

Comparison of Potassium forms and Potassium Sorption Characteristics in Tobacco-Cultivated and Non-cultivated Soils in Northwest of Iran

RAHMATOLLAH RANJBAR^{1*}, EBRAHIM SEPEHR², ABBAS SAMADI³, MIRHASAN RASOULI SADAGHIANI⁴,
BEHNAM DOVLATI⁵, MOHSEN BARIN⁶

1. PhD Student, Soil Science Department, College of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
2. Associate Professor, Soil Science Department, College of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
3. Professor, Soil Science Department, College of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
4. Professor, Soil Science Department, College of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
5. Assistant Professor, Soil Science Department, College of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
6. Assistant Professor, Soil Science Department, College of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

(Received: Oct. 28, 2018- Revised: Dec. 15, 2018- Accepted: Dec. 17, 2018)

ABSTRACT

The present study was conducted to investigate the effect of cultivation on potassium forms and potassium adsorption characteristics behavior in tobacco-growing and adjacent virgin soils in Northwest of Iran. Soil potassium forms were determined in 29 tobacco-growing soils and in 29 adjacent virgin soils. Soil potassium quantity-intensity relations (Q/I) were constructed by equilibrating and shaking 2.5 g soil with 25 ml of 0.01 mM CaCl₂. The results indicated that the mean of exchangeable potassium (K_{ex}) and the initial equilibrium concentration of solution potassium (EKC) values in tobacco-growing soils were significantly ($p \leq 0.01$) lower than those in the adjacent virgin soils and decreased 28% and 27 %, respectively. Thus, in tobacco-growing soils and their adjacent virgin soils, the mean of K_{ex} were 197 and 273 mg kg⁻¹, and the mean of EKC were 7.9 and 10.8 mg L⁻¹, respectively. There was a significant correlation between solution potassium (K_{so}) and K_{ex} ($r=0.418^*$) as well as between K_{ex} and clay ($r= 0.577^{**}$) in tobacco-growing soils indicating depletion of K_{ex} in the studied soils. The mean of potassium activity ratio at equilibrium (AR_e^K) and the energy of exchange potassium (E_K) values in tobacco-growing soils were significantly ($p \leq 0.001$) lower than those in the adjacent virgin soils and decreased 36 and 11 %, respectively. In tobacco-growing soils and their adjacent virgin soils, the mean of AR_e^K were 0.004 and 0.0063 mol L⁻¹ and the mean of E_K were -3407 and -3055 cal mol⁻¹, respectively. Because of exchangeable potassium depletion in the studied soils, potassium fertilizer management is needed to be practiced for sustainable production of tobacco in Northwest of Iran.

Key words: Soil potassium form, Adsorption isotherms, Potassium depletion, Tobacco

*Corresponding Author's Email: ranjbarrahim14@gmail.com

مقایسه شکل‌های مختلف پتاسیم و رفتار جذب پتاسیم در خاک‌های زراعی و غیر زراعی منطقه زیرکشت توتون شمال غرب کشور

رحمت اله رنجبر^{۱*}، ابراهیم سپهر^۲، عباس صمدی^۳، میرحسن رسولی صدقیانی^۴، بهنام دولتی^۵، محسن برین^۶

۱. دانشجوی دکترای گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲. دانشیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳. استاد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۴. استاد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۵. استادیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۶. استادیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۹/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۹/۲۶)

چکیده

به منظور بررسی تأثیر کشت مستمر بر شکل‌های شیمیایی پتاسیم و رفتار جذب آن در خاک‌های زیرکشت توتون در منطقه شمال غرب ایران، شکل‌های پتاسیم خاک در ۲۹ نمونه خاک زراعی و ۲۹ نمونه خاک غیرزراعی هم‌جوار تعیین گردید و آزمایشات جذب به صورت پیمانه‌ای با ۲/۵ گرم خاک در قدرت یونی ۰/۰۱ مولار CaCl_2 انجام گرفت. نتایج نشان داد که با استمرار کشت، میانگین پتاسیم تبادلی و غلظت تعادلی پتاسیم محلول (EKC) در خاک‌های زراعی در مقایسه با مقدار آن‌ها در خاک‌های غیرزراعی هم‌جوار به‌طور معنی‌دار ($P \leq 0.01$) و به ترتیب حدود ۲۸ و ۲۷ درصد کاهش یافته به‌طوری‌که میانگین پتاسیم تبادلی در خاک‌های زراعی و غیرزراعی، به ترتیب ۱۹۷ و 273 mg kg^{-1} و میانگین EKC به ترتیب برابر ۷/۹ و 10.8 mg l^{-1} بود. با توجه به وجود همبستگی معنی‌دار بین پتاسیم تبادلی و درصد رس ($r = 0.577^{**}$) و همبستگی معنی‌دار بین پتاسیم تبادلی و پتاسیم محلول ($r = 0.418^*$) در خاک‌های زراعی و عدم معنی‌داری آن در خاک‌های غیرزراعی هم‌جوار، می‌توان استنباط کرد که مقداری از پتاسیم تبادلی در خاک‌های زراعی تخلیه شده است. با استمرار کشت، میانگین نسبت فعالیت پتاسیم در نقطه تعادل (AR_e^{K}) و انرژی آزاد تبادلی پتاسیم (E_K) در خاک‌های زراعی به ترتیب حدود ۳۶ و ۱۱ درصد و به‌طور معنی‌دار ($P \leq 0.01$) کاهش یافت که میانگین AR_e^{K} در خاک‌های زراعی و غیرزراعی، به ترتیب ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۶۳ mol L^{-1} و میانگین E_K به ترتیب ۳۴۰۷- و $3055 \text{ cal mol}^{-1}$ بود. به دلیل تخلیه نسبی پتاسیم تبادلی در خاک‌های زراعی مورد مطالعه، اعمال مدیریت کودهای پتاسیمی جهت تولید پایدار توتون در منطقه شمال غرب ایران نیاز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شکل پتاسیم خاک، ایزوترم جذب، تخلیه پتاسیم، توتون

مقدمه*

پتاسیمی گیاه نقش مهمی دارند (Fathi et al., 2014). غلظت پتاسیم در محلول خاک به جذب آن توسط گیاه و میزان آزادسازی آن از کانی‌های خاک بستگی دارد که غلظت تعادلی پتاسیم جذب شده به عنوان بهترین شاخص حاصلخیزی است (Ali et al., 2013). در یک آستانه غلظت پتاسیم در محلول خاک، آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی از کانی‌های رسی خاک متوقف می‌شود که این آستانه به نوع کانی‌های رسی غالب در خاک و حضور یون‌های کلسیم و سدیم بستگی دارد (Wang et al., 2011). بر اساس مطالعات، دو شکل پتاسیم تثبیت شده و ساختاری نیز در تأمین پتاسیم مورد نیاز گیاه نقش دارد ولی به دلیل پیچیدگی این روابط، پیش‌بینی پتاسیم قابل جذب برای گیاهان با استفاده از این رابطه‌ها مشکل است. بنابراین

پتاسیم یکی از عناصر مهم در تغذیه گیاهی است. پتاسیم در خاک شامل شکل‌های محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختمانی می‌باشد (Martin and Sparks, 1985). تمام شکل‌های شیمیایی پتاسیم با درصد رس و سیلت ارتباط مستقیم دارد چرا که رس جایگاه اصلی نگهداری پتاسیم در خاک است (Sharma et al., 2006). خاک‌های حاوی مقدار زیاد رس‌های ورمی‌کولیت و میکا، مقدار زیادی پتاسیم غیرتبادلی دارند (Martin and Sparks, 1985). علاوه بر پتاسیم محلول، سایر شکل‌های پتاسیم از جمله تبادلی و غیرتبادلی و کودهای حاوی پتاسیم نیز در تأمین نیاز

* نویسنده مسئول: ranjbarrahim14@gmail.com

و غیرزراعی هم‌جوار به ترتیب ۱/۴ و ۲ درصد بود (Samadi *et al.*, 2008). برخی محققان نشان دادند که مقدار AR_e^K و EKC در خاک‌های ΔK^0 غیرزراعی مجاور کاهش معنی‌داری داشتند (Peyghami *et al.*, 2015). تحقیقات رابطه معنی‌دار بین ظرفیت بافری پتاسیم (PBC^K) و درصد رس، درصد ماده آلی و پتاسیم تبدلی نشان دادند (Bostani and Savaghebi, 2005). خاک‌های با PBC^K کم، دارای AR_e^K بیشتری هستند و PBC^K پایین خاک‌ها را به باز شدن لایه‌های میکا نسبت دادند (Akhtar and Dixon, 2009).

