگی دارد. بانگرو و همکاران (Bangroo et al., 2021) با بررسی ایزوترم‌های پتاسیم بر اساس رابطه کمیت-شدت در ۱۰ خاک مختلف در کشمیر هند به این نتیجه دست یافتند که  $PBC^K$  با درصد رس خاک، به عنوان یک عامل کنترل‌کننده ویژگی‌های بافری، ارتباط دارد. آن‌ها همبستگی مثبت و معنی‌دار بین  $PBC^K$  و CEC را بیانگر آن دانستند که پتاسیم جذب شده در مکان‌های غیراختصاصی نقش مهمی در کنترل پویایی پتاسیم در خاک دارد.

جدول ۴. ضرایب همبستگی پیرسون بین پارامترهای رابطه Q/I

پارامترها	$AR_e^K$	$PBC^K$	$K^0$	$K_X$	$K_L$	$-\Delta G^0$	CEC	$K_G$
$AR_e^K$	۱							
$PBC^K$	$-0.841^{**}$	۱						
$K^0$	$-0.210$	$-0.310$	۱					
$K_X$	$-0.348$	$-0.054$	$0.514^{**}$	۱				
$K_L$	$-0.302$	$-0.188$	$-0.921^{**}$	$-0.808^{**}$	۱			
$-\Delta G^0$	$-0.988^{**}$	$0.852^{**}$	$-0.201$	$-0.417^*$	$-0.328$	۱		
CEC	$-0.564^{**}$	$0.797^{**}$	$0.469^*$	$0.126$	$0.380$	$0.561^{**}$	۱	
$K_G$	$-0.872^{**}$	$0.970^{**}$	$-0.207$	$-0.092$	$0.100$	$0.882^{**}$	$0.636^{**}$	۱

\* و \*\* به ترتیب بیانگر معنی‌دار بودن در سطوح ۵ و ۱ درصد هستند.

$AR_e^K$ : نسبت فعالیت پتاسیم در حالت تعادل،  $PBC^K$ : ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم،  $K^0$ : پتاسیم جذب شده در مکان‌های غیر اختصاصی،  $K_X$ : پتاسیم جذب شده در مکان‌های اختصاصی،  $K_L$ : پتاسیم جذب شده در مکان‌های غیر اختصاصی،  $-\Delta G^0$ : انرژی آزاد تبادل،  $K_G$ : ضریب انتخاب‌پذیری گاپون، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی

