



A Review on the Role of Biochar in Improving Soil Quality and Plant Performance

Elham Danaee^{1✉}, Sophia Soroori²

1- Department of Horticulture, Ga.C., Islamic Azad University, Garmsar, Iran

2- Department of Horticultural, AK.C., Islamic Azad University, Aliabad katoul, Iran

Email: dr.edanaee@iau.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Review Article</p> <p>Article history:</p> <p>Received: Aug. 11, 2025</p> <p>Revised: Aug 31, 2025</p> <p>Accepted: Aug 28, 2025</p> <p>Published: Autumn, 2025</p> <p>Keywords:</p> <p>Carbon sequestration, Environment, Nutrients, Pyrolysis.</p>	<p>Soil fertility and plant nutrition, based on the principles of ecological agriculture, are among the key factors in improving plant growth and performance. The increasing volume of agricultural and industrial residues and their improper disposal have led to various environmental consequences. In recent years, the efficient use of these residues to reduce pollution and improve soil quality has attracted significant attention. Biochar, as an innovative and sustainable technology, is the product of biomass pyrolysis under low-oxygen conditions, characterized by a porous structure and enriched with stable carbon. Incorporating biochar into soil can enhance its physical, chemical, and biological properties, improve water and nutrient retention capacity, and supply essential elements for plant growth, thereby increasing crop productivity. Moreover, biochar plays an important role in agricultural waste management, greenhouse gas mitigation, and long-term carbon sequestration, and may contribute to the control of certain plant pests and diseases through altering the soil microbiome. This review article is based on a library research method and the analysis of reliable scientific resources (peer-reviewed articles, books, and technical reports published in international databases). In this study, the research background was first reviewed, and then the findings of previous studies on the effects of biochar on soil properties, plant growth, pest and disease control, and waste management were collected and analyzed. The findings indicate that the effects of biochar depend on feedstock type, pyrolysis conditions, soil texture and pH, and plant species. In some cases, biochar application may reduce the availability of certain micronutrients or cause nutritional imbalances. Therefore, determining the optimal application conditions and conducting further research in this field are essential.</p>
<p>Cite this article: Danaee, E., & Soroori, S. (2025), A Review on the Role of Biochar in Improving Soil Quality and Plant Performance, <i>Soil and Sustainable Development</i>, 1 (2), 207-234.</p> <p>DOI: https://doi.org/10.22034/ssd.2025.540457.1040 © The Author(s). Publisher: The University of Jiroft Press</p>	

مروری بر نقش بیوچار در بهبود کیفیت خاک و افزایش عملکرد گیاهان

الهام دانائی^۱، سوفیا سروری

۱- گروه علوم باغبانی، واحد گرمسار، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمسار، ایران. ایمیل: dr.edanace@iau.ac.ir

۲- گروه علوم باغبانی، واحد علی آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آباد کتول، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مروری تاریخ دریافت: ۲۰ مرداد ۱۴۰۴ تاریخ بازنگری: ۰۹ شهریور ۱۴۰۴ تاریخ پذیرش: ۰۶ آبان ۱۴۰۴ تاریخ انتشار: پاییز ۱۴۰۴	حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه، بر اساس اصول کشاورزی اکولوژیک، از عوامل کلیدی در بهبود رشد و عملکرد گیاهان هستند. افزایش حجم ضایعات ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و دفع نامناسب آن‌ها، پیامدهای زیست‌محیطی متعددی به همراه دارد. در سال‌های اخیر، استفاده بهینه از این ضایعات برای کاهش آلودگی و بهبود کیفیت خاک مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. بیوچار به‌عنوان یک فناوری نوین و پایدار، محصول پیرولیز زیست‌توده در شرایط کم‌اکسیژن است که دارای ساختار متخلخل و غنی از کربن پایدار می‌باشد. افزودن بیوچار به خاک می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را بهبود بخشیده، ظرفیت نگهداری آب و مواد غذایی را افزایش دهد و از طریق تأمین عناصر ضروری رشد گیاه، عملکرد محصول را ارتقا بخشد. علاوه بر این، بیوچار نقش مهمی در مدیریت پسماندهای کشاورزی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ترسیب بلندمدت کربن دارد و می‌تواند با تغییر میکروبیوم خاک در کنترل برخی آفات و بیماری‌های گیاهی مؤثر باشد. این مقاله مروری براساس روش کتابخانه‌ای و بررسی منابع علمی معتبر (مقالات پژوهشی، کتاب‌ها و گزارش‌های علمی منتشر شده در پایگاه‌های داده بین‌المللی) تهیه شده است. در این مطالعه، ابتدا پیشینه تحقیق مرور گردید، سپس یافته‌های پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه تأثیر بیوچار بر خصوصیات خاک، رشد گیاه، کنترل بیماری‌ها و مدیریت پسماندها گردآوری و تحلیل شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که اثرات بیوچار وابسته به نوع ماده اولیه، شرایط پیرولیز، بافت و pH خاک و نوع گیاه است و در برخی موارد ممکن است کاهش فراهمی برخی ریزمغذی‌ها یا ایجاد عدم تعادل غذایی را به دنبال داشته باشد. بنابراین، تعیین شرایط بهینه مصرف بیوچار و انجام مطالعات بیشتر در این زمینه ضروری است.

واژه‌های کلیدی:

ترسیب کربن،
پیرولیز،
عناصر غذایی،
محیط زیست.

ارجاع به مقاله: دانائی، الهام، سروری، سوفیا، (۱۴۰۴)، مروری بر نقش بیوچار در بهبود کیفیت خاک و افزایش عملکرد گیاهان، مجله خاک و توسعه پایدار، ۱ (۲)، ۲۰۷-۲۳۴.

© نویسندگان، ناشر: انتشارات دانشگاه جیرفت

DOI: <https://doi.org/10.22034/ssd.2025.540457.1040>

مقدمه

در دهه‌های اخیر، با افزایش نگرانی‌های جهانی نسبت به پیامدهای تغییرات اقلیمی، تخریب منابع خاک و بحران‌های زیست محیطی ناشی از فعالیت‌های انسانی، تحقیقات پیرامون یافتن راهکارهای پایدار جهت بهبود کیفیت خاک و کاهش گازهای گلخانه‌ای شدت یافته است (Lehmann and Joseph, 2015). از سویی دیگر تولید پایدار محصولات کشاورزی به‌عنوان یکی از نیازهای اساسی بشر، همواره دغدغه محققان و بهره‌برداران بخش کشاورزی بوده است و دستیابی به روش‌هایی جهت افزایش عملکرد در واحد سطح بدون آسیب به محیط زیست، در اولویت مطالعات قرار دارد (افراشته و کولیوند، ۱۴۰۰).

در این راستا، بیوچار به‌عنوان یکی از گزینه‌های نویدبخش در مدیریت پسماند زیستی، اصلاح خاک و تثبیت کربن مورد توجه گسترده قرار گرفته است (عظیم‌زاده، ۱۴۰۲). نخستین مزیت استفاده از بیوچار، افزایش ماده آلی خاک است. به دلیل پایداری بالای بیوچار در برابر تجزیه میکروبی، این ماده قابلیت ماندگاری طولانی‌مدت در خاک را دارد و به این ترتیب می‌تواند سطح ماده آلی را افزایش داده و ساختمان خاک را بهبود بخشد (Ernest et al., 2024).

تولید بیوچار از پسماندهای کشاورزی و صنعتی، راهکاری مؤثر برای مدیریت اصولی این ضایعات و کاهش آثار منفی زیست محیطی به شمار می‌رود. به‌ویژه در شرایطی که حجم تولید پسماندها به‌صورت روزافزون در حال افزایش است، تبدیل این مواد به بیوچار می‌تواند علاوه بر کاهش آلودگی، مزایای قابل توجهی برای خاک و گیاه فراهم آورد (خادم و همکاران، ۱۳۹۶).

کاربرد بیوچار نه‌تنها در بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک مؤثر است، بلکه موجب کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی، تقویت مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی و ارتقاء کیفیت محصولات کشاورزی به‌ویژه در نظام‌های تولید ارگانیک می‌گردد، همچنین استفاده از بیوچار می‌تواند به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و مقابله با اثرات نامطلوب تغییر اقلیم کمک کند (خادم و همکاران، ۱۳۹۶؛ افراشته و کولیوند، ۱۴۰۰).

با این حال، بهره‌برداری مؤثر و هدفمند از بیوچار، نیازمند درک جامع‌تری از روش‌های تولید، ویژگی‌های ساختاری، شیمیایی و تأثیرات آن بر محیط زیست و عملکرد گیاهان است. از این‌رو، مقاله حاضر با هدف مرور مفاهیم پایه، تاریخچه،

فرآیند تولید و کاربردهای مرتبط با بیوچار تدوین شده است تا بستری برای تحقیقات آینده و به‌کارگیری عملی آن در مدیریت پایدار منابع فراهم گردد.

تاریخچه بیوچار

استفاده از مواد کربنی برای بهبود ویژگی‌های خاک، پیشینه‌ای طولانی در تاریخ کشاورزی دارد. یکی از مهم‌ترین شواهد تاریخی در این زمینه، کشف خاک‌های سیاه بسیار حاصلخیز در منطقه آمازون، موسوم به تراپرتا^۱ است که توجه جامعه علمی را در اواخر قرن نوزدهم به خود جلب کرد. این خاک‌ها که اولین بار توسط چارلز هارت در سال ۱۸۷۴ میلادی گزارش شدند، حاوی مقادیر زیادی زغال، استخوان، خرده سفال و مواد آلی بودند و عمر آن‌ها به بیش از ۲۵۰۰ سال می‌رسد (Glaser & Birk, 2012).

در دهه ۱۹۶۰، دکتر ویم سومبروک، خاک‌شناس هلندی، نشان داد که دلیل اصلی حاصلخیزی استثنایی این خاک‌ها، وجود زغال افزوده‌شده توسط انسان است. از آن زمان، مطالعات بیشتری در مورد خواص فیزیکی و شیمیایی بیوچار آغاز شد و به تدریج این ماده به‌عنوان یک گزینه علمی در اصلاح خاک و مدیریت کربن شناخته شد. شواهدی از استفاده تاریخی از زغال در کشاورزی در سایر نقاط جهان نیز وجود دارد. برای مثال، در ژاپن، از سال ۱۶۹۷ میلادی از ذغال حاصل از شالی برنج برای بهبود خاک‌های زراعی و باغی استفاده می‌شده است (Ogawa & Okimori, 2010).

در دوران معاصر، توجه گسترده جهانی به بیوچار از اوایل قرن ۲۱ آغاز شد. تأسیس نهادهایی مانند ابتکار بین‌المللی بیوچار (International Biochar Initiative - IBI) در سال ۲۰۰۶، نقش مهمی در استانداردسازی، توسعه فناوری، ترویج پژوهش و برقراری ارتباط بین دانشمندان، کشاورزان و سیاست‌گذاران ایفا کرد (Lehmann & Joseph, 2015). هم‌زمان، پژوهش‌ها نشان دادند که بیوچار نه تنها در بهبود کیفیت خاک مؤثر است، بلکه از ظرفیت بالایی برای تثبیت کربن و کاهش گازهای گلخانه‌ای برخوردار است. این ویژگی‌ها موجب شد که بیوچار به یکی از موضوعات کلیدی در پژوهش‌های مرتبط با کشاورزی کربن‌منفی و مدیریت اقلیم تبدیل شود. در نتیجه، از اواخر دهه ۲۰۰۰، بیوچار به‌طور گسترده به‌عنوان یک راهکار بالقوه برای ذخیره‌سازی بلندمدت کربن در خاک مطرح شد (Ogawa & Okimori, 2010).

مطالعات باستان‌شناسی انجام شده در برخی مناطق اروپا نیز شواهدی از کاربرد غیرمستقیم زغال در خاک‌های کشاورزی سنتی ارائه داده‌اند، هرچند این شواهد به لحاظ سیستماتیک با خاک‌های تراپرتای منطقه آمازون قابل قیاس نیستند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که آگاهی از تأثیر مثبت زغال بر خاک، به‌شکلی مستقل در فرهنگ‌های مختلف انسانی شکل گرفته است. به‌این ترتیب، بیوچار از یک پدیده بومی تاریخی، به یک ابزار مدرن و میان‌رشته‌ای برای کشاورزی پایدار، مدیریت پسماند و کاهش تغییرات اقلیمی تبدیل شده است (Woolf et al., 2010).

