

تأثیر کاربرد بیوچارهای مختلف بر برخی ویژگی‌های خاک و قابلیت جذب بعضی از عناصر غذایی در یک خاک آهکی

مهدی نجفی قیری¹

استادیار دانشگاه شیراز؛ mnajafighiri@yahoo.com

دریافت: 92/11/9 و پذیرش: 93/9/19

چکیده

گرماکافت بقایای گیاهی و تبدیل آن به بیوچار و افزودن به خاک علاوه بر ترسیب کربن و کاهش آلودگی هوا می‌تواند سبب اصلاح برخی ویژگی‌های خاک‌های آهکی شود. هدف از این پژوهش، ارزیابی تأثیر بیوچار حاصل از گرماکافت پنج نوع بقایای گیاهی بر برخی ویژگی‌های خاک آهکی می‌باشد. بیوچارهای مورد استفاده از گرماکافت بقایای گندم، بقایای ذرت، چوب ذرت، بقایای پنبه و بقایای کنجد در دمای 500 درجه سلسیوس به مدت سه ساعت و در شرایط اکسیژن محدود به دست آمد. سپس تأثیر افزودن مقدار 2 درصد بیوچار به یک خاک آهکی به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار بررسی شد. نمونه‌ها به مدت 90 روز در دمای 22 ± 2 درجه سلسیوس و 50 درصد رطوبت اشباع نگهداری شده و سپس ویژگی‌های خاک شامل پهاش، قابلیت هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی و مقدار کربن آلی، شکل‌های پتاسیم، مقدار نیتروژن کل، فسفر، آهن، منگنز، روی و مس قابل استفاده خاک در آنها اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که بیوچار حاصل از بقایای پنبه و کنجد سبب افزایش دار پهاش خاک گردید. همه بیوچارها مقدار کربن آلی و قابلیت هدایت الکتریکی خاک را به طور معنی‌داری افزایش دادند. مقادیر پتاسیم محلول، تبدلی و غیرتبدلی تحت تأثیر افزودن بیوچار و نوع آن قرار گرفت. بیوچارها سبب افزایش 4/4 تا 7 برابری پتاسیم محلول شدند. مقدار افزایش پتاسیم تبدلی از 144 میلی‌گرم بر کیلوگرم با کاربرد بیوچار پنبه تا 209 میلی‌گرم بر کیلوگرم با کاربرد بیوچار کنجد متغیر بود. پتاسیم غیرتبدلی نیز با افزودن بیوچار از 290 تا 532 میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافت. قابلیت استفاده نیتروژن، فسفر، روی و مس تحت تأثیر کاربرد بیوچار قرار نگرفت، اما بیوچار بقایای پنبه و کنجد مقدار آهن قابل استفاده را افزایش دادند. همچنین منگنز نیز با کاربرد هر پنج نوع بیوچار افزایش معنی‌دار نشان داد. با توجه به افزایش قابل ملاحظه مقادیر شکل‌های مختلف پتاسیم و با توجه به کمبود پتاسیم در بعضی از خاک‌های آهکی استان فارس، می‌توان استفاده از بیوچار به‌عنوان منبع حاوی پتاسیم را در مدیریت حاصلخیزی این عنصر مد نظر قرار داد.

واژه‌های کلیدی: پهاش خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، استان فارس، کلش پنبه، کلش کنجد

¹ نویسنده مسئول، آدرس: داراب، دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی

مقدمه

جهت بهبود وضعیت حاصلخیزی پتاسیم خاک‌ها مورد مطالعه قرار داد.

با توجه به ترکیبات متفاوت بقایای گیاهی، بیوچار تولید شده از آنها نیز می‌تواند ویژگی‌های متفاوتی داشته باشد (تانگ و همکاران، 2013). این ویژگی‌های متفاوت ممکن است تأثیرات متفاوتی را بر نیتروژن، فسفر، شکل‌های مختلف پتاسیم خاک (شامل پتاسیم محلول، تبدالی و غیرتبدالی) و ریزمغذی‌ها (آهن، منگنز، مس و روی) داشته باشد. جهت بررسی این امر، پنج گروه از بقایای گیاهی از مزارع جنوب ایران که فراوان‌تر بوده (بقایای گندم، بقایای پنبه، بقایای ذرت، چوب ذرت و بقایای کنجد) و به علت سوء مدیریت در اراضی سوزانده می‌شوند جهت تولید بیوچار و بررسی تأثیر آن بر اشکال مختلف پتاسیم، نیتروژن، فسفر، آهن، منگنز، مس و روی یک خاک لومی جمع‌آوری شده از مزارع دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب واقع در جنوب شرقی استان فارس مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر بیوچار و نوع آن بر برخی ویژگی‌های خاک و وضعیت عناصر غذایی در یک خاک آهکی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های خاک

