

بیوجار، ماده‌ای با ویژگی‌های منحصر به فرد برای ترسیب کربن اتمسفر و کاهش گرمایش جهانی

یاسر عظیم‌زاده^۱ و نصرت‌اله 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 ۱۳۹۵ و پذیرش: مرداد ۱۳۹۶

چکیده

تغییرات اقلیمی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های جهان امروز است. افزایش گاز دی‌اکسید کربن اتمسفر در نتیجه سوزاندن سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری اراضی از علت‌های اصلی گرمایش جهانی به شمار می‌رود. بیوجار ماده جامد غنی از کربن پایدار می‌باشد که برای صدها تا هزاران سال در محیط باقی می‌ماند؛ بنابراین، می‌تواند با ذخیره کربن، تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین را کاهش دهد. علاوه بر آن، افزودن بیوجار به خاک، می‌تواند به‌طور مستقیم و غیرمستقیم انتشار گاز اکسید نیتروژن و سایر گازهای گلخانه‌ای را از خاک کاهش دهد. بیوجار از تخریب گرمایی مواد آلی در محیط بدون اکسیژن و یا با اکسیژن محدود تولید می‌شود که به این فرآیند، گرماکافت گفته می‌شود. زیست‌توده در طی گرماکافت دچار تغییرات فیزیکی، شیمیایی و مولکولی شده و به سه فاز مایع (روغن زیستی)، جامد (بیوجار) و گاز تبدیل می‌شود. هر سه فاز جامد، مایع و گاز تولید شده در طی گرماکافت، قابلیت استفاده به‌عنوان سوخت را دارد. افزودن بیوجار به خاک علاوه بر ترسیب کربن، باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک می‌شود؛ بنابراین، با افزایش حاصلخیزی خاک و عملکرد محصول نقش مهمی در کشاورزی پایدار و مدیریت پایدار خاک بازی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تغییرات اقلیم، روغن زیستی، کربن، گاز زیستی، گرماکافت.

مقدمه

معمولترین روش که به‌طور گسترده در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش گرماکافت آهسته^۱ می‌باشد (بریک و لیوتز، ۲۰۱۰؛ مانیا، ۲۰۱۲). در طی این فرآیند، مواد آلی در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن کم، در دمای بیش از ۴۰۰ درجه سلسیوس حرارت داده شده و تبدیل به ماده جامد سیاه رنگ غنی از کربن به نام بیوجار می‌شود. تقریباً تمام ترکیب‌ها و پس‌مانده‌های آلی از قبیل مواد چوبی، بقایای گیاهان زراعی (کاه و کلش، پوشال برنج، بقایای بادام زمینی و غیره)، شاخ و برگ درختان، انواع کودهای آلی (دامی، مرغی و غیره)، اجساد و لاشه حیوانات، لجن فاضلاب و پس‌مانده‌های آلی صنعتی و شهری قابلیت تبدیل شدن به بیوجار را دارند (لهمان و همکاران، ۲۰۱۱؛ سوهی و همکاران، ۲۰۱۰).

امروزه نقش مهم بیوجار در ترسیب کربن، جلوگیری از افزایش گازهای گلخانه‌ای، افزایش حاصلخیزی خاک و استفاده به‌عنوان سوخت به اثبات رسیده و به این علت توجه محققان زیادی را در سرتاسر جهان به خود جلب کرده است. با این حال، در ایران تاکنون مطالعات بسیار محدودی در رابطه با بیوجار انجام شده و نیاز به تحقیقات بیش‌تر در رابطه با تولید و استفاده از بیوجار در شرایط اقلیمی و خاک‌های مختلف کشورمان می‌باشد. در این مقاله، مهم‌ترین کارکردهای گرماکافت و بیوجار در کاهش تغییرات اقلیمی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

روش تولید بیوجار

شکل ۱ مراحل اصلی تولید بیوجار و انواع و کاربرد محصولات فرآیند گرماکافت را نشان می‌دهد. برای تولید بیوجار، ابتدا زیست‌توده را خشکانده و سپس درون یک محفظه قرار داده و آن را تا رسیدن به یک دمای حداکثر حرارت می‌دهند (هرناندز منا و همکاران، ۲۰۱۴). به‌منظور خارج کردن گاز و روغن تولید شده در طی

تغییرات اقلیمی یکی از بزرگترین چالش‌های جهان امروز است. افزایش گاز دی‌اکسید کربن اتمسفر در نتیجه سوزاندن سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری اراضی از علت‌های اصلی گرمایش جهانی به شمار می‌رود. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در طی حدود ۱۵۰ سال گذشته تا سال ۲۰۱۷، دی‌اکسید کربن اتمسفر از ۰/۰۲۲۸ درصد به بیش از ۰/۰۴ درصد افزایش یافته است (رامستور و همکاران، ۲۰۱۰؛ NOAA/AGGI، ۲۰۱۷) و علت اصلی آن مصرف سوخت‌های فسیلی و از بین رفتن جنگل‌ها می‌باشد. بنابراین، تعدیل کربن اتمسفر از طریق چرخه طبیعی کربن که به‌وسیله گیاهان و درختان انجام می‌شود کافی نیست. افزایش دی‌اکسید کربن اتمسفر مشکلات زیست‌محیطی فراوان و جبران‌ناپذیری را در پی خواهد داشت. با تداوم انتشار گازهای گلخانه‌ای، میانگین دمای کره زمین افزایش خواهد یافت و یخ‌های قطبی شروع به آب شدن کرده و بخش‌هایی از کشورهای ساحلی را به زیر آب خواهد برد (آسیفا و مونیر، ۲۰۰۷).

به عقیده دانشمندان، افزایش CO₂ اتمسفر بر سلامتی، کشاورزی، تأمین غذا، اکوسیستم‌ها، منابع آب و تولید و مصرف انرژی در جهان تأثیرگذار بوده و مهم‌تر از همه، باعث بروز تغییرات اقلیمی سریع و شدید مانند خشکسالی‌ها و باران‌های شدید، بروز سیل و برهم خوردن تعادل اقلیمی کره زمین خواهد شد (آلکامو و همکاران، ۱۹۹۴). بنابراین، بررسی راه‌های کاهش ورود دی‌اکسید کربن به اتمسفر و کاهش غلظت آن در اتمسفر از مسائل مهمی است که توجه دانشمندان علوم مختلف را به خود جلب کرده است و اهمیت این مسئله روز به روز افزایش می‌یابد.