کشت عمده توتون در شمال‌غرب کشور، در کردستان و آذربایجان غربی واقع است و رقم غالب کشت، بارلی بوده که یک رقم پرنیاز نسبت به پتاسیم می‌باشد (Richmond *et al.*, 2016). غلظت پتاسیم و کیفیت توتون در مناطق کشت توتون به‌خصوص شمال‌غرب ایران در مقایسه با توتون باکیفیت وارداتی، پایین‌تر است (Gholizadeh *et al.*, 2016). به نظر می‌رسد کشت مداوم توتون و مصرف نامتعادل کود پتاسیمی و بدون توجه به آزمون خاک در مزارع توتون سبب تخلیه پتاسیم قابل‌استفاده خاک در منطقه شده و در نتیجه سبب کاهش غلظت پتاسیم برگ و کاهش کیفیت آن شده است. با توجه به اهمیت پتاسیم در عملکرد کمی و کیفی توتون و مشکلات به وجود آمده در به‌سوزی آن، تاکنون شکل‌های مختلف پتاسیم و رفتار جذب پتاسیم در خاک‌های زیرکشت توتون با خاک‌های غیرزراعی هم‌جوار در منطقه شمال‌غرب ایران مورد بررسی و مقایسه واقع نشده است. در این تحقیق سعی شده است شکل‌های مختلف پتاسیم و پارامترهای کمیت به شدت جذب پتاسیم در برخی از خاک‌های زیرکشت توتون و خاک‌های غیرزراعی هم‌جوار در منطقه شمال‌غرب ایران مورد مقایسه و بررسی قرار گیرد تا با درک وضعیت پتاسیم در خاک و بررسی ارتباط آن‌ها با برخی از خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک بتوان مدیریت کودی پتاسیم و کیفیت برگ توتون منطقه را بهبود بخشید.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: کشت عمده توتون شمال‌غرب کشور در شمال استان آذربایجان غربی و غرب استان کردستان در محدوده جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۴/۷ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۵۳/۱ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و ۵۶/۹ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۱۸/۷ دقیقه طول شرقی واقع شده است. بر این اساس نمونه‌برداری خاک از این نواحی صورت گرفت. میانگین ۱۰ ساله

عصاره‌گیری با محلول‌های نمکی مانند محلول استات آمونیوم به عنوان روش جایگزین به منظور ارزیابی وضعیت پتاسیم خاک‌ها و توصیه کودی پیشنهاد شده‌اند که در این روش خصوصیات خاک مانند درصد و نوع رس‌های غالب خاک در نظر گرفته نمی‌شود. قابلیت استفاده پتاسیم برای گیاهان به شدت (غلظت پتاسیم محلول)، ظرفیت (کمیت) و سرعت تجدید آن در خاک بستگی دارد که کمیت همان مقدار کل پتاسیم قابل استفاده در فاز جامد خاک است که وارد محلول خاک می‌شود و سرعت تجدید، تشریح کننده سرعت انتقال پتاسیم از فاکتور کمیت به فاکتور شدت است (Barber, 1984).

در رابطه کمیت-شدت (Q/I) پتاسیم در خاک، تغییر غلظت پتاسیم محلول خاک (عامل شدت) در اثر تغییر غلظت پتاسیم در فاز تبدلی (عامل کمیت) ارزیابی می‌شود. روابط Q/I می‌تواند درک فوری از وضعیت پتاسیم خاک فراهم کند بنابراین، نسبت به روش عصاره‌گیری پتاسیم با استات آمونیوم، اطلاعات بیشتری از وضعیت حاصلخیزی خاک ارائه می‌دهد و پارامترهایی از جمله ظرفیت بافری بالقوه پتاسیم^۱ (PBC^K)، فعالیت نسبی پتاسیم در نقطه تعادل^۲ (AR_e^K) و پتاسیم جذب شده در سطوح^۳ (ΔK^0) محاسبه می‌شوند (Evangelou *et al.*, 1994). بنابراین، روابط Q/I و پارامترهای آن در ارزیابی وضعیت پتاسیم خاک و انجام توصیه کودی مهم هستند. با این حال، روش آزمایش پیچیده بوده و نیاز به دانش، تجربه و هزینه زیادی دارد. لذا محققان برای رفع این مشکل، سعی دارند تا رابطه بین Q/I و خصوصیات مختلف خاک را مشخص نمایند تا از این طریق بتوانند دینامیک پتاسیم را در خاک بهتر ارزیابی کنند (Beckett, 1964). ظرفیت بافری پتاسیم نشان‌دهنده توانایی بالقوه خاک برای حفظ شدت مناسبی از پتاسیم در محلول خاک است. برخی محققان توصیه کودی دقیق‌تری را بر اساس پارامترهای مذکور انجام دادند. با بررسی رابطه بین شاخص‌های گیاهی گوجه‌فرنگی و پارامترهای Q/I، همبستگی معنی‌دار و مثبتی بین پتاسیم قابل استفاده و پارامتر پتاسیم آسان قابل تبادل به دست آمده است (Samadi, 2006). در سال ۲۰۰۸، Dowlati *et al.* نشان دادند که بین PBC^K و CEC رابطه خطی معنی‌داری وجود دارد. در یک تحقیق، پتاسیم محلول خاک‌های زارعی کمتر از خاک‌های غیرزراعی هم‌جوار بود و نسبت پتاسیم محلول به پتاسیم غیرتبدلی در خاک‌های زراعی

1. Potential buffering capacity
2. Equilibrium activity ratio
3. Labile or easily exchangeable K

استفاده از دستگاه شعله‌سنجی اندازه‌گیری شد. تغییر در پتاسیم تبدالی (ΔK) از تفاوت غلظت پتاسیم در محلول اولیه و محلول تعادلی و با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد.

$$\Delta K(mg.kg^{-1}) = \frac{(C_0 - C) * V}{M_s} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که C_0 و C به ترتیب غلظت اولیه و تعادلی پتاسیم $(mg.L^{-1})$ ، V حجم محلول (mL) و M_s جرم خاک خشک (g) می‌باشد. قدرت یونی با مدل تجربی (رابطه ۲) محاسبه شد.

$$I = 0.0127EC \quad (\text{رابطه ۲})$$

I قدرت یونی با واحد میلی‌مول بر لیتر و EC میزان قابلیت هدایت الکتریکی بر حسب دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد. سپس ضرایب فعالیت یون‌ها (γ_i) با استفاده از معادله دیویس^۱ (رابطه ۳) محاسبه گردید.

$$\text{Log} \gamma_i = -0.509 \times (z_i^2 \times \frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}}) - 0.3I \quad (\text{رابطه ۳})$$

فعالیت هر یون، با استفاده از رابطه $a_i = C\gamma_i$ و غلظت آن محاسبه شد. برای محاسبه نسبت فعالیت پتاسیم از رابطه (۴) استفاده شد.

$$AR^k = \frac{aK}{\sqrt{a(Ca+Mg)}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این معادله AR^k نسبت فعالیت پتاسیم (عامل شدت)، aK فعالیت پتاسیم و $a(Ca+Mg)$ فعالیت کلسیم و منیزیم می‌باشد. منحنی‌های کمیته- شدت ($AR^k - \Delta K$) به دست آمدند. برای تعیین انرژی آزاد تبادل پتاسیم از رابطه (۵) استفاده شد:

$$E_k = RT \ln AR_k^k \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن R ، ثابت گازها، T نسبت فعالیت تعادلی پتاسیم و AR_e^k نسبت فعالیت پتاسیم در حالت تعادل می‌باشد. روابط پارامترهای کمیته- شدت با شکل‌های پتاسیم و برخی از خصوصیات خاک و آماره‌های توصیفی با نرم‌افزار SPSS انجام گرفت.

نتایج و بحث

خصوصیات خاک: میانگین درصد رس، سیلت و شن در خاک‌های زراعی به ترتیب ۲۸/۷، ۴۴/۸ و ۲۶/۴ و در خاک‌های غیرزراعی به ترتیب ۲۷/۸، ۴۳/۴ و ۲۸/۸ بود و بافت خاک در خاک‌های زراعی و غیرزراعی لوم سیلنتی تا رسی متغیر بود. در

بارندگی سالانه و دمای سالانه در شمال استان آذربایجان غربی به ترتیب ۳۴۵ میلی‌متر و ۱۳/۹ درجه سلسیوس و در غرب استان کردستان به ترتیب ۷۹۴ میلی‌متر و ۱۳/۵ درجه سلسیوس است. رژیم رطوبتی و حرارتی به ترتیب در استان آذربایجان غربی و کردستان زریک و مزیک است.

