Scientific-Promotional (Professional) Journal of Aquifer
Homepage: https://abkhansj.ut.ac.ir

The Role of Biochar in Reducing Greenhouse Gas Emissions: Effects of Chemical and Physical Factors on Carbon Sequestration and Nitrous Oxide Emissions in Soil

Samaneh Sardroudi Rad [1]✉ | **Seyed-Mahdi Salar-Khorasani** [2]

1. Corresponding Author, Master's Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Tehran, Iran. E-mail: samaneh.sardroudi@ut.ac.ir

2. Master's Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Tehran, Iran. E-mail: mahdi.salar.kh@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Original Article

Article history:

Received: April. 04, 2025

Revised: April. 05, 2025

Accepted: April. 08, 2025

Published online: April. 14, 2025

Keywords:
Biochar,
Greenhouse Gas Emissions,
Pyrolysis Temperature,
Soil Carbon Sequestration,
Nitrous Oxide (N_2O) Emission.

ABSTRACT

This study aimed to investigate the effect of biochar on greenhouse gas emissions, particularly CO_2 and N_2O. Biochar influences environmental cycles by altering the physical, chemical, and biological properties of soil. The results showed that biochar produced from agricultural residues at 400 °C achieved the highest reduction in CO_2 emissions (240 mg kg^{-1}), while increasing the temperature to 600 °C reduced this effect and raised N_2O emissions to 45 mg kg^{-1}. The C:N ratio and feedstock type were key determinants; plant-derived biochars with higher C:N ratios were more effective in reducing CO_2 emissions, whereas manure-based biochars in moist soils tended to increase N_2O emissions. Biochar derived from peanut shells showed the lowest, and pig manure biochar the highest, levels of CO_2 and N_2O emissions. Particle size was also an important factor; coarser biochars (5–10 mm) reduced N_2O and CO_2 emissions by 41.7% and 39.4%, respectively, compared to finer particles (0.5–2 mm). These effects were attributed to the biochar's chemical composition, porous structure, influence on soil microbial activity, and environmental factors such as moisture and temperature. Overall, selecting biochar with an optimal production temperature, stable feedstock, and appropriate particle size can effectively mitigate greenhouse gas emissions and improve soil quality.

Cite this article: Sardroudi Rad, S., Salar-Khorasani, S., (2025) The Role of Biochar in Reducing Greenhouse Gas Emissions: Effects of Chemical and Physical Factors on Carbon Sequestration and Nitrous Oxide Emissions in Soil, *Scientific-Promotional Journal of Aquifer*, 19 (1).

Publisher: The University of Tehran Press.

نشریه علمی–ترویجی آبخوان، دوره ۱۹، شماره ۱
Homepage: https://abkhansj.ut.ac.ir

نقش بیوچار در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای: تأثیر عوامل شیمیایی و فیزیکی بر ذخیره‌سازی کربن و اکسید نیتروژن در خاک

سمانه سردرودی راد[۱] ✉ | سیدمهدی سالارخراسانی [۲]

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، تهران، ایران. رایانامه: samaneh.sardroudi@ut.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، تهران، ایران. رایانامه: mahdi.salar.kh@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵

واژه‌های کلیدی:
بیوچار،
انتشار گازهای گلخانه‌ای،
دمای پیرولیز،
ذخیره‌سازی کربن در خاک،
انتشار اکسید نیتروژن.

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر بیوچار بر انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه CO_2 و N_2O، انجام شد. بیوچار با تغییر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک بر چرخه‌های زیست‌محیطی اثر می‌گذارد. نتایج نشان داد بیوچار تولیدشده از بقایای کشاورزی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین کاهش انتشار CO_2 (۲۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) را ایجاد کرد، در حالی‌که افزایش دما به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش انتشار N_2O تا ۴۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم شد. نسبت C:N بیوچار و نوع ماده اولیه از عوامل تعیین‌کننده بودند؛ بیوچارهای گیاهی با نسبت C:N بالا در کاهش CO_2 مؤثرتر و بیوچارهای حاصل از کود حیوانی در خاک‌های مرطوب موجب افزایش N_2O شدند. بیوچار تولیدشده از پوست بادام‌زمینی کمترین، و بیوچار حاصل از کود خوکی بیشترین میزان انتشار CO_2 و N_2O را داشتند. همچنین اندازه ذرات بیوچار بر پایداری و شدت انتشار اثر گذاشت، به‌طوری‌که ذرات درشت‌تر (۵–۱۰ میلی‌متر) نسبت به نمونه‌های ریزتر تا ۷/۴۱٪ و ۴/۳۹٪ به‌ترتیب انتشار N_2O و CO_2 را کاهش دادند. عملکرد بیوچار تحت‌تأثیر ترکیب شیمیایی، ساختار متخلخل، فعالیت میکروبی خاک و شرایط محیطی مانند رطوبت و دما بود. در نتیجه، انتخاب بیوچار با دمای بهینه، ماده اولیه پایدار و اندازه ذرات مناسب می‌تواند راهکاری مؤثر برای کاهش گازهای گلخانه‌ای و بهبود کیفیت خاک باشد.