در سال‌های اخیر تکنولوژی کربونیزاسیون به عنوان یک روش کارآمد برای ترسیب کربن اتمسفر و کاهش گازهای گلخانه‌ای مطرح شده است. کربونیزاسیون زیست‌توده بر اساس میزان و مدت زمان حرارت‌دهی شامل فرآیندهای مختلفی می‌باشد که از این میان،

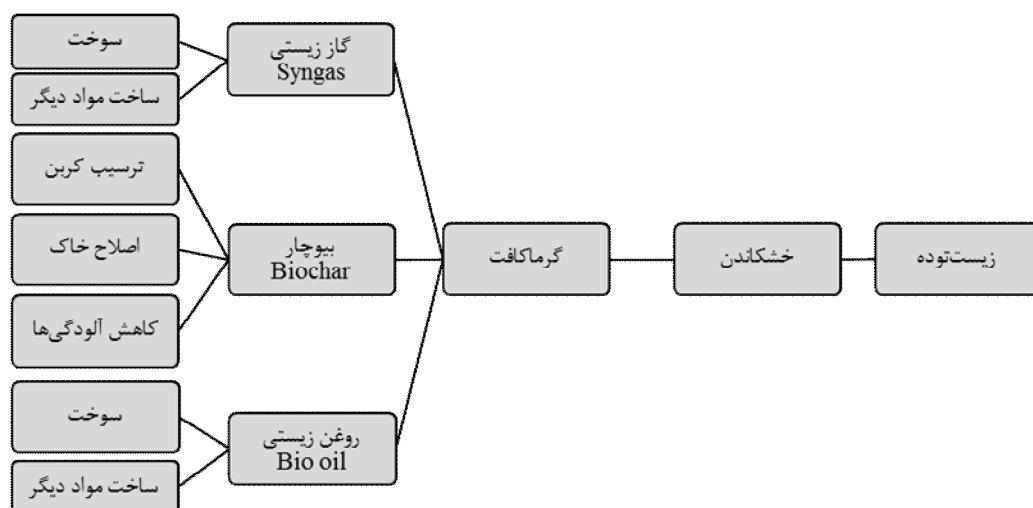
¹Slow pyrolysis

دامنه و میانگین pH، عناصر NPK و ترکیب‌های اصلی بیوپچار در جدول ۱ ارائه شده است. معمولاً بیوپچار به علت غلبیت عناصر قلیایی و قلیایی خاکی دارای pH قلیایی می‌باشد و بیوپچارهای با منشأ چوبی دارای pH کمتری نسبت به بیوپچارهای علفی می‌باشند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۳). با توجه به اینکه خاک‌های کشورهای ایران عمدتاً آهکی و قلیایی می‌باشد، افزودن بیوپچار با pH قلیایی به این خاک‌ها ممکن است اثر مطلوبی بر فراهمی برخی عناصر خاک نداشته باشد. بنابراین، بهتر است برای تولید بیوپچار برای افزودن به خاک‌های آهکی و قلیایی از گرماکافت در دماهای پایین‌تر استفاده شود و یا از زیست‌توده‌هایی استفاده شود که pH بیوپچار حاصل از آنها کمتر می‌باشد. به‌عنوان مثال، زلفی باوریانی و همکاران (۱۳۹۵) نشان دادند که افزودن دو درصد جرمی از بیوپچار تولید شده از کود مرغی در دمای ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس به یک خاک آهکی با pH ۷/۹، به ترتیب باعث کاهش و افزایش pH خاک شد و بیوپچار تولید شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس اثر معنادار بر pH خاک نداشت.

نجفی قیری (۱۳۹۴) با افزودن ۲ درصد جرمی از بیوپچارهای تولید شده از زیست‌توده‌های مختلف شامل بقایای ذرت، گندم، پنبه، کنجد و چوب ذرت در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به یک خاک آهکی با pH ۷/۸۷ نشان داد که بیوپچارهای تولید شده از بقایای پنبه و کنجد باعث افزایش ولی بیوپچار تولید شده از بقایای گندم باعث کاهش pH خاک شد و بیوپچارهای تولید شده از چوب ذرت و بقایای ذرت اثر معنادار بر pH خاک نداشت. احتمالاً استفاده از مواد و ترکیباتی مانند گوگرد، کودهای آمونومی و اسیدهای رقیق به همراه بیوپچار و یا مخلوط با آن می‌تواند اثر pH بالای بیوپچار در خاک‌های آهکی را تا حدودی جبران نماید. میزان عناصر و نسبت C:N بیوپچار بسته به نوع زیست‌توده اولیه ممکن است بسیار متغیر باشد.

فرآیند گرماکافت، به ترتیب درجه‌ای در بالا و شیری در پایین محفظه تولید بیوپچار تعبیه می‌کنند. همچنین یک ورودی و یک خروجی برای جریان گاز بی‌اثر (مانند نیتروژن یا آرگون) در محفظه تعبیه می‌شود. این جریان گاز بی‌اثر دو نقش مهم بر عهده دارد. اول، محیط فرآیند گرماکافت را از اکسیژن خالی می‌کند و دوم، گازهای تولید شده در طی فرآیند را به بیرون از سیستم هدایت می‌کند (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹؛ استینیسی و همکاران، ۲۰۰۹). فرآیند گرماکافت باعث خروج هیدروژن و اکسیژن از ساختمان زیست‌توده شده و با کاهش نسبت هیدروژن به کربن (H:C) و اکسیژن به کربن (O:C) در ساختمان بیوپچار، درصد آروماتیک بودن^۱ کربن در بیوپچار را افزایش می‌دهد. بنابراین، کربن آلی بیوپچار ساختار آروماتیکی داشته و در برابر تجزیه‌های زیستی و غیرزیستی مقاومت بسیار زیادی دارد (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹). با اینکه تبدیل زیست‌توده به بیوپچار نیازمند حرارت‌دهی با دماهای بالا (۳۵۰-۷۵۰ درجه سلسیوس) می‌باشد (نووتنی و همکاران، ۲۰۱۵)، ولی به علت اینکه برای تولید بیوپچار معمولاً از زمان‌های حرارت‌دهی کم (۱ یا ۲ ساعت) استفاده می‌شود و بیوپچار اثرهای بسیار مفید و پایداری بر خاک دارد (نووتنی و همکاران، ۲۰۱۵)، تولید بیوپچار مقرون به صرفه می‌باشد به طوری که بیوپچار در برخی از کشورها به صورت تجاری تولید و عرضه می‌شود. علاوه بر آن، امروزه با مدیریت شرایط گرماکافت و مخلوط کردن زیست‌توده با انواع مواد معدنی، شیمیایی و آلی و انواع کودها، بیوپچارهایی با قابلیت‌های متنوع تولید می‌شود (هایینگ و همکاران، ۲۰۱۱؛ گائو و همکاران، ۲۰۱۳؛ چن و همکاران، ۲۰۱۵). به عنوان مثال، حمزئی و همکاران (۱۳۹۱) بیوپچار را به همراه فاضلاب و فتحی گردلیدانی و همکاران (۱۳۹۵) بیوپچار را به همراه کمپوست قارچ مصرفی به کار بردند و نتایج مفیدی را نسبت به کاربرد بیوپچار تنها گزارش کردند.

