

مروری بر کودهای مبتنی بر بیوچار و کاربردهای آن در کشاورزی پایدار

چکیده

کودهای مبتنی بر بیوچار به عنوان رویکردی نوین در مدیریت پایدار خاک و بهینه سازی تغذیه گیاه، در پاسخ به محدودیت منابع و افزایش تقاضای غذایی، مورد توجه قرار گرفته اند. این کودها به واسطه سطح ویژه بالا، تخلخل مناسب و وجود گروه های عاملی فعال، ضمن بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی و پایداری خاکدانه ها را افزایش داده و از طریق تنظیم سینتیک رهایش عناصر غذایی، موجب کاهش تلفات عناصر غذایی ناشی از آبشویی و تصعید می شوند. در این مقاله مروری، پیشرفت های اخیر در فناوری های تولید بیوچار، روش های فعال سازی و راهبردهای غنی سازی آن، همراه با کاربردهای آن در سامانه های خاک-گیاه بررسی شده است. شواهد نشان می دهد استفاده از این کودها موجب افزایش کربن آلی پایدار، تقویت فعالیت میکروبی خاک و بهبود کارایی مصرف عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف می شود، این اثرات به افزایش عملکرد محصول و بهبود کیفیت آن منجر می گردد. علاوه بر این، کودهای مبتنی بر بیوچار از طریق تعدیل شرایط اکسایش-کاهش، افزایش نگهداشت نیتروژن و فسفر و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای، در کاهش اثرات زیست محیطی کشاورزی مؤثر هستند. با این حال، چالش هایی مانند ناهمگونی ویژگی ها و تفاوت پاسخ گیاه و خاک همچنان وجود دارد. بنابراین، توسعه فرمولاسیون های بهینه و انجام مطالعات بلندمدت ضروری است.

واژه های کلیدی: بیوچار، مدیریت پایدار خاک، کارایی مصرف عناصر غذایی، ضایعات کشاورزی

A review of biochar-based fertilizers and their applications in sustainable agriculture

Abstract

Biochar-based fertilizers have emerged as an innovative approach for sustainable soil management and optimized plant nutrition in response to resource limitations and increasing food demand. Owing to their high specific surface area, suitable porosity, and presence of active functional groups, these fertilizers improve the physical, chemical, and biological properties of soils while enhancing cation exchange capacity and aggregate stability. They also regulate nutrient release kinetics, thereby reducing nutrient losses caused by leaching and volatilization. This review examines recent advances in biochar production technologies, activation methods, and enrichment strategies, along with their applications in soil-plant systems. Evidence indicates that the use of biochar-based fertilizers increases stable soil organic carbon, enhances microbial activity, and improves the efficiency of both macro- and micronutrient use, ultimately leading to higher crop yields and improved product quality. In addition, these fertilizers contribute to mitigating the environmental impacts of agriculture by regulating redox conditions, increasing nitrogen and phosphorus retention, and reducing greenhouse gas emissions. However, challenges such as variability in biochar properties and inconsistent soil and plant responses still remain. Therefore, the development of optimized formulations and long-term field studies is essential.

Keywords: Biochar, sustainable soil management, nutrient use efficiency, agricultural waste.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In recent years, increasing pressure on natural resources, declining soil fertility, and growing global food demand have highlighted the need for sustainable soil management practices. In this context, biochar-based fertilizers have emerged as an effective and multifunctional approach for improving soil quality and optimizing plant nutrition. These materials are produced through the pyrolysis of agricultural residues followed by nutrient enrichment, and are characterized by

high surface area, porous structure, and reactive functional groups. Such properties enhance nutrient retention, improve soil structure, and regulate nutrient availability within the soil–plant system, thereby supporting more sustainable and efficient agricultural production.

Method

This study was conducted as a comprehensive review based on the analysis of scientific literature, including both national (domestic) and international peer-reviewed articles. Relevant publications were comprehensive review examined to evaluate recent advances in biochar production technologies, activation methods, enrichment strategies, and their applications in soil–plant systems.

Results

The findings indicate that biochar-based fertilizers significantly improve soil physical, chemical, and biological properties. Their application enhances cation exchange capacity, increases stable soil organic carbon, improves soil aggregate stability, and stimulates microbial activity. Moreover, these fertilizers contribute to better nutrient use efficiency for both macro- and micronutrients by reducing losses through leaching and volatilization and enabling controlled nutrient release. As a result, crop yield and product quality are notably improved. Additionally, biochar-based fertilizers play a crucial role in mitigating environmental impacts by regulating soil redox conditions, enhancing nitrogen and phosphorus retention, and reducing greenhouse gas emissions such as methane and nitrous oxide.

Conclusion

Despite their considerable benefits, challenges such as high production costs, variability in biochar properties due to differences in feedstock and pyrolysis conditions, and inconsistent responses across soil types and crops remain. Therefore, future research should focus on optimizing production processes, developing site-specific and controlled-release formulations, and conducting long-term field experiments to fully assess their agronomic and environmental effectiveness. Overall, biochar-based fertilizers represent a promising and sustainable solution for improving soil health and agricultural productivity.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authorship contribution

All authors contributed equally to the study design, data collection, data analysis, interpretation of results, and manuscript preparation and revision.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

No artificial intelligence tools were used in the article writing process.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مقدمه

کشاورزی نوین متکی بر مصرف کودهای شیمیایی برای افزایش بهره‌وری محصولات و تضمین امنیت غذایی است. کاربرد غیراصولی کودها و نبود راهنمایی‌های علمی مناسب، موجب تشدید فرایندهای تخریب خاک شده و پیامدهایی مانند کاهش حاصل خیزی خاک، اسیدی شدن خاک، عدم تعادل عناصر غذایی، افت کیفیت محصولات کشاورزی، و برهم خوردن تعادل جوامع میکروبی خاک به دنبال دارد (Kan et al., 2023; Liu et al., 2020; Krasilnikov et al., 2022). علاوه، کارایی پایین مصرف کودهای رایج سبب اتلاف منابع و آلودگی محیط زیست شده و ضرورت توسعه راهکارهای کارآمد و سازگار با محیط زیست را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این میان، بیوپچار به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد خود به عنوان یک اصلاح کننده خاک و افزودنی کودی با پتانسیل بالا در توسعه پایدار کشاورزی مورد توجه بوده است (Kavitha et al., 2018; Xia et al., 2024; Lin et al., 2025) (شکل ۱). کاربرد بیوپچار می‌تواند به طور مؤثر کیفیت خاک را بهبود بخشد (Samoraj et al., 2022). بطوریکه استفاده از بیوپچار موجب افزایش ظرفیت نگهداشت آب، عناصر غذایی و ذخیره سازی کربن در خاک می‌گردد (Masek et al., 2019; Li et al., 2024; He et al., 2024). علاوه استفاده از بیوپچار باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شده، رشد گیاه را تحریک کرده، عملکرد و کیفیت محصولات را ارتقا می‌دهد (Sultan et al., 2024; Jiang et al., 2024; Xiao et al., 2024). بر اساس پژوهش‌ها اثرات بیوپچار بر رشد گیاه یکسان نیست و واکنش گیاهان مختلف به آن می‌تواند متفاوت باشد (Kizito et al., 2019; Yin et al., 2020). این ناهمگونی ناشی از تنوع مواد اولیه مورد استفاده در تولید بیوپچار است که منجر به تفاوت‌های چشمگیر در ساختار فیزیکی و ترکیب عناصر بیوپچار شده و در برخی موارد نیازهای اختصاصی گیاهان مختلف را برآورده نمی‌سازد. علاوه، ظرفیت بالای جذب عناصر غذایی در بیوپچار می‌تواند در برخی شرایط دسترسی گیاه به مواد غذایی را محدود کند (Joseph et al., 2018; Eissa et al., 2024). همچنین، بیوپچار ممکن است حاوی فلزات سنگین باشد که رشد گیاه را به طور منفی تحت تأثیر قرار می‌دهند (Hilber et al., 2017). بنابراین، برای اینکه کارایی بیوپچار به عنوان اصلاح کننده خاک تضمین شود بایستی در تولید آن معیارهایی نظیر پایداری مکانیکی بالا، سطح ویژه زیاد، ساختار متخلخل توسعه یافته و محتوای بالای عناصر غذایی رعایت شود (Lee et al., 2023; Ullah et al., 2024; Nguyen et al., 2024). با وجود مزایای اثبات شده، پذیرش بیوپچار در کشاورزی در مقیاس وسیع همچنان محدود است. این امر عمدتاً به هزینه‌های تولید و کاربرد، نبود استانداردهای یکپارچه برای ارزیابی کیفیت و عملکرد بیوپچار، ناهمگنی ویژگی‌های آن ناشی از تفاوت در مواد اولیه و شرایط پیرولیز، و نیز کمبود شواهد بلندمدت اقتصادی در سامانه‌های زراعی نسبت داده می‌شود (Patel and Panwar, 2024).

¹ Biochar



شکل ۱. کاربرد زیست‌محیطی و کشاورزی بیوپچار (Santos et al., 2025)

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی بر توسعه بیوپچار با هدف رفع محدودیت‌های آن در کاربردهای کشاورزی و زیست محیطی متمرکز شده‌اند (شکل ۱). یکی از مهم‌ترین رویکردهای نوین در این زمینه، توسعه کودهای مبتنی بر بیوپچار است که امکان بهینه‌سازی ویژگی‌های بیوپچار و افزایش ارزش تغذیه‌ای آن برای گیاهان را فراهم می‌کند. کودهای مبتنی بر بیوپچار می‌توانند یا از طریق پیرولیز مستقیم مواد اولیه غنی از عناصر غذایی تولید شوند یا با غنی‌سازی مواد غذایی پیش یا پس از فرایند پیرولیز به دست آیند. این کودها به‌عنوان نسل جدید کودهای کشاورزی، توانسته‌اند بسیاری از محدودیت‌های بیوپچار متعارف، از جمله محتوای پایین عناصر معدنی، عملکرد ناپایدار، نامشخص بودن اثرات بلندمدت و احتمال وجود ترکیبات زیان‌آور را برطرف کنند (Seow et al., 2022; Uwingabire et al., 2024). در مقایسه با بیوپچار، کودهای مبتنی بر بیوپچار از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی برتری برخوردارند، به‌گونه‌ای که کاربرد آن‌ها علاوه بر بهبود بافت خاک و افزایش ظرفیت نگهداشت آب و عناصر غذایی، موجب تقویت رشد گیاه و افزایش عملکرد محصول می‌شود (Lu et al., 2023; Nagaraju et al., 2024; Wang et al., 2025). همچنین، این کودها می‌توانند از طریق آزادسازی عناصر قلیایی، اسیدیته خاک را تعدیل کنند (Nepal et al., 2023). در مجموع، کودهای مبتنی بر بیوپچار ظرفیت بالایی برای مقابله با تخریب کیفیت خاک و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی دارند. این مقاله مروری به بررسی روش‌های تهیه، سازوکارهای عملکرد و اثرات کاربردی کودهای مبتنی بر بیوپچار در اکوسیستم‌های کشاورزی می‌پردازد و تمرکز ویژه‌ای بر سازگاری آن‌ها با انواع مختلف خاک، رفتار آزادسازی عناصر غذایی و مزایای زیست‌محیطی دارد. با تلفیق نتایج، این مقاله تلاش دارد مبنای نظری لازم برای کاربرد هدفمند کودهای مبتنی بر بیوپچار را فراهم سازد و مسیرهای پژوهشی آینده، از جمله توسعه فناوری‌های تولید کم‌هزینه و ارزیابی‌های اثرات زیست‌محیطی را برجسته کند. فرضیه اصلی این پژوهش بر این مبنا استوار است که کودهای مبتنی بر بیوپچار، در صورت طراحی و به‌کارگیری متناسب با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و نیازهای فیزیولوژیک گیاه، قادرند در مقایسه با کودهای متداول، کارایی مصرف عناصر غذایی را به‌طور معناداری بهبود ببخشند و هم‌زمان پیامدهای نامطلوب زیست‌محیطی را کاهش دهند. بنابراین برخلاف مرورهای پیشین که عمدتاً بر کاربرد بیوپچار به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک تمرکز داشته‌اند، مقاله حاضر به‌طور اختصاصی بر کودهای مبتنی بر بیوپچار متمرکز بوده و جنبه‌های تولید، مکانیسم عملکرد، کارایی مصرف عناصر غذایی، مزایا، محدودیت‌ها و چشم‌اندازهای توسعه این فناوری در کشاورزی پایدار را بررسی می‌کند.