استناد: سردرودی راد؛ سمانه، سالارخراسانی؛ سیدمهدی، (۱۴۰۴) نقش بیوچار در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای: تأثیر عوامل شیمیایی و فیزیکی بر ذخیره‌سازی کربن و اکسید نیتروژن در خاک، *نشریه علمی–ترویجی آبخوان*، ۱۹ (۱).

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

تغییر اقلیم و افزایش دمای جهانی از چالش‌های اساسی قرن حاضر محسوب می‌شوند که تأثیرات گسترده‌ای بر اکوسیستم‌های طبیعی و انسانی دارند (Sivakumar, 2011; Salar-Khorasani, 2023; Moghaddam, 2024; Mohammadi et al., 2024). یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر این پدیده، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو زمین است که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی، از جمله فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و احتراق سوخت‌های فسیلی است (IPCC, 2018; Salar-Khorasani, 2025; Salar-Khorasani & Sardroudi Rad, 2024). در میان این گازها، دی‌اکسیدکربن (CO_2)، متان (CH_4) و اکسید نیتروژن (N_2O) به‌دلیل نقش کلیدی خود در پدیده گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی، مورد توجه گسترده محققان قرار گرفته‌اند. به‌ویژه، بخش کشاورزی سهم بسزایی در انتشار این گازها دارد و به همین دلیل، توسعه و به‌کارگیری راهکارهای پایدار به‌منظور کاهش انتشار آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Woolf et al., 2010).

بیوچار، که از پیرولیز زیست‌توده‌های آلی در شرایط کم اکسیژن تولید می‌شود، به عنوان یکی از راهکارهای نوین و پایدار در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود کیفیت خاک معرفی شده است (Lehmann, 2007; Sri Shalini et al., 2021). این ماده کربن‌دار به‌دلیل پایداری ساختاری بالا و ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود می‌تواند به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیر بگذارد. از یک سو، بیوچار می‌تواند با تثبیت کربن در خاک، مانع از ورود مجدد CO_2 به جو شود. از سوی دیگر، این ماده با تغییر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، بر فرآیندهای بیوژئوشیمیایی مؤثر بر انتشار N_2O و CH_4 تأثیر می‌گذارد (Jeffery et al., 2011; McDaniel et al., 2019; Zhang et al., 2020).

ویژگی‌های بیوچار، از جمله نوع و منبع اولیه زیست‌توده، دمای پیرولیز، نسبت کربن به نیتروژن (C:N) و میزان مواد فرار موجود در آن، از عوامل تعیین‌کننده در کارایی آن در کاهش یا افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند. مطالعات نشان داده‌اند که بیوچارهای تولید شده در دماهای بالاتر، به دلیل ساختار متراکم‌تر و کاهش میزان مواد آلی فرار، پایداری بیشتری در خاک داشته و میزان انتشار CO_2 را کاهش می‌دهند (Liu et al., 2020; Bai et al., 2025; Shrestha et al., 2023). در مقابل، بیوچارهای با دمای تولید پایین‌تر، به دلیل برخورداری از مقادیر بیشتری از مواد آلی تجزیه‌پذیر، ممکن است منجر به افزایش فعالیت‌های میکروبی و در نتیجه، افزایش تولید CO_2 و N_2O شوند (Ameloot et al., 2013; Lyu et al., 2022; Wang et al., 2017). به همین ترتیب، نوع زیست‌توده مورد استفاده در تولید بیوچار نیز نقش مهمی در میزان تأثیر آن بر انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد؛ به‌طوری‌که بیوچارهای حاصل از بقایای گیاهی در مقایسه با نمونه‌های تولید شده از چوب یا کودهای حیوانی، معمولاً تأثیر متفاوتی بر فرآیندهای زیست‌محیطی خاک دارند (Cayuela et al., 2014; Yin et al., 2021). علاوه بر ویژگی‌های ذاتی بیوچار، شرایط محیطی، از جمله میزان رطوبت خاک، دما، نوع کاربری زمین و میزان کودهای نیتروژنی مصرفی نیز بر عملکرد بیوچار در کاهش یا افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای مؤثر هستند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که بیوچار می‌تواند در شرایط خاص، مانند خاک‌های مرطوب و شالیزارها، به کاهش انتشار CH_4 کمک کند، در حالی که در خاک‌های خشک، ممکن است تأثیرات متفاوتی بر این فرآیند داشته باشد (Feng et al., 2012; Kerner et al., 2023). همچنین، بیوچار می‌تواند از طریق تأثیر بر جوامع میکروبی خاک، میزان انتشار N_2O را کاهش دهد (Harter et al., 2014).

