



J Soil Plant Sci, 2025, 35(2): 93–113.

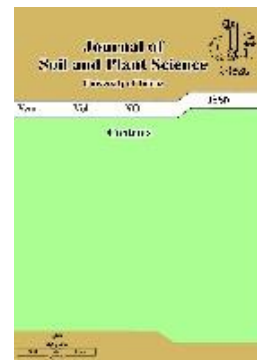
<https://doi.org/10.22034/sps.2025.68824.1016>

Journal of Soil and Plant Science

E-ISSN: 3092-6106

<https://sps.tabrizu.ac.ir>

Review Article



Effects of Biochar on Pesticides Sorption in Soils

Somayeh Sefidgar Shakolaie^{1✉} , Azam Taheri Shahrestani² 

1- Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran.

E-mail: s.sefidgar16@gmail.com

2- Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran.

E-mail: azamtaheri98@gmail.com

Received: August 26, 2025

Revised: September 15, 2025

Accepted: September 17, 2025

Published: September 19, 2025

Extended Abstract

Background and Objectives

Pesticides are extensively used in the modern agricultural systems. The inefficient and extensive use of pesticides during the last 5 to 6 decades inadvertently led to serious deterioration of environmental quality with health risk to living organisms, including humans. It is important to use some environmentally friendly and sustainable approaches to remediate, restore and maintain soil quality. Biochar, with its high specific surface area and porosity, offers numerous adsorption sites. Its stability, eco-friendliness, and superior adsorption capabilities render it an excellent choice. As a versatile material, biochar finds use in agriculture, environmental management, industry, energy, and medicine. Added to soil, biochar helps adsorption or degradation of pesticides in contaminated areas, enhancing soil microbial activity. Current research primarily focuses on biochar produced via direct pyrolysis for pesticide adsorption. Studies on functionalized biochar for this purpose are relatively scarce. This review examines biochar's pesticide absorption properties, its characteristics, formation mechanisms, environmental impact, and delves into adsorption mechanisms, functionalization methods, and their prospects and limitations.

Review methodology

ResearchGate, Scopus, Google Scholar, Web of Science, and ScienceDirect.com were used as sources to gather information for this study. These database sites were preferred because these sites are the most complete and contain the most prominent and important research publications. The major search term was "effect of biochar amendment on the bioavailability of pesticide". In this strategy, 40 articles published between 2012 and 2024 were chosen. Furthermore, the relevant studies cited in the above publications were examined.

Conclusion

The current review highlighted the implications of biochar application in soils to control pesticides fate. Application of biochar to soil greatly affects pesticides sorption/desorption, biodegradation, leaching in soil. The sorption/desorption of pesticides on biochar surfaces depends on the physicochemical characteristics of biochar: (i) chemical structure and composition, (ii) porosity, surface area, (iii) pH and elemental ratios, and (iv) surface functional groups. It has been also observed that all these physicochemical characteristics of biochar rely on the feedstock type and production conditions. Moreover, the sorption capacity of biochar also varies with the type of pesticides. The degradation of pesticides in soil occurs via various reactions such as hydrolysis, photolysis, oxidation, and

biodegradation. To advance biochar's application, mitigate environmental risks from pesticides, and enhance pesticide efficiency, in-depth research on biochar's adsorption mechanisms is crucial. Factors affecting biochar bioavailability, development of functional products and field production applications should be addressed to provide effective scientific evidence for the safe and rational use of biochar. In the management of pesticide pollution, it may be necessary to combine other technical approaches, such as loading degrading bacteria into biochar to enhance degradation capabilities and using biochar to prepare slow-release formulations to reduce the amount of pesticide used. Although there are still many challenges at present, with the continuous progress of technology and the expansion of applications, it is believed that biochar materials will play a more important role in the future.

Future perspectives

The available literature provides ample justification for some key knowledge gaps regarding the use of biochar to control pesticides fate in soil and could be considered to advance our understanding of biochar use for remediation of pesticides in soil. Research is needed on the capacity of modified biochar for sustainable management of land productivity. Moreover, it can be of great importance to classify biochars (including modified biochars) based on their capacity to bind/hold pesticides over time. It is important to explore if the pyrolytic conditions and the type of feedstock affect the efficacy of biochars in degradation of pesticides. Furthermore, the effect of feedstock type and pyrolytic conditions on soil microbial activity is not well-understood and research is warranted to examine these fundamental aspects. The available literature data show that the interactions of biochar, pesticides and soil microbial activity are poorly understood. There is no clear trend of biochar application on soil microbial activity and the role of soil fauna and flora towards pesticide mineralization under biochar application. There exists very limited data regarding the effects of biochars on the mode of action and chemistry of pesticides and how the sorption of pesticides on biochar vary with soil types. Similarly, the data about the role of different organic matter fractions on pesticide sorption are very limited.

Keywords: Adsorption, Biochar, Environmental fate, Functionalization, Pesticide.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to sincerely thank the anonymous reviewers for their valuable comments and constructive suggestions, which greatly contributed to improving the quality of this manuscript. The authors also wish to express their gratitude to the editor for their guidance and support throughout the review process.

Cite this article: Sefidgar Shakolaie, S. & Taheri Shahrestani, A. (2025). Effects of biochar on pesticides sorption in soils. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(2), 93–113.
<https://doi.org/10.22034/sps.2025.68824.1016>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2025 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz





نشریه دانش خاک و گیاه، جلد ۳۵، شماره ۲، صفحه‌های ۹۳ تا ۱۱۳، تابستان ۱۴۰۴

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.68824.1016>

Online ISSN: 3092-6106

<https://sps.tabrizu.ac.ir>



مقاله مروری

تأثیر بیوچار بر جذب آفت‌کش‌ها در خاک‌ها

سمیه سفیدگر شاکلائی^۱، اعظم طاهری شهرستانی^۲

۱- نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: s.sefidgar16@gmail.com

۳- گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: azamtaheri98@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷	تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۲۸

چکیده

امروزه از آفت‌کش‌ها به‌طور گسترده در نظام‌های کشاورزی استفاده می‌شود. استفاده ناکارآمد و گسترده از آفت‌کش‌ها در طول ۵ تا ۶ دهه گذشته ناخواسته سبب کاهش جدی کیفیت محیط‌زیست شده و سلامت جانداران از جمله انسان‌ها را به خطر انداخته است. استفاده از برخی رویکردهای سازگار با محیط‌زیست و پایدار برای اصلاح، بازیابی و حفظ کیفیت خاک بسیار مهم است. بیوچار به‌عنوان یک اصلاحگر خاک، در سطح جهانی توجه قابل‌توجهی را به خود جلب کرده است، زیرا توانایی جذب و به حداقل رساندن زیست‌فراهمی آفت‌کش‌ها را در خاک دارد. در این مطالعه از وبسایت‌های ریسرچ‌گیت، اسکوپوس، گوگل اسکولار و ساینس دایرکت به‌عنوان منابعی برای جمع‌آوری اطلاعات استفاده شد. همچنین، ۴۰ مقاله منتشر شده از سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۵ انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه، ترکیبی جامع از پیشرفت‌های اخیر در جذب آفت‌کش‌ها به‌وسیله بیوچار را ارائه می‌دهد و جنبه‌های کلیدی مانند سازوکارهای تولید بیوچار، سازوکارهای جذب و روش‌های اصلاح نوآورانه شامل فعال‌سازی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی را روشن می‌کند. همچنین، این مطالعه با هدف ارائه بینش‌های گسترده‌تر در مورد پتانسیل بیوچار برای کاهش مؤثر آلودگی آفت‌کش‌ها انجام شده است. این دیدگاه روشنگرانه به شکل‌دهی و جهت‌گیری‌های پژوهش‌های آینده در زمینه اصلاح آلودگی آفت‌کش‌ها کمک می‌کند و در نتیجه، نوآوری و اهمیت کار ارائه شده را افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آفت‌کش، بیوچار، جذب سطحی، زیست‌فراهمی، فعال‌سازی

استناد به این مقاله: سفیدگر شاکلائی، س. و طاهری شهرستانی، ا. (۱۴۰۴). تأثیر بیوچار بر جذب آفت‌کش‌ها در خاک‌ها. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۵(۲)، ۹۳-۱۱۳.

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.68824.1016>

مقدمه

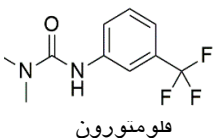
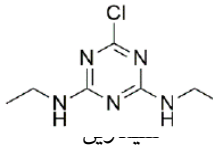
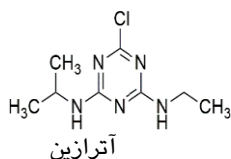
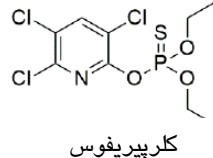
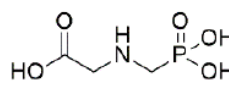
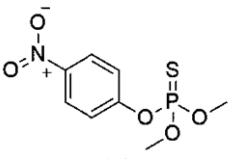
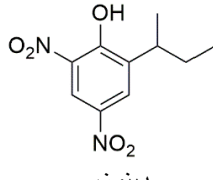
آفتکش‌ها نهاده‌های ضروری کشاورزی هستند که تولید مواد غذایی را افزایش می‌دهند. جمعیت جهان از ۱/۵ میلیارد نفر در سال ۱۹۰۰ به ۸/۰۹ میلیارد نفر در آغاز سال ۲۰۲۵ افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰ به ۸/۳ میلیارد نفر برسد (FAO, 2016). رشد شدید جمعیت و گسترش صنعتی در متنوع‌ترین بخش‌های جامعه منجر به افزایش قابل‌توجه تقاضا برای تأمین آب آشامیدنی و تولید مواد غذایی در مقیاس بزرگ شده است (Bruckmann et al., 2022). بنابراین، برای افزایش بهره‌وری در سطحی که از نظر اقتصادی سودآور باشد، استفاده از مواد شیمیایی کشاورزی به‌طور گسترده برای مبارزه با آفات و علف‌های هرز مورد استفاده قرار گرفته است (Bruckmann et al., 2022). بازتاب‌های استفاده بیش از حد از ترکیبات آفتکش در کشورهایی که از نظر کشاورزی بسیار گسترش یافته‌اند، مانند برزیل، که یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان غلات در سراسر جهان است، بهتر دیده می‌شود، جایی که افزایش استفاده از آفتکش‌ها با افزایش تشخیص سرطان بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ مرتبط بوده است (Pereira et al., 2023). علاوه بر این، مولکول‌های آفتکش تمایل به تجمع زیستی در محیط‌های مختلف مانند خاک‌ها و آب‌ها دارند و تهدیدی برای سلامت انسان محسوب می‌شوند (Pereira et al., 2023).

