

اثر بیوپچار بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک

یاسر عظیم‌زاده^۱ و نصرت‌الله نجفی

دانشجوی دکتری خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. yaser.azimzadeh@gmail.com

دانشیار خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. nanajafi@yahoo.com

دریافت: آذر ۱۳۹۳ و پذیرش: مرداد ۱۳۹۵

چکیده

بیوپچار نوعی ماده آلی غنی از کربن می‌باشد که از سوزاندن مواد آلی در شرایط اکسیژن کم و یا بدون اکسیژن تولید می‌شود. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فرد بیوپچار، آن را از سایر مواد آلی خاک متمایز می‌سازد. افزودن بیوپچار به خاک می‌تواند باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند افزایش سطح ویژه، ظرفیت نگهداری آب، تهویه و کاهش فرسایش خاک، شیمیایی مانند افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، pH کربن آلی، فراهمی عناصر و کاهش خطر آلاینده‌های خاک و بیولوژیکی مانند افزایش کلونیزاسیون و حفاظت از ریزجانداران در برابر شکارچی‌ها و افزایش حاصلخیزی خاک و عملکرد محصول، ترسیب کربن و جلوگیری از تغییرات اقلیم و تولید سوخت زیستی شود. با این حال، بیوپچار ممکن است دارای اثرهای منفی بر محیط زیست و خاک باشد. به‌علاوه نوظهور بودن تولید و استفاده از بیوپچار، اثرهای مثبت و منفی آن بر اجزای مختلف محیط زیست و برهم‌کنش‌های آن در خاک هنوز به‌درستی روشن نشده است. علاوه بر آن، ویژگی‌های مختلف بیوپچار با گذشت زمان تغییر می‌کند ولی این تغییرات و اثرات بلندمدت آن هنوز به‌خوبی مشخص نشده است. بیوپچار به‌علاوه اثرات مفیدی که بر خاک‌ها و ترسیب کربن دارد، امروزه در جهان بسیار مورد توجه قرار گرفته است ولی در ایران تاکنون تحقیقات چندانی در این رابطه انجام نشده است. لذا لازم است تحقیقات بیش‌تری در مورد فرآیندهای تولید و استفاده از بیوپچار در خاک‌های ایران انجام شود.

واژه‌های کلیدی: بیوپچار، گرماکافت، ویژگی‌های خاک.

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

مقدمه

یکی از انواع کودهای آلی که از زمان‌های گذشته مورد استفاده کشاورزان مناطق حاره قرار می‌گرفته است بیوچار^۱ می‌باشد. بیوچار ماده جامد سیاه‌رنگ غنی از کربن پایدار می‌باشد که در نتیجه سوزاندن مواد آلی در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن کم، در دمای کمتر از ۷۰۰ درجه سلسیوس تولید می‌شود که به این فرآیند، گرماکافت^۲ گفته می‌شود. برای تولید بیوچار در مقادیر زیاد، معمولاً از دستگاه‌های بزرگی که برای این منظور ساخته می‌شوند (دستگاه گرماکافت کننده) استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها دارای یک مخزن بزرگ می‌باشند که زیست‌توده در داخل آن ریخته شده و حرارت داده می‌شود. زیست‌توده مواد آلی در طی فرآیند گرماکافت تبدیل به گاز زیستی، روغن زیستی و زغال زیستی (بیوچار) می‌شود. از گاز و روغن زیستی می‌توان برای تولید انرژی استفاده کرد ولی بیوچار به علت ویژگی‌های منحصر به فردی که دارد، به عنوان اصلاح کننده خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. 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، زیست‌توده داخل مخزن تبدیل به بیوچار شده و روغن و گاز زیستی تولید شده نیز از طریق خروجی‌هایی که بدین منظور در مخزن تعبیه شده‌اند خارج می‌شوند. زیست‌توده‌ها و مواد آلی مانند بقایای محصولات کشاورزی (کاه و کلش گندم، شلتوک برنج)، شاخ و برگ و چوب درختان، لجن فاضلاب، کودهای دامی و تایر اتومبیل را می‌توان به بیوچار تبدیل کرد (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹). شرایط فرآیند گرماکافت مانند حداکثر دمای گرماکافت، سرعت افزایش دما و مدت زمان ماندن در دمای حداکثر تأثیر زیادی بر ویژگی‌های بیوچار و درصد ترکیب‌ها و عناصر بیوچار می‌گذارد. فرآیند گرماکافت باعث خارج شدن هیدروژن و اکسیژن از ساختمان

زیست‌توده می‌شود. با کاهش نسبت هیدروژن به کربن و اکسیژن به کربن در ساختمان بیوچار، درصد آروماتیسیته^۳ کربن در بیوچار افزایش می‌یابد. بنابراین، کربن آلی بیوچار ساختار آروماتیکی داشته و در برابر تجزیه‌های زیستی و غیر زیستی مقاومت بسیار زیادی دارد (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹). با افزایش دما، درصد بیوچار و درصد کربن آن کاهش یافته ولی درصد آروماتیکی بودن کربن افزایش می‌یابد و باعث افزایش مقاومت و پایداری زیستی بیوچار می‌شود. همچنین با افزایش دمای گرماکافت درصد تولید گاز زیستی افزایش و درصد تولید روغن زیستی تا یک حدی از دما (حدود ۵۰۰ درجه سلسیوس) افزایش یافته و سپس با افزایش دما کاهش می‌یابد. کاهش درصد روغن تولید شده در دمای بالاتر به علت تبدیل آن به گاز زیستی در دمای بالا می‌باشد. بنابراین، بیوچار تولید شده در دمای گرماکافت کم نسبت به دمای بالا به علت دارا بودن درصد بیشتری از عناصر غذایی دارای ویژگی اصلاح‌کنندگی بهتری برای خاک می‌باشد و بیوچار تولید شده در دمای گرماکافت بالا به علت مقاومت زیاد کربن در برابر تجزیه، دارای ظرفیت زیادی برای ترسیب کربن می‌باشد (ورهیجن و همکاران ۲۰۱۰).

