نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذر ۱۴۰۴
19th Iranian Soil Science Congress
02-04 December, 2025
مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran
۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

تأثیر افزودن بیوچار تفاله قهوه بر ترکیب شیمیایی محلول و تعادل شکل‌های پتاسیم یک خاک آهکی

مهدی نجفی قیری[۱*]، حمید رضا بوستانی[۲]، نیلوفر صدری[۳]، سبحان شریان‌پور[۴]

۱-دانشیار بخش خاک و آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، پست الکترونیکی: **mnajafighiri@shirazu.ac.ir**
۲-دانشیار بخش خاک و آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز
۳-دانش آموخته دکتری علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
۴-دانشجوی کارشناسی علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز

چکیده

پتاسیم در خاک به چهار شکل تعادلی محلول، تبادلی، غیرتبادلی و ساختمانی وجود دارد و با افزودن ترکیبات مختلف، تعادل جدیدی ممکن است بین این شکل‌ها بوجود آید. در پژوهش حاضر، تأثیر افزودن دو درصد بیوچار تفاله قهوه (ترکیبی سرشار از پتاسیم) تهیه شده در دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس بر ترکیب کاتیونی محلول خاک و شکل‌های مختلف پتاسیم مورد بررسی قرار گرفت. هر دو بیوچار، مقدار پتاسیم و سدیم را در محلول خاک افزایش اما مقدار کلسیم را کاهش دادند. همچنین نسبت مولی کلسیم به پتاسیم و سدیم کاهش یافت. مقدار پتاسیم محلول با کاربرد بیوچارهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۲۸ و ۱۲۴ درصد افزایش نشان داد. مقدار پتاسیم تبادلی افزایش به‌ترتیب ۴۵ و ۱۱۳ درصدی و مقدار پتاسیم غیرتبادلی نیز افزایش به‌ترتیب ۲۴ و ۱۷ درصدی با کاربرد بیوچارهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس نشان داد. به‌طور کلی بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس، مقدار پتاسیم کل، محلول و تبادلی را نسبت به بیوچار ۳۰۰ درجه سلسیوس افزایش بیشتری داد. در خاک مورد مطالعه نسبت پتاسیم تبادلی به محلول ۳/۵ بود و با کاربرد بیوچار ۳۰۰ درجه سلسیوس، مقدار آن به ۴/۰ افزایش یافت در حالی‌که کاربرد بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس، تأثیری بر آن نداشت.

واژگان کلیدی: پتاسیم تبادلی، پتاسیم غیرتبادلی، توزیع شکل‌های پتاسیم، نسبت کلسیم به پتاسیم

مقدمه

اگرچه مطالعات زیادی در مورد تعادل و پویایی پتاسیم در خاک‌های مختلف دنیا صورت گرفته است اما هنوز این عنصر در خاک‌ها بخصوص خاک‌های آهکی مناطق خشک دارای پیچیدگی‌ها و ابهاماتی در فرآیندهای خاکی می‌باشد. یکی از مهمترین ابهامات در این زمینه، رقابت کاتیون‌های مختلف محلول خاک با این عنصر جهت جذب توسط ریشه گیاه می‌باشد که بخصوص در خاک‌های آهکی با مقدار بالای کلسیم در محلول خاک این فرآیند جدی‌تر به نظر می‌رسد (نجفی‌قیری، ۱۴۰۳). از طرف دیگر، به دلیل استفاده از ترکیبات نوظهور (مانند بیوچارها) که به‌عنوان اصلاح کننده خاک به کار می‌روند روابط پتاسیم خاک می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد.

بیوچارها به عنوان محصولات گرماکافت ترکیبات مختلف آلی در محیط‌های بدون اکسیژن یا دارای اکسیژن محدود در دماهای مختلف از ۳۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس می‌باشند. برخی مطالعات نشان می‌دهند که این ترکیبات به دلیل دارا بودن مقدار بالای پتاسیم می‌توانند سبب تغییر در تعادل پتاسیم خاک شوند (Najafi-Ghiri et al., 2022). به‌هرحال، مقدار پتاسیم بیوچارها با توجه به ماده اولیه و شرایط تولید بسیار متفاوت می‌باشد و می‌تواند از ۰/۱ تا ۵ درصد تغییر کند (نجفی‌قیری، ۱۴۰۳). تفاله قهوه به‌عنوان یک ماده دور ریختنی دارای مقدار بالایی پتاسیم می‌باشد که می‌تواند در بیوچار حاصل از آن حفظ شود. تحقیقات کمی در مورد تأثیر این بیوچار بر ترکیب شیمیایی محلول خاک‌های آهکی و تغییر در روابط تعادلی پتاسیم صورت گرفته است. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر بیوچارهای تهیه شده از تفاله قهوه در دو دمای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس بر ترکیب کاتیونی محلول یک خاک آهکی، نسبت مولی کاتیون‌ها و توزیع پتاسیم در شکل‌های محلول، تبادلی و غیرتبادلی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

