مروری بر اثرات کاربرد بیوچار بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک

الهیار خادم [۱]، فایز رئیسی و حسین بشارتی

دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.**akhadem1361@gmail.com**

استاد خاکشناسی، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.**f_raiesi@yahoo.com**

استاد خاکشناسی، موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران.**besharati1350@yahoo.com**

دریافت: اردیبهشت ۱۳۹٤ و پذیرش: مرداد ۱۳۹٦

چکیده

فعالیت‌های انسانی در زمینه های مختلف کشاورزی و صنعتی موجب افزایش روز افزون ضایعات می گردد. دفع و تخلیه نامناسب این ضایعات در محیط باعث ایجاد عوارض نامطلوبی برای محیط زیست می گردد. استفاده مناسب و کاربردی از این ضایعات موجب کاهش فشار بر محیط زیست خواهد شد. بیوچار ماده کربنی است که از گرمادهی بقایای گیاهی و ضایعات در محیط حاوی اکسیژن محدود یا بدون اکسیژن به دست می‌آید. تجزیه گرمایی زیست توده در محیط فاقد اکسیژن را گرماکافت می نامند. بیوچار پایداری بالایی داشته و به منظور مدیریت ضایعات، کاهش تغییرات اقلیمی، تولید انرژی و بهبود خصوصیات خاک تولید می‌شود. خصوصیات منحصر به فرد بیوچار آن را به عنوان گزینه مناسبی برای مصرف در خاک مطرح ساخته است. بیوچار خصوصیات مختلف فیزیکی (از جمله ساختمان خاک، جرم مخصوص ظاهری، هدایت هیدرولیکی)، شیمیایی (pH، ظرفیت تبادل کاتیونی، میزان مواد آلی) و زیستی خاک (فعالیت میکروبی، تنوع میکروبی، فعالیت آنزیمی، جمعیت میکروبی) را تحت تأثیر قرار داده و موجب بهبود حاصلخیزی خاک می‌شود. بیوچار با تأمین بخشی از عناصر مورد نیاز گیاه موجب افزایش عملکرد گیاه می گردد. مصرف بیوچار در اغلب موارد باعث بهبود خصوصیات خاک شده است، هرچند در مواردی نیز آثار منفی آن مشاهده گردیده است.

واژه‌های کلیدی: بیوچار، گرماکافت، خصوصیات خاک، عملکرد گیاه.

۱- آدرس نویسنده مسئول:گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

مقدمه

تجزیه گرمایی زیست توده گیاهی در غیاب جزئی و یا کامل اکسیژن یا گرماکافت علاوه بر دی اکسید کربن، گازهای سوختی، مواد تبخیر شونده و بخارهای قیری، یک جزء جامد غنی از کربن بنام بیوچار[۲] تولید می-نماید. بیوچار یک ماده متخلخل، غنی از کربن و ریزدانه است که از گرمادهی بقایای آلی مانند ضایعات گیاهی، کودهای دامی و سایر ضایعات در دماهای ۲۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد در یک محیط بدون اکسیژن یا با میزان اکسیژن محدود به دست می‌آید (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹). وجه مشترک بیوچار با زغال این است که عمدتاً از اشکال آروماتیک کربن آلی تشکیل یافته و در مقایسه با کربن موجود در مواد اولیه در شرایط مساعد و مناسب مانند آنچه در خاک وجود دارد به راحتی به صورت دی اکسید کربن به اتمسفر بر نمی گردد (یانگ و شنگ، ۲۰۱۲). برای تولید بیوچار از دستگاه‌های گرماکافت کننده استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها یک مخزن بزرگ دارند که زیست توده در داخل آن ریخته شده و حرارت داده می‌شود. زیست توده در طی فرآیند گرماکافت به بیوچار تبدیل می‌شود.

بیوچار به علّت ویژگی‌های منحصر به فردی که دارد، به عنوان اصلاح کننده خاک مورد استفاده قرار می-گیرد. دستگاه تولید بیوچار دارای یک مخزن می‌باشد که زیست‌توده در داخل آن قرار داده می‌شود و بعد از خارج کردن اکسیژن حرارت داده میشود و بدین ترتیب، زیست-توده داخل مخزن تبدیل به بیوچار می‌شوند (عظیم زاده و نجفی، ۱۳۹۵). فرایند گرماکافت و محصولات به دست آمده از این فرایند در شکل ۱ آورده شده است.

تولید جهانی بیوچار با هر دو روش گرماکافت آهسته و سریع، در سال ۲۰۰۵ بالغ بر ٤٤ میلیون تن بود. اهداف اصلی تولید این مقدار بیوچار شامل چهار هدف بهبود خاک، مدیریت ضایعات، کاهش تغییرات اقلیمی و تولید انرژی بوده است. اثرات مفید بیوچار از بیش از ۲۰۰۰ سال پیش و در زمان کشاورزی "بریدن و سوختن[۳]" شناخته شده است (وینسلی، ۲۰۰۷).

عوامل مؤثر بر خصوصیات بیوچار

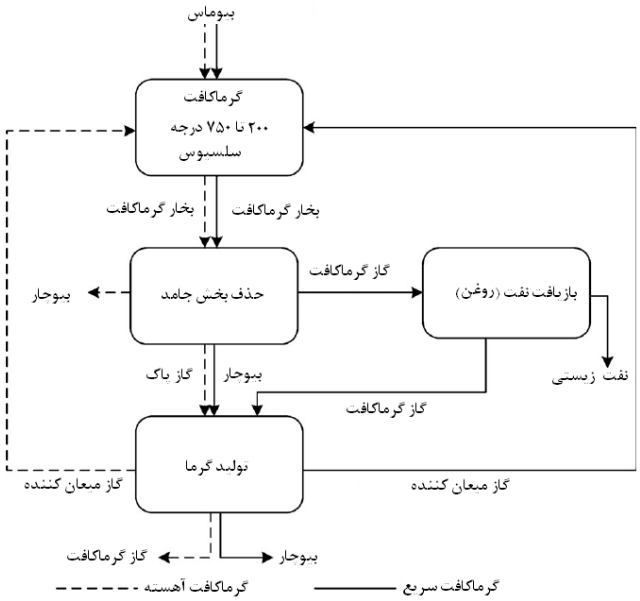
خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچار تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله نوع مواد اولیه، شرایط واحد گرماکافت، سرعت گرمادهی، اندازه ذرات بیوچار و دمای اوج گرماکافت و مدت زمان گرماکافت قرار می‌گیرد. دامنه گسترده فرایند گرماکافت منجر به تشکیل بیوچارهایی می‌شود که از نظر ترکیب عنصری و خاکستر، جرم مخصوص، تخلخل، توزیع اندازه منافذ، سطح ویژه، خصوصیات شیمیایی سطح، جذب و دفع آب و یون‌ها، pH و یکنواختی ساختمان فیزیکی بسیار متفاوت هستند (لایرد و همکاران، ۲۰۱۰).

دما از متغیرهای اصلی تهیه بیوچار است که تأثیر مهمی بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و پایداری آن دارد. خصوصیاتی از بیوچار که تحت تأثیر دما قرار می‌گیرند عبارتند از مقدار بیوچار تولید شده (آستون و همکاران، ۲۰۱۳ ؛ کانیاپورن، ۲۰۱۲) ، درصد کربن، ترکیب عنصری (خادم و همکاران، ۱۳۹۵ ب؛ بهشتی و همکاران، ۱۳۹۵؛ دوی و ساروها، ۲۰۱۳)، میزان خاکستر، میزان مواد فرار، وزن مخصوص، توزیع اندازه خلل و فرج، سطح ویژه، خصوصیات شیمیایی سطح (نوواک و همکاران، ۲۰۰۹) ، جذب سطحی آب و یون‌ها، pH (گوندل و دلوکا، ۲۰۰٦)، ساختمان فیزیکی و پایداری در مقابل تجزیه (بلداک و اسمرنیک، ۲۰۰۲؛ لهمان و همکاران، ۲۰۱۱) (جدول۱).

یکی از ویژگی‌های مهم بیوچار، پایداری آن پس از افزودن به خاک می‌باشد، که به دمای تولید بیوچار و حتی شرایط و نوع خاک بستگی دارد (لهمان و همکاران، ۲۰۰۹).

2- Biochar

3- Slash and burn



شکل ۱- محصولات حاصل از گرماکافت زیست توده

این خصوصیت بیوچار برای ترسیب کربن در خاک بسیار مهم است (زیمرمن و همکاران، ۲۰۱۱؛ بامینگر و همکاران، ۲۰۱٤). فانگ و همکاران (۲۰۱٤) پایداری بیوچار تولید شده در دماهای ٤۵۰ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد را در چهار خاک مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که پس از گذشت یک سال تنها ۳/۷۱-۰/۳ درصد کربن بیوچار معدنی می‌شود و با افزایش دمای گرماکافت، پایداری کربن بیوچار افزایش می‌یابد. پایداری بیشتر کربن بیوچار تولید شده در دماهای بالاتر به درصد نسبی کربن الکیل و آروماتیک، میزان تراکم کربن آروماتیک، نوع مواد اولیه مورد استفاده برای تولید بیوچار و کاهش بخش ناپایدار کربن نسبت داده می‌شود. شواهد نشان می‌دهد که کربن بیوچار بسیار مقاوم و پایدار بوده و زمان ماندگاری آنها در مورد بیوچار چوب در دامنه ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ سال قرار می‌گیرد که ۱۰ تا ۱۰۰۰ برابر زمان ماندگاری کربن آلی خاک است. بنابراین افزودن بیوچار به خاک می تواند مخزن بالقوه‌ای از کربن را در خاک فراهم آورد (ورهیژن و همکاران،۲۰۱۰). بیوچار بجز بخش کربنی پایدار حاوی مقدار زیادی خاکستر می باشد که حاوی نمکهای معدنی است که در کوتاه مدت می‌تواند به تغذیه گیاه کمک نموده و باعث افزایش عملکرد گیاه گردد. میزان خاکستر موجود در بیوچار تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد که از جمله این موارد می توان نوع مواد اولیه و دمای گرماکافت را نام برد.