خاک مورد استفاده از اراضی تحت آیش دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب (جنوب استان فارس) و از عمق 0 تا 30 سانتیمتری جمع‌آوری گردید. این خاک به زیرگروه Typic Haplustepts تعلق داشته و دارای مقدار بالای کربنات کلسیم، پهاش قلیایی و ماده آلی کم می‌باشد. بنابراین نماینده مناسبی از خاک‌های آهکی جنوب ایران محسوب می‌شود. نمونه خاک پس از هواخشک شدن آسیاب و از الک 2 میلیمتری عبور داده شد. آزمایش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی شامل توزیع اندازه ذرات خاک (روول، 1994)، پهاش (گروه آزمایشگاه شوری، 1954)، کربنات کلسیم معادل (گروه آزمایشگاه شوری، 1954)، قابلیت هدایت الکتریکی (گروه آزمایشگاه شوری، 1954)، ظرفیت تبادل کاتیونی (چاپمن، 1965) و مقدار کربن آلی (نلسون و سامرز، 1996) روی نمونه خاک صورت گرفت. نیتروژن کل خاک به روش کلدال و فسفر قابل استفاده با عصاره‌گیری با بیکربنات سدیم (اولسن و همکاران، 1954) اندازه‌گیری شدند. جهت اندازه‌گیری مقدار آهن، منگنز، مس و روی قابل استفاده در نمونه‌های خاک از روش عصاره‌گیری با محلول DTPA (لیندسی و نرول، 1978) استفاده شد. غلظت آهن، منگنز، مس و روی در عصاره‌های حاصل با

بیوچارها حاصل فرآیند گرماکافت ترکیبات آلی می‌باشند. گرماکافت ترکیبات زائد آلی مانند بقایای گیاهی زراعی و جنگلی و فضولات دامی در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن محدود و دمای بالا سبب تشکیل مقداری ترکیبات کربنی فرار و همچنین مقداری ترکیبات کربن باقیمانده و خاکستر دارای مقدار قابل ملاحظه کلسیم و پتاسیم می‌شود (نواک و همکاران، 2009؛ آنتال و گرونلی، 2003). امروزه افزودن بیوچار به خاک‌ها به عنوان روشی جهت ترسیب کربن درون خاک و کاهش غلظت دی‌اکسید کربن هوا توجه زیادی را به خود جلب کرده است (لیمن و جوزف، 2009؛ لایرد، 2008). افزودن بیوچار به خاک با توجه به نقشی که کربن در فرآیندهای شیمیایی، زیستی و فیزیکی خاک ایفا می‌کند می‌تواند مهم باشد. لایرد و همکاران (2010) با کاربرد بیوچار حاصل از کودهای دامی به خاک‌های زراعی نشان دادند که کاهش چشمگیر در آبشویی عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر، منیزیم و سیلیس مشاهده گردید.

مؤخری و همکاران (2013) تأثیر فوق‌العاده بیوچار بر چرخه عناصر و جلوگیری از هدرروی کربن، نیتروژن و فسفر در خاک را نشان دادند و بیان کردند که بیوچار دارای دامنه‌ای از شکل‌های عناصر غذایی بوده که با سرعت‌های متفاوتی آزاد شده و تأثیرات متفاوتی را بر حاصلخیزی خاک دارند. شیرابه خروجی از خاک لومی تیمار شده با بیوچار ضایعات گردو دارای مقادیر بالاتر پتاسیم و سدیم و مقدار کمتر فسفر، کلسیم، منیزیم و روی نسبت به خاک شاهد می‌باشد (نواک و همکاران، 2009). بیوچار ناشی از نی خیزران نیز می‌تواند سبب کاهش آبشویی آمونیم به مقدار 15 درصد طی 70 روز شود (دینگ و همکاران، 2010). اگر چه مطالعاتی در مورد تأثیر بیوچار بر وضعیت آبشویی و چرخه عناصر و مقادیر عناصر غذایی آزاد شده به خاک وجود دارد اما تاکنون مطالعه‌ای در مورد تأثیر بیوچار بر تغییر شکل‌های مختلف پتاسیم خاک صورت نگرفته است. مقادیر بالای پتاسیم موجود در بقایای گیاهی و در بیوچار حاصل از آنها می‌تواند تأثیر مهمی بر وضعیت پتاسیم خاک‌ها داشته باشد. از آنجا که پتاسیم یکی از عناصر پرمصرف گیاهی بوده و کمبود آن در خاک‌های آهکی ایران بخصوص خاک‌های شدیداً آهکی مناطق جنوبی و خاک‌های شنی که بیشتر به راسته انتی‌سولز، اینسپتی‌سولز و هیستوسولز تعلق دارند رو به گسترش است (نجفی قیری و همکاران، 2011) می‌توان بیوچار را به عنوان ماده اصلاح‌کننده

