



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
**Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)**

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

**Vol. 15
No. 2 (58)**

Received:
2025-05-11

Accepted:
2025-09-15

Pages: 121-134

Interactions between Biochar and Soil Microorganisms

Yaser Azimzadeh¹

1) Assistant Professor of Natural Resources Management Research Department, Dryland Agricultural Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran.

*Corresponding author emails: y.azimzadeh@areeo.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: Climate changes and soil degradation are among the most critical global challenges of the present era, adversely affecting food security. Within this context, the health of the soil microbial community, as key players in biogeochemical cycles, plays an undeniable role in maintaining the functionality and fertility of soil ecosystems. Iran's soils, due to their location in arid and semi-arid regions, suffer from low organic matter content and poor biological health, which increasingly highlights the necessity for innovative solutions to improve these conditions. Biochar, as a carbon-based soil amendment, effectively enhances soil biological activities due to its unique structural and chemical properties. The objective of this review study is to investigate and analyze the key mechanisms governing the interactions between biochar and soil microorganisms.

Method: This comprehensive narrative review was conducted through a systematic search of scientific databases, including Google Scholar, Scopus, and Web of Science, using keywords such as "biochar," "soil microorganisms," "microbial community," and "soil health." The primary focus was on selecting articles published between 2000 and 2024 concerning the interactions between biochar and soil microorganisms. The collected sources were analyzed to identify, synthesize, and discuss the physical, chemical, and biological mechanisms associated with the interactions between biochar and soil microorganisms.

Results: Review findings indicate that biochar not only provides a secure and stable habitat for beneficial soil microorganisms, including mycorrhizal fungi, plant growth-promoting bacteria, and organic decomposers, but also supplies their nutritional and oxygen requirements. Furthermore, biochar influences the population, diversity, distribution, and function of soil microorganisms through direct and indirect effects on soil physical (e.g., porosity and permeability) and chemical properties (e.g., pH and cation exchange capacity), as well as indirect effects from altered resource availability. Other important mechanisms of biochar include the gradual release of essential nutrients, detoxification of toxic compounds through adsorption, enhancement of plant-microbial symbioses, and facilitation of biogeochemical cycles of elements such as carbon, nitrogen, and phosphorus. However, depending on the feedstock (e.g., agricultural waste, animal manure, or forestry residues) and production conditions (e.g., pyrolysis temperature and heating rate), biochar may contain certain toxic compounds, such as polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals, which can have adverse effects on soil microorganisms, plant health, and even the human food chain. Therefore, the effectiveness of biochar depends on multidimensional factors, including production temperature (300-700°C), feedstock type (lignocellulosic or proteinaceous), residence time in the soil, and soil characteristics such as texture, moisture, pH, and microbial community composition.

Conclusion: Given biochar's positive role in enhancing soil fertility, improving water retention, and reducing greenhouse gas emissions, its use is highly recommended, especially in arid and semi-arid regions with low organic matter content and salinity issues. Nevertheless, further investigation into its limiting effects (such as reduced availability of certain micronutrients) and potential risks from its toxic compounds in the long term, as well as field studies to optimize application rates and methods under different climatic conditions, are deemed essential.

Keywords: Carbon cycle, Soil fertility, Soil biological activity, Pyrolysis



شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

iauwsrj@srbiau.ac.ir
iauwsrj@gmail.com

سال پانزدهم

شماره ۲ (۵۸)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۲۴

صفحات: ۱۳۴-۱۲۱

برهم کنش های بین بیوپار و ریز جانداران خاک

یاسر عظیمزاده^۱

^(۱) استادیار بخش تحقیقات مدیریت منابع، مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: y.azimzadeh@areeo.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: تغییرات اقلیمی و تخریب خاک، از مهم ترین چالش های جهانی عصر حاضر هستند که امنیت غذایی را به طور نامطلوب تحت تأثیر قرار داده اند. در این میان، سلامت جامعه ریز جانداران خاک، به عنوان بازیگران اصلی چرخه های بیوژئوشیمیایی، نقشی غیرقابل انکار در حفظ کارکرد و حاصلخیزی اکوسیستم های خاکی ایفا می کند. خاک های ایران نیز به واسطه قرارگیری در منطقه خشک و نیمه خشک، از محتوای مواد آلی کم و سلامت زیستی ضعیف رنج می برد که لزوم یافتن راهکارهای نوین برای بهبود شرایط را بیش از پیش آشکار می سازد. بیوپار، به عنوان یک اصلاح کننده کربنی خاک، به علت برخورداری از ویژگی های منحصربه فرد ساختاری و شیمیایی، نقش مؤثری در بهبود فعالیت های زیستی خاک ایفا می کند. هدف از این مطالعه مروری، بررسی و تحلیل سازوکارهای کلیدی حاکم بر برهم کنش های بین بیوپار و ریز جانداران خاک است.

روش پژوهش: این مطالعه مروری روایی جامع با جستجوی نظام مند در پایگاه های داده علمی از جمله Google Scholar، Scopus و Web of Science با استفاده از کلیدواژه هایی مانند «بیوپار»، «ریز جانداران خاک»، «جامعه میکروبی» و «سلامت خاک» انجام شد. تمرکز اصلی بر انتخاب مقالات منتشر شده بین سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ در زمینه برهم کنش های بیوپار با ریز جانداران خاک بود. منابع جمع آوری شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند تا سازوکارهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی مرتبط با برهم کنش های بین بیوپار و ریز جانداران خاک، شناسایی، تلفیق و مورد بحث قرار گیرند.

یافته ها: نتایج بررسی ها نشان می دهد که بیوپار نه تنها زیستگاهی امن و پایدار برای ریز جانداران مفید خاکزی از جمله قارچ های میکوریزی، باکتری های محرک رشد گیاه و تجزیه کننده های آلی فراهم می سازد، بلکه نیازهای تغذیه ای و اکسیژن آن ها را تأمین می نماید. همچنین، بیوپار از طریق تأثیر مستقیم و غیرمستقیم بر ویژگی های فیزیکی (نظیر تخلخل و نفوذپذیری) و شیمیایی خاک (نظیر pH و ظرفیت تبادل کاتیونی) و نیز اثرات غیرمستقیم ناشی از تغییر در دسترسی به منابع غذایی، بر جمعیت، تنوع، پراکنش و عملکرد میکروارگانیسم های خاک تأثیر می گذارد. از دیگر سازوکارهای مهم بیوپار می توان به تأمین تدریجی عناصر غذایی ضروری، سمیت زدایی ترکیبات سمی از طریق جذب سطحی، تقویت همزیستی های میکروبی-گیاهی و تسهیل چرخه های بیوژئوشیمیایی عناصر نظیر کربن، نیتروژن و فسفر اشاره کرد. باین حال، بیوپار ممکن است بسته به ماده اولیه (نظیر پسماندهای کشاورزی، فضولات دامی یا ضایعات جنگلی) و شرایط تولید (نظیر دمای پیرولیز و نرخ حرارت دهی)، حاوی برخی از ترکیبات سمی نظیر هیدروکربن های آروماتیک چندحلقه ای و فلزات سنگین باشد که می تواند اثرات منفی بر ریز جانداران خاک، سلامت گیاهان و حتی زنجیره غذایی انسان داشته باشد. بنابراین، اثربخشی بیوپار به عواملی چندبعدی نظیر دمای تولید (۳۰۰-۷۰۰ درجه سانتی گراد)، نوع زیست توده اولیه (لیگنوسلولزی یا پروتئینی)، مدت زمان ماندگاری در خاک و ویژگی های خاک نظیر بافت، رطوبت، pH و ترکیب جامعه میکروبی بستگی دارد.

نتایج: با توجه به نقش مثبت بیوپار در افزایش حاصلخیزی خاک، بهبود نگهداری آب و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای، استفاده از آن به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک با محتوای مواد آلی پایین و مشکلات شوری خاک به شدت توصیه می شود، لیکن انجام بررسی های بیشتر در مورد اثرات محدودکننده (نظیر کاهش دسترسی به برخی ریز مغذی ها) و خطرات احتمالی ناشی از مواد سمی آن در بلندمدت، همچنین مطالعات میدانی برای بهینه سازی دوز و روش کاربرد در شرایط اقلیمی مختلف ضروری به نظر می رسد.

کلید واژه ها: چرخه کربن، حاصلخیزی خاک، فعالیت زیستی خاک، گرماکافت

مقدمه

«ریزجاندانان خاک» برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ انجام شد و نتایج مقالات پژوهشی منتشر شده به زبان‌های انگلیسی و فارسی که به بررسی اثرات بیوپار بر شاخص‌های میکروبی خاک (مانند تنوع، فراوانی و فعالیت) پرداخته‌اند، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کیفی حاصل از این مطالعات با استفاده از روش تحلیل محتوای کیفی، در قالب مکانیسم‌های کلیدی حاکم بر برهم‌کنش بیوپار و ریزجاندانان خاک دسته‌بندی و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