نتایج مطالعات مختلف (موهان و همکاران، ۲۰۰٦؛ یانگ و شنگ، ۲۰۱۲؛ دوی و ساروها، ۲۰۱۳؛ دوم و همکاران، ۲۰۱۵) نشان می‌دهد با افزایش دمای گرماکافت بر میزان خاکستر آن افزوده می شود و همچنین بقایای چوبی نسبت به بقایای علفی خاکستر کمتری تولید می نماید.

کاربرد بیوچار

به طور کلی بیوچار برای تحقق چهار هدف مدیریت ضایعات، کاهش تغییرات اقلیمی و کاهش مصرف سوختهای فسیلی و تولید انرژی و همچنین بهبود خصوصیات خاک تهیه می‌شود (رودریگز، ۲۰۱۰؛ شکل۲).

مدیریت ضایعات: تولید و مصرف بیوچار پتانسیل زیادی برای مدیریت ضایعات گیاهی و حیوانی دارد و بنابراین

آلودگی محیط زیست را کاهش می‌دهد. ضایعاتی که برای تولید بیوچار استفاده می‌شوند شامل ضایعات محصولات کشاورزی (وو و همکاران، ۲۰۱۳)، ضایعات جنگلداری (روتیگلیانو و همکاران، ۲۰۱۳)، کودهای حیوانی (اویانگ، ۲۰۱۳)، ضایعات فرآوری محصولات غذایی (کارتر و همکاران، ۲۰۱۳)، ضایعات کاغذسازی (وان زویتن و همکاران، ۲۰۱۰) و ضایعات جامد شهری و لجن فاضلاب هستند (پازفریرو و همکاران، ۲۰۱۲).

جدول ۱- تأثیر دمای گرماکافت و نوع زیست توده بر خصوصیات بیوچار (دوم و همکاران، ۲۰۱۵)

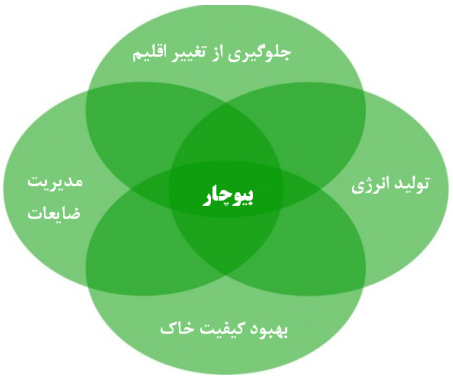
متغیرهای اندازه گیری شده	بیوچار پوست قهوه تهیه شده در ۳۵۰°C	بیوچار پوست قهوه تهیه شده در ۵۰۰°C	بیوچار کلش ذرت تهیه شده در ۳۵۰°C	بیوچار کلش ذرت تهیه شده در ۵۰۰°C
سطح ویژه (m^2g^{-1})	۱۴/۰۷±۰/۰۲	۲۶/۲±۰/۰۱	۴/۴۶±۰/۰۵	۱۸/۱±۰/۰۴
pH H_2O (1:10)	۹/۶۲±۰/۰۶	۱۱/۰±۰/۰۲	۸/۱۵±۰/۰۱	۹/۴۴±۰/۰۳
EC (mS/cm^{-1}) (1:10)	۴/۲۹±۰/۰۳	۶/۴۴±۰/۱۳	۰/۸۹±۰/۲۳	۱/۸۱±۰/۲۴
کلسیم تبادلی (me/100g)	۵۰/۵±۰/۶۸	۶۱/۵±۰/۸۱	۳۷/۴±۰/۵۶	۴۸/۴±۰/۰۶
منیزیم تبادلی (me/100g)	۶/۷۱±۰/۱۱	۸/۲۱±۰/۰۶	۴/۹۳±۰/۰۴	۶/۴۳±۰/۰۶
پتاسیم تبادلی (me/100g)	۱/۹۶±۰/۲۷	۲/۷۷±۰/۴۳	۱/۷۱±۰/۲۶	۲/۱۶±۰/۱۴
سدیم تبادلی (me/100g)	۳/۴۳±۰/۰۲	۵/۱۵±۰/۱۱	۰/۷۱±۰/۱۸	۱/۴۵±۰/۱۹
ظرفیت تبادل کاتیونی (me/100g)	۶۴/۸±۰/۷۶	۷۹/۲±۰/۳۳	۴۷/۵±۰/۶۶	۶۲/۰±۰/۸۰
کربن آلی (٪)	۱۶/۵±۱/۹۶	۲۶/۹±۷/۲۲	۱۴/۰±۲/۴۵	۲۰/۶±۱/۴۰
ماده آلی (٪)	۲۸/۴±۳/۳۸	۴۶/۴±۱۲/۵	۲۴/۱±۴/۲۳	۳۵/۵±۲/۴۱
نیتروژن کل (٪)	۱/۴۲±۰/۱۷	۲/۳۲±۰/۶۲	۱/۲۰±۰/۲۱	۱/۷۷±۰/۱۲
فسفر قابل جذب ($mg\ kg^{-1}$)	۹/۷۹±۱/۳۴	۱۳/۹±۲/۱۶	۸/۵۵±۱/۳۱	۱۰/۸±۲/۴۱

کاهش تغییرات اقلیمی: تولید و مصرف بیوچار به عنوان یکی از بهترین روش‌های کاهش تغییرات اقلیمی پیشنهاد شده است (آمونته و جوزف، ۲۰۰۹). در مطالعات تأثیر بیوچار بر خصوصیات خاک مشخص گردیده پایداری بالای بیوچار در خاک عامل کلیدی در کاهش خروج گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر است. بیوچار علاوه بر دی اکسید کربن از خروج گازهای نیتروزاکسید و متان نیز جلوگیری می‌نماید (زانگ و همکاران، ۲۰۱۲).

کاهش مصرف سوختهای فسیلی: در فرایند گرماکافت گازهایی از قبیل متان و اتان تولید می‌گردد که استفاده از انرژی به دست آمده از این گازها مصرف سوخت‌های فسیلی را کاهش داده و نیمی از کربن تثبیت شده طی فتوسنتز نگه داشته می‌شود (مهتاب و همکاران، ۲۰۱٤).

بهبود خصوصیات خاک: مصرف بیوچار در خاک باعث اصلاح خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک می‌گردد. نتایج مطالعات متعدد نشان می‌دهد مصرف بیوچار در خاک موجب بهبود خصوصیات فیزیکی خاک مانند وزن مخصوص ظاهری، هدایت هیدرولیکی، پایداری خاک‌دانه‌ها، ساختمان خاک و سطح ویژه (استمن و همکاران، ۲۰۱۱؛ اویانگ و همکاران، ۲۰۱۳؛ هرات و همکاران، ۲۰۱۳؛ موخرجی و همکاران، ۲۰۱٤)، خصوصیات شیمیایی خاک از قبیل pH، قابلیت هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی و عناصر قابل جذب خاک (خادم و همکاران، ۱۳۹۵الف؛ چان و همکاران، ۲۰۰۷؛ کرمی و همکاران، ۲۰۱۱؛ فارل و همکاران، ۲۰۱۳) و خصوصیات زیستی خاک مانند فعالیت آنزیمی، فعالیت میکروبی، معدنی شدن عناصر، خروج گازهای گلخانه‌ای (پازفریرو و همکاران، ۲۰۱۲؛ دمپستر و همکاران، ۲۰۱۲؛ سلیم و همکاران، ۲۰۱۳؛ وو و همکاران، ۲۰۱۳) می‌گردد. طبق مطالعات انجام شده توسط یانای و همکاران (۲۰۰۷) و پال سینگ و همکاران (۲۰۱۰) مصرف بیوچار در خاک با تغییر خصوصیاتی از قبیل pH، ساختمان خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، فراهمی و توزیع گیرنده ها (اکسیژن و نیترات) و دهنده‌های الکترون (آمونیم و مواد آلی محلول)، القاء کاهش کاتالیزوری نیتروزاکسید به گاز نیتروژن بعد از اکسید شدن و واکنشهای بیوچار با مواد معدنی خاک و

تأثیر بر جامعه میکروبی خاک موجب کاهش خروج گازهای گلخانه ای می گردد.