سرنوشت آفتکش‌ها به محیطی که در آن قرار دارند بستگی دارد (Aldas-Vargas et al., 2022). به عنوان مثال، آفتکش‌ها می‌توانند در محیط‌هایی مانند خاک و رسوبات کف دریا، جذب شوند یا با آب منتقل شوند. در حالی که برخی آفتکش‌ها می‌توانند تغییر شکل دهند، سایر آفتکش‌ها یا محصولات تغییر شکل یافته آن‌ها می‌توانند در محیط باقی بمانند (Aldas-Vargas et al., 2022). آفتکش‌ها یا متابولیت‌های پایدار، زیست‌بوم‌ها و تولید آب آشامیدنی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را تهدید می‌کنند (Aldas-Vargas et al., 2022). همچنین، آلودگی ناشی از آفتکش‌ها، خواص فیزیکی و شیمیایی خاک را تغییر می‌دهد و بر فعالیت‌های میکروبی و فرایند تجزیه مواد آلی تأثیر منفی می‌گذارد (Losacco et al., 2024). بنابراین، روندهای پژوهش‌هایی بر روی روش‌هایی متمرکز شده‌اند که می‌توانند تهدیدات آفتکش‌ها را در آب و خاک کاهش داده و همچنین عملکرد محصول را به حداکثر برسانند (Cara et al., 2022).

طبقه‌بندی آفتکش‌ها بر اساس درجه خطر، ساختار شیمیایی و اثرهای سمی بر محیط‌زیست و سلامت عمومی در جدول ۱ آورده شده است. تعیین سرنوشت آفتکش‌ها در محیط‌زیست نیازمند مطالعه رفتار جذبی آن‌ها در خاک بوده که در ارتباط با برقراری پیوند بین آفتکش با ذرات رس و مواد آلی خاک می‌باشد و از مهمترین عوامل مؤثر بر زیست‌فراهمی، تجزیه، تصعید^۱ و قابلیت آبشویی آفتکش‌ها در خاک است (Rigi and Farahbakhsh, 2018). پیش‌بینی تحرک و سرنوشت آفتکش‌ها در خاک راهکار مناسبی برای شناسایی و کاهش اثرهای مضر آن‌ها بر محیط‌زیست^۲ می‌باشد (Rigi and Farahbakhsh, 2018). برای پیش‌بینی تحرک و سرنوشت آفتکش‌ها در محیط‌زیست، علاوه بر شناخت ویژگی‌های جذب و واجذب آن‌ها در خاک، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مختلف یک ترکیب مثل حل‌پذیری در آب، ضریب اکتانول-آب و مقدار pK_a نقش مهمی در میزان جذب دارد (Rigi and Farahbakhsh, 2018).

¹ Volatility

جدول ۱- طبقه‌بندی آفت‌کش‌ها بر اساس درجه خطر، ساختار شیمیایی و اثرهای سمی بر محیط‌زیست و سلامت عمومی (Bruckmann et al., 2022)

آفت‌کش	طبقه	اثرهای سمی	طبقه‌بندی
 فلومنورون	تری‌فلورومتیل اوره	تخریب یاخته‌های اپیتلیال توبول‌های کلیوی و خونریزی در گوسفند	بعید است مشکلات حادی داشته باشد.
 تریازین	تریازین	مختل‌کننده غدد درون ریز، سرطان‌زا و تخریب یاخته‌های اپیتلیال توبول کلیوی گونه کپور معمولی	در استفاده عادی بعید است خطری ایجاد کند.
 آترازین	تریازین	ناهنجاری‌های خونی، تغییرات هورمونی و سمیت حاد در ریزجلبک‌ها	اندکی خطرناک
 کلرپیریفوس	ارگانوفسفات	سمیت عصبی، تغییر در یکپارچگی تروفوبلاستیک	نسبتاً خطرناک
 گلیفوزات	ارگانوفسفوز	اختلال در غدد درون ریز که باعث رشد یاخته‌های سرطان سینه در انسان می‌شود، قرار گرفتن موش‌ها در معرض گلیفوزات باعث اضطراب و رفتارهای شبه افسردگی می‌شود و بر متابولیسم انرژی یاخته‌های تک هسته‌ای خون تاثیر می‌گذارد.	اندکی خطرناک
 متیل پاراتیون	ارگانوفسفات	مختل‌کننده غدد درون ریز، ژنوتوکسیک، سمیت عصبی	بسیار خطرناک
 دینوزب	دینیتروفنول	کاهش سطح ATP و اختلال در متابولیسم کبد	بسیار سمی (منسوخ شده در ایالت متحده آمریکا و اروپا)

برخی آفتکش‌ها، به ویژه علفکش‌ها، pKa پایینی دارند و اسیدیته ضعیفی از خود نشان می‌دهند. این ویژگی برای جذب و انتقال به وسیله گیاه مفید است، اما سبب پویایی زیاد آن‌ها در خاک و انتقال آن‌ها به آب‌های سطحی یا زیرزمینی می‌شود. برای مثال، ساختارهای شیمیایی علفکش‌های تری‌کتون مانند مزوتریون^۱ و تمبوتریون^۲، حاوی گروه‌های کربونیل متعددی هستند. در این گروه‌ها، اتم اکسیژن در پیوند C=O الکترون‌گاتر از اتم کربن است و باعث می‌شود الکترون‌های پیوند به سمت اتم اکسیژن متمایل شوند. در نتیجه، یک بار منفی جزئی روی اتم اکسیژن تشکیل می‌شود که منجر به افزایش تشکیل پیوندهای هیدروژنی با مولکول‌های آب و افزایش قابل توجه پویایی آن‌ها در خاک می‌شود. همچنین، مطالعات اخیر گزارش داده‌اند که آفتکش‌هایی مانند کلرپیریفوس^۳، کاربندازیم^۴ می‌توانند انتشار و پایداری ژن‌های مقاومت آنتی‌بیوتیکی، نوعی از آلاینده‌های محیطی نوظهور را به دلیل جهش‌های ژنتیکی تحریک‌شده یا افزایش انتقال افقی ژن، افزایش دهند (You et al., 2021). در نتیجه، با افزایش نگرانی‌ها در مورد خطرهای احتمالی آفتکش‌ها برای ایمنی محیط‌زیست و سلامت انسان، توسعه فناوری‌های کارآمد برای اصلاح خاک‌های آلوده به آفتکش‌ها ضروری است (You et al., 2021).

بیوچار دارای توان جذب عالی و پایداری بالایی است و مقرون به صرفه و سازگار با محیط‌زیست است (Wahla et al., 2019; Khalid et al., 2020). کاهش آبشویی آفتکش‌ها از طریق جذب به بیوچارها نیز گزارش شده است (Garcia et al., 2014). خواص سطحی و ساختار فیزیکی و شیمیایی بیوچارها تا حد زیادی به وسیله شرایط پیرولیز و زیست‌توده اولیه کنترل می‌شوند (Garcia et al., 2014). جذب آفتکش‌های آلی به بیوچار از جذب اسید هیومیک و ماده آلی خاک بیشتر است. در نتیجه، اصلاح خاک با بیوچار می‌تواند هم تأثیر مثبت و هم تأثیر منفی بر رفتار آفتکش‌ها داشته باشد. هنگامی که جذب افزایش می‌یابد، آبشویی کاهش می‌یابد و خطر آلودگی آب زهکشی به حداقل می‌رسد (Garcia et al., 2014). بیوچار به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی خاص خود، می‌تواند به طور قابل توجهی در جذب و جداسازی آلاینده‌های آلی مانند آفتکش‌ها در خاک نقش داشته باشد (Garcia et al., 2014؛ شکل ۱).