با وجود مطالعات گسترده در این زمینه، همچنان چالش‌هایی در درک دقیق مکانیسم‌های حاکم بر تأثیر بیوچار بر انتشار گازهای گلخانه‌ای وجود دارد. برخی از نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهند که بیوچار در شرایط خاص می‌تواند به افزایش انتشار CO_2 و N_2O منجر شود، که این امر ضرورت بررسی دقیق‌تر تأثیرات متقابل بین ویژگی‌های بیوچار، شرایط خاک و فرآیندهای میکروبی را برجسته می‌کند. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی جامع تأثیر بیوچار بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و تحلیل نقش آن در بهبود ویژگی‌های خاک و فرآیندهای بیوژئوشیمیایی مرتبط، انجام شده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر بیوچار بر انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق یک متاآنالیز جامع انجام شد. به‌منظور دستیابی به نتایج معتبر و قابل استناد، فرآیند جستجو، انتخاب مقالات، استخراج داده‌ها و تحلیل آماری به‌صورت سیستماتیک طراحی و اجرا گردید. جستجوی سیستماتیک مقالات علمی در پایگاه‌های داده معتبر از جمله ScienceDirect، Springer، Google Scholar و Web of Science

صورت گرفت. در این جستجو، از کلیدواژه‌هایی نظیر "بیوچار"، "گازهای گلخانه‌ای"، "دی‌اکسید کربن"، "اکسید نیتروژن"، "اثرات زیست‌محیطی" و "پایداری خاک" استفاده شد.

انتخاب مقالات براساس معیارهایی از قبیل انتشار در مجلات دارای داوری همتا، بررسی تأثیر بیوچار بر انتشار گازهای گلخانه‌ای در شرایط آزمایشگاهی یا مزرعه‌ای و ارائه داده‌های کمی نظیر میانگین انتشار گازها، انحراف معیار و اندازه نمونه صورت گرفت. علاوه بر این، پژوهش‌هایی که داده‌های کیفی را نیز مورد بررسی قرار داده بودند، در نظر گرفته شدند، اما اولویت به مطالعات دارای داده‌های کمی اختصاص یافت. داده‌های استخراج‌شده شامل میانگین انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO_2، CH_4، N_2O) در گروه‌های تیمار (با بیوچار) و کنترل (بدون بیوچار)، انحراف معیار و اندازه نمونه برای هر گروه، ویژگی‌های بیوچار نظیر نوع ماده اولیه، دمای تولید و میزان کاربرد، و همچنین مشخصات خاک از جمله pH، محتوای نیتروژن و نوع خاک بودند. در صورت لزوم، داده‌ها به واحدهای استاندارد تبدیل شدند تا امکان مقایسه میان مطالعات مختلف فراهم گردد. برای تحلیل داده‌ها، از روش متاآنالیز با استفاده از لگاریتم طبیعی نسبت پاسخ (lnRR) به عنوان اندازه اثر استفاده شد. فرمول محاسبه lnRR به صورت زیر (رابطه ۱) است:

$$In\ RR = In\left(\frac{\bar{X}_T}{\bar{X}_C}\right)$$ رابطهٔ ۱)

که در آن، $\bar{X}_T$ میانگین انتشار گاز در گروه تیمار (با بیوچار) و $\bar{X}_C$ میانگین انتشار گاز در گروه کنترل (بدون بیوچار).