شکل ۲- اهداف کلی تولید و مصرف بیوچار (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹)

تأثیر بیوچار بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

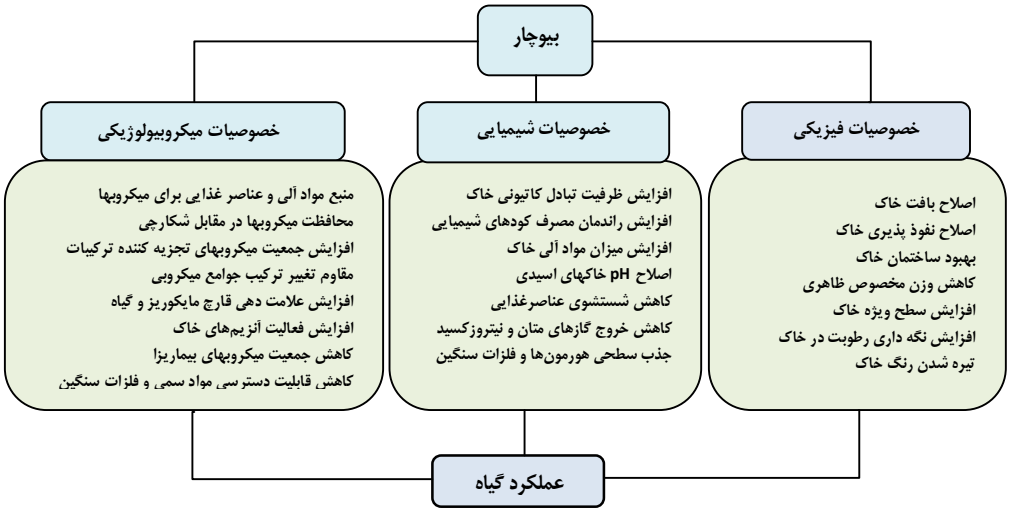
بیوچار خصوصیات مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (شکل ۳). تأثیر بیوچار بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک توسط محققان مختلف طی دهه گذشته مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۲) و مشخص شده که افزودن بیوچار به خاک کیفیت آن را تغییر می‌دهد و اغلب بهبود کیفیت خاک را به همراه دارد (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹). اولین مزیت استفاده از بیوچار افزایش مواد آلی خاک است. روشهای مختلفی برای افزایش مواد آلی خاک وجود دارند که عبارتند از افزودن کودهای دامی، افزودن مالچ، کشت گیاهان پوششی، برگرداندن بقایای گیاهی به خاک. لکن بخش عمده این مواد در مقابل تجزیه میکروبی پایدار نبوده و به سرعت تجزیه و از خاک خارج می گردد. با توجه به پایداری بیوچار در مقابل تجزیه میکروبی و زمان ماندگاری طولانی آن در خاک، مصرف بیوچار باعث افزایش سطح مواد آلی خاک به مدت طولانی و در نتیجه بهبود خصوصیات خاک، مخصوصا در مناطق خشک و نیمه خشک می‌گردد. همچنین، افزودن بیوچار به عنوان یک ماده اصلاحی به خاک موجب افزایش بازهای تبادلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و قابلیت دسترسی عناصر غذایی، کاهش وزن مخصوص ظاهری و بهبود ظرفیت نگه‌داری آب می‌گردد (لیانگ، ۲۰۰۶). بیوچار به خاطر سطح ویژه زیاد و تراکم بار سطحی بالا توانایی خاک برای نگه‌داری عناصر غذایی و آب قابل استفاده گیاه را افزایش و شستشوی عناصر غذایی و کودها را کاهش می‌دهد (لایرد و همکاران، ۲۰۱۰). نجفی قیری (۱۳۹٤) تأثیر کاربرد بیوچار را بر ویژگی‌های خاک و قابلیت جذب عناصر غذایی بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد مصرف بیوچار باعث افزایش معنی‌دار ماده آلی و قابلیت هدایت الکتریکی و پتاسیم محلول و تبادلی گردید در حالی که قابلیت دسترسی نیتروژن، فسفر، روی و مس تحت تأثیر مصرف بیوچار قرار نگرفت. همچنین، نتایج مطالعه دیوبند هفشجانی و همکاران (۱۳۹٦) نشان داد افزودن بیوچار باگاس نیشکر تهیه شده در ۳۰۰ درجه سلسیوس و در سطوح ۰/۲، ۰/۵ و یک درصد، طی هشت ماه دوره آزمایش، باعث افزایش معنی‌دار کربن آلی، ازت کل، فسفر قابل جذب، ظرفیت تبادل آنیونی، هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک گردید. نیگوسی و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر بیوچار بر خصوصیات خاک و جذب عناصر غذایی توسط کاهو را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد بیوچار موجب افزایش pH، قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل دسترس، ظرفیت تبادل کاتیونی و بازهای تبادلی می‌گردد. نتایج مطالعه ماستو و همکاران (b ۲۰۱۳) افزایش pH خاک (۹٪)، افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک (۵۰٪)، میزان مواد آلی خاک (۱/۱۷٪)، نیتروژن کل (۱۰٪)، فسفر (٦۵٪)، پتاسیم (۱۱۸٪) را بر اثر کاربرد بیوچار نشان داد. افزایش میزان عناصر ذکر شده به افزایش pH خاک و اثر آهکی بیوچار در افزایش قابلیت جذب فسفر و افزوده شدن مستقیم پتاسیم توسط بیوچار (که در خاکستر بیوچار موجود است) نسبت داده شد.

استنبیس و همکاران (۲۰۰۹) دریافتند که افزودن بیوچار به خاک به دلیل افزایش pH خاک، افزایش ظرفیت نگه‌داری آب، جذب قارچها و میکروب‌های مفید، افزایش

ظرفیت تبادل کاتیونی، نگه‌داری و ابقـاء عناصـر غـذایی، باعث ارتقاء حاصل‌خیزی و بهبود کیفیت خاک می‌گـردد. اخیراً، نتایج مطالعه کـویی و همکـاران (۲۰۱۳) نشـان داد استفاده از سطوح ۱۰، ۲۰ و ٤٠ تن در هکتار بیوچار باعث افزایش دو تا پنج درصدی pH خاک و ١٦ تا ٥١ درصدی کربن آلی خاک می‌گردد. در خاکهـای آهکـی اسـتفاده از بیوچار باعث تغییر اندک در pH خاک گردید که این تغییر به خاصیت بافری شدید این خاکها نسبت داده شد (الزبیر و همکاران، ٢٠١٦).

جدول ۲- تأثیر بیوچار بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مختلف

منبع بیوچار	میزان مصرف بیوچار (ton/ha)	دمای تهیه بیوچار (°C)	متغیر	تغییرات (٪)	منبع
کلش ذرت	۱۰	۳۵۰ و ۵۵۰	پایداری خاکدانه	(+۱۷)- (+۴)	هرات و همکاران (۲۰۱۳)
			درصد حجمی آب	(+۱۲)	
			وزن مخصوص ظاهری	(-۱۰)	
			هدایت هیدرولیکی اشباع	(+۱۳۹)	
بقایای گندم	۱۵۰	۴۵۰	pH	(+۱۰۰)	فارل و همکاران (۲۰۱۳)
بقایای اوکالیپتوس			EC	(+۱۰۰)	
			خروج کربن بیوچار	+(۰/۲۴ -۰/۲۹)	
			تجزیه کربن بومی خاک	+(۷۳/۲ -۱۰۶)	
چوب بلوط	۵ و ۲۵	۴۲۵	وزن مخصوص ظاهری	(-۱۸)	استمن (۲۰۱۱)
			میزان آب قابل دسترس	(+۲۹)	
			هدایت هیدرولیکی اشباع	(+۳۳)	
			عملکرد گیاه	(+۱۲/۵)	
ضایعات چمن	۱۰، ۵۰ و ۱۰۰	۴۵۰	راندمان مصرف کود شیمیایی	(+۱۶۶)	چان و همکاران (۲۰۰۷)
تفاله پنبه			جذب نیتروژن	(+۱۲/۵)	
ضایعات هرس			جذب فسفر	(+۱۰۰)	
			جذب پتاسیم	(+۶۸)	
			ظرفیت تبادل کاتیونی خاک	(+۲۶)	
			کربن آلی خاک	(+۲۰۰)	
			pH خاک	(+۲۵/۶)	
چوب بلوط	۱۵	۶۵۰	کربن آلی خاک	(+۷)	موخرجی و همکاران (۲۰۱۴)
			سطح ویژه	(+۱۵)	
			وزن مخصوص ظاهری	(-۱۳)	
			تصاعد تجمعی نیتروزاکسید	(-۹۲)	
کود دامی	۶۰	۵۰۰	تشکیل خاکدانه های بزرگ	(+۱۴۵)	اویانگ و همکاران (۲۰۱۳)
			هدایت هیدرولیکی اشباع	(+۹)	
			درصد آب اشباع	(+۷/۴)	
			آب قابل دسترس	(+۱۰/۶)	
چوب بلوط	-	-	pH خاک	(+۳/۷)	کرمی و همکاران (۲۰۱۱)
			کربن محلول	(+۳۸/۵)	
			نیتروژن محلول	(+۱۹۵)	
			فسفر قابل دسترس	(-۳۲)	
			سرب قابل جذب	بی تأثیر	
			مس قابل جذب	(-۶۹)	



شکل ۳- تأثیر بیوچار بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (لهمان و همکاران، ۲۰۱۱)

نتایج مطالعه زلفی باوریانی و همکاران (۱۳۹۵) نشان داد افزودن بیوچارکود مرغی باعث افزایش معنی‌دار pH، قابلیت هدایت الکتریکی، ماده آلی خاک، پتاسیم و فسفر قابل دسترس گردید و بالاترین میزان عناصر قابل جذب در بیوچار تهیه شده در ۳۰۰ درجه سلسیوس مشاهده گردید.

