مروری بر کاربرد جاذب زیستی بیوچار (زغال زیستی) در پایداری محیط زیست با رویکرد انرژی، آب و کشاورزی

لاله قفقازی[۱] و لعبت تقوی[۲*]

۱) دانشجوی دکتری رشته علوم و مهندسی محیط زیست، گروه علوم محیط زیست و جنگل، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲) دانشیار گروه علوم محیط زیست و جنگل، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

*رایانامه نویسنده مسئول مکاتبات: taghavi_lobat @ yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۸

چکیده

تامین منابع پایدار انرژی، گرمایش زمین و حفظ سلامت خاک از چالش‌های اصلی قرن بیست‌ویکم هستند. بیوچار پتانسیل زیادی در پرداختن به این مسایل جهانی دارد و می‌تواند در دستیابی به اهداف توسعه پایدار موثر باشد. بیوچار حاصل از زیست‌توده پسماند (بقایای گیاهی، پسماندهای شهری و روستایی) به‌واسطه محتویات معدنی و ظرفیت بافری و کاتالیزور فرآیند هضم بی‌هوازی بوده و تولید انرژی زیستی را افزایش می‌دهد. این پژوهش مروری حاصل بررسی مقاله‌های آنلاین معتبر سایت‌های گوگل اسکولار، ساینس‌دایرکت، ریسرچ‌گیت و ناشران الزویر و اشپرینگر می‌باشد. یافته‌های حاصل مزایای بالای بیوچار را برای استفاده گسترده در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش گازهای گلخانه‌ای توجیه می‌کند. بیوچار به‌طور بالقوه تولید متان و هیدروژن را در هضم بی‌هوازی افزایش و در غنی‌سازی بیوگاز در محل بسیار کارآمد است و منجر به تولید بیومتان با خلوص بیش از ۹۰ درصد می‌شود. از طرفی می‌تواند جایگزینی ارزان و بالقوه برای الکترود سلول‌های سوخت میکروبی باشد و هزینه باتری‌های مبتنی بر یون را کاهش دهد. کاربرد بیوچار در اکوسیستم کشاورزی باعث افزایش ترسیب کربن در خاک و کاهش انتشار متان و اکسید نیتروژن می‌شود. خصوصیات ساختاری سطح ویژه بالا، توزیع بهینه منافذ، واکنش‌پذیری سطحی، آب‌گریزی، گروه‌های عاملی فراوان جاذب را برای حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی گزینه مناسبی می‌کند. پتانسیل استفاده پایدار از بیوچار برای تولید انرژی زیستی (بیوگاز و هیدروژن زیستی)، کاهش گازهای گلخانه‌ای، ترسیب کربن و سلامت خاک و تصفیه پساب به همراه چالش‌ها و چشم‌اندازهای آتی آن با رویکرد هم‌بست پیوند انرژی، آب و کشاورزی ضروری است.

واژه‌های کلیدی: بیوچار، پایداری انرژی، زیست‌توده، سلامت خاک، گرمایش جهانی.

مقدمه

افزایش جمعیت انسان در جهان و توسعه شتابزده شهرها، صنایع و شیوه‌های غیراصولی کشاورزی، مهمترین عامل بسیاری از مشکلات محیط زیستی مانند گرمایش زمین و افزایش سریع غلظت گازهای گلخانه‌ای (دی اکسید کربن، متان و اکسید نیتروژن)، کمبود منابع آب، کمبود غذا و سرپناه با کیفیت، کاهش انرژی‌های تجدیدپذیر، مدیریت نامناسب پسماند و نابودی تنوع زیستی شناخته شده است. افزایش

مصرف انرژی ناشی از سبک امروز زندگی، جنگل‌زدایی، گسترش کشاورزی، صنایع آلاینده و فعالیت‌های متعدد توسعه انسانی، عامل اصلی تغییرات جهانی اقلیم تعیین شده‌اند. مصرف جهانی انرژی هر سال ۱/۲ درصد افزایش می‌یابد و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۴۰ میلادی به ۱۸/۹ میلیارد تن معادل نفت[1] برسد. بهره‌برداری بیش از حد منابع انرژی فسیلی تهدیدی جدی برای محیط‌زیست و جامعه محسوب می‌شود. سوزاندن سوخت‌های فسیلی منجر به تولید گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های سمی مختلفی (جیوه، مواد شیمیایی فرار و هیدروکربن‌های چند حلقه‌ای) می‌گردد که مسئول گرمایش جهانی بوده و تاثیر نامطلوبی بر سلامت انسان دارند. بنابراین استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان گزینه‌ای پایداربرای جبران تقاضای‌انرژی (علاوه برمنابع انرژی غیرقابل تجدید موجود) در نظر گرفته می‌شود (Bhatia *et al*., 2021).

در راستای دستورکار ۲۰۳۰ سازمان ملل برای توسعه پایدار[2] که جهت استفاده خردمندانه از منابع طبیعی برای رفع نیازهای کنونی بشر و حفظ این منابع برای نسل‌های آینده معرفی شده، شرکت‌کنندگان در کنفرانس تغییرات اقلیم پاریس نیز به توافقی بین‌المللی با هدف اقدام هماهنگ برای حفظ کره زمین و محدود کردن تاثیر انسان بر اقلیم دست یافتند. از محورهای مهم این پیمان، محدود کردن میزان افزایش متوسط دمای جو زمین به کمتر از ۲ درجه سلسیوس و به‌طور عمده تلاش برای حفظ تغییر دما در سطح ۱/۵ درجه سلسیوس تا پایان این قرن است. اجرای برنامه‌هایی برای توقف هرچه سریع‌تر انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشورها، هدف اصلی این موافقتنامه است تا بتوان در نهایت در سال ۲۰۵۰ میلادی بین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و جذب دوباره آن تعادل ایجاد کرد و به تدریج میزان انتشار دی‌اکسیدکربن را به صفر رساند (IPCC, 2016). بنابراین کاربرد فناوری‌های سبز و کارآمد همانند بیوچار[3] (کربن سیاه یا زغال زیستی) جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، پاکسازی منابع آب آلوده و مدیریت سلامت خاک (در جهت ایمنی و امنیت غذایی) برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار بسیار مهم می‌باشد. استفاده از بیوچار در کنار طیف وسیعی از روش‌های پیشنهادی دانشمندان جهت مدیریت این چالش‌ها، مطرح و مورد توجه قرار گرفته است.

بیوچار شکل پایدار زغال چوب است که به‌خاطر پایداری از پتانسیل خوبی برای ترسیب کربن برخوردار است و به‌دلیل ساختار شیمیایی آروماتیک و مقاومت در برابر تجزیه میکروبی در ذخیره‌سازی طولانی‌مدت کربن مفید واقع شده است. حد زمانی ترسیب کربن در بیوچار ۲۰۰۰–۱۰۰۰ سال ادامه دارد. بنابراین می‌توان آن را ابزاری برای مهار گرم شدن کره زمین و بستری برای کاهش تغییرات اقلیم ناشی از انتشار دی اکسید کربن و کنترل گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفت. کاربرد بیوچار در کشاورزی می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای متان، دی اکسید کربن و اکسید نیتروژن از خاک را کاهش دهد (Gupta *et al*., 2020; Malyan *et al*., 2021). در واقع بیوچار پیشرفت‌های قابل توجهی در افزایش بهره‌وری کشاورزی، کاهش فراهمی زیستی آلاینده‌های محیط زیست و متعاقبا تبدیل شدن به محصولی با ارزش افزوده برای حفظ اقتصاد زیستی داشته است. اقتصاد زیستی متضمن اکتشاف و بهره‌برداری از منابع زیستی است که شامل استفاده از بیوتکنولوژی برای تولید محصولات زیستی جدید با ارزش اقتصادی است و در این میان بیوچار محصول زیستی قابل فروش است که می‌تواند در کشاورزی، صنایع و انرژی استفاده شود (Onia *et al*., 2019).

علاوه بر این، کاربرد بیوچار از طریق افزایش تخلخل و حفظ رطوبت خاک، افزایش ظرفیت تامین مواد مغذی خاک و در نتیجه افزایش تولیدات محصولات زراعی، سلامت خاک را بهبود می‌بخشد. از طرفی به‌دلیل داشتن سطح ویژه زیاد، ساختار متخلخل، گروه‌های عاملی در سطح و محتوای بالای مواد معدنی از بیوچار در فرآیند تصفیه به‌عنوان جاذب آلاینده‌های آب و هوا و از طریق مکانیسم‌هایی همانند جذب، پرکردن منافذ، تبادل یونی و برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک استفاده و جایگزینی سازگار با محیط زیست برای کربن فعال و سایر جاذب‌های کربنی است (Kwarciak-Kozłowska *et al*., 2019; Malyan *et al*., 2021). گزارش‌های منتشر شده علمی به خوبی کاربرد بیوچار را در حذف فلزات سنگین (Sharma *et al*., 2020) و ترکیبات آفت کش از خاک (Zheng *et al*., 2019) آنتی‌بیوتیک (Yang *et al*., 2020a) ؛ فلزات سنگین (Patra *et al*., 2017; Son *et al*., 2018) و رنگ (Rangabhashiyam & Balasubramanian, 2019) از

1 Tons of Oil Equivalent (TOE)
2 Sustainable Development Goals (SDGs)
3 Biochar

پساب آلوده فاضلاب‌ها و فلزات سنگین از شیرابه لندفیل (Reshadi *et al.*, 2020) گزارش کرده‌اند. در بازار جهانی پیش‌بینی شده است که نرخ سالانه رشد ترکیبی[1] مصرف بیوچار تا سال ۲۰۲۵ تا ۱۴/۵ درصد به‌ویژه در کشورهای آمریکای شمالی به‌واسطه فراوانی زیست‌توده کشاورزی رشد داشته‌باشد(Global Biochar Market-Industry Analysis, 2019).