Garcia et al. (2014) تأثیر بیوچار را بر جذب قارچ‌کش تری‌سیکلazol^۵ بررسی کردند. بیوچارهای حاصل از کمپوست میل ترکیبی بسیار بالایی با قارچ‌کش تری‌سیکلazol داشتند. این میل ترکیبی با دمای پیرولیز، pH، سطح ویژه بیوچارها و میزان آروماتیک بودن همبستگی مثبت داشت. Abdollahi et al. (2019) در بررسی تأثیر بیوچار کود دامی بر پایداری متری‌بیوزین^۶ در خاک بیان کردند که کاربرد بیوچار به دلیل افزایش مواد غذایی و تحریک فعالیت ریزجانداران سبب افزایش تجزیه متری‌بیوزین شد. Zheng et al. (2010) اثرهای چندین پارامتر از جمله اندازه ذرات بیوچار، زمان تماس، نسبت جامد به محلول و pH محلول بر جذب آترازین^۷ و سیمازین^۸ به طور جامع بررسی و مشاهده کردند که بیوچار با اندازه ذرات کوچک به زمان کمتری برای رسیدن به تعادل جذب نیاز داشت. میل ترکیبی بیوچار برای دو آفتکش با کاهش نسبت جامد به محلول افزایش یافت. مقادیر جذب شده آترازین و سیمازین به ترتیب از ۴۵۱

¹ Mesotrione

² Tembotrione

³ Chlorpyrifos

⁴ Carbendazim

⁵ Tricyclazole

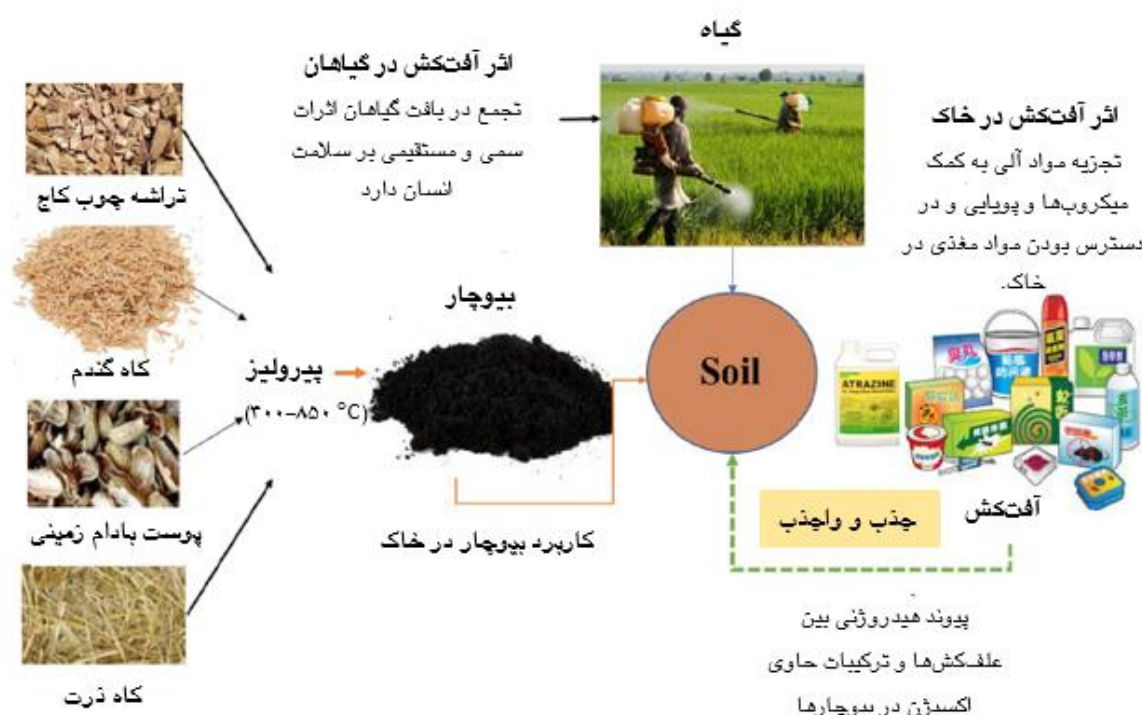
⁶ Metribuzin

⁷ Atrazine

⁸ Simazine

به ۱۱۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و از ۲۴۳ به ۱۰۶۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافت، زمانی که نسبت جامد به محلول از ۱:۵۰ به ۱:۱۰۰۰ (گرم بر میلی‌لیتر) کاهش یافت.

بررسی تأثیر pH محلول (از ۳ تا ۱۰) بر جذب دو آفتکش به‌وسیله بیوپچار نشان داد که در pHهای کمتر از ۷، مقدار ضریب جذب (Kd) دو آفتکش با کاهش pH افزایش یافت که نشان می‌دهد جذب آترازین و سیمازین به‌وسیله بیوپچار در pHهای پایین بهتر انجام می‌شود. همچنین، بیوپچار می‌تواند از طریق پیرولیز در دمای بالا، تیمار با اسید، باز و سایر روش‌ها تهیه و برای تثبیت، تخریب آلاینده‌ها و به حداقل رساندن خطر آلودگی خاک در نظر گرفته شود. خواص فیزیکی و شیمیایی بیوپچار را می‌توان برای بهبود عملکرد جذب آن اصلاح کرد (Khalid et al., 2020). به‌عنوان مثال، فعال‌سازی شیمیایی و شستشوی اسیدی بیوپچار می‌تواند مقدار گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن و تراکم محل جذب سطحی آن را افزایش دهد و در نتیجه عملکرد جذب آن را بهبود بخشد (Dong et al., 2024). این مطالعه، ترکیبی جامع از پیشرفت‌های اخیر در جذب آفتکش‌ها به‌وسیله بیوپچار ارائه می‌دهد و جنبه‌های کلیدی مانند سازوکارهای تولید بیوپچار، سازوکارهای جذب و روش‌های اصلاح نوآورانه شامل رویکردهای شیمیایی و بیولوژیکی را روشن می‌کند. همچنین، این پژوهش با هدف ارائه بینش‌های گسترده‌تر در مورد پتانسیل بیوپچار برای کاهش مؤثر آلودگی آفتکش‌ها انجام شده است. این دیدگاه روشنگرانه به شکل‌دهی و جهت‌گیری‌های پژوهش‌هایی آینده در زمینه اصلاح آلودگی آفتکش‌ها کمک می‌کند و در نتیجه، نوآوری و اهمیت کار ارائه شده را افزایش می‌دهد.



شکل ۱. اثرهای کاربرد بیوپچار بر سرنوشت آفتکش‌ها در خاک (Khalid et al., 2020).

ویژگی‌های بیوپچار

خواص فیزیکی و شیمیایی بیوچار به‌طور قابل‌توجهی بر توانایی آن در جذب آفت‌کش‌ها تأثیر می‌گذارد. قبل از بررسی سازوکارهای حاکم بر جذب آفت‌کش‌ها به‌وسیله بیوچار، باید خواص آن، از جمله سطح ویژه، تخلخل، pH و گروه‌های عاملی به خوبی مشخص شود.