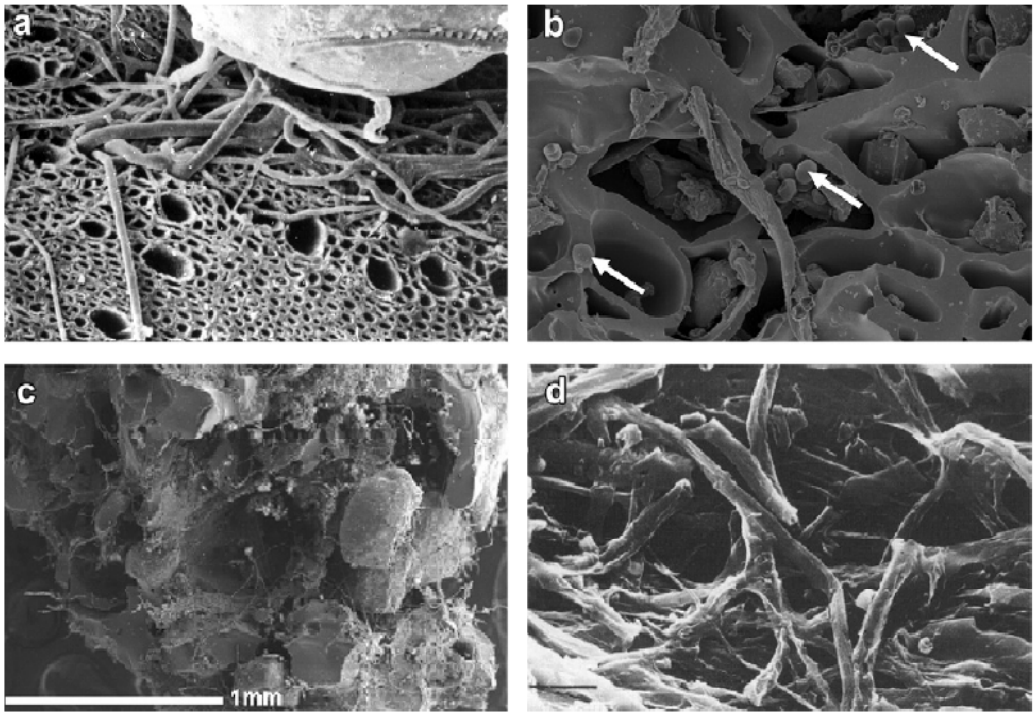
از طرفی لهمان و همکاران (۲۰۰۳) بیان نمودند که بیوچار به خاطر نسبت کربن به نیتروژن بالا ممکن است قابلیت دسترسی نیتروژن خاک را محدود نموده و مصرف آن باعث کاهش باروری خاک گردد.

تأثیر بیوچار بر ویژگی‌های میکروبی خاک

جامعه زیستی خاک تجمع پیچیده‌ای از باکتری-ها، قارچ‌ها، آرکئاها، جلبک‌ها، پروتوزواها، نماتدها، بندپایان و انواع بی‌مهرگان است. بیوچار برهمکنش‌های میان اعضاء این جمعیت و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار داده و باروری و نقش کلی آن‌ها را در اکوسیستم تعیین خواهد کرد (لهمان و همکاران، ۲۰۱۱). بیوچار، همانند دیگر اصلاح کننده‌های آلی خاک، شرایط فیزیکی و فرایندهای شیمیایی خاک را تغییر می-دهد (گلاسر و همکاران، ۲۰۰۲؛ استمن، ۲۰۱۱؛ هرات و همکاران، ۲۰۱٤) و در نتیجه بر خصوصیات و رفتارهای جانداران خاک مؤثر است (لهمان و همکاران، ۲۰۱۱؛ ماستو و همکاران، ۲۰۱۳). فعالیت میکروبی خاک بر انجام وظایف آن و رشد و عملکرد گیاه اثر گذار است (پازفریرو و همکاران، ۲۰۱٤). ساختار متخلخل بیوچار، سطوح ویژه بالا و توانایی آن برای جذب مواد آلی محلول، گازها و مواد معدنی محل مناسبی را برای سکونت میکروب‌ها، رشد و تکثیر آنها مخصوصاً باکتری‌ها، اکتینومیست‌ها و قارچ‌های مایکوریز آربوسکولار فراهم می‌آورد. شکل ٤ خلل و فرج بیوچار و اشغال سطح آن توسط میکروب‌ها را نشان می‌دهد (لهمان و همکاران، ۲۰۱۱). هم‌چنین محتوای زیاد کربن و پایداری بیوچار سطح مواد آلی خاک را افزایش می‌دهد که خود نقش اساسی در چرخه عناصر غذایی و بهبود منابع آب قابل دسترس برای گیاه، ظرفیت بافری و ساختمان خاک دارد (اشتنبیس و همکاران، ۲۰۰۹). بیوچار فعالیت انواع مختلف میکروب‌های خاک را که از نظر کشاورزی مهم هستند، تحریک می‌نماید (اندرسون، ۲۰۱۱). وجود خلل و فرج و توزیع اندازه آنها در بیوچار با حفاظت میکروب‌ها در مقابل شکار شدن و خشکی و هم چنین تأمین نیاز کربنی، انرژی و عناصر معدنی محل مناسبی را برای ریزجانداران فراهم می‌آورد (وارنوک و همکاران، ۲۰۱۰). هم‌چنین سطح ویژه ایجاد شده از ۱۰ تا چند صد متر مربع بر گرم متغیر بوده و سطح زیادی برای میکروب‌های اشغال کننده ایجاد می‌نماید. اندازه خلل و فرج مشاهده شده در بیوچار به نحوی است

که میکروفلور خاک می‌توانند آن را اشغال کرده و از چـرا شدن توسط بقیه موجودات محافظت شوند. خلل و فـرج زیاد بیوچار اجازه نگهداری مقدار زیادی رطوبت را داده و بنابراین موجب افزایش ظرفیـت نگـه‌داری آب در خـاک می‌شود (کرول و همکاران، ۲۰۰۹).

علاوه بر آب، انواعی از گازها از جمله دی-اکسید کربن و اکسیژن در آب موجود در خلل و فرج بیوچار حل شده، فضای داخل خلل و فرج پر شده از هوا را اشغال می‌کنند یا به سطح بیوچار جذب سطحی می-شوند (شینوگی و کانری، ۲۰۰۳). بسته به میزان خلل و فرج پر شده از هوا، غلظت نسبی گازها، سرعت انتشار و میزان جذب سطحی آنها، شرایط هوازی و غیرهوازی در خلل و فرج بیوچار به وجود می‌آید و این شرایط به نوبه خود بر میکروب‌های موجود در خلل و فرج اثر خواهد گذاشت (شینوگی و کانری، ۲۰۰۳؛ تیز و ریلیگ، ۲۰۰۹). بیوچار pH مختلفی داشته و بنابراین جمعیت میکروبی که در اطراف و روی ذرات بیوچار مستقر می‌شوند، متغیر خواهد بود. در شرایط pH اسیدی قارچ‌ها جمعیت غالب هستند در حالی که باکتری‌ها pH خنثی را ترجیح می-دهند. افزودن بیوچار به خاک، چه اسیدی و چه قلیایی، ممکن است باعث تغییر معنی‌دار نسبت باکتری به قارچ (بامینگر و همکاران، ۲۰۱٤) و جمعیت میکروبی غالب خاک شده و هم چنین با اثر بر فعالیت آنزیمی و فعالیت میکروبی موجب تغییر عملکرد و نقش خاک گردد (وارنوک و همکاران، ۲۰۱۰؛ واتزینگر و همکاران، ۲۰۱٤).



شکل ۴- موقعیت فضایی و اشغال سطح بیوچار توسط ریزجانداران. a: بیوچار تازه تولید شده و هیف قارچ در سطح آن. b: بیوچار ذرت و میکروب‌های موجود در خلل و فرج آن. c: بیوچار ۱۰۰ ساله از یک آتش‌سوزی جنگل. d: بیوچار ۳۵۰ ساله از آتش‌سوزی جنگل (لهمان و همکاران، ۲۰۱۱).

باکتری‌ها و قارچ‌ها برای تجزیه سوبسترای موجود در محیط اطراف به ملکول‌های کوچک‌تر، انتقال آنها به سلول و استفاده از آن برای فعالیت‌های متابولیکی خود به آنزیم‌های برون سلولی متکی هستند. بنابراین محیط مجاور جاندار با ترشح آنزیم‌های برون سلولی مورد کاوش قرار می‌گیرد. چون آنزیم‌های برون سلولی در حالت آزاد به سرعت تجزیه می‌شوند لذا برای ادامه فعالیت می‌بایست جذب ذرات و کلوئیدهای خاک شوند

تا از دسترس پروتئازها محافظت شوند (کرول و همکاران، ۲۰۰۹). از این لحاظ سطوح ویژه بسیار اهمیت دارند و این سطوح می‌تواند سطوح خاکدانه، ریشه گیاه، یک ذره رس، مواد آلی و بیوچار باشد. فعالیت آنزیم‌های برون سلولی به محلی از آنزیم که با سطح ذرات بیوچار برهمکنش می‌دهد، بستگی دارد (کالدول، ۲۰۰۵). اگر جایگاه فعال آنزیم بدون پوشش، عملیاتی و آزاد باشد تا با محیط واکنش دهد، افزایش فعالیت اتفاق خواهد افتاد. در صورت مسدود شدن جایگاه فعال، فعالیت کاهش خواهد یافت (برنز و همکاران، ۲۰۱۳).

بنابراین گروه‌های خاصی از آنزیم‌ها با افزودن بیوچار فعال‌تر شده و گروه دیگر بسته به ترکیب ملکولی و خصوصیات تاخوردگی و چگونگی جذب سطحی به بیوچار کاهش فعالیت نشان می‌دهند (پازفریرو و همکاران، ۲۰۱٤). به طور کلی مصرف بیوچار موجب ایجاد تغییراتی در تنوع، جمعیت و فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک می‌گردد. انتظار می‌رود که ترکیب های قابل حل در آب مانند اسیدها، الکلها، آلدهیدها، کتونها و قندها که توسط ریزجانداران خاک به راحتی متابولیزه می‌شوند، اثرهای مثبتی بر ریزجانداران خاک داشته باشند در حالی که ممکن است حضور ترکیب‌هایی مانند هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، زایلنوز، اکرولین، فرمالدهید، کرسولز و سایر ترکیب های کربوکسیلی سمی که بسته به شرایط گرماکافت ممکن است از طریق بیوچار به خاک افزوده شوند، دارای اثرهای ضدباکتریایی و ضدقارچی باشند (عظیم‌زاده و نجفی، ۱۳۹۵).