مشخصات و خصوصیات خاک‌ها: به منظور بررسی

وضعیت و رفتار جذب پتاسیم در خاک‌های زیرکشت توتون و غیرزراعی هم‌جوار در شمال غرب ایران، ۲۹ نمونه جفتی مرکب خاک سطحی (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری) از خاک‌های مناطق زیرکشت توتون و خاک‌های غیرزراعی هم‌جوار در شمال غرب ایران تهیه شد. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها از جمله بافت به روش هیدرومتری بایکاس، pH (روش پتانسیومتری)، EC (با هدایت‌سنج الکتریکی)، کربن آلی (Nelson and Summers, 1996)، کربنات کلسیم معادل CCE (Loeppert and Suarez, 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات سدیم نرمال و پتاسیم، کلسیم و منیزیم محلول در تمامی خاک‌ها اندازه‌گیری شد.

شکل‌های پتاسیم خاک: شکل‌های محلول، تبدالی،

غیرتبدالی و پتاسیم کل در خاک‌های زراعی به ترتیب توسط آب مقطر (در نسبت ۱۰:۱) (Knudsen et al., 1982)، استات آمونیوم یک مولار در pH=7 (McLean and Watson, 1985)، اسیدنیتریک یک مولار جوشان (Helmke and Sparks, 1996) و با هضم نمونه در مخلوطی از اسیدهای هیپوکلریک، نیتریک و فلوریدریک تعیین شد (Knudsen et al., 1982). مقدار پتاسیم غیرتبدالی با کم کردن مقدار پتاسیم محلول و تبدالی از پتاسیم عصاره‌گیری شده با اسید نیتریک مولار جوشان و پتاسیم ساختمانی نیز با کم کردن پتاسیم عصاره‌گیری شده با اسید نیتریک جوشان از پتاسیم کل به دست آمد. پتاسیم موجود در عصاره‌ها با استفاده از شعله‌سنج مدل SHERWOOD 410 اندازه‌گیری شد. سپس، نسبت جذبی پتاسیم $(PAR = [K] / [Ca + Mg]^{0.5})$ و نسبت پتاسیم تبدالی $(EPR = [K_{ex}] / [CEC - K_{ex}])$ محاسبه گردید.

آزمایشات جذب: به ۲/۵ گرم نمونه خاک، ۲۵ میلی‌لیتر

محلول ۱۰ میلی مولار کلرید کلسیم حاوی سری غلظت‌های پتاسیم (۰، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) از منبع KCl اضافه شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس توسط شیکر دورانی شیک شدند، نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۱۸۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شده و پتاسیم در محلول صاف شده با

تحقیق مربوط باشد به طوری که با استمرار کشت، مقدار پتاسیم تبدالی در خاک‌های زراعی از ۲۷۳ به ۱۹۷ میلی‌گرم در کیلوگرم (۲۸ درصد) به طور معنی‌دار ($P \leq 0.01$) کاهش یافت (جدول ۲). همچنین در خاک‌های زراعی، همبستگی مثبت و معنی‌دار بین پتاسیم محلول و پتاسیم تبدالی ($r = 0.418^*$) مشاهده شد که بر خلاف نتایج برخی مطالعات بود (Zareian *et al.*, 2016; Gholizadeh *et al.*, 2017) که وجود همبستگی معنی‌دار بین پتاسیم تبدالی و پتاسیم محلول خاک‌ها ممکن است به تخلیه پتاسیم تبدالی مربوط باشد (Sharpley and Buol, 1987). میانگین درصد پتاسیم تبدالی (EPP) در خاک‌های زراعی ۲/۷ درصد و در خاک‌های غیرزراعی ۴/۳۷ درصد بود.

پتاسیم غیرتبدالی: دامنه تغییرات پتاسیم غیرتبدالی در خاک‌های زراعی ۶۹۰-۴۴۳ (میانگین ۵۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در خاک‌های غیرزراعی ۷۵۶-۵۳۳ (میانگین ۶۳۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود (جدول ۱). مقدار پتاسیم غیرتبدالی در خاک‌های زراعی و غیرزراعی هم‌جوار از لحاظ آماری یکسان است (جدول ۱). در مقایسه با نتایج برخی تحقیقات (Bahmani *et al.*, 2011)، مقدار پتاسیم غیرتبدالی در خاک‌های زراعی مورد تحقیق کمتر است که دلیل آن کمی درصد رس در خاک‌های مورد مطالعه در مقایسه با خاک‌های شهرکرد (تحقیق مذکور) و احتمال تخلیه نسبی K_{nex} خاک در مقایسه با خاک‌های مبارکه اصفهان در همان تحقیق می‌باشد.

رابطه شکل‌های پتاسیم خاک با برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک

همبستگی مثبت و معنی‌دار بین پتاسیم محلول و پتاسیم تبدالی ($r = 0.418^*$) در خاک‌های زراعی مشاهده شد در حالی که در خاک‌های غیرزراعی، رابطه بین آن‌ها معنی‌دار نبود. رابطه پتاسیم محلول با pH در خاک‌های زراعی ($r = -0.375^*$) و خاک‌های غیرزراعی ($r = -0.432^*$) و رابطه پتاسیم محلول با کربنات کلسیم معادل در خاک‌های زراعی ($r = -0.412^*$) و خاک‌های غیرزراعی ($r = -0.471^*$) منفی و معنی‌دار بود. برخلاف خاک‌های زراعی، پتاسیم محلول در خاک‌های غیرزراعی با درصد رس ($r = -0.447^*$) همبستگی منفی و معنی‌دار داشت.

رابطه مثبت و معنی‌دار بین پتاسیم تبدالی و پتاسیم غیرتبدالی در خاک‌های زراعی ($r = 0.415^*$) و غیرزراعی ($r = 0.642^{**}$) به دست آمد. همچنین، همبستگی بین پتاسیم تبدالی و درصد رس در خاک‌های زراعی ($r = 0.577^{**}$) و غیرزراعی ($r = 0.644^{**}$) و همبستگی بین پتاسیم تبدالی و CEC در خاک‌های

خاک‌های زراعی و غیرزراعی محدوده pH به ترتیب ۶/۱۷ تا ۷/۷۸ (میانگین ۷/۰۷) و ۷/۸۶-۶/۲۳ (میانگین ۷/۱۳)، کربنات کلسیم از ۰/۱۰ تا ۲۵/۲ درصد (میانگین ۷/۷۱ درصد) و ۲۶/۳-۱/۳ (میانگین ۸/۶ درصد)، کربن آلی ۰/۳۰ تا ۱/۳۹ درصد (میانگین ۰/۸۴ درصد) و ۱/۰۰-۰/۳۲ درصد (میانگین ۰/۶۱ درصد)، ظرفیت تبادل کاتیونی ۱۲/۴-۲۳/۰ و ۱۱/۳-۲۲/۱ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم به دست آمد (جدول ۲). طبق نتایج، بین خاک‌های زراعی و غیرزراعی هم‌جوار از لحاظ کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی تفاوت معنی‌داری وجود داشت (جدول ۱).

شکل‌های شیمیایی پتاسیم

در خاک‌های زراعی، به طور میانگین ۰/۳۵ درصد پتاسیم خاک به صورت محلول و ۳/۰۴ درصد آن به شکل تبدالی بود که در مقایسه با نتایج تحقیق در دشت قره‌باغ استان فارس (Zareian *et al.*, 2017)، سهم شکل‌های پتاسیم محلول و تبدالی کمتر است و احتمال تخلیه نسبی پتاسیم تبدالی را نشان می‌دهد.

پتاسیم محلول (K_{so}): مقدار پتاسیم محلول در خاک‌های زراعی بین ۱۰ تا ۴۴ (میانگین ۱۹/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در خاک‌های غیرزراعی ۱۵ تا ۳۲ (میانگین ۲۱/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود (جدول ۱). مقدار پتاسیم محلول خاک در ۶۳ درصد خاک‌های زراعی و ۴۳ درصد خاک‌های غیرزراعی کمتر از ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود که این خاک‌ها از نظر پتاسیم فقیر هستند (Tandon, 1998) با این حال، غلظت کلسیم و منیزیم (عامل شدت) و تداوم تأمین پتاسیم محلول از سوی خاک (عامل کمیت) نیز لازم است در نظر گرفته شود که میانگین نسبت جذب پتاسیم خاک‌های زراعی ۰/۰۲۸۱ است. به عقیده برخی محققان غلظت پایین پتاسیم محلول خاک به احتمال زیاد مربوط به تمایل بالای سطوح جذبی رس‌های ۲:۱ خاک برای جذب پتاسیم است (Samadi, 2006). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مقدار پتاسیم محلول در خاک‌های زراعی و غیرزراعی از لحاظ آماری یکسان است (جدول ۱).