کاربرد همه‌جانبه بیوچار برای رفع مشکلات مربوط به کاهش گازهای گلخانه‌ای و مدیریت پایدار منابع انرژی، هیدروسفر (آلودگی منابع آب و فاضلاب) و لیتوسفر (مدیریت سلامت خاک) منجر به توجه روزافزون جهانی به کاربرد آن برای حل مسایل محیط‌زیستی شده است. این مقاله مروری با توجه به یکپارچگی و ضرورت پیوند انرژی، آب و غذا با لحاظ کردن رویکرد میان رشته‌ای هم‌بست[2] سعی در معرفی پتانسیل جاذب زیستی بیوچار به‌عنوان کاتالیزور دستیابی به اهداف توسعه پایدار دارد.

مواد و روش‌ها

در این مقاله مروری با توجه به اهمیت استفاده از بیوچار در مدیریت پایدار انرژی از منابع مختلف آنلاین مانند ساینس دایرکت[3]، ریسرچ‌گیت[4]، گوگل‌اسکولار و از ناشران معتبر الزویر[5]، اشپرینگر[6]، امدی‌پی‌آی[7] و غیره برای پردازش مطالب استفاده شده است. روش تحقیق این مقاله مروری به صورت توصیفی – تحلیلی می‌باشد و از کلیدواژه‌های زیست‌توده، پایداری انرژی، بیوچار، گرمایش جهانی استفاده شده است.

نتایج

خصوصیات و کاربرد بیوچار

بیوچار ترکیب جامد غنی از کربن (۷۰ درصد کربن، مابقی اکسیژن، هیدروژن و نیتروژن در میان سایر عناصر) بسیار پایدار و متخلخلی است که در اثر تجزیه حرارتی (پیرولیز) زیست‌توده در دمای بین ۳۵۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و در غیاب اکسیژن تولید می‌شود. تجزیه حرارتی ترکیبات آلی زیست‌توده، منجر به تولید زغال زیستی شده و مصرف این ماده در خاک ضمن اصلاح خصوصیات کیفی خاک، به‌عنوان سازوکار درازمدت ترسیب کربن نیز شناخته می‌شود. به‌دلیل داشتن سطح ویژه زیاد، ساختار متخلخل، گروه‌های عاملی در سطح و محتوای بالای مواد معدنی از بیوچار به‌عنوان جاذب آلاینده‌های آلی آب و هوا و حذف فلزات سنگین، استفاده شده است وجایگزین مناسب سازگار با محیط زیست برای کربن فعال و سایر مواد کربنی شمرده می‌شود (شکل ۱). از دیگر کاربردهای بیوچار می‌توان به نقش کاتالیست برای ارتقا سین‌گاز، تولید و ذخیره بیودیزل، کاربرد در سلول سوخت میکروبی، ابر خازن و ذخیره هیدروژن نیز اشاره داشت.

شکل ۱. خصوصیات و پتانسیل بالقوه بیوچار تولیدی از جامدات زیستی

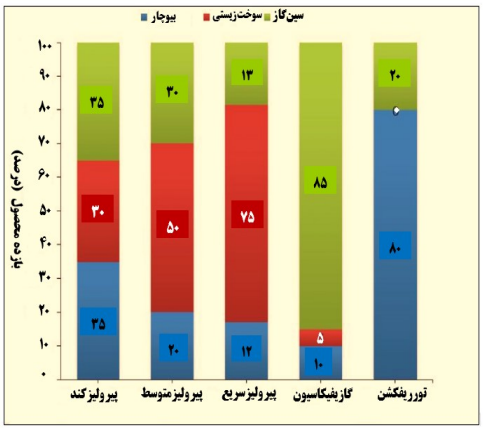
1 Compound annual growth rate (CAGR)
2 Nexus
3 Science Direct
4 Research Gate
5 Elsevier
6 Springer
7 MDPI

روش‌های تهیه بیوچار

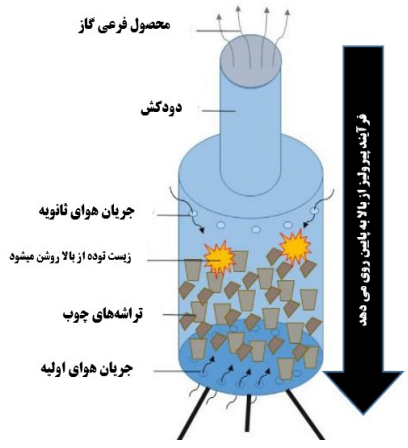
پیرولیز یا تجزیه در اثر حرارت، تبدیل به گاز (گازیفیکاسیون)، شکست (توررفکشن)[1] فرآیندهای ترموشیمیایی اصلی است که از طریق آنها زیست‌توده به محصولات با ارزشی مانند بیوچار، سوخت زیستی و سین‌گاز (گاز سنتزی) تبدیل می‌شود. از کربونیزاسیون هیدروترمال نیز به‌عنوان روش تبدیل زیست‌توده به بیوچار نام برده می‌شود و زیست‌توده در دما و فشار بالا در حضور اکسیژن ناچیز می‌تواند به بیوچار تجزیه شود (Qambrani *et al*., 2017). در ادامه فناوری‌های مختلف تولید بیوچار توضیح داده شده است.

فناوری پیرولیز

پیرولیز (تجزیه در اثر حرارت) یک فرآیند تبدیل ترموشیمیایی است که در آن زیست‌توده (زائدات کشاورزی و پسماندهای غذایی) در دمای بالا (معمولا ۷۵۰–۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) در غیاب اکسیژن برای تولید محصولات حاوی انرژی مانند ذغال جامد زیستی، روغن‌های زیستی و سین‌گاز قبل از تبدیل به خاکستر گرم می‌شود. یک سیستم پایدار و بسته انرژی با جریان متغیر مواد ورودی و خروجی که چرخه فرآیند، ضامن مقرون به صرفه بودن آن است. در محصول غنی از کربن پیرولیز زیست‌توده، ضمن حفظ ساختار اصلی ماده، تخلخل و منافذ آن افزایش می‌یابد. در میان فناوری‌های موجود، سهم پیرولیز در بازار جهانی تولید بیوچار بالاتر است و عموما از سه فناوری پیرولیز آهسته، متوسط و سریع برای تهیه بیوچار استفاده می‌شود. شکل (۲) تصویر ساده‌ای از واحد پیرولیز بیوچار را نشان می‌دهد.



شکل ۳. مقایسه تولید بیوچار، روغن‌زیستی و سین‌گاز در روش‌های مختلف پیرولیز (Qambrani *et al*., 2017)



شکل ۲. طرح شماتیک واحد پیرولیز تهیه بیوچار

الف) پیرولیز آهسته

پیرولیز آهسته روشی مرسوم برای تولید بیوچار از زیست‌توده است. تحت فرآیند پیرولیز آهسته، زیست‌توده برای مدت زمان ماندگاری طولانی‌تری (از دقیقه تا ساعت) در دمای پایین، در مقایسه با پیرولیز سریع گرم می‌شود. نرخ گرمایش از ۰/۱ تا ۰/۸ درجه سلسیوس در ثانیه یا کمتر از ۵۰ درجه سلسیوس در دقیقه است (Roy & Dias, 2017). تولید بیوچار و روغن زیستی به خواص مواد اولیه، سرعت گرمایش، دمای پردازش و محیط گازی پیرولیز بستگی دارد. درصد تشکیل محصولات با ارزش (بیوچار، سوخت زیستی و بیوگاز) تحت تاثیر شرایط پیرولیز است و بازده تولید بیوچار با افزایش دمای تجزیه در اثر حرارت در فرآیندهای پیرولیز متوسط و سریع کاهش می‌یابد (شکل ۳).

مشخص شده است که میزان تولید بیوچار در نرخ گرمایش پایین در مقایسه با نرخ گرمایش بالا در فرآیند پیرولیز بیشتر است. بنا به مطالعه‌های گزارش شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس با افزایش سرعت گرمایش از ۱۰ درجه سلسیوس در دقیقه به ۵۰ درجه سلسیوس در دقیقه، بازده بیوچار از ۳۴/۱۸ به ۲۹/۷۰ درصد کاهش می‌یابد (Angin, 2013). به عبارتی تولید بیوچار با افزایش دمای پیرولیز کاهش و بالاترین بازده بیوچار می‌تواند با پیرولیز آهسته به‌دست آید. در پیرولیز آهسته، تقریبا ۵۰ درصد کربن خام به شکل پایدار در بیوچار ذخیره می‌شود (Malyan *et al*., 2021).

1 Torrefaction

ب) پیرولیز متوسط (میانه)

معمولا پیرولیز متوسط برای به‌دست آوردن غلظت متعادلی از محصولات مختلف تجزیه حرارتی مانند بیوچار، سوخت زیستی و سین‌گاز دنبال می‌شود (شکل ۳). شرایط عملیاتی این فرآیند مانند دمای گرمایش (۶۰۰-۵۰۰ درجه سلسیوس) و زمان ماند (۱۰۰۰-۳۰۰ ثانیه) در حدفاصل پیرولیز سریع و آهسته قرار می‌گیرند. غلظت محصولات جانبی تولید شده در طی پیرولیز میانه ۲۵-۱۵ درصد بیوچار، ۳۰-۲۰ درصد سین‌گاز و ۶۰-۴۰ درصد سوخت زیستی گزارش شده است (Tripathi *et al*., 2016).

ج) پیرولیز سریع

حرارت دادن مواد اولیه در دمای بالای ۵۰۰ درجه سانتی گراد در دقیقه و برای کمتر از ۲ ثانیه زمان ماندگاری بخار در غیاب اکسیژن به‌عنوان پیرولیز سریع شناخته می‌شود. در چنین شرایط عملیاتی، بیشتر بخارات (سوخت/ روغن زیستی) با مقداری زغال چوب تولید می‌شود (شکل ۳). پیرولیز سریع فرآیند پیشرفته برای به‌دست آوردن بازده بالایی از سوخت زیستی و مقدار کم بیوچار و سین‌گاز است. محصول اصلی پیرولیز سریع، روغن زیستی مخلوط در آب (۲۰ تا ۲۵ درصد وزنی) و مواد آلی قطبی (۷۵ تا ۸۰ درصد وزنی) می‌باشد. پیرولیز سریع نسبت به فرآیندهای آهسته و متوسط ترجیح داده می‌شود تا از پلیمریزاسیون مواد واسطه‌ای و ترک خوردگی ثانویه و متراکم شدن در طی فرآیند جلوگیری شود. از عوامل مهم موثر بر فرآیند پیرولیز سریع، اندازه ذرات است و توصیه می‌شود اندازه ذرات ماده اولیه به کمتر از یک میلی‌متر کاهش یابد (Yang *et al*., 2019).