تنوع میکروبی: نتایج مطالعات مختلف انجام شده نشان می‌دهد مصرف بیوچار، بسته به خصوصیات بیوچار، موجب ایجاد تغییراتی در جامعه زیستی خاک می‌گردد. برای مثال، اشتنبیس و همکاران (۲۰۰۹) اثر بیوچار را بر فعالیت میکروبی خاک مورد بررسی قرار داده و دریافتند که بیوچار مخمر موجب افزایش رشد قارچ‌ها، ولی بیوچار گلوکز موجب افزایش جمعیت باکتری‌های گرم منفی می‌گردد. واتزینگر و همکاران (۲۰۱٤) پاسخ جامعه میکروبی خاک را به افزودن بیوچار گندم و درخت بید بررسی کردند. افزودن بیوچار موجب افزایش زیست توده میکروبی و تغییر جامعه میکروبی گردید و جمعیت باکتری‌های گرم منفی و اکتینومیست‌ها بیشترین پاسخ را به افزودن بیوچار نشان دادند. افزایش زیست توده میکروبی در این تحقیق به افزایش غلظت فسفر و پتاسیم قابل دسترس، افزایش ظرفیت نگه‌داری آب در خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، بهبود شرایط تغذیه‌ای و فیزیکی خاک و توانایی سازگاری بیشتر باکتری‌های گرم منفی به تغییر شرایط محیطی نسبت داده شد. در این مطالعه بخشی از کربن بیوچار (۲٪) مورد استفاده میکروب‌ها قرار گرفت و از این رو جمعیت قارچ‌ها و باکتری‌های گرم مثبت که تجزیه‌کنندگان بیوچار هستند، افزایش نیافت. کویی و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر بیوچار بر فعالیت میکروبی مزارع برنج آلوده به فلزات سنگین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد، مصرف بیوچار موجب افزایش جمعیت اکتینومیست‌ها و قارچ‌ها؛ و افزایش فعالیت آنزیم‌های سلولاز، فسفاتاز و سوکراز گردید. اشتینر و همکاران (۲۰۱۱) افزایش فعالیت و سرعت رشد میکروبی را با افزودن بیوچار به خاک مشاهده کردند. در این مطالعه علی‌رغم افزایش سرعت تکثیر میکروبی پس از افزودن گلوکز در خاک تیمار شده با بیوچار، تنفس خاک افزایش نیافت. این اختلاف بین تنفس پایین خاک و جمعیت میکروبی بالا یکی از خصوصیات خاک‌های ترا پرتا[4] (خاک‌های سیاه آمازون، نام محلی برای خاک‌های منطقه آمازون برزیل) است. این نتایج نشان می‌دهد وجود مواد آلی کم تجزیه‌پذیر همراه با مقدار کافی عناصر مغذی قادر به حمایت از رشد جمعیت میکروبی هستند.

فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک: مصرف بیوچار در خاک به علت تغییر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک موجب ایجاد تعییراتی در فعالیت میکروبی خاک می گردد (جدول ۳). گالوز و همکاران (۲۰۱۲) اثرات کاربرد

4 - terra preta

بیوچار (تهیه شده در ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد)، محصولات جانبی فرایندهای انرژی زیستی و کمپوست را بر دینامیک کربن، نیتروژن، قابلیت دسترسی عناصر غذایی و فعالیت آنزیمی خاک مورد بررسی قرار دادند. تنفس خاک تیمار شده با بیوچار اختلاف معنی‌داری با نمونه شاهد نداشت، میزان کربن معدنی شده از بیوچار بعد از یک ماه کمتر از ۱٪ و ضریب هوموسی شدن بیوچار ۹۹٪ بود که این مشاهده به میزان کم کربن فعال نسبت داده شد. هم چنین در این مطالعه بیوچار اثر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم‌های بتاگلوکوزیداز، لوسین آمینوپپتیداز و فسفاتاز نداشت که علت این عدم افزایش فعالیت نیز بخاطر عدم افزوده شدن سوبسترای این آنزیم‌ها عنوان شد. بامینگر و همکاران (۲۰۱٤) در یک مطالعه انکوباسیونی اثرات زیستی بیوچار را در دو خاک جنگلی و زراعی مورد آزمایش قرار دادند. در این آزمایش بیوچار (گرماکافت در ٦۰۰ درجه سانتی-گراد) و هیدروچار (محصول کربنی آبگرم، این محصول فرایند تولید متفاوت و نسبت هیدروژن به کربن بالاتر نسبت به بیوچار دارد، ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) مورد آزمایش قرار گرفتند. در این مطالعه فعالیت انواع آنزیم‌ها، شامل آلفاگلوکوزیدار، بتاگلوکوزیداز، بتازایلوزیداز، کیتیناز، اسید فسفاتاز و لوسین آمینوپپتیداز مورد مطالعه قرار گرفت.

جدول۳- اثرات مصرف بیوچار بر خصوصیات میکروبیولوژیکی خاک

منبع بیوچار	دمای تهیه بیوچار (°C)	میزان مصرف بیوچار (ton/ha)	متغیر اندازه‌گیری شده	تغییرات (٪)	منبع
لجن فاضلاب لجن رنگ زدایی چوب کاج Miscanthus	۴۵۰ ۶۰۰ ۸۰۰	۹۰	فعالیت آنزیم بتا گلوکوزیداز فعالیت آنزیم ساکاراز فعالیت آنزیم بتا گلوکوامینیداز فعالیت آنزیم اورهاز فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز میانگین هندسی فعالیت آنزیم	(+۱۸۹)- (+۱۶۱) (+۲۵۰)- (+۱۵۰) (+۲۳۰) ـ (+۶۰) (+۳۳) ـ (+۸) (+۳۰۰) ـ (+۵۰) (+۱۳۰) ـ (+۷۰)	پازفریرو و همکاران (۲۰۱۲)
کلش گندم	۴۵۰	۱۰ و ۲۵	خروج دی اکسید کربن خروج گاز متان خروج گاز N_2O فعالیت آنزیم دهیدروژناز فعالیت آنزیم بتاگلوکوزیدار فعالیت آنزیم اورهاز	(۰) (+۲۵) +(۶۶- ۹۹) (۰) (+۲۵) (+۱۵۰)	وو و همکاران (۲۰۱۳)
کلش گندم	۳۵۰ ۶۵۰	۳۰ و ۴۵	فعالیت آنزیم دهیدروژناز فعالیت آنزیم اورهاز فعالیت آنزیم پروتتاز فعالیت آنزیم فسفاتاز فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز	(+۱۶۸)- (+۷۱) (+۱۲۷)- (+۷۷) (+۷۴) ـ (+۷) (+۱۹۸) ـ (+۱۲۰) (+۳۰۰) ـ (+۵۰)	اولسکزوک و همکاران (۲۰۱۴)
لجن فاضلاب	۶۰۰	۸۰ و ۱۶۰	تنفس پایه ضریب متابولیک فعالیت آنزیم بتاگلوکوزیداز فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز فعالیت آنزیم دهیدروژناز میانگین هندسی فعالیت آنزیمها	(-۸۵)- (-۴۹) (-۶۵ ـ)- (-۳۷) (-۵۳) (+۳۶) (+۲۷۰) (+۱۹)	پازفریرو و همکاران (۲۰۱۲)
ریشه چغندر	۱۸۰ و ۲۰۰	۳۰ و ۳۰۰	طول هیف قارچ مایکوریزا درصد اشغال ریشه	(+۱۵) (+۱۵۰)	سلیم و همکاران (۲۰۱۳)
چوب راش، فندق، بلوط و توس	۵۰۰	۳۰ و ۶۰	تنفس ناشی از سوبسترا کربن کل و قابل عصاره گیری عملکرد گندم ضریب متابولیک	(+۷۰) (۰) (+۳۲) (۰)	روتیگلیانو و همکاران (۲۰۱۳)
چوب کاج	-	۱۵ و ۳۰	ظرفیت نگه داری آب در خاک فعالیت آنزیم دهیدروژناز جمعیت میکروبی خاک	(+۳/۵) (+۱۵) بدون روند مشخص	اندرسون و همکاران (۲۰۱۱)

بالاترین میزان زیست توده میکروبی در تیمار هیدروچار مشاهده شد و دو تا سه برابر میزان زیست توده نمونه شاهد (بدون بیوچار) بود. از بین آنزیم‌ها فقط فعالیت بتاگلوکوزیداز در خاک جنگلی افزایش یافت که به افزایش تولید آنزیم‌هایی که سوبسترای آنها موجود است، نسبت داده شد. هم چنین بالاترین فعالیت آنزیمی در خاک تیمار شده با هیدروچار مشاهده گردید. پازفریرو و همکاران (۲۰۱٤) اثرات متقابل چهار نوع بیوچار (تهیه شده در ٤٥٠، ٦٠٠ و ٨٥٠ درجه سانتی‌گراد) و کرم خاکی را بر عملکرد گیاه و فعالیت آنزیمی خاک مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن بیوچار موجب افزایش زیست توده میکروبی (این اختلاف بین تنفس پایین خاک و جمعیت میکروبی بالا یکی از خصوصیات خاک‌های ترا پرتا، خاک‌های سیاه آمازون، نام محلی برای خاک‌های منطقه آمازون برزیل) است ، مواد آلی، pH خاک و افزایش فعالیت آنزیم های بتاگلوکوزیداز (۱٦۹٪-۵۹٪)، اینورتاز (۱۱٦٪)، بتاگلوکزآمینیداز (۲۳۳٪)، اوره آز (۲۷٪) و آریل سولفاتاز (۳۵۰٪) گردید. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش فعالیت آنزیمی توسط بیوچارهای مختلف متفاوت است و روند ثابتی را برای افزایش فعالیت آنزیم‌های مختلف نشان نمی‌دهند.