پتاسیم تبدالی (K_{ex}): مقدار پتاسیم تبدالی در خاک‌های زراعی بین ۶۴ تا ۴۰۸ (میانگین ۱۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) و در خاک‌های غیرزراعی ۲۰۱ تا ۳۴۶ (میانگین ۲۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) بود (جدول ۱) که در خاک‌های زراعی، مقدار آن در مقایسه با نتایج برخی محققان (Dovlati *et al.*, 2008; Bahmani *et al.*, 2012) یکی از دلایل آن، کمی درصد رس در خاک‌های تحقیق حاضر در مقایسه با درصد رس خاک‌های تحقیقات مذکور است و دلیل دیگر آن می‌تواند به تخلیه پتاسیم تبدالی اغلب خاک‌های این

پتاسیم تبدالی در خاک‌های زراعی متمرکز به دست آمد که وجود چنین همبستگی به معنی نزدیک شدن به سطح حدائق پتاسیم تبدالی و تخلیه آن است (Sharply and Buol, 1987).

زراعی ($r=0.457^*$) مثبت و معنی دار شد که این نتایج با نتایج برخی تحقیقات (Zareian et al., 2017) مطابقت داشت. کانی‌های غنی از پتاسیم در بخش ریز خاک است (Najafi-Ghiri et al., 2012). رابطه مثبت و معنی داری بین درصد رس و میزان

جدول ۱. مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، شکل‌های مختلف پتاسیم و پارامترهای کمیت- شدت (Q/I) خاک‌های مورد مطالعه

خصوصیت	خاک زراعی	خاک غیرزراعی	P-value آزمون جفتی t-test
pH (0.01M CaCl ₂)	۷/۰۷	۷/۱۳	۰/۵۳ ^{ns}
کربنات کلسیم معادل (%)	۷/۷۱	۷/۶۶	۰/۶۲۵ ^{ns}
کربن آلی (%)	۰/۸۴	۰/۶۱	۰/۰۰۱ ^{***}
ظرفیت تبدالی کاتیونی (meq/100g)	۱۹/۳	۱۷/۱	۰/۰۰۲ ^{**}
رس (%)	۲۸/۷	۲۷/۸	۰/۷۲۵ ^{ns}
پتاسیم محلول (mg kg ⁻¹)	۱۹/۸	۲۱/۳	۰/۴۶۳ ^{ns}
پتاسیم تبدالی (mg kg ⁻¹)	۱۹۷	۲۷۳	۰/۰۰۰۱ ^{***}
پتاسیم غیرتبدالی (mg kg ⁻¹)	۵۶۷	۶۳۸	۰/۱۴۷ ^{ns}
PBC ^K (cmole Kg ⁻¹ /(mol L ⁻¹) ^{0.5})	۱۰/۴	۶/۶	۰/۰۶۸ ^{ns}
AR _e ^K (mol L ⁻¹)	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۱ ^{***}
ΔK ⁰ (cmol kg ⁻¹)	۰/۰۲۹	۰/۰۳۸	۰/۰۸۷ ^{ns}
K _x (cmol kg ⁻¹)	۰/۴۶۷	۰/۴۰۲	۰/۲۱۰ ^{ns}
E _K (cal mol ⁻¹)	-۳۴۰۷	-۳۰۵۵	۰/۰۰۲ ^{**}

انرژی آزاد تبادل پتاسیم: E_K، پتاسیم سخت قابل تبادل: K_x، پتاسیم به سهولت قابل تبادل: ΔK⁰، نسبت فعالیت تعادلی پتاسیم: AR_e^K، ظرفیت بافری بالقوه: PBC^K *** و ** به ترتیب نشان دهنده وجود اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۰/۱ درصد و ۱ درصد و ns نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار می‌باشد.

جدول ۲. شاخص‌های آماری ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، شکل‌های مختلف پتاسیم و پارامترهای کمیت- شدت (Q/I) خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی	حداقل		حداکثر		میانگین		انحراف معیار	
	غیرزراعی	زراعی	غیرزراعی	زراعی	غیرزراعی	زراعی	غیرزراعی	زراعی
واکنش خاک (pH)	۶/۲۳	۶/۱۷	۷/۸۶	۷/۷۸	۷/۱۳	۷/۰۷	۰/۳۹۴	۰/۴۰۱
کربنات کلسیم معادل (%)	۱/۳۴	۰/۱۰	۲۶/۳	۲۵/۲	۸/۶۶	۷/۷۱	۷/۳۹	۷/۶۸
کربن آلی (%)	۰/۳۲	۰/۳۰	۱/۰۰	۱/۳۹	۰/۶۱	۰/۸۴	۰/۲۸۷	۰/۱۷۳
ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol kg ⁻¹)	۱۱/۳	۱۲/۴	۲۲/۱	۲۳	۱۷/۱	۱۹/۳	۲/۹۰	۲/۳۲
رس (%)	۹/۲	۱۰/۶	۴۴/۲	۴۴/۴	۲۷/۸	۲۸/۸	۱۰/۴۵	۹/۸۰
پتاسیم محلول (mg kg ⁻¹)	۱۵/۰	۱۰/۰	۳۲/۰	۴۴	۲۱/۲	۱۹/۸	۸/۸۰۹	۴/۸۱۹
پتاسیم تبدالی (mg kg ⁻¹)	۲۰۱	۶۴	۳۴۶	۴۰۸	۲۷۳	۱۹۷	۷۳/۷۷	۳۸/۰۳
پتاسیم غیرتبدالی (mg kg ⁻¹)	۵۳۳	۴۴۳	۷۵۶	۶۹۰	۶۳۸	۵۶۷	۷۶/۰۰	۶۸/۱۰
EKC(mg L ⁻¹)	۷/۰	۴/۰	۱۷/۰	۱۳/۰	۱۰/۸۶	۷/۹۳	۲/۳۴	۲/۱۲
PBC ^K (cmolc Kg ⁻¹ /(mol L ⁻¹) ^{0.5})	۳/۰	۳/۴	۱۵/۹	۵۶/۱	۶/۶	۱۰/۴	۱۰/۶	۳/۴
AR _e ^K (mol L ⁻¹)	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۱۸	۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۵
ΔK ⁰ (cmol kg ⁻¹)	۰/۰۱۱	۰/۰۰۲۶	۰/۱۳۳	۰/۰۸۲	۰/۰۳۸	۰/۰۲۹	۰/۰۱۵۶	۰/۰۲۲۵
K _x (cmol kg ⁻¹)	۰/۱۹۷	۰/۲۴۹	۰/۷۸۶	۱/۲۵۱	۰/۴۰۳	۰/۴۶۷	۰/۲۲۴	۰/۱۶۱
E _K (cal mol ⁻¹)	-۳۵۷۸	-۵۱۵۱	-۲۶۲۷	-۲۷۸۷	-۳۰۵۵	-۳۴۰۷	۵۱۷/۹	۲۵۶/۷

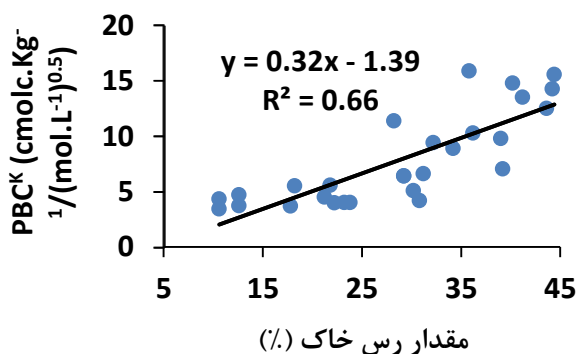
انرژی آزاد تبادل پتاسیم: E_K، پتاسیم سخت قابل تبادل: K_x، پتاسیم به سهولت قابل تبادل: ΔK⁰، نسبت فعالیت تعادلی پتاسیم: AR_e^K، ظرفیت بافری بالقوه: PBC^K

جدول ۳. همبستگی بین شکل‌های مختلف پتاسیم و برخی از خصوصیات فیزیکوشیمیایی در خاک‌های مورد مطالعه