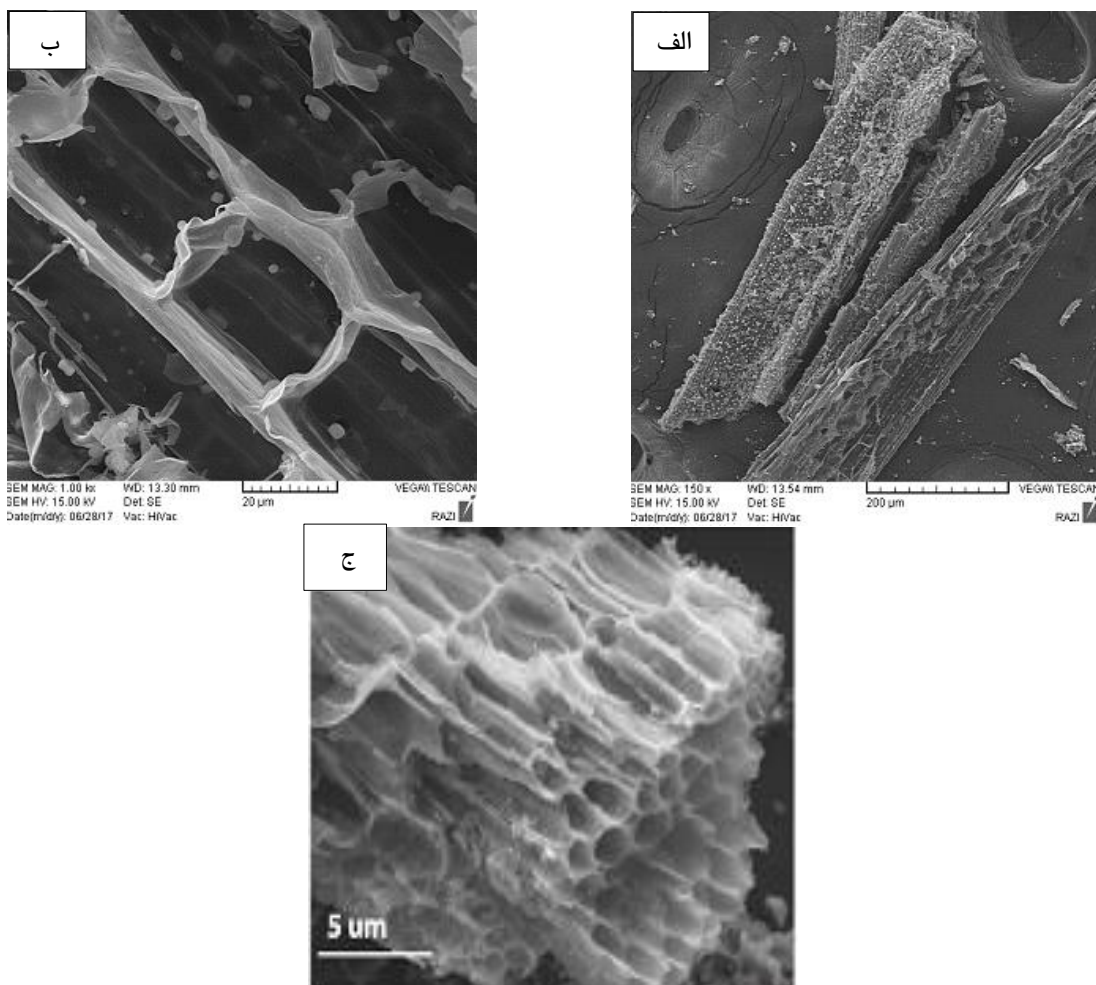
سطح ویژه و تخلخل

بیوچار تولید شده از زیست‌توده مختلف، خواص متفاوتی مانند سطح ویژه، اندازه حفرات و گروه‌های عاملی مختلف برای حذف آلاینده‌های آلی را نشان می‌دهد. ظرفیت جذب با بهبود سطح ویژه و بخش کربنی شده بیوچار به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. با این حال، فرایند آب‌زدایی^۱ (دهیدراته شدن) در طول پیرولیز بیوچار منجر به تشکیل منافذ می‌شود (Khalid et al., 2020). اندازه حفرات بیوچارها بسیار متفاوت است و شامل میکروپورها (کوچک‌تر از ۲ نانومتر)، مزوپورها (۲ تا ۵۰ نانومتر) و ماکروپورها (بزرگ‌تر از ۵۰ نانومتر) می‌باشد (شکل ۲؛ Li et al., 2017). تخلخل و سطح ویژه بیوچار به‌طور قابل‌توجهی با دمای پیرولیز تغییر می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که دمای بالا عموماً منجر به اندازه حفرات بزرگ‌تر و در نتیجه سطح ویژه بزرگ‌تر می‌شود. با افزایش دما از ۴۲۰ به ۶۴۰ درجه سلسیوس، تخلخل بیوچار تهیه شده از کاه برنج از ۰/۰۶۷ به ۰/۰۱ سانتی‌متر مکعب بر گرم افزایش یافت، در حالی که سطح ویژه از ۵/۲۰۸ به ۹/۴۶۵ متر مربع بر گرم افزایش یافت. آنان علت افزایش سطح ویژه بیوچار با افزایش دما را تشکیل ساختاری با حفرات متوسط و ریز دانستند (Sefidgar Shahkolaie et al., 2020).

با این حال، باید توجه داشت که در برخی موارد، بیوچار تهیه شده در دمای بالا، سطح ویژه و تخلخل کمتری داشت. در یک بررسی مشاهده شد که با افزایش دمای پیرولیز از ۳۰۰ به ۷۰۰ درجه سلسیوس سطح ویژه بیوچار تولید شده کاهش یافت که ممکن است به دلیل نفوذ خاکستر یا بلوکه شدن حفرات در بیوچار باشد (Khaefi et al., 2022). علاوه بر دمای پیرولیز، زیست‌توده اولیه بیوچار نیز مهم است. به‌عنوان مثال، سطح ویژه بیوچار کود دامی و جامد زیستی^۲ (۵/۴ تا ۹۴/۲ متر مربع بر گرم) بسیار کمتر از بیوچار گیاهی (۱۱۲ تا ۶۴۲ متر مربع بر گرم) مانند کاه گندم، چوب بلوط، ساقه ذرت و کاج سوزنی برگ است. به‌طور مشابه، بیوچار تهیه شده از جامد زیستی در دمای ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس تخلخل کمتری (۰/۰۵۳ تا ۰/۰۶۸ سانتی‌متر مکعب بر گرم) نسبت به بیوچار تهیه شده از کاج سوزنی برگ در دمای ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس (۰/۰۷۶ تا ۱/۹۰ سانتی‌متر مکعب بر گرم) را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، زیست‌توده غنی از لیگنین (به‌عنوان مثال، بامبو و پوسته نارگیل) بیوچاری با ساختاری با حفرات ماکروایجاد می‌کند، در حالی که زیست‌توده غنی از سلولز (به‌عنوان مثال، پوسته ذرت) بیوچاری با ساختاری با حفرات عمدتاً میکرو تولید می‌کند (Li et al., 2017).

¹ Dehydration process

² Biosolid



شکل ۲- الف) تصویر SEM بیوچار تهیه شده از کاه برنج در دمای ۶۴۰ (میانگین قطر منافذ کمتر از ۲۰۰ میکرومتر) (Sefidgar et al., 2020)، ب) بیوچار تهیه شده از کاه برنج در دمای ۴۲۰ (میانگین قطر منافذ کمتر از ۲۰ میکرومتر) (Sefidgar et al., 2020)، و ج) بیوچار تهیه شده از کاه پنبه (میانگین قطر منافذ کمتر از ۲ میکرومتر) (An et al., 2021).

pH بیوچار

pH بیوچار با دمای پیرولیز و زیست توده اولیه تغییر می کند. به طور کلی، بیوچار قلیایی است، البته با برخی استثنائات که به زیست توده اولیه بستگی دارد. بیوچار تولید شده از چوب بلوط در دمای ۳۵۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس اسیدی بود (Nguyen et al., 2010). Khaefi et al. (2022) رابطه مثبتی بین pH بیوچار و دمای پیرولیز برای بیوچار تولید شده از لجن مشاهده کردند. با تبدیل لجن به بیوچار، یک ماده خنثی به یک ماده با خاصیت بازی تبدیل می شود. افزایش pH می تواند به علت واکنش های بسپارش یا پلیمریزاسیون^۱ (پلیمریزاسیون یک واکنش شیمیایی است که در آن مولکول های کوچک و ساده یا همان مونومر با یکدیگر پیوند برقرار کرده و مولکولی بزرگ با جرم مولکولی چندین برابر مولکول اولیه به وجود می آورند) یا تراکم ترکیبات آلیفاتیک^۲، آب زدایی همراه با کاهش گروه های اسیدی سطحی در طول تیمار

¹ Polymerization

² Aliphatic compounds

حرارتی و غلظت مواد معدنی موجود در بیوچار ناشی از جداسازی نمک‌های فلزی از ماده آلی بر اثر افزایش دما باشد. همچنین باقی‌مانده اکسیدهای فلزی و مواد معدنی به‌عنوان محتوای خاکستر در بیوچار باعث قلیائیت آن نسبت به لجن می‌شود (Khaefi et al., 2022). در یک بررسی، زیست‌توده‌های مختلف شامل لجن فاضلاب، کود مرغی، تفاله چغندر قند، کاه گندم و ضایعات چوب سیب به بیوچار تبدیل و مشاهده شد که pH تالمی بیوچارها قلیایی بود (Azimzadeh et al., 2020).

گروه‌های عاملی

گروه‌های عاملی مانند گروه‌های کربوکسیلیک، آمینی و هیدروکسیل نقش مهمی در جذب آفت‌کش‌ها دارند. دمای پیرولیز و زیست‌توده اولیه بیوچار دو عامل کلیدی کنترل‌کننده مقدار گروه‌های عاملی روی سطح بیوچار هستند. با این حال، برخلاف افزایش کلی سطح، تخلخل و pH، فراوانی گروه‌های عاملی در بیوچار با افزایش دما کاهش می‌یابد، که عمدتاً به دلیل درجه بالاتر کربنیزاسیون^۱ یا زغالی شدن است. با افزایش دما، نسبت‌های اتمی O/C، H/C و N/C کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده کاهش فراوانی گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیلیک و آمینی است (Li et al., 2017).

سازوکار تولید بیوچار

بیوچار یک ماده سیاه رنگ غنی از کربن و متخلخل است که در شرایط اکسیژن کم یا بدون آن از طریق پیرولیز بقایای آلی مانند بقایای محصولات کشاورزی، جامدهای زیستی، فضولات حیوانی، چوب و زباله‌های شهری تهیه می‌شود (Khalid et al., 2020). فناوری پیرولیز زیست‌توده به دلیل راندمان بالای تبدیل انرژی و مصرف کم انرژی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. مهم‌ترین محصولات پیرولیز، بیوچار، بیوروغن، گاز زیستی و سایر محصولات جانبی هستند که در میان آن‌ها، بیوچار نه تنها یک مخزن بزرگ کربن است، بلکه یک محصول زیرساختی برای تهیه مواد مبتنی بر کربن نیز می‌باشد (Zhang et al., 2022). تصور می‌شد که ساختار شیمیایی، به ویژه گروه‌های عاملی آلی، در جذب آلاینده‌ها، پایداری بیوچار، فعالیت کاتالیزوری و سایر فرایندها بسیار مهم هستند. بنابراین، بررسی عمیق تکامل ساختار شیمیایی بیوچار در طول فرایند پیرولیز، به ویژه تشکیل و توسعه گروه‌های عاملی آلی، برای استفاده‌های بعدی از بیوچار بسیار مهم است (Zhang et al., 2022).

مطالعات اخیر تأکید کرده‌اند که در طول فرایند پیرولیز، رادیکال‌های آزاد به دلیل شکستن پیوندهای کووالانسی شیمیایی، در بیوچار تشکیل می‌شوند. این رادیکال‌های آزاد تا ماه‌ها پایدار هستند و به‌عنوان رادیکال‌های آزاد پایدار شناخته می‌شوند. پژوهشگران ثابت کرده‌اند که رادیکال‌های آزاد پایدار ممکن است باعث تولید گونه‌های واکنش‌پذیر، مانند پراکسید هیدروژن، آنیون رادیکال سوپراکسید و رادیکال‌های سولفات شود (Tao et al., 2020). فعالیت رادیکال‌های آزاد پایدار ممکن است برای تجزیه آلاینده‌های آلی مفید باشد، اما در عین حال، ممکن است اثرهای نامطلوبی بر سلامت انسان و محیط‌زیست داشته باشد (Tao et al., 2020). پژوهش‌های اولیه نشان داده‌اند که غلظت رادیکال‌های آزاد پایدار در بیوچار با افزایش دمای پیرولیز افزایش یافته و سپس با افزایش دمای پیرولیز کاهش می‌یابد (Tao et al., 2020). واضح است که خواص بیوچار که کاربردهای آن را در جذب و تجزیه معین می‌کند، به وسیله فرایند پیرولیز تعیین می‌شود. با این حال، هنوز مشخص نیست که چگونه ساختارها و ترکیبات زیست‌توده با فرایند پیرولیز آن و در

¹ Carbonization

نتیجه خواص بیوچار به دست آمده مرتبط هستند. بررسی دقیق پیرولیز زیست توده در رابطه با خواص فیزیکی و شیمیایی آن ضروری است (Tao et al., 2020).

