نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و ششم / شماره دوم / تابستان ۱۴۰۱/ مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۳۹ تا ۵۹

تأثیر بیوچارهای اسیدی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و قابلیت جذب عناصر غذایی خاک‌های آهکی

ایمان حسن‌پور[۱*]، مهران شیروانی[۱]، محمدعلی حاج‌عباسی[۱] و محمدمهدی مجیدی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۲۸)

چکیده

کمبود مواد آلی و pH قلیایی خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک از مهم‌ترین دلایل کم بودن قابلیت جذب برخی عناصر غذایی برای گیاه در این خاک‌ها هستند. یکی از راه‌های ارتقاء ویژگی شیمیایی و حاصلخیزی خاک‌های آهکی کاربرد مواد آلی از جمله بیوچار تولید شده از ضایعات آلی است. اما بیوچارها عمدتاً دارای pH قلیایی بوده و کاربرد مقادیر زیاد آنها می‌تواند کمبود برخی عناصر غذایی را برای گیاه در خاک‌های آهکی تشدید کند. پیرولیز ضایعات خاص در شرایط دمایی کنترل شده می‌تواند منجر به تولید بیوچار با pH اسیدی شود. در مطالعه حاضر تأثیر بیوچارهای اسیدی به‌عنوان اصلاح‌کننده بر چندین ویژگی شیمیایی دو خاک آهکی استان اصفهان انجام شد. تیمارها شامل دو نوع بیوچار (مخروط کاج و شلتوک برنج) در مقادیر یک، سه و شش درصد، دو نوع خاک (با بافت‌های لوم شنی (تیران) و لوم رسی (لورک)) و دو زمان انکوباسیون یک و شش ماه به‌همراه ۴ شاهد و در مجموع ۲۸ نمونه بودند. کاربرد بیوچار در دو خاک قلیایی توانست برخی ویژگی‌های شیمیایی و حاصلخیزی خاک را بهبود ببخشد. نتایج نشان داد کاربرد بیوچار اندکی pH خاک را کاهش و هدایت الکتریکی خاک را افزایش داد. به‌علاوه، میزان کربن آلی، نیتروژن کل و غلظت منگنز قابل جذب خاک در همه تیمارها و غلظت فسفر، پتاسیم، آهن، روی و مس قابل جذب خاک در اکثر تیمارها افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد نشان داد. استفاده از بیوچار به میزان ۶ درصد سبب بیشترین تغییرات در پارامترهای مورد اندازه‌گیری در هر دو نوع خاک شد. به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد بیوچار تولید شده از مخروط کاج و شلتوک برنج می‌تواند به‌عنوان یک ماده بهساز مناسب برای ارتقاء ویژگی‌های شیمیایی و حاصلخیزی خاک‌های آهکی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بیوچار، اصلاح‌کننده آلی خاک، ضایعات آلی خاک، شلتوک برنج، مخروط کاج

۱. گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران
۲. گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: i_hasanpour@yahoo.com

مقدمه

در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک، قلیایی بودن pH و کمبود مواد آلی قدرت حاصلخیزی خاک را کاهش می‌دهد (۲). در دسترس بودن برخی از عناصر غذایی از جمله فسفر، آهن، روی، مس و منگنز در خاک‌های آهکی بسیار کم است، اگرچه غلظت کل این عناصر ممکن است به‌نسبت زیاد باشد (۱۱). صفات مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی و از جمله حاصلخیزی خاک‌ها را می‌توان با اضافه کردن مواد آلی بهبود بخشید. مثلاً اضافه کردن بیوچار به خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک با محتوای ماده آلی کم می‌تواند باعث بهبود وضعیت مواد غذایی و درنتیجه افزایش فعالیت میکروبی این خاک‌ها شود. بیوچار یک محصول کربنی است که در اثر تجزیه مواد آلی در غیاب اکسیژن و در اثر فرایند پیرولیز تولید می‌شود. ترکیب مواد غذایی در بیوچارها و pH آنها به نوع ماده اولیه و دمای پیرولیز بستگی دارد. در گزارش نامگی و همکاران (۲۰۱۰) افزودن بیوچار حاصل از پیرولیز چوب درخت Bluegum به‌طور قابل توجهی غلظت روی قابل دسترس خاک را افزایش داد. گزارش نامگی و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد بیوچار شلتوک برنج تولید شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر مثبت بیشتری بر میزان فسفر قابل دسترس خاک نسبت به نمونه‌های تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد داشت. به‌طور کلی تأثیر بیوچار بر وضعیت مواد غذایی در خاک‌های آهکی به خوبی شناخته نشده است. نتایجی که در هر گزارش داده شد وابسته به نوع خاک، نوع زیست‌توده بیوچار، شرایط تجزیه در اثر حرارت و میزان اضافه شدن بیوچار به خاک است (۲۷).

بیوچار در ابتدای فرایند تجزیه میکروبی در خاک ترکیبات ساده خود را از دست می‌دهد و در ادامه با انجام فرایندهای اکسیداسیون و پلیمریزاسیون در اثر تراکم مواد باقی‌مانده ترکیباتی با ساختار پایدار به‌وجود می‌آید (۳). بخش نرم مواد آلی قابل تجزیه بوده، به‌سرعت مصرف شده و تشکیل زیست توده و متابولیت‌های مختلف میکروبی می‌دهد و قسمت‌های سخت مواد آلی به‌طور موقت در خاک جمع می‌شود. این عمل در محیطی اتفاق می‌افتد که متخلخل بوده و سطح بسیار زیادی را برای جذب زیست‌توده و متابولیت‌های میکروبی عرضه می‌کند (۳۸). هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن، گوگرد و فسفر اغلب اتم‌های درون شبکه حلقوی بیوچار را تشکیل می‌دهند (۵). ویژگی‌هایی از قبیل آبدوستی یا آبگریزی، اسیدیته و قلیائیت بیوچار را به وجود گروه‌های عامل سطح آن نسبت می‌دهند. بیوچار تازه تولید شده معمولاً ماهیت آب‌گریزی دارد که دلیل آن غیرقطبی بودن سطح آن است (۳۱). مقدار pH بیوچار متغیر است ولی معمولاً بیشتر از ۹ گزارش شده که به‌دلیل وجود کربنات‌ها در آن است (۴۷). اختلاط بیوچار با خاک می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند ساختمان، توزیع منافذ خاک و تراکم، تهویه خاک، ظرفیت نگه‌داشت رطوبت، رشد گیاه و کارایی آن را بهبود ببخشد (۱۵).

ماده اولیه مورد استفاده برای تولید بیوچار، مخلوط هیدروکربن‌ها شامل کربن، هیدروژن و اکسیژن با محتوای کمی سولفور و نیتروژن است که شامل مواد زیستی مختلف از جمله ضایعات گیاهی، پسماندهای چوب، نیشکر، خاک اره، پسماندهای کشاورزی مانند مخروط کاج، جامدهای زیستی، علف‌ها، گیاهان آبی (۴۹) و ضایعات صنایع کاغذ، کود حیوانی، پسماندهای مواد غذایی و لجن فاضلاب هستند (۸). اغلب کشاورزان شلتوک برنج را در مزارع می‌سوزانند و همین عامل باعث آلودگی محیط زیست و کاهش باروری زمین و انتشار میزان زیادی دی‌اکسید کربن (گاز گلخانه‌ای) می‌شود. این پوسته بسیار مقرون به صرفه برای کشاورزی، خوراک دام و سوخت کارخانه‌ها است. پوسته برنج به‌عنوان یک محصول فرعی با ارزش است که بیشتر به‌عنوان جاذب به‌خصوص برای جذب فلزهای سنگین به‌جای روش‌های گران‌قیمت استفاده می‌شود (۳۰).

در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک، کمبود مواد آلی و pH قلیایی عامل اصلی کمبود اکثر عناصر غذایی برای گیاه است. جذب و رسوب فسفر و برخی عناصر غذایی کم‌نیاز

گیاه مانند آهن، منگنز، روی و مس سبب کاهش غلظت این عناصر در محلول خاک و بروز کمبود آنها در گیاهان می‌شود. کاربرد بیوچار می‌تواند با افزودن عناصر غذایی و مواد آلی به خاک یک روش مناسب برای افزایش قابلیت دسترسی زیستی عناصر غذایی برای گیاه در این خاک‌ها باشد. سو و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند با افزایش میزان بیوچار به خاک‌های قلیایی جذب فسفر در فاز جامد کاهش و دسترسی آن در فاز محلول افزایش می‌یابد (۲۳).

بیوچارهایی که تاکنون تولید شده‌اند اغلب pH قلیایی داشته و مناسب خاک‌های اسیدی هستند. تولید بیوچار اسیدی برای کاربرد درخاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب است ولی مطالعات زیادی در این خصوص صورت نگرفته است. بنابراین، در پژوهش حاضر تأثیر بیوچار اسیدی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و غلظت عناصر غذایی خاک‌های دو منطقه اصفهان بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از دو نوع خاک لوم شنی و لوم رسی استفاده شد. نمونه خاک لوم شنی از منطقه همت‌آباد تیران در استان اصفهان با مختصات جغرافیایی "۴۶/۵ '۱۳ °۵۱ طول شرقی و "۲۰/۲ '۴۰ °۳۲ عرض شمالی و خاک لوم رسی از مزرعه لورک دانشگاه صنعتی اصفهان در شهرستان نجف‌آباد با مختصات جغرافیایی "۸/۹ '۲۳ °۵۱ طول شرقی و "۲۲/۳ '۳۲ °۳۲ عرض شمالی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری در شهریورماه سال ۱۳۹۷ نمونه‌برداری شد. سپس خاک‌ها هواخشک شده و پس از عبور از الک دو میلی‌متری برای انجام آزمایش به محل آزمایشگاه منتقل شد.

به‌منظور انتخاب بهترین نوع ماده آلی اولیه برای تولید بیوچار دارای pH مناسب، هفت نوع پسماند آلی مختلف شامل چیپس چوب، مخلوط برگ درختان، برگ‌های مخروط کاج و همچنین مخروط کاج از دانشگاه صنعتی اصفهان، شلتوک برنج از منطقه فلاورجان، بقایای شاخساره سیب‌زمینی از منطقه سمیرم و کاه گندم از منطقه بوئین‌میاندشت به‌عنوان ماده اولیه تهیه شدند. مواد اولیه پس از آماده‌سازی، طی چند مرحله با آب معمولی و سپس با آب مقطر شسته شدند. سپس بقایای گیاهی به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک و پس از آسیاب کردن از الک یک میلی‌متر عبور داده و برای تولید بیوچار استفاده شدند.

به‌منظور تولید بیوچار، بقایای گیاهی آسیاب شده داخل کوره مخصوص تولید بیوچار و در شرایط نبود اکسیژن تحت فشار ۲ اتمسفر گاز نیتروژن قرار داده شدند. این کوره شامل محفظه‌ای با لوله‌های رابط ورودی گاز و خروجی شیرابه و ترموکوپل است. شرایط بدون اکسیژن به‌گونه‌ای فراهم شد که گاز نیتروژن از رابط ورودی به داخل محفظه کوره هدایت و تصاعدات و محصولات جانبی آن از رابط خروجی جمع‌آوری شود. هر کدام از مواد خام اولیه در دماهای ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد داخل کوره پیرولیز شدند. برنامه دمایی با نرخ افزایش دمای ۲/۵ درجه بر دقیقه و زمان ماند ۴ ساعت اعمال شد (۲۵). سپس نمونه‌های بیوچار تولید شده به آزمایشگاه منتقل شدند و pH آنها در مخلوط بیوچار و آب مقطر در نسبت ۱:۲۰ اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. با توجه به اینکه در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد ماده آلی به‌خوبی به بیوچار تبدیل نشد و همچنین با مقایسه عملکرد بیوچارهای تولید شده در دمای ۳۰۰ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، درنهایت دو نوع ماده آلی شلتوک برنج و مخروط کاج و دمای پیرولیز ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌دلیل مناسب بودن pH و عملکرد بیوچار تولیدی برای آزمایش‌های اصلی انتخاب شدند.

آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی انجام شد. تیمارها شامل دو نوع خاک (سبک و سنگین)، دو نوع بیوچار (مخروط کاج و شلتوک برنج)، سه مقدار بیوچار (۱٪، ۳٪، ۶٪) و دو دوره زمانی انکوباسیون (۳۰ روزه و ۱۸۰ روزه) درمجموع ۲۴ تیمار به‌همراه ۴ شاهد (۲ نوع خاک و ۲ زمان انکوباسیون) و در کل ۲۸ تیمار در سه تکرار بودند. تیمارها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ثابت

جدول ۱. pH بیوچارهای تولید شده از مواد اولیه مختلف

-	ماده آلی اولیه	بیوچار ۲۵۰°C	بیوچار ۳۰۰°C	بیوچار ۳۵۰°C
چیپس چوب	۵/۱۶	۵/۶۸	۷/۶۱	۹/۲۷
برگ درختان مختلف	۵/۸۷	۶/۴۳	۸/۰۶	۹/۳۴
شلتوک برنج	۶/۲۸	۵/۵۲	۵/۷۱	۶/۱۷
بقایای سیب‌زمینی	۴/۹۳	۶/۷۹	۹/۰۶	۱۰/۱۶
برگ کاج	۴/۷۷	۵/۵۳	۴/۴۰	۵/۰۶
مخروط کاج	۵/۷۳	۵/۴۷	۶/۳۵	۶/۱۹
کاه گندم	۴/۹۱	۵/۸۸	۴/۳۲	۶/۷۲

۶۰ درصد ظرفیت زراعی درون انکوباتور نگهداری شدند.

مقادیر pH و EC نمونه‌های بیوچار در حالت تعلیق در آب با نسبت ۱:۲۰ به‌ترتیب توسط دستگاه pH متر (827-Swise) و دستگاه EC متر (507-CC) (۴۴)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات آمونیوم (۱۸)، کربن آلی به‌روش والکلی- بلک (۱۲)، مقدار کل عناصر به روش هضم تر توسط اسید نیتریک (USEPA Method 3050) (۱۸)، فسفر کل به روش رنگ‌سنجی وانادات (۹)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (۴۴)، درصد خاکستر به روش ASTM D-2866 (۴۵)، عناصر کربن، هیدروژن، نیتروژن و گوگرد توسط دستگاه Analyzer-CHNS (Elementar, Vario EL III) (۱۴) و مورفولوژی سطحی نمونه‌ها توسط دستگاه SEM-FE (QUANTA FEG 450) (۱۳) تعیین شدند.

pH و EC خاک‌ها در حالت تعلیق در آب با نسبت ۱:۵ به‌ترتیب توسط دستگاه pH متر (827-Swise) و دستگاه EC متر (507-CC) (۴۱)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات آمونیوم (۴۶)، کربن آلی به روش والکلی- بلک (۳۶)، نیتروژن به روش اکسایش تر توسط دستگاه کلدال Kjeltec Analyzer 2300 Unit(۷)، فسفر قابل جذب به روش عصاره‌گیری اولسن و اندازه‌گیری توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (JENWAY 6505 UV/VIS) (۲۹)، پتاسیم به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم یک نرمال و اندازه‌گیری توسط دستگاه فلیم فتومتر (410 Corning Flame Photometer) (۲۱) و غلظت فلزات آهن، روی، مس و منگنز نمونه‌ها به روش عصاره‌گیری با DTPA توسط دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی مدل پرکین المر ۳۰۳۰ (۱۷) (۳۲) (۴۰) تعیین شدند.

آنالیزهای آماری (تجزیه واریانس) با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه 9.4 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح ۵ درصد انجام شد. رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۶ رسم شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های شیمیایی دو خاک مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۲ ذکر شده است. مقدار pH هر دو خاک در محدوده قلیایی و هدایت الکتریکی خاک لورک بیشتر از خاک تیران بود. بافت خاک منطقه تیران، از نوع لوم شنی و بافت خاک منطقه لورک لوم رسی بود.

ویژگی‌های دو نوع بیوچار تولید شده در جدول ۳ ذکر شده است. دمای کم کوره سبب بروز خاصیت اسیدی بیوچارها شده است. نتایج نشان می‌دهد شوری بیوچار مخروط کاج از بیوچار شلتوک برنج بیشتر است و ظرفیت تبادل کاتیونی دو نوع بیوچار نسبت به خاک زیاد نیست. درصد کربن آلی بیوچار مخروط کاج از کربن آلی بیوچار شلتوک برنج بیشتر است.

جدول ۲. ویژگی‌های شیمیایی دو نوع خاک استفاده شده در این مطالعه پیش از تیمار با بیوچار

صفت	خاک منطقه تیران	خاک منطقه لورک
pH	۷/۷۰±۰/۱۵	۸/۱۰±۰/۰۲
قابلیت هدایت الکتریکی ($dS\ m^{-1}$)	۰/۳۶±۰/۰۲	۱/۵۰±۰/۰۱
ظرفیت تبادل کاتیونی ($cmol_+ kg^{-1}$)	۱۱/۳۰±۰/۷۶	۱۳/۱۰±۰/۷۷
کربن آلی (٪)	۰/۶۴±۰/۰۵	۰/۷۳۵±۰/۰۸
نیتروژن کل (٪)	۰/۱۲±۰/۰۰۲	۰/۱۲±۰/۰۰۲
فسفر قابل جذب ($mg\ kg^{-1}$)	۲۳۶±۰/۵۴	۴۲/۶۰±۰/۷۱
پتاسیم قابل جذب ($mg\ kg^{-1}$)	۵۲۸±۱۸/۲	۲۵۳۴±۱۰/۵۳
آهن قابل جذب ($mg\ kg^{-1}$)	۱۲/۱۰±۰/۱۴	۵/۸۰±۰/۰۲
روی قابل جذب ($mg\ kg^{-1}$)	۶/۵۰±۰/۰۵	۲/۱۸±۰/۰۲
مس قابل جذب ($mg\ kg^{-1}$)	۱/۵۰±۰/۰۶	۱/۳۰±۰/۰۸
منگنز قابل جذب ($mg\ kg^{-1}$)	۱۵/۵۰±۱/۷	۲۰/۴۰±۰/۷

± مقادیر انحراف معیار

جدول ۳. ویژگی‌های شیمیایی نمونه‌های بیوچار تولید شده در دمای ۳۰۰°C

صفت	بیوچار شلتوک برنج	بیوچار مخروط کاج
pH	۵/۶۰±۰/۱۹	۶/۶۰±۰/۰۹
قابلیت هدایت الکتریکی ($dS\ m^{-1}$)	۰/۳۱±۰/۰۱	۰/۷۲±۰/۰۳
ظرفیت تبادل کاتیونی ($cmol_+ kg^{-1}$)	۹/۳۰±۰/۳۶	۱۰/۸۰±۰/۳۸
فسفر کل ($mg\ kg^{-1}$)	۵۰۸±۸/۶۷	۶۶۹±۸/۸
پتاسیم کل ($mg\ kg^{-1}$)	۴۷۵۹±۱۸۲	۴۸۶۴±۱۸۲
آهن کل ($mg\ kg^{-1}$)	۴۰۹±۴/۸	۳۵۳۳±۱۶/۱
روی کل ($mg\ kg^{-1}$)	۳۹/۹±۴/۹	۷۹/۹±۴/۸
مس کل ($mg\ kg^{-1}$)	۱۱/۳±۱/۶	۲۱/۸±۰/۵۸
منگنز کل ($mg\ kg^{-1}$)	۱۲۴ ±۹۹/۴	۶۸/۳±۲/۸
سدیم کل ($mg\ kg^{-1}$)	۳۳۳۸±۲۵۴	۳۵۰۸±۱۴۸/۶
کلسیم کل ($mg\ kg^{-1}$)	۱۰۸±۳/۳	۴۷۳±۲۰/۳
منیزیم کل ($mg\ kg^{-1}$)	۱۱۰۸±۲۵/۶	۳۶۴۳±۲۴/۷
کربنات کلسیم (٪)	۰/۶۶±۰/۲۹	۳/۸۰±۰/۵۷۷
خاکستر (٪)	۳۱/۳±۲/۱	۱۰/۳۳±۰/۵۷
عملکرد (٪)	۵۲/۹±۲/۶	۴۸/۷±۴/۱

± مقادیر انحراف معیار

جدول ۴. درصد جرمی اتم‌ها و نسبت آنها در بیوچارهای تولید شده در دمای ۳۰۰°C

بیوچار	کربن	هیدروژن	نیتروژن	گوگرد	اکسیژن
شلتوک برنج	۴۳/۲۱	۳/۷۳	۰/۵۲	۰/۱۷	۲۱/۰۷
مخروط کاج	۷۷/۴۲	۴/۸۲	۰/۸۳	۰/۲۹	۶/۳۱

$$\%O = 100\% - (\%C + \%N + \%H + \%S + \%Ash)$$

مقدار نیتروژن مخروط کاج نیز بیشتر از نیتروژن بیوچار شلتوک برنج بود. مقادیر عناصر فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس، سدیم، کلسیم و منیزیم بیوچار مخروط کاج نیز از بیوچار شلتوک برنج بیشتر بود. درصد عملکرد و درصد خاکستر بیوچار شلتوک برنج از بیوچار مخروط کاج بیشتر مشاهده شد. یکی از دلایلی که pH بیوچار مخروط کاج از pH بیوچار شلتوک برنج بیشتر است، درصد زیادتر کربنات کلسیم بیوچار مخروط کاج نسبت به بیوچار شلتوک برنج است.

جدول ۴ عناصر کربن، هیدروژن، نیتروژن و گوگرد اندازه‌گیری شده از طریق دستگاه C,H,N,S Analyser را نشان می‌دهد.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی دو نوع بیوچار در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به مورفولوژی مشاهده شده، سطوح بیوچار مخروط کاج و شلتوک برنج بسیار نامنظم و ناهمگن هستند و دارای روزنه‌ها و حفره‌های داخلی بسیار زیادی هستند. این ساختار متخلخل می‌توانند به‌عنوان یک جاذب قوی برای رطوبت و عناصر غذایی عمل کنند (۶). قطر یک نمونه از منافذ بیوچار شلتوک برنج ۷۹/۶۳ میکرومتر تعیین شد که در برابر قطر یون‌های محلول بسیار بزرگ‌تر است، بنابراین عناصر مختلف موجود در محلول خاک می‌توانند به‌راحتی در آنها نفوذ کنند. در تصویر مربوط به بیوچارها مشخص است که منافذ لانه زنبوری موجود در بیوچار مخروط کاج بیشتر از شلتوک برنج است. در پژوهش بهار ادواج و همکاران نیز (۲۰۰۴) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بیوچار پوسته برنج در دمای ۳۵۰ درجه سانتی گراد وجود تعداد زیادی ساختارهای دکمه‌ای شکل با منافذ ریز در کنار هم را نشان داد. این پژوهشگران نشان دادند با افزایش دمای پیرولیز به ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد منافذ بیوچار شلتوک برنج افزایش می‌یابد (۴).

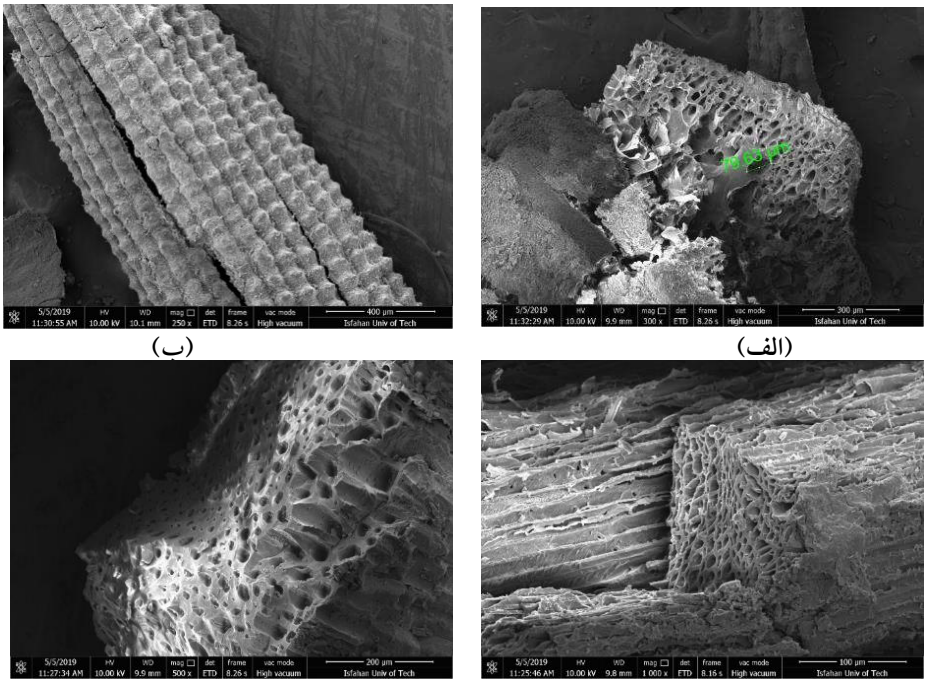
در بررسی‌های آماری نتایج با توجه به اهمیت اثر نوع و مقدار بیوچارها بر خاک ابتدا نتایج حاصل از برش‌دهی فیزیکی به‌منظور آنالیز دو فاکتوره در قالب نمودار و سپس نتایج آنالیز کلی چهار فاکتوره به‌صورت جدول توضیح داده می‌شود.