امروزه گرم شدن کره زمین و تغییرات اقلیمی به چالش بزرگی در جهان تبدیل شده است و یافتن راه حل‌های مقابله با این پدیده توجه دانشمندان را در سرتاسر جهان به خود جلب کرده است و این مسئله در کشورهای صنعتی که حجم انبوهی از گازهای گلخانه‌ای را تولید می‌کنند اهمیت بیشتری دارد. افزایش گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسیدکربن در اتمسفر مهم‌ترین عامل افزایش گرمایش زمین می‌باشد. گیاهان و درختان کربن اتمسفر را از هوا گرفته و با استفاده از نور خورشید و آب مواد مورد نیاز حیات خود را تولید می‌کنند. با تبدیل این زیست‌توده‌های آلی به بیوچار، تغییراتی در ساختار مواد آلی به وجود می‌آید که کربن آلی را برای صدها سال در

¹ Biochar
² Pyrolysis

³ Aromaticity

بیوچار و تحقیقات مربوط به آن در جهان رو به افزایش بوده و انتظار می‌رود که در سال‌های آینده، تحقیقات مربوط به بیوچار در کشور ایران نیز افزایش یافته و تولید و استفاده از این ماده در ایران نیز مورد توجه قرار گیرد. لذا، تحقیقات زیادی در این رابطه نیاز است تا بیوچارهای تهیه شده از زیست‌توده‌ها و شرایط گرماکافت مختلف در خاک‌های مناطق مختلف کشور مورد آزمایش قرار گیرد. در این مقاله به‌طور اجمالی به اثرات بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک اشاره می‌شود.

اثر بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

توزیع اندازه ذرات و ساختمان خاک: بیوچار

بعد از افزوده شدن به خاک، بر اثر هواپدگی و قرار گرفتن در معرض فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، با گذشت زمان به ذرات کوچک‌تر (ذرات به اندازه سیلت و یا کوچک‌تر) تبدیل شده و بدین ترتیب می‌تواند توزیع اندازه ذرات خاک را تغییر دهد (برودوسکی و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین با افزایش کربن آلی، تخلخل و سطح ویژه خاک و بهبود فعالیت میکروبی خاک، می‌تواند خاکدانه‌سازی را در خاک تحت تأثیر قرار داده و ساختمان خاک را بهبود بخشد (چان و همکاران، ۲۰۰۷؛ دونی و همکاران، ۲۰۰۹).

نفوذ آب و نگهداری آب در خاک: ظرفیت

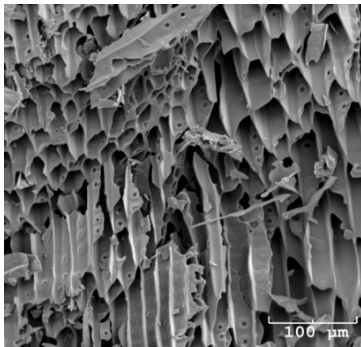
نگهداری آب خاک تحت تأثیر ترکیب‌های آلی و معدنی خاک قرار می‌گیرد. با افزایش مواد آلی خاک، ظرفیت نگهداری آب خاک نیز افزایش می‌یابد. ساختار مولکولی گسترده کربن‌های آروماتیک بیوچار باعث پایداری زیاد آن در خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک می‌شود (سوهی و همکاران، ۲۰۱۰). ترکیب ناهمگن بیوچار باعث می‌شود که در برهم‌کنش با خاک، ویژگی‌های آب‌دوست، آب‌گریز، اسیدی و بازی از خود نشان دهد (اتکینسون و همکاران، ۲۰۱۰). محققان معتقدند که بیوچار باعث بهبود نفوذپذیری خاک می‌شود ولی در مورد برخی از خاک‌ها مانند خاک‌های دارای رس زیاد، هنوز مورد بحث می‌باشد

ساختمان بیوچار به دام می‌اندازد و بدین ترتیب، غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر و تغییرات اقلیمی کاهش می‌یابد (لهمان و همکاران، ۲۰۰۶؛ لهمان و جوزف، ۲۰۰۹).

نوع زیست‌توده نیز تأثیر بسیار زیادی بر ویژگی‌های بیوچار تولید شده دارد. برای تولید بیوچار می‌توان از انواع ترکیبات و بقایای آلی مانند کاه و کلس گندم، شاخ و برگ درختان، انواع کودهای دامی، لجن فاضلاب و غیره استفاده کرد (لهمان و همکاران، ۲۰۰۶؛ لهمان و جوزف، ۲۰۰۹).

تحقیقات نشان می‌دهد که بیوچار نقش مهمی در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک مانند افزایش ذخیره کربنی، تعادل بوم‌نظام‌های خاکی، افزایش pH، CEC، ظرفیت بافری (لهمان و همکاران، ۲۰۰۳)، بهبود ساختمان خاک (چن و همکاران، ۲۰۰۷)، افزایش زیست‌توده میکروبی، فراهمی عناصر غذایی و بهبود حاصلخیزی خاک (استینیس و همکاران، ۲۰۰۹) دارد و این اثرهای بیوچار، به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن مربوط می‌باشد که از آن‌جمله می‌توان به تخلخل و سطح ویژه بالا، مقاومت زیاد در برابر تجزیه زیستی، غنی بودن از عناصر و مواد قابل جذب، pH و CEC زیاد و داشتن ظرفیت نگهداری آب بالا اشاره کرد (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹). بیوچار بسته به نوع زیست‌توده اولیه و شرایط گرماکافت، ممکن است دارای مقادیری فلزات سنگین و ترکیبات آلی سمی باشد و افزودن آن به خاک ممکن است آلودگی‌های زیست محیطی را در پی داشته باشد. در مورد مواد سمی موجود در بیوچارهای تولید شده از بیومس‌های مختلف و همچنین اثرات بلند مدت بیوچار بر خاک اطلاعات کافی در دسترس نبوده و نیاز به تحقیقات بیشتری در این زمینه می‌باشد (ورهیجن و همکاران، ۲۰۱۰).