دلایل افزایش فعالیت آنزیمی در این مطالعه جذب سطحی باکتری‌ها توسط بیوچار و ممانعت از شستشوی آنها از خاک، حفاظت باکتری‌ها و قارچ‌ها در مقابل چرا شدن توسط سایر جانداران، تأمین بخشی از نیاز غذایی میکروب‌ها توسط بیوچار و در نهایت اثر آهکی بیوچار (افزایش pH خاک) عنوان گردید. طلوعی داراب (۱۳۹۵) با بررسی فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز و فسفاتازهای اسیدی و قلیایی در خاک و بیوچار در کشت گلدانی ذرت تحت تنش کم آبی، نشان داد فعالیت فسفاتازهای اسیدی و قلیایی در خاکهای تیمار شده با بیوچار نسبت به خاکهای بدون بیوچار افزایش نشان داد. همچنین مؤثرترین تیمار برای فعالیت فسفاتازهای اسیدی و قلیایی در بیوچار، تیمار ۱٪ وزنی بود. فعالیت اوره آز در بیوچار در تیمار ۲٪ وزنی بیشتر بود. در شرایط تنش بیوچار فعالیت فسفاتاز اسیدی خاک را افزایش داد و فعالیت فسفاتاز قلیایی و اورهآز خاک در تیمارها با هم اختلاف معنی‌دار نداشتند.

مستو و همکاران (b ۲۰۱۳) تأثیر سطوح صفر، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم در کیلوگرم بیوچار سنبل آبی تهیه شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد را بر فعالیت زیستی خاک مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه خصوصیات بیوشیمیایی خاک از قبیل فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز، کاتالاز، هیدرولیز فلورسین دی استات، تنفس میکروبی و زیست توده فعال میکروبی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این بررسی افزایش فعالیت فسفاتاز اسیدی (۳۲٪)، فسفاتاز قلیایی (۲۲/۸٪)، هیدرولیز فلورسین دی استات (۵۰٪)، کاتالاز (۸۰٪)، دهیدروژناز (۲۱٪) را در سطح ۲ درصد بیوچار نشان داد. همچنین زیست توده فعال میکروبی سه برابر و تنفس پایه خاک ۱/۹ برابر افزایش یافت. دلیل افزایش فعالیت آنزیمی در این مطالعه، بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک و افزایش تنفس پایه خاک به افزودن کربن ناپایدار در حضور بیوچار بود. در مطالعه دیگری مستو و همکاران (a ۲۰۱۳) نشان دادند که افزودن بیوچار (به میزان چهار تن در هکتار) موجب افزایش فعالیت دهیدروژناز (٤۰٪)، هیدرولیز فلورسین دی استات (۱۲/٦٪)، فسفاتاز قلیایی و زیست توده میکروبی فعال (۲۷/۹٪) شد، ولی فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز، فنل اکسیداز، کاتالاز و تنفس پایه خاک تغییر نکرد و فعالیت فسفاتاز اسیدی به خاطر افزایش pH خاک کاهش یافت. همچنین ضریب متابولیک، یعنی نسبت تنفس پایه خاک به زیست توده میکروبی فعال، بر اثر افزودن بیوچار ۲۵٪ کاهش یافت. اولسکزوک و همکاران (۲۰۱٤) اثر آفت-کش‌ها را بر گیاه، میکروب‌ها و فعالیت آنزیمی در حضور مقادیر ۳۰ و ٤۵ تن در هکتار بیوچار تهیه شده در دمای ٦۵۰ درجه سانتی‌گراد مطالعه کردند. نتایج به دست آمده حاکی از تحریک فعالیت آنزیمی توسط بیوچار و کاهش

اثر آفت‌کش بر فعالیت آنزیمی و گروه‌های خاصی از میکروب‌ها است. در این مطالعه فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز، فسفاتاز قلیایی، اوره‌آز، و پروتئاز مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص گردید که متناسب با سطح بیوچار مصرف شده، به ترتیب فعالیت دهیدروژناز ۱٦۸٪ و ۷۱٪، اوره‌آز ۷۷٪ و ۱۲۷٪، فسفاتاز ۱۹۸٪ و ۲۰۰٪، و پروتئاز ۷٤٪ و ۷٪ افزایش یافت و فقط فعالیت اوره‌آز با افزایش میزان بیوچار مصرف شده افزایش یافت. افزایش فعالیت اغلب آنزیم‌ها با مصرف ۳۰ تن در هکتار بیوچار به ورود منابع اضافی کربن و عناصر غذایی و هم چنین افزایش ظرفیت جذبی خاک و اثر غیر مستقیم آن در نگه-داری آب نسبت داده شد. با این حال، تأثیر بیوچار بر خصوصیات زیستی خاک همواره مثبت نبوده است و در برخی موارد اثار منفی نیز مشاهده شده است. برای مثال دمپستر و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر افزودن سطوح صفر، ۵ و ۲۵ تن در هکتار بیوچار تهیه شده در ٦۰۰ درجه سلسیوس از اکالیپتوس را بر خصوصیات میکروبی خاک مورد بررسی قرار دادند و نتایج آنها نشان داد مصرف بیوچار زیست توده میکروبی (۲۰٪)، نیتروژن معدنی (۱۰۰٪)، نیتریفیکاسیون خالص (۱۳۰۰٪) و معدنی شدن خالص نیتروژن (۱۰۰۰٪) را کاهش داد. همچنین نسبت کربن به نیتروژن میکروبی از ۸:۱ به ۵:۱ کاهش یافت و ترکیب جامعه میکروبی با افزودن ۲۵ تن در هکتار بیوچار تغییر کرد، در حالی که افزودن ۵ تن در هکتار آن تأثیر معنی‌داری نداشت. کاهش نسبت کربن به نیتروژن میکروبی تغییر به سمت جمعیت غالب باکتریایی را نشان داد. هم چنین در این تحقیق معدنی شدن نیتروژن بر اثر افزودن بیوچار از ۱۱ میلی‌گرم درکیلوگرم خاک خشک به یک میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش یافت. همچنین نتایج مطالعه وارنوک و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد مصرف سطوح مختلف بیوچارهای تهیه شده در دماهای ٦۰۰، ٤۰۰، ۳٦۰ و ٤۳۰ درجه سلسیوس باعث کاهش آلودگی مایکوریزی (۷۳٪–۵۸)، فسفر قابل جذب (۳٤٪–۲۸)، طول هیف قارچ مایکوریز (۹۵٪) و فراوانی آنها (۷۷٪) گردید.

تأثیر بیوچار بر رشد و عملکرد گیاه

همانطور که بیان شد، در اغلب موارد در مطالعات انجام شده، بیوچار با تغییر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک موجب بهبود حاصلخیزی خاک شده و در نهایت موجب افزایش رشد و عملکرد گیاه می گردد. تأثیر بیوچار بر عملکرد گیاه به فاکتورهای مختلف از جمله وضعیت حاصلخیزی اولیه خاک، بافت خاک، دمای تهیه و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچار و حتی نوع گیاه بستگی دارد و می‌تواند باعث افزایش یا کاهش عملکرد گیاه گردد. مطالعات متعدد انجام شده نشان دهنده اثرات مثبت و منفی بیوچار بر حاصل خیزی خاک و عملکرد گیاه است. حجازی زاده و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی تأثیر بیوچار بر جذب سرب و کادمیم لجن فاضلاب کارخانه های کاغذ توسط آفتابگردان، افزایش وزن خشک بخش هوایی و ریشه و کاهش جذب فلزات سنگین توسط گیاه را با مصرف بیوچار گزارش نمودند. تودرول (۲۰۱۱) اثر بیوچار را بر خصوصیات خاک و رشد گیاه مورد بررسی قرار داد. نتایج این بررسی نشان داد مصرف حدود ۱٪ بیوچار موجب افزایش جوانه زنی کاهو گردید که به افزایش نگهداری آب توسط بیوچار نسبت داده شده است. نتایج بدست آمده توسط ماژور و همکاران (۲۰۱۰) افزایش ۱٤۰ درصدی عملکرد و افزایش جذب کلسیم، منیزیم، پتاسیم، مس و منگنز نسبت به شاهد را نشان داد. مطالعه زانگ و همکاران (۲۰۱۲) افزایش ۷/۵ و ۱۵درصدی عملکرد ذرت را در اثر مصرف بیوچار نشان داد. در مقابل، برخی از محققان نه تنها افزایش عملکرد را مشاهده ننمودند بلکه برخی از بیوچارها موجب کاهش عملکرد گیاه شدند. برای مثال، راجکوویچ و همکاران (۲۰۱۲) در یک مطالعه گلخانه ای نشان دادند که سطح بالای مصرف بیوچار (۷٪ عملکرد ذرت را کاهش داد در حالیکه سطوح مصرف پایین تر

(۰/۵ و ۲٪) باعث افزایش عملکرد گردید. کرنلیسن و همکاران (۲۰۱۳) عدم تأثیر بیوچار چوب و ذرت را بر عملکرد گیاه گزارش دادند. محققین علت عدم تأثیر بیوچار بر افزایش عملکرد را حاصلخیزی ذاتی خاک و کافی نبودن سطح مصرف بیوچار گزارش نمودند. جونز و همکاران (۲۰۱۲) طی یک آزمایش سه ساله با استفاده از بیوچار چوب نتیجه گرفتند که استفاده از این نوع بیوچار در سال اول تأثیر کمی بر عملکرد ذرت داشت و در سال دوم اثر آن بر عملکرد علف کمتر بود و در سال سوم موجب افزایش عملکرد گیاه گردید. دنیک و همکاران (۲۰۱۱) رشد کمتر سویا را در خاک‌های تیمار شده با بیوچار دارای مقدار زیاد مواد فرار (۳۵ درصد) و افزایش رشد را در خاک‌های تیمار شده با بیوچار حاوی درصد کم مواد فرار (۱۱ درصد) مشاهده کردند. بنابراین مصرف بیوچار می تواند اثرات مثبت و منفی بر خصوصیات خاک داشته باشد. مصرف بیوچار در خاک می‌تواند عملکرد گیاه را ۶۰ درصد افزایش و یا تا حدود ۳۰ درصد کاهش دهد و این افزایش یا کاهش محصول به نوع خاک بستگی دارد. هرچه خاک کیفیت پایین‌تری داشته باشد (مقدار مواد آلی کمتر و ظرفیت پایین‌تر نگه‌داری عناصر غذایی) احتمال تحریک و افزایش عملکرد گیاه بیشتر است. به علاوه نوع بیوچار نیز بر خصوصیات خاک و عملکرد گیاه اثرگذار است. در یک منطقه مشخص، مصرف بیوچارهای متفاوت باعث پاسخهای مختلفی گردید. برخی از بیوچارها عملکرد را ۱۰۰ درصد افزایش دادند و برخی باعث از بین رفتن گیاه گردیدند (راجکوویچ و همکاران، ۲۰۱۲).