آنالیز آماری

جهت آنالیز آماری نمونه‌ها از نرم افزار SPSS 15.0 و جهت مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح 5 درصد معنی‌داری استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک و بیوچارهای مورد استفاده

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول 1 آورده شده است. خاک مورد مطالعه شدیداً آهکی بوده و دارای شوری کم می‌باشد. با توجه به نتایج تحقیقات نجفی قیری و همکاران (2011) در مورد ویژگی‌های خاک‌های استان فارس، خاک انتخاب شده می‌تواند نماینده خوبی از خاک‌های جنوب استان فارس باشد.

بعضی از ویژگی‌های بیوچارهای تولید شده در جدول 2 نشان داده شده است. درصد کاهش وزن بقایای گیاهی بر اثر گرماکافت از 63 تا 70 متغیر بود. بیوچارهای تولیدی همگی دارای پ‌هش قلیایی بودند. بیشترین پ‌هش مربوط به بیوچار گندم به مقدار 10/04 بود. بیوچار تولیدی از بقایای گندم بیشتر از سایر بیوچارها دارای املاح محلول بود. مقدار پتاسیم محلول از قابلیت هدایت الکتریکی پیروی کرده و بیشترین مقدار آن مربوط به بیوچار گندم بود. مقدار پتاسیم موجود در بیوچار ارتباط نزدیکی با نوع مواد استفاده شده برای تولید آن دارد. مقدار پتاسیم در بیوچارهای تولید شده از چوب بلوط 0/4 درصد، بقایای ذرت 1/3 درصد، لجن فاضلاب 0/1 تا 0/6 درصد و کودهای مرغی 5 تا 7/5 درصد توسط محققان مختلف اندازه‌گیری شده است (آگبلور و همکاران، 2010؛ احمد و همکاران، 2012؛ حسین و همکاران، 2011؛ جیا و همکاران، 2012).

تأثیر بیوچارها بر ویژگی‌های خاک و قابلیت استفاده عناصر

جدول 2 تغییرات ویژگی‌های خاک در اثر کاربرد 5 نوع بیوچار را نشان می‌دهد. کاربرد بیوچار پنبه و کنجد سبب افزایش معنی‌دار پ‌هش خاک شد. این در حالی است که کاربرد بیوچار بقایای گندم پ‌هش خاک را 0/04 نسبت به شاهد کاهش داد. تأثیر بیوچار بقایای ذرت و چوب ذرت بر تغییر پ‌هش خاک معنی‌دار نبود. لیانگ و همکاران (2006) افزایش قابل ملاحظه در پ‌هش خاک در نتیجه کاربرد بیوچار را نشان دادند. همه بیوچارها سبب افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک شدند. اما مقدار افزایش بستگی به نوع بیوچار مورد استفاده داشت.

دستگاه جذب اتمی (AAS; PG 990, PG Instruments Ltd. UK) اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری شکل‌های مختلف پتاسیم به روش هلمک و اسپارکز (1996) انجام شد. پتاسیم محلول در عصاره اشباع خاک، پتاسیم تبدلی خاک با استات آمونیم یک نرمال پ‌هش 7 و پتاسیم غیرتبدلی با اسید نیتریک یک نرمال جوشان اندازه‌گیری گردید. غلظت پتاسیم در عصاره‌ها با استفاده از دستگاه شعله‌سنج مدل Corning 405 (ELE,UK) اندازه‌گیری شد. پتاسیم غیرتبدلی با کسر مقدار پتاسیم استخراج شده به وسیله اسید نیتریک از استات آمونیم محاسبه گردید.

تهیه بیوچار

بقایای گیاهان گندم، ذرت، چوب ذرت، پنبه و کنجد مورد استفاده در تهیه بیوچار از مزارع شهرستان داراب جمع‌آوری گردید. بقایای جمع‌آوری شده پس از هواخشک شدن، آسیاب شده و از الک 2 میلیمتری عبور داده شدند. مقدار 80 گرم از هر نمونه در بشر 250 میلی‌لیتر قرار داده شده و به وسیله ورقه‌های آلومینومی پوشانده شدند تا شرایط دسترسی اکسیژن محدود ایجاد گردد. گرماکافت نمونه‌ها در کوره الکتریکی در دمای 500 درجه سلسیوس به مدت 3 ساعت صورت گرفت. آهنگ افزایش دمای کوره حدود 10 درجه سلسیوس بر دقیقه بود. یک شبانه روز به نمونه‌ها اجازه داده شد تا به دمای محیط برسند و سپس وزن نهایی آنها اندازه‌گیری گردید. درصد کاهش وزن بقایا بر اثر گرماکافت و تبدیل به بیوچار نیز محاسبه گردید. همچنین مقادیر پ‌هش، قابلیت هدایت الکتریکی و پتاسیم محلول نیز به روش مشابه گفته شده در مورد خاک اندازه‌گیری گردید.