بنابراین، ترسیب کربن، استفاده از بیوچار به عنوان اصلاح‌کننده ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و تولید سوخت زیستی از جمله مهمترین اهداف تبدیل زیست‌توده آلی به بیوچار می‌باشد. تولید و استفاده از



شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از بیوپچار تولید شده از ساقه ذرت (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹)

به عقیده دویر و همکاران (۲۰۰۰) مواد آلی قرار گرفته در سطوح ذرات خاک عامل اصلی دفع آب خاک می‌باشند. افزایش آب‌گریزی خاک، بعد از آتش‌سوزی در خاک‌ها به تولید ترکیب‌های آلی فرار و آب‌گریز مربوط می‌باشد. چنین ترکیب‌هایی در بیوپچار نیز وجود دارد ولی برخلاف انتظار، افزودن بیوپچار به خاک نه تنها فرسایش‌پذیری خاک را افزایش نمی‌دهد بلکه با بهبود ویژگی‌های مختلف خاک به ویژه ویژگی‌های فیزیکی خاک، خاکدانه‌سازی و ساختمان خاک را بهبود داده و فرسایش‌پذیری خاک را کاهش می‌دهد. در آتش‌سوزی بر اثر گرمای آتش، ترکیب‌های آلی فرار خارج شده از زیست‌توده در بین سطوح ذرات خاک پخش شده و مانند پوشش در سطوح ذرات خاک قرار گرفته و آب‌گریزی خاک را افزایش می‌دهند. درحالی که در بیوپچار ترکیب‌های آلی فرار در سطوح ذرات بیوپچار باقی می‌ماند و باعث افزایش آب‌گریزی خاک نمی‌شود. علاوه بر آن، بیوپچار نسبت به ذرات خاک تمایل بیش‌تری برای جذب انواع ترکیب‌های آلی دارد و در جذب چنین ترکیب‌هایی موفق‌تر از ذرات خاک عمل می‌کند (دویر و همکاران، ۲۰۰۰).

اثر بیوپچار بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

ظرفیت تبادل کاتیونی: بیوپچار نسبت به سایر مواد آلی خاک دارای سطح ویژه و بار منفی بیش‌تری می‌-

اسای و همکاران، ۲۰۰۹). بیوپچار می‌تواند توزیع اندازه منافذ، ساختمان، تخلخل و چگالی ظاهری خاک را تغییر داده و الگوی نفوذپذیری و مسیر جریان‌های ترجیحی و ماتریس آب و محلول خاک را تغییر داده و باعث افزایش نفوذپذیری خاک شود (اتکینسون و همکاران، ۲۰۱۰) ولی این اثر بیوپچار کوتاه‌مدت می‌باشد چون بعد از افزوده شدن به خاک، به سرعت به ذرات کوچک‌تر تبدیل می‌شود و ممکن است نفوذپذیری خاک را در بلندمدت کاهش دهد که به نوع بیوپچار و زمان بستگی خواهد داشت (برودوسکی و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین، بیوپچار به‌علت داشتن منافذ ریز می‌تواند مقدار آب بیش‌تری را در خاک نگهداری کرده و رطوبت قابل استفاده گیاه را افزایش دهد.

سطح ویژه: یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد بیوپچار که بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، سطح ویژه^۱ (SSA) زیاد آن می‌باشد. این ویژگی نقش بسیار مهمی در روابط خاک-بیوپچار بازی می‌کند. سطح ویژه بیوپچار بسیار متغیر بوده و گستره وسیعی دارد و به شدت تحت تأثیر زیست‌توده اولیه و شرایط تولید بیوپچار قرار می‌گیرد (دونی و همکاران، ۲۰۰۹)؛ به طوری که ممکن است بیوپچارهای ساخته شده از یک زیست‌توده یکسان، به‌علت متفاوت بودن شرایط تولید، دارای سطح ویژه متفاوتی باشند. هم سطح ویژه و هم توزیع منافذ ریز^۲ بیوپچار با افزایش دمای گرماکافت افزایش می‌یابد و این دو ویژگی به هم مرتبط می‌باشند.

فرسایش‌پذیری خاک: مواد آلی خاصیت

آب‌گریزی دارند و در صورتی که به صورت پوشش بر روی سطح ذرات خاک قرار گیرند ممکن است باعث افزایش دفع آب توسط ذرات خاک شده و فرسایش خاک را تشدید کنند.

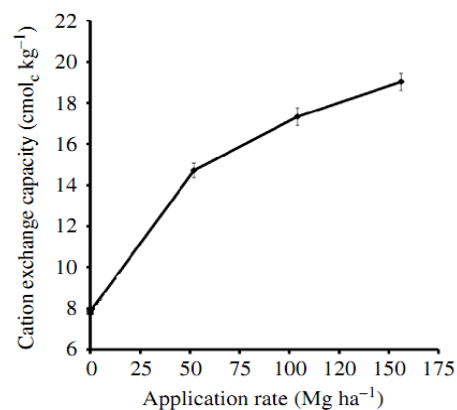
³ Scanning electron microscope

¹ Specific surface area
² Microporosity

قابل انتظار است. بنابراین، CEC بیوچار تازه تولید شده معمولاً بسیار کم می‌باشد ولی در حضور آب و اکسیژن در گذر زمان، افزایش می‌یابد (چنگ و همکاران، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸؛ لیانگ و همکاران، ۲۰۰۶). بیوچار تازه افزوده شده به خاک ممکن است در ابتدا ظرفیت تبادل آنیونی (AEC) از خود نشان دهد، در حالی که بیوچار مس‌تر، در pHهای بیش‌تر از ۳، ظرفیت تبادل کاتیونی از خود نشان می‌دهد. تغییرات و پایداری بیوچار در خاک، تحت تأثیر وضعیت رطوبت خاک نیز قرار می‌گیرد و وضعیت رطوبت خاک ممکن است معدنی‌شدن و تصاعد کربن بیوچار را در شرایط مختلف خاک تحت تأثیر قرار دهد که در این رابطه نیاز به تحقیقات بیش‌تری می‌باشد (چنگ و همکاران، ۲۰۰۸).