### پتاسیم فراهم و اجزای آن

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر تیمارها بر  $K^0$ ،  $K_X$  و  $K_L$  معنی‌دار بود ( $p \leq 0.01$ ). پارامتر  $K^0$  در دامنه  $0.26-0.14$ ، پارامتر  $K_X$  در دامنه  $0.14-0.05$  و پارامتر  $K_L$  در دامنه  $0.40-0.22$  سانتی‌مول بار در کیلوگرم متغیر بود. بیشترین مقدار هر سه پارامتر در تیمار ۱% Na-Z HA + 0.5% به دست آمد (جدول ۳). مقدار زیاد پتاسیم فراهم نشان دهنده دسترسی آسان پتاسیم برای گیاه است. پاندا و پاترا (Panda & Patra, 2018)، دامنه‌های  $0.29-0.08$ ،  $0.28-0.04$  و  $0.40-0.26$  سانتی‌مول بار در کیلوگرم را به ترتیب برای  $K^0$ ،  $K_X$  و  $K_L$  در خاک‌های تحت مطالعه خود گزارش کردند. مقادیر پارامترهای  $K^0$ ،  $K_X$  و  $K_L$  در خاک‌های کشاورزی اطراف معادن میکا در هند به ترتیب در دامنه‌های  $0.28-0.06$ ،  $0.38-0.16$  و  $0.58-0.22$  سانتی‌مول بار در کیلوگرم گزارش شده است (Gosh et al., 2023). مقدار پتاسیم فراهم در خاک‌ها به مقدار رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، پتاسیم غیر تبادلی و پتاسیم تبادلی بستگی دارد (Samadi, 2006). کلونیدهای رسی دارای جایگاه‌های ویژه فراوانی برای جذب پتاسیم هستند، اما پتاسیم در ابتدا از طریق پدیده تبادل آزاد می‌شود تا انحلال یا انتشار (Islam et al., 2017). سهم  $K^0$  در پتاسیم فراهم در تمام خاک‌های شاهد و تیمار شده بیشتر از  $K_X$  بود، به طوری که  $78/3-$  تا  $60/9$  درصد از پتاسیم فراهم را تشکیل داد. پاندا و پاترا (Panda & Patra, 2018)، مقدار مشارکت  $K^0$  در پتاسیم فراهم را بین  $22/8$  تا  $84/5$  درصد گزارش کردند. بر اساس نتایج مطالعه رانی و همکاران (Rani et al., 2023)،  $K^0$  و  $K_X$  به ترتیب  $45-19$  و  $81-55$  درصد از  $K_L$  را تشکیل دادند. از میان پارامترهای  $K^0$ ،  $K_X$  و  $K_L$ ، تنها پارامتر  $K^0$  همبستگی مثبت و معنی‌دار با CEC را نشان داد (جدول ۴). همبستگی مثبت و معنی‌دار بین  $K^0$  و CEC در مطالعه پاندا و پاترا (Panda & Patra, 2018) نیز گزارش شده است. نکته قابل توجه دیگر این است که مقدار پتاسیم فراهم که از رابطه Q/I به دست آمد (جدول ۳)، کمتر از مقدار پتاسیم تبادلی استخراج شده با استات آمونیوم ۱ مولار (جدول ۲) بود. این نشان می‌دهد که بخشی از پتاسیم تبادلی خاک در معرض واکنش تعادلی تبادل کاتیونی که توسط رابطه Q/I توصیف می‌شود، قرار نگرفته است (Subba Rao et al., 1984). این شرایط بیانگر آن است که خاک ظرفیت بالایی برای جذب پتاسیم دارد که می‌تواند ناشی از مقدار بالای رس و غالب بودن کانی ایلیت باشد (Jalali, 2006). با این حال، گزارش شده است که عصاره‌گیر استات آمونیوم در خاک‌های حاوی ایلیت، پتاسیم بیشتری نسبت به عصاره‌گیرهای دیگر استخراج می‌کند که به توانایی این عصاره‌گیر در استخراج بخشی از پتاسیم تثبیت شده (غیر تبادلی) مربوط می‌شود (Khan et al., 2014). صمدی (Samadi, 2012) نشان داد که مقدار پتاسیم فراهم به دست آمده از رابطه Q/I در خاک‌های کشت شده و بکر به ترتیب  $26$  و  $49$  درصد پتاسیم عصاره‌گیری شده با استات آمونیوم را تشکیل داد. بیلپاس و باربایانیس (Bilias & Barbayannis, 2019) با بررسی خاک‌هایی که رس غالب آن‌ها ایلیت بود،

دریافتند که پتاسیم عصاره‌گیری شده با سدیم تترافنیل بور نسبت به پتاسیم عصاره‌گیری شده با استات آمونیوم، همبستگی بهتری با پتاسیم فراهم به دست آمده از رابطه Q/I داشت.