با وجود رشد سریع پژوهش‌ها در زمینه کاربرد بیوچار در کشاورزی، هنوز در ادبیات علمی درباره مرزبندی مفهومی اصطلاحات مرتبط با آن اجماع کامل وجود ندارد. به‌طور خاص، اصطلاحاتی مانند بیوچار، اصلاح‌کننده بیوچار²، بیوچار غنی‌شده³، بیوچار-کودهای مخلوط⁴ و کودهای مبتنی بر بیوچار⁵ در برخی مطالعات به‌صورت هم‌پوشان یا مترادف استفاده می‌شوند که این امر می‌تواند موجب ابهام در تفسیر نتایج شود (Joseph et al., 2021; Gao et al., 2022). بیوچار ماده‌ای کربن‌دار، متخلخل و پایدار است که از پیرولیز زیست‌توده در شرایط محدود اکسیژن تولید می‌شود و عمدتاً به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک برای بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و همچنین افزایش ترسیب کربن به کار می‌رود (Joseph et al., 2021). در این کاربرد، بیوچار در قالب "اصلاح‌کننده خاک مبتنی بر بیوچار" طبقه‌بندی می‌شود و نقش اصلی آن بهبود کیفیت خاک است، نه تأمین مستقیم عناصر غذایی. در مقابل، کودهای مبتنی بر بیوچار به محصولاتی گفته می‌شود که در آن‌ها بیوچار نه صرفاً به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک، بلکه به‌عنوان جزء عملکردی فعال در سامانه تغذیه گیاه عمل می‌کند. در این محصولات، بیوچار نقش مهمی در جذب، نگهداری و رهایش کنترل‌شده عناصر غذایی ایفا کرده و به‌طور مستقیم بر کارایی مصرف کود اثر می‌گذارد (Gao et al., 2022; Wang et al., 2022). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که بیوچار می‌تواند به‌عنوان یک بیستر مناسب برای تولید کودهای رهایش کنترل‌شده و کندرها⁶ عمل کند، زیرا ویژگی‌هایی مانند سطح ویژه بالا، تخلخل زیاد و وجود گروه‌های عاملی سطحی امکان جذب و آزادسازی تدریجی عناصر غذایی را فراهم می‌سازد (Wang et al., 2022). در این چارچوب، کودهای مبتنی بر بیوچار به‌عنوان یک رویکرد ترکیبی بین اصلاح خاک و تأمین عناصر غذایی تعریف می‌شوند. در مقابل، بیوچار غنی‌شد به بیوچاری اطلاق می‌شود که پس از تولید با عناصر غذایی معدنی، آلی یا میکروبی تیمار شده است. با این حال، همه بیوچارهای غنی‌شده الزاماً در گروه کودهای مبتنی بر بیوچار قرار نمی‌گیرند، زیرا در بسیاری موارد نقش غالب آن‌ها همچنان بهبود ویژگی‌های خاک است و نه تأمین هدفمند عناصر غذایی (Hagemann et al., 2017). همچنین، بیوچار-کودهای مخلوط به ترکیباتی اشاره دارد که در آن‌ها بیوچار صرفاً در کنار کودهای آلی یا معدنی مخلوط شده و نقش آن عمدتاً به بهبود نگهداری آب و عناصر غذایی یا کاهش تلفات کودی محدود می‌شود. در این حالت، عملکرد تغذیه‌ای عمدتاً توسط منبع کود تأمین می‌شود و بیوچار نقش مکمل دارد، نه نقش اصلی (Gao et al., 2022). در مقابل، کودهای کندرها و رهایش کنترل‌شده شامل موادی هستند که رهایش عناصر غذایی را به‌صورت تدریجی و در زمان طولانی‌تر نسبت به کودهای محلول معمولی انجام می‌دهند (Shaviv, 2005). در حالی که برخی از کودهای مبتنی بر بیوچار می‌توانند در این دسته قرار گیرند، اما این دو مفهوم مترادف نیستند، زیرا مکانیسم کنترل رهایش در کودهای بیوچار-محور عمدتاً به ویژگی‌های ساختاری بیوچار وابسته است، در حالی که در کودهای سنتی کندرها اغلب از پوشش‌های پلیمری یا ترکیبات شیمیایی استفاده می‌شود (Wang et al., 2022). بر این اساس، در این مقاله اصطلاح «کودهای مبتنی بر بیوچار» تنها برای محصولات به‌کار می‌رود که در آن‌ها بیوچار به‌عنوان جزء عملکردی اصلی در سامانه تأمین و رهایش عناصر غذایی نقش دارد، نه صرفاً به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک یا جزء اختلاطی در کنار سایر کودها.

2 Biochar amendment

3 Enriched biochar

4 Biochar-blended fertilizers

5 Biochar-based fertilizers

6 slow- and controlled-release fertilizers

طبقه‌بندی و روش‌های تهیه کودهای مبتنی بر بیوجار

کود مبتنی بر بیوجار نوعی کود با عملکرد ویژه است که در آن بیوجار به‌عنوان حامل عناصر غذایی به‌منظور بارگذاری نیتروژن، فسفر و پتاسیم از طریق سازوکارهای فیزیکی یا شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس منشأ و ترکیب عناصر غذایی، کودهای مبتنی بر بیوجار به‌طور کلی به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند (شکل ۲):

(۱) کود آلی مبتنی بر بیوجار: این دسته از کودها از ترکیب بیوجار با مواد آلی گیاهی و دامی نظیر کود مرغی، بقایای گیاهی و بقایای گیاهی و پسماندهای آلی شهری تولید می‌شوند و نقش مهمی در بهبود کیفیت خاک و پایداری کربن خاک ایفا می‌کنند (Piash et al., 2022; Zhang et al., 2024).

(۲) کود معدنی مبتنی بر بیوجار: این نوع کودها از تلفیق بیوجار با کودهای شیمیایی متداول نظیر اوره، دی‌آمونیم فسفات و کلرید پتاسیم تهیه می‌شوند و با هدف افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی و کاهش آبشویی آن‌ها توسعه یافته‌اند (Grafmuller et al., 2024).

(۳) کود مرکب آلی - معدنی مبتنی بر بیوجار: این گروه شامل کودهای کامپوزیتی است که به‌طور هم‌زمان حاوی اجزای آلی و معدنی بوده و اثرات هم‌افزای آن‌ها موجب بهبود ساختار خاک و افزایش پایداری شبکه‌های میکروبی می‌شود (Zhou et al., 2019). علاوه بر این، براساس نوع عنصر غذایی غالب کودهای مبتنی بر بیوجار به زیرگروه‌های تخصصی‌تری تقسیم می‌شوند، از جمله:

- کود نیتروژنه مبتنی بر بیوجار که از ترکیب بیوجار با کودهای نیتروژنه شیمیایی نظیر نیترات آمونیوم و اوره تولید شده و می‌تواند کارایی مصرف نیتروژن را افزایش داده و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد (Puga et al., 2020).
- کود فسفاته مبتنی بر بیوجار که از بارگذاری فسفر بر سطح یا منافذ بیوجار، اغلب همراه با ترکیبات نیتروژنه، تهیه شده و پایداری نیتروژن قابل جذب را نسبت به کودهای متداول افزایش می‌دهد (Barbosa et al., 2022).
- کود پتاسه مبتنی بر بیوجار که با غنی‌سازی بیوجار بوسیله منابع پتاسیمی نظیر کلرید یا سولفات پتاسیم تولید شده و جذب پتاسیم توسط گیاه را بهبود می‌بخشد (Fachini et al., 2024).
- کود مرکب مبتنی بر بیوجار که حاوی دو یا چند عنصر غذایی بوده و می‌تواند جذب عناصر را حتی در سال‌های بعد از مصرف اولیه افزایش دهد (Farrar et al., 2022).

به‌منظور ارتقای ویژگی‌های موثر کودهای مبتنی بر بیوجار، راهبردهای اصلاحی متعددی توسعه یافته‌اند. برای مثال، اصلاح شیمیایی بیوجار با اسیدها می‌تواند ظرفیت جذب عناصر غذایی و به‌ویژه فسفر قابل استفاده خاک را افزایش دهد (Qi et al., 2025). همچنین، افزودن تلقیح‌های میکروبی نظیر *Bacillus subtilis* به کودهای مبتنی بر بیوجار موجب افزایش جمعیت میکروارگانیسم‌های مفید، بهبود تنظیم ترشحات ریشه و تقویت مقاومت گیاه در برابر بیماری‌ها می‌شود (Deng et al., 2023). از سوی دیگر، استفاده از نانومواد و طراحی سیستم‌های رهاسازی کنترل‌شده نقش مؤثری در کاهش تلفات عناصر غذایی و افزایش کارایی مصرف آن‌ها دارد (Das and Ghosh, 2023). این رویکردها نه‌تنها کارایی رهاسازی تدریجی عناصر غذایی را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهند، بلکه زیرساخت فنی لازم برای توسعه کشاورزی دقیق را نیز فراهم می‌کنند.



شکل ۲. طبقه بندی کودهای مبتنی بر بیوچار، براساس منشأ، فرایند تولید و نوع محصول

روش‌های تهیه کودهای مبتنی بر بیوچار

روش تهیه کود مبتنی بر بیوچار یکی از عوامل کلیدی تعیین‌کننده در عملکرد، پایداری و کارایی کاربرد آن در اکوسیستم‌های کشاورزی محسوب می‌شود. این کودها از طریق کربونی‌اسیون زیست‌توده و سپس ترکیب بیوچار حاصل با سایر اجزای کودی نظیر نیتروژن، فسفر و پتاسیم با استفاده از فناوری‌های مختلف تولید می‌شوند. بسته به نوع ماده اولیه، مسیر فرایند تولید و ترکیب نهایی کود، روش‌های تولید کودهای مبتنی بر بیوچار از تنوع بالایی برخوردار است. بطوریکه دمای پیرولیز یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار است، به گونه‌ای که بیوچارهای حاصل از دماهای بالاتر عموماً دارای سطح ویژه و تخلخل بیشتری بوده و ظرفیت بیشتری برای جذب و بارگذاری عناصر غذایی از خود نشان می‌دهند (Singh et al., 2022). با وجود مزایای زراعی و زیست‌محیطی کودهای مبتنی بر بیوچار، ارزیابی اقتصادی فناوری‌های مختلف تولید و کاربرد آن‌ها همچنان نیازمند مطالعات جامع و مقایسه‌ای در شرایط واقعی مزرعه است. در حال حاضر، مهم‌ترین روش‌های تهیه این کودها شامل پیرولیز همزمان، پیرولیز درجا، آغشته‌سازی، گرانول‌سازی و پوشش‌دهی است. در روش هم‌پیرولیز، بیوچار و مواد غنی از عناصر غذایی به‌طور هم‌زمان پیرولیز شده و محصول نهایی از پایداری بالاتر و رفتار رهاسازی تدریجی مطلوب‌تری برخوردار است (Esmaeili et al., 2024). پیرولیز درجا امکان بارگذاری یکنواخت عناصر غذایی در ساختار بیوچار را فراهم کرده و برای تولید کودهایی با رهاسازی کنترل‌شده بسیار مناسب است (Palansooriya et al., 2025). روش آغشته‌سازی با هدف نفوذ عناصر غذایی به درون منافذ بیوچار و افزایش ظرفیت ذخیره و رهاسازی تدریجی آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Sim et al., 2021). گرانول‌سازی یکی از رایج‌ترین روش‌های صنعتی است که علاوه بر بهبود خواص فیزیکی کود، موجب کاهش آبشویی عناصر غذایی و افزایش بهره‌وری اقتصادی نیز می‌شود (Zheng et al., 2017). در نهایت، پوشش‌دهی سطح کودهای مبتنی بر بیوچار با مواد معدنی یا پلیمری می‌تواند رهاسازی عناصر غذایی را تنظیم کرده و اثرات زیست‌محیطی مصرف کود را به حداقل برساند (Gao et al., 2022).

روش پیرولیز همزمان

در روش هم‌پیرولیز، بیوچار به‌طور مستقیم از طریق پیرولیز هم‌زمان زیست‌توده و کودها یا افزودنی‌های معدنی سنتز می‌شود (Aban et al., 2025; Luyima et al., 2020). ابتدا مواد زیست‌توده‌ای مانند کاه و کود حیوانی با کودهایی مثل اوره و فسفات در نسبت

مشخصی مخلوط می‌شوند. سپس این ترکیب تحت شرایط دمای بالا و محدودیت اکسیژن پیرولیز می‌شود. پس از پایان فرایند و خنک شدن، محصول تولیدی جمع‌آوری و از طریق خرد کردن، الک کردن یا گرانول‌سازی، به کود مبتنی بر بیوپچار تبدیل می‌گردد. این روش باعث افزایش تثبیت عناصر غذایی در طول پیرولیز شده و به‌طور قابل توجهی پایداری و در دسترس بودن مواد مغذی کود را بهبود می‌بخشد. روش هم‌پیرولیز مبتنی بر فناوری کربونیزاسیون در دمای بالا است و هزینه آن عمدتاً تحت تأثیر عواملی مانند سرمایه‌گذاری در تجهیزات کربونیزاسیون (کوره‌های سنتی یا اجاق‌های پیرولیز)، مصرف بالای انرژی (دمای بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد)، هزینه کودها، استهلاک تجهیزات و هزینه‌های تصفیه گازهای خروجی قرار دارد. اگرچه هزینه مواد اولیه نسبتاً پایین است، اما هزینه کل معمولاً بالاتر است. مزیت اصلی این روش، هم‌افزایی مؤثر بین بیوپچار و کود است که اثرگذاری آن را افزایش می‌دهد و کاربردهای این روش شامل کشت خاک‌های تخریب‌شده و محصولات مختلف است (Esmaeili et al., 2024; Luyima et al., 2020).

روش پیرولیز درجا

روش پیرولیز درجا، زیست‌توده را مستقیماً در خاک یا محیط مزرعه به بیوپچار تبدیل می‌کند و هم‌زمان عملیات کوددهی انجام می‌گیرد (Palansooriya et al., 2025; Wang et al., 2022). در این فرایند، مواد زیست‌توده در مزرعه پخش می‌شوند و با استفاده از تکنیک‌های پیرولیز موضعی، بخشی از آن‌ها کربنیزه شده و هم‌زمان کود به خاک اضافه می‌شود. سپس شخم یا عملیات خاک‌ورزی انجام می‌گیرد تا بیوپچار با خاک به‌طور یکنواخت مخلوط شود. این روش به‌طور مؤثری هزینه‌های حمل و تولید را کاهش می‌دهد و به‌ویژه برای اصلاح اراضی وسیع کشاورزی مناسب است. اگرچه ساختار هزینه آن همچنان شامل استهلاک تجهیزات، مصرف انرژی، کنترل اثرات زیست‌محیطی و هزینه کود است، اما هزینه کلی نسبتاً پایین باقی می‌ماند. مزیت اصلی آن، امکان تبدیل در محل زیست‌توده است و کاربرد این روش شامل خاک‌هایی است که نیاز به بازگرداندن مواد آلی دارند یا با موانع تناوب زراعی مواجه هستند (Palansooriya et al., 2025; Wang et al., 2022).