pH و EC: با وجود اینکه به‌علت وجود عناصر قلیایی (مانند کلسیم و منیزیم)، pH بیوچار عموماً خنثی تا قلیایی می‌باشد، ولی ممکن است pH آن از ۴ تا ۱۲ تغییر کند که به نوع ماده آلی و شرایط گرماکافت بستگی دارد. بیوچارهای با منشأ چوبی دارای pH کمتری نسبت به بیوچارهای علفی می‌باشند. pH بیش‌تر در بیوچار با منشأ علف نسبت به چوب احتمالاً مربوط به وجود عناصر قلیایی مانند سدیم و پتاسیم بیش‌تر در گیاه علفی نسبت به چوب می‌باشد (سینگ و همکاران، ۲۰۱۰b). وانگ و همکاران (۲۰۱۳) با مقایسه بیوچارهای تولید شده از هفت ماده آلی مختلف شامل چوب بامبو، چوب نارون، کلش برنج، کلش گندم، کلش ذرت، پوسته برنج و پوست نارگیل نشان دادند که pH بین ۷/۸ تا ۱۱/۱ متغیر بود. آنان گزارش کردند که pH بیوچارهای با منشأ چوب کمتر از علفی و به‌ترتیب بین ۱۰/۱-۷/۸ و ۱۱/۱-۹/۲ متغیر بود. مباگو و پیکولو (۱۹۹۷) گزارش کردند که مصرف بیوچار باعث افزایش pH خاک به اندازه ۱/۲ (از ۵/۴ به ۶/۶) شد. چیتالا و همکاران (۲۰۱۳) مشاهده کردند که افزودن بیوچار تولید شده از علوفه ذرت به خاک اسیدی، باعث افزایش pH خاک شد در حالی که مقدار EC خاک را چندان تحت تأثیر قرار نداد (شکل ۳).

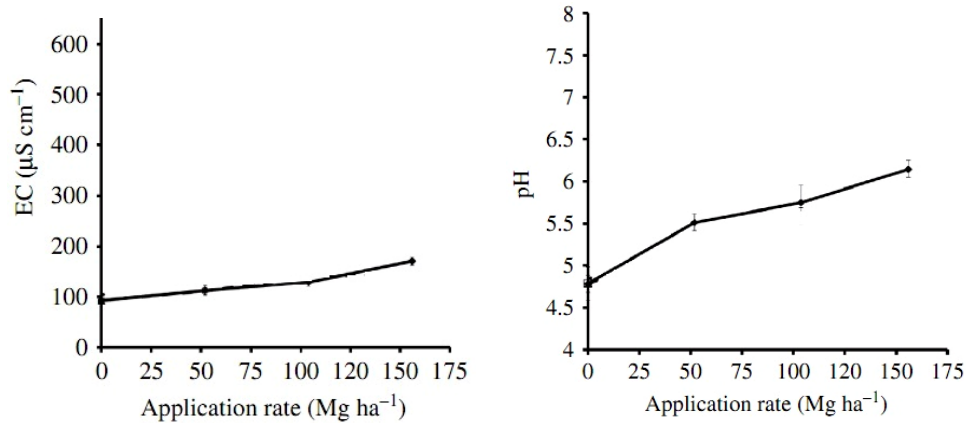
باشد که منجر به ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) زیاد بیوچار و توانایی آن در جذب^۱ و نگهداری انواع ترکیب‌های آلی و معدنی می‌شود (لیانگ و همکاران، ۲۰۰۶)؛ به‌طوری که مطالعات نشان می‌دهد بیوچار می‌تواند CEC خاک را تا ۵۰ درصد افزایش دهد (لهمان و همکاران، ۲۰۰۳) و با افزایش CEC خاک از شستشوی عناصر غذایی جلوگیری کرده و فراهمی آنها را برای گیاه افزایش دهد. با افزوده شدن بیوچار به خاک، در نتیجه اکسایش زیستی و غیرزیستی بیوچار، گروه‌های عاملی کربوکسیلی سطح بیوچار افزایش یافته و بار منفی زیادی در سطح آن ایجاد می‌شود. در نتیجه، CEC افزایش می‌یابد (چنگ و همکاران، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸). چیتالا و همکاران (۲۰۱۳) با افزودن مقادیر مختلف بیوچار تولید شده از علوفه ذرت به یک خاک اسیدی مشاهده کردند که با افزایش مقدار بیوچار به خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک افزایش می‌یابد (شکل ۲).



شکل ۲- اثر افزودن بیوچار تولید شده از علوفه ذرت بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (چیتالا و همکاران ۲۰۱۳)

چنگ و همکاران (۲۰۰۶) مشاهده کردند که نقش فرآیندهای غیرزیستی در اکسایش بیوچار بیش‌تر از فرآیندهای زیستی می‌باشد. بیوچار دارای ترکیب‌های پایدار آروماتیکی فراوانی می‌باشد (اشمیت و نوک، ۲۰۰۰) که با اکسایش این گروه‌ها در طول زمان بعد از افزوده شدن به خاک، افزایش بار منفی سطحی و CEC

¹Adsorption



شکل ۳- اثر افزودن بیوچار تولید شده از علوفه ذرت بر pH (راست) و EC (چپ) خاک اسیدی (چیتالا و همکاران، ۲۰۱۳)

اسیدهای رقیق به همراه بیوچار و یا مخلوط با آن می‌تواند اثر pH بالای بیوچار را در خاک‌های آهکی تا حدودی جبران نماید.

فراهمی عناصر غذایی: نقش بیوچار در عناصر

غذایی خاک، به نوع زیست‌توده اولیه بستگی دارد. از آنجایی که میزان عناصر موجود در زیست‌توده گیاهان مختلف متفاوت می‌باشد، نوع زیست‌توده اولیه، عامل کلیدی در تعیین میزان عناصر موجود در بیوچار می‌باشد. بنا به گزارش چان و زو (۲۰۰۹) دامنه غلظت عناصر پرمصرف (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) و همچنین نسبت C/N بیوچارهای مختلف ممکن است گسترده باشد (جدول ۲).

می‌توان در خاک‌های اسیدی از بیوچار به‌عنوان عامل آهک و افزایش دهنده pH خاک استفاده کرد. ممکن است برخی از بیوچارها دارای ظرفیت بیش‌تری در افزایش pH خاک باشند که به نوع زیست‌توده اولیه و فرآیند گرم‌ماکافت بستگی دارد (چان و همکاران، ۲۰۰۷). با توجه به اینکه خاک‌های کشورمان ایران عمدتاً آهکی و قلیایی می‌باشد، افزودن بیوچار با pH قلیایی به این خاک‌ها ممکن است اثر مطلوبی بر فراهمی برخی عناصر خاک نداشته باشد، هر چند که ممکن است ویژگی‌های فیزیکی خاک و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را بهبود بخشد. بنابراین، بهتر است برای تولید بیوچار برای افزودن به خاک‌های آهکی و قلیایی از بیومس‌هایی استفاده شود که pH بیوچار حاصل از آنها کمتر می‌باشد. احتمالاً استفاده از مواد ترکیباتی مانند گوگرد، کودهای آمونوم و