گازیفیکاسیون

در فرآیند ترموشیمیایی گازیفیکاسیون، مواد اولیه کربنی با اندازه کوچک (کوچک‌تر از ۵ میلی‌متر) و در دمای بیش از ۶۵۰ درجه سلسیوس در یک اتمسفر نیمه اکسیداتیو با هوای کنترل شده (عامل گازسازی) توسط هوا / بخار- هوا/ دی اکسید کربن/ بخار- اکسیژن/ بخار، گرم می‌شوند. محصولات تولید شده در طی گازیفیکاسیون شامل سین گاز/گاز سنتزی (حرارت پایین ۱۰-۳/۵ مگاژول بر نیوتون مترمکعب) و مقادیر کمی خاکستر، زغال سنگ و قطران است. نسبت محصولات جانبی تولید شده در حین تبدیل به گاز به درصد رطوبت و ترکیب زیست‌توده مواد اولیه بستگی دارد. درصد سوختن (۵۵-۳۰ درصد) و دمای فعال‌سازی (۸۵۰-۷۰۰ درجه سلسیوس) از پارامترهای مهم برای تولید سین‌گاز هستند.

فرآیند گازیفیکاسیون در سه فاز انجام می‌شود: الف) اندوترمیک (گرماگیر) پیرولیز- گرما زیست‌توده را به مواد فرار (متانول، بخار، قطران و اسید استیک) و زغال سنگ تبدیل می‌کند؛ ب) اگزوترکیک (گرمازا) - اکسیداسیون کربن به دی اکسید کربن و ج) احیای شیمیایی مواد فرار بخار و مقداری دی اکسید کربن به مونوکسیدکربن، هیدروژن و گاز متان. گاز سنتز تولید شده عمدتا از دی‌اکسیدکربن، مونوکسیدکربن، هیدروژن و هیدروکربن‌ها تشکیل و در طی تبدیل به گاز می‌تواند به‌عنوان منبع مستقیم انرژی در توربین‌های گازی، بویلرها یا موتور گازی پس از تصفیه، استفاده و یا به محصولات شیمیایی/ سوختی با کیفیت بالا (هیدروژن، متان، اتانول و متانول) تبدیل شود (Malyan *et al*., 2021). تولید بیوچار از گازیفیکاسیون بسیار کمتر از پیرولیز آهسته است (شکل ۳).

توروریفکشن (شکست)

توروریفکشن فرآیند تجزیه حرارتی و تصفیه زیست‌توده است که در طی آن، بیوچار از زیست‌توده کشاورزی اولیه در اتمسفر خنثی با فشار یک اتمسفر تولید می‌شود. این فرآیند مواد فرار و محتوای آب زیست‌توده را کاهش و در نتیجه خواص سوخت را از نظر چگالی بالاتر انرژی، حذف فعالیت بیولوژیکی، رفتار آب‌گریز، آسیاب‌پذیری آسان‌تر و همگن شدن ترکیب بهبود می‌بخشد. بازده این روش عمدتا به دما (۳۰۰-۲۰۰ درجه سلسیوس) و زمان‌ماند (۶۰-۱۵ دقیقه) بستگی دارد. خوراک توروریفکشن زائدهای لیگنوسلولزی چوب و پوست درختان و غیرلیگنوسلولوزیک آلی (کود دامی، لجن کاغذ، ضایعات طیور و باگاس) و سایر مواد اولیه از جمله لجن فاضلاب، مواد هضم شده از نیروگاه‌های بیوگاز و ضایعات مواد غذایی هستند. در این فرآیند ترکیبات لیگنوسلولزی (سلولز، همی‌سلولز و لیگنین) تخریب و حذف دی‌اکسیدکربن و آب صورت می‌گیرد، بنابراین اکسیژن و هیدروژن کاهش و به نوبه خود باعث افزایش محتوای کربن

در بقایا می‌شود. تخریب سلولز و لیگنین به دمای شکست بستگی دارد (Malyan *et al*., 2021).

بیوچار و انرژی زیستی

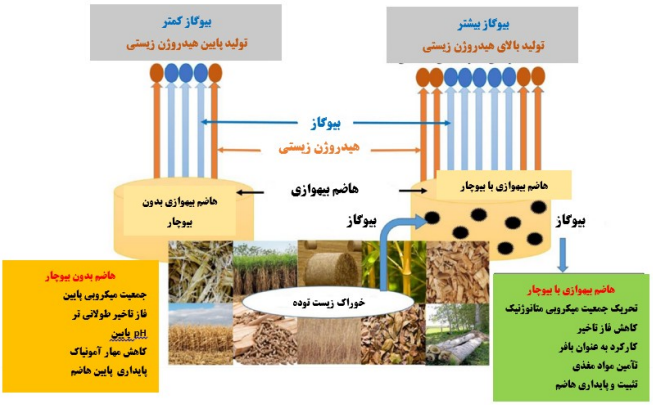
بیوچار نقش مهمی در چشم‌انداز آینده انرژی‌های تجدیدپذیر ایفا می‌کند و می‌توان از آن به عنوان ماده اولیه برای تولید بیوگاز یا غنی‌سازی بیوگاز وحذف ناخالصی‌ها از آن استفاده کرد. به غیر از تولید و تصفیه بیوگاز، از بیوچار می‌توان برای تولید هیدروژن زیستی و یا برای افزایش تولید انرژی زیستی در سلول‌های سوخت میکروبی[1] و همچنین در باتری‌های یونی استفاده کرد.

نقش بیوچار در تولید بیوگاز

تجزیه مواد آلی در یک محیط بی‌هوازی، سوخت زیستی به نام بیوگاز تولید می‌کند که مخلوطی از گاز متان (۴۰–۵ درصد حجمی)، دی اکسیدکربن (۵۵–۳۵ درصد حجمی)، سولفید هیدروژن (۳–۰/۱ درصد حجمی)، رطوبت و سایر گازهای کمیاب است. فرآیند هضم بی‌هوازی فرآیند پیچیده چندمرحله‌ای است که تحت تاثیر دما، اسیدیته، ترکیب مواد اولیه (نسبت)، زمان‌ماند هیدرولیکی و نرخ بارگذاری مواد آلی قرار می‌گیرد (Ghosh *et al*., 2020; Kapoor *et al*., 2020). برای دستیابی به نسبت بهینه کربن به ازت (۱:۲۰–۱:۳۰) مورد نیاز تولید بیوگاز، مواد اولیه اغلب به صورت ترکیبی و یا با حضور مواد اصلاح‌کننده، هضم می‌شوند. بیوچار همراه با سایر مواد آلی می‌تواند به‌عنوان اصلاح‌کننده در هضم بی‌هوازی برای افزایش تولید بیوگاز استفاده شود.

نسبت کربن به ازت سوبسترا و اسیدیته فرآیند هضم بی‌هوازی به‌طور قابل توجهی بر تولید بیوگاز تاثیر می‌گذارد. Zhao و همکارانش (۲۰۲۱a) اثر اسیدیته بر مراحل متانوژنز، هیدرولیز و اسیدوژنز در هضم بی‌هوازی را بررسی کردند و قلیاییت معادل ۸ را برای هر سه فرآیند در هضم بی‌هوازی مناسب گزارش کردند. افزودن بسترهای بسیار زیست تجزیه‌پذیر با نسبت کربن به ازت پایین منجر به فرآیندهای اسیدزایی می‌شود. اسیدزایی فعالیت باکتری‌های متانوژن مولد گاز متان را سرکوب و منجر به تولید بیوگاز کمتر می‌شود. در محیط اسیدی هضم بی‌هوازی، بازیابی مرحله متانوژنز زمان زیادی می‌برد. با این حال، استفاده از بیوچار نسبت کربن به ازت و اسیدیته را متعادل می‌کند و در نتیجه منجر به بازسازی سریع فرآیند متانوژنز می‌شود (Kumar *et al*., 2021).

Sharma و Suthar (۲۰۲۱) مشاهده کردند که افزودن بیوچار به میزان یک درصد (v/v) نسبت کربن به ازت هضم بی‌هوازی را تنظیم و از ۲۱/۸۰ به ۱۴/۲۸ کاهش می‌دهد و به‌طور همزمان تولید بیوگاز را تا ۵۷/۶ درصد نسبت به تیمار بدون بیوچار افزایش می‌دهد. Giwa و همکاران (۲۰۱۹) از بیوچار تجاری و بیوچار محلی در هاضم بی‌هوازی با بار آلی بالا (۰/۶ گرم بر لیتر در روز) در یک آزمایش طولانی مدت (۳۶۵ روز) استفاده و تولید ۵ درصد بیشتر گاز متان را نسبت به شاهد گزارش کردند. در آزمایش Pan و همکاران (۲۰۱۹) بیوچار فضولات مرغی خشک شده در هوا، چوب میوه و کاه گندم مقایسه و مشاهده گردید که تولید متان تا ۶۹ درصد با بیوچار چوب میوه افزایش یافته است. مطابق شکل (۴) افزودن بیوچار، هیدرولیز لجن اولیه همراه با خاصیت هدایت الکتریکی، ظرفیت بافری و کاهش مهار آمونیاک را افزایش داده که منجر به تولید متان بیشتر گردید (Wei *et al*., 2020).



شکل ۴. تاثیر بیوچار بر بیوگاز و تولید بیولوژیکی هیدروژن در هضم بی‌هوازی (Wei *et al*., 2020; Malyan *et al*., 2021)

[1] Microbial fuel cells

نقش بیوچار در غنی‌سازی بیوگاز

غنی‌سازی بیوگاز شامل حذف دی‌اکسیدکربن و سایر ناخالصی‌های بیوگاز (سولفید هیدروژن و سایر گازهای کمیاب) برای افزایش کارآیی انرژی و کاربرد آن به‌عنوان سوخت خودرو است. فرآیند محتوای متان را به بیش از ۹۰ درصد افزایش و در نتیجه، بیوگاز غنی شده دارای ارزش حرارتی تقریبی ۳۵/۸ مگاژول بر نیوتون مترمکعب است که قابل مقایسه با گاز طبیعی است (Malyan *et al*., 2021).