روش آغشته‌سازی

روش آغشته‌سازی از ساختار متخلخل بیوپچار برای بارگذاری عناصر غذایی از طریق جذب سطحی یا تبادل یونی در محیط محلول استفاده می‌کند. در این روش، ابتدا بیوپچار تهیه شده و سپس در یک محلول کودی از پیش آماده‌شده غوطه‌ور می‌شود تا امکان جذب عناصر غذایی فراهم گردد. پس از گذشت مدت زمان مشخص، بیوپچار از محلول خارج شده و خشک می‌شود و در نتیجه، کود مبتنی بر بیوپچار با توزیع یکنواخت مواد مغذی به دست می‌آید. این روش امکان تنظیم ترکیب عناصر غذایی را متناسب با نیازهای مختلف خاک فراهم می‌سازد و به‌طور قابل توجهی کارایی کود را افزایش می‌دهد. برای اصلاح بیوپچار در این روش، از مواد شیمیایی مانند محلول‌های اسیدی-بازی یا نمکی و همچنین محلول‌های کودی حاوی نیتروژن، فسفر و پتاسیم استفاده می‌شود. هزینه‌های این روش عمدتاً ناشی از تهیه مواد شیمیایی و کودها، بازیافت و تصفیه محلول‌ها، مصرف انرژی و مدیریت نگهداری مواد شیمیایی است. و در مجموع، هزینه کلی نسبتاً پایین محسوب می‌شود. مزیت اصلی این روش، قابلیت تنظیم آسان و دقیق محتوای غذایی کود است. کاربرد این روش عمدتاً در سبزی‌های برگ‌ی و شرایطی است که نیاز به تأمین سریع عناصر غذایی وجود دارد (Wali et al., 2020; Villada et al., 2024; Chen et al., 2018).

روش گرانول‌سازی

روش گرانول‌سازی با استفاده از فرآیندهای مکانیکی، یکنواختی و قابلیت رهاسازی کودهای مبتنی بر بیوپچار را بهبود می‌بخشد. در این روش، ابتدا پودر بیوپچار با مواد اولیه کودی مخلوط شده و مقدار مناسبی از مواد چسباننده مانند لیگنین یا استات برای افزایش

پایداری ذرات افزوده می‌شود. سپس گرانول‌ها با استفاده از روش‌هایی نظیر گرانول‌سازی درامی یا اکستروژنی تولید می‌شوند. پس از گرانول‌سازی، ذرات خشک، الک و بسته‌بندی شده و محصولی مناسب برای کوددهی مکانیزه به دست می‌آید. این روش مستلزم مراحل اضافی فرآوری مکانیکی است و هزینه‌های آن شامل سرمایه‌گذاری در تجهیزات گرانول‌سازی، مصرف انرژی تجهیزات، استفاده از مواد افزودنی یا چسباننده مانند بنتونیت یا کربوکسی‌متیل سلولز سدیم و هزینه کودها می‌شود؛ از این رو، هزینه کلی آن در سطح متوسط قرار دارد. مزیت اصلی این روش، آزادسازی یکنواخت‌تر و پایدارتر عناصر غذایی است. کاربرد آن عمدتاً در محصولات زراعی مزرعه‌ای و باغ‌های تثبیت‌شده گزارش شده است (Chen et al., 2018; Wang et al., 2023; Yu et al., 2021).

روش پوشش‌دهی

روش پوشش‌دهی با ایجاد یک لایه از مواد کنترل‌کننده آزادسازی بر سطح کود مبتنی بر بیوجار، موجب افزایش ماندگاری آزادسازی عناصر غذایی و بهبود کارایی کود می‌شود. در این روش، ابتدا گرانول‌های کود مبتنی بر بیوجار تهیه شده و در یک دستگاه پوشش‌دهی چرخان قرار می‌گیرند، سپس مواد پوششی مانند آلزینات سدیم یا پلیمرهای زیست‌پایه به‌صورت اسپری بر سطح ذرات اعمال می‌شوند. پس از آن، گرانول‌ها عمل‌آوری و خشک می‌شوند تا یک لایه پوششی یکنواخت تشکیل گردد. این روش قادر است سرعت آزادسازی عناصر غذایی را به‌طور مؤثری کنترل کند، تلفات مواد مغذی را کاهش دهد و در نتیجه، کارایی کود را به‌طور چشمگیری افزایش یابد. هزینه‌های این روش شامل تأمین مواد پوششی مانند پلی‌وینیل الکل یا اصلاح‌کننده‌های نانویی، سرمایه‌گذاری در تجهیزات دقیق پوشش‌دهی، مصرف انرژی تجهیزات و هزینه کودها است. اگرچه این روش از نظر عملکرد آزادسازی کند، بسیار مطلوب است، اما هزینه کلی آن نسبتاً بالا می‌باشد. مزیت اصلی آن، تطبیق‌پذیری با نیازهای غذایی محصولات مختلف و افزایش بهره‌وری مصرف عناصر غذایی است. بعلاوه نوع پوشش باید از نظر پایداری و زیست‌تخریب‌پذیری ارزیابی شود، زیرا برخی پوشش‌های سنتزی یا نانویی می‌توانند در صورت عدم مدیریت صحیح موجب آلودگی ثانویه شوند (González et al., 2015). این روش بیشتر در محصولات با ارزش اقتصادی بالا که نیاز به کنترل دقیق آزادسازی عناصر غذایی دارند، کاربرد دارد (An et al., 2021; Lu et al., 2025; Jia et al., 2021). در مجموع، روش‌های مختلف تهیه کودهای مبتنی بر بیوجار از نظر فرآیند تولید و دامنه کاربرد تفاوت‌های قابل توجهی دارند و انتخاب روش مناسب باید بر اساس ویژگی‌های عناصر غذایی و نیازهای کاربردی محصول هدف انجام گیرد.

ملاحظات زیست‌محیطی و چرخه عمر

بیوجار مورد استفاده در تولید کودهای مبتنی بر بیوجار معمولاً از پسماندهای کشاورزی مانند بقایای گیاهی و فضولات دامی تهیه می‌شود و از فناوری‌هایی نظیر پیرولیز برای تولید آن بهره گرفته می‌شود (Liu et al., 2013; Zhou et al., 2019; Wen et al., 2017). این رویکرد علاوه بر بازیافت و بهره‌برداری بهینه از پسماندها، موجب کاهش بار زیست‌محیطی ناشی از دفع آن‌ها شده و از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه است. در فرآیند تولید بیوجار، زیست‌توده از طریق کربونیزاسیون در دمای بالا به بیوجار تبدیل می‌شود (Wen et al., 2024). این فرآیند پیرولیز معمولاً در بازه دمایی ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌گیرد که با مصرف قابل توجه انرژی و انتشار محدود گازهای گلخانه‌ای نظیر دی‌اکسیدکربن و متان همراه است. با این حال، بخشی از گازهای قابل اشتعال تولیدشده در این فرآیند می‌توانند به‌عنوان منبع انرژی جایگزین برای تولید برق یا گرمایش مورد استفاده قرار گیرند و به‌طور غیرمستقیم به کاهش انتشار کربن کمک کنند. در صورتی که زیست‌توده به‌طور طبیعی تجزیه شود یا مستقیماً سوزانده شود، کربن موجود در آن به‌سرعت به شکل دی‌اکسیدکربن یا متان وارد اتمسفر خواهد شد. در مقابل، تبدیل زیست‌توده به بیوجار موجب می‌شود بخشی از کربن به‌صورت پایدار و بلندمدت در ساختار بیوجار تثبیت گردد، ساختاری که به دلیل گروه‌های آروماتیکی زیاد و پایداری ساختاری ماندگاری زیادی در خاک دارد (Rudra et al., 2024). فرآیند ترکیب بیوجار با کودهای معدنی، از طریق روش‌هایی مانند آغشته‌سازی، پوشش‌دهی و گرانول‌سازی، نیازمند سرمایه‌گذاری اقتصادی مشخصی شامل هزینه مواد شیمیایی، تجهیزات و کودها است (Ndoung et al., 2024).

(et al., 2021). پس از کاربرد کودهای مبتنی بر بیوپچار در خاک، این مواد می‌توانند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را بهبود بخشند، آبشویی نیتروژن و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهند و در نهایت موجب افزایش عملکرد و کیفیت محصول شوند (Ndoung et al., 2021). به دلیل ویژگی آزادسازی تدریجی عناصر غذایی، این کودها اغلب با یک‌بار مصرف در خاک قابل استفاده هستند که این امر هزینه‌های کوددهی مکرر و نیروی کار را کاهش داده و هم‌زمان بهره‌وری مصرف عناصر غذایی را افزایش می‌دهد (Yin et al., 2022). بنابراین کودهای مبتنی بر بیوپچار در کل چرخه عمر خود دارای کربن و میزان آلاینده‌گی پایین بوده و علاوه بر بهبود ویژگی‌های خاک، منافع زیست‌محیطی قابل توجهی به همراه دارند. بعلاوه استفاده از پسماندهای کشاورزی برای تولید بیوپچار نیز با اصول اقتصاد چرخشی هم‌راستا است ولی مطالعات ارزیابی چرخه عمر در مورد کودهای مبتنی بر بیوپچار هنوز محدود بوده و داده‌های جامعی درباره اثرات زیست‌محیطی مواد اولیه و فرآیندهای مختلف تولید در دسترس نبوده و علی‌رغم مزایای زیست‌محیطی، هزینه تولید این کودها همچنان نسبتاً بالا ارزیابی می‌شود. در شکل ۳ برهم‌کنش‌های کودهای مبتنی بر بیوپچار، خاک، میکروبیوم و گیاه در سیستم‌های کشاورزی نشان داده شده است که در بخش‌های زیر نیز بررسی خواهد شد.

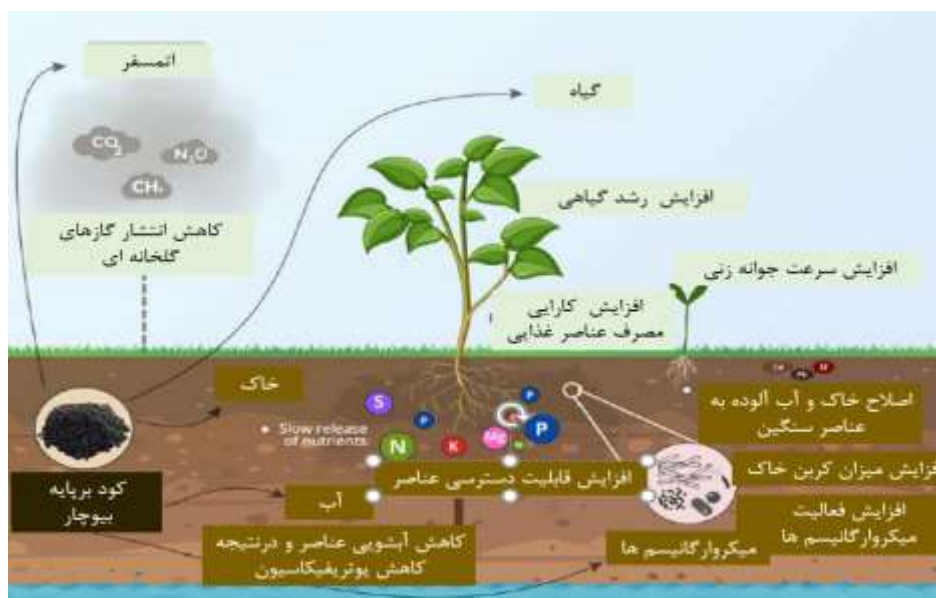


شکل ۳. برهم‌کنش‌های کودهای مبتنی بر بیوپچار، کود، خاک، میکروبیوم و گیاه در سیستم‌های کشاورزی

نقش مهم کودهای مبتنی بر بیوپچار در کشاورزی

در سال‌های اخیر، تأثیر کودهای مبتنی بر بیوپچار بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و پتانسیل کاربرد آن‌ها در اکوسیستم‌های کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. مزایای کودهای مبتنی بر بیوپچار نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. این کودها که بیوپچار را به‌عنوان حامل عناصر غذایی به کار می‌گیرند، توان بالقوه بالایی در افزایش عملکرد و کیفیت محصولات زراعی (Zhao et al., 2022; Feng et al., 2024)، بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک (Rombel et al., 2022)، بهینه‌سازی خصوصیات شیمیایی خاک (Ndoung et al., 2021) و تقویت فعالیت زیستی خاک (Yan et al., 2021) از خود نشان داده‌اند. تحلیل اثرات این کودها بر شاخص‌هایی نظیر pH خاک، ساختار خاک، ظرفیت نگهداشت آب و مقدار ماده آلی می‌تواند به درک ساز و کارهای بهبود خاک کمک کند. علاوه بر این، بررسی روش‌های کاربرد و منافع زیست‌محیطی بالقوه کودهای مبتنی بر بیوپچار، پشتوانه نظری و فنی لازم را برای

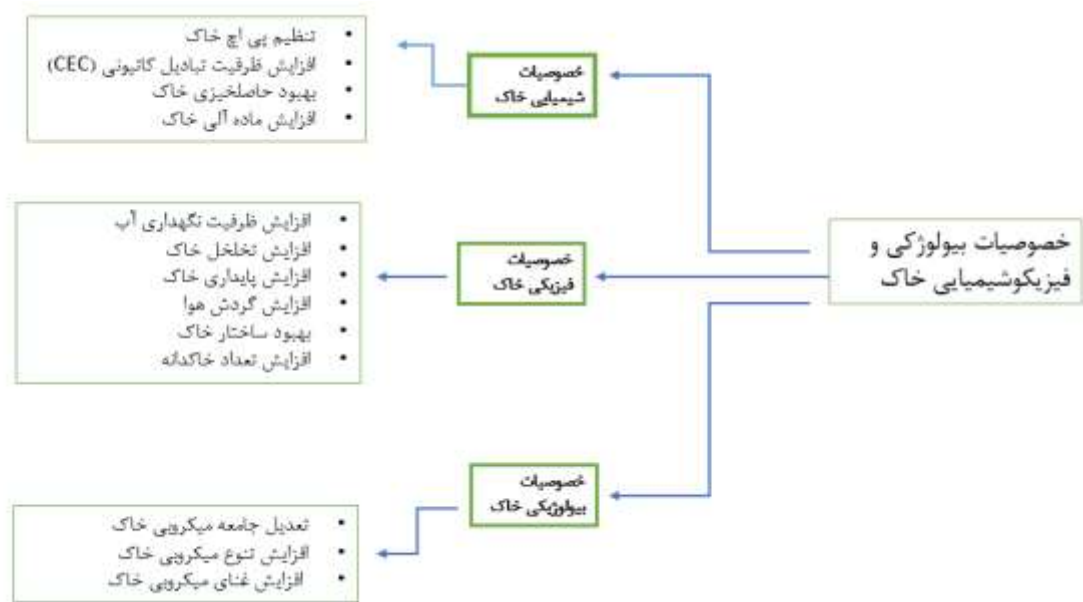
توسعه پایدار تولیدات کشاورزی فراهم می‌سازد. در بخش بعدی تأثیر کودهای مبتنی بر بیوپچار بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی خاک بطور خلاصه نشان داده شده است.