### انرژی آزاد تبادل و ضریب انتخاب‌پذیری گاپون

تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارها بر  $\Delta G^0$  - معنی‌دار بود ( $p \leq 0.01$ ) و این پارامتر در دامنه ۳۷۹۸-۳۱۵۰ کالری در مول قرار داشت. بیشترین و کمترین مقدار به ترتیب مربوط به تیمارهای ۲% Na-B + 0.5% HA و 1% Ca-Z بود (جدول ۳). بر اساس معادله ۳، بین  $\Delta G^0$  و  $AR_e^K$  - ارتباط عکس وجود دارد. به عبارت دیگر، با افزایش  $\Delta G^0$  -، پتاسیم به مقدار بیشتری جذب فاز جامد می‌گردد و از شدت فعالیت پتاسیم در فاز محلول کاسته می‌شود. مقدار زیاد  $\Delta G^0$  - در ارتباط با مقدار کم  $AR_e^K$  - نشان دهنده ارتباط بسیار قوی بین فاز جامد و K در فاز محلول است (Rani et al., 2023). به طور کلی، انرژی آزاد تبادل پتاسیم در تیمارهای حاوی اصلاح‌کننده‌های سدیمی همراه با اسید هیومیک نسبت به سایر تیمارها بزرگتر (منفی‌تر) بود. بین پارامترهای  $\Delta G^0$  - و  $PBC^K$  - همبستگی مثبت و معنی‌دار وجود داشت (جدول ۴). بر اساس حد بحرانی پیشنهاد شده توسط مک‌لین (McLean, 1976)، اگر مقدار  $\Delta G^0$  - بزرگتر از ۳۵۰۰ کالری در مول باشد، بیانگر کمبود پتاسیم در خاک است و گیاه نسبت به مصرف کود پتاسیمی پاسخ می‌دهد. این شرایط می‌تواند ناشی از افزایش جذب و تثبیت پتاسیم در فاز جامد و یا تخلیه آن از خاک باشد. البته باید توجه داشت که ذخیره مناسب پتاسیم در فاز جامد می‌تواند در بلند مدت تأمین‌کننده پتاسیم مورد نیاز گیاه باشد. مقادیر  $\Delta G^0$  - بین ۲۰۰۰ تا ۳۵۰۰ بیانگر مقدار کافی پتاسیم در خاک است و گیاه احتمالاً پاسخی نسبت به مصرف کود پتاسیمی نمی‌دهد و مقادیر کمتر از ۲۰۰۰ نشان دهنده مقدار زیاد پتاسیم در خاک می‌باشد (McLean, 1976). به نظر می‌رسد برای ارائه این حدود بحرانی، نقش پتاسیم محلول در تأمین پتاسیم گیاه بیشتر از پتاسیم تبادل‌دلی در نظر گرفته شده و یا اینکه فراهمی سریع، بیشتر از فراهمی پایدار مورد توجه بوده است. صمدی (Samadi, 2012) نشان داد که  $\Delta G^0$  - در خاک‌های کشت شده و بکر به ترتیب در دامنه‌های ۱۹۱۲ تا ۶۴۵۳ و ۱۶۷۳ تا ۵۷۳۶ کالری در مول متغیر بود. بیلیاس و باربایانیس (Bilias & Barbayannis, 2019) مقدار  $\Delta G^0$  - را بین ۱۷۸۸ و ۴۲۲۶ کالری در مول گزارش کردند.

بر اساس نتیجه تجزیه واریانس، اثر تیمارها بر ضریب انتخاب‌پذیری گاپون معنی‌دار بود ( $p \leq 0.01$ ). این پارامتر در دامنه ۳/۷۶-۸/۲۱  $(\text{mol L}^{-1})^{-1/2}$  قرار داشت و بیشترین و کمترین مقدار به ترتیب مربوط به تیمارهای ۲% Na-Z + 0.5% HA و 1% Ca-B بود (جدول ۳). ضریب  $K_G$  با  $PBC^K$  و CEC همبستگی مثبت و معنی‌دار و با  $AR_e^K$  همبستگی منفی و معنی‌دار داشت (جدول ۴). صمدی (Samadi, 2012) مقادیر  $K_G$  در خاک‌های کشت شده و بکر را به ترتیب در دامنه‌های ۲/۰-۵/۵ و ۱/۷-۵/۱  $(\text{mol L}^{-1})^{-1/2}$  گزارش کرد. هرچه تعداد مکان‌های جذب پتاسیم افزایش پیدا کند، مقدار  $K_G$  نیز بزرگتر می‌شود. ضریب گاپون نشان‌دهنده قدرت ماندگاری پتاسیم در مکان‌های سطحی و گوه‌ای رس‌های خاک است (Sarkar et al., 2013). مکان‌های سطحی کانی‌های رسی دارای مقادیر  $K_G$  کمتری در مقایسه با مکان‌های گوه‌ای هستند که نشان‌دهنده اثربخشی کمتر آنها در نگهداشت یون‌های پتاسیم است. این به این دلیل است که مکان‌های سطحی دارای توزیع بار یکنواخت‌تر و پتانسیل سطحی ضعیف‌تری هستند که توانایی آنها را برای جذب و حفظ یون‌های پتاسیم کاهش می‌دهد (Blume et al., 2015). مقادیر بزرگتر  $K_G$  در مکان‌های گوه‌ای به توزیع نامنظم بار آنها نسبت داده می‌شود که به ایجاد مناطقی با پتانسیل سطحی بالا و جاذبه الکترواستاتیک قوی‌تر برای یون‌های پتاسیم منجر می‌گردد. علاوه بر این، مورفولوژی گوه‌ای شکل این مکان‌ها محیط محدود و بسته‌تری ایجاد می‌کند که ظرفیت آنها را برای حفظ یون‌های پتاسیم افزایش می‌دهد (Gosh et al., 2023).