پتاسیم غیرتبادلی		پتاسیم تبادلی		پتاسیم محلول		شکل شیمیایی پتاسیم
غیرزراعی	زراعی	غیرزراعی	زراعی	غیرزراعی	زراعی	
۰/۶۴۲**	۰/۴۱۵*	۱	۱	۰/۰۱۴ ^{ns}	۰/۴۱۸*	پتاسیم تبادلی
۱	۱	۰/۶۴۲**	۰/۴۱۵*	-۰/۴۲۵*	-۰/۱۰۸ ^{ns}	پتاسیم غیرتبادلی
۰/۳۲۱ ^{ns}	۰/۱۱۱ ^{ns}	۰/۲۲۵ ^{ns}	۰/۴۷۴*	-۰/۴۳۲*	-۰/۳۷۵*	pH
۰/۱۹۲ ^{ns}	-۰/۰۲۳ ^{ns}	۰/۱۵۱ ^{ns}	۰/۴۴۲*	-۰/۴۷۱*	-۰/۴۱۲*	کربنات کلسیم معادل
-۰/۲۱۲ ^{ns}	-۰/۳۱۷ ^{ns}	-۰/۱۷۱ ^{ns}	-۰/۲۷۲ ^{ns}	۰/۱۹۱ ^{ns}	۰/۲۵۳ ^{ns}	کربن آلی
۰/۳۸۱*	۰/۴۰۶*	۰/۲۹۸ ^{ns}	۰/۴۵۷*	-۰/۳۰۲ ^{ns}	-۰/۲۸۴ ^{ns}	ظرفیت تبادل کاتیونی
۰/۷۷۸**	۰/۷۸۶**	۰/۶۴۴**	۰/۵۷۷**	-۰/۴۴۷*	-۰/۲۹۹ ^{ns}	رس

* و **: به ترتیب نشان دهنده همبستگی معنی‌دار در سطح ۱ درصد و ۵ درصد بوده و ns نشان دهنده عدم وجود همبستگی معنی‌دار می‌باشد.

مقدار PBC^K به لحاظ آماری در خاک‌های زراعی و غیرزراعی یکسان بود. در خاک‌های زراعی، مقدار PBC^K همبستگی منفی و معنی‌داری با کربن آلی ($r = -0.421^*$) داشت و رابطه خطی معنی‌دار بین درصد رس ($r = 0.814^{**}$) وجود داشت (شکل ۱).
 $PBC^K = 0.32(\text{Clay } \%) - 1.39$, $R^2 = 0.66$
 هم‌چنین در خاک‌های غیرزراعی، مقدار PBC^K همبستگی مثبت و معنی‌دار با رس ($r = 0.811^{**}$) داشت به طوری که PBC^K در خاک شماره ۱۶ (با رس ۴۱/۲ درصد)، بیشتر از مقدار آن در خاک شماره ۲۴ (با رس ۱۲/۶ درصد) است (شکل ۲). این نتایج به نتایج برخی تحقیقات نزدیک بود ولی برخی معتقدند که تغییرات PBC^K صرفاً به درصد رس وابسته نبوده و ممکن است تغییر ماهیت سطوح تبادلی به واسطه حضور ماده آلی باعث تغییرات PBC^K شود (Wang et al., 2001). ماده آلی به اندازه رس بر PBC^K مؤثر نیست (Evangelou and Parathanasis, 1986). هم‌چنین طبق برخی مطالعات، ماده آلی علی‌رغم تأثیر مثبت بر افزایش مکان‌های تبادلی پتاسیم، بر مقدار PBC^K معنی‌دار نیست (Shaviv et al., 1985). حتی علت کاهش PBC^K به واسطه ماده آلی را افزایش دانسیته بار در سطح و نیز کاهش فراوانی مکان‌های با جذب اختصاصی پتاسیم می‌دانند (Poonia and Nieberbudde, 1990).



شکل ۱. رابطه خطی بین ظرفیت بافری پتاسیم و درصد رس در خاک‌های زراعی

در خاک‌های زراعی، با توجه به همبستگی معنی‌دار بین درصد رس و میزان پتاسیم تبادلی ($r = 0.577^{**}$) و هم‌چنین همبستگی بین مقادیر پتاسیم تبادلی و محلول ($r = 0.418^*$) و عدم معنی‌داری آن در خاک‌های غیرزراعی مورد مطالعه، می‌توان گفت که در اغلب خاک‌های زراعی تخلیه پتاسیم رخ داده است و سبب کاهش میزان پتاسیم تبادلی به سطح حداقل شده است.

پتاسیم غیرتبادلی در خاک‌های زراعی و غیرزراعی، در مقایسه با سایر شکل‌های پتاسیم همبستگی بالایی با درصد رس خاک‌ها داشت که مطابق با نتایج برخی محققان (Hosseinpour et al., 2001) بود که در آن خاک‌های با درصد رس اسمکتایت بالا، بیشترین مقدار پتاسیم غیرتبادلی را داشتند. رابطه بین دو پارامتر نسبت جذبی پتاسیم (PAR) و نسبت پتاسیم تبادلی (EPR) در خاک‌های زراعی ($r = 0.67^{**}$) و خاک‌های غیرزراعی ($r = 0.62^{**}$) مثبت و معنی‌دار بود که این نتایج توسط سایر محققین (Dovlati et al., 2008) به دست آمده است. عرض از مبدا و شیب خطی رابطه فوق به کانی‌شناسی رس و میزان پتاسیم تبادلی و میزان مواد آلی خاک بستگی دارد (Shaviv et al., 1985). شیب رابطه PAR و EPR همان ضریب گزینش‌پذیری گاپون (K_G) است که با افزایش فراوانی مکان‌های اختصاصی جذب و کاهش سطح پتاسیم تبادلی، K_G افزایش می‌یابد.

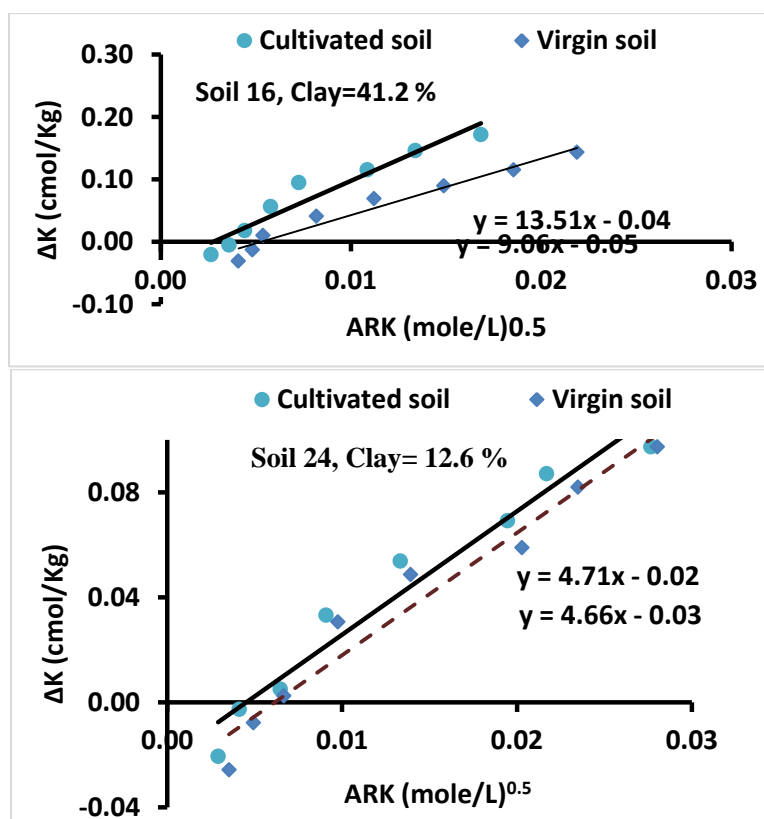
روابط Q/I و پارامترهای آن در خاک‌های زراعی و غیرزراعی هم‌جوار

ظرفیت بافری پتاسیم خاک (PBC^K): ایزوترم‌های جذب در نمونه‌های مورد مطالعه به غیر از خاک شماره ۲۰ در ناحیه جذب قرار داشتند. میانگین PBC^K در خاک‌های زراعی ۱۰/۴ (با دامنه تغییر ۵۶/۱ - ۳/۴) و در خاک‌های غیرزراعی ۶/۶ (با دامنه تغییر ۳/۰ - ۱۵/۹) $(\text{cmolc } K_g^{-1}/(\text{mol } L^{-1})^{0.5})$ بود (جدول ۲).