شکل ۴. مزایای کودهای مبتنی بر بیوپچار (Santos et al., 2025)

تأثیر کودهای مبتنی بر بیوپچار بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

کودهای مبتنی بر بیوپچار از طریق سازوکارهای گوناگون، موجب بهبود قابل توجه خصوصیات شیمیایی خاک می‌شوند (شکل ۵). این کودها سرشار از عناصر غذایی ضروری گیاه از جمله نیتروژن، فسفر و پتاسیم هستند (de Morais & Silva, 2023). پس از مصرف این کودها مقدار نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل جذب خاک را به‌طور معناداری افزایش داده و با ایجاد تعادل غذایی، حاصلخیزی خاک را بهبود می‌بخشند (Wang et al., 2023). یکی دیگر از اثرات مهم این کودها، تنظیم pH خاک است، زیرا خاصیت قلیایی بیوپچار مورد استفاده در فرآیند تولید می‌تواند مستقیماً اسیدیته خاک را خنثی کند، و علاوه بر گروه‌های عاملی سطحی و ساختار متخلخل بیوپچار با جذب یون‌های هیدروژن و کلرید باعث کاهش اسیدیته مؤثر خاک می‌شوند (Shetty & Prakash, 2020; Bolan et al., 2023; Deng et al., 2024). مطالعات نشان داده‌اند که در خاک‌های مورد استفاده برای کشت کلم، کودهای مبتنی بر بیوپچار تهیه‌شده از منابع مختلف باعث افزایش معنی‌دار pH خاک شده‌اند (Zhang et al., 2024). در خاک‌های اسیدی زیر کشت ذرت نیز pH به میزان حدوداً ۰/۶۹ افزایش یافته است (Shetty et al., 2025). با این حال، در خاک‌های آهکی تأثیر معنی‌داری بر pH مشاهده نشده است (Zhou et al., 2019). این نتایج بیانگر آن است که کارایی تنظیم pH این کودها به نوع خاک وابسته بوده و انتخاب آن‌ها باید با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و مواد اولیه انجام شود. Jiang و همکاران (۲۰۲۴) در یک متاآنالیز جهانی مبتنی بر ۹۸۱ مشاهده گزارش کردند که کاربرد بلندمدت بیوپچار موجب افزایش میانگین ۱۶ درصدی عملکرد محصولات زراعی شد. همچنین میزان کربن آلی خاک در دوره‌های بیش از دو سال به‌طور متوسط ۳۶/۲ درصد افزایش یافت. نتایج این مطالعه نشان داد که پاسخ عملکردی در ذرت و گندم بیشتر از برنج بوده و اثر افزایشی بیوپچار حتی پس از شش سال نیز در حدود ۱۵ درصد حفظ شده است.



شکل ۵. تأثیر کودهای مبتنی بر بیوجار بر خواص بیولوژیکی و فیزیکوشیمیایی خاک

آلودگی خاک به فلزات سنگین نه تنها حاصلخیزی و فعالیت میکروبی خاک را کاهش می‌دهد، بلکه رشد گیاه و کیفیت محصول را نیز محدود می‌سازد (Angelovicova et al., 2014; Rai et al., 2019; Wan et al., 2024). ظرفیت تبادل کاتیونی بالا نقش مهمی در تثبیت فلزات سنگین کاتیونی در خاک دارد (He et al., 2019). بیوجار موجود در کودهای مبتنی بر بیوجار به دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار و بار منفی سطحی، از ظرفیت تبادل کاتیونی بالایی برخوردار است (Sheikh et al., 2025) و می‌تواند ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های ضعیف را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد (Rasuli et al., 2022; Antonangelo et al., 2024). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که این کودها از طریق مکانیسم جذب سطحی، دسترسی زیستی فلزات سنگین را در گیاهان کاهش می‌دهند (Xu et al., 2022). به‌عنوان نمونه، در شالیزارهای آلوده به کادمیم، مصرف کود مبتنی بر بیوجار موجب کاهش قابل توجه کادمیم قابل جذب خاک و کاهش غلظت آن در اندام‌های گیاهی برنج شده است (Xu et al., 2022). نتایج مشابهی نیز در خاک‌های آلوده به کادمیم در کشت ذرت گزارش شده است (Mu et al., 2025). همچنین، کودهای ترکیبی جدید مبتنی بر بیوجار پوسته برنج، در مقایسه با بیوجار خالص، توان جذب کادمیم را به‌طور چشمگیری افزایش داده‌اند (Chen et al., 2018). این شواهد نشان می‌دهد که کودهای مبتنی بر بیوجار ظرفیت بالایی برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین دارند و می‌توانند به‌عنوان راهبردی نوین در مدیریت آلودگی خاک مطرح شوند (Lv et al., 2021). به دلیل ویژگی آزادسازی تدریجی عناصر غذایی، این کودها موجب افزایش زمان پایداری عناصر غذایی در خاک شده و هم‌زمان به تجمع ماده آلی خاک کمک می‌کنند (Wang et al., 2023). به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های غنی از کربن، کودهای مبتنی بر بیوجار پس از مصرف، مقدار کربن آلی خاک را افزایش می‌دهند (Zhang et al., 2021). بطوریکه در خاک‌های زیر کشت توتون افزایش بیش از ۲۲ درصد مشاهده شده (Wang et al., 2023) و در خاک‌های شنی نیز افزایش قابل توجه کربن آلی گزارش گردیده است (Ramos et al., 2022). در مجموع، این نتایج تأیید می‌کند که کودهای مبتنی بر بیوجار توان بالایی در افزایش ماده آلی و کربن آلی خاک دارند، ولی بررسی کارایی آن‌ها در خاک‌هایی با بافت رسی با مقادیر متفاوت ماده آلی و یا خاک‌های شنی بسیار فقیر، نیازمند مطالعات تجربی بیشتری است.

تأثیر کودهای مبتنی بر بیوجار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

پس از اعمال کودهای مبتنی بر بیوپچار به خاک، می‌توان انتظار داشت که ویژگی‌های فیزیکی خاک از طریق مکانیزم‌های مختلف که در ادامه به آنها اشاره می‌شود به شکل قابل توجهی بهبود یابند (شکل ۳). ساختار متخلخل بیوپچار در کودهای مبتنی بر بیوپچار می‌تواند به طور مؤثری تخلخل خاک را افزایش دهد، تشکیل ذرات خاک یا خاکدانه سازی را تسهیل کند و پایداری ساختاری خاک و تهویه آن را بهبود ببخشد (Zong et al., 2023; Fei et al., 2024; Xing et al., 2025). علاوه بر این، کودهای مبتنی بر بیوپچار می‌توانند ظرفیت نگهداری آب خاک را به شکل قابل توجهی افزایش دهند (Zhang et al., 2025)، که این امر احتمالاً به دلیل گروه‌های عاملی هیدروفیلی موجود در بیوپچار است که به حفظ رطوبت و کاهش اتلاف آن از طریق نفوذ کمک می‌کنند (Glab et al., 2016). همچنین، بین میکروارگانیسم‌هایی مانند *Vicinamibacteraceae* و پایداری ذرات خاک همبستگی مثبت قابل توجهی وجود دارد. اعمال کودهای مبتنی بر بیوپچار می‌تواند فراوانی این میکروارگانیسم‌ها را تغییر دهد و بدین ترتیب پایداری ساختار ذرات خاک را افزایش دهد. بهبود ساختار ذرات خاک همچنین موجب افزایش توانایی خاک در نگهداری آب و تهویه آن می‌شود و فضای بیشتری برای نفوذ آب و رشد ریشه فراهم می‌کند، که در نهایت توزیع آب و توسعه ریشه را بهینه می‌سازد (Yan et al., 2021; Wang et al., 2024).

در برخی خاک‌های رسی با رطوبت بالا، اثر نگهداری آب کودهای مبتنی بر بیوپچار محدود است و حتی ممکن است اثرات منفی مانند کاهش نفوذپذیری به دلیل مسدود شدن منافذ ایجاد شود. همچنین، افزایش ظرفیت کل نگهداری آب لزوماً به معنای افزایش آب قابل دسترس برای گیاه نیست که عامل حیاتی برای عملکرد محصولات کشاورزی است. علاوه بر این، موادی مانند کانی‌های رسی یا اصلاح‌کننده‌های آلی ممکن است اثر مشابهی را حتی برتری را با هزینه کمتر ارائه دهند. بنابراین، باید مزیت بالقوه زراعی در مقایسه با هزینه‌ها و روش‌های جایگزین افزایش نگهداری آب سنجیده شود. تأثیر کودهای مبتنی بر بیوپچار بر چگالی ظاهری خاک در مطالعات متفاوت است بطوریکه برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهند که استفاده از این کودها ممکن است چگالی ظاهری خاک را کاهش دهد (Feng et al., 2021; Wu et al., 2023)، در حالی که برخی دیگر نتیجه عکس گزارش کرده‌اند (Ndoung et al., 2023). اختلاف نتایج گزارش شده در مطالعات مختلف احتمالاً ناشی از تفاوت در ویژگی‌های خاک، نوع ماده اولیه بیوپچار، دمای پیرولیز، نرخ مصرف و مدت زمان آزمایش است (Feng et al., 2021; Wu et al., 2024; Ndoung et al., 2023). Allohverdi و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که اثر بیوپچار بر چگالی ظاهری و تخلخل خاک به شدت تحت تأثیر بافت خاک، ویژگی‌های بیوپچار و میزان کاربرد آن قرار دارد. بطوریکه بیوپچارهای تولیدشده در دماهای بالاتر دارای تخلخل و سطح ویژه بیشتری بوده و اثر مطلوب‌تری بر کاهش چگالی ظاهری خاک نشان می‌دهند. همچنین پاسخ خاک‌های رسی و متراکم به کاربرد بیوپچار معمولاً شدیدتر از خاک‌های شنی است. علاوه بر این، اثرات مثبت بیوپچار اغلب در آزمایش‌های بلندمدت آشکارتر از مطالعات کوتاه‌مدت گزارش شده‌اند. بنابراین، تناقض مشاهده شده در برخی نتایج به معنای ناکارآمدی کودهای مبتنی بر بیوپچار نیست، بلکه بیانگر وابستگی عملکرد این مواد به ویژگی‌های بیوپچار، شرایط خاک و نحوه کاربرد آنها است (Allohverdi et al., 2022; Fakhar et al., 2025).

تأثیر کودهای مبتنی بر بیوپچار بر میکروارگانیسم‌های خاک

میکروارگانیسم‌های خاک به عنوان موتور محرک عملکردهای اکوسیستم خاک نقش حیاتی در حفظ حاصلخیزی خاک و عملکرد محصولات کشاورزی دارند. تحقیقات نشان داده‌اند که کودهای مبتنی بر بیوپچار به طور قابل توجهی ترکیب و عملکرد میکروارگانیسم‌های خاک را از طریق مسیرهای متعدد تحت تأثیر قرار می‌دهند (شکل ۳). نخست تخلخل بالا و سطح ویژه وسیع بیوپچار در کودهای مبتنی بر بیوپچار، فضای زیست فراوانی برای میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌کند (Lehmann et al., 2011; Nguyen et al., 2018). دوم، کودهای مبتنی بر بیوپچار می‌توانند فعالیت میکروبی خاک را با تغییر جامعه میکروبی تنظیم می‌کنند (Zhou et al., 2019). علاوه، بیوپچار خالص ممکن است فعالیت قارچ‌های میکوریزایی آربوسکولار (AMF) را مهار کرده و فراوانی میکروارگانیسم‌های خاک را کاهش دهد، زیرا برخی ترکیبات سمی مانند هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای در آن وجود دارند.

(Zheng et al., 2019; Warnock et al., 2010). بنابراین، ترکیب بیوچار با کودها و شکل‌دهی کودهای مبتنی بر بیوچار می‌تواند محدودیت‌های مواد منفرد را کاهش داده و جایگاه‌های میکروبی را از طریق اثرات هم‌افزایی-تغذیه‌ای بهینه کند (Ndoung et al., 2021).