Xin et al. (2015) تشکیل ساختار شیمیایی زغال را در طول پیرولیز سلولز در دماهای مختلف به طور عمیق بررسی و مشاهده کردند که دما تأثیر زیادی بر عملکرد و ترکیب شیمیایی زغال ها داشت. افزایش دما سبب کاهش عملکرد زغال شد که در نتیجه تجزیه اولیه یا ثانویه بقایای زغال رخ می دهد. مقدار کربن در زغال باقیمانده با افزایش دما افزایش یافت، در حالی که مقدار هیدروژن و اکسیژن به تدریج کاهش یافت. هنگامی که دما کمتر از ۳۰۰ درجه سلسیوس باشد، سلولز دچار شکست پیوندهای هیدروژنی درون و بین مولکولی می شود. در همین حال، آب زدایی واکنش غالبی است که عمدتاً بین پیوندهای هیدروژنی درون مولکولی رخ می دهد. پیوندهای هیدروژنی درون مولکولی، پیوندهای هیدروژنی بین مولکولی و حلقه پیران^۱ CH (C5H6O) - ابتدا شکسته شدند و به دنبال آن پیوندهای هیدروژنی درون مولکولی شکسته شدند. سپس، غلظت متیلن کاهش یافت و پیوند دوگانه کربن-کربن (C=C) (پیوند الفین) شروع به تشکیل کرد. وقتی دما بالای ۳۰۰ درجه سلسیوس بود، پیوند دوگانه کربن-اکسیژن (C=O) (کربونیل)، پیوند دوگانه کربن-کربن (C=C) (پیوند الفین)، پیوند اکسیژن (-O-) (اتر) و ترکیبات آروماتیک به میزان زیادی افزایش یافت و در عوض پیوندهای گلیکوزیدی، حلقه پیران (-CH) و گروه های هیدروکسیل (-OH) که در زغال باقیمانده کاهش یافته بودند، از بین رفتند. علاوه بر این، الیگوساکاریدها، هیدروکربن های آلیفاتیک و آروماتیک ها از طریق پیوند اتری، یک شبکه پیوندی سه بعدی نامنظم تشکیل دادند. در دمای ۴۳۰ تا ۶۵۰ درجه سلسیوس، کوچک ترین خوشه های آروماتیک پیوند شده با گروه های اکسیژن دار، در فرایند اکسیژن زدایی و میعان^۲ قابل توجهی قرار گرفتند. سیستم های حلقه آروماتیک با افزایش بیشتر دما، از نظر مقدار و اندازه افزایش یافتند. هنگامی که دما بالاتر از ۶۵۰ درجه سلسیوس بود، واکنش غالب از اکسیژن زدایی به هیدروژن زدایی تغییر یافت. در همین حال، زغال بسیار آروماتیک بود و بیش از شش حلقه آروماتیک به هم جوش خورده بودند (Xin et al., 2015).

هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه ای با وزن مولکولی پایین از آلایند های اصلی در بیوچار ساخته شده در دماهای پایین تر بودند (Mengesha et al., 2024). نفتالین، هیدروکربن آروماتیک چند حلقه ای اصلی شناسایی شده در بیوچار در حدود ۵۰۰ درجه سلسیوس بود و در دماهای بالاتر پیرولیز، هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه ای به ساختار های آروماتیک طویل تر تبدیل شدند. دمای پیرولیز در کنترل سمیت بیوچار بسیار مهم بود؛ بالاترین دمای پیرولیز (۷۵۰ درجه سلسیوس) بیوچارهایی با بیش از ۱۶ هیدروکربن آروماتیک چند حلقه ای نسبت به بیوچار های ساخته شده در دماهای بین ۴۵۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس تولید کرد. نتایج این مطالعه، تشکیل هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه ای با وزن مولکولی بالا را به دلیل واکنش های پیرولیز ثانویه (بیش از ۷۰۰ درجه سلسیوس) همراه با تراکم این ترکیبات روی بیوچار نشان داد (Mengesha et al., 2024).

سازوکار جذب آفت کش ها به وسیله بیوچار

سازوکار جذب مولکول های آفت کش به وسیله بیوچار در خاک آلوده به آفت کش ها به دلیل تنوع خاک ها پیچیده است. جذب آفت کش ها بر روی انواع مختلف بیوچار به وسیله چندین سازوکار، کنترل می شود. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، سازوکارها را می توان به جذب فیزیکی، بر اساس نیروهای ضعیف و برهمکنش های الکترواستاتیک، و

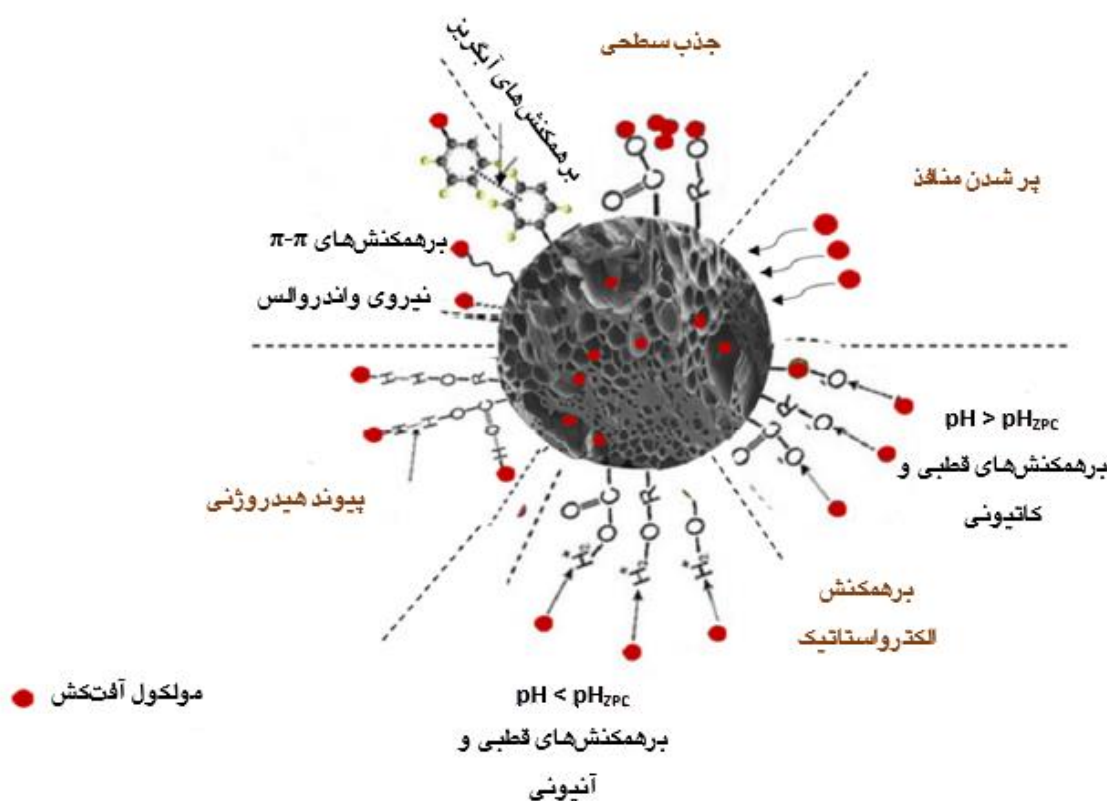
^۱ یک ترکیب هتروسیکل غیر آروماتیک و شش عضوی آلی است که از ۵ اتم کربن و یک اتم اکسیژن درون یک حلقه ۶ عضوی تشکیل شده است.

^۲ Condensation

جذب شیمیایی که اغلب از طریق پیوند کووالانسی یا تشکیل کمپلکس که برهمکنش‌های شیمیایی تک‌لایه برگشت‌ناپذیر هستند، طبقه‌بندی کرد. این سازوکارها می‌توانند به‌طور مستقل یا به صورت هم‌افزایی واکنش نشان دهند (Eissa et al., 2023). هر یک از سازوکارهای جذب آفت‌کش‌ها روی بیوچار به‌شدت به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار (گروه‌های عاملی، مقدار مواد معدنی، سطح ویژه و ساختار حفرات) و خواص خاک بستگی دارد. گروه‌های عاملی قطبی روی سطح بیوچار که شامل اکسیژن، کربونیل و کربوهیدرات‌ها هستند، با آفت‌کش‌های آبدوست با بار مثبت، پیوندهای هیدروژنی قوی برقرار می‌کنند. جذب آفت‌کش‌های قطبی روی بیوچار ممکن است به‌وسیله پیوندهای هیدروژنی تسهیل شود که قدرت آن‌ها بیشتر از نیروهای واندروالس اما کمتر از پیوندهای کووالانسی است. اخیراً مشخص شده است که یک پیوند هیدروژنی منحصر به فرد نقش مهمی در جذب ترکیبات آلی یونیزه شونده آنیونی به‌وسیله بیوچار در محیط‌های بازی ایفا می‌کند (Cara et al., 2022).