### نتیجه‌گیری

کاربرد بنتونیت، ورمی‌کولیت و زئولیت اشباع شده با کلسیم و سدیم و اسید هیومیک به طور معنی‌داری پارامترهای رابطه کمیت-شدت پتاسیم را در خاک تحت تأثیر قرار داد. انرژی آزاد تبادل پتاسیم در تیمارهای حاوی اصلاح‌کننده‌های سدیمی همراه با اسید هیومیک نسبت به سایر تیمارها بزرگتر بود. زئولیت سدیمی به همراه اسید هیومیک، بیشترین تأثیر را در افزایش جذب پتاسیم (فاکتور کمیت)، ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم، ضریب انتخاب‌پذیری گاپون و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک داشت. بنابراین، می‌تواند گزینه مناسبی برای تأمین بلندمدت و پایدار پتاسیم در خاک باشد. در مقابل، برخی اصلاح‌کننده‌های کلسیمی بدون حضور اسید هیومیک موجب کاهش ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم نسبت به شاهد شدند. در نتیجه، قدرت کمتری در تنظیم شدت پتاسیم به هنگام تخلیه پتاسیم محلول دارند و می‌توانند برای تأمین سریع پتاسیم برای گیاه سودمند باشند. پیشنهاد می‌شود که از نتایج این مطالعه برای خاک‌های سبک بافت نیز استفاده شود که به دلیل پایین بودن ظرفیت بافری بالقوه، دچار کمبود پتاسیم هستند و نیاز به کوددهی مکرر دارند.



## "هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

### منابع

- رضایی، میثم؛ موحدی نائینی، سید علیرضا و خرمالی، فرهاد (۱۳۹۰). منحنی کمیت-شدت پتاسیم (Q/I) برای دو خاک و تأثیر زئولیت بر آن. *پژوهش‌های کاربردی زراعی*، ۲۴(۲)، ۲۷-۳۴.
- رنجبر، رحمت‌الله؛ سپهر، ابراهیم؛ صمدی، عباس؛ برین، محسن و دولتی، بهنام (۱۳۹۸). شکل‌های پتاسیم خاک و پارامترهای کمیت به شدت (Q/I) پتاسیم و همبستگی آن با برخی خصوصیات خاک در مناطق زیر کشت توتون شمال غرب ایران. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۶(۲)، ۱۹۵-۲۱۰.
- سمواتی، مهدی و اسکندری، بهاره (۱۳۹۲). همبستگی بین پارامترهای کمیت-شدت پتاسیم خاک (Q/I) با برخی از خصوصیات خاک در تعدادی از خاک‌های شهرستان بهار. *علوم آب و خاک*، ۱۷(۶۳)، ۲۰۳-۲۱۳.
- عبدی، صمد؛ تاج آبادی پور، احمد و حمیدپور، محسن (۱۳۹۷). شکل‌های شیمیایی و روابط کمیت-شدت (Q/I) پتاسیم در اراضی تحت کشت پسته مناطق رفسنجان و انار. *علوم و فناوری پسته*، ۳(۵)، ۲۲-۳۸.
- ملکوتی، محمد جعفر و همایی، مهدی (۱۳۸۳). حاصلخیزی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک "مشکلات و راه‌حل‌ها". چاپ دوم. تهران: انتشارات دانشگاه تربیت مدرس.
- موسی پور، مریم؛ فرقانی، اکبر و صبوری، عاطفه (۱۳۹۹). ارزیابی همبستگی ویژگی‌های خاک با پارامترهای منحنی (Q/I) پتاسیم در خاک‌های آهکی استان لرستان. *آب و خاک*، ۳۴(۲)، ۳۷۹-۳۹۱.