فناوری‌های متعارف غنی‌سازی بیوگاز مانند جذب نوسان فشار، جداسازی غشایی و شستشوی اسکرابر آبی، هزینه‌های عملیاتی بالا (بین ۰/۱۵–۰/۴ دلار در هر نیوتن مترمکعب بیوگاز) دارند (Masebinu *et al*., 2019). در مقایسه فناوری‌های غنی‌سازی بیولوژیکی مقرون‌به‌صرفه‌تر و با کارکرد آسان‌تر می‌باشند (Malyan *et al*., 2021). غنی‌سازی بیوگاز مبتنی بر بیوچار می‌تواند یا در محل انجام شود که در آن بیوچار به هاضم بی‌هوازی اضافه و هدف دوگانه افزایش تولید بیوگاز و جذب ناخالصی‌ها توامان صورت گیرد و یا در خارج از محل به بیوگاز تولید شده اجازه عبور از ستون مملو از بیوچار برای جذب موثر ناخالصی‌ها داده شود. غنی‌سازی در محل مزیت کاهش هزینه را دارد اما متاثر از چالش‌های تکنولوژیکی مختلف افزایش pH و انتقال جرم گاز- مایع هیدروژن خواهد بود. با این حال بیوچار در غنی‌سازی بیوگاز در محل بسیار کارآمد است که منجر به تولید بیومتان با خلوص بیش از ۹۰ درصد و کمتر از ۵ قسمت در بیلیون ناخالصی سولفید هیدروژن می‌شود (Malyan *et al*., 2021).

Linville و همکاران (۲۰۱۷) از بیوچار مشتق شده از ذرت در طی غنی‌سازی درجا بیوگاز برای حذف دی‌اکسیدکربن و سولفیدهیدروژن از بیوگاز استفاده کرد و راندمان جذب بالای بیوچار را گزارش کردند که منجر به محتوی تولید گاز متان بیش از ۹۵ درصد گردید. راندمان حذف CO_2 بر اساس دوز بیوچار بین ۵۴/۹ و ۸۶/۳ درصد متغیر بود. حذف در محل CO_2 به ریز منافذ موجود در بیوچار، سطح ویژه بالاتر، برهم‌کنش الکترواستاتیکی و جاذبه قطبیت[1] نسبت داده شد. با افزایش دوز بیوچار، افزایش محتوای متان و تجزیه سوبسترا مشاهده گردید. با این حال، در دوز بالاتر، مهار فرآیند مشاهده شد که به غلظت بالای فلزات قلیایی فراتر از حد قابل قبول نسبت داده شد و در نتیجه منجر به سمیت کاتیونی گردید. در شرایط ترموفیل، سمیت کاتیونی در مقایسه با شرایط مزوفیل کمتر مشاهده شد زیرا هیدرولیز کارآمد و فعالیت میکروبی قبل از آزادسازی کاتیون رخ می‌دهد.

نقش بیوچار در تولید هیدروژن زیستی

هیدروژن به‌دلیل چگالی بالای انرژی و در دسترس بودن گسترده به‌عنوان سوخت آینده در نظر گرفته می‌شود. انرژی گراویمتری هیدروژن (۱۲۰) ۲/۷۰ برابر بیشتر از بنزین (۴۴/۵ مگاژول بر کیلوگرم) است. هیدروژن همچنین می‌تواند از زیست‌توده و پسماندهای آلی از طریق فتوسنتز میکروبی و هضم بی‌هوازی تولید شود. در طی تخمیر بی‌هوازی، زیست‌توده و مواد آلی تحت تجزیه میکروبی قرار می‌گیرند و منجر به تولید هیدروژن می‌شوند (شکل ۴). نقش بیوچار در تولید زیستی هیدروژن از نظر انرژی و محیط زیست قابل توجه است. اضافه شدن بیوچار به ماده آلی از مهار آمونیاک و تشکیل اسید جلوگیری می‌کند و به‌عنوان یک بافر pH عمل می‌کند که تشکیل بیوفیلم میکروارگانیسم را غنی می‌سازد (Sharma & Melkania, 2017). تشکیل بیوفیلم در هضم بی‌هوازی همبستگی مثبتی با تولید هیدروژن دارد. زغال زیستی بیوچار با حفظ پایداری محیط از طریق ظرفیت بافری، زمان تاخیر[2] در فرآیند هضم بی‌هوازی را کاهش می‌دهد و منجر به تولید هیدروژن بیشتر در مقایسه با ماده آلی بدون اصلاح بیوچار می‌شود.

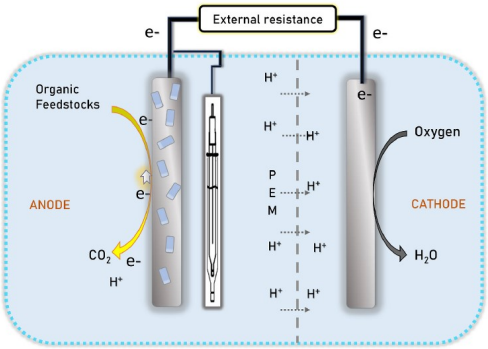
افزودن بیوچار آلی (۱۲/۵ گرم در لیتر) تولید شده از زیست‌توده چوبی در دمای پیرولیز ۵۰۰–۴۰۰ درجه سلسیوس به پسماندهای جامد شهری، فاز تاخیر را از ۱۲/۵±۰/۶ ساعت به ۸/۱±۰/۵ ساعت کاهش داد و منجر به تولید ۷۶/۶۵–۴۴/۵۹ درصد هیدروژن بیشتر نسبت به گروه شاهد شد. Sunyoto و همکاران (۲۰۱۶) همچنین مشاهده کردند افزودن بیوچار فاز تاخیر هضم بی‌هوازی را کوتاه می‌کند و تولید هیدروژن را ۳۱ تا ۳۶ درصد در مقایسه با شاهد بهبود می‌بخشد (Sunyoto *et al*., 2016). Zhao و همکاران (۲۰۲۱b) گزارش کردند باقی‌مانده فرآیند هضم بی‌هوازی نیز می‌تواند به بیوچار تبدیل شود و هیدروژن زیستی از این بیوچار تولید شود. محتوی معدنی آهن، کلسیم، سدیم، پتاسیم

1 Polarity attraction
2 Lag time

و غیره موجود در بیوچار آن را به یک کاتالیزور ایده‌آل برای تولید هیدروژن زیستی تبدیل می‌کند و هزینه تولید بیوچار آن را از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه می‌کند. بنابراین بیوچار می‌تواند نقش به‌سزایی در فرآیند تولید زیستی هیدروژن و تاثیر بی‌سابقه‌ای در حوزه انرژی سبز داشته باشد.

نقش بیوچار در سلول‌های سوخت میکروبی[1]

سلول یا پیل سوخت میکروبی فناوری نوظهوری است که با پاکسازی زیستی آلودگی‌های معدنی، آلی، مواد مغذی و فلزات سنگین همراه با تولید انرژی زیستی از طریق فعالیت میکروارگانیسم‌های اگزوالکتروژنیک[2] سروکار دارد. سرعت تجزیه زیستی آلاینده‌ها و انرژی زیستی تحت تاثیر عوامل متعدد طراحی سلول‌های سوختی (آند، کاتد و غشای تبادل پروتون) و شرایط عملیاتی متغیر است. در سلول‌های سوخت میکروبی (شکل ۵)، انرژی زیستی تولید شده با اتصال بار خارجی بین آند و کاتد مهار می‌شود. تجزیه زیستی آلاینده‌های آلی و مواد مغذی، الکترون‌ها و پروتون‌ها را آزاد می‌کند و انتقال این الکترون‌ها از آند به کاتد در سلول‌های سوخت میکروبی باعث تولید بیوانرژی می‌شود. گیرنده الکترون پایانی، مانند هگزاسیانوفرات یا اکسیژن، الکترون‌ها و پروتون‌ها را در کاتد با عمل احیا مصرف می‌کنند. الکترودها از نظر عملکرد (تولید انرژی/ تجزیه زیستی) و اقتصادی (هزینه ساخت/ تولید) بر کارکرد سلول‌های سوخت میکروبی تاثیر دارند. برای داشتن عملکرد بهینه، یک الکترود ایده‌آل باید سطح ویژه، پایداری، زیست‌سازگاری و رسانایی بالایی داشته باشد، بنابراین از نظر هزینه و کارکرد، استفاده از بیوچار به‌عنوان الکترود در سلول‌های سوخت میکروبی دامنه وسیعی دارد.



شکل ۵. تصویر شماتیک پیل سوخت میکروبی دو محفظه (Malyan *et al*., 2021)

نقش بیوچار در باتری‌های یونی لیتیوم سدیم

نرخ تخلیه منابع نفت، گاز، زغال سنگ و سایر منابع تجدیدناپذیر با انفجار جمعیت انسانی در حال افزایش است. اکثر منابع انرژی تجدیدناپذیر در فعالیت‌های صنعتی و وسایل نقلیه استفاده می‌شود. در حال حاضر کاربرد وسایل ذخیره انرژی مانند باتری‌های لیتیوم/ سدیم در بسیاری از انواع وسایل نقلیه و دستگاه‌های قابل حمل، مطلوبیت جهانی پیدا کرده است. باتری‌های یونی قابل شارژ (سدیم/ لیتیوم) دارای قدرت، چگالی انرژی و گزینه‌های ذخیره‌سازی انرژی با بازده بالاتر و عمر طولانی هستند. در این باتری، یون‌ها از طریق یک الکترولیت در طول چرخه دشارژ از آند به کاتد و در چرخه شارژ برعکس حرکت می‌کنند. کارآیی الکترودها نقش مهمی در عملکرد کلی باتری‌های یونی دارد. سطح بزرگ‌تر برای باتری‌های یونی (لیتیوم/ سدیم/ سیلیکون) به‌دلیل اهداف ایمنی مناسب در نظر گرفته نمی‌شود. بیوچار یک ماده مقرون به صرفه و پایدار با ظرفیت ویژه بالا است که کاربرد آن را به‌عنوان یک الکترود در باتری‌های یونی افزایش می‌دهد. فعال‌سازی از طریق فرآیند KOH/Annealing منجر به افزایش رسانایی الکترونیکی و افزایش ساختار میکروسپوری بیوچار می‌شود. استفاده از چنین بیوچار فعال شده به‌عنوان کاتد در باتری لیتیوم- گوگرد منجر به ظرفیت نگهداری بالا (۱۲۹۵ میلی‌آمپر ساعت بر گرم) با راندمان کولومبیک[3] بیش از ۹۵ درصد گردید (Gu *et al*., 2014).