تأثیر بیوچار و زمان انکوباسیون بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

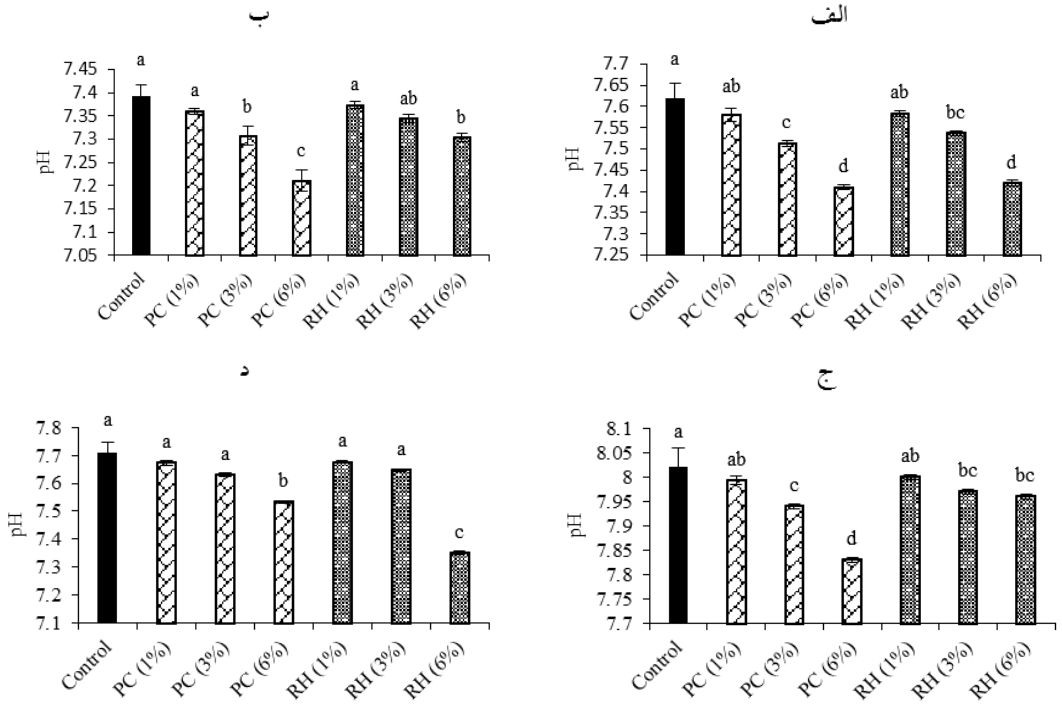
pH

نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثر بیوچارهای مخروط کاج و شلتوک برنج در دو خاک لوم شنی و لوم رسی در دو زمان یک ماه و شش ماه در شکل ۲ ارائه شده است. مقدار pH خاک لوم شنی پیش از تیمار با بیوچار، ۷/۷ و در خاک لوم رسی ۸/۱ بود اما پس از تیمار با بیوچار نسبت به شاهد pH آنها کاهش یافت، به‌طوری که در همه موارد تیمار ۶ درصد بیوچار، بیشترین کاهش pH را در هر دو نوع خاک ایجاد کرده و این تأثیر معنی‌دار شده است. بیشترین تأثیر بیوچار بر کاهش pH در خاک لوم رسی پس از زمان شش ماه انکوباسیون در تیمار ۶ درصد بیوچار شلتوک برنج مشاهده شد که سبب کاهش معنی‌دار ۰/۳۵ واحدی نسبت به نمونه شاهد شده است. در جدول ۵ (تجزیه واریانس کلی) مقدار بیوچار، نوع خاک و زمان و آثار متقابل نوع بیوچار در زمان و نوع خاک در زمان از نظر آماری در سطح یک درصد معنی‌دار است.

در خاک‌های شاهد کاهش pH نسبت به زمان پیش از تیمار با بیوچار مشاهده می‌شود. مقدار pH بیوچار شلتوک برنج ۵/۶ و بیوچار مخروط کاج برابر ۶/۶ بوده است.



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از بیوچار شلتوک برنج (الف-ب) و بیوچار مخروط کاج (ج-د) در دو بزرگنمایی متفاوت



شکل ۲. نمودار مقایسه میانگین اثر نوع (PC مخروط کاج و RH شلتوک برنج) و مقدار بیوچار (یک، سه و شش درصد وزنی) بر pH خاک (الف- خاک لوم شنی زمان یک ماه انکوباسیون، ب- خاک لوم شنی زمان شش ماه انکوباسیون، ج- خاک لوم رسی زمان یک ماه انکوباسیون، د- خاک لوم رسی زمان شش ماه انکوباسیون)

جدول ۵. تجزیه واریانس کلی تأثیر تیمارهای آزمایشی بر برخی پارامترهای شیمیایی خاک

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات										
		pH	EC (dS m^{-1})	Fe (mg kg^{-1})	Zn (mg kg^{-1})	Cu (mg kg^{-1})	O.C	Mn (mg kg^{-1})	P (mg kg^{-1})	K (mg kg^{-1})	CEC (cmol+ kg^{-1})	%N
نوع بیوچار	۱	۰/۰۰۴۲*	۰/۰۳۱۵**	۲۱۷/۷۸**	۲/۶۳**	۰/۰۰۱۱^{ns}	۰/۳۱۸۲**	۲۱۶/۳۲**	۵۳۶/۸۵**	۲۴۸۰۲/۲۴**	۳/۶۰**	۰/۰۰۵۰**
مقدار بیوچار	۲	۰/۱۴۸۶**	۰/۰۵۳۹**	۲/۷۴**	۲/۳۰**	۰/۰۰۸۴**	۲/۴۳**	۱۳۱۵/۴۶**	۸۹۵/۲۵**	۴۳۹۲۱/۸۴**	۰/۲۹۴۴^{ns}	۰/۰۱۲۵**
نوع خاک	۱	۲/۲۷**	۶/۴۸**	۳۴۷/۸۶**	۲۳۰/۷۳**	۰/۵۲۹۰**	۰/۳۲۷۴**	۲۲/۵۸**	۳۷۷۸۹۶/۳۹**	۵۱۷۵۳/۸۰**	۶/۰۰۳**	۰/۰۰۰۴**
زمان	۱	۱/۳۹**	۳/۹۳**	۶۲/۶۸**	۷/۹۰**	۳/۰۰۳**	۱۳/۶۷**	۷۲۶۹/۷۷**	۲۴۴/۲۰**	۵۱۵۲۵/۸۵**	۱۲۰/۲۱**	۰/۰۵۸۷**
مقدار بیوچار × نوع بیوچار	۲	۰/۰۰۰۶^{ns}	۰/۰۰۴۰**	۱۳/۷۷**	۰/۱۶۱۴**	۰/۰۶۱۹**	۰/۰۹۲۲**	۱۷/۹۱**	۵۳۱/۱۹**	۲۲۵۲۸/۲۲**	۰/۵۶۶۲^{ns}	۰/۰۰۰۲*
مقدار بیوچار × نوع خاک	۲	۰/۰۰۲۵^{ns}	۰/۰۰۰۹^{ns}	۱/۱۸**	۱/۷۵**	۰/۰۰۰۱^{ns}	۰/۰۲۹۴^{ns}	۶/۴۳*	۲۵۸۵/۱۰**	۶۰۶۹/۴۳**	۱/۷۱*	۰/۰۰۰۳**
مقدار بیوچار × زمان	۲	۰/۰۰۳۸*	۰/۰۰۲۸*	۵/۲۷**	۲/۵۸**	۰/۰۰۷۸**	۰/۲۳۷۱**	۴/۸۰*	۱۰۸/۴۴**	۱۳۱۶۰/۷۲**	۵/۸۹**	۰/۰۰۰۰۶^{ns}
نوع بیوچار × نوع خاک	۱	۰/۰۰۳۹*	۰/۰۰۱۸^{ns}	۲/۵۲**	۰/۲۴۳۹**	۰/۰۴۶۴**	۰/۰۰۸۰^{ns}	۰/۰۶۷۲^{ns}	۱۴/۲۲**	۸۰۰/۹۸^{ns}	۴/۵۵**	۰/۰۰۰۰۲^{ns}
نوع بیوچار × زمان	۱	۰/۰۰۶۲**	۰/۰۰۰۶^{ns}	۱۵/۴۰**	۱/۲۸**	۰/۰۱۳۴**	۰/۰۰۷۹^{ns}	۲۹۶/۰۵**	۲۴۳/۷۷**	۲۷۷۵۲/۸۹**	۱۲/۰۱۲**	۰/۰۰۰۰۲^{ns}
نوع خاک × زمان	۱	۰/۱۳۴۳**	۱/۱۲**	۵۴/۸۸**	۳/۶۹**	۰/۰۰۰۰۶^{ns}	۰/۰۳۴۸^{ns}	۱۴۸/۱۵**	۲۱/۴۳**	۳۷۱۸۳۷/۵۶**	۲۱/۶۲**	۰/۰۰۱۴**
مقدار بیوچار × نوع بیوچار × نوع خاک	۲	۰/۰۰۲۷*	۰/۰۰۱۹^{ns}	۰/۲۹۳۶**	۰/۱۰۷۶**	۰/۰۱۱۲**	۰/۰۰۶۰^{ns}	۱۵/۰۷**	۷۸۰/۴۱**	۱۰۸۲/۹۷*	۱/۳۵*	۰/۰۰۰۳**
مقدار بیوچار × نوع بیوچار × زمان	۲	۰/۰۰۶۸**	۰/۰۰۰۲^{ns}	۰/۶۱۲۱**	۰/۳۸۴۵**	۰/۰۱۶۹**	۰/۰۰۱۵^{ns}	۴۴/۴۲**	۲۹۹/۶۳**	۱۷۲۲/۱۹**	۱/۲۲^{ns}	۰/۰۰۰۰۱^{ns}
مقدار بیوچار × نوع خاک × زمان	۲	۰/۰۱۶۸**	۰/۰۰۰۵^{ns}	۰/۱۱۹۴**	۱/۶۶**	۰/۰۳۶۲**	۰/۰۲۵۵^{ns}	۲۵/۵۰**	۲۲/۵۲**	۱۶۹۱۵/۷۶**	۰/۱۱۸۷^{ns}	۰/۰۰۰۵**
نوع بیوچار × نوع خاک × زمان	۱	۰/۰۲۳۸**	۰/۰۰۳۳*	۴/۹۴**	۰/۰۷۷۲*	۰/۰۲۳۲**	۰/۰۱۵۸^{ns}	۶۶/۸۹**	۱۱۰/۲۹**	۲۷۶۲۱/۷۴**	۰/۰۰۳۲^{ns}	۰/۰۰۰۷**
مقدار بیوچار × نوع بیوچار × نوع خاک × زمان	۲	۰/۰۱۷۷**	۰/۰۰۱۰^{ns}	۳/۷۴**	۰/۰۸۳۶**	۰/۰۰۳۷*	۰/۰۱۵۲^{ns}	۲۴/۰۴**	۱۰۹/۸۴**	۲۶۴۲۲/۶۲**	۱/۷۷۳۱^{ns}	۰/۰۰۰۲*
خطا	۴۸	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۷	۰/۰۱۵۵	۰/۰۱۱۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۹	۱/۴۵	۰/۵۹	۲۶۸/۶۲	۰/۳۹	۰/۰۰۰۰۴
ضریب تغییرات	–	۱/۳۷۳	۲/۷۸۹	۱/۴۴۴	۲/۵۰۳	۲/۴۱۴	۶/۹۸۹	۳/۹۶	۱/۵۹۹	۲/۰۶۸	۵/۹۶۲	۴/۱۵۴
ضریب تبیین	–	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۱	۰/۹۷

**و * به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد، ns غیر معنی‌دار

تجزیه بخش آلی بیوچار در خاک توسط ریزجانداران علاوه بر تولید CO_2 و اسید کربنیک سبب آزاد شدن برخی اسیدهای آلی با جرم مولکولی کم می‌شود. به‌علاوه، بعضی از گروه‌های عامل اکسیژن‌دار بیوچار دارای خاصیت اسیدی هستند که می‌توانند پس از تفکیک، سبب آزاد شدن پروتون به محلول شوند. کربوکسیلیک اسید، لاکتون‌ها، فنل‌ها و لاکتول‌ها شناخته شده‌ترین گروه‌های اسیدی هستند که سبب خاصیت اسیدی در بیوچار می‌شوند (۴۳). سانگ و همکاران (۲۰۱۲) طی آزمایشی که روی بیوچار کود مرغی تولید شده در دماهای ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام دادند به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما گروه‌های عامل اسیدی شامل فنولیک و کربوکسیلیک کاهش می‌یابد و خاصیت بیوچار قلیایی می‌شود (۴۵).