جدول ۲- دامنه و میانگین pH و مقدار برخی از عناصر موجود در بیوچار (چان و زو، ۲۰۰۹)

C/N	K (g/kg)	P (g/kg)	N (g/kg)	C (g/kg)	pH
۷	۱۰	۰/۲	۱/۷	۱۷۲	۶/۲
۵۰۰	۵۸/۰	۷۳/۰	۷۸/۲	۹۰۵	۹/۶
۶۱	۲۴/۳	۲۳/۷	۲۲/۳	۵۴۳	۸/۱

اما اثر روشن و دقیق بیوچار بر فراهمی عناصر غذایی خاک هنوز به‌درستی روشن نشده است (لهمان و همکاران، ۲۰۰۳). مقدار عناصر غذایی موجود در بیوچار به نوع ماده اولیه‌ای که بیوچار از آن تولید شده است بستگی دارد؛ معمولاً مقدار خاکستر بیوچارهای تولید شده

نقش بیوچار در فراهمی عناصر غذایی، در تحقیقات مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نتایج متفاوتی گزارش شده است؛ به‌طوری که با افزودن بیوچار به خاک، هم کاهش و هم افزایش فراهمی عناصر غذایی خاک و جذب آنها توسط گیاه در مطالعات مختلف گزارش شده

نیاز است تا اثرهای کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت بیوپچار را بر معدنی‌شدن و بی‌تحرک شدن نیتروژن در خاک مورد بررسی قرار دهد (سینگ و همکاران، ۲۰۱۰a). تحقیقات نشان می‌دهد که با افزودن بیوپچار در مقادیر زیاد (۱۰ یا ۲۰ درصد جرمی) به خاک، می‌توان به‌طور مؤثر از آبشویی یون‌هایی مانند آمونیوم از خاک جلوگیری کرد اما این اثر، به نوع بیوپچار و خاک و همچنین زمان تماس^۲ آن دو بستگی دارد (لهمان و همکاران، ۲۰۰۳). بیوپچار، به‌ویژه وقتی که دارای مقدار نیتروژن بیش‌تری است، ممکن است در اوایل افزوده شدن به خاک باعث افزایش آبشویی برخی عناصر (مانند نترات) از خاک شود (سینگ و همکاران، ۲۰۱۰a). سینگ و همکاران (۲۰۱۰a) نشان دادند که گرچه افزودن بیوپچار تازه تولید شده به خاک، اثر اندکی در جلوگیری از آبشویی آمونیوم از خاک دارد، ولی با گذشت زمان (حدود پنج ماه) بیوپچار تولید شده از چوب و کود مرغی در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس، آبشویی آمونیوم را از خاک آلفی‌سولز به میزان ۵۵ تا ۶۵ درصد کاهش داد در حالی‌که این اثر در همان بیوپچارهای تولید شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس مشاهده نشد.

علی‌رغم اینکه با گذشت زمان اقامت^۳ بیوپچار در خاک در حضور مواد هومیکی، غیرمتحرک شدن و کاهش نیتروژن قابل‌جذب گیاه اتفاق می‌افتد، فراهمی عناصری مانند فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم افزایش می‌یابد (یائو و همکاران، ۲۰۰۹). یائو و همکاران (۲۰۰۹) در یک آزمایش مزرعه‌ای با افزودن بیوپچار تولید شده از کود حیوانی به خاک فرسول نشان دادند که فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک با افزودن بیوپچار به خاک، افزایش یافت در حالی‌که با افزودن بیوپچار تولید شده از گیاهان سبز، آن نتیجه مشاهده نشد.

یون‌هایی مانند K^+ به‌صورت غیراختصاصی جذب سطوح بیوپچار می‌شوند چون اندازه بزرگ و بار کم دارند و در داخل شبکه بیوپچار به‌خوبی جای نمی‌گیرند. با این‌که هم یون‌های فسفات و هم سطوح بیوپچار دارای

از چوب، کمتر از بیوپچارهای علفی می‌باشد که نشان می‌دهد مقدار عناصر غذایی زیست‌توده علفی بیش‌تر از چوب می‌باشد (کائو و همکاران، ۲۰۰۹). مقدار نیتروژن کمتر در بیوپچار چوبی نسبت به علفی، به C/N بالای چوب مربوط می‌شود که می‌تواند تا ۱۰۰۰ نیز برسد. بیوپچار علفی (به‌ویژه در دمای گرم‌اکافت بالا) دارای عناصر فسفر، کلسیم، پتاسیم، سدیم و منیزیم بیش‌تری نسبت به بیوپچار چوبی می‌باشد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۳). با وجود اینکه معمولاً بیوپچار علفی از نظر عناصر معدنی غنی‌تر از بیوپچار چوبی می‌باشد ولی تمام این عناصر برای گیاهان قابل استفاده نیستند و اطلاعات خیلی اندکی در رابطه با چگونگی فراهم شدن عناصر موجود در بیوپچار برای گیاهان وجود دارد. با این حال، به عقیده لهمان و همکاران (۲۰۰۳) بیوپچار منبعی مستقیم برای عناصر پتاسیم، کلسیم، فسفر، روی و مس می‌باشد و فراهمی عناصر غذایی بر اثر افزودن بیوپچار به خاک، می‌تواند از طریق افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، تغییر pH خاک و یا افزوده شدن مستقیم عنصر از بیوپچار به خاک افزایش یابد.