پتاسیم تبدالی این خاک‌ها باشد که در آن مقدار پتاسیم تبدالی به ترتیب ۱۰۳ و ۱۸۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد و همچنین ممکن است این خاک‌ها پتاسیم را در مکان‌های جذب اختصاصی پتاسیم به طور محکم نگه داشته‌اند. نتایج نشان داد پتاسیم در خاک‌هایی که درصد رس کمتری دارند، در مواضع غیراختصاصی جذب و نگهداری شده است با این حال، به عقیده وودراف (Woodruff, 1955)، این خاک‌ها به دلیل ظرفیت بافری پتاسیم پایین به مصرف کود پتاسیم نیاز دارند که با روش آزمون خاک تناقض دارد. به عقیده برخی دانشمندان، حفظ AR_e^K بین ۰/۰۲۷ تا ۰/۰۳ $(mol L^{-1})^{0.5}$ برای رفع نیاز پتاسیم اغلب گیاهان مناسب است (Woodruff, 1955). طبق نتایج مقایسه میانگین‌ها، AR_e^K در خاک‌های زراعی نسبت به مقدار آن در خاک‌های غیرزراعی هم‌جوار کاهش معنی‌داری ($P \leq 0.01$) داشت به طوری که با استمرار کشت، AR_e^K در خاک‌های زراعی حدود ۳۵ درصد کاهش نشان داد. برخی محققان نیز کاهش معنی‌دار آن را در خاک‌های زراعی نشان داده‌اند (Dovlati et al., 2008). در خاک‌های زراعی، رابطه AR_e^K با رس خاک ($r = -0.583^{**}$) منفی و با کربن آلی خاک ($r = 0.613^{**}$) مثبت بود در حالی که در خاک‌های غیرزراعی، رابطه معنی‌داری بین آن‌ها وجود نداشت.

در خاک‌های زراعی و غیرزراعی، بین مقدار PBC^K و پتاسیم محلول رابطه معنی‌دار و منفی ($r = -0.585^{**}$) وجود داشت در حالی که رابطه بین PBC^K با پتاسیم غیرتبدالی مثبت و معنی‌دار ($r = 0.698^{**}$) بود. در خاک‌های غیرزراعی، رابطه PBC^K با پتاسیم تبدالی مثبت و معنی‌دار ($r = 0.405^{**}$) بود در حالی که در خاک‌های زراعی رابطه بین آن‌ها معنی‌دار نبود که این نتیجه ممکن است مربوط به تخلیه نسبی پتاسیم تبدالی در خاک‌های زراعی باشد که رابطه پتاسیم تبدالی را با درصد رس و همچنین PBC^K تضعیف می‌کند. رفتار جذب پتاسیم در خاک‌های کشت توتون در مقایسه با خاک‌های هم‌جوار تغییر یافته است (شکل ۲) و مقدار پتاسیم آسان قابل تبادل و پتاسیم سخت قابل تبادل نیز تغییر یافته است. مقدار جذب پتاسیم در خاک‌های زراعی بیشتر از خاک‌های غیرزراعی هم‌جوار بود که ناشی از تخلیه نسبی پتاسیم تبدالی است.

نسبت فعالیت پتاسیم در نقطه تعادل (AR_e^K):
میانگین نسبت فعالیت پتاسیم در نقطه تعادل (AR_e^K) در خاک‌های زراعی و غیرزراعی به ترتیب ۰/۰۰۴۰ و ۰/۰۰۶۲ $(mol L^{-1})^{0.5}$ بود (جدول ۲). در خاک‌های زراعی شماره ۸ و ۱۵ (با درصد رس ۲۸ و ۴۴ درصد)، مقدار AR_e^K کمتر از ۰/۰۰۱ $(mol L^{-1})^{0.5}$ بود که ممکن است به دلیل تخلیه مقدار



شکل ۲. روابط کمیت-شدت در خاک‌های زراعی و غیرزراعی هم‌جوار در دو نوع خاک لوم سیلتی (خاک ۲۴) و خاک لوم رسی (خاک ۱۶)

نظر به همبستگی معنی‌دار بین پتاسیم تبادلی (قابل استخراج با استات‌آمونیم ۱ مولار) و K_x ($r=0.497^*$) می‌توان گفت بخش قابل توجهی از پتاسیم قابل‌استخراج با استات‌آمونیم از مکان‌های اختصاصی (مکان‌های لبه‌ای کانی‌ها و مکان‌های هوا دیده میکا) آزاد شده است که این بخش به سادگی برای گیاه قابل دسترس نمی‌باشد.

انرژی آزاد تبادل پتاسیم^۲ (E_K): عناصر غذایی بر روی

سطوح تبادلی در سطح خاک جذب می‌شوند و مقدار انرژی لازم برای برداشت این یون‌ها از سطوح جذب به عنوان پتانسیل شیمیایی یون‌ها نیز شناخته می‌شود. تغییرات مقادیر E_K در خاک‌های زراعی از -5151 تا -2787 کالری بر مول و در خاک‌های غیرزراعی از -3578 تا -3055 کالری بر مول متغیر بود (جدول ۲).

براساس مقدار انرژی آزاد تبادل پتاسیم با کلسیم و منیزیم که می‌تواند شاخصی از قابلیت دسترسی پتاسیم در خاک باشد، خاک‌هایی که انرژی آزاد آن‌ها در محدوده 1995 تا 3493 کالری بر مول باشد از نظر مقدار پتاسیم قابل جذب در حد کفایت می‌باشند (McLean, 1976). طبق نتایج مقایسه میانگین‌ها، انرژی آزاد تبادلی پتاسیم در خاک‌های زراعی نسبت به مقدار آن در خاک‌های غیرزراعی هم‌جوار کاهش معنی‌داری ($P \leq 0.01$) داشتند و با استمرار کشت، انرژی آزاد تبادلی پتاسیم (E_K) از 3055 به 3407 کالری بر مول کاهش یافت.

غلظت تعادلی پتاسیم (EKC): محل تلاقی منحنی

جذب پتاسیم با محور X ها، به عنوان غلظت تعادلی پتاسیم نامیده می‌شود که در آن، میزان جذب و واجذب برابر است. دامنه تغییرات و میانگین EKC در خاک‌های زراعی مورد مطالعه به ترتیب ۹ (از ۴ تا ۱۳ میلی‌گرم بر لیتر) و $7/9$ میلی‌گرم در لیتر بود (جدول ۲). طبق نتایج مقایسه میانگین‌ها، EKC در خاک‌های زراعی نسبت به مقدار آن در خاک‌های غیرزراعی هم‌جوار کاهش معنی‌داری ($P \leq 0.01$) داشت و با استمرار کشت، میانگین EKC از $10/8$ به $7/9$ میلی‌گرم در لیتر یعنی حدود ۲۷ درصد کاهش یافت (جدول ۱) که ممکن است به دلیل مصرف زیاد پتاسیم توسط گیاهان پرنیاز به مصرف پتاسیم از جمله گیاه توتون باشد. در خاک‌های زراعی، EKC با کربن آلی ($r=0.453^*$) همبستگی معنی‌دار و مثبت داشت. در حالی که در خاک‌های غیرزراعی، روابطی بین آن‌ها وجود نداشت.

پتاسیم به سهولت قابل تبادل (ΔK^0): پتاسیم به

سهولت قابل تبادل (ΔK^0) شاخصی از پتاسیم قابل استفاده است که در مکان‌های غیراختصاصی نگهداری می‌شود. میانگین مقدار ΔK^0 در خاک‌های زراعی و غیرزراعی به ترتیب $0/29$ و $0/38$ (cmol kg^{-1}) است که از لحاظ آماری یکسان هستند (جدول ۱). ΔK^0 برآورد بهتری از پتاسیم تبادلی نسبت به پتاسیم قابل عصاره‌گیری با استات‌آمونیم نرمال به دست می‌دهد (Sparks and Liebhardt, 1981).

در این تحقیق، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین ΔK^0 و پتاسیم عصاره‌گیری شده با استات‌آمونیم نرمال در خاک‌های زراعی و غیرزراعی وجود داشت (جدول ۴). مقدار ΔK^0 خاک‌های زراعی و غیرزراعی نسبت به پتاسیم عصاره‌گیری شده با استات‌آمونیم به ترتیب $7/3$ و $5/3$ درصد بود که در مقایسه با نتایج برخی تحقیقات (Dordipour and Gholizadeh, 2009)، به دلیل زیادی مقدار رس، کمتر بود. این امر نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از پتاسیم در مکان‌های اختصاصی جذب شده است که آمونیم موجود در عصاره‌گیر استات‌آمونیم، با داشتن شعاع کریستالی $1/43A^0$ جایگزین پتاسیم (با شعاع کریستالی $1/33A^0$) در این مکان‌های اختصاصی شده (Mengel and Uhlenbecker, 1993) و باعث افزایش استخراج پتاسیم می‌شود. بر این اساس مقدار پتاسیم استخراج شده به روش استات‌آمونیم بیش از مقدار واقعی بود لذا ΔK^0 شاخص مطمئن‌تر از استات‌آمونیم برای آزمون خاک و توصیه کودی در این خاک‌ها است.