برهم‌کنش بیوپار با قارچ‌های خاک

بیوپار، زیستگاهی مناسب برای قارچ‌های خاکی

نتایج پژوهش‌های متعددی اثبات می‌کند که بیوپار می‌تواند به‌عنوان زیستگاه مناسب برای بسیاری از قارچ‌های خاکی از جمله مایکوریزا عمل نماید (Pai et al., 2024). به‌طور کلی، تخلخل، سطح‌ویژه و ظرفیت نگهداری آب زیاد از یک‌سو و ظرفیت جذب عناصر غذایی و مولکول‌های آلی از سوی دیگر، بیوپار را به یک زیستگاه مناسب برای ریزجاندانان خاک تبدیل می‌کند؛ به‌طوری که آب، اکسیژن، کربن و عناصر غذایی مورد نیاز برای فعالیت ریزجاندانان خاک را در اختیار آنان قرار داده و آن‌ها را از شکار شدن توسط شکارچی‌های طبیعی محافظت می‌نماید و تکیه‌گاه یا بستری فراهم می‌سازد تا ریزجاندانان را از آبهویی و خارج شدن آن‌ها از پروفیل خاک جلوگیری نماید. همچنین، آنان را از شرایط نامساعد محیطی نظیر کمبود رطوبت و pH نامساعد دور می‌سازد (Haider et al., 2022; Pai et al., 2024). بیوپار در ابتدا به‌علت شرایط تولید (دما و فشار بالا) استریل بوده و بعد از تولید از طریق هوا یا خاک آلوده به قارچ‌ها ممکن است به اسپور قارچ‌ها آلوده شود (Haider et al., 2022). هرچه بیوپار دارای تخلخل، سطح‌ویژه و گروه‌های عاملی بیشتر و میزان ترکیبات آلی و فلزات سمی کمتری باشد، برای اقامت ریزجاندانان خاک به‌ویژه قارچ‌ها مناسب‌تر است. بنابراین، چگونگی اثرگذاری بیوپار بر فعالیت‌های زیستی خاک، تا حد زیادی به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن بستگی دارد. این ویژگی‌ها خود متأثر از نوع ماده اولیه و شرایط گرماکافت هستند و از طریق تغییر در نقش بیوپار به عنوان یک زیستگاه، بر فعالیت‌های زیستی خاک اثر می‌گذارند (شکل ۱).

این ویژگی بیوپار به‌طور مستقیم تحت‌تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن قرار دارد؛ به‌طوری که ویژگی‌های فیزیکی نظیر ساختمان متخلخل بیوپار (شکل ۲) به نوع ماده اولیه و شرایط گرماکافت بستگی دارد. دماهای بالا باعث تشکیل درصد بالایی از منافذ با ابعاد نانومتر و میکرومتر در بیوپار شده و سطح ویژه بیوپار را تا چند صد متر مربع بر گرم افزایش می‌دهد. بعد از افزوده شدن بیوپار به خاک، جذب سطحی مواد

تغییرات اقلیمی و تخریب خاک، چالش‌های جهانی پیش‌روی امنیت غذایی هستند که لزوم یافتن راهکارهای نوین برای احیای سلامت و حاصلخیزی خاک را بیش از پیش آشکار می‌سازند. در این میان، ریزجاندانان خاک به‌عنوان بازیگران اصلی چرخه‌های بیوژئوشیمیایی، نقشی حیاتی در عملکرد و تاب‌آوری اکوسیستم‌های خاکی ایفا می‌کنند. با این وجود، شرایط نامساعدی نظیر کمبود مواد آلی در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، بقا و فعالیت این موجودات میکروسکوپی را با چالش مواجه می‌سازد. در پاسخ به این نیاز، بیوپار یا زغال زیستی که از گرماکافت^۱ زیست‌توده در شرایط کم‌اکسیژن و دمای ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس تولید می‌شود، به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک با پتانسیل بالا برای تعدیل محیط خاک و بهبود شرایط برای جامعه میکروبی مورد توجه قرار گرفته است (Azimzadeh and Najafi, 2017).

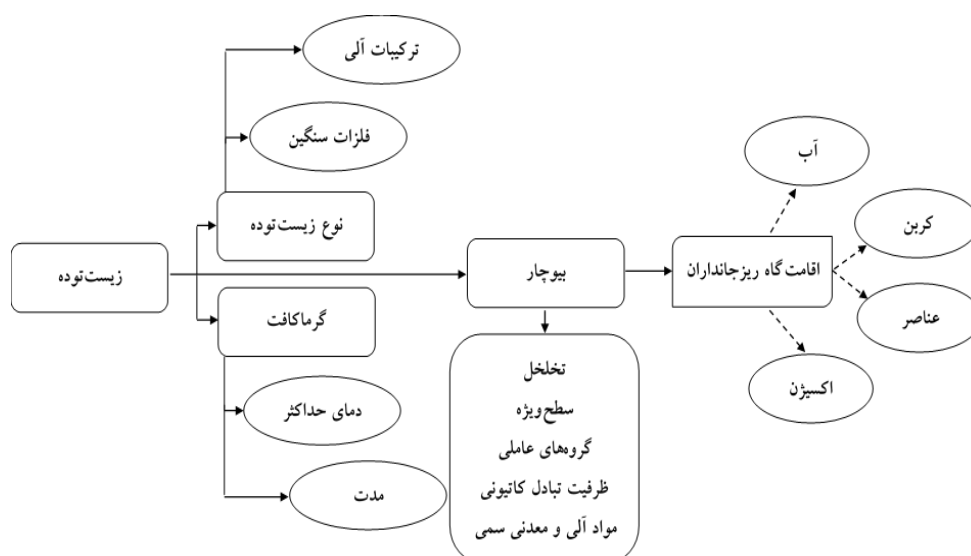
اگرچه بیوپار به دلیل فرآیند تولید در دمای بالا، خود عاری از هرگونه سلول زنده است، اما ویژگی‌های منحصربه‌فرد فیزیکی و شیمیایی آن می‌تواند اثرات شدیدی بر تنوع، ترکیب و عملکرد ریزجاندانان خاک داشته باشد. این اثرات می‌تواند بسته به نوع بیوپار و شرایط و ویژگی‌های خاک ممکن است منفی، خنثی و یا مثبت باشد. برای نمونه، بیوپار می‌تواند با فراهم کردن پناهگاه و اقامتگاه فیزیکی، تأمین تدریجی عناصر غذایی و بهبود شرایط تهویه و رطوبتی خاک، فعالیت زیستی را به شکل چشمگیری افزایش دهد؛ همان‌گونه که در خاک‌های تاریخی و بسیار حاصلخیز تراپرتا^۲ در آمازون شاهد آن هستیم. در مقابل، بیوپارهای تولید شده در دماهای کم ممکن است حاوی برخی از ترکیبات آلی سمی باشند و یا بیوپارهای تولید شده از زیست‌توده‌هایی نظیر لجن فاضلاب و کود مرغی ممکن است مقادیری از عناصر سنگین را داشته باشند که برای بسیاری از ریزجاندانان محدودکننده است (Nguyen et al., 2023). بنابراین، درک جامع برهم‌کنش‌های پیچیده بین بیوپار و ریزجاندانان خاک و سازوکارهای حاکم بر آن، برای بهره‌برداری ایمن و مؤثر از این ماده امری ضروری است. این مقاله مروری قصد دارد تا با واکاوی این روابط، به تصویری روشن‌تر از پتانسیل‌ها و چالش‌های استفاده از بیوپار به‌عنوان یک محرک زیستی در خاک دست یابد.

مواد و روش‌ها

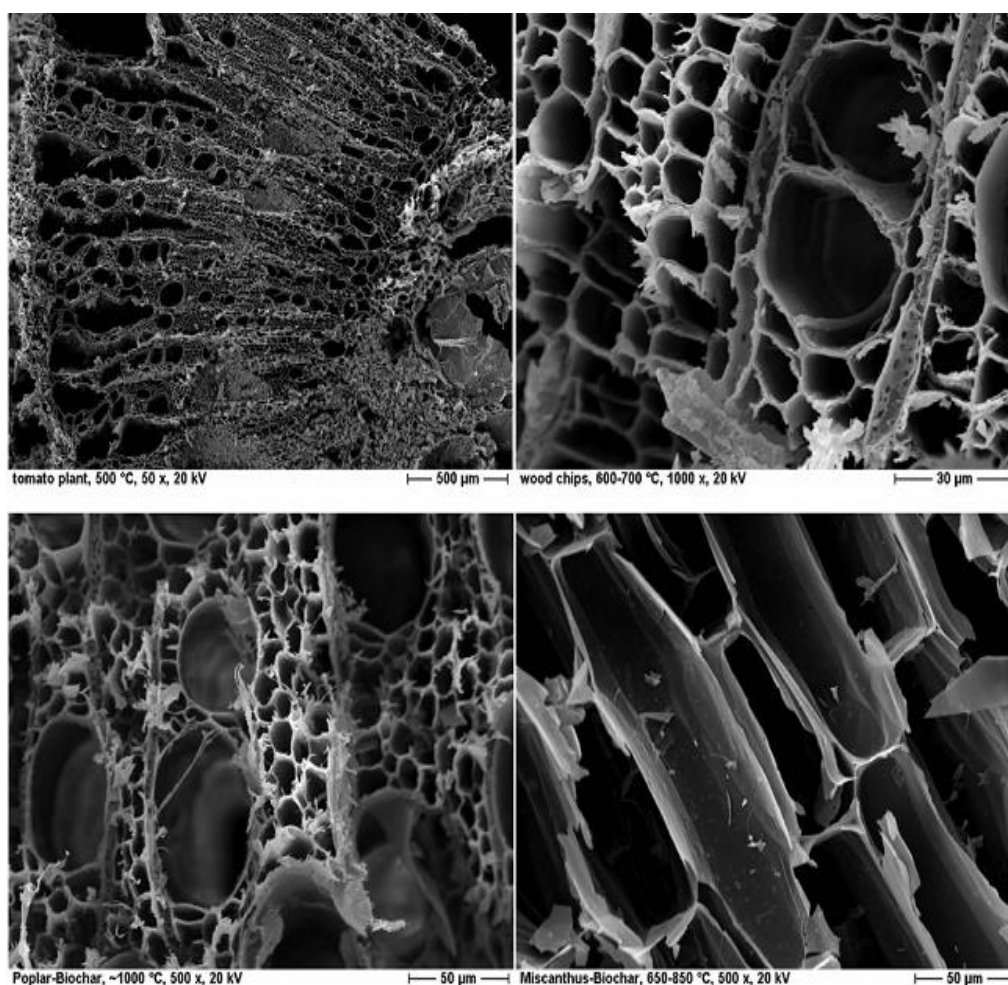
برای انجام این مرور نظام‌مند، جستجوی جامعی در پایگاه‌های داده بین‌المللی (Scopus و Web of Science) و پایگاه‌های داده داخلی (ISC و SID) با استفاده از ترکیبی از کلیدواژه‌های انگلیسی و فارسی مرتبط با «بیوپار» و

بسیاری از قارچ‌ها مابین ۳-۶ میکرومتر بوده و قارچ‌ها تنها می‌توانند در منافذی کلونی تشکیل دهند که بزرگتر از قطر هیف آن‌ها است (Ladygina and Rineau, 2013).