کودهای مبتنی بر بیوچار نه تنها ترکیب جامعه میکروبی را تغییر می‌دهند، بلکه با تنظیم بیان ژن‌های عملکردی، فرآیندهای اکولوژیکی خاک را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند. آنالیزها نشان داده‌اند که در خاک‌هایی که کودهای مبتنی بر بیوچار افزوده شده، فراوانی ژن‌های عملکردی مرتبط با متابولیسم انرژی مانند ژن‌های ATP synthase، چرخه مواد مغذی مانند ژن آمونیاک مونوکسیژناز، متابولیسم کربوهیدرات‌ها مانند ژن سلولاز و انتقال اسید آمینه به طور قابل توجهی افزایش یافته است (Gao et al., 2021). نهایتاً، کودهای مبتنی بر بیوچار نقش کلیدی در تنظیم اکولوژیکی میکروارگانیسم‌های خاک از طریق چندین مکانیزم ایفا می‌کنند. از جمله می‌توان به بهبود زیستگاه‌های میکروبی، بهینه‌سازی ساختار جامعه و افزایش بیان ژن‌های عملکردی اشاره کرد. با این حال، اگرچه تحقیقات موجود تأثیرات چندبعدی کودهای مبتنی بر بیوچار بر جوامع میکروبی خاک را تأیید کرده‌اند، اثرات اکولوژیکی بلندمدت آن‌ها هنوز دارای شکاف‌های دانشی است. شواهد فعلی عمدتاً از آزمایش‌های کوتاه‌مدت به دست آمده و پایداری و ثبات عملکردی بهینه‌سازی جامعه میکروبی در کاربردهای بلندمدت هنوز مشخص نیست. دو ریسک اکولوژیکی که نیاز به بررسی دارند عبارتند از: نخست، خاصیت قلیایی برخی کودهای مبتنی بر بیوچار ممکن است باعث نوسانات شدید pH در خاک‌های کشاورزی با پی‌اچ اسیدی و تعادل جامعه میکروبی را برهم زند. دوم، کودهای مبتنی بر بیوچار حاصل از ضایعات صنعتی ممکن است حاوی فلزات سنگین باشند که برای جوامع میکروبی سمی هستند. بنابراین، انجام آزمایش‌های میدانی بلندمدت برای ارزیابی اثرات پویا انواع مختلف کودهای مبتنی بر بیوچار بر ساختار جامعه میکروبی و عملکرد اکولوژیکی برای تضمین کاربرد ایمن و مؤثر آن‌ها حیاتی است.

تأثیر کودهای مبتنی بر بیوچار بر رشد، نمو، کیفیت و عملکرد محصولات مختلف زراعی

اخیراً پژوهش‌های مرتبط با کودهای مبتنی بر بیوچار به‌طور چشمگیری گسترش یافته است و مطالعات متعددی اثرات مثبت این کودها را در بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، افزایش مقاومت گیاه به تنش‌ها، ارتقای عملکرد و بهبود کیفیت محصولات تأیید کرده‌اند (Zhang et al., 2021; Zheng et al., 2021; Roy et al., 2021). نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که کاربرد گسترده کودهای مبتنی بر بیوچار در تولیدات کشاورزی، مزایای قابل‌توجهی به همراه دارد به‌گونه‌ای که علاوه بر افزایش عملکرد، موجب بهبود کیفیت محصولات نیز می‌شود (Yang et al., 2021). در منابع برای تهیه کودهای مبتنی بر بیوچار از منابع آلی و معدنی مختلف استفاده شده ایت بطوریمه در جدول ۱ خلاصه‌ای از مواد اولیه مورد استفاده در تولید کودهای مبتنی بر بیوچار و بررسی پاسخ‌های گیاهی نشان داده است.

جدول ۱. مواد اولیه مورد استفاده در تولید کودهای مبتنی بر بیوچار و بررسی پاسخ‌های گیاهی

کودهای مبتنی بر بیوچار	گیاه تست شده	رفرنس
بیوچار کود گاوی + روی (Z)	گندم	(Abas et al., 2021)
بیوچار تراشه چوب + محلول حاوی نیتروژن	کلم سفید	(Gafmuller et al., 2022)
بیوچار کاه پنبه + بنتونیت + $Mg_3(PO_4)_2$	فلفل	(Aet al., 2021)
بیوچار مشتق شده از چوب $MgCl_2 + KOH$	ذرت	(AwenyO et al., 2022)
بیوچار کاه ذرت + محلول‌های $MgCl_2$ و نترات آمونیوم	ذرت	(Kajavi-Shojaei et al., 2023)
بیوچار بستر مرغ + سنگ فسفات + باکتری‌های حل‌کننده	ذرت	(Amaral Leite et al., 2020)
بیوچار پوسته برنج، پوسته بادام زمینی و کاه + NPK	گندم - ذرت	(Net al., 2023)

در مقایسه با کودهای شیمیایی متداول کودهای مبتنی بر بیوپار موجب افزایش معنی دار عملکرد بادام زمینی شده اند (Gao et al., 2017). در یک سیستم تناوب کشت ذرت-سویا، اگرچه کاربرد کود مبتنی بر بیوپار منجر به افزایش سالانه عملکرد سویا شد، اما تأثیر معنی داری بر عملکرد ذرت مشاهده نگردید (Yuan et al., 2022). مشخص نیست که آیا این تفاوت نتایج به نوع سیستم کشت مرتبط است یا خیر، و این موضوع نیازمند بررسی های آزمایشی بیشتر است. بعلاوه برخی محققان نیز مشاهده کردند استفاده از کودهای کامپوزیت استروئید مبتنی بر مقادیر مختلف بیوپار صفات مورفولوژیکی و میزان جذب عناصر بوسیله ذرت را در مقایسه با کودهای رایج در خاک های آهکی به طور قابل توجهی افزایش می یابد (Piri and Sepehr, 2023).

آلودگی خاک به کادمیم به شدت رشد و کیفیت برنج را تحت تأثیر قرار داده و می تواند خطرات بالقوه ای برای سلامت انسان ایجاد کند. با این حال مطالعات نشان داده اند که با رسیدن درصد بیوپار در کودهای مبتنی بر بیوپار به یک حد معین، کیفیت خاک به طور چشمگیری بهبود می یابد، شاخص های رشدی برنج افزایش می یابد و فراهمی زیستی کادمیم در خاک به طور مؤثری کاهش پیدا می کند. در نتیجه، جذب کادمیم توسط گیاه برنج کاهش یافته و عملکرد و کیفیت محصول بهبود می یابد (Lv et al., 2021). در مقایسه با کودهای شیمیایی مرکب، کودهای مبتنی بر بیوپار نه تنها عملکرد برنج را حدود ۲/۹ درصد افزایش داده اند، بلکه محتوای کادمیم در دانه برنج را تا ۷۹ درصد کاهش داده اند (Qian et al., 2024).

علاوه بر محصولات زراعی، کودهای مبتنی بر بیوپار در تولید بصری ها نیز اثرات قابل توجهی نشان داده اند. در کشت چغندر قند، کاربرد کود آلی مبتنی بر بیوپار نه تنها عملکرد محصول را افزایش داده، بلکه ظرفیت فتوسنتزی و میزان قند تجمع یافته در ریشه را نیز به طور معنی داری بهبود بخشیده است (Chen et al., 2022). در مقایسه با کودهای شیمیایی، کودهای مبتنی بر بیوپار موجب افزایش قابل توجه عملکرد بادامجان شده و در عین حال، محتوای لیترات میوه را کاهش داده و میزان ویتامین C، قندهای محلول و تجمع نیتروژن، فسفر و پتاسیم را افزایش داده اند (Zhang et al., 2022). همچنین، کودهای مبتنی بر بیوپار تولید شده از پسماندهای بیوگاز و بقایای لیگنوسلولزی کشاورزی، غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم در خیار را به طور معنی داری افزایش داده اند (Villada et al., 2024). در مقایسه با کودهای شیمیایی، استفاده از کودهای مبتنی بر بیوپار موجب افزایش حدود ۱۴/۰۲ درصدی وزن تر کلم شده و شاخص های رشدی نظیر محتوای کلروفیل، ارتفاع بوته، حداکثر طول و عرض برگ را نیز به طور قابل توجهی بهبود داده است (Bi et al., 2024).

کودهای مبتنی بر بیوپار از طریق تأثیر هم زمان بر ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، به صورت هم افزا موجب افزایش بهره وری و کیفیت محصولات می شوند. سازوکارهای اثر گذاری این کودها را می توان در سطوح مختلف تبیین کرد. در سطح فیزیکی، کودهای مبتنی بر بیوپار با بهینه سازی ساختار تخلخل خاک، ظرفیت نگهداشت آب و تهویه خاک را افزایش داده و در نتیجه، رشد و توسعه مورفولوژیک ریشه گیاه را تسهیل می کنند. از نظر شیمیایی، این کودها با افزایش پتانسیل اکسایش-کاهش خاک (Eh)، موجب بهبود پتانسیل غشای ریشه شده، انرژی آزاد مورد نیاز برای تجمع عناصر غذایی در ریشه را کاهش داده و جذب نیتروژن را افزایش می دهند (Chew et al., 2020). از نظر زیستی، کودهای مبتنی بر بیوپار از طریق تنظیم ترکیب جامعه میکروبی ریزوسفر و افزایش فعالیت میکروارگانیسم های خاک، عملکرد و کیفیت محصول را ارتقا می دهند (Chew et al., 2020; Yan et al., 2025).

این برهم کنش ها منجر به افزایش کارایی فتوسنتزی، بهبود ظرفیت جذب عناصر غذایی و افزایش مقاومت گیاه به تنش ها شده و در نهایت، عملکرد و کیفیت محصول را به طور معنی داری افزایش می دهند از جمله افزایش تجمع قندها (Zhang et al., 2022). بهینه سازی محتوای پروتئین و مهار انتقال فلزات سنگین در گیاه می شود (Chen et al., 2018). اگرچه در حال حاضر انواع مختلفی

از کودهای کندرها در بازار وجود دارد که هزینه تولید آن‌ها کمتر از کودهای مبتنی بر بیوجار بوده و تا حدودی موجب افزایش عملکرد محصول می‌شوند، اما مخاطرات زیست‌محیطی و محدودیت‌های کارکردی آن‌ها قابل چشم‌پوشی نیست. کودهای کندرها سنتی معمولاً از پوشش‌های مصنوعی (مانند رزین‌ها یا پلاستیک‌ها) یا روش‌های شیمیایی کلاته‌سازی استفاده می‌کنند که می‌تواند منجر به آلودگی میکروپلاستیکی و باقی‌ماندن ترکیبات شیمیایی پایدار در محیط شود.

ولی کودهای مبتنی بر بیوجار علاوه بر تأثیرگذاری هم‌زمان بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، از اثرات هم‌افزایی قابل توجهی برخوردار هستند و ضمن افزایش عملکرد و کیفیت محصولات، منافع زیست‌محیطی برتری نسبت به کودهای متداول ارائه می‌دهند. با این حال، هزینه بالای تولید این کودها در مقایسه با ارزش افزوده بازار، موجب کاهش تمایل کشاورزان به استفاده از آن‌ها شده است، از طرفی ارزیابی اقتصادی این کودها نیازمند مطالعات آتی می‌باشد. بعلاوه انجام پژوهش‌های بلندمدت در زمینه کاربرد کودهای مبتنی بر بیوجار برای ارزیابی پایداری منافع حاصل از بهبود کیفیت خاک ضروری است. همچنین، توسعه فناوری‌های نوین با هدف کاهش هزینه تولید و دستیابی به هم‌افزایی میان منافع زیست‌محیطی و بازده اقتصادی، باید به‌عنوان یک اولویت تحقیقاتی مدنظر قرار گیرد.

ارتباط کودهای مبتنی بر بیوجار با کشاورزی پایدار

کودهای شیمیایی عمدتاً از سوخت‌های فسیلی (نظیر زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی) یا منابع معدنی (مانند سنگ‌های معدنی) تولید می‌شوند. استخراج و فرآوری این مواد، علاوه بر مصرف منابع تجدیدنپذیر، می‌تواند منجر به آلودگی‌های زیست‌محیطی قابل توجهی شود. همچنین، مصرف کودهای شیمیایی اغلب با انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه اکسید نیتروژن (N_2O)، همراه است (Song et al., 2021). بعلاوه برخی کودهای شیمیایی حاوی فلزات سنگین و ترکیبات زیان‌آور دیگری هستند که به تدریج در خاک تجمع یافته و می‌توانند سلامت گیاهان، جانوران و انسان را به مخاطره اندازند (Giuffrè de Lopez, 1997; Wang et al., 2020). در مقابل، کودهای مبتنی بر بیوجار معمولاً از مواد آلی طبیعی و تجدیدپذیر، مانند بقایای گیاهی، کاه و کلش، بقایای چوب و پسماندهای کشاورزی، از طریق فرآیند پیرولیز در دمای بالا تولید می‌شوند. در مقایسه با کودهای شیمیایی، این کودها وابستگی به منابع طبیعی تجدیدنپذیر را کاهش داده و اثرات مخرب زیست‌محیطی را تعدیل می‌کنند. علاوه بر این، مطالعات متعددی نشان داده‌اند که کودهای مبتنی بر بیوجار دارای پتانسیل بالایی در بهبود کیفیت خاک (Chen et al., 2021)، افزایش حاصلخیزی خاک، کاهش مصرف کودهای شیمیایی و افزایش عملکرد محصولات زراعی هستند (Wang et al., 2024; Acharya et al., 2023). مواد اولیه اصلی برای تولید کودهای مبتنی بر بیوجار شامل بقایای گیاهی نظیر کاه و کلش و همچنین کودهای دامی است. استفاده از کاه و کلش و کودهای دامی به‌عنوان منبع تولید بیوجار، علاوه بر بازیافت مؤثر پسماندها به کاهش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از آلودگی کودهای دامی و سوزاندن بقایای گیاهی کمک می‌کند. این رویکرد، بازتاب‌دهنده مفهوم چرخه مجدد منابع بوده و با اصول حفاظت از محیط زیست و توسعه پایدار هم‌راستا است.