وقتی بیوپچار به‌تنهایی به خاک افزوده می‌شود، به‌علت نسبت C/N زیاد (بیش‌تر از ۴۰۰) (گوندا و دلوکا، ۲۰۰۷) ممکن است باعث غیرمتحرک شدن^۱ و کمبود نیتروژن در گیاهان شود و احتمالاً یکی از دلایل کاهش عملکرد گیاه پس از مصرف بیوپچار در خاک، به غیرمتحرک شدن نیتروژن مربوط می‌باشد (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹). با این حال، در برخی از تحقیقات نیز عدم کاهش نیتروژن خاک در اثر افزودن بیوپچار به خاک گزارش شده است؛ چرا که کربن و نیتروژن قابل‌جذب میکروب‌ها در بیوپچار محدود می‌باشد و حتی ممکن است بیوپچار مولکول‌های آلی با C/N بالا را از محلول خاک جذب کرده و معدنی شدن را افزایش دهد (گوندا و دلوکا، ۲۰۰۷). تغییرات نیتروژن با افزودن بیوپچار به خاک هنوز به‌خوبی مشخص نشده است و تحقیقات بیش‌تری

²Aging
³Residence time

¹Immobilization

فسفر در pH بین ۴ تا ۸/۵ می‌باشد. بیوجار ممکن است با افزایش pH خاک اسیدی، فراهمی برخی از عناصر برای گیاه مانند آلومینیوم، مس و منگنز را کاهش دهد و در عوض، فراهمی برخی از عناصر مانند فسفر، نیتروژن، کلسیم، منیزیم و مولیبدن را افزایش دهد (اتکینسون و همکاران، ۲۰۱۰). با این حال، اثر بیوجارهای مختلف بر تغییرات عناصر در خاک هنوز به خوبی مشخص نشده و نیاز به مطالعه بیشتر در این زمینه وجود دارد. شکل ۴ تصاویر بیوجارهای تولید شده از مواد آلی مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۴. تصاویر زیست‌توده و بیوجار مواد آلی مختلف (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹)

عناصر غذایی و مواد آلی تازه است، انجام می‌شود (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹). ویروز و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که با افزودن بیوجار به خاک، تنفس میکروبی در خاک کاهش یافت. سلیمان و همکاران (۲۰۱۰) مشاهده کردند که بیوجار باعث افزایش کلونیزاسیون میکوریز شد که به علت اثر غیرمستقیم بیوجار در افزایش حل‌پذیری فسفر در خاک می‌باشد. تیز و ریلینگ (۲۰۰۹) نیز افزایش کلونیزاسیون و کاهش تنفس میکروبی را با افزودن بیوجار به خاک مشاهده کردند. در مقابل، ترسدر (۱۹۹۸) نشان داد که افزودن بیوجار تولید شده از کود مرغی به خاک باعث کاهش کلونیزاسیون قارچی در خاک شد.

بعد از فرآیند گرماکافت، ممکن است ترکیب‌های آلی مختلفی شامل پیرولیگنوز اسید^۱، خاکستر، روغن زیستی (استینر و همکاران، ۲۰۰۸) و مواد فرار^۲

بار الکتریکی منفی می‌باشند، ولی فسفر می‌تواند جذب سطوح بیوجار شود. در غلظت‌های برابر یونی، جذب سطحی یون $H_2PO_4^-$ به علت ظرفیت پیوند هیدروژنی زیاد و دفع الکترواستاتیکی کم، بسیار بیش‌تر از HPO_4^{2-} و PO_4^{3-} می‌باشد. ویژگی‌های جذب سطحی بیوجار، به کمپلکس‌های اکسیدی و گروه‌های اسیدی فنولی که با یون $H_2PO_4^-$ پیوند هیدروژنی تشکیل می‌دهند مربوط می‌شود. با این حال، سایر انواع پیوندها نیز ممکن است در جذب سطحی فسفر توسط بیوجار شرکت کند (بیاتون و همکاران، ۱۹۶۰). فراهمی و جذب سطحی فسفر در خاک به pH خاک وابستگی زیادی دارد و بیش‌ترین فراهمی

اثر بیوجار بر ویژگی‌های بیولوژیکی خاک

تحقیقات مختلف نشان داده است که افزودن بیوجار به خاک باعث بهبود فعالیت میکروبی خاک می‌شود (پیتیکاین و همکاران، ۲۰۰۰؛ کرول و همکاران، ۲۰۰۹). با این حال، اثرهای سمی برخی ترکیب‌های آلی چسبیده به سطوح بیوجار بر ریزجانداران خاک گزارش شده است (مک کلان و همکاران، ۲۰۰۷). سطوح بیوجار به علت جذب عناصر غذایی می‌تواند محیط مناسبی برای ریزجانداران خاکزی باشد (پیتیکاین و همکاران، ۲۰۰۰). علاوه بر آن، منافذ ریز موجود در بیوجار می‌تواند ریزجانداران را از شکار شدن توسط شکارچی‌هایی مانند پروتوزوآها و نماتدها محافظت کند و محیط مناسبی برای کلونیزاسیون باکتری و قارچ فراهم می‌کند (تیز و ریلینگ، ۲۰۰۹). با این حال، هنوز به درستی مشخص نشده است که آیا فعالیت میکروبی به درون ذرات بیوجار نفوذ می‌کند و یا اینکه کلونیزاسیون در سطح خارجی آن که دارای

¹Pyroligneous acids

²Volatile matter

ترکیب‌های آلی می‌باشد. علاوه بر آن، بیوجار می‌تواند به صورت غیرمستقیم و از طریق تأثیر بر ویژگی‌های خاک (مانند افزایش pH خاک اسیدی و عناصر غذایی)، بر کرم‌های خاکی و ریزجانداران خاک تأثیرگذار باشد. با این حال، افزودن بیوجار قلیایی در مقادیر زیاد به خاک، به علت اثرهای نامطلوب (مانند افزایش pH)، ممکن است اثر منفی بر کرم‌های خاکی و ریزجانداران خاک داشته باشد (لیسچ و همکاران، ۲۰۱۰). بیوجار معمولاً در خاک‌های اسیدی به عنوان عامل آهک^۸ استفاده شده و pH را افزایش می‌دهد و بدین ترتیب، زیست‌فراهمی عناصر را افزایش داده و فعالیت میکروبی خاک را بهبود می‌دهد؛ در نتیجه، ممکن است با افزایش فعالیت میکروبی خاک، تجزیه مواد آلی خاک شدت گرفته و معدنی شدن مواد آلی نیز افزایش یابد (لهمان و همکاران، ۲۰۰۶).