تیمارها و انکوباسیون

دو گرم از هر بیوچار با 100 گرم خاک با سه تکرار مخلوط گردید. نمونه خاک بدون بیوچار به عنوان شاهد در نظر گرفته شد. نمونه‌ها در ظروف پلاستیکی و در دمای 25 ± 2 درجه سلسیوس و رطوبت ظرفیت زراعی به مدت 90 روز انکوباسیون شدند. مقدار رطوبت ظرفیت زراعی نصف مقدار رطوبت اشباع خاک در نظر گرفته شد. مقدار رطوبت نمونه‌ها با توزین روزانه در حد ظرفیت زراعی نگهداری گردید. پس از پایان 90 روز نمونه‌ها هواخشک شده و مقدار پ‌هش، قابلیت هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربن آلی و همچنین شکل‌های مختلف پتاسیم شامل محلول، تبدلی و غیرتبدلی، مقدار نیتروژن کل، فسفر، آهن، منگنز، مس و روی قابل استفاده آنها به روش‌های بیان شده برای خاک اولیه اندازه‌گیری شد.

جدول 1- برخی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

ویژگی	شن %	سیلت %	رس %	ماده آلی %	CCE %	پ هاش	EC dS m ⁻¹	شکل‌های پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		
								محلول	تبادلی	غیرتبادلی
مقدار	30	46	24	0/7	52	7/87	1/3	28/7	197/2	811/3

CCE: کربنات کلسیم معادل؛ EC: قابلیت هدایت الکتریکی

جدول 2- ویژگی‌های بیوچارهای تولید شده از پنج نوع بقایای گیاهی مختلف

پتاسیم محلول (g kg ⁻¹)	قابلیت هدایت الکتریکی (dS m ⁻¹)	پ هاش	درصد	
			باقیمانده ¹ (%)	نوع بیوچار
15/4	0/23	9/79	33	بقایای ذرت
16/2	0/24	9/62	30	چوب ذرت
23/3	0/47	10/04	36	بقایای گندم
11/8	0/23	9/54	38	بقایای پنبه
21/8	0/39	9/42	37	بقایای کنجد

1- درصد باقیمانده از تقسیم وزن بیوچار تولیدی به وزن بقایای قبل از گرم‌کافت بر حسب به دست آمده است.

دمای تولید آن داشته و با افزایش دمای تولید، مقدار نیتروژن کاهش یافته و مقدار عناصر کم مصرف افزایش می‌یابد. نلیسن و همکاران (2012) نتیجه‌گیری کردند که بیوچارها پس از افزوده شدن به خاک سبب افزایش سرعت تغییر شکل نیتروژن در کوتاه‌مدت و در نتیجه افزایش نیتروژن قابل استفاده خاک از طریق معدنی شدن مواد آلی مقاوم خاک و غیرمتحرک شدن نیتروژن به شکل ترکیبات آلی لبایل می‌شوند. موخرجی و زیمین (2013) بیان کردند که بیوچارها پس از افزوده شدن به خاک می‌توانند مقدار قابل توجهی عناصری مانند نیتروژن و فسفر به خاک آزاد کنند.

قابلیت استفاده فسفر خاک تحت تأثیر کاربرد بیوچار و نوع آن قرار نگرفت. بیوچار پنبه و کنجد قابلیت استفاده آهن را به‌طور معنی‌داری افزایش دادند. همه بیوچارها قابلیت استفاده منگنز را از 3/9 (برای بیوچار چوب ذرت) تا 12/2 میلی‌گرم بر کیلوگرم (برای بیوچار کنجد) افزایش دادند. مقدار روی قابل استفاده تحت تأثیر کاربرد بیوچار قرار نگرفت ولی بیوچار کنجد مقدار آن را به‌طور معنی‌داری کاهش داد. مقدار مس خاک با کاربرد بیوچار تغییر معنی‌داری نشان نداد. مندز و همکاران (2012) با کاربرد لجن فاضلاب و بیوچار تولید شده از آن به یک خاک مدیترانه‌ای (شنی و غیرآهکی) نشان دادند که قابلیت استفاده روی و مس در نتیجه کاربرد بیوچار نسبت به لجن فاضلاب کاهش معنی‌داری نشان داد. تفاوت رفتار عناصری مانند مس و روی در این مطالعه می‌تواند به دلیل