آلی توسط سطوح بیوچار می‌تواند تخلخل و سطح ویژه بیوچار را تحت‌تأثیر قرار دهد؛ زیرا ترکیب‌های آلی با جذب توسط بیوچار باعث بلوکه شدن منافذ و کاهش تخلخل آن می‌شود. قطر هیف



شکل ۱. نقش زیستگاهی بیوچار در بهبود فعالیت‌های زیستی خاک و عوامل مؤثر بر آن



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از بیوچارهای تولید شده از گیاهان مختلف در دماهای مختلف (Ladygina and Rineau, 2013).

• فراهم کردن پناهگاه فیزیکی برای AM که قارچ را از دسترس تراشندگان^{۱۲} خاک محافظت می‌کند (شکل ۳). این سازوکارها ممکن است بر سایر قارچ‌های خاک که بر رشد گیاه اثر منفی دارند نیز مؤثر باشد. البته بیوجار و هیدروچار همیشه بر قارچ‌های AMF اثر مثبت ندارد و کاهش فراوانی قارچ‌های AMF با افزودن بیوجار به خاک نیز گزارش شده است (Solaiman et al., 2010). علت دقیق این کاهش مشخص نیست ولی می‌تواند ناشی از چندین فرضیه زیر باشد (Lehmann et al., 2011):

(۱) کاهش نیاز به هم‌زیستی میکوریزی به علت افزایش فراهمی آب و عناصر برای گیاه (نظیر افزایش فراهمی فسفر در خاک)،

(۲) تغییر در برخی از ویژگی‌های خاک (نظیر pH یا روابط آب)،
(۳) اثرات مستقیم منفی با افزودن میزان زیاد عناصر معدنی یا ترکیب‌های آلی مضر توسط بیوجار (نظیر میزان نمک بالا یا میزان بالای فلزات سنگین)،

(۴) جذب کربن آلی و عناصر دارای پیوندهای آلی توسط بیوجار. دو سازوکار اول مخصوص محیط خاص خاک می‌باشد؛ در حالی که سازوکار سوم نتیجه ویژگی‌های بیوجار می‌باشد که می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی متغیر باشد. سازوکار اول با این‌که بر قارچ هم‌زیست اثر منفی دارد ولی بر فراهمی سایر ریزجانداران نظیر باکتری‌ها می‌تواند اثر مثبت داشته باشد.

تخریب بیوجار با استفاده از قارچ‌های ساپروفیت^{۱۳}

تاکنون تحقیقات اندکی درباره تخریب بیوجار توسط قارچ‌های ساپروفیت انجام شده است. با این‌حال، نتایج چند پژوهش نشان داده است که قارچ‌های تخریب‌کننده چوب قادرند زغال یا بیوجار را نیز تخریب کنند. ترکیب‌هایی نظیر لیگنین و هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای^{۱۴}، بخش‌های آروماتیک تغلیظ شده^{۱۵} و گروه‌های عاملی را در بیوجار تشکیل می‌دهند. بنابراین تخریب بیوجار توسط قارچ‌های ساپروفیت شبیه به تخریب مولکول‌های آروماتیک نظیر لیگنین یا هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای می‌باشد (Kuryntseva et al., 2023).

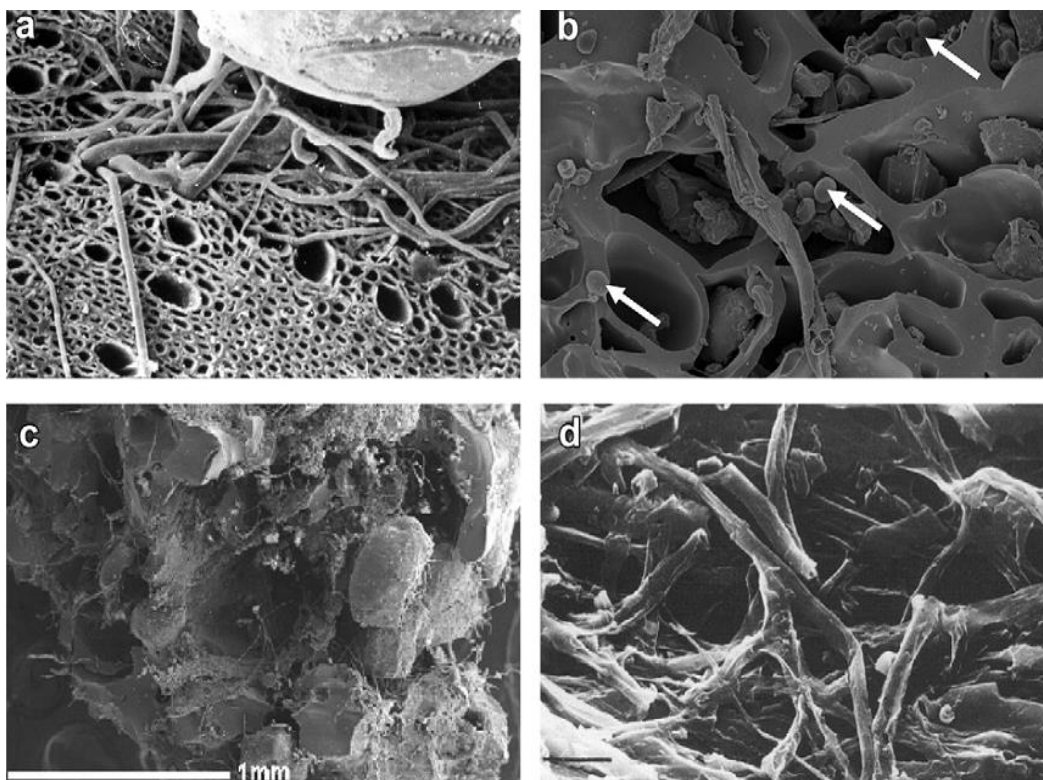
تنوع زیستی و عملکرد قارچ‌های ساپروفیت خاک، نسبت به آلودگی و تغییرهای محیطی حساس می‌باشند. بنابراین، افزودن بیوجار به خاک می‌تواند عملکرد این قارچ‌ها را در خصوص توانایی تخریب زیستی تحت‌تأثیر قرار دهد. قارچ‌های پوسیدگی سفید^{۱۶} قادرند لیگنین را تخریب کنند و ساختارهای آروماتیک خیلی تغلیظ شده نظیر هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای را به مولکول‌های ساده‌تر تبدیل کنند. از این رو، قارچ‌ها می‌توانند پایداری بیوجار را در خاک تحت‌تأثیر قرار دهند.

علاوه بر ساختمان فیزیکی منحصربه‌فرد بیوجار که امکان پناه گرفتن و اقامت ریزجانداران را در آن فراهم می‌سازد، ویژگی‌های عنصری و مولکولی سطوح بیوجار نیز بر رشد و فعالیت ریزجانداران در این سطوح بیوجار مؤثر است. به عنوان مثال، (Ascough et al., 2010) پاسخ دو قارچ ساپروفیت^۲ سفید ریشه (*Pleurotus pulmonarius* و *Trametes versicolor*) به بیوجار به‌عنوان سوبسترای^۴ رشد در زمان کوتاه ۷۰ روزه را بررسی و نتیجه گرفتند که ساختار فیزیکی متناسب بیوجار و عناصر فراهم نظیر فسفر، پتاسیم و کلسیم در سطوح بیوجار دلیل احتمالی افزایش کلونیزاسیون قارچ در بیوجار می‌باشد. قارچ‌ها نسبت به باکتری‌ها تحمل بیشتری به pH اسیدی نشان می‌دهند ولی معمولاً در pH‌های خنثی رشد بهتری دارند. با این حال، باکتری‌ها بسته به گونه، ترجیح‌های متفاوتی نسبت به pH‌های مختلف دارند.