واریانس lnRR نیز با استفاده از فرمول زیر (رابطه ۲) محاسبه شد:

$$V_{In\ RR} = \frac{SD_T^2}{n_T\bar{X}_T^2} + \frac{SD_C^2}{n_C\bar{X}_C^2}$$ رابطهٔ ۲)

که در آن، SD_C و SD_T میانگین انتشار گاز در گروه تیمار (با بیوچار) و n_T و n_C میانگین انتشار گاز در گروه کنترل (بدون بیوچار) است. برای محاسبه اندازه اثر کلی و ارزیابی ناهمگنی بین مطالعات، از مدل اثرات تصادفی با روش DerSimonian و Laird استفاده شد. ناهمگنی با استفاده از آماره I^2 و آزمون Q بررسی شد. تحلیل‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزار R و بسته metafor انجام شدند (Viechtbauer, 2010; Ripley, 2001).

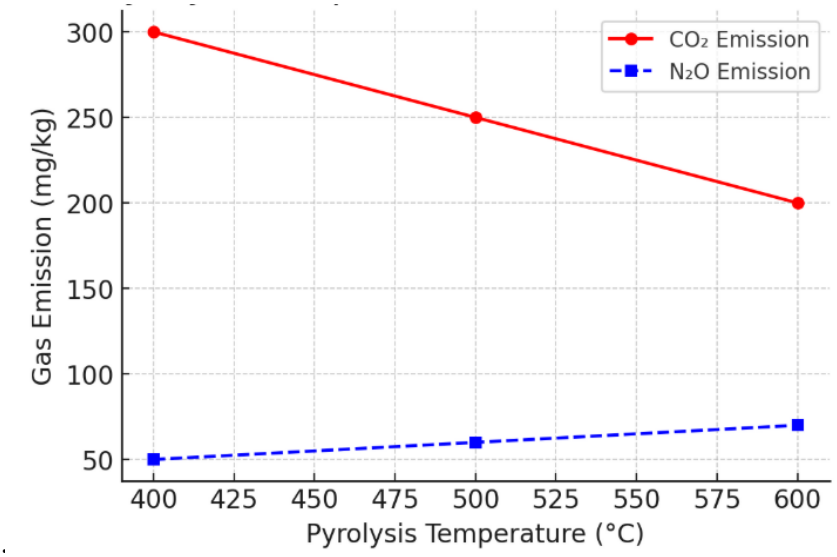
نتایج و بحث

تأثیر دمای پیرولیز بر میزان انتشار گازها

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دمای پیرولیز تأثیر مستقیمی بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. بیوچارهای تولیدشده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر بیشتری در کاهش انتشار تجمعی دی‌اکسید کربن (CO_2) دارند. در مقابل، افزایش دما به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد منجر به کاهش این اثر شده و میزان انتشار CO_2 افزایش یافته است. این امر نشان می‌دهد که دمای پایین‌تر در فرآیند پیرولیز به بهبود عملکرد بیوچار در کاهش انتشار CO_2 منجر می‌شود. با این حال، N_2O رفتار متفاوتی را نشان داده است. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده، میزان انتشار N_2O با افزایش دمای پیرولیز افزایش یافته است. این مسئله نشان می‌دهد که در فرآیندهای با دمای بالا، احتمال تولید و انتشار N_2O افزایش می‌یابد که می‌تواند به دلیل تغییر در ساختار بیوچار و تأثیر آن بر فرآیندهای نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون باشد.

نسبت کربن به نیتروژن (C:N) و نقش آن در انتشار گازها

یکی از عوامل مهم در تأثیر بیوچار بر انتشار گازهای گلخانه‌ای، نسبت کربن به نیتروژن (C:N) است. یافته‌های این مطالعه نشان داد که بیوچارهای دارای نسبت C:N بالا به‌طور کلی انتشار CO_2 را کاهش می‌دهند، در حالی که بیوچارهایی با نسبت C:N پایین، به‌ویژه در محیط‌های مرطوب، می‌توانند باعث افزایش انتشار N_2O شوند. این مسئله نشان می‌دهد که ویژگی‌های شیمیایی بیوچار تأثیر مستقیمی بر گازهای منتشر شده دارد و کنترل این نسبت می‌تواند به بهبود عملکرد بیوچار در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند.