رہیافت ترویجی

تولید و استفاده از بیوجار در جهان به علت ویژگی‌های منحصر به فرد و ظرفیت آن در بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و حاصلخیزی خاک، کاهش آلودگی‌ها و ترسیب کربن، در حال افزایش است. با این حال، ممکن است اثرها و نتایج منفی نیز در پی داشته باشد. بنابراین، برای به حداقل رساندن اثرهای منفی احتمالی بیوجار بر محیط زیست و خاک و بهره‌گیری حداکثر از ظرفیت‌های این ماده مفید، ضروری می‌باشد که ویژگی‌ها و اثرهای متقابل آن در خاک‌های مختلف مورد مطالعه قرار گیرد. با توجه به پیچیدگی روابط بین بیوجار و خاک و نوظهور بودن تولید و استفاده از آن در علوم خاک، اطلاعات ما در رابطه با این ماده و فرآیندها و واکنش‌های مربوط به آن بسیار ناقص می‌باشد؛ لذا نتیجه‌گیری‌ها و پیشنهادات زیر جهت شناخت بیشتر ویژگی‌های بیوجار و روشن‌تر شدن رفتار آن در خاک ارائه می‌شود:

(مک‌کلان و همکاران، ۲۰۰۷) در سطح بیوجار باقی‌مانده سرنوشت این ترکیب‌های باقی‌مانده بر سطح بیوجار، بعد از افزوده شدن آن به خاک و در طول زمان هنوز مشخص نشده است. انتظار می‌رود که ترکیب‌های قابل‌حل در آب مانند اسیدها، الکل‌ها، آلدئیدها، 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 (PAHs)، زایلنوز^۲، اکرولین^۳، فرمالدهید^۴، کرسولز^۵ و سایر ترکیب‌های کربوکسیلی سمی که بسته به شرایط گرماکافت ممکن است از طریق بیوجار به خاک افزوده شوند، دارای اثرهای ضدباکتریایی و ضدقارچی باشند (پایتر، ۲۰۰۱). شکل ۵ روغن زیستی تولید شده از خرده‌های چوب در طی فرآیند گرماکافت را نشان می‌دهد.



شکل ۵. روغن زیستی تولید شده از خرده‌های چوب در طی فرآیند گرماکافت

کرم‌های خاکی به علت این که دارای تحرک زیاد بوده و حساسیت بالایی به آلاینده‌های خاک نشان می‌دهند، نشانگرهای خوبی برای ارزیابی سلامتی خاک‌ها، به ویژه سلامت بیولوژیکی خاک به شمار می‌روند. ون و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که زیست‌فراهمی و تجمع زیستی^۶ پنتاکلوروفنول (PCP)^۷ برای کرم خاکی (*Eisenia foetida*) با افزودن بیوجار به خاک، به طور معنی‌داری کاهش یافت که به علت توانایی بیوجار در جذب

^۱Polycyclic aromatic hydrocarbons

^۲Xylenols

^۳Acrolein

^۴Formaldehyde

^۵Cresols

^۶Bioaccumulation

^۷Pentachlorophenol

^۸Liming agent

با توجه به گستردگی و شدت اثرهای بیوچار بر ویژگی‌های بیولوژیکی خاک به‌ویژه فعالیت میکروبی و آنزیمی، بسیاری از فرآیندهای مرتبط در این زمینه هنوز مشخص نیست و نیاز به تحقیقات بیش‌تر در این زمینه می‌باشد.

در رابطه با نقش بیوچار در ویژگی‌های فیزیکی و فرسایش‌پذیری خاک نیاز به تحقیقات بیش‌تری می‌باشد.

با توجه به این‌که اکثر مطالعات انجام شده در رابطه با بیوچار در خاک‌های اسیدی و مناطق مرطوب انجام شده است، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات مشابه در خاک‌های آهکی و قلیایی و مناطق گرم و خشک ایران نیز انجام شود.

با توجه به این‌که اکثر تحقیقات انجام شده در رابطه با بیوچار در مورد اثرهای آن بر ویژگی‌های خاک انجام شده است، پیشنهاد می‌شود تحقیقاتی نیز در رابطه با اثر بیوچار بر عملکرد و کمیّت و کیفیّت محصولات کشاورزی (زراعی و باغی) انجام گیرد.

با توجه به اینکه خاک‌های کشور ما ایران عمدتاً آهکی و قلیایی می‌باشند و pH بیوچار معمولاً قلیایی است، لذا کاربرد بیوچار به علت افزایش pH خاک در ایران شاید محدودیت ایجاد کند. بنابراین پیشنهاد می‌گردد مطالعات و بررسی‌هایی در جهت تولید بیوچارهای اسیدی و استفاده در خاک‌های قلیایی انجام گیرد.

با توجه به اینکه مقدار مواد آلی خاک‌های کشور ما کم می‌باشد و بیوچار می‌تواند میزان کربن آلی خاک را افزایش دهد و برخلاف سایر مواد آلی اثرات باقی‌مانده بالایی در خاک دارد، لذا توصیه می‌شود در مورد تولید بیوچار از بیومس‌هایی که در مقادیر زیادی در کشورمان تولید می‌شوند تحقیقاتی انجام شود.

با وجود مطالعات انجام شده در رابطه با نقش بیوچار در فراهمی عناصر در خاک، هنوز تغییرات عناصر به‌ویژه عناصر پرمصرف در خاک تیمار شده با بیوچار به‌خوبی روشن نشده است و نیاز به تحقیقات بیش‌تری می‌باشد.

1. Asai, H., B.K Samson., H.M Stephan., K. Songyikhangs., Y. Inoue., T. Shiraiwa., and T. Horie. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research*. 111:81–84.
2. Atkinson, C.J., J.D. Fitzgerald., and N.A. Hips. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil*. 337:1–18.
3. Beaton, J.D., H.B. Peterson., and N. Bauer. 1960. Some aspects of phosphate adsorption by charcoal. *Soil Science Society of America Journal*. 24:340–346.
4. Brodowski, S., W. Amelung., L. Haumaier., and W. Zech. 2007. Black carbon contribution to stable humus in German arable soils. *Geoderma*. 139:220–228.
5. Cao, X., L. Ma., B. Gao., and W. Harris. 2009. Dairy-manure derived biochar effectively sorbs lead and atrazine. *Environmental Science of Technology*. 43:3285–3291.
6. Chan, K., and Z. Xu. 2009. Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement. pp. 53–66. In Lehmann J. and S. Joseph (Eds). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan: London, UK.
7. Chan, K.Y., L. Van Zwieten., I. Meszaros., A. Downie., and S. Joseph. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*. 45:629–634.
8. Chen, J., D. Zhu., and C. Sun. 2007. Effect of heavy metals on the sorption of hydrophobic organic compounds to wood charcoal. *Environmental Science of Technology*. 41:2536–3541.
9. Cheng, C.H., J. Lehmann., J.E. Thies., and S.D. Burton. 2008. Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*. 113:10.
10. Cheng, C.H., J. Lehmann., J.E. Thies., S.D. Burton., and M.H. Engelhard. 2006. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry*. 37:1477–1488.
11. Chintala, R., J. Mollinedo., T.E. Schumacher., D.D. Malo., J.L. Julson. 2013. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*. DOI:10.1080/03650340.2013.789870.
12. Doerr, S. H., R. A. Shakesby., and R. P. D. Walsh. 2000. “Soil water repellency: its causes, characteristics and hydrogeomorphological significance”. *Earth-Science Reviews*. 51(1-4): 33-65.
13. Downie, A., A. Crosky., and P. Munroe. 2009. Physical properties of biochar. pp. 13–32. In Lehmann J. and S. Joseph (Eds). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan: London, UK.
14. Gundale, M.J., and T.H. DeLuca. 2007. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine/douglas fir ecosystem. *Biology and Fertility of Soils*. 43:303–311.
15. Hammond, D.S., H. Steege., and K. van der Borg. 2006. Upland soil charcoal in the wet tropical forests of Central Guyana. *Biotropica*. 39:153–160.
16. Krull, E.S., J.A. Baldock., J.O. Skjemstad., and R.S. Smernik. 2009. Characteristics of biochar: Organo-chemical properties. In Lehmann J. and S. Joseph (Eds). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan: London, UK.