طوری‌که بیوچار چوب ذرت سبب افزایش 0/11 دسی‌زیمنس بر متر شوری خاک گردید در حالی که این افزایش برای بیوچار گندم 0/27 دسی‌زیمنس بر متر بود. تفاوت معنی‌داری بین مقدار افزایش قابلیت هدایت الکتریکی به‌وسیله بیوچار حاصل از بقایای ذرت، بقایای پنبه و بقایای کنجد وجود نداشت. به نظر می‌رسد افزایش قابلیت هدایت الکتریکی مربوط به افزوده شده املاح موجود در بیوچار و همچنین تأثیر بیوچار بر ترکیبات خاک و آزادسازی عناصر محلول باشد. به هر حال مطالعه دقیق‌تری نیاز می‌باشد. مقدار کربن آلی خاک هم تحت تأثیر بیوچار و نوع آن قرار گرفت. هر 5 نوع بیوچار سبب افزایش معنی‌دار مقدار کربن آلی خاک گردیدند؛ اما بیوچار کنجد بیشترین تأثیر را نشان داد. تفاوت معنی‌داری بین دیگر بیوچارها از نظر مقدار افزایش کربن آلی وجود نداشت. ظرفیت تبادل کاتیونی خاک تحت تأثیر کاربرد بیوچار قرار نگرفت که این موافق نتایج هافلی و همکاران (2011) و متفاوت با نتایج لیانگ و همکاران (2006) است که بیان کردند بیوچار سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌شود.

نتایج جدول 3 همچنین نشان می‌دهد که بیوچار چوب ذرت مقدار نیتروژن خاک را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. حسین و همکاران (2010) نشان دادند که کاربرد بیوچار فاضلابها سبب افزایش قابلیت استفاده نیتروژن و فسفر در خاک شد. البته حسین و همکاران (2011) نشان دادند که مقدار عناصر در بیوچار بستگی به

تفاوت اساسی در برخی ویژگیها مانند مقدار کربنات کلسیم معادل و مقدار رس و در نتیجه ظرفیت تبادل کاتیونی خاک که از فاکتورهای اثر گذار بر قابلیت استفاده این عناصر هستند (هاولین و همکاران، 1999) باشد.

تأثیر بیوچارهای مورد استفاده بر تغییر شکل‌های مختلف پتاسیم

نگاهی به جدول 4 نشان می‌دهد که پتاسیم محلول خاک تحت تأثیر افزودن بیوچار و نوع آن قرار گرفته است. به‌طور کلی افزودن بیوچار سبب افزایش 4/4 تا 7 برابری مقدار پتاسیم محلول شد. بیشترین مقدار افزایش مربوط به بیوچارهای حاصل از بقایای کنجد و گندم (به ترتیب افزایش 193 و 181 میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. ضریب همبستگی مثبت و معنی‌دار بین پتاسیم محلول موجود در بیوچار (جدول 2) و پتاسیم محلول خاک تیمار شده با بیوچار می‌تواند تفاوت بیوچارهای به کار رفته را در مقدار افزایش پتاسیم محلول نشان دهد. بیوچارهای حاصل از بقایا و چوب ذرت و بقایای پنبه اگر چه تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش پتاسیم محلول خاک داشتند اما تفاوت معنی‌داری بین این سه نوع بیوچار در افزایش پتاسیم محلول مشاهده نشد.

روند تغییرات پتاسیم تبادل‌ی خاک در نتیجه کاربرد بیوچارهای مختلف (جدول 3) نشان می‌دهد که پتاسیم تبادل‌ی به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. این نتایج با یافته‌های گاسکین و همکاران (2010) و اولارینا و همکاران (2011) همخوانی دارد. مقدار افزایش پتاسیم تبادل‌ی از 144 میلی‌گرم بر کیلوگرم با کاربرد بیوچار بقایای پنبه تا 209 میلی‌گرم بر کیلوگرم با کاربرد بقایای کنجد متغیر بود. معمولاً ارتباط مثبت و معنی‌داری بین مقدار پتاسیم تبادل‌ی خاک و ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک‌های آهکی وجود دارد (نجفی قیری و همکاران، 2011)؛ اما از آنجا که بیوچارهای کاربردی تأثیری بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نداشته‌اند می‌توان نتیجه گرفت که این افزایش ناشی از ارتباط تعادلی بین شکل‌های پتاسیم می‌باشد. این بدین معنی است که با کاربرد بیوچار به خاک، پتاسیم موجود در آن وارد فاز محلول و به علت تعادل بین پتاسیم محلول و تبادل‌ی مقداری نیز وارد فاز تبادل‌ی می‌شود و در نتیجه هر دو شکل محلول و تبادل‌ی پتاسیم افزایش می‌یابد. ارتباط مثبت و معنی‌دار (ضریب همبستگی $0/97^{**}$) بین پتاسیم محلول و تبادل‌ی در خاک شاهد و در خاک تیمار شده با بیوچار می‌تواند صحت این فرضیه را اثبات کند یعنی با افزایش پتاسیم محلول در همه نمونه‌ها، پتاسیم تبادل‌ی نیز افزایش یافته است. این ارتباط بین پتاسیم غیرتبادل‌ی با پتاسیم