بیوچار چیست؟

بیوچار یک ماده جامد کربنی است که نام آن از ترکیب دو واژه‌ی بیومس^۲ به‌معنای زیست‌توده و چارکول^۳ به‌معنای زغال مشتق شده است. این ماده ترکیبی غنی از کربن است که از پیرولیز طیف وسیعی از زیست‌توده‌های آلی، از جمله بقایای گیاهی، مواد چوبی، کود دامی و سایر پسماندهای زیستی تولید می‌شود (افراشته و کولیوند، ۱۴۰۱).

فرآیند تولید بیوچار که به آن گرماکافت (پیرولیز) گفته می‌شود، شامل تجزیه حرارتی زیست‌توده در شرایط کم‌اکسیژن و در دماهای معمولاً کمتر از ۷۰۰ درجه سلسیوس است. این فرآیند مشابه همان روشی است که برای تولید زغال چوب سنتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. زغال و بیوچار از نظر ماهیت ماده تفاوتی با یکدیگر ندارند، بلکه تفاوت آن‌ها در نحوه استفاده و کاربرد آن‌هاست؛ زغال معمولاً برای سوخت استفاده می‌شود، در حالی که زمانی که از همین ماده پیرولیز شده در کاربردهای غیرسوختی مانند اصلاح خاک، تثبیت کربن، بهبود کیفیت آب یا کاربردهای صنعتی استفاده گردد، آن را بیوچار می‌نامند (Lehmann & Joseph, 2015).

ساختار و ترکیبات بیوچار

به‌دلیل تنوع در ترکیب زیست‌توده‌های اولیه مورد استفاده، ساختار دقیق بیوچار به‌صورت یکنواخت قابل تعریف نیست. با این حال، ساختار کلی بیوچار شامل دو بخش، صفحات گرافنی^۴ بلورین، که به‌صورت لایه‌ای روی یکدیگر قرار گرفته‌اند و ساختارهای آمورف (غیربلورین)، که متشکل از حلقه‌های آروماتیک تصادفی هستند، می‌باشد. صفحات گرافنی آمورف دارای سطح ویژه بالایی هستند که قابلیت جذب گسترده‌ی مولکول‌های آلی (قطبی و غیرقطبی) و یون‌های معدنی را فراهم می‌آورند. این ویژگی، بیوچار را به ماده‌ای بسیار فعال از نظر شیمی سطح تبدیل کرده است (Amonette &

2 Biomass

3 Charcoal

4 Graphene-like

(Joseph, 2009). سطح بیوچار غنی از گروه‌های عاملی متنوعی نظیر هیدروکسیل (OH-)، کربوکسیل (COOH-)، کتون (C=O)، آلدئید (CHO-)، استر (COOR-)، آمینو (NH₂-) و نیترو (NO₂-) است. این گروه‌های عاملی موجب می‌شوند که سطح بیوچار از نظر شیمیایی ناهمگن بوده و خواصی چون آب‌دوستی، آب‌گریزی، اسیدی یا بازی بودن را در شرایط مختلف از خود نشان دهد. در نتیجه، بیوچار تولنایی واکنش با طیف گسترده‌ای از ترکیبات آلی و معدنی موجود در محلول خاک را داراست (Amonette & Joseph, 2009).

ترکیب دقیق بیوچار بسته به نوع زیست‌توده و شرایط پیرولیز، متغیر است اما از نظر ترکیب کلی، بیوچار شامل کربن پایدار، مواد فرار، خاکستر (مواد معدنی) و میزان متغیری از رطوبت است. در جدول ۱ میزان ترکیبات اصلی بیوچار ذکر شده است. سهم عمده‌ی ترکیب بیوچار را کربن تشکیل می‌دهد. همچنین مواد فرار شامل ترکیباتی از کربن، هیدروژن و اکسیژن نیز ممکن است به صورت گاز یا اجزای محلول در خاک آزاد شوند (Varkolu et al., 2025).

جدول ۱- دامنه و میانگین برخی ویژگی‌های بیوچار (عظیم زاده و نجفی، ۱۳۹۶)

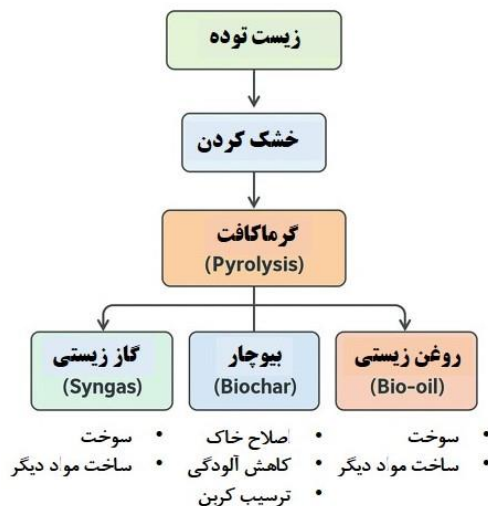
	pH	نیتروژن کل (g/kg)	فسفر کل (g/kg)	پتاسیم کل (g/kg)	C/N	کربن تثبیت شده (درصد)	ترکیبات فرار (درصد)	آب (درصد)	خاکستر (درصد)
دامنه	۴ تا ۱۲	۱/۷ تا ۷/۸	۰/۲ تا ۰/۳	۱ تا ۵۸	۷ تا ۵۰	۵۰ تا ۹۰	۰ تا ۴۰	۱ تا ۱۵	۵ تا ۰/۵
میانگین	۸	۲۲/۳	۲۳/۷	۲۴/۳	۶۱	۷۰	۲۰	۷/۵	۲/۵

تولید بیوچار

تبدیل زیست‌توده به بیوچار، از طریق یک فرآیند حرارتی - شیمیایی خاص انجام می‌گیرد که شامل سه مرحله‌ی اصلی، پیرولیز^۵، کربنیزاسیون^۶ و در موارد خاص، گازسازی^۷ می‌باشد. در این فرآیند، زیست‌توده تحت شرایط کنترل‌شده‌ی دما و در غیاب یا کمبود شدید اکسیژن، دچار تجزیه حرارتی می‌شود. در مرحله‌ی پیرولیز، پیوندهای شیمیایی موجود در مواد آلی شکسته شده و گازها و مواد مایع فرار آزاد می‌شوند. به‌طور هم‌زمان، در مرحله‌ی کربنیزاسیون، اتم‌های کربن آزاد شده به تدریج به ساختاری پایدار، جامد و آروماتیک تبدیل می‌شوند که نتیجه‌ی آن تولید ماده‌ی جامد، سیاه‌رنگ، سبک

5 Pyrolysis
6 Carbonization
7 Gasification

و غنی از کربن به نام بیوچار است و خروجی‌های دیگر این فرآیند گازهای زیستی شامل ترکیباتی مانند منوکسید کربن، دی اکسید کربن، متان و روغن زیستی به‌عنوان محصول مایع است (افراشته و کولیوند، ۱۴۰۰) (شکل ۱).



شکل ۱- مراحل اصلی فرآیند گرماکافت بقایای آلی و کاربردهای مواد حاصل از گرماکافت (عظیم‌زاده و نجفی، ۱۳۹۶)

پیرولیز خود به انواع مختلفی تقسیم می‌شود که از آن میان پیرولیز آهسته برای تولید بیشینه بیوچار مناسب‌تر است. در این روش، نرخ گرمادهی معمولاً کمتر از ۱۰ درجه در دقیقه و زمان ماند طولانی‌تری (چندین دقیقه تا ساعت) اعمال می‌شود. در مقابل، پیرولیز سریع با نرخ گرمادهی بالاتر از ۱۰۰ درجه در ثانیه و زمان ماند کوتاه (چند ثانیه) بیشتر برای تولید بیوروغن استفاده می‌شود و میزان تولید بیوچار در آن کمتر است (Lehmann & Joseph, 2015).

پیرولیز و کربنیزاسیون معمولاً به‌صورت هم‌زمان یا متوالی در راکتورهای حرارتی انجام می‌شوند و تأثیر مستقیم بر خواص فیزیکی، شیمیایی و زیست محیطی بیوچار نهایی دارند. بسته به ویژگی‌های بیوچار، مقدار توصیه شده توسط مؤسسه بین‌المللی بیوچار ۵ تا ۵۰ تن در هکتار است (Jirka & Tomlinson, 2015). عوامل متعددی از جمله نوع ماده اولیه، رطوبت اولیه، اندازه ذرات، سرعت گرمادهی، دمای اوج گرماکافت و مدت زمان گرماکافت بر عملکرد بیوچار تأثیر مستقیم دارند. هر نوع ماده اولیه‌ای را می‌شود به بیوچار تبدیل کرد اما عملکرد و کیفیت بیوچار تولید شده بسیار وابسته به ماده اولیه و روش پیرولیز است. متداول‌ترین مواد خام برای تولید بیوچار بقایای کشاورزی و جنگل‌ها، جلبک‌ها، لجن فاضلاب و ضایعات دام و طیور است (افراشته و کولیوند، ۱۴۰۱).

دمای معمول برای پیرولیز در محدوده‌ی ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس است. بیوچار تولیدشده در دماهای پایین‌تر دارای گروه‌های عاملی اکسیژنه‌ی بیشتر (مانند کربوکسیل و فنولیک) و سطح ویژه‌ی پایین‌تری است، که آن را برای کاربردهای جذب و اصلاح خاک مناسب می‌سازد (Tomczyk et al., 2020). بین تخلخل و سطح ویژه بیوچار رابطه مستقیم وجود دارد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش دمای گرماکافت، انواع ترکیبات آلی از ساختار بیوچار خارج شده و فضاهای خالی متعددی درون آن ایجاد می‌شود. این فرآیند منجر به افزایش تخلخل و در نتیجه افزایش سطح ویژه بیوچار در دماهای بالای گرماکافت می‌گردد. در حالی که دماهای پایین ممکن است موجب خروج نا کامل ترکیبات آلی شده و با انسداد منافذ داخلی بیوچار، تخلخل و سطح ویژه آن را کاهش دهند. با این حال، افزایش دما تا حدود ۷۰۰ درجه سلسیوس معمولاً با افزایش تخلخل همراه است، اما در دماهای بالاتر از این حد، به دلیل فروریزش یا تخریب ساختاری منافذ، تخلخل و سطح ویژه کاهش می‌یابد (عظیم زاده و نجفی، ۱۳۹۵). در نتیجه بیوچار تولیدشده در دماهای بالا، دارای پایداری بیشتر و ساختار آروماتیک متراکم‌تری است (Tomczyk et al., 2020). همچنین توزیع اندازه منافذ بیوچار به میزان لیگنین و سلولز زیست‌توده بستگی دارد (عظیم زاده و نجفی، ۱۳۹۵).

پژوهش‌های متعددی در خصوص اثر دمای پیرولیز بر کیفیت بیوچار انجام شده است، برای نمونه تحقیقات محمودیان چپلو و همکاران (۱۳۹۹) نشان داد، با افزایش دمای پیرولیز، اسیدیته و شوری بیوچار تولید شده افزایش یافت در حالیکه درصد عملکرد و میزان کربن آلی آن کاهش یافته است (محمودیان چپلو و همکاران، ۱۳۹۹). در پژوهشی دیگر نتایج نشان داد، بیوچارهای تولید شده در دمای زیاد پیرولیز (بیش از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) مقدار کربن و حجم منافذ بیشتری در مقایسه با بیوچارهای تولید شده در دمای کم (کمتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) دارد و نسبت H/C و مقدار نیتروژن در دماهای زیاد کاهش یافته است، اما میزان اسیدیته، سطح ویژه و مقدار خاکستر، بدون در نظر گرفتن مواد اولیه افزایش یافته است (Li et al., 2023). سمپارن و همکاران (۲۰۲۰) نیز تأثیر شرایط فرایند پیرولیز را بر خواص بیوچار حاصل از بقایای کشاورزی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، با افزایش دمای پیرولیز، میزان بیوچار تولید شده کاهش می‌یابد، اما مقادیر مختلف کربن، هدایت الکتریکی، مواد معدنی (آهن، کلسیم، منیزیم، پتاسیم، فسفر، نیتروژن) و pH افزایش می‌یابد (Somparn et al., 2020).