Saavedra Rios و همکاران (۲۰۱۸) امکان استفاده از بیوچار به‌دست آمده از مواد اولیه چوبی مختلف مانند چوب رزینی (کاج)، چوب آشوود (چوب خاکستر)، کاه گندم و

1 Microbial fuel cells (MFCs)
2 Exoelectrogenic
3 Coulombic

درخت میسکانتوس را به‌عنوان آند در باتری‌های یونی سدیم بررسی کردند. راندمان کولمبیک الکترودهای کربنی سخت بیوچار مبتنی بر کاج، آشوود، کاه گندم و میسکانتوس در باتری‌های یون سدیم به‌ترتیب ۸۵، ۷۹، ۶۵ و ۸۰ درصد بود. کمترین راندمان کولمبی مرتبط با بیوچار کاه گندم مربوط به سطح بالای آن نسبت به سایرین بود. مساحت سطحی بالا باعث افزایش مصرف الکترولیت به شکل الکترولیت جامد بین فازی به‌دلیل تخریب الکترولیت می‌شود که منجر به راندمان کولمبی کمتر می‌گردد. بیوچار دوپ شده با آهن، محتوی کربن آن را بیشتر بهبود می‌بخشد و استفاده از بیوچار مغناطیسی به‌عنوان الکترود در باتری‌های لیتیومی، ظرفیت تخلیه ویژه اولیه بالاتری نسبت به الکترود بیوچار دوپ نشده، نشان می‌دهد. بنابراین کاربرد بیوچار به‌عنوان الکترود در باتری‌های مبتنی بر یون به‌دلیل روش تولید پایدار و مقرون به صرفه امکان‌سنجی زیادی دارد(Malyan *et al*., 2021).

نقش بیوچار در کاهش گازهای گلخانه‌ای از خاک کشاورزی

گازهای متان، اکسید نیتروژن و دی‌اکسیدکربن سه گاز گلخانه‌ای اصلی هستند که از خاک‌های کشاورزی ساطع می‌شوند. بیوچار پتانسیل زیادی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از خاک‌های کشاورزی و در نتیجه در کاهش گرمایش جهانی دارد که در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت. چندین استراتژی مانند مدیریت کودهای نیتروژن‌دار، مدیریت آب آبیاری، مدیریت مواد آلی، مدیریت خاک‌ورزی و انتخاب نوع کشت معمولا برای کاهش گازهای گلخانه‌ای از خاک اتخاذ می‌شود.

کاهش گاز متان

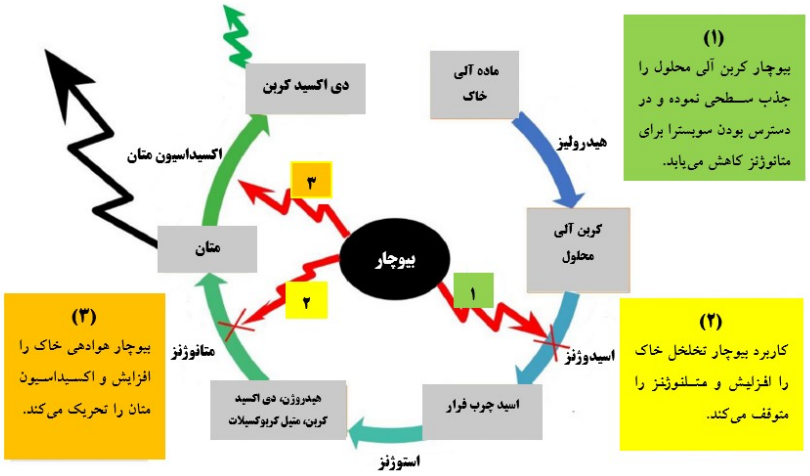
سهم گاز متان در گرمایش جهانی منتج از فعالیت‌های انسان ۱۶ درصد در نظر گرفته می‌شود و خاک‌های کشاورزی حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد از انتشار کل متان را دربرمی‌گیرند و اکثریت آن (۱۲ درصد) مربوط به شالیکاری می‌باشد. کشت برنج دومین منبع مهم انتشار متان بعد از دام است. بنابراین بسیاری از راهبردهای کاهش گاز متان همانند مدیریت آب (تر و خشک کردن متناوب، خشک کردن میان فصل)، استفاده از کودهای زیستی مبتنی بر آزولا و غیره بر کاهش از مزارع شالیزاری متمرکز است (Gupta *et al*., 2016). در شالیکاری، آب غرقابی محیط بی‌هوازی ایجاد می‌کند که رشد میکروب های متانوژن را تحریک می‌کند. این متانوژن‌ها کربن آلی خاک را مصرف و گاز متان را به‌عنوان یک محصول جانبی در طول فرآیند متانوژنز منتشر می‌کنند. معمولا اصلاح‌کننده‌های آلی اضافه شده به شالیکاری‌ها، به‌طور قابل توجهی انتشار متان را افزایش می‌دهد. با این حال، خاک اصلاح شده با بیوچار به عنوان ماده آلی، همبستگی منفی با انتشار متان نشان می‌دهد. انتشار متان از خاک حاصل دو فرآیند متانوژنز (شرایط بی هوازی) و متانوتروفی (شرایط هوازی) است. کاهش متان می تواند با افزایش فعالیت باکتری‌های متانوتروف یا مهار فعالیت متانوژنیک صورت گیرد. بیوچار رشد متانوتروف نوع «I» و نوع «II» را تحریک می‌کند و در نتیجه مصرف متان را افزایش و انتشار خالص متان را کاهش می‌دهد. خاک ممکن است بسته به عوامل زیستی و غیرزیستی به‌عنوان منبع یا فروکش عمل کند. همچنین استفاده از بیوچار در خاک محتوی یون آمونیوم[1] را از طریق جذب کاهش می‌دهد. مهار یون آمونیوم به نوبه خود اکسیداسیون متان را افزایش و در نتیجه باعث کاهش شار متان از خاک می‌شود (شکل ۶).

علاوه برآن، محتوی بالاتر یون آمونیوم در خاک، فعالیت آنزیم متان‌منواکسیژناز[2] را سرکوب می‌کند. این آنزیم مورد نیاز برای اکسیداسیون‌متان در مسیر متانوتروفیک است. از سوی دیگر، افزودن بیوچار به خاک، تراکم خاک را کاهش، هوادهی را افزایش و به عنوان بافر خاک عمل می‌کند که احتمالا متانوژن‌ها را سرکوب می‌کند و باکتری‌های متانوتروف را تحریک می‌کند (Zhao, 2021c). اصلاح خاک با ۲ و ۴ درصد (وزنی/ وزنی) بیوچار پوسته برنج منجر به کاهش قابل توجه ۴۵/۲ و ۵۴/۹ درصد در انتشار گاز متان شد. این کاهش انتشار متان در خاک‌های اصلاح‌شده بیوچار به افزایش فعالیت باکتری‌های متانوتروف کنترل شده توسط ژن pmoA متانوتروف نسبت داده شد (Han, 2016).

Sriphirom و همکاران (۲۰۲۰) اثر بیوچار گونه گیاه ریزوفورا آپیکولاتا[3] را به تنهایی و با استفاده از کمپوست بر انتشار متان مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که انتشار متان به‌ترتیب ۴۰/۵۷ و ۲۹/۵ درصد نسبت به گروه شاهد کاهش یافت. Feng و همکاران (۲۰۱۲) اثر سه نوع بیوچار تهیه شده در دماهای مختلف یعنی ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سیلسیوس بر انتشار گاز متان از خاک برنج را در مقیاس فیلد مورد

1 NH_4^+
2 Methane Mono Oxygenase (MMO)
3 Rhizophora Apiculata

مطالعه قرار دادند. همچنین Cai و همکاران (۲۰۱۸) پتانسیل کاهش متان سه بیوچار تهیه شده در دمای ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس را تحت شرایط انکوباسیون با استفاده از خاک مزارع برنج مورد مطالعه قرار داد. هر دو محقق، کاهش قابل توجه متان را در بیوچار تهیه شده در دمای بالاتر در مقایسه با بیوچار تهیه شده در دمای پایین گزارش کردند. بنابراین نتیجه‌گیری شد که بیوچار تولید شده در دمای بالاتر، پتانسیل کاهش متان بیشتری دارد (Malyan *et al*., 2021).



شکل ۶. مکانیسم درگیر در کاهش گازمتان در خاک‌های خشکی/ کشاورزی اصلاح شده با بیوچار (Malyan *et al*., 2021)

کاهش اکسیدهای نیتروژن

N_2O یک گاز قوی گلخانه‌ای با طول عمر اتمسفر ۱۱۴ سال[1] است که پنج درصد در کل گرمایش جهانی آنتروپوژنیک نقش دارد. خاک‌های کشاورزی بزرگترین منبع انتشار اکسیدهای نیتروژن هستند که ۶۷ درصد از کل انتشار را تشکیل می‌دهند. در سطح جهانی، انتشار اکسیدهای نیتروژن از خاک‌های کشاورزی از ۱/۴۴ تراگرم[2] در سال ۱۹۶۰به ۴/۲۵ تراگرم در سال ۲۰۱۰ افزایش یافته است. انتشار N_2O از کشاورزی هند از ۰/۱۴ (سال ۱۹۶۰) به ۰/۷۱ در سال ۲۰۱۴ افزایش یافته است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند ادغام بیوچار به خاک کشاورزی نیز انتشار N_2O را با راندمان بسیار بالا کاهش می‌دهد. Yang و همکاران (۲۰۲۰b) چهار غلظت بیوچار (صفر، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم در هکتار) را اعمال کردند و بالاترین کاهش انتشار اکسیدنیتروژن (۷۹/۱۵ درصد) را در تیمار ۳۰ میلی‌گرم در هکتار نسبت به شاهد گزارش کردند. افزایش بیشتر غلظت بیوچار از ۳۰ به ۴۵ میلی‌گرم در هکتار باعث کاهش انتشار N_2O به میزان ۷۶/۵ درصد شد که نشان‌دهنده استفاده از دوز بهینه است (Yang *et al*., 2020b).