خاک مورد مطالعه از اراضی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب (استان فارس) از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری برداشت و پس از هواخشک کردن و الک کردن (کوچکتر از دو میلی‌متر)، جهت آزمایش‌های مختلف به روش‌های معمول (Sparks et al., 2020) به آزمایشگاه منتقل شد. تفاله قهوه نیز جمع‌آوری و در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. تفاله خشک شده در کوره الکتریکی تحت شرایط اکسیژن محدود در دو دمای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به مدت چهار ساعت (افزایش دمای ۵ درجه در دقیقه) حرارت داده شد تا بیوچار مورد نظر تولید شود. بیوچار تولیدی نرم و از الک ۰/۵ میلی‌متری عبور داده شد و سپس پ‌هاش و قابلیت هدایت الکتریکی در آب مقطر به نسبت یک به ده پس از یک ساعت تکان دادن اندازه‌گیری گردید (Boostani et al., 2023). یک گرم از نمونه بیوچار در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در کوره الکتریکی خاکستر و سپس در اسید کلریدریک دو نرمال حل و مقدار پتاسیم به‌روش شعله‌سنجی (Corning 510 flame photometer, ELE, UK) اندازه‌گیری گردید. مقدار کربن، هیدروژن و نیتروژن نیز در نمونه‌ها با دستگاه CHN analyzer (ThermoFinnigan Flash EA 1112 Series) اندازه‌گیری شد.

مقدار ۱۰۰ گرم از خاک با دو گرم از هر بیوچار در سه تکرار کاملاً مخلوط گردید و به ظروف پلاستیکی درب‌دار (با چند سوراخ در درب آن) منتقل گردید. مقدار رطوبت نمونه‌ها در حدود ۸۰ درصد ظرفیت زراعی با توزین روزانه آنها حفظ گردید. نمونه‌ها به مدت یک ماه در شرایط آزمایشگاه (دمای ۲۰ تا ۲۲ درجه سلسیوس) نگهداری شدند و سپس خشک و از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. پ‌هاش و قابلیت هدایت الکتریکی به‌ترتیب در خمیر اشباع و عصاره اشباع اندازه‌گیری شدند (Sparks et al., 2020). مقدار پتاسیم، کلسیم و سدیم محلول نیز در عصاره اشباع به روش شعله‌سنجی اندازه‌گیری شد.

شکل‌های مختلف پتاسیم شامل محلول، تبادلی و غیرتبادلی به‌ترتیب در عصاره اشباع، عصاره‌گیری با استات آمونیوم ۱ نرمال خنثی و عصاره‌گیری با اسید نیتریک جوشان تعیین شدند (Helmke and Sparks, 2020). جهت اندازه‌گیری پتاسیم تبادلی، ۵ گرم خاک سه بار به‌وسیله ۲۵ میلی‌لیتر استات آمونیوم ۱ نرمال خنثی به مدت ۱۰ دقیقه عصاره‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری پتاسیم غیرتبادلی، ۲/۵ گرم خاک و ۲۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۱ نرمال به مدت ۱۰ دقیقه جوشانده شد. با کسر پتاسیم عصاره‌گیری شده در این روش از پتاسیم عصاره‌گیری شده با استات آمونیم، مقدار پتاسیم غیرتبادلی محاسبه گردید. مجموع سه شکل پتاسیم به‌عنوان پتاسیم قابل

عصاره گیری با اسید نیتریک (پتاسیم کل) در نظر گرفته شد. مقدار پتاسیم در عصاره‌های به دست آمده با روش شعله‌سنجی اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 20.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) انجام شد و تمامی آزمون‌های آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار در نظر گرفته شدند. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون Tukey HSD post hoc استفاده شد. همه نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Office Excel 2013 تهیه شدند.