تأثیر بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

کاربرد بیوچار تأثیرات قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به افزایش تخلخل و تهویه خاک، بهبود ظرفیت نگهداری آب، افزایش سطح ویژه و کاهش فرسایش خاک اشاره کرد (عظیم زاده، ۱۴۰۲)، پس از افزودن بیوچار به خاک، بیوچار تحت تأثیر عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی دچار هوادیدگی شده و به ذرات ریزتری مانند ذرات سیلت یا کوچک‌تر تجزیه می‌شود. این فرآیند توزیع اندازه ذرات خاک را تغییر داده و می‌تواند خصوصیات فیزیکی خاک را دگرگون سازد (Wang et al., 2016). همچنین بیوچار از طریق افزایش اندازه و تعداد منافذ خاک، ظرفیت نگهداری آب را بالا برده و موجب افزایش نفوذپذیری خاک، جذب آب در ناحیه ریشه و کاهش آبشویی عناصر غذایی می‌شود، با این حال در بلندمدت و بسته به نوع بیوچار و مدت زمان حضور آن در خاک، تبدیل سریع آن به ذرات ریز ممکن است باعث کاهش نفوذپذیری خاک شود (عظیم زاده، ۱۴۰۲). مطالعات لال و موخرجه (۲۰۱۳) نشان دادند که اثر بیوچار بر رطوبت خاک وابسته به نوع بیوچار و بافت خاک است، به طوری که در برخی خاک‌های شنی تغییر محسوسی در ظرفیت نگهداری آب مشاهده نشد (Mukherjee and Lal, 2013). این نتایج متناقض بیانگر آن است که پاسخ خاک‌های مختلف به کاربرد بیوچار یکسان نیست و باید شرایط محلی در نظر گرفته شود. مطالعه السامان و همکاران (۲۰۲۵)، نشان داد که افزودن بیوچار به خاک‌های شور باعث افزایش دامنه آبیاری مؤثر می‌شود و ظرفیت نگهداری آب قابل استفاده گیاه را به طور معنی‌داری افزایش می‌دهد (Elsaman et al., 2025). پژوهش‌های متعددی بر افزایش پایداری خاکدانه‌ها، افزایش ضریب نفوذپذیری و بهبود منحنی رطوبتی خاک در اثر کاربرد بیوچار تأکید داشته‌اند (عظیم‌زاده و نجفی، ۱۳۹۵؛ خادم و همکاران، ۱۳۹۶). در پژوهشی افزودن بیوچار تازه (۱-۲ درصد وزنی) موجب کاهش چگالی ظاهری، افزایش تخلخل کل و ظرفیت نگهداری آب اشباع شد (Zanutel et al., 2023). نتایج لبران و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد بیوچار حاصل از کود گاوی موجب افزایش آب قابل دسترس گیاه و کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک شنی شد (Lebrun et al., 2024). همچنین، کاربرد بیوچار اکالیپتوس باعث افزایش ۰/۸ درصدی آب قابل دسترس گیاه به ازای هر تن مصرف بیوچار در خاک لوم شنی گردید (De Melo Carvalho et al, 2014). تیرگر سلطانی و همکاران (۱۴۰۱) نیز با افزودن بیوچار چوبی (تولیدشده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد) به خاک لوم شنی تحت تنش رطوبتی، نشان دادند که بیوچار با افزایش هدایت هیدرولیکی غیر اشباع و پتانسیل جریان ماتریک خاک موجب بهبود

شاخص برداشت گیاه در شرایط تنش خشکی شده و کارایی مصرف آب بیش از ۴۰ درصد افزایش داده است. در مطالعه‌ای دیگر هرات و همکاران (۲۰۱۳) گزارش نمودند که کاربرد بیوچار ذرت موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش پایداری خاکدانه‌ها شد (Herath et al., 2013). همچنین پژوهش ما و همکاران (۲۰۱۶)، نشان داد که استفاده سه ساله از بیوچار موجب افزایش پایداری خاکدانه و ظرفیت نگهداری آب قابل استفاده گیاه گردیده است (Ma et al., 2016). علاوه بر اثرات ذکرشده، یکی از مکانیسم‌های مهم در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک با کاربرد بیوچار، افزایش پایداری ساختار خاک در برابر تراکم است. بیوچار با افزایش مقاومت خاک به فشردگی، می‌تواند ساختار خاک را در برابر اثرات مکانیکی ناشی از تردد ماشین‌آلات کشاورزی یا بارندگی‌های شدید محافظت کند. پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده‌اند که افزودن بیوچار باعث کاهش مقاومت مخروطی در لایه‌های زیرین خاک و در نتیجه کاهش خطر ایجاد لایه سخت و فشردگی در عمق خاک می‌شود (Busscher et al., 2010). همچنین بیوچار با بهبود شاخص‌های کیفی خاک مانند شاخص پایداری خاکدانه‌ها و میانگین قطر وزنی خاکدانه‌ها، پایداری فیزیکی خاک را در بلندمدت ارتقاء می‌دهد که این امر در حفظ بهره‌وری خاک در سیستم‌های کشاورزی پایدار اهمیت دارد (Blanco-Canqui, 2017).

تأثیر بیوچار بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

افزودن بیوچار به‌عنوان یک ماده اصلاحی، ویژگی‌های شیمیایی خاک از جمله افزایش بازهای تبادلی، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی^۸ و افزایش قابلیت دسترسی به عناصر غذایی مانند پتاسیم، فسفر، روی، منگنز، کلسیم و منیزیم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و به دلیل سطح ویژه و بار منفی بالا، دارای ظرفیت بالای تبادل کاتیونی بوده و توانایی جذب و نگهداری ترکیبات آلی و معدنی را افزایش می‌دهد (Zhu et al., 2025). بیوچار حاوی ترکیبات آروماتیک فراوانی است که با گذشت زمان پس از ورود به خاک، موجب افزایش بار منفی سطحی و ظرفیت تبادل کاتیونی می‌شود. بیوچار تازه افزوده‌شده ممکن است در ابتدا ظرفیت تبادل آنیونی از خود نشان دهد، در حالی که بیوچار مسن تر (در pH بالاتر از ۳) بیشتر ظرفیت تبادل کاتیونی خواهد داشت. تغییرات و پایداری بیوچار در خاک، تحت تأثیر میزان رطوبت نیز قرار دارد؛ به طوری که رطوبت می‌تواند فرآیند معدنی شدن و تصاعد کربن را تحت شرایط مختلف خاک تغییر دهد (عظیم‌زاده، ۱۴۰۲).

نقش بیوچار در فراهمی عناصر غذایی خاک، به نوع زیست‌توده اولیه آن وابسته است، زیرا میزان عناصر موجود در گیاهان مختلف متفاوت بوده و همین موضوع ترکیب شیمیایی بیوچار را تحت تأثیر قرار می‌دهد (عظیم‌زاده، ۱۴۰۲). معمولاً بیوچارهای چوبی دارای خاکستر کمتری نسبت به بیوچارهای علفی هستند که بیانگر غلظت بالاتر عناصر غذایی در گیاهان علفی است. بیوچار علفی، به‌ویژه در دمای بالای گرماکافت، دارای مقادیر بیشتری از فسفر، کلسیم، پتاسیم، سدیم و منیزیم است (Wang et al., 2018). با این حال تمام این عناصر ممکن است به‌طور مستقیم برای گیاه قابل استفاده نباشند (عظیم‌زاده، ۱۴۰۲). مطالعات انجام شده نشان داده است که بیوچار منبع مستقیمی برای عناصر پتاسیم، کلسیم، فسفر، روی و مس بوده و از طریق افزایش ظرفیت کاتیونی، تغییر pH خاک و تأمین مستقیم عناصر، موجب بهبود فراهمی آن‌ها می‌شود (Zhu et al., 2025). در مواردی که بیوچار به‌تنهایی استفاده می‌شود، ممکن است، نیتروژن غیرمتحرک شود، به‌ویژه اگر نسبت C/N آن بسیار بالا (بیش از ۴۰۰) باشد، که می‌تواند منجر به کاهش عملکرد گیاه گردد. هرچند، با گذشت زمان، فراهمی عناصری مانند فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم افزایش می‌یابد. در حالیکه برخی مطالعات نیز هیچ‌گونه کاهش در نیتروژن خاک را پس از کاربرد بیوچار گزارش نکرده‌اند (Liu et al., 2017).

اثر بیوچار شدیداً وابسته به محیط و دوز است، در برخی ترکیب‌ها و میزان‌های نامناسب، کاهش عملکرد گیاه نیز مشاهده شده که نشان می‌دهد پاسخ به بیوچار متغیر و گاهی غیرقابل پیش‌بینی است (Jeffery et al., 2011; Biederman & Harpole, 2013). بایدمن و هارپول (۲۰۱۳) گزارش نمودند در برخی موارد کاربرد بیوچار باعث کاهش فراهمی ریزمغذی‌هایی مانند آهن و روی می‌شود (Biederman & Harpole, 2013). در پژوهشی دیگر کاربرد بیوچار شاخ و برگ درختان جنگلی موجب افزایش فسفر، نیتروژن و پتاسیم خاک شد (توراج‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲). همچنین کاربرد بیوچارهای تولید شده در دماهای پایین در خاک‌های آهکی، می‌تواند فراهمی فسفر و ریزمغذی‌ها را افزایش دهد (Karimi et al., 2020). بررسی‌های عباس‌پور و همکاران (۱۳۹۶) نشان داد، افزودن بیوچار پوست درخت گردو به خاک بر اسیدیته خاک مؤثر نبود ولی هدایت الکتریکی و درصد اشباع خاک تحت تأثیر بیوچار قرار گرفت.

با توجه به وجود عناصر قلیایی مانند کلسیم و منیزیم، pH بیوچار معمولاً در بازه خنثی تا قلیایی قرار دارد؛ اما بسته به نوع ماده اولیه و شرایط گرماکافت، می‌تواند بین ۴ تا ۱۲ متغیر باشد. بیوچارهای چوبی معمولاً pH کمتری نسبت به

بیوچارهای علفی دارند که به دلیل محتوای قلیایی بالاتر گیاهان علفی است (ماله میرچگینی و همکاران، ۱۳۹۹). ظرفیت بیوچار در افزایش pH خاک به نوع زیست توده اولیه و شرایط گرماکافت بستگی دارد (خادم و همکاران، ۱۳۹۶). در پژوهشی، افزودن بیوچار برگ کنار و آتریپلکس موجب افزایش معنی دار pH خاک شد (نجفی قیری و همکاران، ۱۳۹۷). با این حال، در خاک‌های آهکی و قلیایی، کاربرد بیوچار نیازمند بررسی دقیق تری است (عظیم زاده، ۱۴۰۲). بیوچار می‌تواند با افزایش pH خاک در مواقعی سبب کاهش فراهمی برخی ریزمغذی‌های حساس به pH مانند آهن و منگنز شود (Marschner, 2012). برای مثال در پژوهشی افزایش میزان بیوچار در خاک، به دلیل داشتن pH بالا (بیش از ۹) موجب افزایش pH خاک شد. این افزایش pH موجب کاهش فراهمی عناصر مس، روی، آهن و منگنز در محلول خاک گردید (Sorrenti et al., 2016). در پژوهشی دیگر افزودن بیوچار حاصل از بقایای ذرت و گندم به خاک‌های آهکی، باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، هدایت الکتریکی، pH و فراهمی عناصر غذایی مانند فسفر، پتاسیم، آهن، روی، منگنز و مس می‌شود (Rasuli et al., 2022). در مطالعه‌ای دیگر، حسن پور و همکاران (۱۴۰۱) گزارش کردند که افزودن دو نوع بیوچار اسیدی (بیوچار تولید شده از مخروط کاج و شلتوک برنج) به خاک آهکی، به طور جزئی موجب کاهش pH خاک و افزایش هدایت الکتریکی آن شد. همچنین افزایش معنی داری در میزان کربن آلی، نیتروژن کل، منگنز قابل جذب و در اغلب تیمارها فسفر، پتاسیم، آهن، روی و مس مشاهده شد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، کاربرد بیوچار باگاس نیشکر منجر به کاهش pH خاک و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی کل و غلظت قابل جذب عناصر غذایی شد (صرخه و همکاران، ۱۴۰۳).

امروزه، اصلاح بیوچار با اسیدهای آلی و معدنی، یکی از راهکارهای مؤثر برای افزایش سطح ویژه، اندازه منافذ، ظرفیت تبادل کاتیونی و بهبود گروه‌های عاملی بیوچار است. این روش موجب افزایش فعالیت میکروبی خاک و فراهمی فسفر و عناصر کم‌مصرف می‌شود (Yu et al., 2019). در پژوهشی، بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک (مشتمل شده از باگاس نیشکر) در بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک و تغذیه گیاه مؤثر بود (صرخه و همکاران، ۱۴۰۳). همچنین لیو و همکاران (۲۰۱۸)، اثر مثبت اسیدهای معدنی مانند فسفریک، کلریدریک و سولفوریک را در افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی گزارش کرده است (Liu et al., 2018). در پژوهشی دیگر، بیوچار کاه گندم اصلاح شده با اسید سیتریک موجب افزایش فسفر قابل دسترس در خاک شد (Mihoub et al., 2022).