^۱Aromaticity



شکل ۱- مراحل اصلی فرآیند گرماکافت بقایای آلی و کاربردهای مواد حاصل از گرماکافت (نووتنی و همکاران، ۲۰۱۵) ویژگی‌های بیوجار

فیری (۱۳۹۴) با بررسی تأثیر کاربرد بیوجارهای تولید شده از مواد آلی مختلف در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس بر برخی از ویژگی‌های خاک نشان داد که افزودن بیوجار به خاک باعث افزایش مقدار کربن آلی، قابلیت هدایت الکتریکی و پتاسیم قابل جذب خاک شد. بیوجار علاوه بر بهبود ویژگی‌های خاک ممکن است به عنوان جاذب برای جذب انواع آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. مارزی و همکاران (۱۳۹۵) از بیوجار تولید شده از الیاف خرما در دماهای مختلف برای حذف نیترات از محلول آبی استفاده کردند و کارایی بیوجار تولید شده برای حذف نیترات را بیش از ۹۶٪ گزارش کردند. الستی و قرخلو (۱۳۹۴) تأثیر بیوجار بر جذب و آبشویی علف‌کش‌ها را مورد بررسی قرار دادند.

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوجار تحت تأثیر نوع ماده آلی و شرایط گرماکافت قرار می‌گیرد (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۳).

بهشتی و علیخانی (۱۳۹۵) تغییرات کیفیت بیوجار تولید شده از کاه و کلش گندم در دماهای ۷۰۰-۳۰۰ درجه سلسیوس را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که با افزایش دمای گرماکافت، درصد عملکرد، درصد نیتروژن کل و کربن آلی بیوجار کاهش ولی pH، قابلیت هدایت الکتریکی، درصد خاکستر و پایداری کربن بیوجار افزایش یافت. فتحی گردلیدانی و میرسیدحسینی (۱۳۹۴) جنبه‌های مختلف اثرات بیوجار در اصلاح و بهبود کیفیت خاک را مورد بررسی قرار دادند. افزودن بیوجار به خاک باعث بهبود برخی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک می‌شود. به عنوان مثال، نجفی

جدول ۱- دامنه و میانگین برخی از ویژگی‌های بیوجار (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۳)

دامنه	pH	نیتروژن کل (g/kg)	فسفر کل (g/kg)	پتاسیم کل (g/kg)	C/N	کربن تثبیت شده (درصد)	ترکیبات فرار (درصد)	آب (درصد)	خاکستر (درصد)
دامنه	۴ تا ۱۲	۱/۷ تا ۷/۸	۰/۲ تا ۷۳/۰	۱/۰ تا ۵۸/۰	۷ تا ۵۰	۵۰ تا ۹۰	۰ تا ۴۰	۱ تا ۱۵	۵ تا ۵
میانگین	۸	۲۲/۳	۲۳/۷	۲۴/۳	۶۱	۷۰	۲۰	۷/۵	۲/۵

خاک از جمله ظرفیت نگهداری آب، تهویه و جرم مخصوص ظاهری خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بین

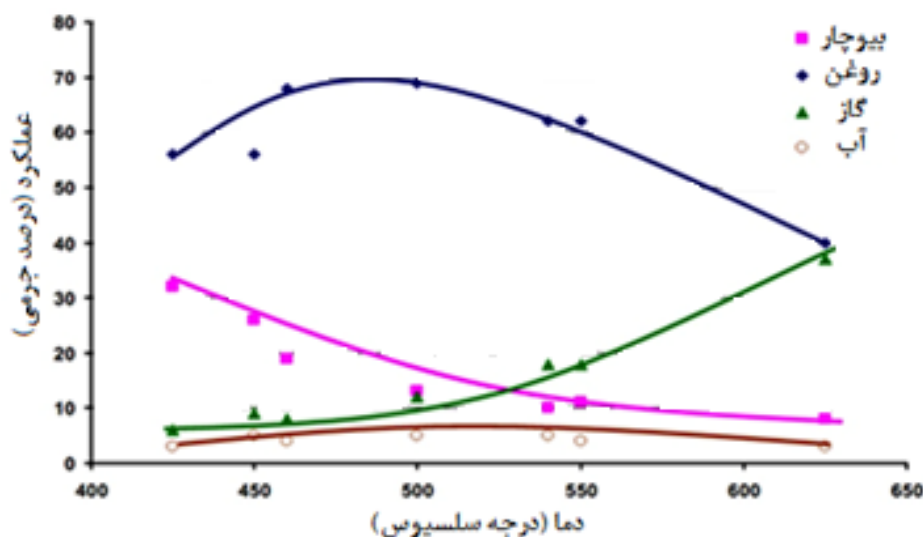
سطح ویژه و تخلخل بیوجار از مهم‌ترین ویژگی‌های آن می‌باشد که بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی

سلولز منجر به تولید بیوچارهای با منافذ ریز می‌شود (یوآنیدو و زابائیتو، ۲۰۰۷).

در نمودار ۲ اثر دمای گرماکافت بر مقدار نسبی بیوچار، گاز زیستی، روغن زیستی و آب ارائه شده است. با افزایش دما، درصد بیوچار کاهش و درصد تولید گاز زیستی افزایش می‌یابد. درصد تولید روغن زیستی با افزایش دما تا حدود ۵۰۰ درجه سلسیوس افزایش یافته و سپس با افزایش بیش‌تر دما کاهش می‌یابد. کاهش روغن در دماهای بالاتر از ۵۰۰ درجه سلسیوس به علت تبدیل آن به گاز زیستی در دمای بالا می‌باشد. در صورتی که هدف اصلی از گرماکافت، تولید سوخت زیستی باشد باید از دماهای بالاتر و زمان کمتر استفاده شود ولی برای تولید مقدار بیش‌تر بیوچار، باید از دماهای پایین و زمان بیش‌تر استفاده شود (ورهیچین و همکاران، ۲۰۱۰).

شکل ۳ اثر دمای گرماکافت بر قابلیت ترسیب کربن و اصلاح‌کنندگی بیوچار در خاک را نشان می‌دهد.