قابلیت هدایت الکتریکی (EC)

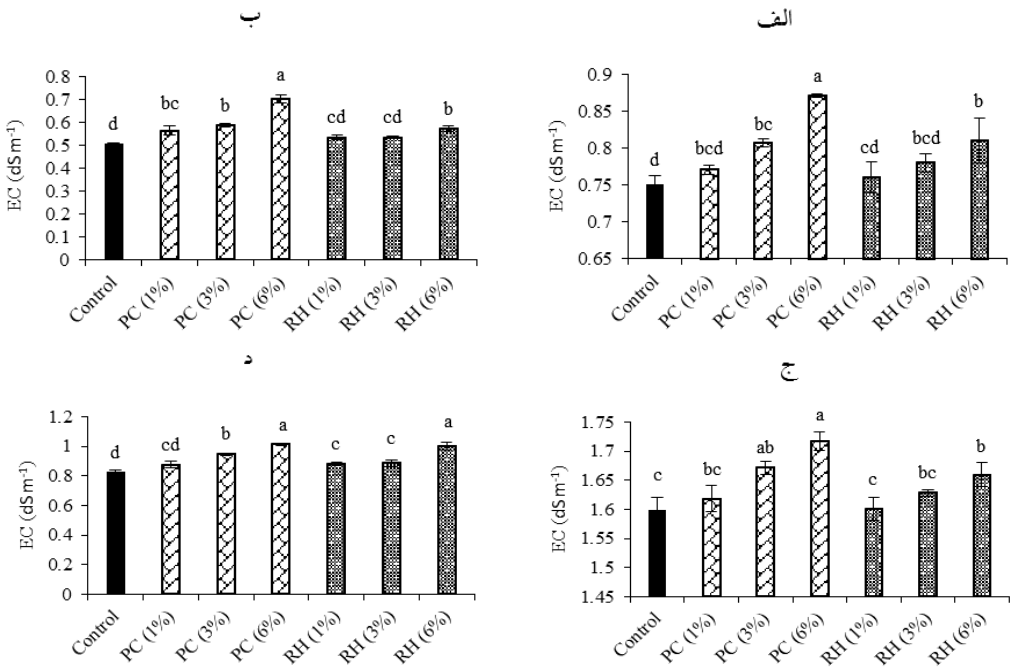
نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌های شکل ۳ نشان می‌دهد به‌طور کلی در اثر افزایش مقادیر بیوچار به خاک، مقدار EC نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری داشته، به‌طوری که در هر دو نوع خاک و هر دو زمان انکوباسیون، روند EC همواره افزایشی بوده است. دلیل افزایش EC به‌ویژه در ماه اول می‌تواند به‌دلیل آزادسازی تدریجی یون‌ها و نمک‌ها از بیوچار به محلول خاک باشد. تأثیر بیوچار مخروط کاج در افزایش EC خاک نسبت به بیوچار شلتوک برنج بیشتر بود که می‌تواند به‌دلیل زیادتر بودن میزان املاح در بیوچار مخروط کاج باشد. قابلیت هدایت الکتریکی در بیوچار شلتوک برنج dSm^{-1} ۰/۳۱ و در بیوچار مخروط کاج dSm^{-1} ۰/۷۱ بود. در تجزیه واریانس کلی اثر مقدار و نوع بیوچار، نوع خاک و زمان در سطح آماری یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵).

پژوهش‌ها نشان می‌دهند بیوچارهایی که در دماهای کم-تر از ۵۵۰°C تولید می‌شوند، سدیم و پتاسیم خود را در رطوبت اطراف آزاد می‌کنند. این بدین معنی است که کلسیم و منیزیم در ساختار آلی بیوچار و سدیم و پتاسیم در قسمت معدنی (خاکستر) حفظ می‌شوند (۲۶). نتایج پژوهش نجفی (۱۳۹۴) نشان داد افزودن بیوچار تولید شده در دمای ۵۰۰°C حاصل از مواد اولیه چوب پنبه و کاه و کلش گندم به خاک سبب افزایش هدایت الکتریکی خاک می‌شود (۳۴).

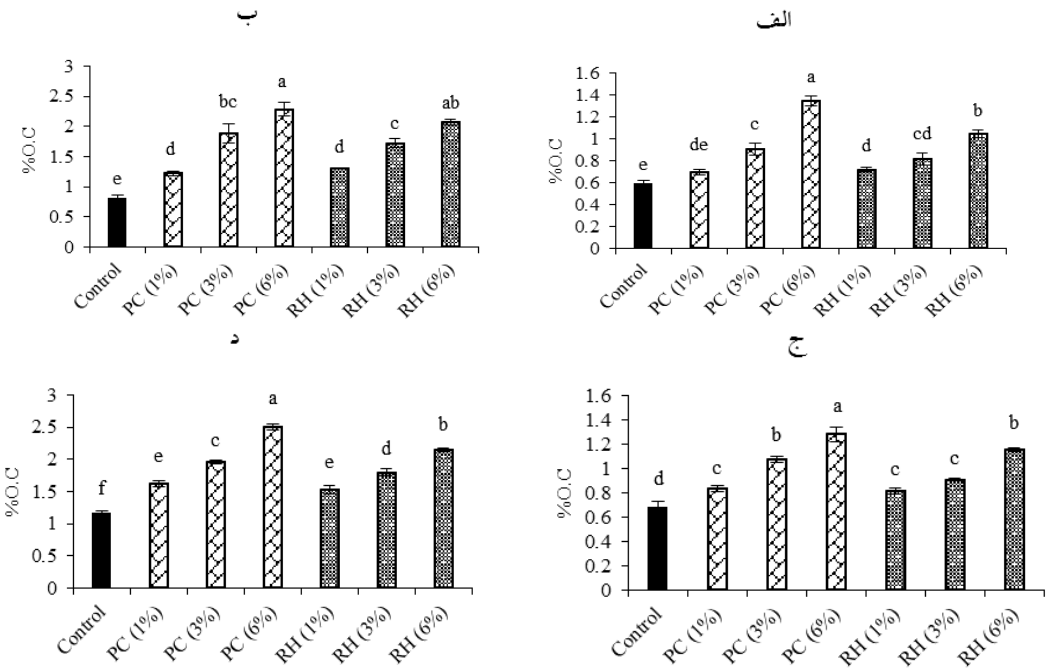
کربن آلی خاک

همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شد، درصد کربن آلی در بیوچار مخروط کاج بیشتر از بیوچار شلتوک برنج بود. کربن آلی در بیوچار شلتوک برنج ۴۳/۲ درصد و در بیوچار مخروط کاج برابر ۷۷/۴ درصد و با توجه به جدول ۲ این مقدار در خاک لوم شنی ۰/۶۴ درصد و در خاک لوم رسی برابر ۰/۷۴ درصد پیش از تیمار با بیوچار بود. با توجه به این تفاوت در محتوای کربن آلی بیوچار و خاک، افزودن بیوچار موجب افزایش معنی‌دار درصد کربن آلی خاک شد که دلیل آن افزایش درصد اضافه شدن بیوچار در تیمارهای مختلف (۱، ۳ و ۶ درصد) به خاک است. افزایش درصد کاربرد هر دو نوع بیوچار از یک به شش درصد (به غیر از تیمار ۱ درصد بیوچار مخروط کاج پس از گذشت یک ماه انکوباسیون)، سبب افزایش معنی‌دار درصد کربن آلی در هر دو نوع خاک و در هر دو زمان انکوباسیون نسبت به نمونه شاهد شد (شکل ۴). بیشترین تأثیر بیوچار بر کربن آلی خاک به میزان ۱/۴۸ درصد در تیمار ۶ درصد بیوچار مخروط کاج در خاک لوم شنی پس از گذشت شش ماه انکوباسیون مشاهده شد. اثر متقابل تیمارها در طرح آماری کلی فقط آثار دوگانه مقدار در نوع بیوچار و همچنین مقدار بیوچار در زمان در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار بودند (جدول ۵).

ابریشمکش و همکاران (۲۰۱۵) بیان کردند افزودن بیوچار شلتوک برنج به میزان ۰/۴، ۰/۸، ۱/۶، ۲/۴ و ۳/۳ درصد به خاک با بافت لوم رسی، سبب افزایش کربن آلی خاک از حدود ۶/۵ به حدود ۸/۵ گرم بر کیلوگرم شد (۱). نجفی (۱۳۹۴) نیز گزارش کرد کاربرد ۵ نوع بیوچار بقایای گیاهان گندم، ذرت، پنبه و کنجد موجب افزایش کربن آلی خاک شد (۳۴).



شکل ۳. نمودار مقایسه میانگین اثر نوع (PC مخروط کاج و RH شلتوک برنج) و مقدار بیوچار (یک، سه و شش درصد وزنی) بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک (الف- خاک لوم شنی زمان یک ماه انکوباسیون، ب- خاک لوم شنی زمان شش ماه انکوباسیون، ج- خاک لوم رسی زمان یک ماه انکوباسیون، د- خاک لوم رسی زمان شش ماه انکوباسیون)



شکل ۴. نمودار مقایسه میانگین اثر نوع (PC مخروط کاج و RH شلتوک برنج) و مقدار بیوچار (یک، سه و شش درصد وزنی) بر کربن آلی خاک (الف- خاک لوم شنی زمان یک ماه انکوباسیون، ب- خاک لوم شنی زمان شش ماه انکوباسیون، ج- خاک لوم رسی زمان یک ماه انکوباسیون، د- خاک لوم رسی زمان شش ماه انکوباسیون)

نیتروژن کل خاک

شکل ۵ نشان می‌دهد افزایش مقادیر بیوچار کاربردی از یک به شش درصد به‌طور کلی باعث افزایش معنی‌دار مقدار نیتروژن کل خاک نسبت به شاهد شده که تنها دلیل آن اضافه شدن نیتروژن موجود در بیوچار به خاک است. مقدار نیتروژن کل بیوچار شلتوک برنج ۰/۲۵ درصد و در بیوچار مخروط کاج ۰/۴۳ درصد و همچنین مقدار کل نیتروژن در هر دو خاک ۰/۱۲ درصد بود. بیشترین تأثیر با کاربرد بیوچار مخروط کاج ۶ درصد در خاک لوم شنی پس از گذشت شش ماه انکوباسیون مشاهده شد که سبب افزایش ۰/۰۷ درصد نیتروژن خاک نسبت به نمونه شاهد شد. در جدول تجزیه واریانس کلی، آثار یگانه مقدار بیوچار، نوع بیوچار، نوع خاک و زمان انکوباسیون و آثار دوگانه مقدار بیوچار در نوع خاک و نوع خاک در زمان در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار بودند (جدول ۵).