تحلیل مقایسه‌ای مطالعات و عوامل مؤثر بر کارایی کودهای مبتنی بر بیوجار

بررسی مطالعات نشان می‌دهد که کارایی کودهای مبتنی بر بیوجار به‌شدت تحت تأثیر ویژگی‌های بیوجار، نوع عنصر غذایی بارگذاری‌شده، خصوصیات خاک و شرایط مدیریتی قرار دارد، از این‌رو، نمی‌توان یک فرمولاسیون واحد را برای تمامی شرایط زراعی توصیه کرد (Gao et al., 2022; Zhang et al., 2025). بررسی انتقادی کودهای نیتروژنه مبتنی بر بیوجار نشان داده است که سامانه‌های پوشش‌دهی و نفوذ عناصر غذایی در ساختار بیوجار معمولاً رهايش کنترل‌شده‌تری نسبت به اختلاط ساده ایجاد می‌کنند و در کاهش تلفات نیتروژن و افزایش کارایی مصرف آن مؤثرتر هستند (Gao et al., 2022). همچنین گزارش شده است که کودهای مبتنی بر بیوجار می‌توانند تلفات نیتروژن را در برخی شرایط تا بیش از ۵۰ درصد کاهش دهند و کارایی مصرف نیتروژن را بهبود

بخشند (González-Cencerrado et al., 2020; Gao et al., 2022). از نظر نوع عنصر غذایی، بیوچارهای دارای سطح ویژه و تخلخل بالا گزینه‌های مناسب‌تری برای کودهای نیتروژنه محسوب می‌شوند، زیرا ظرفیت جذب و نگهداری آمونیوم و ترکیبات نیتروژنی را افزایش می‌دهند. در مقابل، برای کودهای فسفات، بیوچارهای اصلاح‌شده با ترکیبات کلسیم، منیزیم یا آهن عملکرد بهتری در تثبیت و رهایش تدریجی فسفر نشان داده‌اند (Osman et al., 2023). مطالعات همچنین نشان داده‌اند که کودهای مبتنی بر بیوچار، عناصر غذایی را ۲ تا ۴ برابر آهسته‌تر از کودهای متداول آزاد می‌کنند که این موضوع نقش مهمی در افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی دارد (Osman et al., 2023). پاسخ خاک به کودهای مبتنی بر بیوچار نیز یکنواخت نیست. در خاک‌های اسیدی، کاربرد بیوچار معمولاً موجب افزایش pH، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و بهبود فراهمی عناصر غذایی می‌شود. بررسی‌ها نشان دادند که اثرات مثبت بیوچار در خاک‌های اسیدی به‌طور معنی‌داری بیشتر از بسیاری از خاک‌های خنثی و قلیایی است (Aurangzeib & Zhang, 2024). در مقابل، در خاک‌های اهنکی و قلیایی، افزایش بیشتر pH می‌تواند در برخی موارد موجب کاهش فراهمی برخی ریزمغذی‌ها یا افزایش خطر تصعید مونیاک شود (Gao et al., 2022). در خاک‌های شنی، مزایای بیوچار معمولاً بارزتر است. Bekchanova و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کرد که کاربرد بیوچار در خاک‌های شنی موجب افزایش نیتروژن کل و قابل جذب (۳۶٪)، افزایش فسفر قابل جذب (۳۴٪)، افزایش پتاسیم قابل جذب (۱۵٪) و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی (۱۸٪) شده و هم‌زمان آبشویی عناصر غذایی را ۳۸٪ و انتشار N_2O را ۲۹٪ کاهش داده است. این نتایج نشان می‌دهد که خاک‌های شنی به دلیل ظرفیت پایین نگهداری آب و عناصر غذایی، پاسخ بیشتری به کاربرد بیوچار نشان می‌دهند (Bekchanova et al., 2024). ولی برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از بیوچارهای بسیار قلیایی در خاک‌های اهنکی یا کاربرد مقادیر زیاد بیوچار می‌تواند موجب افزایش بیش از حد pH و کاهش رشد گیاه شود (Oh et al., 2014; Gao et al., 2022). در مجموع، شواهد موجود نشان می‌دهد که موفقیت کودهای مبتنی بر بیوچار به انتخاب صحیح نوع بیوچار، عنصر غذایی بارگذاری‌شده، ویژگی‌های خاک و شرایط مدیریتی وابسته است. بنابراین، توسعه فرمولاسیون‌های اختصاصی متناسب با نوع خاک و محصول می‌تواند اثربخشی این فناوری را به میزان قابل توجهی افزایش دهد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

کودهای مبتنی بر بیوچار پتانسیل بالایی در افزایش حاصلخیزی خاک و بهبود عملکرد محصولات زراعی نشان داده‌اند. بررسی روش‌های تهیه و طبقه‌بندی ویژگی‌های این کودها نشان می‌دهد که کودهای مبتنی بر بیوچار، به‌عنوان نسل نوین کودها، نه تنها دسترسی‌پذیری عناصر غذایی خاک و جذب آن‌ها توسط گیاهان را به‌طور مؤثری افزایش می‌دهند، بلکه با بهبود ساختار خاک، ظرفیت نگهداشت آب و عناصر غذایی را ارتقا داده و انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز کاهش می‌دهند. با این حال، چالش‌هایی مانع از کاربرد گسترده و صنعتی کودهای مبتنی بر بیوچار شده است، نخست آنکه بخش عمده پژوهش‌های انجام‌شده بر آزمایش‌های کوتاه‌مدت استوار بوده و مطالعات میدانی بلندمدت، چندهمسای و تحت سامانه‌های مختلف کشت، به‌ویژه در مقیاس مزرعه، هنوز محدود است. دوم آنکه سازوکارهای برهم‌کنش میان انواع مختلف کودهای مبتنی بر بیوچار با خاک، عناصر غذایی و ریزجانداران خاک به‌طور کامل شناخته نشده است، به‌ویژه مکانیسم‌های تنظیمی فرآیندهای تبدیل نیتروژن تحت شرایط بومیای محیطی که نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر است. سوم آنکه استانداردهای یکنواخت و پذیرفته‌شده‌ای برای فناوری‌های تولید کودهای مبتنی بر بیوچار وجود ندارد و ناهمگونی در انتخاب مواد اولیه، شرایط پیرولیز، روش‌های اصلاح و عملیات پس‌فرآوری، توسعه صنعتی این کودها را با محدودیت مواجه کرده است. افزون بر این، تولید بیوچار و فرآیندهای اصلاح آن معمولاً با مصرف نسبتاً بالای انرژی و هزینه مواد همراه است که به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ یا در صورت اعمال اصلاحات عملکردی ترکیبی، منجر به افزایش قیمت نهایی محصول می‌شود. این مسئله تا حدی پذیرش و استفاده گسترده از کودهای مبتنی بر بیوچار را در تولیدات کشاورزی، به‌خصوص در میان بهره‌برداران خرد و متوسط یا مناطق با محدودیت‌های اقتصادی، کاهش داده و گسترش آن‌ها را در کشاورزی سبز و اکولوژیک با مانع مواجه می‌سازد. با وجود این چالش‌های اقتصادی، کودهای مبتنی بر بیوچار همچنان از مزایای زیست‌محیطی قابل توجهی

برخوردار است. این کودها توان بالایی در کاهش تلفات نیتروژن و فسفر، کاهش خطر اسیدی شدن خاک، تأمین تدریجی عناصر غذایی، کنترل آلودگی فلزات سنگین و ارتقای فرایند ترسیب کربن دارند. هم‌زمان با نیاز روزافزون به توسعه کشاورزی پایدار انتظار می‌رود کودهای مبتنی بر بیوچار به‌عنوان یک فناوری پیونددهنده میان افزایش بهره‌وری کشاورزی و حفاظت اکولوژیک نقش مهمی ایفا کنند. بر این اساس پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده بایستی بر محورهای زیر متمرکز شوند:

- تقویت آزمایش‌های میدانی بلندمدت، چندمنطقه‌ای و تحت سامانه‌های متنوع کشت، به‌منظور ارزیابی سازگاری و پایداری عملکرد کودهای مبتنی بر بیوچار در شرایط مختلف خاک و اقلیم
- بهره‌گیری از رویکردهای زیست‌شناسی مولکولی، بوم‌شناسی خاک و علم مواد برای تحلیل عمیق سازوکارهای تنظیمی این کودها بر ساختار جوامع میکروبی خاک، فعالیت آنزیم‌ها و مسیرهای تبدیل عناصر غذایی
- توسعه فرایندهای تولید سبز، کم‌هزینه و پربازده به‌منظور عرضه محصولات کود مبتنی بر بیوچار با قابلیت تولید انبوه و کارکردهای هدفمند
- تدوین استانداردهای جامع کیفیت محصول و دستورالعمل‌های کاربرد مزرعه‌ای، با هدف تسهیل به‌کارگیری عملی این کودها در چارچوب کشاورزی سبز و سامانه‌های مدیریت دقیق عناصر غذایی

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

حمایت مالی برای این پژوهش انجام نشده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در طراحی مطالعه، گردآوری داده‌ها، تحلیل داده‌ها، تفسیر نتایج، تهیه و بازنگری مقاله مشارکت داشتند.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در طول آماده‌سازی این اثر، نویسنده (گان) از فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش استفاده نکرده‌اند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

منابع و داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

REFERENCES

- Aban, C. L., Larama, G., Ducci, A., Huidobro, J., Sabate, D. C., Gil, S. V., & Brandan, C. P. (2025). Restoration of degraded soils with perennial pastures shifts soil microbial communities and enhances soil structure. *Agricultural Ecosystems & Environment*, 382, 109472.
- Abbas, M. S., Akmal, M., Khan, K. S., Aziz, I., & Rafa, H. U. (2021). Zn ferti-fortification of wheat (*Triticum aestivum* L.) using zinc-enriched compost and biochar in rainfed area. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52, 2191–2206.
- Acharya, N., Vista, S. P., Shrestha, S., Neupane, N., & Pandit, N. R. (2023). Potential of biochar-based organic fertilizers on increasing soil fertility, available nutrients, and okra productivity in slightly acidic sandy loam soil. *Nitrogen*, 4, 1–15.
- Alemu, A., Lemma, B., & Gabbiye, N. (2019). Adsorption of chromium (III) from aqueous solution using vesicular basalt rock. *Cogent Environmental Science*, 5(1), 1650416.
- An, X., Wu, Z., Qin, H., Liu, X., He, Y., Xu, X., Li, T., & Yu, B. (2021). Integrated co-pyrolysis and coating for the synthesis of a new coated biochar-based fertilizer with enhanced slow-release performance. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124642.
- Antonangelo, J. A., Culman, S., & Zhang, H. L. (2024). Comparative analysis and prediction of cation exchange capacity via summation: Influence of biochar type and nutrient ratios. *Frontiers in Soil Science*, 4, 1371777.
- Arwenyo, B., Varco, J. J., Dygert, A., & Mlsna, T. (2022). Phosphorus availability from magnesium-modified P-enriched Douglas fir biochar as a controlled release fertilizer. *Soil Use and Management*, 38, 691–702.
- Aurangzeib, M., & Zhang, S. (2024). Biochar application can improve most of the chemical properties of acidic soils: A global meta-analysis. *ACS Agricultural Science & Technology*, 4, 292–306.
- Barbosa, C. F., Correa, D. A., Carneiro, J. S. D., & Melo, L. C. A. (2022). Biochar phosphate fertilizer loaded with urea preserves available nitrogen longer than conventional urea. *Sustainability*, 14, 686.
- Bekchanova, M., Campion, L., Bruns, S., Kuppens, T., & Lehmann, J. (2024). Biochar improves the nutrient cycle in sandy-textured soils and increases crop yield: A systematic review. *Environmental Evidence*, 13, 3.
- Bi, H. W., Xu, J. F., Li, K. X., Li, K. A., Cao, H. L., & Zhao, C. (2024). Effects of biochar-coated nitrogen fertilizer on the yield and quality of bok choy and on soil nutrients. *Sustainability*, 16, 1659.
- Bolan, N., Sarmah, A. K., Bordoloi, S., Bolan, S., Padhye, L. P., Van Zwieten, L., Sooriyakumar, P., Khan, B. A., Ahmad, M., Solaiman, Z. M., et al. (2023). Soil acidification and the liming potential of biochar. *Environmental Pollution*, 317, 120632.
- Campion, L., Bekchanova, M., Malina, R., & Kuppens, T. (2023). The costs and benefits of biochar production and use: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 408, 137138.
- Chen, J. T., Wang, X. R., Liu, X. Y., Wang, S. F., Zhao, J. N., Zhang, H., Wang, Y. B., & Li, C. F. (2022). Beneficial effects of biochar-based organic fertilizers on nitrogen assimilation, photosynthesis, and sucrose synthesis of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Plant Production*, 16, 755–768.
- Chen, L., Chen, Q. C., Rao, P. H., Yan, L. L., Shakib, A., & Shen, G. Q. (2018). Formulating and optimizing a novel biochar-based fertilizer for simultaneous slow-release of nitrogen and immobilization of cadmium. *Sustainability*, 10, 2740.
- Chen, Y., Cui, Z. X., Ding, H., Wan, Y. C., Tang, Z. B., & Gao, J. K. (2018). Cost-effective biochar produced from agricultural residues and its application for preparation of high-performance form-stable phase change material via simple method. *International Journal of Molecular Sciences*, 19, 3055.