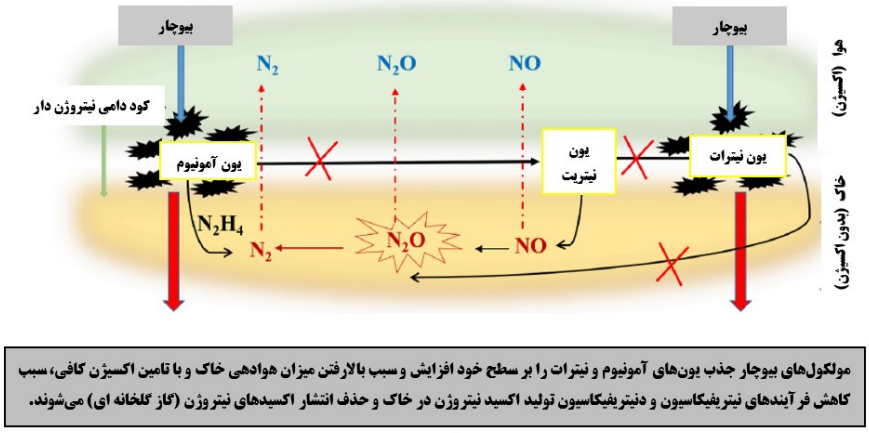
Shakoor و همکاران (۲۰۲۱) یک متاآنالیز جهانی برای مقایسه اثر بیوچار و کود حیوانی بر انتشار اکسیدنیتروژن از خاک‌های کشاورزی انجام دادند. کاربرد مستقیم کود حیوانی، مواد آلی خاک، جمعیت میکروبی وحاصلخیزی خاک را بهبود بخشید، اما منجر به انتشار بیشتر اکسیدنیتروژن شد که تاثیر منفی بر افزایش گرمایش جهانی داشت (شکل ۷). در این مطالعه استفاده از مواد آلی به شکل بیوچار انتشار تجمعی اکسیدهای نیتروژن را تا ۱۹/۷ درصد کاهش و در تیمار استفاده از کود حیوانی، میزان انتشار ۱۷/۷ درصد بیشتر از تیمارشاهد بود.

ترسیب کربن و مدیریت سلامت خاک

بیوچار نقش مهمی در مبارزه با تغییرات آب و هوایی از طریق ترسیب طولانی‌مدت کربن در خاک‌های کشاورزی ایفا می‌کند. بیوچار در برابر تجزیه کربن مقاوم است و در مقایسه با سایر منابع کربن مانند کمپوست، کود دامی و سایر اشکال کربن آلی موجودات زنده خاک می‌تواند برای مدت طولانی تری در خاک باقی بماند. پایداری بیوچار به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر مواد اولیه و روش‌های تولید قرار می‌گیرد. به‌طور کلی، بیوچار تولید شده در دمای بالاتر پایدارتر از بیوچار تولید شده در دمای پایین‌تر است. Singh و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند ۰/۵ تا ۸/۹ درصد کربن بیوچار طی پنج سال مینرالیزه شده است. بیوچار تولید شده از مواد اولیه مبتنی بر کود، کانی‌سازی کربن سریع‌تری را نسبت به مواد اولیه گیاهی نشان داد. بنابراین می‌توان گفت که بیوچار تولید شده در

1 GWP 265
2 Tg

دمای بالاتر از مواد اولیه گیاهی، پتانسیل جذب کربن بیشتری نسبت به بیوچار تولید شده در دمای پایین‌تر از خوراک مبتنی بر کود دارد. پنجاه درصد کربن مواد اولیه را می‌توان از طریق بیوچار در مقایسه با کربن پس از سوزاندن زیست‌توده (سه درصد) و تجزیه از طریق مسیرهای بیولوژیکی (۱۰-۲۰ درصد پس از ۱۰-۵ سال) جدا کرد. بنابراین بیوچار خود منبعی از ذخایر کربن است که برای مدت طولانی‌تری در خاک باقی می‌ماند. علاوه بر این، می‌تواند همراه با مواد آلی خاک بومی عمل کند و سرعت تجزیه میکروبی کربن بومی خاک را کاهش یا افزایش دهد. Zhang و همکاران (۲۰۱۸) بیوچار کاه گندم را به میزان ۴۰ تن در هکتار به خاک اضافه و گزارش کردند که محتوای کربن آلی خاک در ۵ سال کاربرد ۷۶/۲۹ درصد افزایش یافته است. نرخ ترسیب کربن در خاک تحت تاثیر عوامل زیستی (جمعیت میکروبی، تنوع جانوری و گیاهی) و غیرزنده (بافت خاک، pH، رطوبت، دما، محتوی کربن بیوچار، نسبت اکسیژن به کربن و نسبت هیدروژن به کربن) و سایر موارد است. بیوچار با سطح وسیع خود به افزایش ظرفیت نگهداری آب، ظرفیت تبادل کاتیونی، فعالیت میکروبی (زیستگاه) کمک می‌کند و با ایجاد مکان‌های اتصال یا بایندینگ مواد مغذی، شستشوی مواد مغذی در خاک را کاهش می‌دهد. این امر باعث کاهش میزان کود مورد نیاز خاک اصلاح شده با بیوچار شده و در نتیجه باعث کاهش آلودگی محیطی ناشی از شسته شدن کود معدنی می‌شود.



شکل ۷. مکانیسم درگیر در کاهش اکسید نیتروژن از خاک اصلاحی با بیوچار (Shakoor *et al.*, 2021)

خصوصیات ویژه بیوچار به عنوان جاذب در تصفیه آب

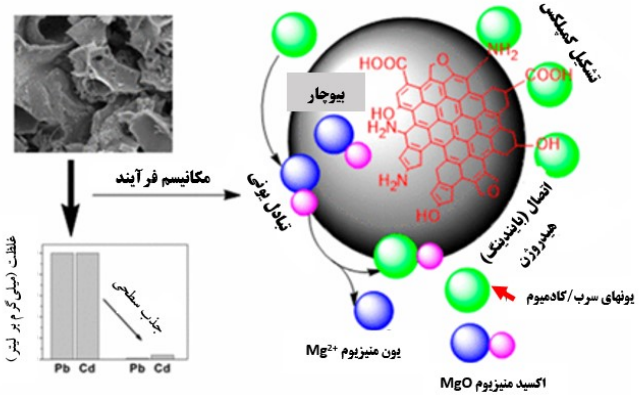
(حذف فلزات سنگین و باقی موارد)

این جاذب از نظر فیزیکی به‌واسطه سطح، تخلخل و منافذ زیاد، تمایل بالایی به فلزات دارند. در نتیجه یون‌های فلزی می‌توانند بر روی سطح بیوچار جذب سطحی و در منافذ آن نگهداری شوند. وجود خصوصیات ساختاری همانند مساحت سطحی ویژه بالا، توزیع بهینه اندازه ذرات و منافذ، واکنش‌پذیری سطحی بالا، آبگریزی و منافذ ریز، وجودگروه‌های عاملی فراوان این جاذب را برای حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی و فاضلاب گزینه مناسبی می‌کند. تاثیر بیوچار در جذب آلاینده‌ها به سطح ویژه آن بستگی دارد. این سطح برای کربن زیستی در محدوده تقریبی ۰/۷۷ تا ۱۱۶۰ مترمربع بر گرم تغییر می‌کند. اکثر سطوح بیوچار بار منفی دارند و از طریق نیروی جاذبه الکترواستاتیک، کاتیون‌های فلزی با بار مثبت را جذب می‌کنند. در ضمن لیگاندها و گروه‌های مختلف عاملی بر سطح بیوچار می‌توانند با فلزات سنگین کمپلکس تشکیل دهند و سبب رسوب فاز معدنی آنها شوند. بیوچار حامل گروه‌های عاملی مختلفی به‌طور عمده گروه‌های حامل اکسیژن هیدروکسیل و کربوکسیلات و سایر موارد است. تغییر و عملکرد این گروه‌های عاملی با افزایش اسیدیته محلول در رابطه و در اسیدیته پایین گروه‌های عاملی در بیوچار به‌صورت بار مثبت وجود دارند (Patra *et al.*, 2017).

عوامل تعیین‌کننده نقش بیوچار به‌عنوان جاذب شامل دمای پیرولیز (کند، متوسط و سریع)، زمان‌ماند در راکتور، سرعت گرمایش و نوع ماده خام اولیه است. دمای پیرولیز بر ساختار، عناصر، مورفولوژی و خواص بیوچار (تخلخل مواد و ظرفیت جذب سطحی) تاثیر می‌گذارد. درجه حرارت بالای فرآیند پیرولیز به تولید محصولی منجر می‌شود که به‌دلیل زیاد بودن سطح ویژه، پر منفذی و آبگریز بودن، جاذب موثری برای جذب آلاینده‌های آلی از خاک است. در مقابل بیوچار حاصل از دمای پایین برای حذف آلاینده‌های معدنی/ آلی قطبی شامل گروه‌های عاملی اکسیژن با خاصیت جذب الکترواستاتیک مناسب‌ترند.