رهیافت ترویجی

با توجه به مطالب بیان شده تولید و مصرف بیوچار یکی از بهترین روشهای مدیریت و اصلاح خاک محسوب شده و می تواند برای افزایش پایدار ماده آلی خاک و بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده قرار گیرد. بعلاوه، تولید بیوچار باعث استفاده بهینه از ضایعات کشاورزی و صنعتی شده و می تواند جهت حفظ محیط زیست و کاهش آلاینده ها و تبدیل ضایعات به ترکیبات مفید مورد استفاده قرار گیرد. تولید این ماده و مصرف آن در خاکهای ایران که کمبود مواد آلی در آنها شایع است و پایداری بالای آن جهت حفظ سطح ماده آلی خاک و بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آنها می‌تواند به عنوان یکی از بهترین و آسانترین روشها مد نظر قرار گیرد. با این حال برای مشخص شدن اثرات مصرف بیوچار بر خاکهای آهکی ایران مطالعات بیشتری باید انجام گیرد.

پایداری این ماده و مقاومت آن در مقابل تجزیه موجب انباشت طولانی مدت کربن در خاک شده و از شدت خروج گازهای گلخانه ای از جمله دی اکسید کربن و نیتروزاکسید و آثار ناشی از آن بر گرم شدن کره زمین و تغییرات اقلیمی می کاهد این ماده می تواند با اصلاح خصوصیات فیزیکی از قبیل ساختمان خاک و دانه بندی آن شرایط فیزیکی خاک را برای رشد هر چه بهتر گیاه آماده نموده و لذا حاصلخیزی خاک را افزایش می دهد. بعلاوه با افزایش ظرفیت نگه داری آب و عناصر غذایی موجب افزایش راندمان مصرف کودهای شیمیایی شده و بهره وری از کودهای شیمیای بهبود می یابد. مصرف این ماده زیستی در خاک موجب افزایش جمعیت میکروبی خاک و فعالیت آنزیمی آن شده و در نتیجه موجب بهبود چرخه عناصر غذایی و استفاده از ظرفیت خود خاک در تأمین عناصر غذایی را موجب شده و می تواند مصرف کودهای شیمیایی را کاهش دهد. لذا با توجه به اثرات مفید این ماده بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و زیستی خاک در مناطق مختلف، انجام آزمایش‌ها و بررسی تأثیر آن بر خصوصیات خاکهای آهکی و عملکرد محصول در شرایط ایران پیشنهاد می‌گردد.

فهرست منابع

۱. بهشتی م، علیخانی ح، متشرع زاده ب و محمدی ل (۱۳۹۵) تغییرات کیفیت بیوچار تولید شده از کود گاوی در طی فرایند پیرولیز آهسته در دماهای مختلف. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، شمارهٔ ۱: ۷٦٤- ۷۵۹.

۲. حجازی زاده ا، غلامی زاده آهنگر ا، قربانی م (۱۳۹۵) تأثیر بیوچار بر جذب سرب و کادمیم لجن فاضلاب کارخانه های کاغذ توسط آفتابگردان (*Heliantus Annus L.*). نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲٦، شماره ۱/۲: ۲۷۱-۲۵۹.

۳. خادم ا، رئیسی ف و بشارتی ح (۱۳۹۵ الف). تاثیر بیوچار ذرت بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی در خاک های آهکی. دومین کنگره ملی توسعه و ترویج مهندسی کشاورزی و علوم خاک ایران. خرداد ۱۳۹۵، تهران.

٤. خادم ا، رئیسی ف و بشارتی ح (۱۳۹۵ ب). تأثیر دمای گرماکافت بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچار ذرت و تصاعد دی اکسید کربن از خاک. دومین کنگره ملی توسعه و ترویج مهندسی کشاورزی و علوم خاک ایران. خرداد ۱۳۹۵، تهران.

۵. دیوبند هفشجانی ل، ناصری ع، هوشمند ع، عباسی ف و سلطانی محمدی ا (۱۳۹٦) بررسی تأثیر بیوچار باگاس نیشکر بر خصوصیات شیمیایی یک خاک لوم شنی. مجله علوم و مهندسی آبیاری، جلد ٤۰، شماره ۱: ۷۲-٦۳.

٦. زلفی باوریانی م، رونقی ع، کریمیان ن، قاسمی و و یثربی ج (۱۳۹۵) اثر بیوچار تهیه شده از کود مرغی در دماهای متفاوت بر ویژگیهای شیمیایی یک خاک آهکی. نشریه علوم آب و خاک.، جلد ۲۰، شماره ۷۵: ۸٤- ۷۳.

۷. طلوعی داراب ع (۱۳۹۵) فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز و فسفاتازهای اسیدی و قلیایی در خاک و بیوچار در کشت گلدانی ذرت تحت تنش کم‌آبی. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ۸۷ صفحه.

۸. عظیم زاده ی و نجفی ن (۱۳۹۵) اثر بیوچار بر ویژگیهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک. نشریه مدیریت اراضی. جلد ٤، شماره ۲: ۱۷۳-۱٦۱.

۹. نجفی قیری م (۱۳۹٤) تأثیر کاربرد بیوچارهای مختلف بر برخی ویژگی های خاک و قابلیت جذب بعضی از عناصر غذایی در یک خاک آهکی. نشریه پژوهش‌های خاک. جلد ۲۹، شماره ۳: ۳۵۸-۳۵۱.

10. Amonette J. and Joseph S. 2009. Characteristics of biochar: Microchemical properties. *In*: Lehmann J. and Joseph S. Biochar for environmental management. Science and Technology. Earthscan, London, pp. 33–52.
11. Anderson C.R. Condron L.M. Clough T.J. Fiers M. Stewart A. Hill R.A. and Sherlock R.R. 2011. Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. Pedobiologia 54: 309– 320.
12. Aston S. Doerr S. and Perrott A.S. 2013. The impacts of pyrolysis temperature and feedstock type on biochar properties and the effects of biochar application on the properties of sandy loam. Geophysical Research Abstracts.
13. Baldock J.A. and Smernik R.J. 2002. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red Pine) wood. Organic Geochemistry 33:1093-1109.
14. Bamminger C. Marschner B. and Juschke E. 2014. An incubation study on the stability and biological effects of pyrogenic and hydrothermal biochar in two soils. European Journal of Soil Science 65:72–82.

15. Brownsort P.A. 2009. Biomass pyrolysis processes: performance parameters and their influence on biochar system benefits. Master of Science Thesis. University of Edinburgh, UK.
16. Burns R.G. DeForest J.L. Marxsen J. Sinsabaugh R.L. Stromberger M.E. Wallenstein M.D. Weintraub M.N. and Zoppini A. 2013. Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. Soil Biology and Biochemistry 58:216-234.
17. Caldwell B.A. 2005. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: a review. Pedobiologia 49:637–644.
18. Carter S. Shackley S. Sohi S. Suy T.B. and Haefele S. 2013. The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and cabbage (*Brassica chinensis*). Agronomy 3:404–418.
19. Chan K.Y. Van Zwieten L. Meszaros I. Downie A. and Joseph S. 2007. Assessing the agronomic values of contrasting char materials on Australian hardsetting soil. *In*: Proceedings of the Conference of the International Agrichar Initiative, Terrigal, NSW, Australia.
20. Cui L. Yan J. Yang Y. Li L. Quan G. Ding C. Chen T. Fu Q. and Chang A. 2013. Biochar for heavy metals in soil. Bioresources 8:5536–5548.
21. Cummer K.R. and Brown R.C. 2002. Ancillary equipment for biomass gasification. Biomass and Bioenergy 23:113-128.
22. Dempster D.N. Gleeson D.B. Solaiman Z.M. Jones D.L. and Murphy D.V. 2012. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. Plant and Soil 354:311–324.
23. Devi P. and Saroha A.K. 2013. Effect of temperature on biochar properties during paper mill sludge pyrolysis. International Journal of Chemtech Research 5:682–687.
24. Dume B. Berecha G. and Tulu S. 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.
25. Eastman C.M. 2011. Soil physical characteristics of an acric ochraqualf amended with biochar. Master of Science Thesis. Ohio State University, USA.
26. Elzobair K.A. Stromberger M.E. Ippolito J.A. Lentz R.D. 2016. Contrasting effects of biochar versus manure on soil microbial communities and enzyme activities in an Aridisol. Chemosphere 142:145-152.
27. Fang Y. Singh B. singh B.P. and Krull E. 2014. Biochar carbon stability in four contrasting soils. European Journal of Soil Science 65:60–71.
28. Farrell M. Kuhn T.K. Macdonald L.M. Maddern T.M. Murphy D.V. Hall P.A. Singh B.P. Baumann K. Krull E.S. and Baldock J.A. 2013. Microbial utilisation of biochar derived carbon. Science of the Total Environment 465:288–297.
29. Galvez A. Siniccoa T. Cayuelac M.L. Mingoranceb M.D. Fornasiera F. and Mondinia C. 2012. Short term effects of bioenergy byproducts on soil C and N dynamics, nutrient availability and biochemical properties. Agriculture, Ecosystems and Environment 160:3– 14.
30. Glaser B. Lehmann J. and Zech W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal- a review. Biology and Fertility of Soils 35:219–230.
31. Gundale M.J. and DeLuca T.H. 2006. Temperature and substrate influence the chemical properties of charcoal in the Ponderosa pine/Douglas-fir ecosystem. Forest Ecology and Management 231:86–93.