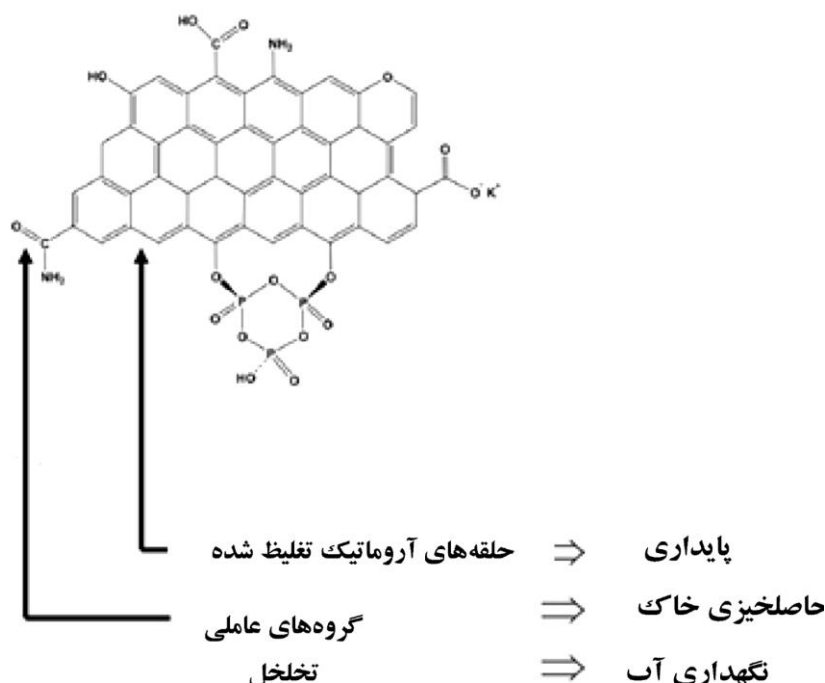
برهم کنش بیوجار و قارچ‌های میکوریز

اثرات مثبت بیوجار بر فراوانی دو گروه مهم از قارچ‌های میکوریز شامل آربوسکولار (AM^۵) و اکتومیکوریز (EM^۶) گزارش شده است. پاسخ گیاه میزبان به میکوریز معمولاً با اندازه‌گیری کلونیزاسیون ریشه اندازه‌گیری می‌شود. (Makoto et al., 2010) نشان دادند که با افزودن بیوجار به خاک، هم سرعت و هم درصد تشکیل اکتومیکوریز هم‌زیست با ریشه کاج اروپایی^۷ به‌میزان ۱۹ تا ۱۵۷٪ افزایش یافت. (Solaiman et al., 2010) نیز به نتایج مشابهی رسیدند؛ آنان مشاهده کردند که دو سال بعد از افزودن بیوجار چوب اوکالیپتوس به‌میزان ۶-۶/۰ تن در هکتار، سرعت کلونیزاسیون AM در ریشه گندم به میزان ۴۰-۲۰ درصد افزایش یافت؛ در حالی که سرعت کلونیزاسیون^۸ در تیمارهای شاهد که بیوجار دریافت نکرده بودند، ۲۰-۵ درصد بود. علاوه بر بیوجار، هیدروچار نیز که با استفاده از فرآیند کربنیزه‌شدن گرمایی^۹ تولید می‌شود و از نظر برخی از ویژگی‌ها با بیوجار متفاوت است، می‌تواند جوانه‌زنی اسپوره‌های قارچ میکوریز آربوسکولار (AMF^{۱۰}) را تحریک کرده و موجب افزایش جمعیت این ریزجانداران در خاک شود (Pai et al., 2024). سازوکارهای بیوجار برای افزایش فراوانی و بهبود عملکرد میکوریز شامل موارد زیر می‌باشد (Elmer and Pignatello, 2011; Solaiman et al., 2010):

- افزایش فراهمی عناصر مورد نیاز AMF‌ها از طریق تحت‌تأثیر قرار دادن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک
- اثرهای مفید یا مضر بر سایر ریزجانداران خاک
- تغییر فرآیندهای سیگنالی بین گیاه و قارچ AMF
- سمیت‌زدایی ترکیب‌های آللوپاتیک شیمیایی^{۱۱} آلی و غیرآلی که بر کلونیزاسیون قارچ‌های AMF مؤثر هستند.



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی از کلونی‌زاسیون قارچ‌ها با بیوچار، هیف‌های قارچی نفوذ یافته به منافذ بیوچار تازه (a)، ریزجانداران موجود در سطوح و درون منافذ بیوچار تازه ذرت (b)، زغال صد ساله حاصل از جنگل‌سوزی باقی‌مانده در یخ (c)، زغال ۳۵۰ ساله حاصل از جنگل‌سوزی باقی‌مانده در یک خاک جنگلی (d) (Lehmann et al., 2011).



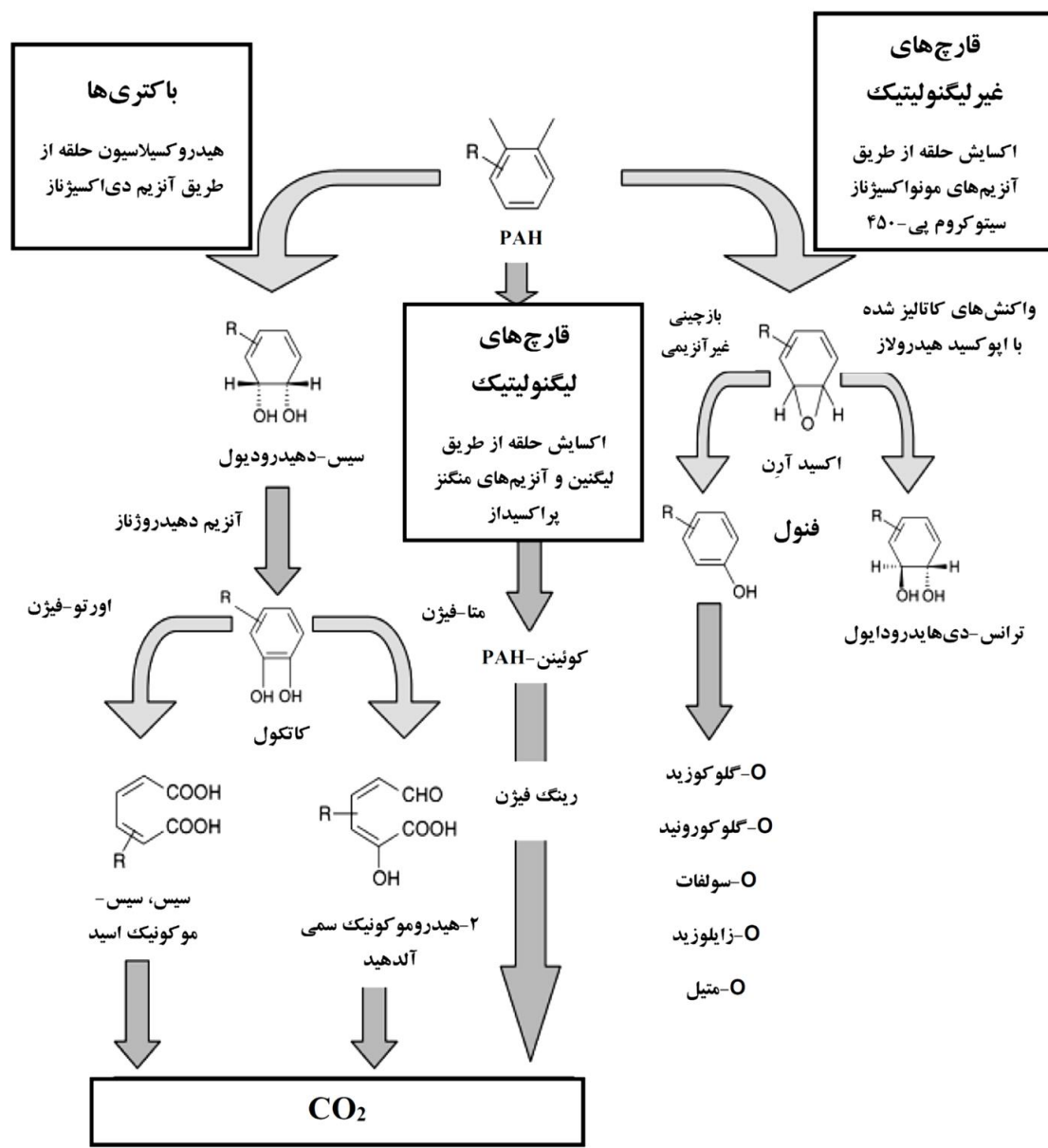
شکل ۴. ساختار فیزیکی و شیمیایی بیوچار و کارکردهای اکولوژیکی آن (Ladygina and Rineau, 2013).

در گذر زمان (هرچند در مدت زمان طولانی) بیوچار را تخریب کنند (Jing et al., 2022; Ladygina and Rineau, 2013). سازوکارهای متعددی در این تخریب مشارکت دارند که عبارتند

قارچ‌های ساپروفیت در خاک‌های حاوی بیوچار زیاد (نظیر خاک‌های تراپرتا^{۱۷}) فراوانی زیادی دارند. اگر چه بیوچار می‌تواند برای هزاران سال در خاک باقی بماند ولی این قارچ‌ها قادرند که

از: تولید آنزیم‌های اکسیدکننده^{۱۸} (نظیر پراکسیدازها^{۱۹} و لاکازها^{۲۰})، آنزیم‌های هیدرولیزکننده^{۲۱} (نظیر استرازها^{۲۲})، متابولیت‌های آلکالین (نظیر آمونیاک) و کلات‌کننده‌های طبیعی (نظیر اغزالات آمونیوم و سایدروفورها) (Cai et al., 2022). درواقع، سازوکار تخریب زیستی^{۲۳} بیوجار شبیه به سازوکار تخریب هیدروکربن‌های آروماتیک چندقلقه‌ای می‌باشد؛ چرا که این ترکیبات و بیوجار تحت فرآیندهای سنتزی یکسانی (گرماکافت) تولید می‌شوند و ساختار شیمیایی، به‌ویژه اسکلت پلی‌آروماتیک یکسانی دارند (شکل‌های ۴ و ۵).

سازوکارهای تخریب زیستی هیدروکربن‌های آروماتیک چندقلقه‌ای در مقایسه با تخریب بیوجار شناخته شده‌تر



شکل ۵. مکانیسم تخریب PAHs توسط باکتری‌ها و قارچ‌ها (Ladygina and Rineau, 2013).