نتایج و بحث

جدول ۱ برخی ویژگی‌های خاک و دو بیوچار مورد استفاده را نشان می‌دهد. خاک مورد مطالعه بر اساس تاکسونومی خاک به‌صورت Coarse-loamy, carbonatic, hyperthermic Typic Haplustepts طبقه‌بندی می‌شود. این خاک شدیداً آهکی و دارای ماده آلی و شوری کم می‌باشد.

برخی ویژگی‌های بیوچارهای مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. هر دو بیوچار دارای پهاش قلیایی بوده و با افزایش درجه حرارت تولید مقدار پهاش، قابلیت هدایت الکتریکی، پتاسیم کل و کربن آلی آن افزایش و مقدار نیتروژن کاهش یافته است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های خاک و بیوچارهای مورد استفاده

ویژگی	خاک	بیوچار تفاله قهوه	
		۳۰۰ درجه سلسیوس	۶۰۰ درجه سلسیوس
شن، درصد	۶۲	-	-
سیلت، درصد	۳۱	-	-
رس، درصد	۷	-	-
پهاش	۷/۶۵	۸/۷	۱۰/۱
قابلیت هدایت الکتریکی، $dS\ m^{-1}$	۰/۹	۰/۲۵	۱/۵۱
کربنات کلسیم معادل، درصد	۵۳	-	-
کربن آلی، درصد	۰/۶۹	-	-
پتاسیم، میلی‌گرم بر کیلوگرم	۴۶۴	۶۰۰	۱۷۰۰
کربن، درصد	-	۶۵	۷۲
نیتروژن، درصد	-	۳/۴۸	۲/۱۳

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که افزودن بیوچار تفاله قهوه بر ویژگی‌های شیمیایی خاک شامل پهاش، قابلیت هدایت الکتریکی، مقدار کلسیم، پتاسیم و سدیم محلول و نسبت آنها تأثیر معنی‌دار داشته است. جدول ۲ مقایسه میانگین ویژگی‌های مختلف تحت تأثیر کاربرد دو نوع بیوچار را نشان می‌دهد.

با افزودن بیوچار تفاله قهوه تهیه شده در دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس مقدار پهاش خاک از ۸/۷۵ به‌ترتیب به ۸/۳۲ و ۸/۵۲ کاهش یافت در حالی‌که مقدار قابلیت هدایت الکتریکی از ۰/۳۰ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب به ۰/۲۴ (کاهش معنی‌دار) و

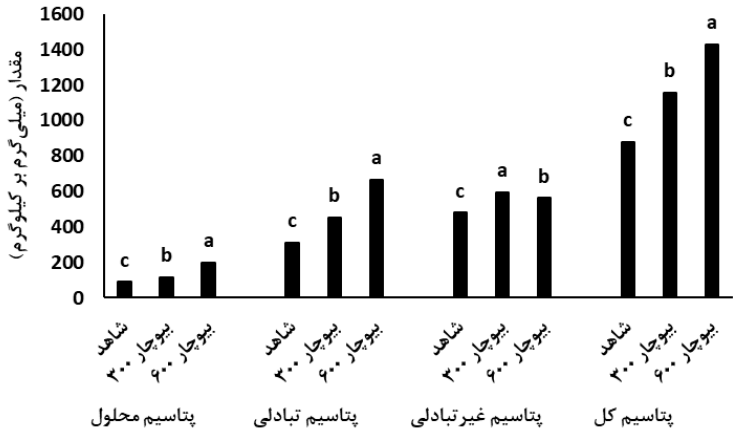
۰/۲۹ دسی‌زیمنس بر متر (بدون تغییر معنی‌دار) رسید. بیوچارهای تهیه شده در دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس همچنین سبب کاهش قابل ملاحظه نسبت مولی کلسیم به پتاسیم و کلسیم به سدیم شدند طوری‌که مقدار این دو نسبت تا ۶۵ درصد کاهش نشان داد. نسبت مولی پتاسیم به سدیم با تیمار بیوچار ۳۰۰ کاهش اما با کاربرد بیوچار ۶۰۰ افزایش نشان داد.