تبادل‌ی و محلول (ضریب همبستگی به ترتیب $0/99^{**}$ و $0/96^{**}$) نیز مشاهده گردید که بیانگر روابط تعادلی این سه شکل پتاسیم می‌باشد. شکل غیرتبادل‌ی پتاسیم که پتاسیم تثبیت شده بین لایه‌های کانی‌های موجود در خاک را شامل می‌شود نیز تحت تأثیر کاربرد بیوچار قرار گرفت. کاربرد بیوچار سبب افزایش پتاسیم غیرتبادل‌ی از 290 میلی‌گرم بر کیلوگرم در نمونه تیمار شده با بقایای پنبه تا 532 میلی‌گرم بر کیلوگرم در نمونه تیمار شده با بقایای کنجد گردید. این افزایش که در نتیجه پخشیدگی یون‌های پتاسیم محلول به بین لایه‌های کانی‌هایی مانند ایلیت، ورمیکولیت و اسمکتیت و تثبیت آنهاست می‌تواند سبب تغییر و تحول جزئی کانی‌های خاک و تبدیل این کانی‌های به میکا و ایلیت شود (نجفی قیری و ابطحی، 2013؛ اسپارکز و هوانگ، 1985). هر چند این تغییرات جزئی ممکن است در مطالعات کانی‌شناسی محسوس نباشد اما نیاز به مطالعات دقیق‌تر در زمینه تأثیر بیوچار بر مینرالوژی خاک در دراز مدت و کوتاه مدت ضروری است.

نتایج هافلی و همکاران (2011) در مورد تأثیراتی که کاربرد بیوچار ناشی از بقایای برنج بر عناصر قلبایی خاک دارد نشان داد که بیوچار سبب افزایش قابلیت استفاده پتاسیم گردید اما مقدار کلسیم، منیزیم و سدیم تبادل‌ی را کاهش داد.

درصد اشباع پتاسیم خاک نیز تحت تأثیر کاربرد بیوچار قرار گرفت. بیشترین تأثیر مربوط به بیوچارهای حاصل از بقایای گندم و کنجد بود. افزایش درصد اشباع پتاسیم با کاربرد بیوچار نشان از تبادل کاتیون‌های جذب شده روی میسل‌ها با پتاسیم محلول ناشی از کاربرد بیوچار می‌باشد. از آنجا که عمده کاتیون‌های تبادل‌ی در خاک‌های ایران شامل کلسیم و منیزیم است می‌توان نتیجه گیری کرد که افزودن بیوچار سبب افزایش غلظت کلسیم و منیزیم در محلول خاک می‌شود.

به‌طور کلی افزودن بیوچار سبب افزایش فوق‌العاده پتاسیم محلول در نمونه‌های خاک گردیده و با توجه به روابط تعادلی بین این سه شکل پتاسیم و زمان کافی انکوباسیون نمونه‌ها (90 روز) یون‌های پتاسیم از محلول خاک به نقاط تبادل‌ی و غیرتبادل‌ی پخشیده می‌شوند. نوع بیوچار تولید شده نیز بر مقدار افزایش شکل‌های مختلف پتاسیم تأثیر داشت؛ طوری‌که بیوچار حاصل از بقایای کنجد و گندم مقدار هر شکل پتاسیم شامل محلول، تبادل‌ی و غیرتبادل‌ی را نسبت به سایر بیوچارها به‌طور معنی‌داری افزایش داد.

جدول 3- تأثیر پنج نوع بیوچار مورد استفاده بر برخی ویژگی‌های خاک و قابلیت استفاده عناصر.

تیمار	په‌هاش	قابلیت هدایت الکتریکی	ظرفیت تبادل کاتیونی	کربن آلی	نیتروژن کل	فسفر	آهن	منگنز	روی	مس
		dS m^{-1}	$\text{Cmol}(+) \text{kg}^{-1}$	%	%					
										mg kg^{-1}
شاهد	8/24 ^b	^a 0/24	^a 13/5	^c 0/59	^b 0/36	^a 48/4	^b 13/9	^c 8/1	^a 1/8	^a 2/7
بقایای ذرت	8/22 ^{bc}	^{bc} 0/37	^a 13/1	^b 0/79	^b 0/31	^a 47/9	^b 15/5	^{ab} 12/3	^a 1/8	^a 2/3
چوب ذرت	8/26 ^b	^c 0/35	^a 13/1	^b 0/85	^a 0/47	^a 48/8	^b 13/8	^{ab} 12/0	^a 2/1	^a 2/3
بقایای گندم	8/20 ^c	^a 0/51	^a 12/9	^b 0/77	^b 0/35	^a 47/1	^b 14/2	^b 16/0	^a 1/7	^a 2/4
بقایای پنبه	8/44 ^a	^b 0/37	^a 13/4	^b 0/84	^b 0/29	^a 47/3	^a 17/8	^b 14/6	^a 1/8	^a 2/7
بقایای کنجد	8/39 ^a	^b 0/41	^a 13/4	^a 1/12	^b 0/30	^a 44/8	^a 17/7	^a 20/3	^b 0/7	^a 2/7