برهمکنش های بیوچار و قارچ های بیماری زا

نتایج بررسی ها نشان می دهد که اثرات مفید بیوچار بر سلامت گیاه بیش از ۱۵۰ سال پیش گزارش شده است (Ladygina and Rineau, 2013). Allen, (1847) در یک آزمایش مزرعهای اثرات مفید زغال چوب را در اصلاح بیماری سیبزمینی^{۲۴} گزارش کرد. Retan, (1915) کاهش بیماری های خاکی^{۲۵} گیاه را بعد از افزودن زغال چوب به خاک گزارش کرد. اخیراً موضوع اثر بیوچار بر آفات و بیماری ها و سلامت گیاه دوباره مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و تحقیقات در این مورد از سر گرفته شده است. از میان قارچ های بیماری زایی که در کشاورزی مطرح هستند، جنس فوزاریوم^{۲۶} فراوان ترین قارچ بیماری زا محسوب می شود که مشکلاتی نظیر از بین بردن قدرت جوانه زنی، کاهش کمیت و کیفیت محصول و کاهش تولید ایجاد می کند. (Elmer and Pignatello, 2011) برهمکنش بیوچار و قارچ های *Fusarium oxysporum* و *Fusarium proliferatum* را در گیاه مارچوبه بررسی کرده و مشاهده کردند که گیاهان تلقیح شده با قارچ های میکروبی مقاومت بیشتری در برابر این قارچ های بیماری زا نشان دادند و افزودن بیوچار به خاک، میزان مقاومت گیاه در برابر قارچ های مهاجم را افزایش داد. بیوچار می تواند با اثر بر رشد میکروبی آربوسکولار، گیاه را در برابر پاتوژن های قارچی مقاوم تر سازد.

تولید بیوچار توسط قارچ ها

شواهدی وجود دارد که نشان می دهد قارچ ها نیز می توانند بیوچار یا ترکیب هایی شبیه به بیوچار را تولید نمایند (Glaser and Knorr, 2008). آسپرژیلین^{۲۷} یک رنگدانه سیاه شبیه به بیوچار است که در خاک های حاوی ساختارهای آروماتیک تغلیظ شده یافت می شود و غالباً توسط قارچ های *Aspergillus niger* که از مهم ترین گونه های جنس *Aspergillus* می باشد

تولید می شود. مشارکت آسپرژیلین در محتوای بیوچار خاک زیاد مورد بررسی قرار نگرفته است، با این حال، Glaser and Knorr, (2008) با استفاده از کربن نشان دار (¹³C) نشان دادند که بعد از ۲۳ سال حدود ۹ درصد از کل بیوچار خاک به صورت زیستی تشکیل شد.

برهمکنش بیوچار با باکتری های خاک

نقش بیوچار در فراوانی باکتری ها

سرعت تکثیر میکروبی در خاک های دریافت کننده بیوچار معمولاً بیشتر است. در راکتورهای هضم کننده زیستی^{۲۸} که زیست توده را به منظور تولید متان به صورت بی هوازی هضم می کنند، افزودن بیوچار باعث افزایش جمعیت باکتری های بی هوازی و هیدرولیز کننده سلولز^{۲۹} می شود. دلایل تغییر در فراوانی میکروبی متأثر از بیوچار، برای گروه های مختلف ریزجانداران ممکن است متفاوت باشد. برخی از سازوکارهایی که بیوچار بر فراوانی میکروبی خاک تأثیر می گذارند عبارتند از: حفاظت از باکتری یا قارچ در مقابل تراشندگان، فراهم کردن آب مورد نیاز ریزجانداران، فراهم کردن عناصر غذایی نظیر فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم، افزایش فراهمی عناصر غذایی کم مصرف، تعدیل pH، جذب ترکیب های سیگنالی، جذب ترکیب های فنولی و افزایش نیترا سازی، تشکیل بیوفیلم، جذب ترکیب های بازدارنده ریزجانداران و جذب مواد آلی محلول به عنوان منبع انرژی برای ریزجانداران، رفع مسمومیت ترکیب های آللوپاتیک شیمیایی یا اثرات غیرمستقیم از طریق تغییر جمعیت سایر میکروب های خاک (جدول ۱) (Lehmann et al., 2011). جدول ۱، برخی از سازوکارهایی را که بیوچار ممکن است در فراوانی ریزجانداران خاک موثر باشد را به اختصار نشان می دهد.

جدول ۱. خلاصه سازوکارهای احتمالی بیوچار برای افزایش فراوانی ریزجانداران خاک، علامت + نشان دهنده تأثیر احتمالی مثبت و علامت - نشان دهنده تأثیر احتمالی منفی بر فراوانی ریزجانداران است (Lehmann et al., 2011).

مکانیسم	ریزوبیوم	سایر باکتری ها	میکوریز	سایر قارچ ها
محافظت در برابر تراشنده ها	nc	(+)	(+)	(+)
تأمین آب	+	+	?	? or ±
افزایش فراهمی P, K, Ca و Mg	+	+	-	-
افزایش فراهمی عناصر کم مصرف	+	+	-	?
افزایش pH	+	+	ns	nc
کاهش pH	-	-	ns	nc or -
جذب ترکیب های سیگنالی	? or -	?	?	?
افزایش فراهمی نیتروژن	-	+ or -	ns	nc
جذب ریزجانداران	nc	+	ns	nc
تشکیل بیوفیلم	+	+	?	?
جذب ترکیب های بازدارنده ریزجانداران	?	+	?	?
جذب مواد آلی محلول به عنوان منبع انرژی ریزجانداران	?	?	nc	?

nc: عدم تغییر، ؟: تأثیر ناشناخته، پراکنده؛ عدم وجود شواهد معتبر

اثر فراهمی کربن و عناصر در فراوانی ریزجاندانان

بعد از فرآیند گرماکافت، ممکن است مواد و ترکیب‌های مختلفی شامل خاکستر، روغن زیستی و مواد فرار^{۲۰} در سطح بیوچار باقی بماند. مواد فرار بیوچار در طی فرآیند گرماکافت تشکیل می‌شوند و شامل طیف گسترده‌ای از ترکیب‌های آلی فرار و نیمه‌فرار شامل انواع مختلفی از مولکول‌های آلی شامل پیرولیگنوز اسید^{۲۱}، بنزوئیک اسید^{۲۲}، هیدروکسی و استوکسی اسید^{۲۳}، n-آلکانوئیک اسید^{۲۴}، آمین‌ها^{۲۵}، دیول‌ها^{۲۶}، تریول‌ها^{۲۷} و فنول‌ها^{۲۸} می‌باشند (Kuryntseva et al., 2023). سرنوشت این ترکیب‌های باقی‌مانده در سطح بیوچار، بعد از افزوده شدن به خاک و در طول زمان هنوز مشخص نشده است. انتظار می‌رود که ترکیب‌های قابل‌حل در آب نظیر اسیدها، الکل‌ها، آلدئیدها، کتون‌ها و قندها که توسط ریزجاندانان خاک به‌راحتی متابولیزه می‌شوند، اثرهای مثبتی بر ریزجاندانان خاک داشته باشند؛ در حالی که ممکن است حضور ترکیب‌هایی نظیر هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای، زایلنوز^{۲۹}، اکرولین^{۳۰}، فرمالدهید^{۳۱}، کرسولز^{۳۲} و سایر ترکیب‌های کربوکسیلی سمی که بسته به شرایط گرماکافت ممکن است از طریق بیوچار به خاک افزوده شوند، دارای اثرهای ضدباکتریایی و ضدقارچی باشند (Painter, 1998). Karami et al. (2021) گزارش کردند که بیوچار تولید شده از بقایای ذرت و نیشکر تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی را به طور معنی‌دار افزایش داد. آنان به این نتیجه رسیدند که بیوچار تولید شده از نیشکر به دلیل کربن بیشتر، بر خصوصیات بیولوژیکی وابسته به کربن بیشترین تأثیر را داشت. بسیاری از نگرانی‌هایی که در ارتباط با اثرات منفی بیوچار بر بیوتای خاک مطرح می‌باشد در ارتباط با بخش فراهمی یا قابل معدنی شدن بیوچار (مواد فرار) و همچنین عناصری نظیر سدیم (Na) و کلر (Cl) است. البته نگرانی از این مواد در بلندمدت کمتر است؛ زیرا مواد فرار معدنی می‌شوند و نمک‌ها از خاک شسته خواهند شد. با این حال، باید در اصلاح خاک با بیوچار اثرات آن‌ها در کوتاه‌مدت در نظر گرفته شود.

افزودن عناصر غذایی از طریق کودها به خاک، ممکن است اثر بیوچار بر سرعت تکثیر ریزجاندانان خاک را کاهش دهد. Blackwell et al. (2010) مشاهده کردند که افزودن بیوچار به خاک، بدون افزودن کود باعث افزایش کلونیزاسیون قارچ‌های AM با ریشه گندم شد. در حالی که با افزودن کود، اثر معناداری از بیوچار مشاهده نشد. شدت ممانعت از اثرگذاری بیوچار بر فراوانی ریزجاندانان، به نوع کود و گروه ریزجاندانان بستگی دارد. به‌عنوان مثال، در یک تحقیق، آلودگی میکوریزی در حضور بیوچار با افزودن کودهای حاوی فسفر کاهش یافت. در حالی که این کاهش با افزودن کودهایی که تنها حاوی نیتروژن بودند مشاهده نشد (Lehmann et al., 2011).