- Chen, Z. F., Pei, J. C., Wei, Z. D., Ruan, X. L., Hua, Y. X., Xu, W., Zhang, C. S., Liu, T. Y., & Guo, Y. (2021). A novel maize biochar-based compound fertilizer for immobilizing cadmium and improving soil quality and maize growth. *Environmental Pollution*, 277, 116455.
- Chew, J., Zhu, L. L., Nielsen, S., Graber, E., Mitchell, D. R. G., Horvat, J., Mohammed, M., Liu, M. L., Van Zwieten, L., Donne, S., et al. (2020). Biochar-based fertilizer: Supercharging root membrane potential and biomass yield of rice. *Science of the Total Environment*, 713, 136431.
- Das, S. K., & Ghosh, G. K. (2023). Developing biochar-based slow-release N-P-K fertilizer for controlled nutrient release and its impact on soil health and yield. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 13051–13063.
- De Amaral Leite, A., De Souza Cardoso, A. A., De Almeida Leite, R., De Oliveira-Longatti, S. M., Filho, J. F. L., De Souza Moreira, F. M., & Melo, L. C. A. (2020). Selected bacterial strains enhance phosphorus availability from biochar-based rock phosphate fertilizer. *Annals of Microbiology*, 70, 6.
- Deng, L. S., Tu, P. F., Ahmed, N., Zhang, G. L., Cen, Y. Y., Huang, B. Y., Deng, L. F., & Yuan, H. R. (2024). Biochar-based phosphate fertilizer improve phosphorus bioavailability, microbial functioning, and citrus seedling growth. *Scientia Horticulturae*, 338, 113699.
- Deng, Z. H., Wang, J. W., He, Y. H., Tu, Z., Tian, F., Li, H. J., Wu, Z. S., & An, X. F. (2023). Biochar-based *Bacillus subtilis* inoculant for enhancing plants disease prevention: Microbiota response and root exudates regulation. *Biochar*, 5, 81.
- Eissa, R., Jeyakumar, L., McKenzie, D. B., & Wu, J. H. (2024). Influence of biochar feedstocks on nitrate adsorption capacity. *Earth*, 5, 55.
- Esmaeili, N., Rad, M. K., Sangani, M. F., & Ghorbanzadeh, N. (2024). Biochar-based fertilizers from co-pyrolysis of algae and hazelnut shell with triple superphosphate: Physicochemical properties and slow-release performance. *Waste Management & Research*, 1–8.
- Fachini, J., De Figueiredo, C. C., Do Vale, A. T., Da Silva, J., & Zandonadi, D. B. (2024). Potassium-enriched biochar-based fertilizers for improved uptake in radish plants. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 128, 415–427.
- Farrar, M. B., Wallace, H. M., Xu, C. Y., Joseph, S., Nguyen, T. T. N., Dunn, P. K., & Bai, S. H. (2022). Biochar compound fertilisers increase plant potassium uptake 2 years after application without additional organic fertiliser. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 7170–7184.
- Fei, Y. H., She, D. L., Yi, J., Sun, X. Q., Han, X., Liu, D. D., Liu, M. X., & Zhang, H. L. (2024). Roles of soil amendments in the water and salt transport of coastal saline soils through regulation of microstructure. *Land Degradation & Development*, 35, 2382–2394.
- Feng, H. L., Xu, C. S., He, H. H., Zeng, Q., Chen, N., Li, X. L., Ren, T. B., Ji, X. M., & Liu, G. S. (2021). Effect of biochar on soil enzyme activity and the bacterial community and its mechanism. *Huan Jing Ke Xue*, 42, 422–432.
- Feng, W. H., Sanchez-Rodriguez, A. R., Bilyera, N., Wang, J. Q., Wang, X. Q., Han, Y. H., Ma, B. X., Zhang, H. Y., Li, F. Y., Zhou, J., et al. (2024). Mechanisms of biochar-based organic fertilizers enhancing maize yield on a Chinese chernozem: Root traits, soil quality and soil microorganisms. *Environmental Technology & Innovation*, 36, 103756.
- Gao, M. Y., Yang, J. F., Du, Z. D., Mu, J. H., & Zhang, Y. H. (2017). Impact of application of biochar and biochar-based fertilizer on peanuts nutrient absorption and yield. *ICMMCT*, 126, 151–155.
- Gao, M. Y., Yang, J. F., Liu, C. M., Gu, B. W., Han, M., Li, J. W., Li, N., Liu, N., An, N., Dai, J., et al. (2021). Effects of long-term biochar and biochar-based fertilizer application on brown earth soil bacterial communities. *Agricultural Ecosystems & Environment*, 309, 107285.

- Gao, Y. R., Fang, Z., Van Zwieten, L., Bolan, N., Dong, D., Quin, B. F., Meng, J., Li, F. B., Wu, F. C., & Wang, H. L. (2022). A critical review of biochar-based nitrogen fertilizers and their effects on crop production and the environment. *Biochar*, 4, 36.
- Giuffrè de Lopez Camelo, L., Ratto de Miguez, S., & Marbán, L. (1997). Heavy metals input with phosphate fertilizers used in Argentina. *Science of the Total Environment*, 204, 245–250.
- Glab, T., Palmowska, J., Zaleski, T., & Gondek, K. (2016). Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. *Geoderma*, 281, 11–20.
- Grafmuller, J., Kammann, C. I., Kray, D., & Hagemann, N. (2024). Granulation compared to co-application of biochar plus mineral fertilizer and its impacts on crop growth and nutrient leaching. *Scientific Reports*, 14, 16555.
- Grafmuller, J., Schmidt, H. P., Kray, D., & Hagemann, N. (2022). Root-zone amendments of biochar-based fertilizers: Yield increases of white cabbage in temperate climate. *Horticulturae*, 8, 307.
- González, M. E., Cea, M., Medina, J., González, A., Diez, M. C., Cartes, P., Monreal, C., & Navia, R. (2015). Evaluation of biodegradable polymers as encapsulating agents for the development of a urea controlled-release fertilizer using biochar as support material. *Science of the Total Environment*, 505, 446–453.
- Hagemann, N., Joseph, S., Schmidt, H. P., Kammann, C. I., Harter, J., Borch, T., Young, R. B., Varga, K., Taherymoosavi, S., Elliott, K. W., McKenna, A., Albu, M., Mayrhofer, C., Obst, M., Conte, P., Dieguez-Alonso, A., Orsetti, S., Subdiaga, E., Behrens, S., & Kappler, A. (2017). Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility. *Nature Communications*, 8, 1089.
- He, D. B., Ma, H., Hu, D. N., Wang, X. G., Dong, Z. X., & Zhu, B. (2024). Biochar for sustainable agriculture: Improved soil carbon storage and reduced emissions on cropland. *Journal of Environmental Management*, 371, 123147.
- He, L. Z., Zhong, H., Liu, G. X., Dai, Z. M., Brookes, P. C., & Xu, J. (2019). Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China. *Environmental Pollution*, 252, 846–855.
- Hilber, I., Bastos, A. C., Loureiro, S., Soja, G., Marsz, A., Cornelissen, G., & Bucheli, T. D. (2017). The different faces of biochar: Contamination risk versus remediation tool. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25, 86–104.
- Jia, Y. M., Hu, Z. Y., Ba, Y. X., & Qi, W. F. (2021). Application of biochar-coated urea-controlled loss of fertilizer nitrogen and increased nitrogen use efficiency. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8, 3.
- Jiang, Y. H., Li, T., Xu, X. R., Sun, J. F., Pan, G. X., & Cheng, K. (2024). A global assessment of the long-term effects of biochar application on crop yield. *Current Research in Environmental Sustainability*, 7, 100247.
- Joseph, S., Kammann, C. I., Shepherd, J. G., Conte, P., Schmidt, H. P., Hagemann, N., Rich, A. M., Marjo, C. E., Allen, J., Munroe, P., et al. (2018). Microstructural and associated chemical changes during the composting of a high temperature biochar: Mechanisms for nitrate, phosphate and other nutrient retention and release. *Science of the Total Environment*, 618, 1210–1223.
- Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z., & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13, 1731–1764.
- Kavitha, B., Reddy, P. V. L., Kim, B., Lee, S. S., Pandey, S. K., & Kim, K. H. (2018). Benefits and limitations of biochar amendment in agricultural soils: A review. *Journal of Environmental Management*, 227, 146–154.

Khan, Z., Yang, X. J., Fu, Y. Q., Joseph, S., Khan, M. N., Khan, M. A., Alam, I., & Shen, H. (2023). Engineered biochar improves nitrogen use efficiency via stabilizing soil water-stable macroaggregates and enhancing nitrogen transformation. *Biochar*, 5, 52.

Khajavi-Shojaei, S., Moezzi, A., Norouzi Masir, M., & Taghavi, M. (2023). Synthesis of modified biochar-based slow-release nitrogen fertilizer increases nitrogen use efficiency and corn (*Zea mays* L.) growth. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 593–601.

Kizito, S., Luo, H. Z., Lu, J. X., Bah, H., Dong, R. J., & Wu, S. B. (2019). Role of nutrient-enriched biochar as a soil amendment during maize growth: Exploring practical alternatives to recycle agricultural residuals and to reduce chemical fertilizer demand. *Sustainability*, 11, 3211.

Lee, J. Y., Kang, Y. G., Kim, J. H., Taek-Keun, O., & Yun, Y. U. (2023). Effects of nutrient-coated biochar amendments on the growth and elemental composition of leafy vegetables. *Korean Journal of Agricultural Science*, 50, 967–976.

Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 1812–1836.

Li, J., Xie, N. Y., Feng, C. C., Wang, C. Q., Huang, R., Tao, Q., Tang, X. Y., Wu, Y. J., Luo, Y. L., Li, Q. Q., et al. (2024). Pore size and organic carbon of biochar limit the carbon sequestration potential of *Bacillus cereus* SR. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 274, 116229.

Lin, G. Y., Wang, Y. Y., Wu, X. D., Meng, J., Ok, Y. S., & Wang, C. H. (2025). Enhancing agricultural productivity with biochar: Evaluating feedstock and quality standards. *Bioresource Technology Reports*, 29, 102059.

Liu, L., Zhang, X. Y., Xu, W., Liu, X. J., Li, Y., Wei, J., Wang, Z., & Lu, X. H. (2020). Ammonia volatilization as the major nitrogen loss pathway in dryland agro-ecosystems. *Environmental Pollution*, 265, 114862.

Liu, N., Zhou, C. J., Fu, S. F., Ashraf, M. I., Zhao, E. F., Shi, H., Han, X. R., & Hong, Z. B. (2013). Study on characteristics of ammonium nitrogen adsorption by biochar prepared in different temperature. *ICEEP*, 724–725, 452–456.

Lu, J., Li, Y., Cai, Y., Jiang, P., & Yu, B. (2023). Co-incorporation of hydrotalcite and starch into biochar-based fertilizers for the synthesis of slow-release fertilizers with improved water retention. *Biochar*, 5, 44.

Lu, J., Wu, M. Q., Luo, L. P., Lu, R. H., Zhu, J., Li, Y. F., Cai, Y. J., Xiang, H., Song, C. F., & Yu, B. (2025). Incorporating iron oxide nanoparticles in polyvinyl alcohol/starch hydrogel membrane with biochar for enhanced slow-release properties of compound fertilizers. *Carbohydrate Polymers*, 348, 122834.

Luyima, D., Lee, J. H., Sung, J., & Oh, T. K. (2020). Co-pyrolised animal manure and bone meal-based urea hydrogen peroxide (UHP) fertilisers are an effective technique of combating ammonia emissions. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, 1887–1898.

Masek, O., Buss, W., Brownsort, P., Rovere, M., Tagliaferro, A., Zhao, L., Cao, X. D., & Xu, G. W. (2019). Potassium doping increases biochar carbon sequestration potential by 45%, facilitating decoupling of carbon sequestration from soil improvement. *Scientific Reports*, 9, 5514.

Nagaraju, K., Prasad, T., Chari, M. S., Ramu, Y. R., Murthy, B. R., Naidu, M. V. S., Leelavathy, G. P., Mohan, P. R., Damu, A. G., & Gopal, D. (2024). Effects of soil application of nanobiochar-based nitrogen and potassium fertilizers on the growth and yield of groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24, 5759–5771.

Ndoung, O. C. N., de Figueiredo, C. C., & Ramos, M. L. G. (2021). A scoping review on biochar-based fertilizers: Enrichment techniques and agro-environmental application. *Heliyon*, 7, e08473.

- Ndoun, O. C. N., de Souza, L. R., Fachini, J., Leão, T. P., Sandri, D., & de Figueiredo, C. C. (2023). Dynamics of potassium released from sewage sludge biochar fertilizers in soil. *Journal of Environmental Management*, 346, 119057.
- Nepal, J., Ahmad, W., Munsif, F., Khan, A., & Zou, Z. Y. (2023). Advances and prospects of biochar in improving soil fertility, biochemical quality, and environmental applications. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 14752.
- Nguyen, T. T. N., Wallace, H. M., Xu, C. Y., Van Zwieten, L., Weng, Z. H., Xu, Z. H., Che, R. X., Tahmasbian, I., Hu, H. W., & Bai, S. H. (2018). The effects of short term, long term and reapplication of biochar on soil bacteria. *Science of the Total Environment*, 636, 142–151.
- Nguyen, V., Sharma, P., Rowinski, L., Le, H. C., Le, D. T. N., Osman, S. M., Le, H. S., Truong, T. H., Nguyen, P. Q. P., & Cao, D. N. (2024). Biochar-based catalysts derived from biomass waste: Production, characterization, and application for liquid biofuel synthesis. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 18, 594–616.
- Ni, P., Wang, S., Liu, B., & Sun, H. (2023). Effects of organic manure and biochar-based fertilizer application on soil water and salt transport in brackish water irrigated soil profile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23, 3120–3136.
- Osman, A. I., Zhang, Y., Lai, Z. Y., Ahmed, A. T., Ahmed, M., Farghali, M., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2023). Machine learning and computational chemistry to improve biochar fertilizers: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21, 3159–3244.
- Palansooriya, K. N., Dissanayake, P. D., El-Naggar, A., Gayesha, E., Wijesekara, H., Krishnamoorthy, N., Cai, Y. J., & Chang, S. X. (2025). Biochar-based controlled-release fertilizers for enhancing plant growth and environmental sustainability: A review. *Biology and Fertility of Soils*, 61, 701–715.
- Piash, M. I., Iwabuchi, K., & Itoh, T. (2022). Synthesizing biochar-based fertilizer with sustained phosphorus and potassium release: Co-pyrolysis of nutrient-rich chicken manure and Ca-bentonite. *Science of the Total Environment*, 822, 153509.
- Piri, M., & Sepehr, E. (2023). Struvite/biochar composites as recovered phosphorus fertilizers from domestic sewage sludge increased biomass and nutrient uptake of maize. *Journal of Plant Nutrition*, 1–14.
- Puga, A. P., Grutmacher, P., Cerri, C. E. P., Ribellino, V. S., & de Andrade, C. A. (2020). Biochar-based nitrogen fertilizers: Greenhouse gas emissions, use efficiency, and maize yield in tropical soils. *Science of the Total Environment*, 704, 135375.
- Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y. F., & Kim, K. H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environmental International*, 125, 365–385.
- Ramos, N. C., Bulatao, R. M., Pascual, K. S., Monserate, J. J., Diaz, J. M. A., & Abon, J. E. O. (2022). Synthesis and characterization of rice straw derived nanoscale biochar-based fertilizer infused with nutrients. *Key Engineering Materials*, 6352, 107–115.
- Rasuli, F., Owliaie, H., Najafi-Ghiri, M., & Adhami, E. (2022). Effect of biochar on potassium fractions and plant-available P, Fe, Zn, Mn and Cu concentrations of calcareous soils. *Arid Land Research and Management*, 36, 1–26.
- Rudra, A., Petersen, H. I., & Sanei, H. (2024). Molecular characterization of biochar and the relation to carbon permanence. *International Journal of Coal Geology*, 291, 104565.
- Roy, A., Pyne, S., & Chaturvedi, S. (2021). Effect of enriched biochar-based fertilizers on growth, yield and nitrogen use efficiency in direct-seeded rice (*Oryza sativa*). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 91, 459–463.
- Samoraj, M., Mironiuk, M., Witek-Krowiak, A., Izydorczyk, G., Skrzypczak, D., Mikula, K., Basladyńska, S., Moustakas, K., & Chojnacka, K. (2022). Biochar in environmentally friendly fertilizers—Prospects of development products and technologies. *Chemosphere*, 296, 133975.