تخلخل و سطح ویژه بیوچار یک رابطه مستقیم وجود دارد؛ به طوری که با افزایش دمای گرماکافت، انواع ترکیبات آلی از ساختمان بیوچار خارج شده و منجر به ایجاد فضاهای خالی در داخل بیوچار می‌شود و بدین ترتیب تخلخل و در نتیجه سطح ویژه بیوچار در دماهای زیاد گرماکافت افزایش می‌یابد (دونی و همکاران، ۲۰۰۹)؛ در حالی که دماهای کم ممکن است باعث کاهش خروج ترکیبات آلی و مسدود شدن منافذ داخل بیوچار و در نتیجه، کاهش تخلخل و سطح ویژه بیوچار شود (پیگناتلو و همکاران، ۲۰۰۶). با این حال، با افزایش دما، تخلخل بیوچار تا یک حدی از دما (حدود ۷۰۰ درجه سلسیوس) افزایش می‌یابد و سپس با افزایش دما به علت فروریزش منافذ کاهش می‌یابد (نووتنی و همکاران، ۲۰۱۵). توزیع اندازه منافذ بیوچار به میزان لیگنین و سلولز زیست توده بستگی دارد. معمولاً میزان بالای لیگنین در زیست توده منجر به تولید بیوچارهای با منافذ درشت و میزان بالای

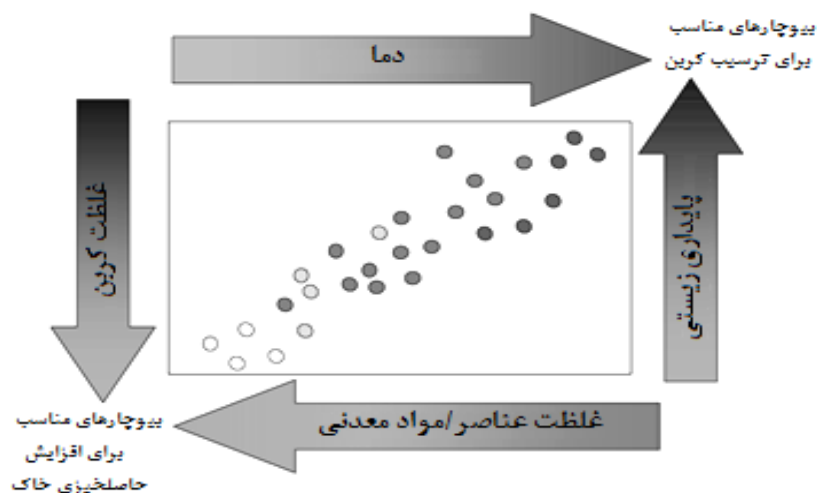


نمودار ۲- اثر دمای گرماکافت بر درصد زغال، روغن و گاز زیستی و آب در فرآیند تولید بیوچار (ورهیچین و همکاران، ۲۰۱۰)

می‌باشند به فنول، فوران و آلکیل تبدیل شده مقادیری از اکسیژن، هیدروژن و گوگرد از زیست توده خارج می‌شود.

در طی فرآیند گرماکافت، با شروع فرآیند آب‌زدایی^۱ در دمای حدود ۲۵۰ درجه سلسیوس، سلولز، لیگنین و پکتین که از اجزای اصلی تشکیل دهنده زیست توده‌های آلی

¹ Dehydration



شکل ۳- اثر دمای گرماکافت بر قابلیت ترسیب کربن و اصلاح‌کنندگی بیوجار در خاک (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹)

نقش بیوجار در ترسیب کربن و کاهش گرمایش جهانی از جمله مهم‌ترین راه‌کارهای تکنولوژی گرماکافت برای کاهش تغییرات اقلیمی می‌توان به توقف کربن، تولید انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از خاک اشاره کرد (لهمان و جوزف، ۲۰۰۹). هر کدام از این کارکردها در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

توقف کربن

گیاهان با دریافت دی‌اکسیدکربن هوا و جذب آب و عناصر غذایی از خاک، با استفاده از انرژی نور خورشید در طی فرآیند فتوسنتز، کربن اتمسفر را تثبیت می‌کنند. در طی فرآیند فتوسنتز، کربن اتمسفر به ترکیبات قندی تبدیل و سپس برای تنفس سلول‌ها مصرف می‌شود و باقی‌مانده به اتمسفر آزاد می‌شود (نووتنی و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین، بخشی از کربن دریافت شده توسط گیاه دوباره طی فرآیند تنفس به اتمسفر باز گردانده می‌شود ولی بخش زیادی از آن در ساختار زیست‌توده به شکل انواع ترکیبات آلی تثبیت می‌شود. این کربن تثبیت شده بعد از مرگ گیاه یا درخت با تجزیه و تخریب زیستی و غیرزیستی و یا سوزاندن زیست توده به صورت دی-اکسیدکربن به اتمسفر باز می‌گردد. ممکن است با به دام افتادن زیست توده در داخل رسوبات، این فرآیند آزاد شدن CO_2 به اتمسفر به تعویق افتد (مانند پیت). با افزوده

در دماهای بالاتر (۴۰۰ درجه سلسیوس و بالاتر از آن) واکنش‌های شکستن پلیمرها، از دست دادن گروه‌های عاملی و از دست دادن هیدروژن و اکسیژن منجر به کاهش نسبت‌های H:C و O:C و تشکیل صفحات بزرگی از حلقه‌های آروماتیک به هم پیوسته کربنی می‌شود. این ساختارهای متراکم کربنی در مقابل تخریب‌های زیستی و غیرزیستی مقاومت بالایی دارند. مقاومت بیوجار در برابر تخریب‌های زیستی و غیرزیستی به عوامل مختلفی از جمله میزان ماکروپورها و میکروپورهای بیوجار، حل‌پذیری ترکیب‌های موجود در بیوجار، تمایل سطح بیوجار به جذب سایر ترکیبات خاک و عوامل بیرونی مانند pH، غلظت اکسیدانت‌ها، سطح رطوبت و ترکیب و ساختمان خاک بستگی دارد. نتایج بررسی‌های مختلف نشان داده است که بیوجارهای تولید شده در دما و زمان حرارت‌دهی بیشتر نسبت به بیوجارهای تولید شده در دما و زمان حرارت‌دهی پایین دارای پایداری بیشتری می‌باشند و بیوجارهای تولید شده از زیست توده‌های چوبی نسبت به بیوجارهای تولید شده از زیست توده‌های علفی پایداری بیشتری دارند. از این رو، میزان پایداری بیوجار به نوع زیست توده و شرایط گرماکافت بستگی دارد (کیلوویت و همکاران، ۲۰۱۰؛ کوایوم و همکاران، ۲۰۱۲).