### REFERENCES

- Abdi, S., Tajabadi Pour, A., & Hamidpour, M. (2018). Chemical forms and quantity-intensity relationships of potassium in Rafsanjan and Anar lands under pistachio trees. *Pistachio Science and Technology*, 3(5), 22-38. (In Persian)
- Bangroo, S. A., Kimani, N. A., Bhat, M.A., Wani, J. A., Iqbal, A. M., Dar, Z. A., Mahdi, S. S., & Malik, A. (2021). Potassium isotherm portioning based on modified quantity-intensity relation and potassium buffering characterization of soils of north India. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 184(1), 112-122. <https://doi.org/10.1002/jpln.202000406>.
- Beckett, P. H. T. (1964). Studies on soil potassium: II. The 'immediate' Q/I relations of labile potassium in the soil. *Journal of Soil Science*, 15(1), 9-23. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1964.tb00240.x>.
- Beckett, P. H. T. (1972). Critical activity ratio. *Advances in Agronomy*, 24, 379-412. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60639-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60639-2).
- Bilias, F., & Barbayiannis, N. (2019). Potassium availability: An approach using thermodynamic parameters derived from quantity-intensity relationships. *Geoderma*, 338, 355-364. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.026>.
- Blume, H. -P., Brümmer, G. W., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B. -M. (2015). *Scheffer/Schachtschabel Soil Science*. Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30942-7>.
- Bower, C. A., Reitmeir, R. F., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, 73(4), 251-262. <https://doi.org/10.1097/00010694-195204000-00001>.
- Dumat, C., Quiquampoix, H., & Staunton, S. (2000). Adsorption of cesium by synthetic clay-organic matter complexes: effect of the nature of organic polymers. *Environmental Science and Technology*, 34(14), 2985-2989. <https://doi.org/10.1021/es990657o>.
- Evangelou, V. P., & Karathanasis, A. D. (1986). Evaluation of potassium quantity-intensity relationships by a computer model employing the Gapon equation. *Soil Science Society American Journal*, 50(1), 58-62. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000010011x>.
- Gee, G. W., & Bauder J. W. (1986). Particle-size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis, part 1: Physical and mineralogical methods* (pp. 383-411). Madison: American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>.
- Gosh, S., Banerjee, S., Mukherjee, A., & Bhattacharyya, P. (2023). Appraise potassium chemistry and distribution patterns in tailing soil, India: Through quantity-intensity relations and multi model statistical methods. *Chemosphere*, 335, 139184. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139184>.
- Hamed, M. H., & Abu Zeid Amin, A. E. (2017). Evaluation of potassium quantity-intensity in some soils of El-Dakhla Oasis, New Valley, Egypt. *Alexandria Science Exchange Journal*, 38(1), 112-119.