در هر ستون میانگین‌هایی با حروف مشابه فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال 5 درصد (روش دانکن) می‌باشند

جدول 4- مقدار پتاسیم محلول، تبدلی و غیرتبدلی در نمونه خاک‌های

شاهد و خاک‌های تیمار شده با بیوچار

تیمار	شکل‌های پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)			اشباع پتاسیم 1 (درصد)
	محلول	تبدلی	غیرتبدلی	
شاهد	32 ^c	192 ^c	774 ^c	3/7 ^c
کلش ذرت	148 ^b	345 ^b	1095 ^b	6/7 ^b
بلال ذرت	148 ^b	348 ^b	1092 ^b	6/8 ^b
بقایای گندم	213 ^a	385 ^a	1282 ^a	7/6 ^a
بقایای پنبه	142 ^b	336 ^b	1064 ^b	6/5 ^b
بقایای کنجد	225 ^a	401 ^a	1306 ^a	7/7 ^a

¹ اشباع پتاسیم از تقسیم مقدار پتاسیم تبدلی بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به دست می‌آید

مصرف (بخصوص پتاسیم) می‌گردد. افزایش قابل ملاحظه مقادیر شکل‌های مختلف پتاسیم شامل محلول، تبدلی و غیرتبدلی و در نتیجه پتاسیم قابل استفاده (مجموع محلول و تبدلی) با کاربرد انواع بیوچارهای استفاده شده در این پژوهش نشان می‌دهد که می‌توان بیوچار را به عنوان یک منبع حاوی پتاسیم در مدیریت حاصلخیزی این عنصر در خاک‌های دچار کمبود پتاسیم بخصوص در خاک‌های استان فارس (نجفی قیری و همکاران، 2011) مدنظر قرار داد و مطالعات بیشتری را روی آن انجام داد. به هر حال عواقب سوء ناشی از کاربرد این مواد بر برخی ویژگی‌های خاک مانند افزایش شوری و افزایش پ هاش خاک نیز باید در نظر گرفته شود.

تغییر شکل‌های پتاسیم از حالت محلول موجود در بیوچار به شکل‌های تبدلی و غیرتبدلی در خاک بر قابلیت استفاده این عنصر در خاک تأثیر کمی دارد؛ چراکه پتاسیم تبدلی مانند پتاسیم محلول قابل استفاده گیاه می‌باشد و مقدار قابل ملاحظه‌ای از پتاسیم غیرتبدلی نیز در طول فصل رشد گیاه آزاد شده و جذب گیاه می‌شود (هاولین و همکاران، 1999). به هر حال تبدیل شکل محلول پتاسیم به شکل تبدلی و غیرتبدلی از آشنویی این عنصر مخصوصاً در خاک‌های بافت درشت و در مناطق با بارندگی زیاد جلوگیری کرده، ظرفیت بافری پتاسیم خاک را افزایش داده و با توجه به تبادل آن با کاتیون‌هایی مانند کلسیم، منیزیم و سدیم و گاهی آمونیوم موجود بر نقاط تبدلی می‌تواند ترکیب یونی محلول خاک را تغییر دهد. نیاز به مطالعات بیشتر در زمینه تأثیر بیوچار بر ترکیب یونی محلول خاک پیشنهاد می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزودن بیوچار سبب تغییرات در برخی ویژگی‌های خاک مانند قابلیت هدایت الکتریکی، په‌هاش و مقدار کربن آلی و همچنین قابلیت استفاده برخی عناصر پرمصرف و کم

فهرست منابع:

1. Agblevor, F.A., S. Beis, S.S. Kim, R. Tarrant, N.O. Mante. 2010. Biocrude oils from the fast pyrolysis of poultry litter and hardwood. *Waste Management*.30(2):298-307.
2. Ahmad, M., S. Soo Lee, J.E. Yang, H.-M. Ro, Y. Han Lee, Y. Sik Ok. 2012. Effects of soil dilution and amendments (mussel shell, cow bone, and biochar) on Pb availability and phytotoxicity in military shooting range soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*.79(0):225-31.
3. Antal, M.J., M. Grønli. 2003. The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*.42(8):1619-40.
4. Chapman, H.D. 1965. Cation-exchange capacity. *Methods of soil analysis Part 2 Chemical and microbiological properties. (methodsofsoilanb)*:891-901.
5. Ding, Y., Y.-X. Liu, W.-X. Wu, D.-Z. Shi, M. Yang, Z.-K. Zhong. 2010. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. *Water, Air, & Soil Pollution*.213(1-4):47-55.
6. Gaskin, J.W., R.A. Speir, K. Harris, K. Das, R.D. Lee, L.A. Morris, et al. 2010. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agronomy Journal*.102(2):623-33.
7. Haefele, S.M., Y. Konboon, W. Wongboon, S. Amarante, A.A. Maarifat, E.M. Pfeiffer, et al. 2011. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems. *Field Crops Research*.121(3):430-40.
8. Havlin, J., J. Beaton, S. Tisdale, W. Nelson. 1999. *Soil Fertility and Fertilizers*. Ed. Prentice Hall, New Jersey.
9. Helmke, P., D. Sparks, A. Page, R. Loeppert, P. Soltanpour, M. Tabatabai, et al. 1996. Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. *Methods of soil analysis Part 3-chemical methods*.551-74.
10. Hossain, M. K., Strezov, V., Yin Chan, K., Nelson, P.F., 2010. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*) . *Chemosphere*, 78(9): 1167-1171.
11. Hossain, M.K., V. Strezov, K.Y. Chan, A. Ziolkowski, P.F. Nelson. 2011. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management*.92(1):223-8.
12. Jia, J., B. Li, Z. Chen, Z. Xie, Z. Xiong. 2012. Effects of biochar application on vegetable production and emissions of N₂O and CH₄. *Soil Science and Plant Nutrition*.58(4):503-9.
13. Laird, D.A. 2008. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal*.100(1):178-81.
14. Laird, D.A., P. Fleming, D.D. Davis, R. Horton, B. Wang, D.L. Karlen. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*.158(3-4):443-9.
15. Lehmann, J., S. Joseph. 2009. *Biochar for environmental management: science and technology*: Earthscan.
16. Liang, B., J. Lehmann, D. Solomon, J. Kinyangi, J. Grossman, B. O'Neill, et al. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*.70(5):1719-30.
17. Lindsay, W.L., and Norvell, W.A., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of American Journal* 42: 969-974.
18. Méndez, A., Gómez, A., Paz-Ferreiro, J., Gascó, G., 2012. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. *Chemosphere*, 89(11): 1354-1359.

19. Mukherjee, A., A.R. Zimmerman. 2013. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures. *Geoderma*.193–194(0):122-30.
20. Najafi-Ghiri, M., A. Abtahi. 2013. Potassium Fixation in Soil Size Fractions of Arid Soils. *Soil and Water Research*.8(2):49-55.
21. Najafi-Ghiri, M., A. Abtahi, H. Owliaie, S.S. Hashemi, H. Koohkan. 2011. Factors Affecting Potassium Pools Distribution in Calcareous Soils of Southern Iran. *Arid Land Research and Management*.25(4):313-27.
22. Méndez, A., Gómez, A., Paz-Ferreiro, J., Gascó, G., 2012. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. *Chemosphere*, 89(11): 1354-1359.
23. Nelson, D.W., L.E. Sommers, D. Sparks, A. Page, P. Helmke, R. Loeppert, et al. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis Part 3-chemical methods*.961-1010.
24. Nelissen, V., Rütting, T., Huygens, D., Staelens, J., Ruyschaert, G., Boeckx, P., 2012. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 55(0): 20-27.
25. Novak, J.M., I. Lima, B. Xing, J.W. Gaskin, C. Steiner, K. Das, et al. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*.3(1):2.
26. Olarieta, J.R., R. Padrò, G. Masip, R. Rodríguez-Ochoa, E. Tello. 2011. 'Formiguers', a historical system of soil fertilization (and biochar production?). *Agriculture, Ecosystems & Environment*.140(1–2):27-33.
27. Olsen, S.R., Kole, C.W., Wantanabe, F.S., Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *Circular*. US Dept of Agriculture, p. 939.
28. Rowell, D.L. 1994. *Soil science: methods and applications*: Longman Group Limited, Longman Scientific & Technical.
29. Sparks, D., P. Huang. 1985. Physical chemistry of soil potassium. *Potassium in agriculture. (potassiuminagri)*:201-76.
30. Staff, U.S.L. 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. US Dept Agr Handbook.6.
31. Tang, J., W. Zhu, R. Kookana, A. Katayama. 2013. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. *Journal of Bioscience and Bioengineering*.116(6):653-9.