غلظت پتاسیم محلول با کاربرد هر دو نوع بیوچار ۳۰۰ و ۶۰۰ افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان داد (به‌ترتیب ۲۷ و ۱۲۲ درصد) در حالی‌که مقدار کلسیم از ۲۰/۸ میلی‌گرم بر لیتر به‌ترتیب به ۱۴/۷ و ۱۶/۲ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت. مقدار سدیم نیز با کاربرد بیوچار ۳۰۰ و ۶۰۰ افزایش به‌ترتیب ۵۹ و ۵۴ درصدی نشان داد. نجفی‌قیری و همکاران (۱۳۹۴) با مطالعه تأثیر چند نوع بیوچار تهیه شده در دماهای مختلف نتایج متفاوتی گرفتند و نشان دادند که افزودن بیوچار کود گوسفندی تهیه شده در دماهای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس مقدار کلسیم، پتاسیم و سدیم محلول را در یک خاک آهکی افزایش داد در حالی‌که بیوچار سبوس برنج مقدار پتاسیم را افزایش اما بر مقدار کلسیم و سدیم تأثیری نداشت و دمای تولید بیوچار نیز تأثیری بر این تغییرات نداشت.

جدول ۲- تأثیر کاربرد بیوچارهای تفاله قهوه تهیه شده در دو دمای مختلف بر برخی ویژگی‌های محلول خاک

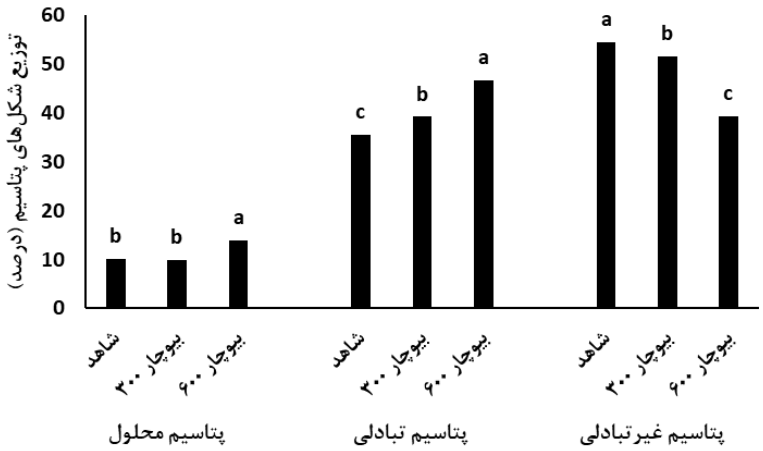
تیمار	pH	EC (dS m^{-1})	کاتیون‌های محلول (mg L^{-1})			نسبت مولی کاتیون‌های محلول		
			پتاسیم	کلسیم	سدیم	کلسیم به پتاسیم	کلسیم به سدیم	پتاسیم به سدیم
شاهد	8.75a	0.30a	17.9c	20.8a	9.7b	1.19a	0.67a	1.09b
بیوچار ۳۰۰	8.32c	0.24b	22.8b	14.7b	15.4a	0.66b	0.37b	0.88c
بیوچار ۵۰۰	8.52b	0.29a	39.7a	16.2b	14.9a	0.42c	0.24c	1.58a

شکل ۱ مقدار شکل‌های مختلف پتاسیم را تحت تأثیر افزودن بیوچارهای تولید شده از تفاله قهوه در دو دمای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که افزودن هر دو بیوچار تهیه شده در دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس، مقدار پتاسیم قابل استخراج با اسید نیتریک (مجموع پتاسیم محلول، تبادلی و غیرتبادلی) را به‌ترتیب ۳۱ و ۶۲ درصد افزایش داد که این افزایش در شکل‌های مختلف پتاسیم تأثیرگذار بود. مقدار پتاسیم محلول با کاربرد بیوچارهای ۳۰۰ و ۶۰۰، به‌ترتیب ۱۱۴ و ۱۹۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم (به‌ترتیب ۲۸ و ۱۲۴ درصد) افزایش نشان داد. مقدار پتاسیم تبادلی نیز افزایش به‌ترتیب ۴۵ و ۱۱۳ درصدی نشان داد. افزایش مقدار پتاسیم غیرتبادلی نیز با کاربرد بیوچارهای ۳۰۰ و ۶۰۰ افزایش به‌ترتیب ۲۴ و ۱۷ درصدی نشان داد. به‌طور کلی بیوچار ۶۰۰، مقدار پتاسیم کل، محلول و تبادلی را نسبت به بیوچار ۳۰۰ افزایش بیشتری داد در حالی‌که مقدار پتاسیم غیرتبادلی در خاک تیمار شده با بیوچار ۳۰۰ بیشتر از بیوچار ۶۰۰ بود. نتایج مشابهی توسط Rasuli و همکاران (2022) با کاربرد بیوچارهای تهیه شده از بقایای گندم و ذرت در دماهای ۲۵۰، ۴۵۰ و ۶۵۰ درجه سلسیوس به دست آمد و نشان داده شد که مقدار پتاسیم محلول، تبادلی و غیرتبادلی به‌ترتیب ۷۰-۲۷۰، ۷۰-۳۵۰ و ۲۲۰-۷۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافت و با افزایش درجه حرارت تولید این تأثیر بیشتر بود.