با کشاورزی می‌باشد. بیوجار انتشار این گازهای گلخانه‌ای مهم از خاک را کاهش می‌دهد (کارهو و همکاران ۲۰۱۱؛ سینگ و همکاران، ۲۰۱۰). به‌عنوان مثال، در مورد گاز N_2O که از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود، بیوجار با کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک، افزایش هوای خاک و غیرمتحرک کردن نیتروژن در ساختار ملکول‌های آلی، باعث کاهش انتشار گاز N_2O از خاک می‌شود (نووتی و همکاران، ۲۰۱۵). دیک و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که افزودن بیوجار به خاک باعث کاهش انتشار گاز N_2O از خاک شد. معمولاً زمین‌هایی که کود دامی دریافت می‌کنند، گاز N_2O بیش‌تری منتشر می‌کنند. تقی‌زاده طوسی و همکاران (۲۰۱۱) مشاهده کردند که با افزودن (۳۰ تن بر هکتار) بیوجار به خاکی که کود دامی دریافت کرده بود، انتشار N_2O به میزان ۵۰٪ کاهش یافت. ژانگ و همکاران (۲۰۱۰) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند. آنان با افزودن بیوجار تولید شده از کاه و کلش گندم به یک شالیزار، کاهش ۵۱-۴۰ درصدی انتشار N_2O از خاکی که کود نیتروژن دریافت کرده بود و کاهش ۲۸-۲۱ درصدی در خاک بدون کود نیتروژن مشاهده کردند. مکانیسم اثر بیوجار بر کاهش انتشار CH_4 از شالیزار نه به خاطر کاهش میکروب‌های تولیدکننده متان^۲، بلکه به خاطر افزایش میکروب‌های اکسیدکننده متان^۳ می‌باشد که بیشتر به‌علت ساختار متخلخل بیوجار و تغییرات pH خاک می‌باشد (فنگ و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین، نقش بیوجار در کاهش انتشار این گازهای گلخانه‌ای مهم از خاک در تحقیقات مختلف اثبات شده است. با این حال، برخی از نتایج متناقض نیز گزارش شده است (موخرجی و همکاران، ۲۰۱۴). به‌عنوان مثال، یو و کانگ (۲۰۱۲) بیوجار تولید شده از کود خوکی و کلش جو را به میزان ۲۰ تن بر هکتار به دو نوع خاک با محتوای نیتروژن متفاوت افزودند و میزان انتشار گازهای CO_2 ، CH_4 و N_2O را در طی ۳۶ روز بررسی کردند. آنان مشاهده کردند که با افزودن بیوجار کود خوکی به خاک حاوی

شدن بر بار رسوبات روی زیست توده‌ها، فشار افزایش یافته و اکسیژن کاهش می‌یابد. تداوم چنین شرایطی در درازمدت باعث می‌شود که زیست توده‌ها طی یک سری واکنش‌های گسست، به یک ذخیره کربنی مانند زغال سنگ، نفت خام و یا گاز طبیعی تبدیل شوند (هو و همکاران، ۲۰۱۰؛ لیبرا و همکاران، ۲۰۱۱؛ تیتیرسی، ۲۰۱۳). فرآیند کربونیزاسیون در واقع نوعی تقلید از همین فرآیند بسیار طولانی طبیعی می‌باشد که در آن، با ایجاد شرایط مورد نیاز، این فرآیند به طور مصنوعی تسریع می‌شود و با تبدیل زیست توده‌ها به بیوجار، کربن اتمسفر برای چندصد تا چندهزار سال تثبیت شده و ورود گاز دی‌اکسیدکربن به اتمسفر کاهش می‌یابد (سوهی و همکاران، ۲۰۱۰؛ لیمان و همکاران، ۲۰۱۱). سالانه حجم بسیار زیادی از پسماندهای کشاورزی و جنگلی و ضایعات آلی صنایع وابسته به کشاورزی در جهان تولید می‌شود که اغلب سوزانده می‌شوند. سوزاندن این بقایای آلی بویژه بقایای محصولات کشاورزی سالانه مقادیر قابل توجهی گاز دی‌اکسیدکربن را وارد اتمسفر می‌کند؛ درحالی که با تبدیل این پسماندها به بیوجار و افزودن آن به خاک، می‌توان ضمن بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش حاصلخیزی آن، کربن اتمسفر را برای قرن‌ها و حتی هزاران سال در خاک ذخیره کرد (چیتالا و همکاران، ۲۰۱۴). به‌عنوان مثال، کامیاما و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که ۵۰ تا ۷۰ درصد کربن باگاس نیشکر می‌تواند در بیوجار تثبیت شود و تخمین زدند که اگر تمام باگاس نیشکر تولید شده در جزیره میاکو^۱ ژاپن که ۱۲۰۰۰ تن در سال می‌باشد تبدیل به بیوجار شود، می‌توان سالانه ۱۲۰۰ تا ۱۸۰۰ تن CO_2 را تثبیت کرد.

کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای

آزاد شدن CH_4 از شالیزارها و CO_2 از سوزاندن بقایای کشاورزی و N_2O در اثر مصرف کودهای نیتروژن، نمونه‌های بارز از انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط

²Methanogenic archaea

³Methanotrophic proteobacteria

¹Miyako

می‌یابد. علاوه بر محدودیت و عدم توزیع متناسب این منابع انرژی، انتشار روزافزون دی‌اکسیدکربن حاصل از سوختن این مواد به اتمسفر را نیز باید به این مشکلات اضافه کرد؛ چون یکی از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین منابع انتشار CO_2 به اتمسفر، همین سوخت‌های فسیلی می‌باشد. یکی از مهم‌ترین رویکردهای رفع وابستگی به نفت و سایر سوخت‌های فسیلی، تولید منابع جدید انرژی می‌باشد. انرژی‌های باد و خورشید از جمله این منابع جدید انرژی می‌باشند. ولی دسترسی به باد و خورشید به جغرافیا و اقلیم مناطق بستگی دارد و با تغییرات فصول، زمان و آب و هوا تغییر می‌کند. در نتیجه هزینه‌های اضافی ذخیره و انتقال را در پی خواهد داشت. علاوه بر آن، استفاده از منابع انرژی جایگزین، مانند انرژی خورشید و باد می‌تواند از انتشار بیشتر دی‌اکسیدکربن به اتمسفر بکاهد ولی نمی‌تواند این روند را معکوس نماید. درحالی که تکنولوژی کربونیزاسیون، علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، می‌تواند این روند را معکوس نماید (لهمان، ۲۰۰۷).