- Santos, M. G. B., Paiva, A. B., Viana, R. S. R., Jindo, K., & Figueiredo, C. C. (2025). Biochar as a feedstock for sustainable fertilizers: Recent advances and perspectives. *Agriculture*, 15, 894.
- Seow, Y. X., Tan, Y. H., Mubarak, N. M., Kansedo, J., Khalid, M., Ibrahim, M. L., & Ghasemi, M. (2022). A review on biochar production from different biomass wastes by recent carbonization technologies and its sustainable applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10, 107017.
- Shaviv, A. (2005). Controlled release fertilizers. *Advances in Agronomy*, 88, 1–49.
- Sharma, A., Kumar, R., Singh, P., Verma, S., & Gupta, N. (2024). Biochar: A sustainable soil conditioner for improving soil health, crop production and environment under changing climate: A review. *Frontiers in Soil Science*, 4, 1376159.
- Sheikh, L., Naz, N., Oranab, S., Younis, U., Alarfaj, A. A., Alharbi, S. A., & Ansari, M. J. (2025). Minimization of cadmium toxicity and improvement in growth and biochemical attributes of spinach by using acidified biochar. *Scientific Reports*, 15, 5880.
- Shetty, R., & Prakash, N. B. (2020). Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity. *Scientific Reports*, 10, 12249.
- Sim, D. H. H., Tan, I. A. W., Lim, L. L. P., & Hameed, B. H. (2021). Encapsulated biochar-based sustained release fertilizer for precision agriculture: A review. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127018.
- Singh, H., Northup, B. K., Rice, C. W., & Prasad, P. V. V. (2022). Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: A meta-analysis. *Biochar*, 4, 8.
- Song, S. N., Jiyun, W., Min, K. S., Hwa-Soo, L., & Eui-Chan, J. (2021). Characteristics of N₂O emissions from urea fertilizer application to cabbage fields. *Journal of Climate Change Research*, 12, 515–522.
- Sultan, H., Li, Y. S., Ahmed, W., Yixue, M., Shah, A. S., Faizan, M., Ahmad, A., Abbas, H. M. M., Nie, L. X., & Khan, M. N. (2024). Biochar and nano biochar: Enhancing salt resilience in plants and soil while mitigating greenhouse gas emissions: A comprehensive review. *Journal of Environmental Management*, 355, 120448.
- Ullah, A., Ren, W. L., Tian, P., & Yu, X. Z. (2024). Biochar as a green strategy in alleviating Cd mobility in soil and uptake in plants: A step towards Cd-free food. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 190, 105787.
- Uwingabire, S., Chamshamba, S. A. O., Nduwamungu, J., & Nyberg, G. (2024). French bean production as influenced by biochar and biochar blended manure application in two agro-ecological zones of Rwanda. *Agronomy*, 14, 2020.
- Villada, E., Velasquez, M., Gomez, A. M., Correa, J. D., Saldarriaga, J. F., Lopez, J. E., & Tamayo, A. (2024). Combining anaerobic digestion slurry and different biochars to develop a biochar-based slow-release NPK fertilizer. *Science of the Total Environment*, 927, 171982.
- Wali, F., Naveed, M., Bashir, M. A., Asif, M., Ahmad, Z., Alkahtani, J., Alwahibi, M. S., & Elshikh, M. S. (2020). Formulation of biochar-based phosphorus fertilizer and its impact on both soil properties and chickpea growth performance. *Sustainability*, 12, 9528.
- Wan, Y. A., Liu, J., Zhuang, Z., Wang, Q., Li, H. F., & Henriquez-Hernandez, L. A. (2024). Heavy metals in agricultural soils: Sources, influencing factors, and remediation strategies. *Toxics*, 12, 63.
- Wang, C. Q., Luo, D., Zhang, X., Huang, R., Cao, Y. J., Liu, G. G., Zhang, Y. S., & Wang, H. (2022). Biochar-based slow-release fertilizers for sustainable agriculture: A mini review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 10, 100167.
- Wang, C., Luo, D., Zhang, X., Li, J., & Chen, W. (2022). Biochar and engineered biochar as slow- and controlled-release fertilizers. *Journal of Cleaner Production*, 339, 130685.

- Wang, D., Chen, J. H., Tang, Z. Y., & Zhang, Y. H. (2024). Effects of soil physical properties on soil infiltration in forest ecosystems of Southeast China. *Forests*, 15, 1470.
- Wang, F. L., Yan, T. Z., Zong, H. Y., Li, S. J., Liu, J., Liu, Y., & Hou, X. S. (2020). Long-term fertilization influencing agricultural diffuse heavy metal pollution and its environmental threat to a coastal city, Qingdao, East China. *Fresenius Environmental Bulletin*, 29, 5390–5398.
- Wang, J., Sun, L. J., Sun, Y. F., Yang, S. Y., Qin, Q., & Xue, Y. (2025). Integrated enzyme activities and untargeted metabolome to reveal the mechanism that allow long-term biochar-based fertilizer substitution improves soil quality and maize yield. *Environmental Research*, 270, 120935.
- Wang, K. A., Hou, J. J., Zhang, S. D., Hu, W. J., Yi, G. W., Chen, W. J., Cheng, L., & Zhang, Q. Z. (2023). Preparation of a new biochar-based microbial fertilizer: Nutrient release patterns and synergistic mechanisms to improve soil fertility. *Science of the Total Environment*, 860, 160478.
- Wang, X. R., Wang, B., Gu, W. R., & Li, J. (2023). Effects of carbon-based fertilizer on soil physical and chemical properties, soil enzyme activity and soil microorganism of maize in Northeast China. *Agronomy*, 13, 877.
- Wen, P., Wu, Z. S., Han, Y. J., Cravotto, G., Wang, J., & Ye, B. C. (2017). Microwave-assisted synthesis of a novel biochar-based slow-release nitrogen fertilizer with enhanced water-retention capacity. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5, 7374–7382.
- Wen, X. L., Wu, Y. C., Xu, J. J., Zhou, Y. C., Jia, L. Y., & Yuan, B. H. (2024). A facile strategy for improving the hydrophobicity and photo-thermal conversion capability of biochar and its application in the absorption of hazardous chemicals and viscous oil. *Materials Letters*, 360, 136009.
- Wu, D., Feng, Z. B., Gu, W. Q., Wang, Y. N., Liu, Z. F., Wang, W. J., Zhang, Y. X., Zhang, W. M., & Chen, W. F. (2023). Could continuous rice cropping increase soil fertility and rice productivity by rice straw carbonized utilization in cold areas? A 6-year field-located trial. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 110674–110686.
- Xia, F., Zhang, Z., Zhang, Q., Huang, H. C., & Zhao, X. H. (2024). Life cycle assessment of greenhouse gas emissions for various feedstocks-based biochars as soil amendment. *Science of the Total Environment*, 911, 168734.
- Xiao, L. A., Lin, Y., Chen, D. L., Zhao, K. B., Wang, Y. D., You, Z. T., Zhao, R. Q., Xie, Z. X., & Liu, J. G. (2024). Maximizing crop yield and water productivity through biochar application: A global synthesis of field experiments. *Agricultural Water Management*, 305, 109134.
- Xing, L. Q., Niu, X. Y., Yin, X. W., Duan, Z. H., Liu, A. J., Ma, Y. F., & Gao, P. L. (2025). Optimizing biochar concentration for mitigating nutrient losses in runoff: An investigation into soil quality improvement and non-point source pollution reduction. *Agriculture*, 15, 45.
- Xu, M. Z., Luo, F., Tu, F., Rukh, G., Ye, Z. Q., Ruan, Z. Q., & Liu, D. (2022). Effects of stabilizing materials on soil Cd bioavailability, uptake, transport, and rice growth. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 35960.
- Yan, S., Wang, P., Cai, X. J., Wang, C. L., Van Zwieten, L., Wang, H. L., Yin, Q. Y., Liu, G. S., & Ren, T. B. (2025). Biochar-based fertilizer enhanced tobacco yield and quality by improving soil quality and soil microbial community. *Environmental Technology & Innovation*, 37, 103964.
- Yan, T. T., Xue, J. H., Zhou, Z. D., & Wu, Y. B. (2021). Biochar-based fertilizer amendments improve the soil microbial community structure in a karst mountainous area. *Science of the Total Environment*, 794, 148757.
- Yan, T. T., Xue, J. H., Zhou, Z. D., & Wu, Y. B. (2021). Impacts of biochar-based fertilization on soil arbuscular mycorrhizal fungal community structure in a karst mountainous area. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 66420–66434.

Yin, D. W., Yang, X. Y., Wang, H. Z., Guo, X. H., Wang, S. Q., Wang, Z. H., Ding, G. H., Yang, G., Zhang, J. N., & Jin, L., et al. (2022). Effects of chemical-based fertilizer replacement with biochar-based fertilizer on albic soil nutrient content and maize yield. *Open Life Sciences*, 17, 517–528.

Yin, X. H., Chen, J. N., Cao, F. B., Tao, Z., & Huang, M. (2020). Short-term application of biochar improves post-heading crop growth but reduces pre-heading biomass translocation in rice. *Plant Production Science*, 23, 522–528.

Yuan, M., Bi, Y. D., Han, D. W., Wang, L., Wang, L. X., Fan, C., Zhang, D., Wang, Z., Liang, W. W., & Zhu, Z. J., et al. (2022). Long-term corn-soybean rotation and soil fertilization: Impacts on yield and agronomic traits. *Agronomy*, 12, 2554.

Zhang, X., Liu, Y., Wang, H., Li, J., Chen, Z., & Zhao, Q. (2025). Biochar-based fertilizers: Advancements, applications, and future directions in sustainable agriculture—A review. *Agronomy*, 15, 1104.

Zhang, H. W., Xing, L. B., Liang, H. X., Liu, S. Z., Ding, W., Zhang, J. G., & Xu, C. Y. (2023). Preparation and characterization of biochar-based slow-release nitrogen fertilizer and its effect on maize growth. *Industrial Crops and Products*, 203, 117227.

Zhang, J. N., Ge, L. A., Yang, Y. X., Zhang, X. X., Wang, C., Sun, H. F., Chen, H. H., Huang, J., & Zhou, S. (2024). Production and subsequent application of different biochar-based organic fertilizers to enhance vegetable quality and soil carbon stability. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25, 147–159.

Zhang, M., Guo, J., Liu, Y., & Qin, S. (2021). Effects of different biochar-based fertilizers on the biological properties and economic benefits of pod pepper (*Capsicum annuum* var. *frutescens* L.). *Applied Ecology and Environmental Research*, 19, 2829–2841.

Zhang, M., Liu, Y. L., Wei, Q. Q., Liu, L. L., Gu, X. F., & Gou, J. L. (2022). Biochar-based fertilizer enhances the production capacity and economic benefit of open-field eggplant in the karst region of Southwest China. *Agriculture*, 12, 1388.

Zhang, P. Z., Chang, F. L., Huo, L. L., Yao, Z. L., & Luo, J. (2025). Impacts of biochar pyrolysis temperature, particle size, and application rate on water retention of loess in the semiarid region. *Water*, 17, 69.

Zhao, H., Xie, T. T., Xiao, H. J., & Gao, M. (2022). Biochar-based fertilizer improved crop yields and N utilization efficiency in a maize–Chinese cabbage rotation system. *Agriculture*, 12, 1030.

Zheng, J. F., Han, J. M., Liu, Z. W., Xia, W. B., Zhang, X. H., Li, L. Q., Liu, X. Y., Bian, R. J., Cheng, K., Zheng, J. W., et al. (2017). Biochar compound fertilizer increases nitrogen productivity and economic benefits but decreases carbon emission of maize production. *Agricultural Ecosystems & Environment*, 241, 70–78.

Zheng, J. L., Wang, S. J., Wang, R. M., Chen, Y. L., Siddique, K. H. M., Xia, G. M., & Chi, D. C. (2021). Ameliorative roles of biochar-based fertilizer on morpho-physiological traits, nutrient uptake and yield in peanut (*Arachis hypogaea* L.) under water stress. *Agricultural Water Management*, 257, 107129.

Zhou, Z. D., Gao, T., Zhu, Q., Yan, T. T., Li, D. C., Xue, J. H., & Wu, Y. B. (2019). Increases in bacterial community network complexity induced by biochar-based fertilizer amendments to karst calcareous soil. *Geoderma*, 337, 691–700.

Zong, Y. T., Liu, Y. J., Li, Y. Q., Ma, R. H., Malik, Z., Xiao, Q., Li, Z. C., Zhang, J., & Shan, S. D. (2023). Changes in salinity, aggregates and physico-mechanical quality induced by biochar application to coastal soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69, 2721–2738.