همچنین، مشخص شده است که ظرفیت جذب بالای بیوچار برای آفت‌کش‌ها می‌تواند به‌دلیل پیوند هیدروژنی بین بخش‌های حاوی اکسیژن بیوچار و آفت‌کش‌ها باشد (Cara et al., 2022). سازوکار جذب و تجزیه آلاینده‌های آلی آبریز از جمله آفت‌کش‌ها به‌وسیله بیوچار به زیست‌توده اولیه مورد استفاده برای تهیه بیوچار و فرایند پیرولیز از جمله دما بستگی داشت (Sarker et al., 2023). به‌طور خاص، آفت‌کش‌های قطبی و یونی می‌توانند به بیوچار تهیه شده از پیرولیز دمای پایین متصل شوند، در حالی که آفت‌کش‌های غیریونی می‌تواند به بیوچار تهیه شده از پیرولیز دمای بالا متصل شود (Sarker et al., 2023). Zhang et al. (2013) تأثیر بیوچارهای تهیه شده از کود خاکی که دارای مقادیر زیادی از خاکستر هستند را بر سرنوشت دو آفت‌کش (کارباریل^۱ و آترازین) ارزیابی کردند. در بیوچار اصلی که ترکیبی از مواد آلی و خاکستر معدنی بود، پر شدن منافذ، برهمکنش‌های $\pi-\pi$ (نزدیک شدن دو اوربیتال P) از پهلوی سبب تشکیل اوربیتال (II) می‌شود و برهمکنش‌های خاص مانند برهمکنش‌های دهنده-گیرنده الکترون و پیوند هیدروژنی و برهمکنش آبریزی، در جذب آفت‌کش‌ها نقش زیادی داشتند. خاکستر می‌تواند آفت‌کش‌ها را از طریق برهمکنش‌های خاص ترکیب کند، با این حال، افزایش جذب آفت‌کش‌ها به‌وسیله بیوچار کاهش یافت زیرا مکان‌های جذب بخش‌های آلی به‌وسیله خاکستر پوشانده شده بودند. پس از خاکستردایی، جذب به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت و بیوچار تولید شده در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس، بالاترین ظرفیت جذب را نشان داد. هیدرولیز کارباریل در سوسپانسیون‌های بیوچار، به‌دلیل اثرهای کاتالیزوری pH بالا، آزاد شدن یون‌های فلزی محلول و سطح معدنی، افزایش یافت. با این حال، هیدرولیز آترازین عمدتاً به‌وسیله pH بالا و سطح معدنی افزایش یافت. بنابراین تأثیر بیوچار بر سرنوشت آفت‌کش‌ها می‌تواند به‌دلیل ترکیبات شیمیایی و ساختارهای فضایی مختلف آفت‌کش‌ها بسیار متفاوت باشد.

¹ carbaryl



شکل ۳- سازوکارهای جذب آفتکش‌ها روی بیوچار (Cara et al., 2022).

اصلاح بیوچار و سازوکار جذب آفتکش‌ها به وسیله بیوچار اصلاح شده

خواص فیزیکی و شیمیایی بیوچار از عوامل اصلی مؤثر بر فرایند جذب هستند که تحت تأثیر روش سنتز قرار دارد. به‌طور کلی، تولید بیوچار شامل دو مرحله است: کربن‌سازی و اصلاح ساختاری (Suo et al., 2019). بسیاری از مطالعات از روش‌های تک‌مرحله‌ای برای تولید بیوچار برای حذف آفتکش‌ها استفاده کرده‌اند. بیوچار تهیه شده به‌وسیله فرایند پیرولیز سنتی معمولاً دارای معایبی از جمله گروه‌های عاملی سطحی محدود مانند گروه‌های هیدروکسیل، کربونیل و کربوکسیل، سطح ویژه کم و ساختار حفرات توسعه نیافته است. این کاستی‌ها منجر به ظرفیت جذب بسیار پایین بیوچار می‌شود. بنابراین، معمولاً اصلاح ساختاری برای بهبود عملکرد انجام می‌شود (Zhu et al., 2018). اصلاح ساختاری بیوچار شامل فعال‌سازی و آلودگی‌های ناهمگن^۱ است که در شکل ۴ نشان داده شده است. فعال‌سازی بیوچار عمدتاً شامل فعال‌سازی فیزیکی و شیمیایی است. عوامل فعال‌کننده فعال‌سازی فیزیکی شامل دی‌اکسید کربن (CO_2)، بخار، آمونیاک (NH_3)، هوا، اکسیژن (O_2) و یا مخلوطی از آن‌ها است (شکل ۴؛ Saffari, 2023, Chen et al., 2017).

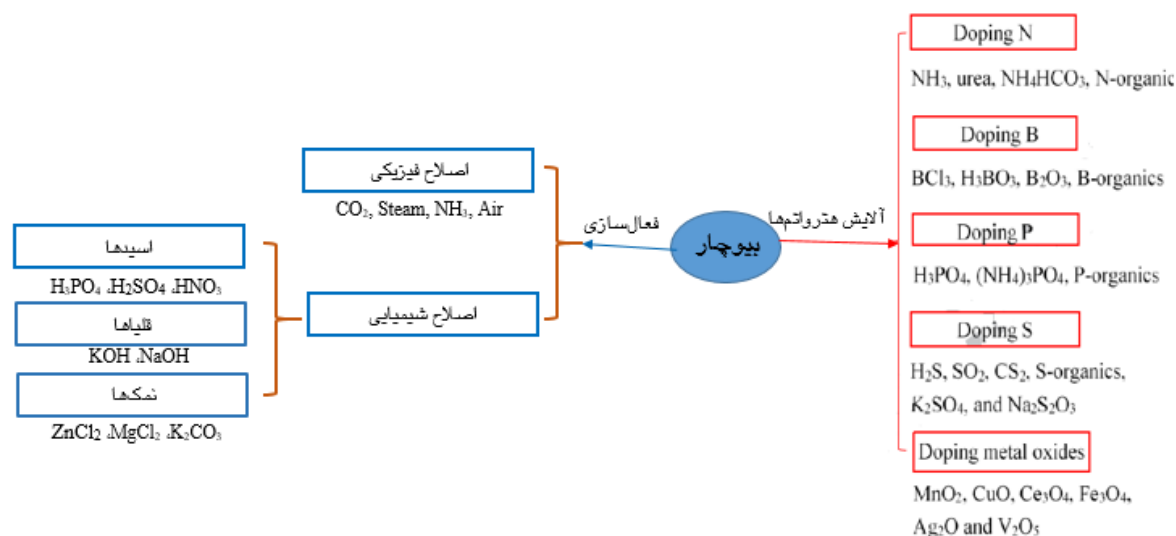
فعال‌کننده‌های شیمیایی شامل اسیدها (اسید فسفریک (H_3PO_4))، اسید سولفوریک (H_2SO_4))، اسید نیتریک (HNO_3))، قلیاها (سدیم هیدروکسید (KOH))، پتاسیم هیدروکسید (NaOH))، نمک‌ها (روی کلرید (ZnCl_2))، منیزیم کلرید

¹ Doping heteroatoms

($MgCl_2$)، پتاسیم کربنات (K_2CO_3)، پرمنگنات پتاسیم ($KMnO_4$)، آب اکسیژنه (H_2O_2) و ازون (O_3) است (شکل ۴) (Chen et al., 2017). اکسایش سطحی پرکاربردترین روش برای تولید گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن روی سطح بیوچار است، که با ترکیب گروه‌های حاوی اکسیژن و همچنین تعدیل ساختار ماتریس کربن و ترکیب معدنی، روش‌های پرکاربرد برای تهیه بیوچارهای با ساختار متنوع را فراهم می‌کند (Bian et al., 2021). Wu et al. (2017) بیوچار را با آب اکسیژنه (H_2O_2)، اسید نیتریک (HNO_3) و آمونیاک (NH_3) فعال کردند، نتایج آنان نشان داد که مقدار گروه کربوکسیل روی سطح بیوچار پس از فعال‌سازی با HNO_3 بیشترین مقدار را داشت و در جذب سرب (Pb) غالب بود. آنان واکنش کی‌لیت شدن سرب با اسید کربوکسیلیک روی سطح بیوچار را سازوکار غالب جذب سرب به‌وسیله بیوچار دانسته‌اند. Wu et al. (2016) نشان دادند که ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) بیوچار پس از اکسایش با اسید نیتریک (HNO_3) سه برابر بیوچار فعال نشده بود. نتایج آنان نشان داد همه اکسیدان‌ها نمی‌توانند ترکیب و مقدار گروه‌های عاملی روی سطح بیوچار را تغییر دهند.