زیست توده‌های آلی، به عنوان بزرگ‌ترین منابع تجدید شونده انرژی در جهان و چهارمین منبع بزرگ انرژی بعد از نفت خام، زغال سنگ و گاز طبیعی شناخته می‌شود (آسیفا و مونیر، ۲۰۰۷). با این حال، زیست توده‌های آلی به علت رفتار آب دوستی، ساختمان فیبری و چگالی و ارزش گرمایی^۱ کم، سوخت مناسبی نمی‌باشند. علاوه بر آن، به علت چگالی انرژی کم، جابه‌جایی و کاربرد این زیست توده‌ها نسبت به سوخت‌های فسیلی مشکل و گران می‌باشد. بنابراین، با استفاده از تکنولوژی کربونیزاسیون، زیست توده‌ها به سوخت‌هایی تبدیل می‌شوند که نسبت به مواد اولیه، همگن‌تر و آب‌گریزتر بوده و دارای چگالی انرژی و ارزش گرمایی بالاتر و کاربرد راحت‌تری می‌باشند (استویل، ۲۰۱۱). در سال‌های اخیر تبدیل زیست توده‌های آلی به منابع انرژی تجدیدپذیر بسیار مورد توجه قرار گرفته و تکنولوژی آن روز به روز در حال پیشرفت می‌باشد. امروزه حدود ۱۴٪ از کل انرژی

نیروژن کم، میزان انتشار CO_2 و CH_4 از خاک کاهش ولی انتشار N_2O افزایش یافت و بیوجار تولید شده از کلس جو، انتشار هر سه گاز گلخانه‌ای را در هر دو خاک کاهش داد. به نظر می‌رسد علت این تناقض‌ها نه تنها مربوط به نوع خاک و نوع بیوجار بلکه به سطوح مختلف رطوبت خاک نیز مربوط می‌شود. به‌عنوان مثال، کامان و همکاران (۲۰۱۲) اثر بیوجار تولید شده از پوست بادام-زمینی را بر انتشار گازهای گلخانه‌ای از خاک بررسی و مشاهده کردند که بیوجار انتشار گازهای CO_2 ، N_2O و CH_4 از خاک را کاهش داد، ولی در خاک‌هایی که به مدت طولانی مرطوب بودند اثر معنادار نداشت. شرایط بیولوژیکی خاک نیز نقش بیوجار در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌عنوان مثال، آگوستنبرگ و همکاران (۲۰۱۲) بیوجار تولید شده از پوست بادام‌زمینی را به خاک افزوده و میزان انتشار گازهای CO_2 و N_2O از خاک را در حضور و عدم حضور کرم خاکی بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیوجار انتشار هر دو گاز CO_2 و N_2O را کاهش داد و حضور کرم خاکی باعث افزایش انتشار گاز N_2O شد.

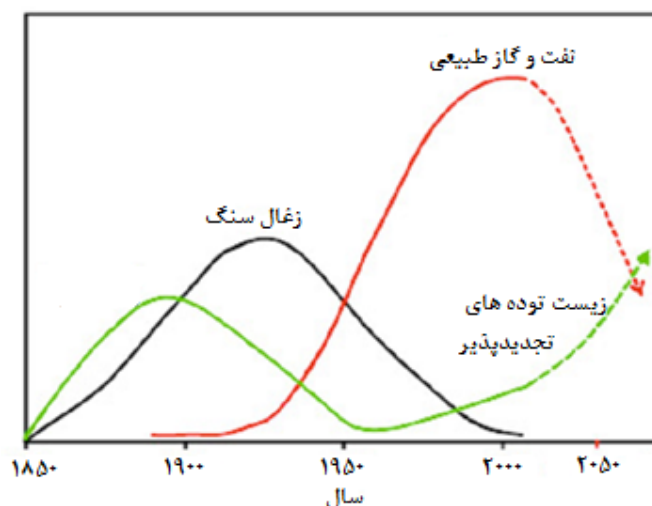
بنابراین، نوع بیوجار، نوع خاک و شرایط محیطی نقش مؤثری در انتشار گازهای گلخانه‌ای از خاک‌های حاوی بیوجار دارند. اگر مطالعات آینده در جهت شناخت مکانیسم‌ها و برهم‌کنش‌های بین گیاه، خاک، میکروب و بیوجار انجام شود، اطلاعات ارزنده‌ای را در ارتباط با انتشار گازهای گلخانه‌ای در اختیار ما قرار خواهد داد.

تولید سوخت زیستی

امروزه مصرف روزانه نفت خام در دنیا حدود ۸۰/۱ میلیون بشکه می‌باشد و تخمین زده می‌شود که ذخایر باقی‌مانده نفت خام جهان حدود ۱۰۰۰ میلیارد بشکه می‌باشد و در ۵۰ الی ۱۰۰ سال آینده به اتمام خواهد رسید (آسیفا و مونیر، ۲۰۰۷). این درحالی است که نیاز جهانی به انرژی و سوخت روز به روز افزایش

آینده سهم بسیار مهمی از تولید انرژی را در جهان به خود اختصاص دهد (نمودار ۴) (تیتیریسی، ۲۰۱۲).

جهان از زیست توده تأمین می شود و این میزان در حال افزایش است (آسیفا و مونیر، ۲۰۰۷) و انتظار می رود در



نمودار ۴- مقایسه مصرف انواع منابع انرژی در جهان در سال های مختلف (تیتیریسی، ۲۰۱۲)

گرماکافت، نسبت به سوخت های فسیلی سوخت هایی پاک، تجدیدپذیر و ارزان می باشند.

رهیافت ترویجی

تبدیل زیست توده مواد آلی به ویژه بقایا و پس ماند های کشاورزی به بیوچار و افزودن آن به خاک، نتایج بسیار مفیدی از جمله ترسیب کربن، افزایش حاصلخیزی خاک و عملکرد گیاهان زراعی و غیر زراعی (مانند چمنزارها و مراتع) در پی دارد. علاوه بر آن، از محصولات جانبی تولید شده در فرآیند گرماکافت می توان به عنوان سوخت استفاده کرد. با این وجود، اطلاعات بسیار اندکی در رابطه با ویژگی ها و اثر های بیوچار های تولید شده از زیست توده های مختلف و همچنین اثر شرایط گرماکافت بر این ویژگی ها در دسترس می باشد. بنابراین، نتیجه گیری ها و پیشنهادات زیر جهت شناخت بیشتر ویژگی های بیوچار و روشن تر شدن رفتار و سرنوشت آن در خاک ارائه می شود:

ویژگی های بیوچار به شدت تحت تأثیر نوع زیست توده اولیه و شرایط گرماکافت قرار می گیرد. علی-رغم مطالعات انجام شده در مورد استفاده از مواد آلی و