پتاسیم سخت قابل تبادل (K_x): دامنه مقادیر پتاسیم

سخت قابل تبادل در خاک‌های زراعی از $0/249$ تا $1/25$ (با میانگین $0/46 \text{ cmol kg}^{-1}$) و در خاک‌های غیرزراعی از $0/151$ تا $0/786$ (با میانگین $0/40 \text{ cmol kg}^{-1}$) متغیر بود (جدول ۲). میانگین مقدار K_x در خاک‌های زراعی و غیرزراعی از نظر آماری یکسان بود. مقدار K_x در خاک‌های زراعی و غیرزراعی به ترتیب $1/1$ و $0/56$ برابر مقدار پتاسیم تبادلی بود و این حاکی از تخلیه نسبی پتاسیم تبادلی در خاک‌های زراعی است. در مطالعه‌ای در خاک‌های جنوب ارومیه، مقادیر K_x $0/48$ تا $0/88$ گزارش گردید. در خاک‌هایی که کانی‌های رسی سایت‌های اختصاصی زیادی برای پتاسیم دارند مقادیر K_x در آن‌ها زیاد است و نشان می‌دهد مقادیر قابل توجهی از پتاسیم جذب شده بر روی سایت‌های با انرژی بالا وجود دارد (Samadi, 2006).

جدول ۴. همبستگی پارامترهای روابط شدت به کمیت Q/I با شکل‌های شیمیایی پتاسیم و خصوصیات خاک‌های زراعی زیرکشت توتون و غیرزراعی هم‌جوار در

شمال غرب ایران

غلظت تعادلی پتاسیم	E_K	K_x	ΔK^0	PBC^K	AR_e^K	
۰/۷۳۵**	۰/۶۳۳**	-۰/۵۸۵**	۰/۱۰۰ ^{ns}	-۰/۵۸۴**	۰/۶۸۱**	پتاسیم محلول
۰/۳۵۴ ^{ns}	-۰/۰۳۰ ^{ns}	۰/۴۹۷*	۰/۴۱۸*	۰/۱۱۵ ^{ns}	۰/۲۱۹ ^{ns}	پتاسیم تبادلی
-۰/۰۴۹ ^{ns}	-۰/۴۳۹*	۰/۸۱۹**	۰/۷۱۶**	۰/۶۹۸**	-۰/۵۸۲**	پتاسیم محلول
-۰/۲۵۱ ^{ns}	-۰/۱۹۲ ^{ns}	۰/۳۱۹ ^{ns}	-۰/۱۰۱ ^{ns}	۰/۳۰۱ ^{ns}	-۰/۲۹۱ ^{ns}	کربنات کلسیم محلول
۰/۴۵۳*	۰/۵۰۷**	-۰/۴۵۳*	۰/۴۱۷*	-۰/۴۲۱*	۰/۶۱۳**	کربن آلی
۰/۰۵۵ ^{ns}	-۰/۰۴۸ ^{ns}	۰/۳۱۸ ^{ns}	۰/۴۹۴**	۰/۳۴۶ ^{ns}	-۰/۰۶۳ ^{ns}	ظرفیت تبادل کاتیونی
-۰/۲۷۹ ^{ns}	-۰/۴۲۸*	۰/۸۱۸**	۰/۲۳۲ ^{ns}	۰/۸۱۴**	-۰/۵۸۲**	رس
۰/۲۴۲ ^{ns}	۰/۴۰۹*	-۰/۶۰۳**	-۰/۲۳۰ ^{ns}	-۰/۵۷۶**	۰/۳۸۹*	پتاسیم محلول
۰/۴۶۷*	۰/۱۴۳ ^{ns}	۰/۳۸۸*	۰/۶۳۸**	۰/۴۰۵*	-۰/۰۷۳ ^{ns}	پتاسیم تبادلی
۰/۲۶۷ ^{ns}	-۰/۲۰۷*	۰/۶۶۷**	۰/۵۰۲*	۰/۷۷۴**	-۰/۳۲۸ ^{ns}	پتاسیم محلول
۰/۱۰۲ ^{ns}	۰/۰۱۴ ^{ns}	۰/۳۵۹*	۰/۳۴۲ ^{ns}	۰/۲۷۴ ^{ns}	۰/۰۶۸ ^{ns}	کربنات کلسیم محلول
۰/۲۰۵ ^{ns}	۰/۱۳۶ ^{ns}	-۰/۳۴۸*	۰/۱۵۱ ^{ns}	-۰/۰۱۲ ^{ns}	۰/۰۹۲ ^{ns}	کربن آلی
۰/۱۵۵ ^{ns}	۰/۰۱۴ ^{ns}	۰/۱۸۶ ^{ns}	۰/۳۰۶ ^{ns}	۰/۲۴۷ ^{ns}	-۰/۱۴۹ ^{ns}	ظرفیت تبادل کاتیونی
۰/۲۲۱ ^{ns}	-۰/۱۵۷ ^{ns}	۰/۷۷۶**	۰/۶۷۴**	۰/۸۱۱**	-۰/۲۱۱ ^{ns}	رس

انرژی آزاد تبادل پتاسیم: E_K ، پتاسیم سخت قابل تبادل: K_x ، پتاسیم به سهولت قابل تبادل: ΔK^0 ، نسبت فعالیت تعادلی پتاسیم: AR_e^K ، ظرفیت بافری بالقوه: PBC^K * و **: به ترتیب نشان دهنده همبستگی معنی‌دار در سطح ۱ درصد و ۵ درصد بوده و ns نشان دهنده عدم وجود همبستگی معنی‌دار می‌باشد.

رابطه بین پارامترهای کمیت- شدت

داشت که دلیل آن همبستگی مثبت PBC^K و K_x با درصد رس خاک است. با افزایش مقدار رس خاک، میزان فعالیت نسبی پتاسیم محلول خاک کاهش یافته و مقدار PBC^K و K_x افزایش می‌یابد.

در خاک‌های زراعی و غیرزراعی هم‌جوار، PBC^K همبستگی منفی و معنی‌داری با AR_e^K ($r=-0.737^{**}$ و $r=-0.564^{**}$) و همبستگی مثبت و معنی‌دار با K_x ($r=0.924^{**}$ و $r=0.990^{**}$)

جدول ۵. همبستگی پارامترهای روابط شدت به کمیت Q/I در خاک‌های زراعی و غیرزراعی در شمال غرب ایران

AR_e^K		ΔK^0		K_x		E_K		Q/I parameters
غیرزراعی	زراعی	غیرزراعی	زراعی	غیرزراعی	زراعی	غیرزراعی	زراعی	
						-۰/۴۱۵*	-۰/۷۷۳**	K_x
				۰/۶۸۴**	۰/۱۲۹ ^{ns}	۰/۳۳۸ ^{ns}	۰/۰۲۶ ^{ns}	ΔK^0
		۰/۳۰۳ ^{ns}	۰/۳۷۰ ^{ns}	-۰/۳۱۶ ^{ns}	-۰/۷۳۵**	۰/۹۸۱**	۰/۹۴۱**	AR_e^K
-۰/۵۶۴**	-۰/۷۳۷**	-۰/۱۵۵ ^{ns}	۰/۳۵۵ ^{ns}	۰/۹۲۴**	۰/۹۹۰**	-۰/۵۲۷**	-۰/۷۶۴**	PBC^K

انرژی آزاد تبادل پتاسیم: E_K ، پتاسیم سخت قابل تبادل: K_x ، پتاسیم به سهولت قابل تبادل: ΔK^0 ، نسبت فعالیت تعادلی پتاسیم: AR_e^K ، ظرفیت بافری بالقوه: PBC^K * و **: به ترتیب نشان دهنده همبستگی معنی‌دار در سطح ۱ درصد و ۵ درصد بوده و ns نشان دهنده عدم وجود همبستگی معنی‌دار می‌باشد.

پتاسیم محلول (EKC) در خاک‌های زراعی نسبت به مقدار آن‌ها در خاک‌های غیرزراعی هم‌جوار به ترتیب حدود ۲۸ و ۲۷ درصد کاهش یافت به طوری که میانگین پتاسیم تبادلی در خاک‌های زراعی و غیرزراعی، به ترتیب ۱۹۷ و ۲۷۳ $mg\ kg^{-1}$ و میانگین EKC به ترتیب ۷/۹ و ۱۰/۸ $mg\ L^{-1}$ بود. با توجه به وجود همبستگی معنی‌دار بین پتاسیم تبادلی و درصد رس و همبستگی معنی‌دار بین پتاسیم تبادلی و پتاسیم محلول در خاک‌های زراعی و عدم معنی‌داری آن در خاک‌های غیرزراعی هم‌جوار، می‌توان گفت در اثر کشت مستمر توتون، میزان

در خاک‌های زراعی و غیرزراعی، بین PBC^K و AR_e^K همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد مشاهده شد. رابطه منفی بین این دو پارامتر نشان می‌دهد که خاک‌هایی با مقادیر PBC^K بالا، شدت پتاسیم (AR_e^K) کمتر ولی پایدارتری را نسبت به خاک‌های با مقادیر PBC^K کمتر، تأمین می‌کنند و خاک‌هایی با PBC^K بالا، توانایی بالایی در ارائه پتاسیم به محلول خاک دارند.