نلیسن و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند افزودن بیوچار ذرت سیلو به خاک سبب افزایش نیتروژن قابل استفاده خاک شد (۳۵). همچنین، موخرجی و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند پس از افزودن بیوچار چمن تولید شده در دمای ۲۵۰ و ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار قابل توجهی عناصر مانند نیتروژن به خاک‌های شنی و لوم رسی آزاد می‌شود. نتایج این پژوهشگران نشان داد تولید بیوچار در دمای کمتر، میزان آزاد شدن نیتروژن را افزایش می‌دهد (۳۳).

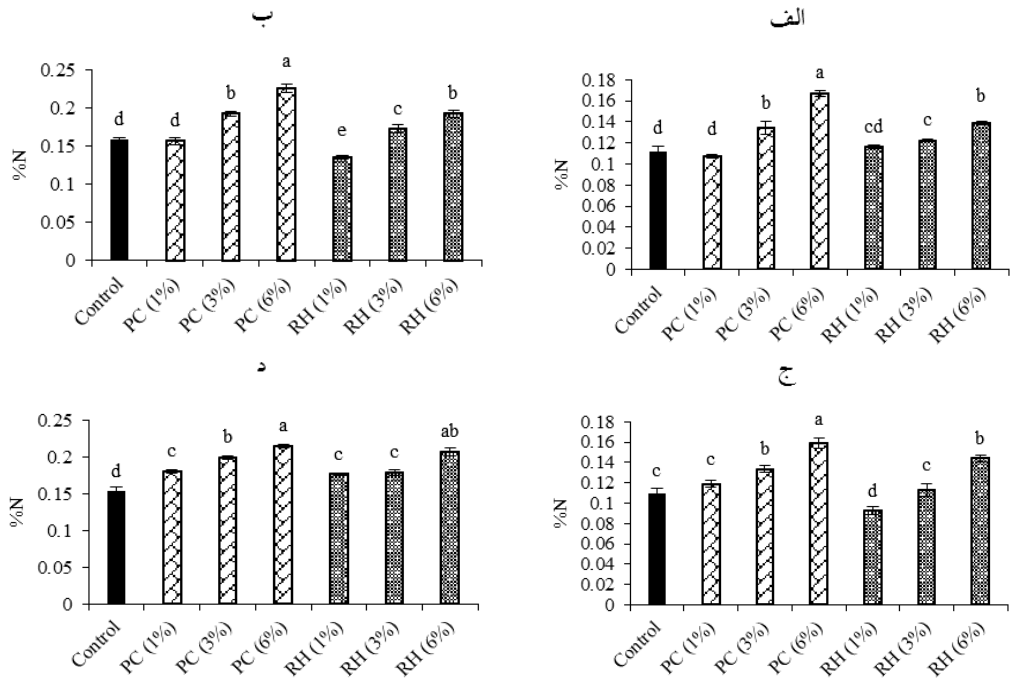
فسفر قابل جذب خاک

شکل ۶ تأثیر مقدار و نوع بیوچارها را بر فسفر قابل جذب خاک‌ها نشان می‌دهد. در خاک‌های لوم شنی کاربرد بیوچار سبب افزایش معنی‌دار فسفر قابل جذب خاک در تیمار ۶ درصد بیوچار و در هر دو زمان نسبت به شاهد شد. افزودن هر دو نوع بیوچار در تمامی مقادیر منجر به افزایش معنی‌دار فسفر قابل جذب در خاک لوم رسی پس از یک ماه انکوباسیون شد. در خاک لوم رسی مقادیر ۱ و ۳ درصد بیوچار مخروط کاج و مقدار ۱ درصد بیوچار شلتوک برنج باعث افزایش معنی‌دار فسفر قابل جذب خاک نسبت به شاهد پس از گذشت ۶ ماه شد. افزودن ۶ درصد بیوچار شلتوک برنج به خاک لوم شنی پس از یک ماه انکوباسیون سبب افزایش بیش از ۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر قابل جذب نسبت به شاهد شد. این افزایش به دلیل وجود ذخیره فسفر در بیوچار کاربردی است. مقدار فسفر کل بیوچار شلتوک برنج برابر با ۵۰۸ $mg\ kg^{-1}$ و در بیوچار مخروط کاج ۶۹۹ $mg\ kg^{-1}$ بود. با مشاهده جدول تجزیه واریانس کلی طرح فاکتوریل تصادفی، می‌توان دریافت که همه آثار اصلی، دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار شدند (جدول ۵).

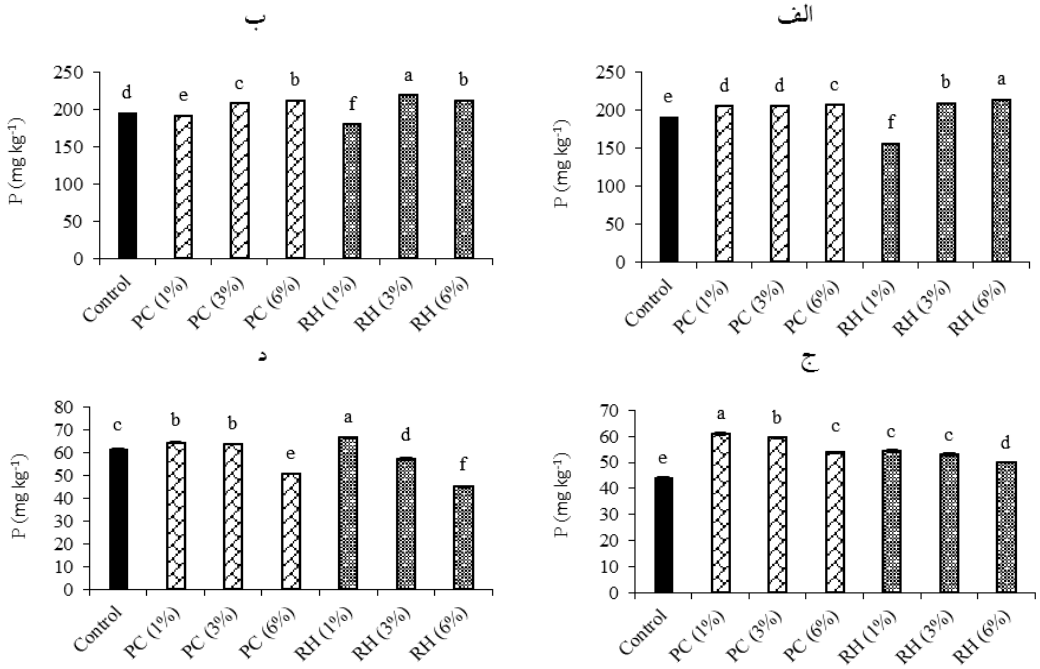
در پژوهش گاندل و همکاران (۲۰۰۶) در مورد بیوچار کاج و صنوبر، افزایش فراهمی فسفر به‌دلیل شکسته شدن پیوندهای فسفر آلی و درنتیجه باقی‌ماندن نمک‌های محلول فسفر در بیوچار گزارش شده است. تولید بیوچار در دمای کم باعث کاهش از بین رفتن عناصر غذایی و در دسترس بودن بیشتر آنها می‌شود (۲۰). سو و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند به‌کار بردن بیوچار کاه و کلش گندم باعث افزایش قابلیت دسترسی فسفر خاک از طریق کاهش جذب آن توسط ذره‌های جامد خاک می‌شود. افزایش اسیدیته ناشی از کاربرد بیوچار به‌دلیل ایجاد تغییرات در فعالیت کاتیون‌هایی که در واکنش با فسفر هستند (مثل آلومینیوم، آهن و کلسیم) نیز می‌تواند سبب افزایش واجذب فسفر از خاک شود (۴۸). کاهش در فراهمی فسفر در خاک با گذشت زمان را می‌توان به تثبیت تدریجی فسفر و تبدیل به فرم‌های کم محلول طی زمان نسبت داد (۲۲).

پتاسیم قابل جذب خاک

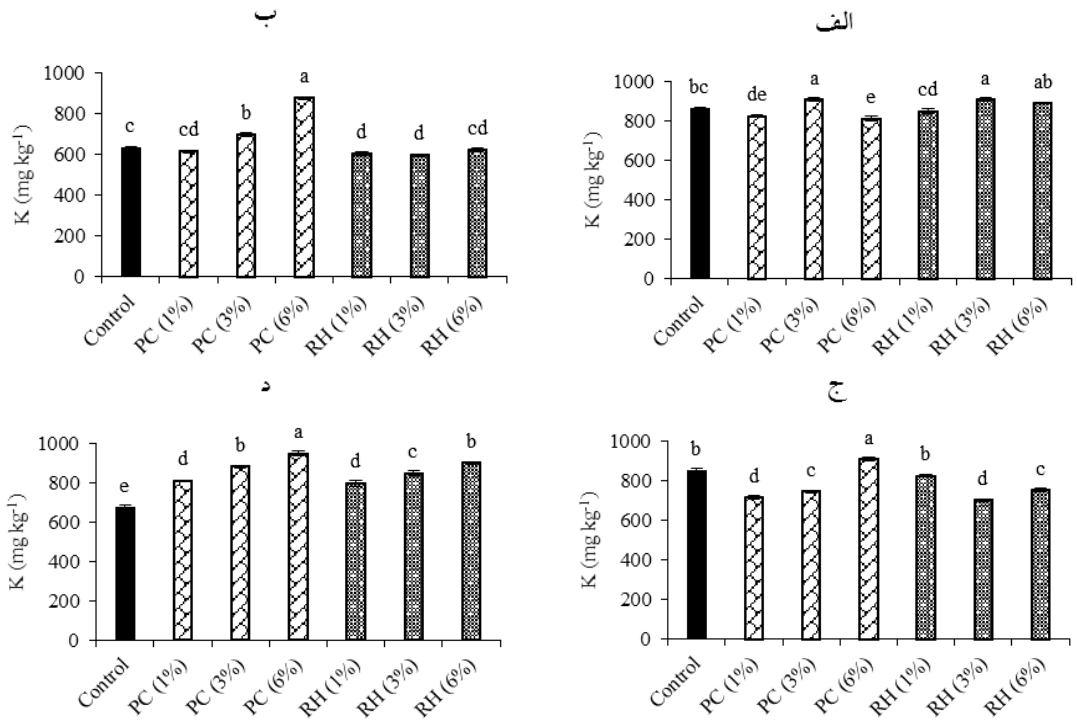
شکل ۷ نتایج مقایسه میانگین اثر مقدار و نوع بیوچار بر پتاسیم قابل جذب دو نوع خاک لوم شنی و لوم رسی پس از یک و شش ماه انکوباسیون را نشان می‌دهد. به‌طور کلی تأثیر کاربرد بیوچار مخروط کاج بر پتاسیم قابل جذب خاک بیشتر از بیوچار شلتوک برنج بود، زیرا مقدار پتاسیم مخروط کاج بیشتر از پتاسیم بیوچار شلتوک برنج بوده است. پتاسیم کل در بیوچار



شکل ۵. نمودار مقایسه میانگین اثر نوع (PC مخروط کاج و RH شلتوک برنج) و مقدار بیوچار (یک، سه و شش درصد وزنی) بر نیتروژن کل خاک (الف- خاک لوم شنی زمان یک ماه انکوباسیون، ب- خاک لوم شنی زمان شش ماه انکوباسیون، ج- خاک لوم رسی زمان یک ماه انکوباسیون، د- خاک لوم رسی زمان شش ماه انکوباسیون)



شکل ۶. نمودار مقایسه میانگین اثر نوع (PC مخروط کاج و RH شلتوک برنج) و مقدار بیوچار (یک، سه و شش درصد وزنی) بر فسفر قابل جذب خاک (الف- خاک لوم شنی زمان یک ماه انکوباسیون، ب- خاک لوم شنی زمان شش ماه انکوباسیون، ج- خاک لوم رسی زمان یک ماه انکوباسیون، د- خاک لوم رسی زمان شش ماه انکوباسیون)