بیوچار، تغییرات اقلیمی و ترسیب کربن

بیوچار یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش تغییرات اقلیمی است، زیرا باعث ترسیب بلند مدت کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود (Woolf et al., 2018). سالانه حجم بسیار زیادی از پسماندهای کشاورزی و ضایعات آلی صنایع وابسته به کشاورزی در جهان تولید می‌شود که اغلب سوزانده می‌شوند که سوزاندن این بقایا مقادیر قابل توجهی گاز دی‌اکسید کربن^۹ را وارد اتمسفر می‌کند؛ درحالی‌که با تبدیل این پسماندها به بیوچار و افزودن آن به خاک، می‌توان کربن اتمسفر را در خاک ذخیره کرد (عظیم‌زاده و نجفی، ۱۳۹۶). پایداری بالای بیوچار در خاک و مقاومت نسبت به تجزیه زیستی از ویژگی‌های برجسته بیوچار است. به‌دلیل این خاصیت، بیوچار می‌تواند برای صدها تا هزاران سال در خاک باقی بماند و از این طریق به‌عنوان مخزن پایداری برای کربن عمل کند. این موضوع، بیوچار را به گزینه‌ای مؤثر در کاهش گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسید کربن، متان^{۱۰} و دی‌نیتروژن مونواکسید^{۱۱} تبدیل کرده است (Lehmann & Joseph, 2015).

آزاد شدن گاز متان از شالیزارها، دی‌اکسید کربن از سوزاندن بقایای کشاورزی و دی‌نیتروژن مونواکسید در اثر مصرف کودهای نیتروژن مثالی از انتشار گازهای گلخانه‌ای مربوط به بخش کشاورزی است. بیوچار با کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک، افزایش هوای خاک و غیرمتحرک کردن نیتروژن در ساختار ملکول‌های آلی، موجب کاهش انتشار گاز دی‌نیتروژن مونواکسید از خاک می‌شود. همچنین بیوچار به علت ساختار متخلخل و تغییرات pH خاک با افزایش میکروبی‌های اکسیدکننده متان از انتشار گاز متان از شالیزار جلوگیری می‌کند (عظیم‌زاده و نجفی، ۱۳۹۶).

در فرآیند تولید بیوچار گاز و انرژی حرارتی تولید می‌شود که می‌توانند جایگزین بخشی از سوخت‌های فسیلی شود و از این طریق انتشار غیر مستقیم، دی‌اکسید کربن را نیز کاهش دهد در نتیجه این اثرات باعث شده است که بیوچار به کاهش خالص گازهای گلخانه‌ای در مقیاس جهانی کمک کند (Woolf et al., 2018).

برآوردهای جهانی نشان می‌دهند که پتانسیل کاهش خالص گازهای گلخانه‌ای توسط بیوچار بین ۰/۰۳ تا ۱۱ پتاگرم معادل دی‌اکسید کربن در سال متغیر است که به نوع زیست‌توده، فناوری تولید و مدیریت چرخه عمر بیوچار بستگی دارد

9 CO₂
10 CH₄
11 N₂O

(Weng & Cowie, 2025). در مطالعه‌ای جیو و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد، که خاک‌های اصلاح شده با بیوچار علاوه بر نگهداری کربن آلی می‌توانند دی‌اکسید کربن را از هوا جذب کرده و به‌صورت کربنات معدنی تثبیت کنند (Gui et al., 2025). این اثر به‌ویژه در حضور یون‌های کلسیم یا منیزیم موجود در بیوچار بیشتر است و نشان‌دهنده پتانسیل واقعی بیوچار برای ترسیب کربن مستقیم از جو است. ترکیب این ویژگی‌ها یعنی ترسیب پایدار کربن، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و جذب مستقیم دی‌اکسید کربن از هوا بیوچار را به یک ابزار مؤثر در کاهش اثرات تغییرات اقلیمی تبدیل کرده است (Weng & Cowie, 2025).

بیوچار به عنوان راهکاری برای مدیریت پسماندهای کشاورزی

استفاده از مواد آلی مانند بیوچار یکی از روش‌های مناسب برای کاهش آلودگی محیط زیست و بهبود خاک است. تولید بیوچار از بقایای زراعی مانند کاه گندم، ذرت، شلتوک برنج، تفاله نیشکر، شاخه‌های هرس شده درختان و سایر پسماندهای گیاهی نه تنها به کاهش ضایعات کمک می‌کند بلکه جایگزینی مناسب برای سوزاندن زیست‌توده‌ها در فضای آزاد است. سوزاندن مستقیم زیست‌توده، خاکستری فقیر از ماده آلی تولید می‌کند که برخلاف بیوچار، تأثیر مثبتی بر خاک ندارد. در حالی که بیوچار، خاکی غنی از کربن به همراه عناصری چون کلسیم، منیزیم و کربن غیرآلی بر جای می‌گذارد (ابریشم‌کش و همکاران، ۱۳۹۹).

از منظر مدیریت پسماند، بیوچار موجب کاهش حجم و وزن ضایعات کشاورزی شده و از دفن یا رهاسازی آن‌ها در محیط جلوگیری می‌کند (Shackley et al., 2011). این فرآیند راهکاری برای استفاده بهینه از پسماندهای زیستی و بازگرداندن آن‌ها به چرخه تولید است. تولید بیوچار نمونه‌ای روشن از اقتصاد چرخشی است، زیرا بقایای گیاهی و دامی را به محصولی ارزشمند برای بهبود خاک، جذب آلاینده‌ها یا حتی ماده خام در صنایع تبدیل می‌کند (Lehmann & Joseph, 2015). همچنین تحقیقات جدید نشان داده‌اند که تبدیل انواع پسماند از جمله ضایعات کشاورزی و حتی پسماند انسانی به بیوچار می‌تواند تا ۹۰ درصد حجم و وزن مواد زائد را کاهش دهد و مدیریت آن‌ها را کارآمدتر سازد (Castro-Herrera et al., 2023). بنابراین، بیوچار نه تنها از هدررفت منابع جلوگیری می‌کند، بلکه یک گزینه عملی برای مدیریت پایدار پسماندهای کشاورزی و شهری محسوب می‌شود.

توانایی بیوچار در حذف فلزات سنگین و آلاینده‌ها

بیوچار به عنوان جاذب فلزات سنگین موجب بهبود کیفیت آب و خاک‌های آلوده می‌شود. ساختار متخلخل، گروه‌های فعال سطحی و pH بالای بیوچار باعث می‌شود که توان بالایی در جذب فلزات سنگینی مانند مس، سرب و کادمیم از محلول‌های آبی و خاک آلوده داشته باشد. سطح ویژه زیاد بیوچار، فضای لازم برای تجمع کاتیون‌ها و آنیون‌ها و پیوند آن‌ها با عناصر و فلزات خاک را فراهم کرده و ظرفیت حفظ مواد غذایی را بهبود می‌دهد (Lie et al., 2014). خصوصیات جذبی بیوچار به ماده اولیه آن بستگی دارد، بیوچارهای تهیه شده از مواد چوبی (چوب‌های جنگلی، پوسته آجیل و غیره) با ساختار توسعه‌یافته خوب، تنها جاذب فیزیکی در سطوح داشته و فلزات را با واکنش‌های ضعیفی جذب می‌کنند در مقابل در بیوچارهایی با ساختمان توسعه‌یافته ضعیف (ساقه انگور، کلش گندم، سبوس برنج و غیره) فلزات اغلب به صورت ترکیبی از تبادل کاتیونی و کلاته شدن فلزی با گروه‌های عاملی کربوکسیل در سطح بیوچار و در درون ساختمان آن جذب می‌شوند؛ بنابراین کارایی جذب بیوچار بیشتر شده و اغلب تعاملات فلزی بسیار قوی در مقایسه با جذب فیزیکی دارند (Trakal et al., 2014). پژوهش‌های زیادی ظرفیت جذب این فلزات توسط بیوچار را گزارش کرده‌اند. به‌عنوان مثال، پارک و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که بیوچار ساقه کنجد می‌تواند ظرفیت‌های جذب برای سرب، کادمیم، کروم، مس و روی فراهم کند (Park et al., 2016). همچنین، بوستانی و عسگری (۱۳۹۹) نشان دادند کاربرد بیوچار کاه گندم و ذرت می‌تولند به عنوان یک جاذب مؤثر در جذب روی از محلول‌های آبی است. در مطالعات دیگری نیز استفاده از زغال فعال حاصل از برگ نخل، قابلیت بالای جذب سرب را اثبات کرده است (Hikmat et al., 2014). همچنین حمزه‌نژاد و همکاران (۱۳۹۹) گزارش نمودند که بیوچار بقایای هرس انگور، جاذبی مؤثر و قابل دسترس برای جذب سرب از منابع آبی آلوده و پساب است. کاربرد بیوچار سبوس برنج با حذف بخشی از کادمیم قابل دسترس از خاک و تثبیت کادمیم در ساختار خود، سبب رشد بهتر گیاه و افزایش تعداد و وزن میوه گوجه فرنگی گردید (جمیلی و همکاران، ۱۴۰۱). نتایج ولی‌زاده قلعه بیگ و همکاران نیز (۱۳۹۸ و ۱۳۹۹)، نشان داد، مصرف بیوچار گلایل و رز به دلیل داشتن سطح ویژه بالا، سرب و کادمیم را در سطح خود جذب کرد و سبب کاهش جذب این دو عنصر و بهبود صفات مورفولوژیک در کاهو گردید (ولی‌زاده قلعه بیگ و همکاران (۱۳۹۹ و ۱۳۹۸)). در پژوهشی دیگر جلالی و همکاران (۱۴۰۰)، کاربرد بیوچار درختان جنگلی در گیاه سورگوم موجب جذب سرب در خاک آلوده گردید (جلالی و همکاران،

۱۴۰۰). در گیاه ماشک گل خوشه‌ای نیز کاربرد بیوچار موجب کاهش جذب سرب و روی در اندام هوایی این گیاه گردید (جم و همکاران، ۱۴۰۳). بررسی‌های حمامی و همکاران (۱۴۰۲) نشان داد، غلظت بالای نیترات در منابع آب، اغلب به دلیل تخلیه مستقیم نیترات موجود در کودها و آلودگی ناشی از فاضلاب و پساب‌ها است که کاربرد بیوچار ضایعات شاخه ناشی از برداشت زرشک می‌تواند سبب کاهش آبشویی نیترات و خطر انتقال آلودگی به سایر نقاط خاک شود (حمامی و همکاران، ۱۴۰۲).

علاوه بر نقش مثبت بیوچار در جذب فلزات سنگین، در مواردی که زیست‌توده اولیه یا فرایند پیرولیز به‌درستی کنترل نشده باشد، بیوچار ممکن است خود حامل آلاینده‌هایی مثل فلزات سنگین یا ترکیبات آلی مخاطره‌آمیز باشد یا بر حرکت آن‌ها در خاک تأثیر نامطلوب بگذارد، برای مثال، تغییرات پیچیده در تحرک برخی آلاینده‌ها پس از اصلاح با بیوچار گزارش شده است برخی انواع بیوچار به‌ویژه آن‌هایی که در دمای پایین پیرولیز می‌شوند، می‌توانند موجب افزایش انحلال و تحرک فلزات سنگین مانند کادمیم و روی شوند. تفاوت در نوع خاک، ویژگی‌های بیوچار (مانند سطح ویژه، محتوای خاکستر و گروه‌های عاملی سطحی) و شرایط محیطی می‌تواند منجر به نتایج متناقض در زمینه پایداری و فراهمی فلزات سنگین شود (Beesley et al., 2010). این نکات نشان می‌دهند که برای بهره‌برداری پایدار از مزایای بیوچار، باید انتخاب زیست‌توده مناسب، شرایط پیرولیز، دوز و سازگاری با نوع خاک و گیاه به‌دقت مدنظر قرار گیرد.