نتیجه‌گیری

با استمرار کشت، میانگین پتاسیم تبادلی و غلظت تعادلی

میانگین انرژی آزاد تبادلی پتاسیم به ترتیب ۳۴۰۷- و ۳۰۵۵- cal mol⁻¹ بود. نتایج نشان داد که تخلیه پتاسیم تبادلی و کاهش پارامترهای کمیت - شدت می‌تواند به دلیل نیاز بالای پتاسیمی توتون و عدم مصرف بهینه کودهای پتاسیمی در این خاک‌ها باشد لذا به دلیل تخلیه نسبی پتاسیم تبادلی در خاک‌های زراعی مورد مطالعه، مدیریت کودهای پتاسیمی جهت تولید پایدار توتون در منطقه شمال غرب ایران نیاز می‌باشد.

REFERENCES

- Akhtar, M. S. and Dixon, J. B. (2009) Mineralogical characteristics and potassium quantity/intensity relation in three Indus River Basin soils. *Asian Journal of Chemistry*, 21(5), 3427-3442.
- Bahmani, M., Salehi, M. H. and Hosseinpour, A. (2012) The studying Q/I parameters of potassium in the calcareous soils of arid and semi-arid regions in Isfahan and Chaharmahal-Va-Bakhtiari provinces. *Journal of Water and Soil*, 26(2), 349-360. (In Farsi)
- Barber, S. A. (1984) *Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach*. New York: John Wiley and Sons.
- 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, 9-23.
- Bostani, A. and Savaghebi, Gh. (2005) Potassium quantity-intensity (Q/I) curve and correlation of its parameters with characteristics of selected soils of sugarcane cultivation in Khuzestan. *Iranian Journal of Agriculture Science*, 37(3), 471-479. (In Farsi)
- Dordipour, E. and Gholizadeh, A. L. (2009) Q/I parameters of potassium in the soils of Mazandaran under tobacco cultivation. *Journal of Plant Production*. 16(1), 1-16. (In Farsi)
- Dovlati, B., Oustan, S. H., and Samadi, A. (2008) Forms of potassium and Q/I relationship for sunflower growing soils in Khoy region. *Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources*, 12(46), 623-636, (In Farsi).
- Evangelou, V. P and Parathanasis A. D. (1986) Evaluation of potassium quantity- intensity relationship by a computer model employing the Gapon equation. *Soil Science Society of America*, 50, 58-62.
- Evangelou V. P., Wang J., and Phillips R. E. (1994) New developments and perspectives in characterization of soil potassium by quantity - intensity (Q/I) relationships. In D. L. Sparks (Ed.). *Advances in agronomy*. (pp. 173-227). Orlando: Academic Press, Inc.
- Fathi, S., Samadi, A., Davari, M. and Asadi Capurchal S. (2014) Evaluation different Extractants for determining corn available potassium in some calcareous soils of Kurdistan province. *Journal of Cereals*, 4(3), 253-266. (In Persian)
- Gholizadeh, A. Gh., Karimi, A.R., Khorasani, R. and Khormali F. (2016) Different forms of soil potassium in tobacco cultivated areas of Northern Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(4), 1-23. (In Farsi)
- Helmke, P. A. and Sparks, D. L. (1996) Lithium, sodium and potassium. P 551-574, In: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Sultanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Jhonston, and M.E. Sumner (Eds.), *Methods of Soil Analysis, part 2, Chemical and Microbiological Properties.*, Soil Science Society of American, WI. USA.
- Hosseinpour, A., Kalbasi, M. and Khademi, H. (2001) Kinetics of non-exchangeable K release in soil and soil components of Gilan Province. *Iran Soil and Water Journal*, 14, 112-119.
- Knudsen, D., Peterson, G. A. and Pratt, P. F. (1982) Lithium, sodium and potassium. In A. L. et al. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological properties (Part 2)*. (pp. 225-246), 2nd ed., WI: ASA and SSSA, Madison.
- Loeppert, R. H. and Suarez, D. L. (1996) Carbonate and gypsum. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis (Part 3)*. (pp. 437- 474). WI: SSSA, ASA. Madison.
- Martin, H. W. and Sparks, D. L. (1985) On the behavior of non- exchangeable potassium in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 16, 133-162.
- McLean, E. O. (1976) Exchangeable K levels for maximum crop yields on soils of different cation exchange capacities. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 7, 823-838.
- McLean, E. O. and Watson, M. E. (1985) Soil measurement of plant- available potassium. In R. D. Munson (Ed.), *Potassium in agriculture*, (pp. 277- 308). Madison: ASA, CSSA, SSSA.
- Mengel, K. and Uhlenbecker, K. (1993) Determination of available interlayer potassium and its uptake by rygrass. *Soil Science Society of American Journal*, 57, 561-566.
- Najafi-Ghiri, M., Abtahi, A. and Jaberian, F. (2012) Potassium release from sand, silt and clay fractions in calcareous soils of Southern Iran. *Archive of Agronomy and Soil Science*, 58(12), 1439-1425.
- Nelson, D. W. and Summers, L. E. (1996) Total carbon, organic carbon and organic matter. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis, (Part 3)*, (pp. 961-1010). Madison: WI: SSSA, ASA.

- Peyghami Khoshemehr, H., Sepehr, E. and Momtaz H. R. (2015) Comparison of potassium sorption characteristics of cultivated and virgin soils in Khoy region. *Applied Soil Research*, 2(2), 18-28. (In Farsi)
- Poonia, S. R. and Niederbudde, E. A. (1990) Exchange equilibria of potassium in soil, V. Effect of natural organic matter on K-Ca exchange. *Geoderma*, 47(3-4), 233-242.
- Richmond, M. D., Pearce, R. C. and Bailey, W. A. (2016) Dark fire- cured tobacco response to potassium and application method. *Tobacco Science*, 53, 12-15.
- Samadi, A. (2006) Potassium exchange isotherms as a plant availability index in selected calcareous soils of Western Azerbaijan province, Iran. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 30(3), 213-222.
- Samadi, A., Dovlati, B. and Barin, M. (2008) Effect of continuous cropping on potassium forms and potassium adsorption characteristics in calcareous soils of Iran. *Australian Journal of Soil Research*, 46, 265-272.
- Sharma, R. R., Mukhopadhyay S. S. and Sawhney, J. S. (2006) Distribution of potassium fractions in relation to landform in a Himalayan catena. *Archive of Agronomy and Soil Science*, 52(4), 469-476.
- Sharpley, A. N. and Buol, S. W. (1987) Relationship between minimum exchangeable potassium and soil taxonomy 1. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 18(5), 601-614.
- Shaviv, A., Mohsen, M., Pratt, P. F. and Mattigod, S. V. (1985) Potassium fixation characteristics of five Southern California soils. *Soil Science Society of America Journal*, 49, 1105- 1109.
- Sparks, D. L., and Liebhardt, W.C. (1981) Effect of long-term lime and potassium applications on quantity-intensity (Q/I) relationships in sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 45, 786-790.
- Tandon, H. L. S. (1998) *Methods of analysis of soils, plant, water and fertilizer*. New Delhi: Development and Consultation Organization.
- Ali, W., Muhammad, H., Mujahid, A., Muhammad, M., Muhammad, A. R. T, Muhammad, M. and Hafiz, A. A. N. (2013) Evaluation of Freundlich and Langmuir Isotherm for Potassium Adsorption Phenomena. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 6(15), 1048-1054.
- Wang, H. Y., Shen, Q. H., Zhou, J. M., Wang, J., Du C. W. and Chen, X. Q. (2011) Plants use alternative strategies to utilize nonexchangeable potassium in minerals. *Plant and soil*, 343(1-2), 209-220.
- Wang, J., Fu, B., Qiu, Y. and Chen, L. (2001) Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semi-arid small catchment on the loess plateau in China. *Journal of Arid Environments*, 48(4), 537-555.
- Woodruff, C. M. (1955) Ionic equilibrium between clay and dilute salt solutions. *Soil Science Society of America Proceedings*, 19, 36-40.
- Zareian, G. R., Farpoor, M. H., Hejazi M. and Jafari, A. (2017) Relationship of potassium forms with soil physicochemical properties and clay mineralogy in Ghrehbagh Plain, Fars province. *Journal of Soil Researches (Soil and water Science)*, 31(2), 315- 328. (In Farsi)