بیوچار دارای ارزش گرمایی حدود 18 MJ/kg بوده و می توان به عنوان سوخت، مورد استفاده قرار داد. مقدار گوگرد موجود در بیوچار کم می باشد، بنابراین در سوزاندن صنعتی بیوچار، به تکنولوژی های حذف SO_x ها از گاز های منتشر شده نیاز نیست. مقدار NO_x حاصل از سوزاندن بیوچار و زغال سنگ برابر می باشد (چان و زو، ۲۰۰۹؛ سوهی و همکاران، ۲۰۱۰). روغن تولید شده در طی گرماکافت، شامل انواع زیادی از ترکیب های آلی قطبی با وزن مولکولی زیاد می باشد که می تواند بعد از پالایش به عنوان سوخت مورد استفاده قرار گیرد (لایرد و همکاران، ۲۰۰۹). گاز زیستی، ترکیبی از هیدروژن و مونواکسید کربن به همراه مقداری متان، دی اکسید کربن، آب و سایر ترکیب های با وزن مولکولی کم می باشد. ارزش گرمایی گاز زیستی تولید شده معمولاً کمتر (حدود 6 MJ/kg) از گاز طبیعی (حدود 54 MJ/kg) می باشد. با این حال این گاز می تواند برای تولید انرژی گرمایی در برخی کاربردها نظیر تولید انرژی برق و یا خشک کردن مورد استفاده قرار گیرد (لایرد و همکاران، ۲۰۰۹). بنابراین، سوخت های تولید شده به روش

شرایط گرماکافت برای تولید بیوجار، ارتباط بین ویژگی‌های بیوجار مناسب و نوع زیست‌توده و شرایط گرماکافت، هنوز به‌خوبی مشخص نشده و لازم است در تحقیقات آینده به این پرسش پاسخ داده شود که مناسب‌ترین زیست‌توده‌ها و شرایط گرماکافت برای تولید بیوجار مناسب کدام است؟

ویژگی‌های بیوجار در طول زمان با شرکت در فرآیندهای زیستی و غیرزیستی دچار تغییر می‌شود. با این حال، تاکنون تحقیق جامعی در رابطه با تغییرات بیوجار با زمان و اثرهای آن بر خاک و محیط زیست صورت نگرفته است و در این رابطه نیاز به تحقیق می‌باشد.

با توجه به اینکه اکثر مطالعات انجام شده در رابطه با بیوجار 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.

فهرست منابع

۱. الستی، ا. و ج. قرخلو، ۱۳۹۴. مروری بر تأثیر بیوجار در جذب و آبشویی علف‌کش‌ها. مجله پژوهش علف‌های هرز. جلد ۷، شماره ۱، ص: ۲۰-۱.
۲. بهشتی، م. و ح. علیخانی. ۱۳۹۵. تغییرات کیفیت بیوجار تولید شده از کاه و کلش گندم در طی فرآیند پیرولیز آهسته در دماهای مختلف. نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار، جلد ۲۶، شماره ۲، ص: ۲۰۱-۱۸۹.
۳. حمزئی، ا. ا. لکزیان، ع. آستارایی، و ا. فتوت. ۱۳۹۱. تأثیر بیوجار و فاضلاب بر غلظت کادمیوم قابل جذب خاک و رشد گیاه ماش. سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب. ساری.
۴. فتحی‌گردیدانی، ا. و ح. میرسیدحسینی. ۱۳۹۴. جنبه‌های مختلف اثرات بیوجار در اصلاح و بهبود کیفیت خاک. اولین همایش بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در کشاورزی. تهران.
۵. فتحی‌گردیدانی، ا. ح. میرسیدحسینی، و م. فرحبخش. ۱۳۹۵. تأثیر کمپوست قارچ مصرفی و بیوجار باگاس نیشکر بر قابلیت استفاده و جزءبندی فسفر معدنی در یک خاک آهکی. مجله مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی)، جلد ۳۹، شماره ۱، ص: ۱۴۴-۱۲۷.
۶. زلفی باوریانی، م. ع. رونقی، ن. کریمیان، ر. قاسمی، و ج. یثربی. ۱۳۹۵. اثر بیوجار تهیه شده از کود مرغی در دماهای متفاوت بر ویژگی‌های شیمیایی یک خاک آهکی. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، سال ۲۰، شماره ۷۵، ص: ۸۶-۷۳.
۷. ماززی، م. م. فرحبخش، و ص. خیال. ۱۳۹۵. سینتیک و هم‌دمای جذب نیترات از محلول آبی با استفاده از بیوجار. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۱/۱، ص: ۱۵۸-۱۴۵.
۸. نجفی قیری، م. ۱۳۹۴. تأثیر کاربرد بیوجارهای مختلف بر برخی ویژگی‌های خاک و قابلیت جذب بعضی از عناصر غذایی در یک خاک آهکی. نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، جلد ۲۹، شماره ۳، ص: ۳۵۸-۳۵۱.
9. Alcamo, G.J., A.F. van den Born., B.J. Bouwman., K. de Haan., O. Klein Goldewijk., J. Klepper., R. Krabec., J.G.J. Leemans., A.M.C. Olivier., H.J.M. Toet., and H.J. de Vries. 1994. Modeling the global society-biosphere-climate system. *Water Air Soil Poll.* 76(2): 37-78.
10. Antal, M.J., and M. Gronli. 2003. The art, science, and technology of charcoal production. *Ind Eng Chem Res.* 42: 619-1640.
11. Asifa, M., and T. Muneer. 2007. Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economics. *Sust Energ Rev.* 11:1388-1413.