Yakout (2015) ویژگی‌های طیفی بیوچار اصلاح‌شده را بررسی و گزارش کرد که گروه‌های عاملی کربونیل اکسید شده به‌وسیله اسید نیتریک (HNO_3) و پرمنگنات پتاسیم ($KMnO_4$) به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافتند و تفاوت معناداری بین نمونه‌های تیمار شده با H_2O_2 و بیوچار خام وجود نداشت (Zhu et al., 2018). در مقایسه با سایر اکسیدان‌ها، H_2O_2 مزیت منحصر به فردی را برای بهبود قابلیت جذب بیوچار به‌عنوان یک اصلاحگر کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست نشان می‌دهد. معمولاً، اکسایش H_2O_2 می‌تواند خواص فیزیکی و شیمیایی بیوچار را از طریق اصلاح ساختار سطح با ایجاد گروه‌های حاوی اکسیژن بهبود بخشد (Bian et al., 2021). با این حال، اطلاعات کمی در مورد تأثیر اصلاح سطح بیوچار بر عملکرد تجزیه آفت‌کش‌ها در خاک‌ها وجود دارد و سازوکارهای اساسی آن هنوز مشخص نیست. بنابراین، توسعه روش‌های مؤثر اصلاح سطح بیوچار و بررسی نقش آن‌ها در فرایند تجزیه آفت‌کش‌ها خاک با بررسی اثرهای آن‌ها بر خواص شیمیایی خاک و مسیرهای تخریب آفت‌کش‌ها، مهم است. Zhu et al. (2018) اثر بیوچار فعال شده با کربنات پتاسیم (K_2CO_3)، اکسایش سطحی (O)، آمین‌دار کردن سطحی (N)، بارگذاری نانو آهن صفر ظرفیتی (nZVI) و بارگذاری نانو اکسی هیدروکسید آهن (nHIO) را بر خواص بیوچار بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که اصلاح سطح به‌طور قابل‌توجهی بر ساختار منافذ به ویژه منافذ میکرو و گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن، آمین و فلز-اکسیژن تأثیر گذاشت. همچنین توزیع ۲-۴ دی کلروفلوئوکسی استیک اسید (D-۲،۴) را بر روی سطح بیوچار تغییر داد. سطح ویژه تنها عامل تعیین کننده ظرفیت جذب نبود. سطوح غنی از گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن، جذب D-۲،۴ به‌وسیله بیوچار را تسهیل کرد. سازوکار جذب D-۲،۴ به‌وسیله بیوچارها شامل برهمکنش $\pi-\pi$ ، جذب شیمیایی و پیوند هیدروژنی بود. خواص بیوچار اصلاح‌شده ارزیابی شد و کارایی بیوچار به‌ترتیب زیر بود:





شکل ۴- اصلاح ساختاری بیوچار به روش فعال سازی و آلایش اتمهای ناهمگن (Chen et al., 2017).

بنابراین اصلاح ساختاری، آمیناسیون سطحی و اکسایش سطحی می‌توانند خواص بیوچار را بهبود بخشند. Shi et al. (2022) حذف آفت‌کش‌های نئونیکوتینوئیدی^۱ را به وسیله بیوچار فعال شده با هیدروکسید پتاسیم (KOH) در دمای مختلف پیرولیز بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که ظرفیت جذب برای دینوتفوران^۲، نیتنپیرام^۳ و تیاکلوپرید^۴ به ترتیب ۱۵۵ میلی‌گرم بر گرم بر لیتر، ۱۹۵ میلی‌گرم بر گرم بر لیتر و ۳۲۵ میلی‌گرم بر گرم بر لیتر بود که نشان می‌دهد بیوچار فعال شده به وسیله KOH در دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس ظرفیت بیشتری برای حذف آفت‌کش‌های نئونیکوتینوئیدی داشت (جدول ۲). بیوچار تهیه شده با این فناوری دارای سطح ویژه و گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن فراوان بود که ظرفیت جذب زیاد آن را برای آفت‌کش‌های نئونیکوتینوئیدی، به ویژه تیاکلوپرید، تضمین می‌کرد. این فرایند عمدتاً به وسیله پر شدن منافذ میکرو، برهمکنش‌های $\pi-\pi$ و برهمکنش‌های گروه‌های عاملی (پیوند هیدروژنی، پیوند کووالانسی و برهمکنش‌های آبگریز) کنترل می‌شد (Sarker et al., 2023).

نتایج تجزیه FTIR نشان داد که بخش‌های حاوی اکسیژن (O) (C=O , C-O , COOH) زیادی روی سطح بیوچار وجود داشت. اتم هیدروژن الکتروپوزیتیو (تمایل به از دست دادن الکترون) هیدروکسیل (OH) روی بیوچار می‌تواند پیوند هیدروژنی با اکسیژن الکترون‌گاتیو (تمایل به گرفتن الکترون)، نیتروژن و کلر داشته باشد. محاسبات پتانسیل الکترواستاتیک (مانند پتانسیل شیمیایی، سختی شیمیایی، نرمی و شاخص الکترون‌دوستی^۵) نشان داد، همه آفت‌کش‌های نئونیکوتینوئیدی می‌توانند با بیوچار پیوند هیدروژنی تشکیل دهند. با توجه به پتانسیل الکترواستاتیک نزدیک پیوند هیدروژنی، توانایی تشکیل پیوندهای هیدروژنی به صورت نیتنپیرام < دینوتفوران < تیاکلوپرید بود. گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن زیادی از OH , C=O , C-O روی سطح بیوچار تهیه شده در دمای ۷۵۰ درجه

¹ Neonicotinoid

² Dinotefuran

³ Nitenpyram

⁴Thiacloprid

⁵ Electrophilicity

سلسیوس وجود دارند که می‌توانند به‌عنوان دهنده و گیرنده الکترون π عمل کنند. آفت‌کش‌های نیتنپیرام و تیاکلوپرید دارای حلقه پیریدین (C_5H_5N) هستند، اما دینوتفوران این حلقه را ندارد. علاوه بر این، تیاکلوپرید دارای یک گروه سیانو نیز می‌باشد. حلقه پیریدین و گروه سیانو به‌دلیل داشتن آمینواسید غیراشباع، به‌عنوان گیرنده الکترون π در نظر گرفته شدند. گروه سیانو در تیاکلوپرید توانایی بیشتری در تشکیل پیوندهای کووالانسی و برهمکنش‌های آبگریز با اتم‌های کربن غیرقطبی در بیوچار را نشان داد (Shi et al., 2022).

ترکیب تلقیح میکروبی تجزیه‌کننده آلاینده‌ها با اصلاح هیدروچار و بیوچار می‌تواند تجزیه بیولوژیکی آفت‌کش‌ها را افزایش دهد، که روشی امیدوار کننده برای اصلاح خاک ارائه می‌دهد (Mukherjee et al., 2022). Isakovski et al. (2024) به بررسی اثرهای بیوچار اصلاح شده با باسیلوس مگاتریوم بر تجزیه زیستی آفت‌کش‌های ارگانوفسفره در خاک شنی آبرفتی پرداختند. بیوچار اصلاح شده با باسیلوس مگاتریوم ناپویایی آفت‌کش‌ها، فراوانی و فعالیت باکتری‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد. آنان با استفاده از رزونانس مغناطیسی هسته‌ای حالت جامد^۱ و آنالیز گرموزن‌سنجی^۲ بینش‌های ارزشمندی در مورد خواص ساختاری و عملکردی این اصلاحگرها به دست آوردند و نقش‌های حیاتی ساختارهای آروماتیک و گروه‌های عاملی اکسیژن در تثبیت و تسهیل فرایندهای تجزیه زیستی را نشان دادند (جدول ۲).

آلایش اتم‌های ناهمگن شامل آلایش N ، P و S و غیره، یکی از روش‌های فعال‌سازی شیمیایی است که می‌تواند عملکرد بیوچار را بهبود بخشد. در میان هترواتم N ، P و S ، الکترون‌گاتیوی P کمتر و شعاع کووالانسی آن بزرگ‌تر از N و S است. بنابراین، آلایش فسفر می‌تواند فعالیت بیوچار را به‌طور مؤثرتری بهبود بخشد (Suo et al., 2019). برای فسفرهای خارجی مختلف مانند اسید فسفریک (H_3PO_4)، آمونیوم فسفات $(NH_4)_3PO_4$ و مواد آلی فسفردار (شکل ۴)، $-C-P=O$ ، $-C-P-O-$ ، $-C-P-C-$ گروه‌های عاملی اصلی حاوی فسفر هستند (Suo et al., 2019). Wu et al. (2015) دریافتند که H_3PO_4 نه تنها می‌تواند گروه‌های عاملی حاوی فسفر را ایجاد کند، بلکه می‌تواند ریزمنافذهایی (۳-۸ نانومتر) را نیز در بیوچار ایجاد کند. Azimzadeh et al. (2021) گزارش کردند که بیوچار تلفیق شده با LDH می‌تواند فسفات را از آب‌های آلوده جذب نماید و می‌تواند در تصفیه آب‌های آلوده مورد استفاده قرار گیرد. آنان در یک بررسی دیگر گزارش کردند که فسفات بارگذاری شده روی بیوچار-LDH می‌توان به‌عنوان کود فسفوری در تولید محصول ذرت استفاده کرد (Azimzadeh et al., 2020).