Ogawa and Okimori, (2010) در مورد گره‌زایی ریزوبیوم‌ها عکس این مشاهدات را گزارش کردند. در واقع، این مسئله را می‌توان با نیازهای متفاوت گیاه برای تشکیل رابطه هم‌زیستی با ریزجاندانان که بر اثر محدودیت عناصر غذایی ایجاد می‌شود، توضیح داد. وقتی کود حاوی نیتروژن به خاک افزوده می‌شود، نیتروژن کافی در اختیار گیاه قرار گرفته و ممکن است گیاه به نیتروژن حاصل از تثبیت زیستی نیازی نداشته باشد. درحالی که در شرایطی که گیاه با محدودیت نیتروژن مواجه می‌شود، برای تأمین نیتروژن مورد نیاز خود، نیاز به ایجاد هم‌زیستی با ریزجاندانان تثبیت‌کننده نیتروژن پیدا می‌کند. البته، غیر از نیتروژن، تغییر در فراهمی سایر عناصر در خاک نیز ممکن است بر جمعیت ریزوبیوم‌ها در خاک مؤثر باشد. به‌عنوان مثال، به عقیده Rondon et al. (2007) افزایش غلظت عناصر کم‌مصرف نظیر مولیبدن و بور بر اثر کاربرد بیوچار، احتمالاً یکی از دلایل اصلی بهبود تثبیت زیستی نیتروژن (BNF^{۳۳}) توسط ریزوبیوم‌ها در ریشه لگوم‌ها می‌باشد. ولی این دلیل را نمی‌توان به فراوانی ریزوبیوم‌ها نیز تعمیم داد. به‌عنوان مثال، Vantsis and Bond, (1950) مشاهده کردند که بیوچار بر وزن خشک و فعالیت گره‌های ریزوبیوم‌ها اثر چندانی نداشت. آنان علت بهبود BNF توسط بیوچار را به جذب مواد سمی توسط بیوچار مربوط دانستند. به عقیده Turner, (1955) جذب ترکیب‌های بازدارنده توسط بیوچار، گره‌زایی ریزوبیوم را افزایش و زمان بین تلقیح و اولین ظهور گره‌ها را کاهش می‌دهد. در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، بیوچار می‌تواند با افزایش pH و جذب فلزات سنگین، فراهمی آن‌ها را در خاک کاهش داده و رشد و فعالیت ریزجاندانان را در خاک بهبود بخشد (Ladygina and Rineau, 2013).

بیوچار می‌تواند عناصر غذایی را جذب و نگهداری کرده و در اختیار ریزجاندانان قرار دهد. از سوی دیگر، بسته به نوع بیوچار، برخی از عناصر غذایی ممکن است مستقیماً از بیوچار به خاک اضافه شده و در اختیار ریزجاندانان قرار گیرد. بنابراین، در شرایط محدودیت عناصر غذایی، ممکن است فراوانی ریزجاندانان، به‌ویژه ریزجاندانان غیرهم‌زیست، به‌علت افزایش فراهمی نسبی عناصر غذایی افزایش یابد. در بسیاری از موارد، با افزودن بیوچار به خاک، کاهش فراوانی ریزوبیوم‌ها و میکوریزا در نتیجه افزایش فراهمی به‌ترتیب نیتروژن و فسفر مشاهده شده است. با این حال، Jin (2010) مشاهده کرد که افزودن بیوچار به خاک باعث افزایش فراوانی ریزجاندانان در خاک شد و میزان این افزایش در ریزوسفر بیشتر از توده خاک بود. در حالی که Graber et al. (2010) عکس این مشاهده را گزارش کردند. بنابراین، اثر بیوچار بر فراوانی ریزجاندانان در خاک بسیار پیچیده بوده و به عوامل بسیار زیادی بستگی دارد.

اثر pH بر فراهمی ریزجانداران

پاسخ جوامع قارچی و باکتریایی به تغییرهای pH در خاک متفاوت می‌باشد. معمولاً با افزایش pH تا حدود ۷، فراوانی باکتری‌ها افزایش می‌یابد؛ ولی ممکن است در زیست‌توده قارچ‌ها تغییری ایجاد نشود و با حتی رشد آن‌ها در pHهای بالا به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد (Ahmad et al., 2025). با افزودن بیوپچار به خاک، بسته به pH و اثر آهک بیوپچار و pH اولیه خاک، pH خاک ممکن است افزایش یا کاهش یابد. pH بیوپچارها بسته به نوع زیست‌توده، دمای گرم‌کافت و درجه اکسیداسیون، از حدود ۴ تا بیش از ۱۲ متغیر می‌باشد (Lehmann and Joseph, 2024). در یک تحقیق، بعد از افزودن بیوپچار به یک خاک فراسول اسیدی، تغییرهای pH خاک با زیست‌توده میکروبی همبستگی مثبت نشان داد که نشان می‌دهد pH این خاک اسیدی با افزودن بیوپچار افزایش یافته و باعث تشدید تکثیر و فعالیت میکروبی در آن شده است (Steiner et al., 2004). هنظیر اثر فراهمی کربن و عناصر، اثر تغییرهای pH ناشی از بیوپچار نیز به pH اولیه خاک بستگی زیادی دارد. باکتری‌های اتوتروف نیتروژن‌تور^{۴۴} به شرایط کمتر اسیدی خاک سازگاری دارند. بنابراین افزودن بیوپچار به خاک معدنی که باعث افزایش pH خاک می‌شود و به‌طور مطلوب نیترات‌سازی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد.

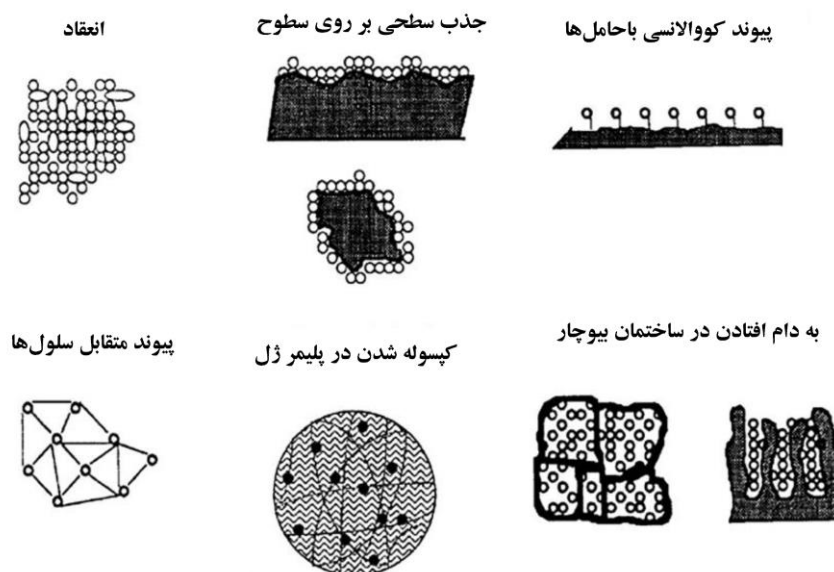
اثر جذب سطحی باکتری توسط بیوپچار بر فراوانی ریزجانداران

بیوپچار با جذب سطحی باکتری‌ها می‌تواند آن‌ها را از آبشویی محافظت کند. این مسئله ممکن است فراوانی باکتری‌ها را در خاک افزایش دهد ولی اثر قابل‌توجهی بر فراوانی قارچ‌ها ندارد؛ زیرا قارچ‌ها خودشان به‌علت داشتن شبکه هیفی گسترده،

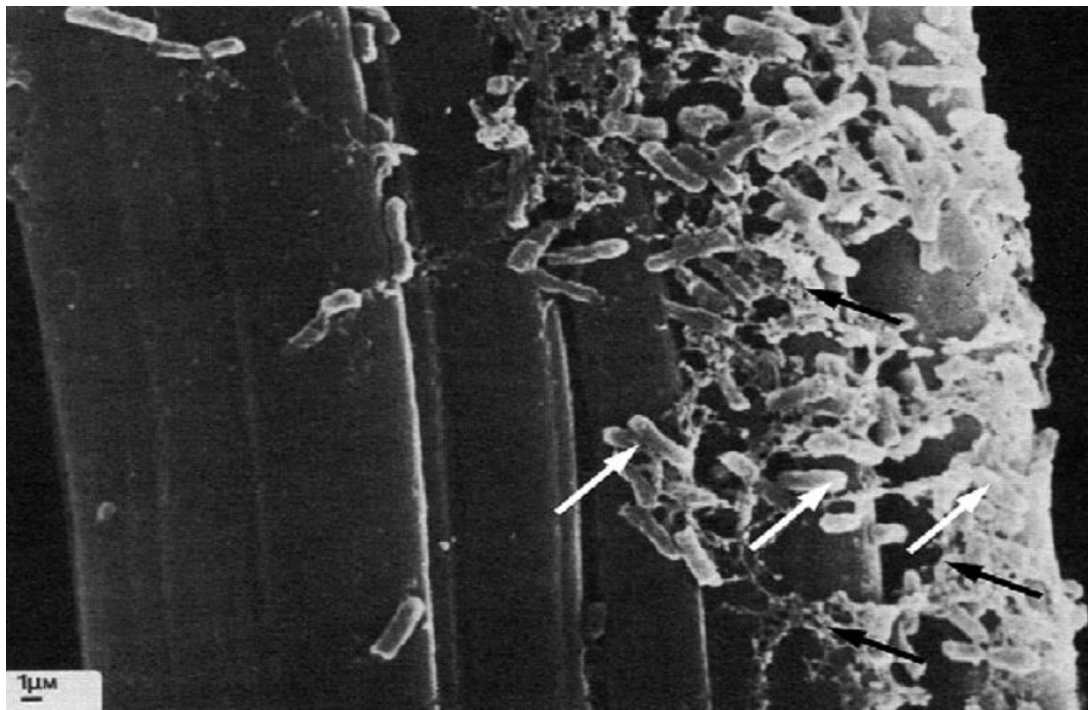
تحرك کمتری در خاک دارند و خود در برابر آبشویی از خاک مقاوم می‌باشند. فرآورده‌های اصلی که منجر به چسبندگی باکتری به سطوح بیوپچار می‌شود عبارتند از (۱) انعقاد^{۴۵}، (۲) جذب بر روی سطوح، (۳) پیوند کووالانسی با حامل‌ها^{۴۶}، (۴) پیوند متقابل سلول‌ها^{۴۷}، (۵) کپسوله شدن در پلیمر ژل^{۴۸} و (۶) به دام افتادن در ساختمان بیوپچار^{۴۹}. شکل ۶ هر یک از این سازوکارها را به‌طور خلاصه و شماتیک نشان می‌دهد (Lehmann et al., 2011).