12. Augustenborg, C.A., S. Hepp., C. Kammann., D. Hagan., O. Schmidt., and C. Müller. 2012. Biochar and earthworm effects on soil nitrous oxide and carbon dioxide emissions. *J Environ Qual.* 41:1203–1209.
13. Brick, S., and S. Lyutse. 2010. Biochar: Assessing the promise and risks to guide US policy. Natural Resource Defence Council (NRDC), USA.
14. Chen, P., H. Zhou., J. Gan., M. Sun., G. Shang., and L. Liu. 2015. Optimization and determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar-based fertilizers. *J Sep Sci.* 38(5):864-70.
15. Chintala, R., J. Mollinedo., T.E. Schumacher., D.D. Malo., and J.L. Julson. 2014. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Arch Agron Soil Sci.* 60(3):393-404.
16. Dicke, C., G. Lanza., J. Mumme., R. Ellerbrock., and J. Kern. 2014. Effect of HTC-char application on trace gas emissions from two sandy soil horizons. *J Environ Qual.* 43:1790–1798.
17. Downie, A., A. Crosky and P. Munroe 2009. Physical properties of biochar. In *Biochar for environmental management : science and technology* Eds. J. Lehmann and S. Joseph. Earth scan, London ; Sterling, VA, pp. 13-32.
18. Feng, Y., Y. Xu., Y. Yu., Z. Xie., and X. Lin. 2012. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils. *Soil Biol Biochem.* 46:80–88.
19. Gao, H., X. Chen., W. Zhang., X. He, and Z. Geng. 2013. Physicochemical properties and efficiencies of biochar and biochar-based nitrogenous fertilizer. *J Nat Sci Ed.* 41(4):69-85.
20. Haiying, G., H. Xusheng., G. Zengchao., S. Diao., and Y. Jinyan. 2011. Effects of biochar and biochar-based nitrogen fertilizer on soil water-holding capacity. *Chin Agric Sci Bull.* 27(24):207-13.
21. Hernandez-Mena, L.E., A.A. Pécoraa., and A.L. Beraldob. 2014. Slow pyrolysis of bamboo biomass: Analysis of biochar properties. *ChemEngin.* 37:115-120.
22. Hu, B., K. Wang., L. Wu., S. Yu., M. Antonietti., and M. Titirici. 2010. Engineering carbon materials from the hydrothermal carbonization process of biomass. *Adv Mater.* 22(7):813-828.
23. Ioannidou, O., and A. Zabaniotou. 2007. Agricultural residues as precursors for activated carbon production- A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 11:1966–2005.
24. Keiluweit, M., P.S. Nico., M.G. Johnson., and M. Kleber. 2010. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environ Sci Technol.* 44(4):1247-53.
25. Karhu, K., T. Mattila., I. Bergström., and K. Regina. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity—results from a short-term pilot field study. *Agric Ecosyst Environ.* 140:309–313.
26. Kameyama, K., Y. Shinogi., T. Miyamoto., and K. Agarie. 2010. Estimation of net carbon sequestration potential with farmland application of bagasse charcoal: life cycle inventory analysis through a pilot sugarcane bagasse carbonisation plant. *Soil Res.* 48:586–592.
27. Kammann, C., S. Ratering, C. Eckhard, and C. Müller. 2012. Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas (carbon dioxide, nitrous oxide, methane) effluxes from soils. *J Environ Qual.* 41:1052–1066.

28. Laird, D.A., R.C. Brown., J.E. Amonette., and J. Lehmann. 2009. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels Bioprod Bioref.* 3: 547–562.
29. Lehmann, J. 2007. Bio-energy in the black, *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol 5, pp.381–387.
30. 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 Biol Biochem.* 43: 1812-1836.
31. Lehmann, J., and S. Joseph. 2009. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology.* Earthscan, London & Sterling, VA. 416p.
32. Libra, J.A., K.S. Ro., C. Kammann., A. Funke., N.D. Berge., Y. Neubauer., and J.Kern. 2011. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels.* 2(1):71-106.
33. Manyà, J.2012. Pyrolysis for Biochar Purposes: A Review to Establish Current Knowledge Gaps and Research Needs. *Environ. Sci. Technol.* 46, 7939–7954.
34. Mukherjee, A., R. Lal., and A.R. Zimmerman. 2014. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. *Sci Total Environ.* 487:26-36.
35. NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). 2017. [Online]. Available at www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html. Updated Spring 2017.
36. Novotny, E.H., C.M.Bd.F, Maia.,M.Td.M, Carvalho, and B.E, Madari. 2015. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use-a critical review. *Rev Bras Ciênc Solo.*39(2):321-44.
37. Novotny, E.H., C.M.B.dF. Maia., M.T.dM. Carvalho., and B.E. Madari. 2015. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use-a critical review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo.* 39(2):321-44.
38. Pignatello, J.J., S. Kwon., and Y.F. Lu. 2006. Effect of natural organic substances on the surface and adsorptive properties of environmental black carbon (char): attenuation of surface activity by humic and fulvic acids. *Environ Sci Technol.* 40, 7757–7763.
39. Qayyum, M.F., D. Steffens, H.P. Reisenauer., and S. Schubert. 2012. Kinetics of carbon mineralization of biochars compared with wheat straw in three soils. *J Environ Qual.* 41:1210–1220.
40. Rahmstort, S., J. Morgan., A. Levermann., and K. Sach. 2010. *Global Sustainability-a Nobel Cause.* Cambridge University Press.p. 68.
41. Sano, H. 2002. *Biomass Handbook*, Japan Institute of Energy.Ohm-sha.311-323.
42. 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. *J Environ Qual.* 39:1224–1235.
43. Sohi, S.P., E. Krull., E. Lopez-Capel., and R. Bol. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *AdvAgron.* Vol 105.SanDiego, Elsevier Academic Press Inc. pp: 47-82.
44. Steinbeiss, S., G. Gleixner., and M. Antonietti. 2009. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biol Biochem.* 41:1301–1310.
45. Stoyle, A. 2011. *Biochar Production for Carbon Sequestration [dissertation].* Shanghai Jiao Tong University.
46. Taghizadeh-Toosi, A., T.J. Clough., L.M. Condon., R.R. Sherlock., C.R. Anderson., and R.A. Craigie. 2011. Biochar incorporation into pasture soil

- suppresses in situ nitrous oxide emissions from ruminant urine patches. *J Environ Qual.* 40:468–476.
47. Titirici, M.M. 2012. Hydrothermal Carbonisation: A Sustainable Alternative to Versatile Carbon Materials [dissertation]. Universität Potsdam Potsdam.
 48. Titirici, M. 2013. Sustainable carbon materials from hydrothermal processes. UK, John Wiley and Sons, Ltd.
 49. Verheijen, F., S. Jeffery., A.C. Bastos., M. Van Der Velde., and I. Diafas. 2010. Biochar Application to Soils. A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. JRC Scientific and Technical Report.
 50. Wang, Y., Y. Hu., X. Zhao., S. Wang., and G. Xing. 2013. Comparisons of biochar properties from wood material and crop residues at different temperatures and residence time. *Energy and Fuels.* 27(10):5890-9.
 51. Yoo, G., and H. Kang. 2012. Effects of biochar addition on greenhouse gas emissions and microbial responses in a short-term laboratory experiment. *J Environ Qual.* 41:1193–1202.
 52. Zhang, A. L. Cui., G. Pan., L. Li., Q. Hussain., and X. Zhang. 2010. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. *Agric., Ecosyst Environ.*, 2010, 139, 469–475.