- <https://doi.org/10.21608/asejaiqjsae.2017.2367>.
- Harada Y., & Inoko A. (1975). Cation-exchange properties of soil organic matter. *Soil Science and Plant Nutrition*, 21(4), 361–369. <https://doi.org/10.1080/00380768.1975.10432651>.
- Islam, A., Karim, A. J. M. S., Solaiman, A. R. M., Islam, M. S., & Saleque, M. A. (2017). Eight-year long potassium fertilization effects on quantity/intensity relationship of soil potassium under double rice cropping. *Soil Tillage and Research*, 169, 99–117. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.02.002>.
- Jalai, M. (2006). Kinetics of non-exchangeable potassium release and availability in some calcareous soils of western Iran. *Geoderma*, 135, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.11.006>.
- Jones, J. B. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420025293>.
- Khan, S. A., Mulvaney, R. L., & Ellsworth, T. R. (2014). The potassium paradox: implications for soil fertility, crop production and human health. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 29(1), 3–27. <https://doi.org/10.1017/S1742170513000318>.
- Lalitha, M., & Dhakshinamoorthy, M. (2015). Quantity-intensity characteristics of potassium (K) in relation to potassium availability under different cropping systems in alluvial soils. *African Journal of Agricultural Research*, 10(19), 2097–2113. <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.8947>.
- Lin, J., Yanhui, Zh., & Zhiliang, Zh. (2011). Evaluation of sediment cropping with active barrier systems (ABS) using calcite/zeolite mixtures to simultaneously manage phosphorus and ammonium release. *Science of Total Environment*, 409(3), 638–646. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.10.031>.
- Loeppert, R. H. & Sparks, D. L. (1996). Carbonate and gypsum. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods* (pp. 437–475). Madison: Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c15>.
- Malakouti, M. J., & Homae, M. (2003). *Soil fertility of arid and semi arid regions: Difficulties and solutions*. Tehran: Tarbiat Modares University. (In Persian)
- Martin, H. W., & Sparks, D. L. (1985). On the behavior of non- exchangeable potassium in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 16(2), 133–162. <https://doi.org/10.1080/00103628509367593>.
- McLean, E. O. (1976). Exchangeable K levels for maximum crop yields on soils of different cation exchange capacities. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 7(9), 823–838. <https://doi.org/10.1080/00103627609366690>.
- Mosapour, M., Forghani, A., & Sabouri, A. (2020). Evaluating the correlation of soil characteristics with Potassium Q/I curve parameters in some calcareous soils of Lorestan province. *Journal of Water and Soil*, 34(2), 379–391. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20084757.1399.34.2.10.0>. (In Persian)
- Panda, R., & Patra, S. K. (2018). Quantity-intensity of potassium in representative coastal soils of eastern India. *Geoderma*, 332, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.014>.
- Rani, K., Datta, A., Jat, H. S., Choudhary, M., Sharma, P. C., & Jat, M. L. (2023). Assessing the availability of potassium and its quantity-intensity relations under long term conservation agriculture based cereal systems in North-West India. *Soil & Tillage Research*, 228, 105644. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105644>.
- Ranjbar, R., Sepehr, E., Samadi, A., Barin, M., & Dovlati, B. (2019). Soil potassium forms and quantity-intensity parameters of soil potassium and its correlation with some soil properties of tobacco-growing region in northwest of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(2), 195–210. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.15461.3070>. (In Persian)
- Rezaei, M., Movahedi Naeini, S. A. R., & Khormali, F. (2011). Potassium quantity-intensity (Q/I) curves for two soils as affected by zeolite addition. *Applied Field Crops Research*, 24(2), 27–34. (In Persian)
- Rowell, D. L. (1994). *Soil science: Methods and applications*. Oxfordshire: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315844855>.
- Samadi, A. (2006). Potassium exchange isotherms as a plant availability index in selected calcareous soils of western Azarbaijan province, Iran. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 30(3), 213–222.
- Samadi, A. (2012). Impact of continuous sugar beet cropping on potassium quantity-intensity parameters in calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition*, 35(8), 1154–1167. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.676128>.
- Samavati, M., & Eskandari, B. (2013). Potassium quantity-intensity ratio and selected properties of some soils in Bahar area. *Journal of Water and Soil Science*, 17(63), 203–213. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.24763594.1392.17.63.17.5>. (In Persian)
- Sarkar, G. K., Chattopadhyay, A. P., Sanyal, S. K. (2013). Release pattern of non-exchangeable potassium



- reserves in Alfisols, Inceptisols and Entisols of West Bengal, India. *Geoderma*, 207–208, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.029>.
- Sharma, V., Sharma, S., Arora, S., & Kumar, A. (2012). Quantity-intensity relationships of potassium in soils under some guava orchards on marginal lands. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(11), 1550–1562. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.675387>.
- Sparks, D. L., Singh, B., Siebecker, M. G. (2023). *Environmental Soil Chemistry*, 3<sup>rd</sup> edition, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2022-0-03090-7>.
- Strawn, D. G., Bohn, H. L., & O'Connor, G. A. (2020). *Soil chemistry*. Hoboken: Wiley-Blackwell.
- Subba Rao, A., Adinarayan, V., & Subba Rao, I. V. (1984). Quantity-intensity relationships of potassium in representative soils of Andhra Pradesh. *Journal of Indian Society of Soil Science*, 32(2), 240–243.
- Thomas, G. W. (1982). Exchangeable cations. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis, part 2: Chemical and microbiological properties* (pp. 159–165). Madison: American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c9>.
- van Schouwenburg, J.C., & Schuffelen, A.C. (1963). Potassium-exchange behavior of an illite. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 11(1), 13–22. <https://doi.org/10.18174/njas.v11i1.17567>.
- Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.
- Wang, F.L., & Huang, P.M. (2001). Effects of organic matter on the rate of potassium adsorption by soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 81(3), 325–330. <https://doi.org/10.4141/S00-069>.
- Wang, H. Y., Shen, Q. H., Zhou, J. M., Wang, J., Du C. W., & Chen, X. Q. (2011). Plants use alternative strategies to utilize non-exchangeable potassium in minerals. *Plant and Soil*, 343(1-2), 209–220. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0726-x>.
- Zhang, W. Z., Chen, X. Q., Zhou, J. M., Liu, D. H., Wang, H. Y., & Du, C. W. (2013). Influence of humic acid on interaction of ammonium and potassium ions on clay minerals. *Pedosphere*, 23(4), 493–502. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60042-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60042-9).