تأثیر بیوچار بر جانداران خاک و زیست‌سازگاری آن

افزودن بیوچار به خاک موجب بهبود فعالیت میکروبی خاک می‌شود. بیوچار با ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا و توانایی جذب ترکیبات آلی و معدنی، محیط مناسبی برای استقرار و رشد میکروارگانیسم‌های مفید خاک مانند باکتری‌ها، قارچ‌های میکوریزا و اکتینومیسیت‌ها فراهم می‌کند ساختار متخلخل و سطح ویژه بالای بیوچار، زیستگاهی مطلوب برای میکروارگانیسم‌ها ایجاد کرده و با افزایش کربن آلی محلول، رشد و تکثیر آن‌ها را تسهیل می‌کند. این تغییرات منجر به افزایش تنوع و تراکم جمعیت‌های میکروبی و در نتیجه بهبود فرآیندهای زیستی در خاک می‌گردد (Lehmann et al., 2012). افزایش pH خاک‌های اسیدی به کمک بیوچار منجر به بهبود احتباس مواد مغذی و رشد فعالیت‌های زیستی خاک می‌شود (Sohi et al., 2010). همچنین بیوچار موجب افزایش فعالیت آنزیمی نظیر فسفاتاز شود که دلیل آن مربوط به نقش آن در افزایش دسترسی میکروارگانیسم‌ها به مواد غذایی و افزایش ترشحات ریشه‌ای است (واحدی و همکاران،

۱۳۹۸). بیوجار فعالیت آنزیم‌های کلیدی مانند دهیدروژناز، فسفاتاز، اوره‌آز و بتا-گلوکوزیداز را تحریک می‌کند که این آنزیم‌ها در چرخه‌های زیستی خاک و آزادسازی عناصر غذایی همچون نیتروژن، فسفر و کربن نقش اساسی دارند (Jiang et al., 2021). به عنوان مثال، افزایش فعالیت دهیدروژناز نشان‌دهنده تقویت متابولیسم میکروبی و افزایش فعالیت فسفاتاز و اوره‌آز نشان‌دهنده بهبود معدنی‌سازی فسفر و نیتروژن در خاک تحت تیمار بیوجار است (Jien & Wang, 2013). بیوجار به صورت غیر مستقیم و از طریق تأثیر بر ویژگی‌های خاک مانند افزایش pH خاک‌های اسیدی و عناصر غذایی، بر کرم‌های خاکی و ریزجلنداران اثر بگذارد. در حالیکه افزودن بیوجار قلیایی در مقادیر زیاد اثرات نامطلوبی بر ریز جانداران و کرم‌های خاکی دارد (عظیم زاده و نجفی، ۱۳۹۵). در پژوهشی حیدری و همکاران (۲۰۲۳) برهم‌کنش مثبت بیوجار تولید شده از بقایای داروآش با باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) را گزارش کردند این تعامل در ریزوسفر نهال‌های بلوط سبب افزایش کارایی جذب آب و مقاومت به کم‌آبی شد (Heydari et al., 2023). نتایج سویدی و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد، کاربرد بیوجار کود مرغی موجب افزایش کربن زی‌توده میکروبی خاک شدند (Subedi et al., 2016). واحدی و همکاران (۱۳۹۸) نیز بهبود خواص بیولوژیکی خاک را با کاربرد بیوجار (ضایعات هرس سیب و انگور) در شرایط تلقیح میکروبی (قارچ مایکوریزا آربسکولار و PGPR) گزارش نمودند. همچنین کاربرد بیوجار حاصل از بریده‌های علفی مراتع نیز اثرات مثبتی بر جمعیت جانداران خاک و جوامع گیاهی نشان دادند (Jeffery et al., 2022). در مطالعه‌ای دیگر پیرامون اثر بیوجار حاصل از زیست توده‌های گیاهی بر تنوع و فراوانی مورچه‌ها نتایج نشان داد، بیوجار منجر به افزایش pH و فراوانی گونه‌های بومی گردید و مورفولوژی (لندازه بدن، چشم‌ها و پاها) را در برخی گونه‌ها تغییر داد که نشان دهنده تطابق با محیط تعدیل شده است (Liu et al., 2024). کوماری و همکاران (۲۰۲۴)، نیز اثر محافظتی بیوجار کاه برنج را بر کرم خاکی در برابر آفت‌کش کلروفیفوس مورد بررسی قرار دادند، نتایج نشان داد کاربرد بیوجار به‌طور قابل توجهی مرگ و میر کرم‌های خاکی را از طریق حفظ فعالیت آنتی‌اکسیدانی و کاهش استرس اکسیداتیو کاهش داد (Kumari et al., 2024). با این حال، برخی ترکیب‌های آلی چسبیده به سطوح بیوجار بر ریزجانداران خاک اثرات سمی بر ریزجانداران خاک دارد. پس از گرماکافت ممکن است ترکیبات آلی مختلفی شامل پیرولیگنوز اسید، خاکستر، روغن زیستی و مواد فرار در سطح بیوجار باقی بماند. ترکیبات قابل حل در آب مانند اسیدها، الکل، آلدئید، کتون و قندها توسط ریزجانداران متابولیزه می‌شوند و اثرات مثبتی بر آن‌ها دارد اما ترکیباتی مانند هیدروکربن‌های آروماتیک چند

حلقه‌ای، زایلنوز^{۱۲}، اکرولین^{۱۳}، فرمالدئید^{۱۴}، کرسلوز^{۱۵} و سایر ترکیبات کربوکسیلی سمی که بسته به شرایط گرماکافت ممکن است از طریق بیوچار به خاک اضافه شود ممکن است اثرات ضد باکتری و قارچی داشته باشد (عظیم‌زاده و نجفی، ۱۳۹۵).

تأثیر بیوچار بر کنترل بیماری‌های گیاهی و آفات

بیوچار می‌تواند بر میکروبیوم خاک تأثیر بگذارد و از طریق تقویت سیستم دفاعی گیاه، القای دفاع سیستمیک، کاهش عوامل بیماری‌زا، و کنترل نماتدها و آفات، در کاهش بیماری‌های گیاهی مؤثر باشد (افراشته و کولیوند، ۱۴۰۰). مکانیسم‌های اصلی کنترل بیماری توسط بیوچار شامل تأمین عناصر غذایی، جذب سموم، تحریک تولید آنتی‌بیوتیک‌ها، تغییر در ترشحات ریشه و القای سیستم دفاعی گیاه از طریق میکروارگانیسم‌های مفید است (Bonanomi et al., 2015). علاوه بر مکانیسم‌های شناخته‌شده، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که بیوچار می‌تواند با تحریک آنزیم‌های دفاعی گیاه مانند پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز، کاهش جوانه‌زنی اسپور قارچ‌های خاک‌زاد و محدود کردن انتقال بیماری‌های ویروسی توسط حشرات ناقل، نقش مهمی در کاهش بیماری‌های گیاهی ایفا کند. همچنین ترکیب بیوچار با عوامل کنترل زیستی نظیر *Bacillus* و *Trichoderma* موجب افزایش پایداری و اثرگذاری این میکروارگانیسم‌ها در سرکوب بیماری‌ها می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که بیوچار نه تنها در اصلاح خاک، بلکه به‌عنوان یک ابزار مکمل در مدیریت تلفیقی بیماری‌ها و آفات نیز اهمیت ویژه‌ای دارد (Graber et al., 2014; Wu et al., 2019). علاوه بر مکانیسم‌های ذکرشده، شواهد تجربی فرنکل و همکاران (۲۰۱۷) نشان می‌دهند که بیوچار می‌تواند با فعال کردن پاسخ‌های دفاعی سیستمیک در گیاه (ISR) و SAR، تغییر جامعه میکروبی مفید و مهار مستقیم عوامل بیماری‌زا (از طریق جذب و غیرفعال‌سازی آنزیم‌ها و متابولیت‌های سمی)، بیماری‌های گیاهی را سرکوب کند (Frenkel et al., 2017). در پژوهشی بر روی گوجه‌فرنگی، ترکیب بیوچار با باکتری مفید *Bacillus subtilis* منجر به القای مقاومت سیستمیک علیه بیماری لکه زنگ (*Alternaria solani*) شد و بیان ژن‌های دفاعی مرتبط با مسیرهای سالیسیلیک و جاسمونات/اتیلن افزایش یافت (Rasool et al., 2021). همچنین مطالعه‌ای دیگر نشان داد که بیوچار می‌تواند آنزیم‌های تخریب‌کننده دیواره سلولی و متابولیت‌های

سمی تولیدشده توسط پاتوژن‌های خاک‌زاد را جذب و غیرفعال کند، که این مکانیسم به سرکوب قابل توجه بیماری‌های ریشه‌ای کمک می‌کند (Jaiswal et al., 2018). بیوچار با حذف یا غیرفعال‌سازی فاکتورهای آسیب‌زا و هم‌زمان بهبود شرایط خاک (مانند pH و ساختار) می‌تواند به‌طور مؤثری بیماری‌های خاک‌زاد را کاهش دهد و این اثرات هم‌زمان باعث تقویت سلامت کلی ریزوسفر می‌شود (Yang et al., 2024). در بررسی‌های انجام شده نشان داده است که، کاربرد بیوچار موجب کنترل کپک خاکستری ناشی از *Botrytis cinerea* در گیاهان گیاه گوجه فرنگی، فلفل و توت‌فرنگی شده است (Mehari et al., 2015). همچنین بیوچار توانسته است سفیدک پودری ناشی از *Leveillula taurica* در گوجه فرنگی و *Podosphaera* در توت‌فرنگی را کنترل کند که نشان داده بیوچار از طریق جذب میکروارگانیسم‌های مفید و آماده‌سازی سیستم دفاعی گیاه، حساسیت به پاتوژن‌های سطحی را کاهش می‌دهد (Meller Harel et al., 2012). برخی مطالعات نشان داده‌اند که کاربرد بیوچار در شرایط خاص می‌تواند باعث افزایش شدت بیماری یا بی‌اثر بودن آن در کنترل پاتوژن‌ها شود (Elmer & Pignatello, 2011). این تناقض ممکن است ناشی از نوع ماده اولیه بیوچار، دمای پیرولیز، مقدار مصرف، شرایط محیطی و حتی نوع پاتوژن و گیاه میزبان باشد. برای مثال، در حالی که بیوچار در برخی موارد سبب کاهش بیماری‌های قارچی شده است، در موارد دیگر مشاهده شده که به‌دلیل تغییر در تعادل میکروبی ریزوسفر، فرصت برای رشد بعضی پاتوژن‌ها افزایش یافته است (Noyce et al., 2016).

علاوه بر بیماری، بیوچار می‌تولند بر آفات نیز اثر بازدارنده داشته باشد، بیوچار می‌تولند با تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند pH، رطوبت و دما، شرایط محیطی را برای تخم‌ریزی و رشد پوره‌های آفات نامناسب سازد، به عنوان مثال در ذرت، اصلاح خاک با بیوچار باعث تغییرات ریزوسفری و کاهش خسارت ناشی از *Spodoptera frugiperda* شده است (Rivera-García et al., 2024). همچنین بیوچار از طریق تأثیر بر متابولیسم گیاه و القای پاسخ‌های دفاعی مثل اسید جاسمونیک کیفیت تغذیه آفات را کاهش می‌دهد و مقاومت ضد علف خواری را تقویت می‌کند (Waqas et al., 2018). مصرف بیوچار می‌تواند به‌طور مستقیم رشد، شفیگی و بقا را در آفات برگ خوار مانند *Spodoptera frugiperda* و *Manduca sexta* کاهش دهد که نشان دهنده اختلال فیزیولوژیک یا اثرات سمی نسبی است (Wagle et al., 2025). در پژوهش دیگر درختان پسته تیمار شده با بیوچار با افزایش ترکیبات بازدارنده تغذیه و تخم‌ریزی، مقاومت بیشتری در برابر آفت پسپیل معمولی پسته *Agonoscena pistaciae* از خود نشان دادند که این اثر به ایجاد دفاع مستقیم و القای

مقاومت سیستمیک نسبت داده شده است (ایران‌نژاد پاریزی و همکاران، ۱۴۰۱). این یافته‌ها نشان می‌دهند که بیوچار علاوه بر نقش اصلاحی خاک می‌تواند به عنوان یک ابزار مدیریت تلفیقی بیماری‌ها و آفات نیز مورد استفاده قرار گیرد. موجب کاهش نیاز به مصرف آفت‌کش‌های شیمیایی گردد.