در دمای پایین‌تر از ۵۰۰ درجه سلسیوس، زیست‌توده ابتدا به شبکه سه‌بعدی حلقه‌های بنزن[1] با گروه‌های عاملی فراوان تغییر می‌یابد. با افزایش دما (۷۰۰-۵۰۰ درجه سلسیوس)، به ساختار دو بعدی حلقه‌های ذوب شده[2] با تخلخل فراوان تبدیل و با افزایش بیشتر دما (بالاتر از ۷۰۰ درجه سلسیوس) ممکن است به ساختار ریز بلوری گرافیت[3] تبدیل و به‌ترتیب از تخلخل و گروه‌های عاملی آنها کاسته شود (Chen *et al.*, 2017). مکانیسم‌های جذب مختلف شامل ته‌نشینی، تبادل یونی، تشکیل کمپلکس، جذب فیزیکی و واکنش الکتروستاتیکی می‌توانند در حذف فلزات سنگین توسط بیوچار نقش داشته باشد. عموما از فرآیند ته‌نشینی به‌عنوان مکانیسم غالب در توقف جابه‌جایی فلزات سنگین در جاذب بیوچار نام می‌برند. در بهینه‌سازی فرآیند جذب، محلول حیاتی‌ترین پارامتر است که بر روی درجه یونیزاسیون و بار سطح جاذب تاثیرگذار است. در مطالعات مربوط به جذب آلاینده‌ها بر روی جاذب‌های مختلف، تعیین ظرفیت جاذب و میزان سازگاری با مدل‌های ایزوترمی از مهمترین مشخصه‌های بررسی بازدهی جاذب است. داده‌های ایزوترمی ماهیت تعامل بین آلاینده جذب شونده و جاذب را نشان می‌دهند.

تحقیقات Li و همکارانش (۲۰۱۹) کارآیی بالای بیوچار اصلاح‌شده با هیدروکسیدپتاسیم و اسیدکلریدریک را در محدوده وسیعی اسیدیته از ۴ تا ۱۲ برای حذف موثر تالیوم از پساب را نشان دادند. در این مطالعه از زائدات پوست هندوانه برای تهیه بیوچار با تخلخل بالا استفاده شد که به‌عنوان جاذب‌های قابل احیا برای تصفیه پساب‌های سنتتیک و واقعی حاوی تالیوم عمل می‌کنند. بیوچار اولیه تهیه شده در دمای پیرولیز ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد موثرترین جاذب برای حذف تالیوم یک ظرفیتی بود. در تحقیق مذکور حداکثر ظرفیت جذب تالیوم به ۴/۱۷۸ میلی‌گرم در گرم رسید که از تحقیقات مشابه با انواع دیگر بیوچار بالاتر بود. بیوچار پوست هندوانه به‌عنوان جاذبی با قابلیت احیای بالا، عملکرد موثری در حذف آلاینده تالیوم به نمایش می‌گذارد (Li *et al.*, 2019). مطالعه Ling و همکاران (۲۰۱۷) کارآیی بالای نانو ذره اکسیدمنیزیوم تثبیت‌شده بر روی بیوچار دوپ شده با نیتروژن[4] را در حذف فلزات سرب و کادمیوم از محلول آبی نشان می‌دهد. این ترکیب سنتزشده عملکرد بالایی در حذف سرب از محلول آبی با ظرفیت جذب بالا (۸۹۳ میلی‌گرم بر گرم) و زمان تعادل بسیار کوتاه (کمتر از ۱۰ دقیقه) نشان داد. عملکرد بالای بیوچار در این مطالعه به هماهنگی سطحی میان یون‌های سرب و گروه‌های عاملی کربن- اکسیژن[5]، پیریدینیک، پیریدونیک است (شکل ۸).



شکل ۸. مکانیسم درگیر در حذف فلزات سنگین سرب و کادمیوم با استفاده از ترکیب سنتزی بیوچار (MgO@N-biochar)

1 3D network of benzene rings
2 2D structure of fused rings
3 Graphite microcrystalline structure
4 MgO@N-biochar
5 C = O ; O = C-O

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های موجود پتانسیل بالای بیوچار را به‌عنوان فناوری سبز و کارآمد در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، کاهش گازهای گلخانه‌ای از اکوسیستم‌های کشاورزی و پاکسازی منابع آب آلوده برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار را توجیه می‌کند. انرژی‌های تجدیدپذیر پتانسیل حمایت از منابع انرژی موجود را برای برآورد تقاضای انرژی در آینده دارد و بیوچار قابلیت زیادی در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید متان و هیدروژن در جریان فرآیند هضم بی‌هوازی نشان داده است. ضمن آنکه می‌تواند جایگزینی ارزان و بالقوه برای الکترود سلول سوخت میکروبی باشد و به‌طور قابل توجهی هزینه باتری‌های یونی را کاهش دهد. به‌طور بالقوه می‌توان از آن به‌عنوان جاذب برای حذف آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها، آنتی‌بیوتیک‌ها و رنگ‌ها از خاک و پساب آلوده استفاده کرد. استفاده از بیوچار در اکوسیستم کشاورزی باعث افزایش جذب کربن در خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای متان و اکسیدنیتروژن می‌شود. بنابراین، کاربرد مناسب بیوچار در رویکرد هم‌بست پیوند انرژی، آب و کشاورزی (تامین غذا) می‌تواند برای مقابله با چالشهای محیط زیستی اتمسفر، هیدروسفر و لیتوسفر پیشنهاد شود. برای استفاده از پتانسیل کامل بیوچار برای دستیابی به هدف تامین و پایداری انرژی‌های تجدیدپذیر، کاهش گازهای گلخانه‌ای و پاک‌سازی آب و پساب، لازم است این بخش‌ها با رویکردی یکپارچه به درستی ادغام شوند. سهولت و فراوانی دسترسی به سوبسترا و مواد اولیه تولید بیوچار در کشورهای مختلف به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، پتانسیل خوبی را برای تولید این جاذب فراهم می‌سازد. بنابراین برای مقرون به صرفه‌تر کردن انرژی‌های تجدیدپذیر، نیاز به اقتصادی و کارآمد کردن این فناوری وجود دارد و انجام تحقیقات منطقه‌ای و بررسی دسترسی منابع اولیه محلی تولید بیوچاردر مناطق مختلف جهت تقویت پایداری محیط زیست ضروری است.

منابع

Angin, D. (2013) Effect of pyrolysis temperature and heating rate on biochar obtained from pyrolysis of safflower seed press cake. Bioresource Technology, 128(10): 7-593. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.150/

Bhatia, S.K., Palai, A.K., Kumar, A., Bhatia. R,K., Kumar Patel. A., Kumar Thakur, V. and Yang, Y.H. (2021) Trends in renewable energy production employing biomass-based biochar. Bioresource Technology, 340(12): 125644. Elsevier Ltd. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125644/

Cai, F., Feng, Z. and Zhu, L. (2018) Effects of biochar on CH_4 emission with straw application on paddy soil. Journal Soils and Sediments, 18(9): 599–609. Retrieved from https://doi.org/10.1007/ s11368-017-1761-x/

Chen, Y., Zhang, X., Chen, W., Yang, H. and Chen, H. (2017) The structure evolution of biochar from biomass pyrolysis and its correlation with gas pollutant adsorption performance. Bioresource Technology, 246(12): 101-109.

Feng, Y., Xu, Y., Yu, Y., Xie, Z. and Lin, X. (2012) Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils. Soil Biological Biochemistry, 46(3): 80–88. Retrieved from https://doi. org/10.1016/j.soilbio.2011.11.016/

Ghosh, P., Shah, G., Sahota, S., Singh, L. and Vijay, V.K. (2020) Biogas production from waste: Technical overview. Progress, and challenges, Bioreactors, INC 2020, pp: 89–104. Retrieved from https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821264-6.00007-3/

Giwa, A.S., Xu, H., Chang, F., Wu, J., Li, Y. and Ali, N. (2019) Effect of biochar on reactor performance and methane generation during the anaerobic digestion of food waste treatment at long-run operations. Journal Environmental Chemistry Enginerring, 7(4): 103067. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103067/

Global Biochar Market-Industry Analysis (2019) Forecast 2019-2026 by feedstock, technology, application and geography, Retrieved from htttp://www.maximize market research.com/

Gu, X., Wang, Y., Lai, C., Qiu, J., Li, S., Hou, Y., Martens, W., Mahmood, N. and Zhang, S. (2014) Microporous bamboo biochar for lithium-sulfur batteries. Nano Research., 8(12): 129–39. Retrieved from https://doi.org/10.1007/ s12274-014-0601-1/

Gupta, D.K., Bhatia, A., Kumar, A., Das, T.K., Jain, N., Tomer, R., Malyan, S.K., Fagodia, R.K. and Pathak, H. (2016) Mitigation of greenhouse gas emission from rice-wheat system of the Indo-Gangetic plains: Through tillage, irrigation and fertilizer management. Agriculture, Ecosystems and Environment, 230(8): 1–9. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.05.023.envpol.2019.07.073/

Gupta, D.K., Gupta, C.K., Dubey, R., Fagodiya, R.K., Sharma, G., Keerthika, Nour Mohamed, M.B. and Shukla, A.K. (2020) Role of biochar in carbon sequestration and greenhouse gas mitigation. book: Biochar Applications in Agriculture and Environment Management, Springer International Publishing: pp. 65–141.

Han, X., Sun, X., Wang, C., Wu, M., Dong, D., Zhong, T., Thies, J.E. and Wu, W. (2016) Mitigating methane emission from paddy soil with rice-straw

Onia, B.A., Oziegbeb, O. and Olawoleb, O.O. (2019) Significance of biochar application to the environment and economy. Annals of Agricultural Sciences, 64(2): 222–236.

Pan, J., Ma, J., Liu, X., Zhai, L., Ouyang, X. and Liu, H. (2019) Effects of different types of biochar on the anaerobic digestion of chicken manure. Bioresource Technology, 275(3): 65-258. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.068/

Patra, J.M., Panda, S.S. and Dhal, N.K. (2017) Biochar as a low-cost adsorbent for heavy metal removal: A review. International Journal of Research in Biosciences, 6(1): 1-7.

Qambrani, N.A., Rahman, M.M., Won, S., Shim, S. and Ra, C. (2017) Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: Review. Renewable Sustainable Energy Reviews, 79(11): 73-255.

Rangabhashiyam, S. and Balasubramanian, P. (2019) The potential of lignocellulosic biomass precursors for biochar production: performance, mechanism and wastewater application-A review. Industrial Crops and Product, 128(9): 23–405.

Reshadi, M.A.M., Bazargan, A. and McKay, G. (2020) A review of the application of adsorbents for landfill leachate treatment: Focus on magnetic adsorption. Science of the Total Environment, 731(8): 138863.