شکل ۱: تأثیر دمای پیرولیز بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO_2 و N_2O)

اثر ماده اولیه بیوچار بر انتشار گازهای گلخانه‌ای

نوع ماده اولیه مورد استفاده برای تولید بیوچار نیز تأثیر چشمگیری بر انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. نتایج نشان می‌دهد که بیوچارهای حاصل از منابع مختلف دارای اثرات متفاوتی هستند (جدول ۱).

جدول ۱. مقایسه میزان انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) و اکسید نیتروژن (N_2O) برای بیوچارهای تولیدشده از مواد اولیه مختلف

نوع ماده اولیه	CO_2 (mg/kg)	N_2O (mg/kg)
کود خوکی	۸۷۵	۴۵
پوست بادام‌زمینی (دمای بالا)	۵۶۰	۲۸
بقایای کشاورزی	۶۴۰	۳۲

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، بیوچار حاصل از کود خوکی بیشترین میزان انتشار CO_2 را نشان داده است. در مقابل، بیوچار تولید شده از پوست بادام‌زمینی در دمای بالا کمترین میزان انتشار را داشته است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که نوع ماده اولیه و شرایط پیرولیز نقش مهمی در کارایی بیوچار در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند.

اثر اندازه ذرات بیوچار

اندازه ذرات بیوچار نیز تأثیر قابل‌توجهی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. نتایج نشان می‌دهد که بیوچارهای دارای اندازه ذرات بزرگ‌تر (۵– ۱۰ میلی‌متر) عملکرد بهتری در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته‌اند. در مقابل، ذرات کوچک‌تر (۲ – ۰/۵ میلی‌متر) گرچه سطح تماس بیشتری دارند، اما به دلیل تجزیه سریع‌تر، انتشار گازهای بیشتری را موجب شده‌اند. این یافته نشان می‌دهد که اندازه ذرات می‌تواند بر میزان پایداری بیوچار و تأثیر آن بر جذب و انتشار گازهای گلخانه‌ای اثر بگذارد.

جمع‌بندی

(۱) بیوچار می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد، اما کارایی آن به عوامل مختلفی مانند دمای پیرولیز، نسبت C:N، نوع ماده اولیه و اندازه ذرات بستگی دارد.

(۲) بیوچارهای تولید شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین کاهش انتشار CO_2 را نشان داده‌اند.

(۳) افزایش دمای پیرولیز می‌تواند منجر به افزایش انتشار N_2O شود.

(۴) بیوچارهای دارای نسبت C:N بالا عملکرد بهتری در کاهش انتشار CO_2 دارند.

(۵) نوع ماده اولیه تأثیر بسزایی در انتشار گازها دارد، به‌طوری که بیوچار حاصل از پوست بادام‌زمینی در دمای بالا کمترین میزان انتشار CO_2 را داشته است.

(۶) اندازه ذرات بزرگ‌تر باعث کاهش بیشتر انتشار گازهای گلخانه‌ای شده‌اند. همچنین، شکل ۱ به وضوح نشان می‌دهد که با افزایش دمای پیرولیز، میزان انتشار CO_2 کاهش اما انتشار N_2O افزایش می‌یابد. این نتایج می‌توانند به بهینه‌سازی استفاده از بیوچار در کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک کنند و زمینه‌ای برای مطالعات آینده در این حوزه فراهم آورند.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بیوچار می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد، اما تأثیر آن به عوامل متعددی بستگی دارد. یافته‌های این تحقیق با مطالعات پیشین که نشان داده‌اند بیوچار از طریق افزایش تثبیت کربن در خاک و تغییر فرآیندهای میکروبی، می‌تواند میزان انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) و اکسید نیتروژن (N_2O) را تحت تأثیر قرار دهد، همخوانی دارد. یکی از نکات مهم این پژوهش، تأثیر دمای تولید بیوچار بر میزان کاهش گازهای گلخانه‌ای است. بیوچارهای تولید شده در دماهای بالا (۴۰۰–۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) پایداری بیشتری داشته و به کاهش انتشار CO_2 کمک کرده‌اند، در حالی که بیوچارهای تولید شده در دماهای پایین‌تر ممکن است به دلیل فعالیت میکروبی بالاتر، منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای شوند. این یافته‌ها با تحقیقاتی که تأکید دارند بیوچارهای با دمای پیرولیز بالاتر دارای ساختار متخلخل‌تر و پایدارتر هستند، مطابقت دارد. علاوه‌براین، نسبت کربن به نیتروژن (C:N) نقش کلیدی در تنظیم میزان انتشار گازها دارد. نتایج نشان می‌دهد که بیوچارهایی با نسبت C:N بالا انتشار CO_2 را کاهش داده‌اند، اما در برخی موارد افزایش N_2O مشاهده شده است. این امر نشان می‌دهد که علاوه بر فاکتورهای فیزیکی و شیمیایی بیوچار، شرایط زیستی و میکروبیولوژیکی خاک نیز باید در نظر گرفته شود. همچنین، نوع ماده اولیه بیوچار در عملکرد آن نقش مهمی دارد. بیوچارهای حاصل از بقایای کشاورزی معمولاً تأثیر مثبت‌تری در کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای داشته‌اند، در حالی که بیوچارهای تولید شده از کودهای حیوانی ممکن است به دلیل مقدار بالای نیتروژن موجود، منجر به افزایش انتشار گازهای نیتروژنی شوند.