تأثیر بیوچار بر رشد و عملکرد گیاهان

مطالعات انجام شده نشان داد، بیوچار با تغییر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک موجب بهبود حاصلخیزی خاک شده و در نهایت موجب افزایش رشد و عملکرد گیاه می‌گردد، تأثیر بیوچار بر عملکرد گیاه به فاکتورهای مختلف از جمله وضعیت حاصلخیزی اولیه خاک، بافت خاک، دمای تهیه و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچار و حتی نوع گیاه بستگی دارد و می‌تواند سبب افزایش یا کاهش عملکرد گیاه گردد (خادم و همکاران، ۱۳۹۶). کاربرد بیوچار در بستر کاشت موجب می‌شود تا با جذب مواد مغذی، این ترکیبات را در زمان مورد نیاز در اختیار گیاهان قرار دهد، در نتیجه عناصر در مدت بیشتری در خاک باقی‌مانده و نیاز به مصرف کود و هزینه کود دهی را کاهش می‌دهد (یعقوبی و همکاران، ۱۳۹۳). از سویی دیگر بیوچار با افزایش میزان ترسیب کربن در خاک و کاهش گازهای گلخانه‌ای، تأثیر مثبتی بر رشد و عملکرد گیاه دارد (بخشی‌پور و همکاران، ۱۴۰۰).

مطالعات متعددی اثرات مثبت کاربرد بیوچار را بر گیاهان گزارش نمودند برای مثال، در پژوهشی، کاربرد بیوچار برگ نخل خرما به میزان ۳۶ کیلوگرم در مترمربع، در شرایط تنش کم‌آبی میزان پرولین برگ میوه طالبی رقم سمسوری را کاهش داد، در حالیکه میزان نیتروژن برگ، پتاسیم برگ، منگنز برگ، طول شاخساره، سطح برگ و تعداد برگ در بوته، قطر میوه و قطر گوشت میوه را افزایش داد (باقری و همکاران، ۱۴۰۰). نتایج یزدی و دانائی (۱۴۰۲) نشان داد، افزودن کاه کلش گندم به میزان ۴۰ گرم در کیلوگرم خاک موجب افزایش وزن تازه و خشک میوه، طول میوه و تعداد میوه در بوته، اسیدیته قابل تیتراسیون، ویتامین ث، آنتوسیانین و فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز، کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در گیاه فلفل کاپی (*Capsicum annuum* L.) گردید. همچنین بررسی‌ها نشان داد، کاربرد بیوچار سبوس برنج (۷-۸ درصد وزن حجمی خاک تا عمق ۳۰ سانتی‌متر) در شرایط کم‌آبی بر توده‌های بومی سنبليله، عملکرد دانه، وزن صد دانه، تعداد شاخه اصلی و فرعی در بوته را افزایش داد (بیطرفان و همکاران، ۱۳۹۸). در پژوهشی دیگر مصرف بیوچار ۱۰ تن در هکتار مواد اولیه سلولزی شامل بقایای چوب و گیاهان زراعی افزایش وزن تر برگ، ساقه و وزن تر کل، کلروفیل a و کل

را در نعنای فلفلی (*Mentha piperita* L.) افزایش داد (زغفریان و همکاران، ۱۳۹۸). در گل آهار (*Zinnia elegans* L.) نیز کاربرد بیوچار (۲۰ گرم در کیلوگرم خاک گلدان) تأثیر معنی‌داری بر افزایش کلروفیل a، b و کل، نیتروژن و فسفر نشان داد (کشاورز فرد و همکاران، ۱۳۹۹). در پژوهشی دیگر کاربرد بیوچار ۴۵ تن در هکتار موجب افزایش ارتفاع بوته، وزن تر و خشک، وزن صد دانه، وزن کل دانه در شرایط کم‌آبی در گیاه زنیان (*Trachyspermum ammi*) شد (خاشعی سیوکی و همکاران، ۱۳۹۸)، در گیاه علف پشمکی (*Bromus tomentellus*) و یونجه (*Medicago sativa*) نیز کاربرد بیوچار ۰/۵ درصد وزنی (بقایای شاخه‌های *Acer monspessulanum* و بوته *Artemisia sieberi* همچنین ساقه‌های خشک (*Agropyron cristatum*) موجب افزایش ارتفاع گیاه، حجم و طول ریشه شد (عباس نسب و همکاران، ۱۴۰۰).

استفاده از مقدار مناسب بیوچار گندم (۲/۵ درصد حجمی) سبب کاهش اثرات منفی تنش رطوبتی و بهبود شاخص‌های رشد و نمو نظیر ارتفاع گیاه، تعداد، وزن، قطر و طول میوه و پارامترهای کیفی نظیر مقدار قند میوه، شاخص سبزی‌نگی و شاخص سطح برگ کارلا (خریزه تلخ) (*Momordica Charantia* L.) در مقایسه با شاهد شد (میر و همکاران، ۱۴۰۰).

کاربرد بیوچار کاه و کلش گندم با غلظت ۴۰ و ۶۰ گرم در کیلوگرم وزن خاک را برای بهبود شاخص‌های رشد و رنگ‌ریزه‌های گیاهی حسن‌یوسف (*Solenostemon scutellarioides* L.) توصیه نمود (کشاورز کلهری و لادن‌مقدم، ۱۴۰۱).

در گیاه بادمجان (*Solanum melongena* L.) نیز کاربرد ۵۰۰ گرم بیوچار وزن تازه و خشک شاخساره، تعداد و وزن میوه، عملکرد کل و کارایی مصرف آب را افزایش داد (ابراهیمی و همکاران، ۱۴۰۰). در گیاه مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.) کاربرد ۲۰ تن در هکتار بیوچار به‌طور معنی‌داری شاخص سبزی‌نگی، وزن خشک ریشه و شاخساره را در شرایط تنش خشکی افزایش داد، درحالی‌که نشت یونی و فنل کل را کاهش داد (Ghias et al., 2022).

همچنین کاربرد بیوچار سبب افزایش میزان قند، پروتئین محلول و مواد جامد محلول در میوه ازدها (*Hylocereus polyrhizus*) شد (Chen et al., 2022). در پژوهشی دیگر مشاهده شد کاربرد بیوچار به میزان ۱۰ درصد وزن کل محیط کشت گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) موجب افزایش وزن خشک ساقه و قطر ساقه گردید (Ardakani & Sharifi, 2017).

نتیجه‌گیری کلی

براساس بررسی‌های انجام‌شده، استفاده از بیوچار تأثیرات مثبتی بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و در پی آن افزایش رشد و عملکرد گیاهان دارد. تولید بیوچار از ضایعات کشاورزی و صنعتی علاوه بر بهینه‌سازی مدیریت پسماند، به کاهش آلاینده‌های محیطی، ترسیب پایدار کربن و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی کمک می‌کند. با این حال، نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اثرات بیوچار همواره یکسان نبوده و گاه متناقض است. کاربرد بیوچار، می‌تواند پیامدهایی مانند غیرمتحرک شدن موقت نیتروژن، تغییرات نامطلوب در فراهمی ریزمغذی‌ها به‌ویژه در اثر افزایش pH، یا انتقال آلاینده‌های موجود در زیست‌توده اولیه به خاک به همراه داشته باشد. بنابراین، برای بهره‌برداری بهینه و پایدار از بیوچار، لازم است:

- تحقیقات میدانی بلندمدت و گستره‌ای از شرایط خاکی و اقلیمی ایران انجام شود تا بهینه‌ترین ترکیب‌ها، دوزها و نوع بیوچار بر اساس ماده اولیه مشخص گردد.

- ارزیابی چرخه عمر و تحلیل اقتصادی صورت گیرد تا مزیت‌های زیست‌محیطی و هزینه کاربرد بیوچار در سیستم‌های کشاورزی محاسبه و قابل مقایسه با روش‌های مرسوم شود.

- تعامل بیوچار با کودهای معدنی و زیستی بررسی شود تا از تثبیت نیتروژن یا کاهش فراهمی برخی عناصر جلوگیری شود.

- استانداردهای تولید بیوچار (شامل انتخاب زیست توده، دمای پیرولیز و فرآوری پس از تولید) مورد توجه قرار گیرد.

- آگاهی‌دهی به کشاورزان درباره مزایا، محدودیت‌ها و نحوه استفاده مناسب از بیوچار صورت گیرد.

با توجه به این موارد، بیوچار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده مؤثر خاک، راهکاری کارآمد برای مدیریت پایدار پسماندهای زیستی و کاهش تغییرات اقلیمی از طریق تثبیت کربن در خاک محسوب می‌شود. استفاده استراتژیک و تلفیق آن با دانش بومی، پتانسیل این ماده را در بهبود کشاورزی پایدار و حفظ محیط زیست افزایش می‌دهد.

منابع مورد استفاده

ابراهیمی، م.، م.، سوری، ا.، موسوی، و ن.، صاحبانی. ۱۴۰۰. مطالعه اثر رومی کمپوست و بیوچار بر رشد، عملکرد و کارایی مصرف آب بادنجان (*Solanum melongena* L.) در شرایط مزرعه، علوم باغبانی ایران، جلد ۵۲، شماره ۱، صفحه ۲۳-۳۳.

ابریشم کش، س.، م.، فاضلی سنگانی، ح.، رمضانپور، م.، نوروزی، و ع.، شعبانی. ۱۳۹۹. اثر کاربرد سوسپانسیون بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی‌وشیمیایی دو خاک حساس به فرسایش. پژوهش‌های فرسایش محیطی. جلد ۱۰، شماره ۱، صفحه ۷۸-۵۸.

- افراشته، م. و د، کولیوند. ۱۴۰۰. اثر زغال زیستی (بیوچار) در افزایش مقاومت گیاهان نسبت به عوامل بیماری‌زا. فصل‌نامه علمی ایمنی زیستی. شماره ۱۴، جلد ۲، صفحه ۱۷-۳۰
- ایران‌نژاد پاریزی، م، سمیع، و م، ضیا الدینی. ۱۴۰۱. تاثیر بیوچار طبیعی بر پاسخ‌های دفاعی گیاه و کنترل پسیل معمولی پسته *Agonoscaena pistaciae* (Hemiptera: Aphalaridae) تحت شرایط مزرعه، علوم و فناوری پسته. شماره ۷، جلد ۱۳، صفحه ۱۰۸-۱۳۸.
- باقری، س، م، حسندخت، ع، میرسلیمانی، و ا، موسوی. ۱۴۰۰. بررسی تاثیر بیوچار تهیه شده از برگ نخل خرما بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی طالبی رقم سمسوری (*Cucumis melo cv. Samsouri*) تحت تنش کم آبی. مجله فرآیند و کارکرد گیاهی. جلد ۱۰، شماره ۴۵، صفحه ۳۰۲-۲۸۵.
- بخشی‌پور، ف، ح، مومینوند، ا، صداقتی. و ع، احتشام نیا. ۱۴۰۰. تاثیر کاربرد بیوچار و میکوریزا آربسکولار بر زی توده گیاهی و برخی عناصر غذایی دو وارپته جعفری، علوم باغبانی ایران، جلد ۵۲، شماره ۴، صفات ۱۰۲۷-۱۰۴۱.
- بوستانی، ح. و ه، عسکری. ۱۳۹۹. بررسی تاثیر بیوچارهای حاصل از بقایای گندم و ذرت بر جذب روی در محلول‌های آبی. علوم و تکنولوژی محیط زیست، جلد ۲۲، شماره ۶، صفحه ۱۲۹-۱۴۶.
- بیطرفان، ز، ح، اصغری، ط، حسنلو، ا، غلامی. و ف، مرادی. ۱۳۹۸. پاسخ توده‌های بومی گیاه دارویی شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum L.*) به کاربرد بیوچار در شرایط کم‌آبیاری. بوم شناسی کشاورزی. جلد ۱۱، شماره ۲، صفحه ۴۰۳-۴۱۵.
- توراج زاده، ا، ح، پیری، ا، ناصرین. و م، چاری. ۱۴۰۲. بررسی تاثیر بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تحت کشت کینوا در شرایط تنش آبی و شوری، آب و خاک، جلد ۳۸، شماره ۱، صفحه ۶۹-۸۵.
- تیرگر سلطانی، م، ح، بهرامی. و ع، مختصی بیدگلی. ۱۴۰۱. تاثیر بیوچار چوب انگور بر پاسخ ذرت به تنش کمبود آب در شرایط گلخانه‌ای. تحقیقات آب و خاک ایران. شماره ۵۳، جلد ۹، صفحه ۱۹۷۹-۱۹۹۶.
- جلالی، س، ف، زعفریان، ر، حسن پور. و ا، عباسیان. ۱۴۰۰. توانایی گیاه‌پالایی سرب توسط سورگوم (*Sorghum bicolor L.*) تحت کاربرد بیوچار و اسید سالیسیلیک. علوم گیاهان زراعی ایران. شماره ۵۴، جلد ۴، صفحه ۲۲۳-۲۳۳.
- جم، ا، س، خماری، ع، عبادی، ا، گلی کلانپا. و ا، قویدل. ۱۴۰۳. کاهش اثرات آلاینده‌های فلزات سنگین خاک در گیاه ماشک گل خوشه ای با کاربرد بیوچار، تریکودرما و مدیریت کود فسفر. تنش‌های محیطی در علوم زراعی. جلد ۱۷، شماره ۳، صفحه ۵۲۳-۵۴۷.
- جمیلی، ت، ا، عالی نژادیان بیدآبادی، ع، ملکی، م، فیضیان. و ا، اکبرپور. ۱۴۰۱. بررسی کاربرد بیوچار و سطوح مختلف آبیاری بر ویژگی‌های فیزیکی‌وشیمیایی و تنفس میکروبی خاک آلوده به کادمیوم در کشت گوجه فرنگی. تحقیقات آب و خاک ایران، شماره ۵۳، جلد ۵، صفحه ۹۳۷-۹۵۶.
- حسن پور، ا، م، شیروانی، م، حاج عباسی. و م، مجیدی. ۱۴۰۱. تاثیر بیوچارهای اسیدی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و قابلیت جذب عناصر غذایی خاک‌های آهکی. علوم آب و خاک. شماره ۲۶، جلد ۲، صفحه ۳۹-۵۹.
- حمادی، ح، ع، شهیدی. و ح، حنفی. ۱۴۰۲. بررسی اثر بیوچار ضایعات ساقه زرشک بر آبشویی نیترات از یک خاک لومی حاوی ماده آلی، پژوهش‌های خاک جلد ۳۷، شماره ۱، صفحه ۶۷-۸۰.
- حمزه نژاد، ر، سپهر، ا، صمدی، ع، رسولی صدقیانی، م. و ح، خداوردیلو. ۱۳۹۹. ویژگی‌های جذب سرب توسط بقایای هرس انگور و بیوچار آن از محلول‌های آبی، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. شماره ۲۷، جلد ۱، صفحه ۲۱۳-۲۲۸.
- خادم، ا، ف، رئیسی. و ح، بشارتی. ۱۳۹۶. مروری بر اثرات کاربرد بیوچار بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، مدیریت اراضی. جلد ۵، شماره ۱، صفحه ۱۳-۳۰.
- خاشعی سیوکی، ع، ع، شهیدی، م، یعقوب‌زاده. و م، دستورانی. ۱۳۹۸. کاربرد بیوچار و سطوح تنش آبی بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه دارویی زنیان (*Trachyspermum ammi*). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. جلد ۱۳، شماره ۲، صفحه ۳۱۹-۳۲۸.