32. Herath H.M. Arbestain M.C. and Hedley M. 2013. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol. Geoderma 209-210:188–197.
33. Kanyaporn C. Kiatsiriroat T. Vorayos N. and Thararax C. 2012. Biochar production from freshwater algae by slow pyrolysis. Maejo International Journal of Science and Technology 6:186–195.
34. Karami N. Clemente R. Jimenez E.M. Lepp N.W. and Beesley L. 2011. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass. Journal of Hazardous Materials 191:41–48.
35. Krull E.S. Baldock J.A. Skjemstad J.O. and Smernik R.J. 2009. Characteristics of biochar: Organochemical properties. *In*: Lehmann J. and Joseph S. (Eds). Biochar for environmental management. Science and Technology. Earthscan, London, pp. 53–66.
36. Laird D.A. Fleming P.D. Karlen D.L. Wang B. and Horton R. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. Geoderma 158:436–442.
37. Laird D.A. Rogovska N.P. Garcia-Perez M. Collins H.P. Streubel J.D. and Smith M. 2010. Pyrolysis and biochar opportunities for distributed production and soil quality enhancement. *In*: Braun R. Karlen D. and Johnson D. Sustainable alternative fuel feedstock opportunities, challenges and roadmaps for six U. S. regions. Proceedings of the Sustainable Feedstocks for Advance Biofuels Workshop, pp. 257–281.
38. Lammirato C. Miltner A. and Kaestner M. 2011. Effects of wood char and activated carbon on the hydrolysis of cellobiose by β-glucosidase from *Aspergillus Niger*. Soil Biology and Biochemistry 43:1936–1942.
39. Lehmann J. and Joseph S. 2009. Biochar for environmental management- an introduction. *In*: Lehmann J. and Joseph S. (Eds). Biochar for environmental management: Science and Technology. Earthscan, London, pp. 1–11.
40. Lehmann J. Da Silva J.P. Steiner C. Nehls T. Zech W. and Glaser B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. Plant and Soil 249:343–357.
41. Lehmann J. Rillig M.C. Thies J. Masiello C.A. Hockaday W.C. and Crowley D. 2011. Biochar effects on soil biota- a review. Soil Biology and Biochemistry 43:1812–1836.
42. Liang B. Lehmann J. Solomon D. Kinyangi J. Grossman J. O'Neill B. Skjemstad J.O. Theis J. Luizao F.J. Peterson J. and Neves E.G. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. Soil Science Society of America Journal 70:1719–1730.
43. Mahtab A. Rajapaksha A.U. Lim J.E. Zhang M. Bolan N. Mohan D. Vithanage M. Lee S.S. and Ok Y.S. 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water- a review. Chemosphere 99:19–33.
44. Major J. Rondon M. Molina D. Riha S.J. and Lehmann J. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. Plant and Soil 333:117–128.
45. Masto R.E. Ansari M.A. George J. Selvi V.A. and Ram L.C. 2013 a. Coapplication of biochar and lignite fly ash on soil nutrients and biological parameters at different crop growth stages of *Zea mays*. Ecological Engineering 58:314– 322.

46. Masto R.E. Kumar S. Rout T.K. Sarkar P. George J. and Ram L.C. 2013 b. Biochar from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and its impact on soil biological activity. Catena 111:64–71.
47. Mohan D. Pittman C.U. and Steele P.H. 2006. Pyrolysis of Wood/Biomass: A critical review. Energy and Fuels 20:848-889.
48. Mullen C.A., Boateng A.A. Goldberg N. Lima I.M. Laird D.A. and Hicks K.B. 2010. Bio-oil and biochar production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. Biomass and Bioenergy, 34:67-74.
49. Mukherjee A. Lal R. and Zimmerman A.R. 2014. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. Science of the Total Environment 487:26–36.
50. Nigussie A. Endalkachew K. Mastawesha M. and Gebermedihin A. 2012. Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of Lettuces (*Lactuca sativa*) grown in chromium polluted soils. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science 12:369–376.
51. Novak J.M. Busscher W.J. Laird D.L. Ahmedna M. Watts D.W. and Niandou M.A.S. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a Southeastern coastal Plain soil. Soil Science 174:105–112.
52. Oleszczuk P. Josko I. Futa B. Patkowska S.P. Pałys E. and Kraska P. 2014. Effect of pesticides on microorganisms, enzymatic activity and plant in biochar amended soil. Geoderma 214–215:10–18.
53. Ouyang L. Wang F. Tang J. Yu L. and Zhang R. 2013. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 13:991–1002.
54. Paz-Ferreiro J. Fu S. Mendez A. and Gasco G. 2014. Interactive effects of biochar and the earthworm (*Pontoscolex corethrurus*) on plant productivity and soil enzyme activities. Journal of Soils and Sediments 14:483–494.
55. Paz-Ferreiro J. Gasco G. Gutiérrez B. and Mendez A. 2012. Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme ctivities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil. Biology and Fertility of Soils 48:511–517.
56. Rajkovich S. Enders A. and Hanley K. 2012. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. Biology and Fertility of Soils 48:271–284.
57. Rodriguez M. 2010. Biochar as a strategy for sustainable land management, poverty reduction and climate change mitigation/adaptation. Master of Science Thesis. University of Amsterdam, Nederland.
58. Rutigliano F.A. Romano M. Marzaioli R. Baglivo I. Baronti S. Miglietta F. and Castaldi S. 2014. Effect of biochar addition on soil microbial community in a wheat crop. European Journal of Soil Biology 60:9–15.
59. Salem M. Kohler J. Wurst S. and Rillig M.C. 2013. Earthworms can modify effects of hydrochar on growth of *Plantago lanceolata* and performance of arbuscular mycorrhizal fungi. Pedobiologia 56:219–224.
60. Shinogi Y. and Kanri Y. 2003. Pyrolysis of plant, animal and human waste: physical and chemical characterization of the pyrolytic products. Bioresource Technology 90: 241–247.
61. Singh B.P. Hatton B.J. Singh B. Cowie A.L. 2010. The role of biochar in reducing nitrous oxide emissions and nitrogen leaching from soil. 19th World congress of soil science, soil solutions for a changing world, Brisbane, Australia, 1–6 Aug 2010.

62. Smith J.L. Collins H.P. and Bailey V.L. 2010. The effect of young biochar on soil respiration. Soil Biology and Biochemistry 42:2345–2347.
63. Steinbeiss S. Gleixner G. and Antonietti M. 2009. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. Soil Biology and Biochemistry 41:1301–1310.
64. Steiner C. Melear N. Harris K. and Das K.C. 2011. Biochar as bulking agent for poultry litter composting. Carbon Management 2:227–230.
65. Thies J.E. and Rillig M.C. 2009. Characteristics of biochar: biological properties. *In*: Lehmann J. and Joseph S. (Eds). Biochar for environmental management: Science and Technology. Earthscan, London. pp. 85–106.
66. Tood Revell K. 2011. The effect of fast pyrolysis biochar made from poultry litter on soil properties and plant growth. Master of Science Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
67. Van Zwieten L. Kimber S. Morris S. Chan Y.K. Downie A. Rust J. Josepp S. and Cowie A. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of paper mill waste on agronomic performance and soil fertility. Plant and Soil 37:235–246.
68. Verheijen F. Jeffery S. Bastos A.C. Van Der Velde M. and Diafas I. 2010. Biochar application to soils: a critical scientific review of effects on soil properties processes and functions. Joint Research Centre Scientific and Technical Reports.
69. Warnock D.D. Mummeya D.L. McBride B. Major J. Lehmann J. and Rillig M.C. 2010. Influences of nonherbaceous biochar on arbuscular mycorrhizal fungal abundances in roots and soils: results from growth chamber and field experiments. Applied Soil Ecology 46:450–456.
70. Watzinger A. Feichtmair S. Kitzler B. Zehetner F. Kloss S. Wimmer B. Boltenstern S.Z. and Soja G. 2014. Soil microbial communities responded to biochar application in temperate soils and slowly metabolized ^{13}C-labelled biochar as revealed by ^{13}C PLFA analysis: results from a short term incubation and pot experiment. European Journal of Soil Science 65: 40–51.
71. Winsley P. 2007. Biochar and bioenergy production for climate change mitigation. New Zealand Science Review 64:5-10.
72. Wu F. Jia Z. Wang S.S. Chang X. and Startse A. 2013. Contrasting effects of wheat straw and its biochar on greenhouse gas emissions and enzyme activities in a Chernozemic soil. Biology and Fertility of Soils 49:555–565.
73. Yanai Y. Toyota K. Okazaki M. 2007 Effects of charcoal addition on N_2O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. Soil Science and Plant Nutrition 53:181–188.
74. Yang H. and Sheng K. 2012. Characterization of biochar properties affected by different pyrolysis temperatures using visible near infrared spectroscopy. International Scholarly Research Network Spectroscopy.
75. Zhang A. Liu Y. Pan G. Hussain Q. Li L. Zheng J. and Zhang X. 2012. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil from central China plain. Plant and Soil 351:263–275.
76. Zimmerman A.R. Gao B. and Ahn M.Y. 2011. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar amended soils. Soil Biology and Biochemistry 43:1169–1179.