چالش‌ها و محدودیت‌ها

یکی از محدودیت‌های این پژوهش، تفاوت در شرایط محیطی آزمایش‌ها است که می‌تواند باعث تغییر در نتایج شود. تأثیر طولانی‌مدت بیوچار بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای همچنان نیاز به مطالعه بیشتر دارد، زیرا تغییرات بیوچار در خاک طی زمان ممکن است بر عملکرد آن اثر بگذارد. بررسی دقیق‌تر تأثیر اندازه ذرات بیوچار و روش‌های کاربرد آن در شرایط مزرعه‌ای می‌تواند در آینده به بهبود نتایج کمک کند.

نتیجه‌گیری

استفاده از بیوچار می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر دی‌اکسید کربن (CO_2) و متان (CH_4) از خاک عمل کند، اما میزان این تأثیر به عوامل متعددی بستگی دارد. یکی از این عوامل، دمای پیرولیز است؛ به‌طوری‌که بیوچارهای تولیدشده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین کاهش را در انتشار CO_2 نشان داده‌اند، درحالی‌که دمای بالاتر، مانند ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، ممکن است موجب افزایش انتشار اکسید نیتروژن (N_2O) شود. نسبت کربن به نیتروژن (C:N) نیز از دیگر عوامل تأثیرگذار است، به‌گونه‌ای که بیوچارهایی با نسبت C:N بالا عملکرد بهتری در کاهش انتشار CO_2 دارند، اما در صورت پایین بودن این نسبت، احتمال افزایش انتشار N_2O، خصوصاً در شرایط مرطوب خاک، افزایش می‌یابد. علاوه‌براین، نوع ماده اولیه مورد استفاده در تولید بیوچار تأثیر قابل‌توجهی بر میزان کاهش گازهای گلخانه‌ای دارد؛ به‌عنوان مثال، بیوچار حاصل از بقایای گیاهی مانند پوست بادام‌زمینی، کارایی بالاتری در کاهش انتشار این گازها نشان داده است، درحالی‌که بیوچار تولیدشده از کود حیوانی، به دلیل محتوای بالای نیتروژن، می‌تواند انتشار N_2O را افزایش دهد. اندازه ذرات بیوچار نیز نقش مهمی ایفا می‌کند، به‌گونه‌ای که ذرات بزرگ‌تر (۵ تا ۱۰ میلی‌متر) به دلیل پایداری بیشتر و تجزیه آهسته‌تر، تأثیر بیشتری در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. با وجود این یافته‌ها، همچنان برخی محدودیت‌ها، از جمله تفاوت در شرایط آزمایشگاهی مطالعات و نیاز به بررسی اثرات بلندمدت بیوچار بر خاک، نیازمند تحقیقات بیشتر است. به‌طور کلی، این پژوهش تأکید دارد که برای استفاده بهینه از بیوچار در کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای، باید ویژگی‌های بیوچار، شرایط خاک و محیط، و نحوه کاربرد آن به طور جامع بررسی شود. در نهایت، برای دستیابی به مدیریت پایدار خاک و کاهش تغییرات اقلیمی، سیاست‌گذاران و کشاورزان باید ترکیبی از بهترین روش‌های تولید و کاربرد بیوچار را مورد استفاده قرار دهند.