- زعفریان، ف.، و، اکبرپور، م.، حبیبی. و م.، کاوه. ۱۳۹۸. تاثیر بیوچار و کودهای زیستی بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، عملکرد و محتوای عناصر غذایی نعنای فلفلی (*Mentha piperita L.*). به زراعی کشاورزی (مجله کشاورزی پردیس ابوریحان). جلد ۲۱، شماره ۴، صفحه ۴۰۷-۴۲۲.
- صرخه، ص.، ع.، معزی، ن.، مرادی. و ا.، کریمی. ۱۴۰۳. تأثیر کاربرد بیوچار اصلاح‌شده بر ویژگی‌های شیمیایی خاک و جذب عناصر غذایی در نیشکر واریته CP73-21 تحقیقات آب و خاک ایران. جلد ۵۵، شماره ۹، صفحه ۱۵۲۱-۱۵۳۶.
- عباس پور، ف.، ح.، اصغری، پ.، رضوانی مقدم. و ح.، عباسدخت. ۱۳۹۶. تاثیر کاربرد بیوچار در بهبود برخی ویژگی‌های خاک و رشد گیاه دارویی سیاه دانه (*Nigella sativa L.*) در شرایط تنش آبی، کنفرانس بین المللی علوم کشاورزی، گیاهان دارویی و طب سنتی، مشهد.
- عباس نسب، ز.، م.، عابدی. و ا.، ساداتی. ۱۴۰۰. اثر بیوچار بر برخی صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی دو گونه *Bromus tomentellus* و *Medicago sativa*. مجله فرآیند و کارکرد گیاهی. جلد ۱۰، شماره ۴۱، صفحه ۱۵۶-۱۴۵.
- عظیم‌زاده، ی. ۱۴۰۲. نقش بیوچار در حاصلخیزی خاک و بهره‌وری محصول در مناطق خشک و نیمه‌خشک: چالش‌ها و فرصت‌ها، تحقیقات آب و خاک ایران. جلد ۵۴، شماره ۹، صفحه ۱۳۳۷-۱۳۶۲.
- عظیم‌زاده، ی. و ن.، نجفی. ۱۳۹۵. اثر بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک. نشریه مدیریت اراضی. جلد ۴، شماره ۲، صفحه ۱۶۱-۱۷۳.
- عظیم‌زاده، ی. و ن.، نجفی. ۱۳۹۶. بیوچار، ماده‌ای با ویژگی‌های منحصر به فرد برای ترسیب کربن اتمسفر و کاهش گرمایش جهانی، مدیریت اراضی، جلد ۵، شماره ۱، صفحه ۵۱-۶۳.
- کشاورز فرد، س.، م.، سلگی، ح.، باقری. و ا.، شهرجردی. ۱۳۹۹. کاربرد بیوچار و اسید هیومیک برای مقاومت به تنش خشکی در گل آهار. زیست‌شناسی کاربردی. جلد ۳۳، شماره ۱، صفحه ۱۴۸-۱۷۴.
- کشاورز کلهری، س. و ع.، لادن مقدم. ۱۴۰۱. بررسی شاخص‌های رشد و رنگیزه‌های گیاه حسن یوسف (*Solenostemon scutellarioides L.*) به کاربرد بیوچار در بستر کشت. فصلنامه گیاه و زیست فناوری ایران. جلد ۱۷، شماره ۳، صفحه ۲۴-۳۵.
- ماله میر چگینی، م.، ا.، گلچین، ن.، خادم مقدم ایگده لو. و ک.، مروج. ۱۳۹۹. مقایسه تأثیر دماهای گرماکافت و مواد فعال‌ساز بر ویژگی بیوچارهای اصلاح‌شده. تحقیقات آب و خاک ایران، جلد ۵۱، شماره ۹، صفحه ۲۴۰۵-۲۴۱۵.
- محمودیان چپلو، ا.، ح.، نیک نهاد قرماخر. و ح.، یوسفی. ۱۳۹۹. تولید بیوچار از شاخ و برگ هرس شده درخت هلو و خصوصیات کیفی آن در دماهای مختلف. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، جلد ۲۷، شماره ۳، صفحه ۱۲۴-۱۰۵.
- میر، ا.، ح.، پیری. و ا.، ناصرین. ۱۴۰۰. اثرات سطوح مختلف بیوچار گندم و تنش آبی بر ویژگی‌های کمی و کیفی کارلا (خربزه تلخ) در شرایط گلدانی. پژوهش آب در کشاورزی. جلد ۳۵، شماره ۲، صفحه ۱۶۹-۱۸۵.
- نجفی قیری، م.، ح.، بوستانی. و ع.، محمودی. ۱۳۹۷. تأثیر بقایای سه گونه گیاهی و بیوچار آنها بر برخی ویژگی‌ها و وضعیت پتاسیم یک خاک آهکی. پژوهش‌های خاک. جلد ۳۲، شماره ۱، صفحه ۲۵-۳۶.
- واحدی، ر.، م.، رسولی صدقیانی. و م.، برین. ۱۳۹۸. تأثیر بیوچار ضایعات هرس درختان میوه بر برخی خصوصیات بیولوژیکی خاک در شرایط رایزوباکس. علوم آب و خاک. جلد ۲۳، شماره ۱، صفحه ۳۳۶-۳۲۱.
- ولی زاده قلعه بیگ، ا.، س.، نعمتی، ح.، امامی. و ح.، آروبی. ۱۳۹۸. تأثیر بیوچار پسماند گل رز شاخه بریده بر صفات مورفولوژیک و فلزات سنگین در گیاه کاهو (*Lactuca sativa L.*) رقم "سیاهو". روابط خاک و گیاه (علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای). جلد ۱۰، شماره ۴، صفحه ۴۲۱-۳۵.
- ولی زاده قلعه بیگ، ا.، س.، نعمتی، ح.، امامی. و ح.، آروبی. ۱۳۹۹. بررسی تأثیر بیوچار گلابول بر برخی خصوصیات مورفولوژیکی و جذب فلزات سنگین در گیاه کاهو (*Lactuca sativa L.*) رقم "سیاهو". مجله علوم باغبانی ایران (علوم کشاورزی ایران). جلد ۵۱، شماره ۴، صفحه ۷۷۳-۷۸۴.

- یزدی، م. و ا. دانائی. ۱۴۰۳. اثر بیوچار کاه و کلش گندم بر ویژگی‌های رشدی و بیوشیمیایی میوه فلفل کاپی (*Capsicum annuum* L.) مجله روابط خاک و گیاه. جلد ۱۵، شماره ۲، صفحه ۱۹-۳۲.
- یعقوبی، م.، م. عامریان. و ح. اصغری. ۱۳۹۳. مقایسه تاثیر کود های بیولوژیک و بیوچار بر برخی صفات فیزیولوژیک در زراعت لوبیا چشم بلبلی در مناطق خشک، دومین همایش ملی بیابان با رویکرد مدیریت مناطق خشک و کویری، سمنان.
- Amonette, J. E., & Joseph, S. (2009). Characteristics of biochar: Microchemical properties. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology* (pp. 33–52). Earthscan, London. ISBN: 978-1-84407-658-5.
- Ardakani, M. R., & Sharifi, M. (2017). Worm castings-based growing media with biochar and arbuscular mycorrhizal fungi for producing organic tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in greenhouse. *Iranian J. Plant Physiol.* 7(3), 2083–2093. <https://doi.org/10.30495/ijpp.2017.533562>.
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., & Gomez-Eyles, J. L. (2010). Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environmental Pollution*, 158(6), 2282–2287. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.02.003>
- Biederman, L. A., & Harpole, W. S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 5(2), 202–214. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12011>
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687–711. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>
- Bonanomi, G., Ippolito, F., & Scala F. (2015). A "black" future for plant pathology? Biochar as a new soil amendment for controlling plant diseases. *Journal of Plant Pathology*, 97, 223-234.
- Busscher, W. J., Novak, J. M., Evans, D. E., Watts, D. W., Niandou, M. A. S., & Ahmedna, M. (2010). Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand. *Soil Science*, 175(1), 10–14. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181cb7f46>
- Castro-Herrera, D., Prost, K., Kim, D. G., Yimer, F., Tadesse, M., Gebrehiwot, M., & Brüggemann, N. (2023). Biochar addition reduces non-CO2 greenhouse gas emissions during composting of human excreta and cattle manure. *Journal of environmental quality*, 52(4), 814–828. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20482>
- Chen, L., Li, X., Peng, Y., Xiang, P., Zhou, Y., Yao, B., Zhou, Y., & Sun, C. (2022). Co-application of biochar and organic fertilizer promotes the yield and quality of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) by improving soil properties. *Chemosphere*, 294, 133619. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133619>
- De Melo Carvalho, M. T., de Holanda Nunes Maia, A., Madari, B. E., Bastiaans, L., van Oort, P. A. J., Heinemann, A. B., Soler da Silva, M. A., Petter, F. A., Marimon Jr., B. H., & Meinke, H. (2014). Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system, *Solid Earth*, 5, 939–952, <https://doi.org/10.5194/se-5-939-2014>.
- Elmer, W. H., & Pignatello, J. J. (2011). Effect of Biochar Amendments on Mycorrhizal Associations and Fusarium Crown and Root Rot of Asparagus in Replant Soils. *Plant disease*, 95(8), 960–966. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-10-0741>.
- Elsaman, N., Amin, A., El-Razek, M., & Roshdy, N. (2025). Comparative effects of different types and doses of biochar on soil quality indicators and arugula growth under saline conditions. *Scientific Reports*. 15, 1-19. 10.1038/s41598-025-92816-w.
- Ernest, B., Yanda, P. Z., Hansson, A., Fridahl, M. (2024). Long-term effects of adding biochar to soils on organic matter content, persistent carbon storage, and moisture content in Karagwe, Tanzania. *Scientific Reports*, 14, 30565. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83372-w>.
- Frenkel, O., Jaiswal, A. K., Elad, Y., Lew, B., Kammann, C., & Graber ER. (2017). The effect of biochar on plant diseases: what should we learn while designing biochar substrates? *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25, 105-113.
- Ghias, S., Shirmardi, M., Meftahizadeh, H., & Dehestani Ardakani, M. (2022). Effect of biochar and hydrogel on morphophysiological and biochemical characteristics of common Sage (*Salvia officinalis* L.) under drought stress. *Plant Produc.* 45(1), 67–80. <https://doi.org/10.22055/ppd.2021.36030.1962>.
- Glaser, B., & Birk, J. J. (2012). State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (Terra Preta de Índio). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 82, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.029>.
- Graber, E. R., Frenkel, O., Jaiswal, A. K., & Elad, Y. (2014). How may biochar influence severity of diseases caused by soilborne pathogens? *Carbon Management*, 5(2), 169–183.