Roy, P. and Dias, G. (2017) Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review. Renewable Sustainable Energy Reviews, 77(9): 59–69. Retrieved from https: //doi.org/10.1016/j. rser.2017.03.136/

Saavedra Rios, C.M., Simone, V., Simonin, L., Martinet, S. and Dupont, C. (2018) Biochars from various biomass types as precursors for hard carbon anodes in sodium-ion batteries. Biomass Bioenergy, 117(4): 7-32.

Shakoor, A., Shahzad, S.M., Chatterjee, N., Arif, M.S., Farooq, T.H., Altaf, M.M. Tufail, M.A., Dar, A.A. and Mehmood, T. (2021) Nitrous oxide emission from agricultural soils: Application of animal manure or biochar? A global meta-analysis. Journal Environmental Management, 285(2): 112170. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112170.

Sharma, B. and Suthar, S. (2021) Enriched biogas and biofertilizer production from Eichhornia weed biomass in cow dung biochar-amended anaerobic digestion system. Environmental Technology and Innovation, 21(2): 101201. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101201/

Sharma, G.K., Jena, R.K., Hota, S., Kumar, A., Ray, P., Fagodiya, R.K., Malav, L.C. and Kumar Yadav, K. (2020) Recent development in bioremediation of soil pollutants through biochar for environmental sustainability. In book Biochar Applications in Agriculture and Environment Management, first online April 2020: pp. 123–140.

Sharma, P. and Melkania, U. (2017) Biochar-enhanced hydrogen production from organic fraction of biochar amendment under projected climate change. Scientific Reports, 6(4): 1–10.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2016) An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, Summary for policy makers:1(1):1-32.

Kapoor, R., Ghosh, P., Tyagi, B., Vijay, V.K., Vijay, V., Thakur, I.S., Kamyab, H. and Nguyen, D.D. (2020) Advances in biogas valorization and utilization systems: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production, 273(34): 123052. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123052/

Kumar, M., Dutta, S., You, S., Luo, G., Zhang, S., Show, P.L., Sawarkar, A.D., Singh, L.C.W. and Tsang, D. (2021) A critical review on biochar for enhancing biogas production from anaerobic digestion of food waste and sludge. Journal of Cleaner Production, 305(7): 127143. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j. jclepro.2021.127143/

Kwarciak-Kozłowska, A., Włodarczyk, R. and Wystalska, K. (2019) Biochar compared with activated granular carbon for landfill leachate treatment, E3S Web of Conferences, 11th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK, 100(6): 1-9. Retrieved from https://doi.org/10.1051/e3sconf /2019/

Li, H., Xiong, J., Xiao, T., Wang, Q., Li, K., Zhang, G. and Zhang, H. (2019) Biochar derived from watermelon rinds as regenerable adsorbent for efficient removal of thallium (I) from wastewater. Process Safety and Environmental Protection, 127(7): 257-266.

Ling, L.L., Liu, W.J. and Zang, S. (2017) Magnesium oxide embedded nitrogen self-doped biochar composites: Fast and high-efficiency adsorption of heavy metals in an aqueous solution. Environmental Science and Technolgy, 51(17): 10081–0089.

Linville, J.L., Shen, Y., Ignacio-de Leon, P.A., Schoene, R.P. and Urgun-Demirtas, M. (2017) In-situ biogas upgrading during anaerobic digestion of food waste amended with walnut shell biochar at bench scale. Waste Management and Research, 35(5): 669-679. Retrieved from https://doi.org/ 10.1177/0734242X17704716/

Malyan, S.K., Kumar, S.S., Fagodiya, R.K., Ghosh, P., Kumar, A., Singh, R. and Sing, L. (2021) Biochar for environmental sustainability in the energy-water-agroecosystem nexus. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 149(10): 111379.

Masebinu, S.O., Akinlabi, E.T., Muzenda, E. and Aboyade, A.O. (2019) A review of biochar properties and their roles in mitigating challenges with anaerobic digestion. Renewable Sustainable Energy Reviews, 103(4): 291–307.

microalgae: A critical review. Fuel Processing Technology, 186(22): 53–72. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j. fuproc.2018.12.012/

Yang, J., Ji, G., Gao, Y., Fu, W., Irfan, M., Mu, L., Zhang, Y. and Li, A. (2020a) High-yield and high-performance porous biochar produced from pyrolysis of peanut shell with low-dose ammonium polyphosphate for chloramphenicol adsorption. Journal of Cleaner Production, 264(6): 121516. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121516/

Yang, W., Feng, G., Miles, D., Gao, L., Jia, Y., Li, C. and Qu, Z. (2020b) Impact of biochar on greenhouse gas emissions and soil carbon sequestration in corn grown under drip irrigation with mulching. Science of Total Environment, 729(8): 138752.

Zhang, X., Chen, C., Chen, X., Tao, P., Jin, Z. and Han, Z. (2018) Persistent effects of biochar on soil organic carbon mineralization and resistant carbon pool in upland red soil, China. Environmental Earth Science, 77(5): 1–8.

Zhao, L., Wu, K.K., Chen, C., Ren, H.Y., Wang, Z.H., Nan, J., et al. (2021a) Role of residue cornstalk derived biochar for the enhanced bio-hydrogen production via simultaneous saccharification and fermentation of cornstalk. Bioresource Technology, 330(6): 125006. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125006/

Zhao, Q., Arhin, S.G., Yang, Z., Liu, H., Li, Z., Anwar, N., Liu, G. and Wang, W. (2021b) pH regulation of the first phase could enhance the energy recovery from two-phase anaerobic digestion of food waste. Water Environment Research, 2021(2): 1–11.

Zhao, Q., Wang, Y., Xu, Z. and Yu, Z. (2021c) How does biochar amendment affect soil methane oxidation? A review. Journal of Soils and Sediments, 21(1): 1575-1586. Retrieved https://doi.org/10.1007/s11368- 021-02889-z/

Zheng, H., Zhang, Q., Liu, G., Luo, X., Li, F., Zhang, Y., Zhang, Y. and Wang, Z. (2019) Characteristics and mechanisms of chlorpyrifos and chlorpyrifos-methyl adsorption onto biochars: Influence of deashing and low molecular weight organic acid (LMWOA) aging and co-existence. Science of Total Environment, 657(2): 962-953.

municipal solid waste using co-culture of Enterobacter aerogenes and E. coli. International Journal of Hydrogen Energy, 42(30): 18865. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j. ijhydene.2017.06.171/

Singh, B.P., Cowie, A.L. and Smernik, R.J. (2012) Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature. Environmental Science Technology, 46(21): 11770. Retrieved from https://doi.org/10.1021/es302545b/

Son, E.B., Poo, K.M., Chang, J.S. and Chae, K.J. (2018) Heavy metal removal from aqueous solutions using engineered magnetic biochars derived from waste marine macro-algal biomass. Science of Total Environment, 615(9): 161–168.

Sriphirom, P., Chidthaisong, A., Yagi, K., Tripetchkul, S. and Towprayoon, S. (2020) Evaluation of biochar applications combined with alternate wetting and drying (AWD) water management in rice field as a methane mitigation option for farmers' adoption. Soil Science and Plant Nutrition, 66(3): 1-12. Shakoor, A., Shahzad, S.M., Chatterjee, N., Arif, M.S., Farooq, T.H., Altaf, M.M. Tufail, M.A., Dar, A.A., Mehmood, T. (2021) Nitrous oxide emission from agricultural soils: Application of animal manure or biochar? A global meta-analysis. Journal Environmental Management, 285(2): 112170.

https://doi.org/10.1080/ 00380768.2019.1706431/

Sunyoto, N.M.S., Zhu, M., Zhang, Z., Zhang, D. (2016) Effect of biochar addition on hydrogen and methane production in two-phase anaerobic digestion of aqueous carbohydrates food waste. Bioresource Technology, 219(11): 29–36.

Tripathi, M., Sahu, J.N. and Ganesan, P. (2016) Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. Renewable Sustainable Energy Reviews, 55(22): 81-467. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122/

Wei, W., Guo, W., Ngo, H.H., Mannina, G., Wang, D., Chen, X., Peng, L. and Ni, B.J. (2020) Enhanced high-quality biomethane production from anaerobic digestion of primary sludge by corn stover biochar. Bioresource Technology, 306(34): 123159.

Yang, C., Li, R., Zhang, B., Qiu, Q., Wang, B., Yang, H., Ding, Y. and Wang, C. (2019) Pyrolysis of

A review on application of biochar (biological coal) bioabsorbent in environmental sustainability with the approach of energy, water, and agriculture

Laleh Ghafghazi[1], and Lobat Taghavi[2*]

1) Ph.D. Candidate, Department of Environment and Forest Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2) Associate Professor, Department of Environment and Forest Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
[*]Corresponding Auther Email Address: taghavi_lobat @ yahoo.com

Date of Submission: 2022/08/16 Date of Acceptance: 2022/09/30

Abstract

Providing sustainable sources of energy, global warming, and maintaining soil health are the main challenges of the 21st century. Biochar has great potential in addressing these global issues and can be effective in achieving sustainable development goals. Biochar obtained from waste biomass (plant residues, urban and rural wastes) is a catalyst for the anaerobic digestion process and increases bioenergy production due to its mineral content and buffering capacity. This article is the result of reviewing valid online papers from Google Scholar, Science Direct, Research Gate, Elsevier, and Springer. The Results showed high advantages of biochar for using in the production of renewable energy and reducing greenhouse gases. Biochar potentially increases methane and hydrogen productions in anaerobic digestion and is efficient in on-site biogas enrichment, leading to biomethane production with a purity of more than 90%. On the other hand, it can be a cheap and potential replacement for the electrode of microbial fuel cells and reduce the cost of ion-based batteries. The application of biochar in the agricultural ecosystem increases carbon sequestration in soil and reduces methane and nitrogen oxide emission. The structural characteristics such as high surface area, optimal pore distribution, surface reactivity, hydrophobicity, and many functional groups make this adsorbent a suitable choice for the remediation of heavy metals from aqueous solutions. The potential of sustainable use of biochar in biological energy production (biogas and biohydrogen), reduction of greenhouse gases, carbon sequestration and soil health, and wastewater treatment along with its future challenges and perspectives is necessary with the Nexus approach of energy, water, and agriculture.

Keywords: Biochar, Energy sustainability, Biomass, Soil health, Global warming.