چسبندگی^{۵۰} به اندازه منافذ نیز بستگی دارد. به‌عنوان مثال، اندازه منافذ برای چسبندگی بهینه باکتری‌های *Bacillus mucilaginosus* و *Acinetobacter* sp حدود ۴-۲ میکرومتر تعیین شده است (Samonin and Elikova, 2004). به‌طور کلی، اندازه منافذ برای چسبندگی بهینه میکروب‌ها حدود ۵-۲ برابر بزرگ‌تر از اندازه سلول، پیشنهاد شده است تا دارای انحنای بزرگ‌تری‌اند؛ بنابراین چسبندگی ریزجانداران به‌خوبی انجام نمی‌شود. در منافذ کوچک‌تر نیز ریزجانداران نمی‌توانند به‌خوبی جای گیرند. از این رو، منافذ کوچک‌تر و بزرگ‌تر برای چسبندگی بهینه مناسب نیستند (Samonin and Elikova, 2004). بنابراین، توانایی بیوپچار در نگهداری باکتری‌ها بسته به ویژگی‌های بیوپچار شامل میزان خاکستر، اندازه منافذ و میزان مواد فرار می‌تواند بسیار متغیر باشد.

حضور برخی از عناصر می‌تواند باعث بهبود جذب باکتری به سطوح بیوپچار شود. جذب سطحی ممکن است با تشکیل رسوبات روی سطوح کربن تحت جریان الکتریکی تسهیل شود (شکل ۷) (Lehmann et al., 2011).



شکل ۶. سازوکارهای اتصال سلول‌های میکروب‌های زنده به سطوح (Lehmann et al., 2011).



شکل ۷. جذب باکتری اشیریشیا کولای^{۵۱} به سطح بیوچار

اثر جذب ترکیب‌های بازدارنده توسط بیوچار بر فراهمی ریزجانداران جذب ترکیب‌های بازدارنده رشد میکروب‌ها توسط بیوچار ممکن است فراوانی میکروب‌ها را افزایش دهد. Kasozi et al. (2010) نشان دادند که ترکیب‌هایی نظیر کتیکول^{۵۲} که برای ریزجانداران سمی می‌باشد، توسط بیوچار تولید شده از کلش ذرت در دمای بالا (حاوی خاکستر زیاد) به شدت جذب می‌شود. همچنین در یک تحقیق، افزودن بیوچار تولید شده به‌روش گرماکافت سریع به خاکی که با اسیدهای آروماتیک (اسیدهای سینامیک^{۵۳}، کوماریک^{۵۴} و فرولیک^{۵۵}) آلوده شده بود، باعث افزایش کلونیزاسیون قارچ AM در مارچوبه شد. گرافیت و کربن فعال که ویژگی‌های مشابه با بیوچار تولید شده در دمای بالا دارند، کلونیزاسیون و جوانه‌زنی سویه‌های باسیلوس را در حضور میزان نمک زیاد در محیط آگار افزایش داد (Matsushashi et al., 1995). از سوی دیگر، بیوچار ممکن است با جذب ترکیب‌های آلی سیگنالی نظیر فلاونوئیدها و ایجاد تداخل در عملکرد سیستم سیگنالی، کلونیزاسیون را تحت‌تأثیر قرار دهد (Lehmann et al., 2011).

اثر جذب ترکیب‌های بازدارنده توسط بیوچار بر فراهمی ریزجانداران جذب ترکیب‌های بازدارنده رشد میکروب‌ها توسط بیوچار ممکن است فراوانی میکروب‌ها را افزایش دهد. Kasozi et al. (2010) نشان دادند که ترکیب‌هایی نظیر کتیکول^{۵۲} که برای ریزجانداران سمی می‌باشد، توسط بیوچار تولید شده از کلش ذرت در دمای بالا (حاوی خاکستر زیاد) به شدت جذب می‌شود. همچنین در یک تحقیق، افزودن بیوچار تولید شده به‌روش گرماکافت سریع به خاکی که با اسیدهای آروماتیک (اسیدهای سینامیک^{۵۳}، کوماریک^{۵۴} و فرولیک^{۵۵}) آلوده شده بود، باعث افزایش کلونیزاسیون قارچ AM در مارچوبه شد. گرافیت و کربن فعال که ویژگی‌های مشابه با بیوچار تولید شده در دمای بالا دارند، کلونیزاسیون و جوانه‌زنی سویه‌های باسیلوس را در حضور میزان نمک زیاد در محیط آگار افزایش داد (Matsushashi et al., 1995). از سوی دیگر، بیوچار ممکن است با جذب ترکیب‌های آلی سیگنالی نظیر فلاونوئیدها و ایجاد تداخل در عملکرد سیستم سیگنالی، کلونیزاسیون را تحت‌تأثیر قرار دهد (Lehmann et al., 2011).

نقش بیوچار در کو-متابولیسم^{۶۰} و اثر تحریکی^{۶۱}

بیوچار در خاک پایداری بالایی داشته و می‌تواند کربن اتمسفر را برای سالیان زیاد در خاک تثبیت نماید. با این حال، چند سازوکار پیچیده و کمتر شناخته شده نظیر کو-متابولیسم و اثر تحریکی در خاک وجود دارد که ممکن است ترکیب‌های کربن فراهم و پایداری بیوچار را در خاک تحت‌تأثیر قرار دهد. اصطلاح کو-متابولیسم بر اساس اصطلاح "Co-oxidation" بوده

اثر حفاظت ریزجانداران در برابر خشک شدن بر فراوانی ریزجانداران خشک شدن دوره‌ای خاک منجر به ایجاد تنش در موجودات زنده خاک و در نهایت منجر به مرگ آن‌ها می‌شود. ریزجانداران خاک‌زی بسته به این‌که باکتری یا قارچ باشند و بسته به گرم مثبت و یا گرم منفی بودن باکتری‌ها، درجات مختلفی از مقاومت در برابر این تنش را نشان می‌دهند

می‌تواند جمعیت، تنوع و فعالیت ریزجانداران خاک را تحت تأثیر قرار دهد. از سایر سازوکارهای بیوچار برای افزایش جمعیت و فعالیت میکروبی خاک می‌توان به افزودن مستقیم برخی از عناصر به خاک، سمیت زدایی ترکیبات سمی آلی و غیرآلی، تقویت همزیستی‌های هم‌افزایی (نظیر کو-متابولیسم) و تسهیل چرخه‌های بیوژئوشیمیایی عناصر (کربن، نیتروژن، فسفر، گوگرد) اشاره کرد. با این که بیوچار به علت دمای زیاد فرآیند تولید، یک ماده استریل و عاری از پاتوژن محسوب می‌شود، اما بسته به نوع ماده اولیه و شرایط تولید، ممکن است حاوی برخی از ترکیبات آلی و غیرآلی سمی از جمله فلزات سنگین و مواد سمی فرار باشد. این مواد سمی علاوه بر این که ممکن است برای گیاه، حیوان و انسان سمی باشد، می‌تواند برای فعالیت ریزجانداران خاک هم محدودیت ایجاد کند. بنابراین، با وجود برهم‌کنش‌های مثبت و هم‌افزای بیوچار و ریزجانداران در بهبود فعالیت‌های زیستی و ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی خاک و عملکرد محصول، شدت و جهت این برهم‌کنش‌ها و اثربخشی آن تحت تأثیر شرایط تولید از جمله دمای گرم‌ماکافت و نوع زیست‌توده اولیه و ویژگی‌های خاک نظیر بافت، رطوبت و جامعه میکروبی بومی قرار دارد. با توجه به برهم‌کنش‌های مثبت بین بیوچار و ریزجانداران خاک و نقش مثبت بیوچار در افزایش فعالیت زیستی خاک، کاربرد بیوچار در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک که مبتلا به فقر مواد آلی هستند پیشنهاد می‌شود. با این حال، اثرات محدودکننده بیوچار بر ریزجانداران خاک و میزان خطرهای ناشی از ورود مواد سمی موجود در آن به زنجیره غذایی انسان نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد.

و اولین بار توسط Leadbetter and Foster, (1959) برای توصیف اکسیداسیون یک ماده توسط ریزجانداران بدون مصرف انرژی حاصل از آن به کار برده شد. کو-متابولیسم عبارت است از تجزیه و تخریب هم‌زمان دو ماده (سوبسترا) که تجزیه و تخریب ماده دوم به حضور ماده اول بستگی دارد. اثر تحریکی عبارت است از اثر مواد آلی افزوده شده به خاک بر میزان تجزیه و تخریب مواد آلی موجود در خاک. از آنجایی که مواد آلی عمدتاً از کربن و نیتروژن تشکیل شده‌اند، افزودن یک ماده حاوی نسبت مشخصی از کربن و نیتروژن به خاک می‌تواند اثر زیادی بر رشد و فعالیت ریزجانداران تجزیه‌کننده مواد آلی در خاک داشته باشد. بیوچار به عنوان یک ماده آلی پایدار می‌تواند در هر دو سازوکار یاد شده در خاک دخالت کند ولی اطلاعات ما در این مورد بسیار محدود است و ارتباط هر یک از این دو سازوکار با بیوچار نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

نتیجه‌گیری

بیوچار به واسطه ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله محتوای کربن پایدار، ساختار متخلخل، سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد، زیستگاه مناسبی برای استقرار و فعالیت ریزجانداران مفید خاکی از جمله قارچ‌های میکوریزی، باکتری‌های محرک رشد گیاه و تجزیه‌کننده‌های آلی فراهم می‌کند و ضمن این که از آن‌ها در برابر شکارگرهای طبیعی و شسته شدن از خاک حفاظت می‌کند، آب، اکسیژن، عناصر غذایی و کربن مورد نیاز آن‌ها را تأمین می‌نماید. علاوه بر آن، این ماده کربنی از طریق تأثیر مستقیم و غیرمستقیم بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک،