- Gui, X., Xu, X., Zhang, Z., Hu, L., Huang, W., Zhao, L., & Cao, X. (2025). Biochar-amended soil can further sorb atmospheric CO₂ for more carbon sequestration. *Communications Earth & Environment*, 6. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01985-5>.
- Herath, H. M. S. K., Camps-Arbestain, M., & Hedley, M. (2013). Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol. *Geoderma*, 209–210, 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.005>.
- Heydari, M., Hajinia, S., Jafarian, N., Karamian, M., Mosa, Z., Asgharzadeh, Sh., Rezaei, N., Guidi, L., Valkó, O., & Prévosto, B. (2023). Synergistic use of biochar and the plant growth-promoting rhizobacteria in mitigating drought stress on oak (*Quercus brantii* Lindl.) seedlings. *Forest Ecology and Management*, 531, 120793.
- Hikmat, N. A., Qassim, B. B., & Khethi, M. T. (2014). Thermodynamic and kinetic studies of lead adsorption from aqueous solution onto petiole and fiber of palm tree. *American Journal of Chemistry*, 4(4), 116–124.
- Jaiswal, A. K., Tsechansky, L., Frenkel, O., Graber, E. R. (2018). Immobilization and deactivation of pathogenic enzymes and toxic metabolites by biochar: A possible mechanism involved in soilborne disease suppression. *Soil Biology and Biochemistry*, 121, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.03.001>
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., 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. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>
- Jeffery, S., Voorde, T., Harris, W., Mommer, L., Van G., Jan W., Deyn, G.B., Ekelund, F., Briones, M., & Bezemer, T.m. (2022). Biochar application differentially affects soil micro-, meso-macro-fauna and plant productivity within a nature restoration grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 174, 108789.
- Jiang, Y., Wang, X., Zhao, Y., Zhang, C., Jin, Z., Shan, S., & Ping, L. (2021). Effects of Biochar Application on Enzyme Activities in Tea Garden Soil. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 9:728530. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.728530>
- Jien, S.H., & Wang, C.S. (2013). Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*, 110, 225–233.
- Jirka, S., & Tomlinson, T. (2015). State of the biochar industry 2014. *International biochar initiative rep.* 1-77.
- Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., & Enayatizamir, N. (2020). Application of Biochar Changed the Status of Nutrients and Biological Activity in a Calcareous Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 450-459.
- Kumari, T., Phogat, D., Phogat, J., Shukla, S. (2024). Biochar & fly ash amendments lower mortality and increase antioxidant activity in chlorpyrifos-exposed earthworms. *Applied Biological Chemistry*, 67, 65. <https://doi.org/10.1186/s13765-024-00909-3>.
- Lebrun, M., Aguinaga, M., Zahid, Z., Šimek, P., Ouředníček, P., Klápště, P., Száková, J., Bimová, K., Jačka, L., Beesley, L., Punčochář, J., & Trakal, L. (2024). Manure-biochar blends effectively reduce nutrient leaching and increase water retention in a sandy, agricultural soil: Insights from a field experiment. *Soil Use and Management*, 40 (4), e13135.
- Lehmann, J. & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge. 3rd Edition.
- Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C. and Crowley, D. (2012). Biochar effects on soil biota- a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 1812–1836.
- Li, L., Long, A., Fossum, B., & Kaiser, M. (2023). Effects of pyrolysis temperature and feedstock type on biochar characteristics pertinent to soil carbon and soil health: a meta-analysis. *Soil Use and Management*, 39(1), 43–52.
- Lie, J.H., Lv, G.H., Bai, W.B., Liu, Q., Zhang, Y.C., & J.Q. Song. (2014). Modification and use of biochar from wheat straw (*Triticum aestivum* L.) for nitrate and phosphate removal from water. *Desalination. Water. Treat.* 57, 4681–4693.
- Liu, S., Li, J., Zhou, Z., Steinberg, Ch., Pan, B., Tao, Sh., & Xing, B. (2024). Biochar soil addition alters ant functional traits as exemplified with three species. *Biochar*, 6(1): 53. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00337-y>.
- Liu, S., Meng, J., Jiang, L., Yang, X., Lan, Y., Cheng, X., & Chen, W. (2018). Rice husk biochar impacts soil phosphorous availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types. *Applied Soil Ecology*, 116, 12-22
- Liu, Z., He, T., Cao, T., Yang, T., Meng, J., & Chen, W. (2017). Effects of biochar application on nitrogen leaching, ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in two distinct soils. *Journal of soil science and plant nutrition*, 17. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000037>.
- Ma, N., Zhang, L., Zhang, Y., Yang, L., Yu, C., & Yin, G. (2016). Biochar improves soil aggregate stability and water availability in a Mollisol after three years of field application. *PLOS ONE*, 11(4), e0154091. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154091>.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press.

- Mehari, ZH., Elad, Y., Rav-David, D., Graber, ER., & Harel, YM. (2015). Induced systemic resistance in tomato (*Solanum lycopersicum*) against *Botrytis cinerea* by biochar amendment involves jasmonic acid signaling. *Plant and Soil*, 395, 31-44.
- Meller Harel, Y., Elad, Y., Rav-David, D., Borenstein, M., & Shulchani, R. (2012). Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. *Plant and Soil*, 352, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1012-0>
- Mihoub, A., Amin, A. E. E. A. Z., Motaghian, H. R., Saeed, M. F. & Naeem, A. (2022). Citric Acid (CA)– Modified Biochar Improved Available Phosphorus Concentration and Its Half-Life in a P-Fertilized Calcareous Sandy Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(1): 465-474.
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2013). Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*, 3(2), 313–339.
- Noyce, GL, Winsborough, C., Fulthorpe, R., Basiliko, N. (2016). The microbiomes and metagenomes of forest biochars. *Science Report*. 23;6:26425. <https://doi.org/10.1038/srep26425>
- Ogawa, M., & Y. Okimori. (2010). Pioneering works in biochar research, Japan. *Australian Journal of Soil Research*, 48, 489-500.
- Park, J. H., Ok, Y. S., Kim, S. H., Cho, J. S., Heo, J. S., DeLaune, R. D., & Seo, D. C. (2016). Competitive adsorption of heavy metals onto sesame straw biochar in aqueous solutions. *Chemosphere*, 142, 77-83.
- Rasool, M., Akhter, A., Haider, M. S., & Soja, G. (2021). Molecular and biochemical insight into biochar and *Bacillus subtilis* induced defense in tomatoes against *Alternaria solani*. *Scientia Horticulturae*, 285, 110203. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110203>
- 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), 1-26.
- Rivera-García, J. A., Díaz, T., Contreras-Cornejo, H. Á., Larsen, J., González-Esquivel, C. E., López-Pérez, L., Barreto-Barriga, O., Ortiz-Salgado, D. A., Real-Santillán, R. O. (2024). Biochar alters maize growth, mycorrhizal associations and fall armyworm performance. *Plant and Soil*. 509(1):487-499. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06874-6>
- Shackley, S., Hammond, J., Gaunt, J., & Ibarrola, R. (2011). The feasibility and costs of biochar deployment in the UK. *Carbon Management*, 2(3), 335–356.
- Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E., and Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*. Vol 105. San Diego, Elsevier Academic Press Inc. pp: 47-82.
- Somparn, W., Panyoyai, N., Khamdaeng, T., & Tippayawong, N. (2020). Effect of process conditions on properties of biochar from agricultural residues. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 463, 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012005>.
- Sorrenti, G., Masiello, C., & Toselli, M. (2016). Biochar interferes with kiwifruit Fe-nutrition in calcareous soil. *Geoderma*. 272. 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.017>.
- Subedi, R., Taupe, N., Ikoyi, I., Bertora, C., Zavattaro, L., Schmalenberger, A., Leahy, J.J. and Grignani, C. (2016). Chemically and biologically-mediated fertilizing value of manure-derived biochar. *Science of the Total Environment*, 550, 924–933.
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews. Environmental Science and Biotechnology*, 19, 191–215.
- Trakal, L., Bingöl, D., Pohofely, M., Hruška, M and Komárek, M. (2014). Geochemical and spectroscopic investigations of Cd and Pb sorption mechanisms on contrasting biochars: engineering implications. *Bioresource Technology*, 171, 442-451
- Varkolu, M., Gundekari, S., Omvesh; Palla, V.C.S., Kumar, P., Bhattacharjee, S., & Vinodkumar, T. (2025). Recent Advances in Biochar Production, Characterization, and Environmental Applications. *Catalysts*, 15, 243. <https://doi.org/10.3390/catal15030243>
- Wagle, N., Unnikrishnan, S., Kaur, S., Pereira, E. I. P., & Kariyat, R. (2025). Biochar suppresses growth, pupation and eclosion success of a specialist (*Manduca sexta*) and a generalist (*Spodoptera frugiperda*) insect herbivore. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*. 4(2). <https://doi.org/10.1002/sae2.70069>
- Wang, J., Xiong, Z., & Kuzyakov, Y. (2016). Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy*, 8(3), 512–523. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12266>
- Wang, T., Zhai, Y., Zhu, Y., Li, C., & Zeng, G. (2018). A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, fundamentals, and physicochemical properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 223-247.

- Waqas, M., Shahzad, R., Hamayun, M., Asaf, S., Khan, A. L., Kang, S.-M., Yun, S., Kim, K.-M., & Lee, I.-J. (2018). Biochar amendment changes jasmonic acid levels in two rice varieties and alters their resistance to herbivory. *PLOS ONE*, 13(1), e0191296. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191296>
- Weng, Z. H., & Cowie, A. L. (2025). Estimates vary but credible evidence points to gigaton-scale climate change mitigation potential of biochar. *Communications Earth & Environment*, 6, 259.
- Woolf, D., Amonette, J., Street-Perrott, F. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *nature communications*, 1, 56. <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>
- Woolf, D., Lehmann, J., Cowie, A., Cayuela, M., Whitman, T., & Sohi, S. (2018). Biochar for Climate Change Mitigation. Soil and Climate, 1st Edition, pp 30.
- Wu, H., Lai, C., Zeng, G., Liang, J., Chen, J., Xu, J., & Liu, J. (2019). The interactions of composting and biochar and their implications for soil amendment and pollution remediation: a review. *Critical reviews in*
- Yang, S., Chio, C., Qin, W., Pei, Y., Pei, G., Zhu, Y., & Li, H. (2024). Suppression mechanism of soilborne diseases by biochar: Immobilization and deactivation of pathogenic enzymes and toxic metabolites. *Scientia Horticulturae*, 325, 112707. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112707>
- Yu, H., Zou, W., Chen, J., Chen, H., Yu, Z., Huang, J., Tang, H., Wei, X. & Gao, B. (2019). Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. *Journal of Environmental Management*, 232, 8-21.
- Zanutel, M., Garre, S., Sanglier, P., & Biolders, Ch. (2023). Biochar modifies soil physical properties mostly through changes in soil structure rather than through its internal porosity. *Vadose Zone Journal*. 23: e20301. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20301>
- Zhu, Z., Zhang, Y., Tao, W., Zhang, X., Xu, Z., & Xu, C. (2025). The Biological Effects of Biochar on Soil's Physical and Chemical Characteristics: A Review. *Sustainability*, 17, 2214. <https://doi.org/10.3390/su17052214>