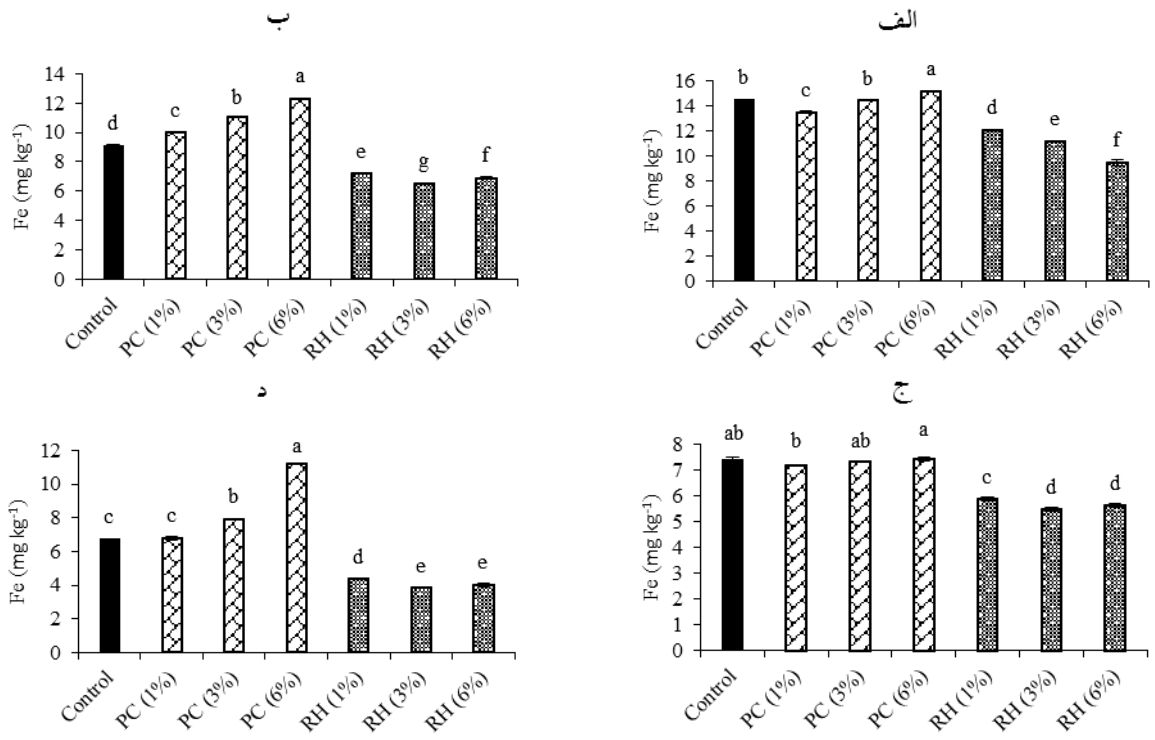
شکل ۷. نمودار مقایسه میانگین اثر نوع (PC مخروط کاج و RH شلتوک برنج) و مقدار بیوچار (یک، سه و شش درصد وزنی) بر پتاسیم قابل جذب خاک (الف- خاک لوم شنی زمان یک ماه انکوباسیون، ب- خاک لوم شنی زمان شش ماه انکوباسیون، ج- خاک لوم رسی زمان یک ماه انکوباسیون، د- خاک لوم رسی زمان شش ماه انکوباسیون)

شلتوک برنج ۴۷۵۹ mg kg^{-1} و در بیوچار مخروط کاج برابر مقدار ۴۸۶۴ mg kg^{-1} بود. کاربرد بیوچار شلتوک برنج از یک تا شش درصد نیز در خاک لوم رسی و در زمان شش ماه انکوباسیون تفاوت معنی‌داری با شاهد از نظر پتاسیم قابل جذب خاک ایجاد کرده است. بیشترین اختلاف معنی‌دار مقدار پتاسیم قابل جذب در تیمار ۶ درصد بیوچار مخروط کاج در خاک لوم رسی به مقدار بیش از ۲۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم پس از شش ماه انکوباسیون مشاهده شد که این روند افزایشی از نظر آماری معنی‌دار بود. در جدول تجزیه واریانس کلی همه آثار اصلی تا چهارگانه به‌جز اثر متقابل نوع بیوچار در نوع خاک و اثر متقابل مقدار بیوچار در نوع بیوچار در نوع خاک، از نظر آماری در سطح ۱ درصد معنی‌دار بودند (جدول ۵).

نواک و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند کاربرد بیوچار پوست گردو باعث افزایش مقدار پتاسیم محلول در خاک‌های اصلاح شده با بیوچار شد و علت آن مقدار پتاسیم زیاد بیوچار اضافه شده به خاک بود (۳۷). ابریشم‌کش و همکاران (۲۰۱۵) نیز بیان کردند بیوچار شلتوک برنج تهیه شده در شرایط دمایی ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تیمار شده با خاک با بافت لوم رسی سبب افزایش پتاسیم قابل جذب نسبت به شاهد شد (۱).

آهن قابل جذب خاک

شکل ۸ نشان می‌دهد مقدار آهن قابل جذب روند افزایشی در خاک‌های تیمار شده با بیوچار مخروط کاج دارد، درحالی که تأثیر بیوچار شلتوک برنج بر خاک‌ها در همه تیمارها روند کاهشی و اختلاف معنی‌داری با شاهد داشته است. مقدار آهن کل بیوچار شلتوک برنج ۴۱۰ mg kg^{-1} و در مخروط کاج بسیار بیشتر از بیوچار شلتوک برنج و برابر ۳۵۳۳ mg kg^{-1} بود. با توجه به این مقدار زیاد آهن بیوچار مخروط کاج در همه



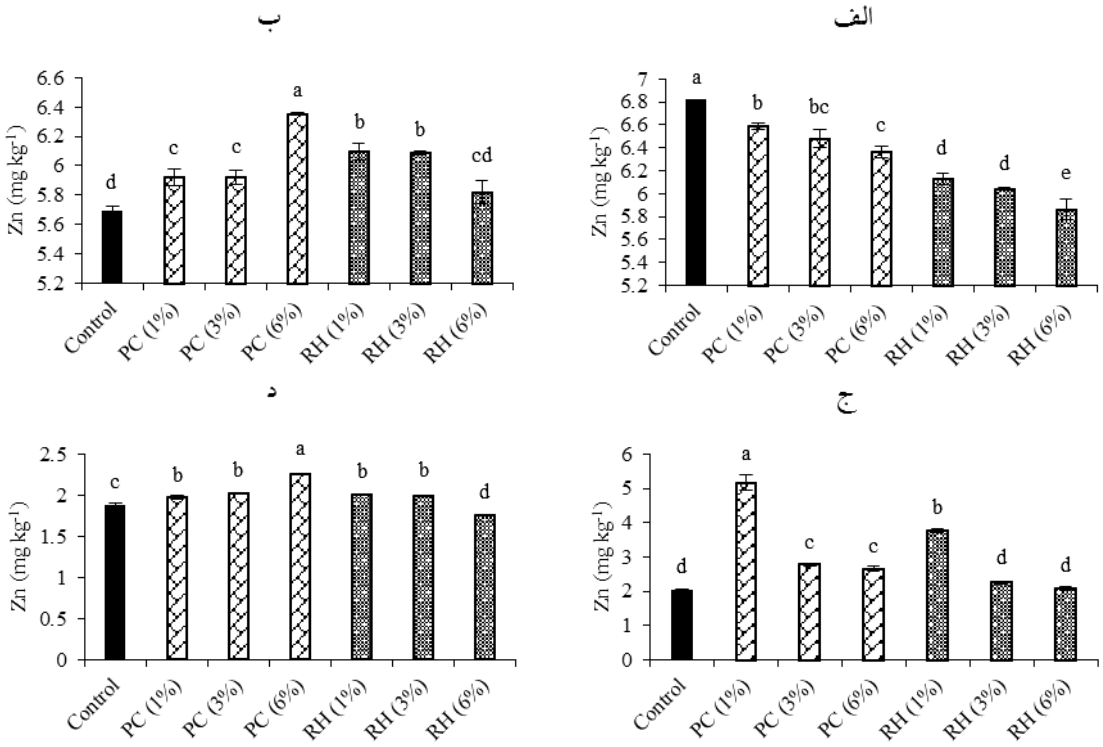
شکل ۸. نمودار مقایسه میانگین اثر نوع (PC مخروط کاج و RH شلتوک برنج) و مقدار بیوچار (یک، سه و شش درصد وزنی) بر آهن قابل جذب خاک (الف- خاک لوم شنی زمان یک ماه انکوباسیون، ب- خاک لوم شنی زمان شش ماه انکوباسیون، ج- خاک لوم رسی زمان یک ماه انکوباسیون، د- خاک لوم رسی زمان شش ماه انکوباسیون)

تیمارها، مقدار آهن قابل جذب خاک تیمار شده با بیوچار مخروط کاج بیشتر از مقدار آن در خاک تیمار شده با بیوچار شلتوک برنج بوده است. تیمار ۶ درصد بیوچار مخروط کاج در خاک لوم رسی و پس از گذشت شش ماه انکوباسیون بیشترین اختلاف معنی‌دار را نسبت به شاهد سبب شده که این مقدار برابر ۴/۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. در جدول تجزیه واریانس کلی همه آثار اصلی تا چهارگانه در سطح آماری درصد معنی‌دار شدند (جدول ۵).

علاوه بر محتوای آهن بیوچار، احتمالاً لیگاندهای آلی محلول آزاده شده طی فرایند تجزیه و تشکیل کمپلکس آلی- فلز سنگین سبب افزایش حلالیت فلزات سنگین از جمله آهن می‌شود (۱۹). در برخی موارد گزارش شده که کاربرد بیوچار سبب کاهش حلالیت آهن قابل دسترس خام شده است. به‌عنوان مثال اینال و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند کاربرد بیوچار کود مرغی به‌میزان ۲/۵، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر هر کیلوگرم خاک پس از انکوباسیون ۷۰ روزه، باعث کاهش میزان عنصر آهن قابل جذب خاک شد. فلزاتی مانند آهن به‌طور مستقیم توسط بیوچار جذب شده و این جذب باعث کاهش فعالیت آنها در محلول می‌شود. بنابراین ممکن است گروه‌های عامل آلی آهن را از محلول خاک جذب کرده باشند (۲۴).

روی قابل جذب خاک

شکل ۹ نشان می‌دهد تأثیر مقادیر فزاینده بیوچار شلتوک برنج و مخروط کاج بر عنصر روی قابل جذب خاک لوم رسی و لوم شنی در زمان یک ماه انکوباسیون روند نزولی داشته است. به‌طور کلی، کاربرد هر دو نوع بیوچار (به‌جز تیمار ۶ درصد بیوچار شلتوک برنج) سبب افزایش معنی‌دار روی قابل جذب در هر دو خاک پس از شش ماه انکوباسیون شد (شکل ۹). در زمان یک ماه



شکل ۹. نمودار مقایسه میانگین اثر نوع (PC مخروط کاج و RH شلتوک برنج) و مقدار بیوچار (یک، سه و شش درصد وزنی) بر عنصر روی قابل جذب خاک (الف- خاک لوم شنی زمان یک ماه انکوباسیون، ب- خاک لوم شنی زمان شش ماه انکوباسیون، ج- خاک لوم رسی زمان یک ماه انکوباسیون، د- خاک لوم رسی زمان شش ماه انکوباسیون)

انکوباسیون نیز افزایش بیوچار (به‌جز سطح ۳ و ۶ درصد بیوچار شلتوک برنج) به خاک لوم رسی غلظت روی قابل جذب را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. این در حالی است که در زمان یک ماه انکوباسیون، روی قابل جذب خاک لوم شنی روند نزولی در پی کاربرد بیوچار داشته است. غلظت عنصر روی قابل جذب در نمونه شاهد نیز در هر دو خاک با افزایش زمان انکوباسیون از یک به شش ماه انکوباسیون کاهش یافته است که احتمالاً به‌دلیل تثبیت زیستی این عنصر توسط ریزجانداران یا تثبیت شیمیایی روی توسط بخش جامد خاک در طول زمان باشد. غلظت روی قابل جذب در خاک لوم شنی پیش از تیمار با بیوچار برابر ۶/۵ $mg\ kg^{-1}$ و مقدار آن در خاک لوم رسی ۲/۲ $mg\ kg^{-1}$ بود. در جدول تجزیه واریانس کلی همه آثار اصلی تا چهارگانه به‌غیر از اثر نوع بیوچار در نوع خاک در زمان، در سطح آماری ۱٪ معنی‌دار شدند (جدول ۵).