شکل ۱- تأثیر بیوچارهای تهیه شده در دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس بر شکل‌های مختلف پتاسیم یک خاک آهکی

شکل ۲، توزیع پتاسیم خاک بین شکل‌های مختلف محلول، تبادلی و غیرتبادلی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، در خاک شاهد مقدار پتاسیم خاک در شکل‌های محلول، تبادلی و غیرتبادلی به‌ترتیب ۱۰، ۳۵ و ۵۵ درصد بود. کاربرد بیوچار ۳۰۰، درصد پتاسیم تبادلی را ۳/۷ درصد افزایش و درصد پتاسیم غیرتبادلی را ۲/۸ درصد کاهش داد ولی بر درصد پتاسیم محلول بی‌تأثیر بود. مقدار پتاسیم محلول و تبادلی در نتیجه کاربرد بیوچار ۶۰۰ افزایش به‌ترتیب ۳/۷ و ۱۱/۲ درصدی نشان داد اما پتاسیم غیرتبادلی را ۱۵ درصد کاهش داد. در واقع می‌توان گفت که افزودن بیوچار با توجه به مقدار بالای پتاسیم موجود در آن که به شکل محلول و تبادلی می‌باشد تأثیر بیشتری را بر پتاسیم محلول و تبادلی نسبت به پتاسیم غیرتبادلی خاک می‌گذارد و این سبب تمرکز بیشتر پتاسیم در شکل‌های محلول و تبادلی (شکل‌های قابل استفاده) می‌شود. شاید بتوان این را به ظرفیت محدود خاک‌ها در تثبیت پتاسیم (تبدیل شکل‌های محلول و تبادلی پتاسیم به شکل غیرتبادلی) نسبت داد در حالی‌که نقاط تبادلی و محلول خاک ظرفیت بالاتری برای نگهداری پتاسیم دارند. نتایج مشابهی (Najafi-Ghiri et al., 2022) با کاربرد بیوچارهای حاصل از ریشه شیرین‌بیان، زباله شهری و کود گاوی تهیه شده در دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به‌دست آمد و گزارش شد که بسته به نوع ماده اولیه بیوچار و دمای تولید، کاهش درصد پتاسیم غیرتبادلی و افزایش درصد پتاسیم محلول و تبادلی می‌تواند متفاوت باشد.



شکل ۲- توزیع پتاسیم خاک در شکل‌های محلول، تبادلی و غیرتبادلی پس از افزودن بیوچارهای تفاله قهوه تهیه شده در دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس

نسبت پتاسیم تبادلی به محلول یکی از شاخص‌های مهم ارزیابی سرنوشت پتاسیم خاک و پتانسیل جذب آن توسط گیاه و آبشویی آن می‌باشد. بالا بودن این شاخص نشان دهنده ظرفیت بافری بالاتر خاک در حفظ غلظت پتاسیم در محلول خاک برای گیاه می‌باشد و مشخص می‌کند که چند بار محلول خاک می‌تواند از پتاسیم تخلیه شده و توسط نقاط تبادلی جایگزین شود. از طرف دیگر، مقدار کم این شاخص نشان دهنده تمرکز بیشتر پتاسیم در محلول خاک بوده و می‌تواند پتانسیل بالای آبشویی این عنصر در صورت مهیا بودن شرایط آبشویی را نشان دهد. باید در نظر داشت که بالا بودن این شاخص اگر چه ظرفیت بافری پتاسیم خاک را نشان می‌دهد اما می‌تواند غلظت پتاسیم را در محلول خاک جهت رقابت بهتر با سایر کاتیون‌های محلول بویژه کلسیم برای جذب توسط ریشه گیاه محدود کند (نجفی‌قیری ۱۴۰۳). در خاک مورد مطالعه، این نسبت ۳/۵ بود و با کاربرد بیوچار ۳۰۰ مقدار آن به ۴/۰ افزایش یافت در حالی که کاربرد بیوچار ۶۰۰، تأثیری بر آن نداشت (۳/۳۷). می‌توان نتیجه گیری کرد که در خاک‌هایی که غلظت بالای کلسیم در خاک سبب جلوگیری از جذب پتاسیم توسط ریشه گیاه می‌شود بهتر است از بیوچارهای تولید شده در دماهای بیشتر استفاده نمود در حالی‌که در خاک‌های دارای پتانسیل آبشویی بالای پتاسیم بهتر است از بیوچارهای تولید شده در دماهای کمتر استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

بیوچار تفاله قهوه دارای مقدار قابل توجهی پتاسیم بوده و پس از افزوده شدن به خاک، مقدار شکل‌های مختلف پتاسیم را افزایش می‌دهد. مقدار افزایش در شکل‌های محلول و تبادلی بسیار بیشتر از غیرتبادلی بوده و این به دلیل ظرفیت محدود خاک در تثبیت پتاسیم (تبدیل پتاسیم به شکل غیرتبادلی) می‌باشد. بیوچار تولید شده در دمای بالاتر (۶۰۰ درجه سلسیوس) مقدار پتاسیم محلول و تبادلی (شکل قابل استفاده) را بیشتر از بیوچار تولید شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس افزایش داد در حالی‌که مقدار پتاسیم

غیرتبادلی روند معکوسی را نشان داد. از طرف دیگر، بیوچار تفاله قهوه سبب افزایش نسبت پتاسیم به سایر کاتیون‌ها در محلول خاک گردید که این با توجه به رقابت شدید کلسیم با پتاسیم برای جذب توسط ریشه در خاک‌های آهکی می‌تواند در تعادل جذب پتاسیم توسط ریشه گیاه تأثیر مثبت داشته باشد. این تأثیر مثبت با افزایش دمای تولید بیوچار بیشتر بود. به‌طور کلی توصیه می‌شود در کاربرد بیوچار تفاله قهوه به‌صورت محدود (در گلخانه‌ها، خرانه و ...) وضعیت پتاسیم مورد رصد قرار گیرد و توصیه کودی پتاسیم بر مبنای مقدار کل پتاسیم قابل استفاده و نسبت آن با سایر کاتیون‌ها و همچنین پتانسیل آبشویی پتاسیم در خاک‌ها انجام شود.

منابع مورد استفاده

نجفی‌قیری، م.، بوستانی، ح. ر.، سلیمانی، ن.، قارزی، ی. (۱۳۹۴). مقایسه کلسیم و سدیم در آزادسازی و تثبیت مجدد پتاسیم در برخی از خاک‌های جنوب ایران با ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و مینرالوژیکی. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۶(۱): ۱-۱۰.

نجفی‌قیری، م. (۱۴۰۳). تعادل و پویایی پتاسیم در خاک‌های آهکی ایران. چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران. ۱۷۲ ص.

Boostani, H. R., Hardie, A. G., Najafi-Ghiri, M. (2023). Chemical fractions, mobility and release kinetics of Cadmium in a light-textured calcareous soil as affected by crop residue biochars and Cd-contamination levels. Chemistry and Ecology, 29: 525-538.

Helmke, P. A., Sparks, D. L. (2020). Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. in Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H. (eds.), Methods of soil analysis. Part 3-chemical methods. (Madison: WI).

Najafi-Ghiri, M., Boostani, H. R., Hardie, A. G. (2022). Investigation of biochars application on potassium forms and dynamics in a calcareous soil under different moisture conditions. Archives of Agronomy and Soil Science, 68: 325-339.

Rasuli, F., Owliaie, H. R., Najafi-Ghiri, M., Adhami, E. (2022). Effect of biochar on potassium fractions and plant-available P, Fe, Zn, Mn and Cu concentrations of calcareous soils. Arid Land Research and Management, 36: 1-26.

Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H. (2020). Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods (John Wiley & Sons).