REFERENCE

Bai, J., Moreira, B. R. D. A., Bai, Y., Nadar, C. G., Feng, Y., & Yadav, S. (2025). Assessing biochar's impact on greenhouse gas emissions, microbial biomass, and enzyme activities in agricultural soils through meta-analysis and machine learning. Science of the Total Environment, 963, 178541.

Viechtbauer, W. (2010). Conducting meta-analyses in R with the metafor package. Journal of statistical software, 36, 1-48.

Zhang, Q., Xiao, J., Xue, J., & Zhang, L. (2020). Quantifying the effects of biochar application on greenhouse gas emissions from agricultural soils: a global meta-analysis. Sustainability, 12(8), 3436.

Shrestha, R. K., Jacinthe, P. A., Lal, R., Lorenz, K., Singh, M. P., Demyan, S. M., ... & Lindsey, L. E. (2023). Biochar as a negative emission technology: A synthesis of field research on greenhouse gas emissions. Journal of Environmental Quality, 52(4), 769-798.

Kerner, P., Struhs, E., Mirkouei, A., Aho, K., Lohse, K. A., Dungan, R. S., & You, Y. (2023). Microbial responses to biochar soil amendment and influential factors: a three-level meta-analysis. Environmental science & technology, 57(48), 19838-19848.

Ripley, B. D. (2001). The R project in statistical computing. MSOR connections. The newsletter of the LTSN Maths, Stats & OR Network, 1(1), 23-25.

Sivakumar, B. (2011). Global climate change and its impacts on water resources planning and management: assessment and challenges. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 25, 583-600.

Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. Nature communications, 1(1), 56.

Salar-Khorasani, S. M. (2025). Food security and sustainable development: Strategies for coping with insecurity in today's world (In Persian). University of Tehran. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22791.51360

Salar-Khorasani, S. M. (2023). The role of water in Iran’s economy and water footprint (In Persian). University of Tehran. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19436.07042

Salar-Khorasani, S. M., & Sardroudi Rad, S. (2024). The Role of Modern Technologies and the Concept of Water Footprint in Managing the Water Resource Crisis in Iran. Professional Promoting Scientific Journal of Aquifer, 16.(۱)

Sri Shalini, S., Palanivelu, K., Ramachandran, A., & Raghavan, V. (2021). Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions—a review. Biomass Conversion and Biorefinery, 11(5), 2247-2267.

Jeffery, S., Verheijen, F. G., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. Agriculture, ecosystems & environment, 144(1), 175-187.

McDaniel, M. D., Saha, D., Dumont, M. G., Hernández, M., & Adams, M. A. (2019). The effect of land-use change on soil CH4 and N2O fluxes: A global meta-analysis. Ecosystems, 22(6), 1424-1443.

Lehmann, J. (2007). A handful of carbon. Nature, 447(7141), 143-144.

Lyu, H., Zhang, H., Chu, M., Zhang, C., Tang, J., Chang, S. X., ... & Ok, Y. S. (2022). Biochar affects greenhouse gas emissions in various environments: A critical review. Land Degradation & Development, 33(17), 3327-3342.

Wang, N., Chang, Z. Z., Xue, X. M., Yu, J. G., Shi, X. X., Ma, L. Q., & Li, H. B. (2017). Biochar decreases nitrogen oxide and enhances methane emissions via altering microbial community composition of anaerobic paddy soil. Science of the Total Environment, 581, 689-696.

Yin, Y., Yang, C., Li, M., Zheng, Y., Ge, C., Gu, J., ... & Chen, R. (2021). Research progress and prospects for using biochar to mitigate greenhouse gas emissions during composting: a review. Science of The Total Environment, 798, 149294.

Harter, J., Krause, H. M., Schuettler, S., Ruser, R., Fromme, M., Scholten, T., ... & Behrens, S. (2014). Linking N2O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N-cycling microbial community. The ISME journal, 8(3), 660-674.

Viechtbauer, W. (2010). Conducting meta-analyses in R with the metafor package. Journal of statistical software, 36, 1-48.

Moghaddam, N. (2024). Managing water resources to mitigate drought impacts due to climate change in the United States with a focus on the state of California. Iran-Water Resources Research, 20(2), 194-217.

Mohammadi, S., Hajirad, I., & Ahmadaali, K. (2024). Artificial intelligence and reducing the effects of climate change: applications and challenges. Water Management in Agriculture.