سیکل افزایش و کاهش سطح اکسیژن و رطوبت در خاک‌های آهکی و تغییر شرایط رطوبتی و تهویه‌ای خاک، بیشتر سبب کریستاله شدن و غیرقابل دسترس‌تر شدن ترکیبات کم محلول همانند عنصر روی می‌شود (۴۲). همچنین کمبود اکسیژن ناشی از زیادی آب در خاک طی انکوباسیون نمونه‌های خاک به‌شدت فرایندهای شیمیایی و بیولوژیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و ممکن است یکی از دلایل کاهش عنصر روی قابل دسترس در نمونه‌های شاهد و تیمارها باشد (۳۹).

مواد اصلاح کننده به‌طور آشکار ترکیب‌های کلات‌کننده آزاد کرده و یا معدنی شدن آنها باعث آزادسازی اسید فولویک‌ها می‌شود که آهن و روی معدنی موجود در خاک را کلات می کنند. از طرف مقابل، حضور ماده آلی در فاز جامد خاک ممکن است به‌دلیل داشتن گروه‌های عامل متفاوت به‌ویژه گروه‌های فنولیک و کربوکسیلیک، کمپلکس سطحی پایدار و قوی با

فلزات ایجاد و درنتیجه غلظت روی را در محلول خاک و قابلیت دسترسی آن را برای گیاه محدود کنند (۱۰).

مس قابل جذب خاک

در هر دو خاک افزایش معنی‌دار مس قابل جذب خاک در اثر کاربرد بیوچار مخروط کاج در ماه اول انکوباسیون مشاهده شد ولی با ادامه زمان انکوباسیون خاک تا ۶ ماه، اختلاف مس قابل جذب خاک با شاهد کمتر شد، هر چند اختلاف معنی‌داری از این لحاظ با خاک شاهد وجود داشت (شکل ۱۰). در خاک لوم شنی روند کاهشی و معنی‌دار مس قابل جذب خاک در اثر کاربرد بیوچار شلتوک برنج با افزایش نسبت‌های ۱، ۳ و ۶ درصد در ماه اول و ششم انکوباسیون مشاهده شد درصورتی که مقادیر مس قابل جذب آنها از خاک شاهد بیشتر بود. در خاک لوم رسی روند افزایشی و معنی‌دار مس قابل جذب خاک در اثر کاربرد بیوچار شلتوک برنج با نسبت‌های ۱، ۳ و ۶ درصد در ماه اول انکوباسیون نسبت به شاهد مشاهده شد، ولی با ادامه زمان انکوباسیون خاک تا ۶ ماه مقادیر قابل جذب آن با نسبت های ۳ و ۶ درصد روند کاهشی و معنی‌دار نسبت به شاهد داشت. تیمار خاک لوم شنی با ۱ درصد بیوچار شلتوک برنج باعث شد مقدار عنصر مس قابل جذب خاک بیش از ۰/۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به شاهد پس از شش ماه انکوباسیون افزایش پیدا کند که از نظر آماری معنی‌دار بود. در جدول ۵ هنگامی که تیمارها به‌طور کلی مقایسه آماری شدند نتایج نشان داد همه تیمارها در آثار اصلی به غیر از نوع بیوچار از نظر آماری در سطح ۱ درصد معنی‌دار شدند.

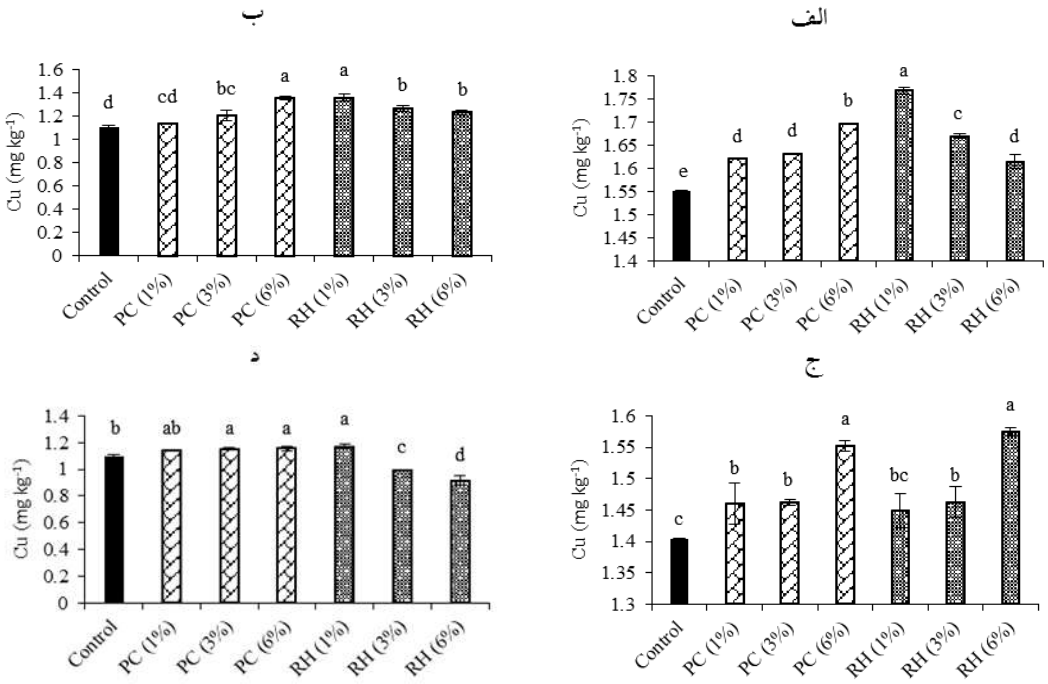
ممکن است مس قابل جذب خاک به‌مرور زمان رسوب کرده یا جذب ذرات خاک شده باشد. غلظت مس کل بیوچار شلتوک برنج $mg\ kg^{-1}$ ۱۱/۳ و غلظت آن در مخروط کاج $mg\ kg^{-1}$ ۲۱/۸ و همچنین غلظت قابل جذب آن در خاک لوم شنی پیش از تیمار با بیوچار $mg\ kg^{-1}$ ۱/۵ و در خاک لوم رسی $mg\ kg^{-1}$ ۱/۳ بود که گذشت زمان سبب کاهش مقدار قابل جذب مس شده است. خاک‌های شاهد هر دو نوع خاک با ادامه زمان انکوباسیون کاهش یافتند.

قابلیت دسترسی مس به‌شدت تحت تأثیر مواد آلی خاک قرار دارد. ترکیب‌های گوناگون محلول در آب با وزن‌های مولکولی کم مانند اسید فولویک، کمپلکس‌های پایدار با Cu^{2+} تشکیل می دهند. این عمل، کاتیون‌ها را از هیدرولیز و واکنش‌های رسوب حفظ کرده و بنابراین انحلال‌پذیری آنها در محلول افزایش می یابد. خان و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند غلظت مس قابل جذب خاک‌های آتیگرام بنگلادش پس از اضافه شدن بیوچار شلتوک برنج پس از ۳۰ روز انکوباسیون کاهش، پس از آن تا ۶۰ روز افزایش و سپس بعد از ۹۰ روز مجدداً کاهش می‌یابد (۲۸). کاربرد بیوچار کود مرغی به نسبت‌های وزنی ۲/۵، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر هر کیلوگرم خاک پس از انکوباسیون ۷۰ روزه، سبب افزایش مقدار مس قابل جذب خاک شد (۲۴).

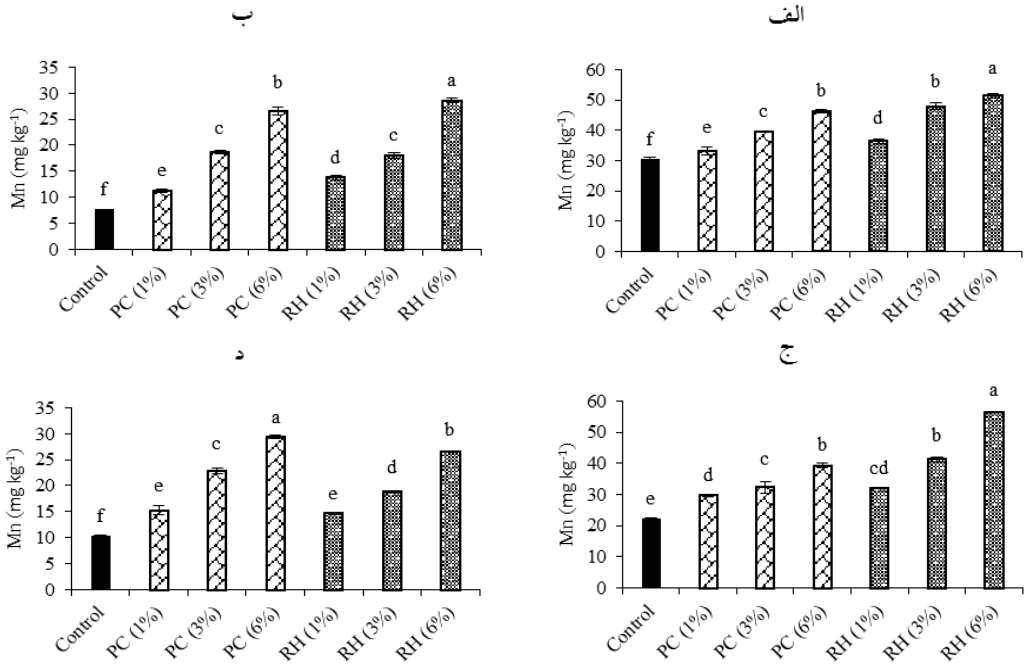
منگنز قابل جذب خاک

شکل ۱۱ نشان می‌دهد در هر دو خاک، منگنز قابل جذب خاک در اثر کاربرد هر دو نوع بیوچار مخروط کاج و شلتوک برنج در ماه اول و ششم انکوباسیون افزایش معنی‌داری یافته است. در خاک لوم رسی کاربرد بیوچار شلتوک برنج در مقدار ۶ درصد با بیش از ۳۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم، بیشترین تأثیر معنی‌دار را نسبت به نمونه شاهد پس از گذشت ۳۰ روز داشت. غلظت کل منگنز بیوچار شلتوک برنج برابر $mg\ kg^{-1}$ ۱۲۴/۹ و در بیوچار مخروط کاج $mg\ kg^{-1}$ ۶۸/۳ و غلظت قابل جذب منگنز خاک لوم شنی پیش از تیمار با بیوچار $mg\ kg^{-1}$ ۱۵/۵ و مقدار آن در خاک لوم رسی $mg\ kg^{-1}$ ۲۰/۴ بود. در جدول ۵ همه آثار اصلی (مقدار و نوع بیوچار، نوع خاک و گذشت زمان) در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار شدند.

در دسترس بودن منگنز توسط ماده آلی، $CaCO_3$، pH و شرایط ریداکس تعیین می‌شود. ماده آلی به‌خصوص بیوچاری که در شرایط اسیدی تولید شده در طی تجزیه، تعدادی اسیدهای آلی آزاد می‌کند که باعث کاهش pH خاک و افزایش دسترسی این عنصر می‌شود (۱۶). اینل و همکاران (۲۰۱۵) نیز گزارش



شکل ۱۰. نمودار مقایسه میانگین اثر نوع (PC مخروط کاج و RH شلتوک برنج) و مقدار بیوچار (یک، سه و شش درصد وزنی) بر مس قابل جذب خاک (الف- خاک لوم شنی زمان یک ماه انکوباسیون، ب- خاک لوم شنی زمان شش ماه انکوباسیون، ج- خاک لوم رسی زمان یک ماه انکوباسیون، د- خاک لوم رسی زمان شش ماه انکوباسیون)



شکل ۱۱. نمودار مقایسه میانگین اثر نوع (PC مخروط کاج و RH شلتوک برنج) و مقدار بیوچار (یک، سه و شش درصد وزنی) بر منگنز قابل جذب خاک (الف- خاک لوم شنی زمان یک ماه انکوباسیون، ب- خاک لوم شنی زمان شش ماه انکوباسیون، ج- خاک لوم رسی زمان یک ماه انکوباسیون، د- خاک لوم رسی زمان شش ماه انکوباسیون)

کردند کاربرد بیوچار کود مرغی نیز سبب افزایش مقدار منگنز قابل جذب خاک شد (۲۴).