Reference:

- Ahmad, B., Rahim, H. U., Mian, I. A., & Ali, W. (2025). Synergistic Biochar–Nitrogen Application Enhances Soil Fertility and Compensates for Nutrient Deficiency, Improving Wheat Production in Calcareous Soil. *Sustainability*, 17(5), 2321.
- Allen, R. L. (1847). A brief compend of American agriculture. Author.
- Ascough, P. L., Sturrock, C. J., & Bird, M. I. (2010). Investigation of growth responses in saprophytic fungi to charred biomass. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 46(1), 64–77.
- Azimzadeh, Y., & Najafi, N. A. (2017). Effects of biochar on soil physical, chemical, and biological properties. *Land Management Journal*, 4(2), 161–173. [in Persian]
- Azimzadeh, Y., & Mohammadzadeh, A. (2023). Interaction of biochar with soil components and its stability with during time. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 13(3), 121–136. [in Persian]
- Blackwell, P., Krull, E., Butler, G., Herbert, A., & Solaiman, Z. (2010). Effect of banded biochar on dryland wheat production and fertiliser use in south-western Australia: an agronomic and economic perspective. *Soil Research*, 48(7), 531–545.
- Cai, Y., Zhu, M., Meng, X., Zhou, J. L., Zhang, H., & Shen, X. (2022). The role of biochar on alleviating ammonia toxicity in anaerobic digestion of nitrogen-rich wastes: A review. *Bioresource Technology*, 351, 126924.
- 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.
- Leadbetter, E. R., & Foster, J. W. (1959). Oxidation products formed from gaseous alkanes by the bacterium *Pseudomonas methanica*. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 82(2), 491–492.
- Glaser, B., & Knorr, K. (2008). Isotopic evidence for condensed aromatics from non-pyrogenic sources in soils—implications for current methods for quantifying soil black carbon. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 22(7), 935–942.

- Graber, E. R., Meller Harel, Y., Kolton, M., Cytryn, E., Silber, A., Rav David, D., Tsechansky, L., Borenshtein, M., & Elad, Y. (2010). Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant and Soil*, 337, 481–496.
- Haider, F. U., Coulter, J. A., Cai, L., Hussain, S., Cheema, S. A., Wu, J., & Zhang, R. (2022). An overview on biochar production, its implications, and mechanisms of biochar-induced amelioration of soil and plant characteristics. *Pedosphere*, 32(1), 107–130.
- Jing, F., Sun, Y., Liu, Y., Wan, Z., Chen, J., & Tsang, D. C. W. (2022). Interactions between biochar and clay minerals in changing biochar carbon stability. *Science of the Total Environment*, 809, 151124.
- Jin, H. (2010). Characterization of microbial life colonizing biochar and biochar-amended soils. Dissertation in Doctor of Philosophy, Cornell University.
- Karami, S., Landi, A., Enayatizamir, N., & Zalaghi, R. (2021). Effect of corn and sugarcane biochars on some soil biological properties and carbon sequestration. *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(5(108)), 57–69. [in Persian]
- Kasozi, G. N., Zimmerman, A. R., Nkedi-Kizza, P., & Gao, B. (2010). Catechol and humic acid sorption onto a range of laboratory-produced black carbons (biochars). *Environmental Science & Technology*, 44(16), 6189–6195.
- Kuryntseva, P., Karamova, K., Galitskaya, P., Selivanovskaya, S., & Evtugyn, G. (2023). Biochar functions in soil depending on feedstock and pyrolyzation properties with particular emphasis on biological properties. *Agriculture*, 13(10), 2003.
- Ladygina, N., & Rineau, F. (2013). Biochar and soil biota. CRC Press.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2024). Biochar for environmental management: Science, technology and implementation. Taylor & Francis.
- 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(9), 1812–1836.
- Makoto, K., Tamai, Y., Kim, Y. S., & Koike, T. (2010). Buried charcoal layer and ectomycorrhizae cooperatively promote the growth of *Larix gmelinii* seedlings. *Plant and Soil*, 327, 143–152.
- Malik, K. A. (1990). Use of activated charcoal for the preservation of anaerobic phototrophic and other sensitive bacteria by freeze-drying. *Journal of Microbiological Methods*, 12(2), 117–124.
- Matsushashi, M., Pankrushina, A. N., Endoh, K., Watanabe, H., Mano, Y., Hyodo, M., Fujita, T., Kunugita, K., Kaneko, T., & Otani, S. (1995). Studies on carbon material requirements for bacterial proliferation and spore germination under stress conditions: a new mechanism involving transmission of physical signals. *Journal of Bacteriology*, 177(3), 688–693.
- Nguyen, T.-B., Sherpa, K., Bui, X.-T., Nguyen, V.-T., Vo, T.-D.-H., Ho, H.-T.-T., Chen, C.-W., & Dong, C.-D. (2023). Biochar for soil remediation: A comprehensive review of current research on pollutant removal. *Environmental Pollution*, 337, 122571.
- Ogawa, M., & Okimori, Y. (2010). Pioneering works in biochar research, Japan. *Soil Research*, 48(7), 489–500.
- Painter, T. J. (1998). Carbohydrate polymers in food preservation: an integrated view of the Maillard reaction with special reference to discoveries of preserved foods in Sphagnum-dominated peat bogs. *Carbohydrate Polymers*, 36(4), 335–347.
- Pai, S., Shetty, V., Rajangane, S., & Selvaraj, S. (2024). Synergistic interactions of fungi and biochar for various environmental applications. In *Bioprospecting of multi-tasking fungi for a sustainable environment: Volume I* (pp. 219–247). Springer.
- Retan, G. A. (1915). Charcoal as a means of solving some nursery problems. *Journal of Forestry*, 13(1), 25–30.
- Rondon, M. A., Lehmann, J., Ramirez, J., & Hurtado, M. (2007). Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. *Biology and Fertility of Soils*, 43, 699–708.
- Samonin, V. V., & Elikova, E. E. (2004). A study of the adsorption of bacterial cells on porous materials. *Microbiology* (00262617), 73(6).
- Schimel, J., Balser, T. C., & Wallenstein, M. (2007). Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. *Ecology*, 88(6), 1386–1394.
- Solaiman, Z. M., Blackwell, P., Abbott, L. K., & Storer, P. (2010). Direct and residual effect of biochar application on mycorrhizal root colonisation, growth and nutrition of wheat. *Soil Research*, 48(7), 546–554.
- Steiner, C., Teixeira, W. G., Lehmann, J., & Zech, W. (2004). Microbial response to charcoal amendments of highly weathered soils and Amazonian Dark Earths in Central Amazonia—preliminary results. *Amazonian Dark Earths: Explorations in Space and Time*, 195–212.
- Turner, E. R. (1955). The effect of certain adsorbents on the nodulation of clover plants. *Annals of Botany*, 19(1), 149–160.
- Vantsis, J. T., & Bond, G. (1950). The effect of charcoal on the growth of leguminous plants in sand culture. *Annals of Applied Biology*, 37(2), 159–168.
- Wengel, M., Kothe, E., Schmidt, C. M., Heide, K., & Gleixner, G. (2006). Degradation of organic matter from black shales and charcoal by the wood-rotting *Fungus Schizophyllum commune* and release of DOC and heavy metals in the aqueous phase. *Science of the Total Environment*, 367(1), 383–393.

- ¹ Pyrolysis
- ² Terra preta
- ³ Saprophytic fungi
- ⁴ Substrate
- ⁵ Arbuscular mycorrhiza
- ⁶ Ectomycorrhiza
- ⁷ Larch
- ⁸ Colonization
- ⁹ Hydrothermal Carbonization, HTC
- ¹⁰ Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)
- ¹¹ Allelochemicals
- ¹² Grazers
- ¹³ Saprophyte
- ¹⁴ Polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs
- ¹⁵ Condensed
- ¹⁶ White rot fungi
- ¹⁷ Terra Preta
- ¹⁸ Oxidative
- ¹⁹ Peroxidases
- ²⁰ Laccases
- ²¹ Hydrolytic
- ²² Esterase
- ²³ Biodegradation
- ²⁴ Potato rot
- ²⁵ Soil-borne Disease
- ²⁶ Fusarium
- ²⁷ Aspergillin
- ²⁸ Biodigesters
- ²⁹ Cellulose-hydrolyzing bacteria
- ³⁰ Volatile matter
- ³¹ Pyroligneous acids
- ³² Benzoic acids
- ³³ Hydroxy and Acetoxy acids
- ³⁴ n-alkanoic acids
- ³⁵ Amines
- ³⁶ Diols
- ³⁷ Triols
- ³⁸ Phenols
- ³⁹ Xylenols
- ⁴⁰ Acrolein
- ⁴¹ Formaldehyde
- ⁴² Cresols
- ⁴³ Biological N₂ fixation
- ⁴⁴ Autotrophic nitrifying bacteria
- ⁴⁵ Flocculation
- ⁴⁶ Covalent bonding to carriers
- ⁴⁷ Cross-linking of cells
- ⁴⁸ Encapsulation in a polymer-gel
- ⁴⁹ Entrapment in a matrix
- ⁵⁰ Adhesion
- ⁵¹ Escherichia coli
- ⁵² Catechol
- ⁵³ Cinnamic acid
- ⁵⁴ Cumaric acid
- ⁵⁵ Ferulic acid
- ⁵⁶ Fuchsin
- ⁵⁷ Peptidoglycan
- ⁵⁸ Cytoplasmic Membrane
- ⁵⁹ Lipopolysaccharide
- ⁶⁰ Co-metabolism
- ⁶¹ Priming effect