17. Lehmann, J., J. Gaunt., and M. Rondon. 2006. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems-A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 11(2):403–427.
18. Lehmann, J., J.P da Silva., C. Jr., C. Steiner., T. Nehls., W. Zech., and B. Glaser. 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.
19. Lehmann, J., M.C. Rillig., J. Thies., C.A. Masiello., W.C. Hockaday., and D. Crowley. 2011. Biochar effects on soil biota: A review. *Soil Biology and Biochemistry*. 43:1812-1836.
20. Lehmann, J. and S. Joseph. 2009. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London & Sterling, VA. 416p.
21. Liang, B., J. Lehmann., D. Solomon., J. Kinyangi., J. Grossman., B. O'Neill., J.O. Skjemstad., J. Thies., F.J. Luizao., J. Petersen., and E.G. Neves., 2006. Blackcarbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*. 70:1719–1730.
22. Liesch, A.M., S.L. Weyers., J.W. Gaskin., and K.C. Das. 2010. Impact of two different biochars on earthworm growth and survival. *Annals of Environmental Science*. 4:1–9.
23. Mbagwu J.S.C., and A. Piccolo. 1997. Effects of humic substances from oxidized coal on soil chemical properties and maize yield. pp. 921–925. In Drozd J., S.S. Gonet., N. Senesi., J. Weber (eds). *The role of humic substances in the ecosystems and in environmental protection*. IHSS, Polish Society of Humic Substances, Wroclaw, Poland.
24. McClellan, A.T., J. Deenik., and M. Antal. 2007. Effects of flash carbonized macadamia nutshell charcoal on plant growth and soil chemical properties. *American Society of Agronomy Abstracts*, 3–7 November, New Orleans, LA.
25. Painter, T.J. 2001. Carbohydrate polymers in food preservation: An integrated view of the Maillard reaction with special reference to discoveries of preserved foods in Sphagnum dominated peat bogs. *Carbohydrate Polymers*. 36:335–347.
26. Pietikainen, J., O. Kiikkila., and H. Fritze. 2000. Charcoal as a Habitat for Microbes and Its Effect on the Microbial Community of the Underlying Humus. *Oikos*. 89:231-242.
27. Schmidt, M.W.I., and A.G. Noack. 2000. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*. 14:777–793.
28. Singh, B., B.P. Singh., and A.L. Cowie. 2010. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*. 48:516–525.
29. Singh, B.P., B.J. Hatton., B. Singh., A.L. Cowie., and A. Kathuria. 2010. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils. *Journal of Environmental Quality*. 39(4):1224–1235.
30. Sohi, S.P., E. Krull., E. Lopez-Capel., and R. Bol. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*. Vol 105. San Diego, Elsevier Academic Press Inc. Pp. 47-82.
31. Solaiman, Z.M., P. Blackwell., L.K. Abbott., and P. Storer. 2010. Direct and residual effect of biochar application on mycorrhizal root colonisation, growth and nutrition of wheat. *Australian Journal of Soil Research*. 48:546-554.

32. Steinbeiss, S., G. Gleixner., and M. Antonietti. 2009. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*. 41:1301–1310.
33. Steiner, C., K.C. Das., M. Garcia., B. Forster., and W. Zech. 2008. Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferralsol. *Pedobiologia*. 51:359–366.
34. Thies, E., and M.C. Rilling. 2009. Characteristics of biochar: Biological properties. In Lehmann J. and S. Joseph (Eds). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan: London, UK.
35. Titiz, B., and R.L. Sanford Jr. 2007. Soil charcoal in old-growth rain forests from sea level to the continental divide. *Biotropica*. 39:673–682.
36. Treseder, K.K. 1998. A meta-analysis of mycorrhizal responses to nitrogen, phosphorus, and atmospheric CO₂ in field studies. *Commun. Soil Science and Plant Analysis*. 29:1779–1784.
37. 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*. JRC Scientific and Technical Report.
38. Wang, Y., Y. Hu., X. Zhao., S. Wang., G. Xing. 2013. Comparisons of biochar properties from wood material and crop residues at different temperatures and residence time. *Energy and Fuels*. DOI: 10.1021/ef400972z.
39. Wen, B., R.J. Li., S. Zhang., X.Q. Shan., J. Fang., K. Xiao., and S.U. Khan. 2009. Immobilization of pentachlorophenol in soil using carbonaceous material amendments. *Environmental Pollution*. 157:968–974.
40. Weyers, S.L., J. Gaskin., A.M. Liesch., and K.C. Das. 2010. Earthworms, microbes and the release of c and n in biochar amended soil. In *Proceedings of the 2010 U.S. Biochar Initiative Conference*, June 27–30, Ames, Iowa.
41. Yao, F.X., M.C. Arbestain., S. Virgel., F. Blanco., J. Arostegui., J.A. Macia-Agullo., and F. Macias. 2009. Simulated geochemical weathering of a mineral ash-rich biochar in a modified Soxhlet reactor. *Chemosphere*. 80:724–732.