جدول تجزیه واریانس کلی شامل نوع بیوچار، مقدار بیوچار، نوع خاک و زمان و آثار متقابل دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه که در هر پارامتر به‌طور جداگانه به اثر آن پرداخته شد در جدول ۵ ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد ترکیب بیوچارهای تولید شده دارای pH اسیدی، سطوح داخلی و سطح ویژه زیاد و همچنین غنی از عناصر غذایی هستند و توانایی اضافه کردن این عناصر به خاک را دارند. کاربرد بیوچار در دو خاک قلیایی توانست برخی ویژگی‌های شیمیایی و حاصلخیزی خاک را بهبود ببخشد. بیوچار تولید شده تا حدودی pH خاک را تعدیل بخشید ولی سبب افزایش هدایت الکتریکی خاک شد. درصد کربن آلی و نیتروژن و مقادیر منگنز خاک در همه تیمارها و فسفر، پتاسیم، آهن، روی و مس در اکثر تیمارها افزایش معنی‌دار نسبت به شاهد یافت. در مجموع، کاربرد بیوچار اسیدی به‌عنوان روشی مناسب برای ارتقاء کیفیت شیمیایی و حاصلخیزی خاک‌های آهکی توصیه می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Abrishamkesh, S., M. Gorji, H. Asadi, G. Bagheri-Marandi and A. Pourbabaee. 2015. Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth. *Plant Soil and Environment* 61: 475-482.
2. Al-Busaidi, A. and P. Cookson. 2003. Salinity-pH relationships in calcareous soils. *Journal of Agricultural and Marine Sciences [JAMS]* 8: 41-46.
3. Baglieri, A., A. Ioppolo, M. Negre and M. Gennari. 2007. A method for isolating soil organic matter after the extraction of humic and fulvic acids. *Organic Geochemistry* 38: 140-150.
4. Bharadwaj, A., Y. Wang, S. Sridhar and V. S. Arunachalam. 2004. Pyrolysis of rice husk. *Current Science* 87: 981-986.
5. Bourke, J., M. Manley-Harris, C. Fushimi, K. Dowaki, T. Nunoura and M. J. Antal. 2007. Do all carbonized charcoals have the same chemical structure? 2. A model of the chemical structure of carbonized charcoal. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 46: 5954-5967.
6. Boutaieb, M., M. Guiza, S. Román, S. Nogales, B. Ledesma and A. Ouederni. 2019. Pine cone pyrolysis: optimization of temperature for energy recovery. *Environmental Progress Sustainable Energy* 39: 1-12.
7. Bremner, J. M. 1996. Nitrogen-total. PP. 1085-1121. *In*: Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T. and Sumner, M. E. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part3, Chemical Methods Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
8. Cantrell, K. B., P. G. Hunt, M. Uchimiya, J. M. Novak and K. S. Ro. 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology* 107: 419-428.
9. Cottenie, A. 1980. Soil and Plant Testing as a Basis of Fertilizer Recommendations. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The University of Michigan.
10. Dhaliwal, S. S., R. K. Naresh, A. Mandal, R. Singh and M. K. Dhaliwal. 2019. Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. *Environmental and Sustainability Indicators* 2: 1-14.
11. Ding, W., P. L. Clode and H. Lambers. 2019. Is pH the key reason why some Lupinus species are sensitive to calcareous soil? *Plant and Soil* 434: 185-201.
12. Dume, B., G. Berecha and S. Tulu. 2015. Characterization of biochar produced at different temperatures and its effect on acidic nitosol of Jimma, Southwest Ethiopia. *International Journal of Soil Science* 10: 63-73.
13. Ehsan, M., M. A. Barakat, D. Z. Husein, S. M. Ismail and A. Water. 2014. Immobilization of Ni and Cd in soil by biochar derived from unfertilized dates. *Water Air and Soil Pollution* 225: 1-10.
14. Fadeeva, V. P., V. D. Tikhova and O. N. Nikulicheva. 2008. Elemental analysis of organic compounds with the use of automated CHNS analyzers. *Journal of Analytical Chemistry* 63: 1094-1106.
15. Feichtinger, F., E. Erhart and W. Hartl. 2004. Net N-mineralisation related to soil organic matter pools. *Plant Soil and Environment* 50: 273-276.
16. Fu, P., S. Hu, J. Xiang, W. Yi, X. Bai, L. Sun and S. Su. 2012. Evolution of char structure during steam gasification

of the chars produced from rapid pyrolysis of rice husk. *Bioresource Technology* 114: 691-697.
17. Gambrell, R. P. 1996. Manganese. PP. 665-682. *In*: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A. and Loeppert, R. H. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
18. Gaskin, J., C. Steiner, K. Harris, K. Das and B. Bibens. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use (ASABE). *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)* 51: 2061-2069.
19. Gregson, S. and B. Alloway. 1984. Gel permeation chromatography studies on the speciation of lead in solutions of heavily polluted soils. *Journal of Soil Science* 35: 55-61.
20. Gundale, M. J. and T. H. Deluca. 2006. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fir charcoal. *Forest Ecology and Management* 231: 86-93.
21. Helmke, P. A. and D. L. Sparks. 1996. Lithium, Sodium, Potassium, Rubidium, and Cesium. PP. 551-574. *In*: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A. and Loeppert, R. H. (Eds.). Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
22. Hinsinger, P. 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil* 237: 173-195.
23. Igalavithana, A. D., Y. S. Ok, A. R. Usman, M. I. Al-Wabel, P. Oleszczuk and S. S. Lee. 2016. The effects of biochar amendment on soil fertility. PP. 123-144. *In*: Mingxin, G., Zhongqi, H. and Sophie Minori, U. (Eds.). Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers. Soil Science of America, Inc.
24. Inal, A., A. Gunes, O. Sahin, M. Taskin and E. Kaya. 2015. Impacts of biochar and processed poultry manure, applied to a calcareous soil, on the growth of bean and maize. *Soil Use and Management* 31: 106-113.
25. Ippolito, J. A., T. F. Ducey, K. B. Cantrell, J. M. Novak and R. D. Lentz. 2016. Designer, acidic biochar influences calcareous soil characteristics. *Chemosphere* 142: 184-191.
26. Joseph, S., A. Downie, P. Munroe, A. Crosky and J. Lehmann. 2007. Biochar for carbon sequestration, reduction of greenhouse gas emissions and enhancement of soil fertility; A review of the materials science. Paper presented at the Proceedings of the Australian Combustion Symposium, University of Sydney.
27. Karimi, A., A. Moezzi, M. Chorom and N. Enayatizamir. 2019. Application of biochar changed the status of nutrients and biological activity in a calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 1-10.
28. Khan, K., M. Chowdhury and S. I. Huq. 2015. Effects of biochar on the fate of the heavy metals Cd, Cu, Pb and Zn in soil. *Bangladesh Journal of Scientific Research* 28: 17-26.
29. Kuo, S. 1996. Phosphorus. PP. 869-919. *In*: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A. and Loeppert, R. H. (Eds.). Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
30. Lahiji, F. A. S., P. Ziarati and A. Jafarpour. 2016. Potential of rice husk biosorption in reduction of heavy metals from oryza sativa rice. *Biosciences Biotechnology Research Asia* 13: 2231-2237.
31. Lehmann, J. and S. Joseph. 2009. Biochar systems. PP. 147-168. *In*: Johannes, L. and Stephen, J. (Eds.). Biochar For Environmental Management. Earthscan. London Sterling, VA.
32. Loeppert, R. H. and W. P. Inskeep. 1996. Iron. PP. 639-664. *In*: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A. and Loeppert, R. H. (Eds.). Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
33. Mukherjee, A. and A. R. Zimmerman. 2013. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar-soil mixtures. *Geoderma* 194: 122-130.
34. Najafi Ghiri, M. 2015. Effect of different biochars application on some soil properties and nutrient availability in A calcareous soil. *Iranian Journal of Soil Research (Formerly Soil and Water Sciences)* 29: 352-358.
35. Nelissen, V., T. Rütting, D. Huygens, J. Staelens, G. Ruysschaert and P. Boeckx. 2012. Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil. *Soil Biology and Biochemistry* 55: 20-27.
36. Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. PP. 961-1010. *In*: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T. and Sumner, M. E. (Eds.). Methods of Soil Analysis, Part3, Chemical Methods. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
37. Novak, J. M., W. J. Busscher, D. L. Laird, M. Ahmedna, D. W. Watts and M. A. S. Niandou. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science* 174: 105-112.
38. Oades, J. M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377-400.
39. Ponnamperuma, F. N. 1972. The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy* 24: 29-96.
40. Reed, S. T. and D. C. Martens. 1996. Copper and Zinc. PP. 703-722. *In*: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A. and Loeppert, R. H. (Eds.). Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods. Soil Science Society of America,

American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
41. Rhoades, J. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. PP. 417-435. *In*: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T. and Sumner, M. E. (Eds.). Methods of Soil Analysis, Part3, Chemical Methods. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
42. Ryan, J. and S. Hariq. 1983. Transformation of incubated micronutrient chelates in calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal* 47: 806-810.
43. Sajjadi, B., T. Zubatiuk, D. Leszczynska, J. Leszczynski and W. Y. Chen. 2019. Chemical activation of biochar for energy and environmental applications: a comprehensive review. *Reviews in Chemical Engineering* 35: 777-815.
44. Singh, B., M. Camps-Arbestain and J. Lehmann. 2017. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. PP. 23-38. *In*: Singh, B., Mei Dolk, M., Shen, Q. and Camps-Arbestain, M. (Eds.).Biochar: A Guide to Analytical Methods. Csiro Publishing. London, New York.
45. Song, W. and M. Guo. 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 94: 138-145.
46. Sumner, M. E. and W. P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. PP. 1201-1229. *In*: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T. and Sumner, M. E. (Eds.). Methods of Soil Analysis, Part3, Chemical Methods. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
47. Van Zwieten, L., S. Kimber, S. Morris, K. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph and A. Cowie. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil* 327: 235-246.
48. Xu, G., J. Sun, H. Shao and S. X. Chang. 2014. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. *Ecological Engineering* 62: 54-60.
49. Yaman, S. 2004. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion and Management* 45: 651-671.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 26, No. 2, Summer 2022, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Effect of Acidic Biochars on Some Chemical Properties and Nutrient Availabilities of Calcareous Soils

I. Hasanpour[1*], M. Shirvani[1], M. A. Hajabbasi[1] and M. M. Majidi[2]

(Received: April 16-2021; Accepted: July 19-2021)

Abstract

Low organic matter content and alkaline pH of calcareous soils in arid and semi-arid regions are the main reasons for the low nutrient availabilities for plants in these soils. One way to improve the chemical properties and fertility of calcareous soils is the application of organic substances such as biochar produced from pyrolysis of organic wastes. However, biochars have an almost predominant alkaline pH, which exacerbates plant nutrient deficiencies in calcareous soils when used for a long time. Pyrolysis of some organic wastes under controlled temperature conditions can lead to the production of acidic biochar. The effect of acidic biochars on several chemical properties of two calcareous soils in Isfahan province was investigated in the present study. Treatments included two types of biochar (pine cone and rice husk), three levels of biochar addition (one, three, and six percent), two types of soil (a sandy loam (Tiran) and a clay loam (Lavark)), and two incubation periods (one and six months). The results showed that applying biochar could slightly decrease soil pH but raised soil electrical conductivity. In addition, the amount of organic carbon, total nitrogen, and available concentration of manganese in all treatments and the concentrations of available phosphorus, potassium, iron, zinc, and copper in the most of treatments showed a significant increase compared to the control. Amending soil with biochar at a 6% rate caused the most significant changes in the measured parameters in both soil types. In general, the results of this study indicated that acidic biochar produced from pine cones and rice husk can be used as a suitable conditioner to improve the chemical properties and fertility of calcareous soils.

Keywords: Biochar, Soil conditioner, Soil organic waste, Rice husk, Pine cone.

1. Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2. Department of Production and Plant Genetic, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
*: Corresponding author, Email: i_hasanpour@yahoo.com