¹ Nuclear Magnetic Resonance

² Thermogravimetric Analysis

³ Doping

جدول ۲- سازوکار جذب احتمالی آفتکش‌ها به وسیله بیوچار اصلاح شده

آفتکش‌ها	نوع زیست‌توده	دمای پیرولیز (درجه سلسیوس)	سازوکار	منبع
۴،۲-دی	کاه ذرت / فعال شده با K_2CO_3	۶۰۰	برهمکنش π - π جذب شیمیایی و پیوند هیدروژنی	(Zhu et al., 2018)
تریازین	کاه ذرت، چوب بلال و نشاسته ذرت / اصلاح شده با فسفر	۳۰۰	نیروهای واندروالس، پیوند هیدروژنی، برهمکنش‌های الکترواستاتیک و پر شدن منافذ	(Suo et al., 2019)
دینوتفوران نیتن‌پیرام تیاکلوپرید	فضولات کرم میلورم / فعال شده با KOH	۶۵۰-۸۵۰	پر شدن منافذ میکرو، برهمکنش‌های π - π و برهمکنش‌های گروه‌های عاملی	(Shi et al., 2022)
آفتکش‌های ارگانوفسفره	چغندر قند / فعال شده با باکتریایی تجزیه‌کننده آفتکش‌های ارگانوفسفره	۱۸۰-۲۰۰	ساختارهای آروماتیک و گروه‌های عاملی اکسیژن دار	(Isakovski et al., 2024)
آفتکش‌های نئونیکوتینوئیدی	بلال ذرت، صنوبر داگلاس، اکالیپتوس، سپیدار و چمن	۹۰۰	برهمکنش‌های آبگریز، برهمکنش‌های π - π و پر شدن منافذ	(Radwan et al., 2025)
۱،۲- دی‌برومواتان	کاه جو، کنجاله سویا، کاه گندم، علف مارماهی فعال شده با CO_2	۳۰۰-۸۵۰	ساختارهای سطحی حاوی نیتروژن	(Lindhardt et al., 2025)

(Suo et al., 2019) تأثیر مجموعه‌ای از بیوچارهای تهیه شده از کاه ذرت، چوب بلال و نشاسته ذرت بر حذف آفتکش تریازین^۱ در آب را بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که بیوچار فعال شده با فسفر از کاه ذرت توانست بیش از ۹۶ درصد از آفتکش تریازین موجود در آب را حذف کند. این حذف سریع‌تر از سه جاذب رایج دیگر بیوچارهای تهیه شده از کاه ذرت، چوب بلال و نشاسته ذرت بود. آنان خواص فیزیکی و شیمیایی بیوچار فعال شده با فسفر کاه ذرت را بررسی و مشاهده کردند که کربوکسیل و متافسفات (P_6O_{18}) روی بیوچار فعال شده مکان‌های جذب را فراهم می‌کنند. سازوکار جذب بیوچار فعال شده برای آترازین شامل نیروهای واندروالس، پیوند هیدروژنی، برهمکنش‌های الکترواستاتیک و پر شدن منافذ بود (جدول ۲؛ Suo et al., 2019). (Radwan et al., 2025) اثر ۱۶ نوع نانوبیوچار که از بلال ذرت، صنوبر داگلاس، اکالیپتوس، سپیدار و چمن تولید شده بودند را بر جذب آفتکش‌های نئونیکوتینوئیدی در خاک بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که نانو بیوچار تهیه شده از صنوبر داگلاس در دمای ۹۰۰ درجه سلسیوس در جذب آفتکش‌های نئونیکوتینوئیدی مؤثرتر بوده است. آنان خواص فیزیکی و شیمیایی نانوبیوچار خصوصا سطح

¹ Triazine

ویژه، قطر حفرات و ترکیبات عناصر را در تعیین راندمان جذب نئونیکوتینوئیدی از طریق برهمکنش‌های آبریز، برهمکنش‌های $\pi-\pi$ و پر شدن منافذ برجسته دانستند (جدول ۲). Lindhardt et al. (2025) اثر بیوچار فعال شده با CO_2 که از کاه جو، کنجاله سویا، کاه گندم، علف مارماهی تولید شده بودند را بر جذب آفت‌کش ۱،۲-دی‌برومواتان^۱ بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که بیوچار فعال شده با CO_2 تهیه شده از کنجاله سویا در جذب آفت‌کش ۱،۲-دی‌برومواتان مؤثرتر بوده است. اصلاح بیوچار کنجاله سویا به وسیله CO_2 منجر به افزایش سطح ویژه و افزایش سهم نسبی ساختارهای سطحی حاوی نیتروژن شد (جدول ۲).

نتیجه‌گیری

بررسی حاضر، پیامدهای کاربرد بیوچار در خاک برای کنترل سرنوشت آفت‌کش‌ها را برجسته کرد. کاربرد بیوچار در خاک تا حد زیادی بر جذب و واجذب آفت‌کش‌ها، تجزیه زیستی و آبشویی آن‌ها در خاک تأثیر می‌گذارد. جذب و واجذب آفت‌کش‌ها روی سطوح بیوچار به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار بستگی دارد که شامل (۱) ساختار و ترکیب شیمیایی بیوچار، (۲) تخلخل و سطح ویژه، (۳) pH و نسبت‌های عنصری و (۴) گروه‌های عاملی سطحی می‌باشد. همچنین مشاهده شده است که همه این ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار به نوع زیست‌توده اولیه و شرایط تولید بستگی دارد. علاوه بر این، با توجه به نوع آفت‌کش‌ها ظرفیت جذب بیوچار نیز متفاوت است. تجزیه آفت‌کش‌ها در خاک از طریق واکنش‌های مختلفی مانند آبکافت (هیدرولیز)، نورکافت، اکسایش و تجزیه زیستی رخ می‌دهد. برای پیشبرد کاربرد بیوچار، کاهش خطرهای محیط‌زیستی ناشی از آفت‌کش‌ها و افزایش راندمان آفت‌کش‌ها، پژوهش‌های عمیق در مورد سازوکارهای جذب بیوچار بسیار مهم است. عواملی که بر زیست‌فراهمی بیوچار، توسعه محصولات کاربردی و استفاده از آن در تولید محصول در مزرعه تأثیر می‌گذارند، باید مورد توجه قرار گیرند تا شواهد علمی مؤثری برای استفاده ایمن و منطقی از بیوچار ارائه شود. در مدیریت آلودگی ناشی از آفت‌کش‌ها، ممکن است لازم باشد رویکردهای فنی دیگری مانند بارگذاری باکتری‌های تجزیه‌کننده در بیوچار برای افزایش قابلیت‌های تجزیه و استفاده از بیوچار برای تهیه کودهای کندرها برای کاهش میزان آفت‌کش مورد استفاده، تلفیق شوند. اگرچه در حال حاضر هنوز چالش‌های زیادی وجود دارند، اما با پیشرفت مداوم فناوری و گسترش کاربردها، اعتقاد بر این است که بیوچار در آینده نقش مهم‌تری ایفا خواهد کرد.

منابع مورد استفاده

References

- Abdollahi, K., Movahedi Naeini, S.A.R., Barani Motlagh, M., Ebrahimi, P. & Roshani G.A. (2019). Evaluation the effect of organic amendments (manure and biochar) on Metribuzin herbicide persistence in soil. *Applied Soil Research*, 8(1): 149-161. (in Persian with English abstract)
- Aldas-Vargas, A., Poursat, B.A.J. & Sutton, N.B. (2022). Potential and limitations for monitoring of pesticide biodegradation at trace concentrations in water and soil. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38, 240. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03426-x>
- An, X., Wu, Z., Shi, W., Qi, H., Zhang, L., Xu, X. & Yu, B. (2021). Biochar for simultaneously enhancing the slow-release performance of fertilizers and minimizing the pollution of pesticides. *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124865. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124865>

¹ 1,2-dibromoethane

- Azimzadeh Y., Najafi N., Abdolmaleki E., & Amirloo B. (2020). Changes in some chemical properties of various organic materials after converting in biochar and hydrochar. *Applied Soil Research*, 7(4), 1–17. (in Persian with English abstract)
- Azimzadeh Y., Najafi N., Reyhanitabar A., Oustan S. & Khataee A. (2020). Effects of phosphate loaded LDH-biochar/hydrochar on maize dry matter and P uptake in a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(12): 1649–1664. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1802012>
- Azimzadeh Y., Najafi N., Reyhanitabar A., Oustan S. & Khataee A. (2021). Modeling of phosphate removal by Mg-Al layered double hydroxide functionalized biochar and hydrochar from aqueous solutions. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 40(2): 565–579. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2020.38042>
- Bian, S., Xu, S., Yin, Z., Liu, S., Li, J., Xu, S. & Zhang, Y. (2021). An efficient strategy for enhancing the adsorption capabilities of biochar via sequential KMnO₄-promoted oxidative pyrolysis and H₂O₂ oxidation. *Sustainability*, 13, 2641. <https://doi.org/10.3390/su13052641>
- Bruckmann, F.S., Schnorr, C., Oviedo, L.R., Knani, S., Silva, L.F.O., Silva, W.L., Dotto, G.L. & Bohn Rhoden, C.R. (2022). Adsorption and photocatalytic degradation of pesticides into nanocomposites: A review. *Molecules*, 27, 6261. <https://doi.org/10.3390/molecules27196261>
- Cara, I.G., T opa, D., Puiu, L. & Jitareanu, G. (2022). Biochar a promising strategy for pesticide-contaminated soils. *Agriculture*, 12, 1579. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101579>
- Chen, Y., Zhang, X., Chen, W., Yang, H. & Chen, H. (2017). The structure evolution of biochar from biomass pyrolysis and its correlation with gas pollutant adsorption performance. *Bioresource Technology*, 246, 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.138>
- Dong, X., Chu, Y., Tong, Z., Sun, M., Meng, D., Yi, X., Gao, T. & Wang, M. D. (2024). Mechanisms of adsorption and functionalization of biochar for pesticides: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 272, 116019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116019>
- Eissa, F., Alsherbeny, S., El-Sawi, S., Slany, M., Lee, S., Shaheen, S.M. & Jamil, T. (2023). Remediation of pesticides contaminated water using biowastes-derived carbon rich biochar. *Chemosphere*, 340, 139819. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139819>
- FAO. (2016). *Food and Agriculture: Key to Achieving the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Job No. I5499, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Garcia, M., Lucia, J., Cox Heike, E., Juan, K., Cornejo Kurt, A. & MCarmen, S. (2014). Characterization and selection of biochar for an efficient retention of tricyclazole in a flooded alluvial paddy soil. *Journal of Hazardous Materials*, 286, 581-588. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jhazmat.2014.10.052>
- Isakovski, M.K., Jevrosimov, I., Tamind`zija, D., Apostolovi`c, T., Knicker, H., la Rosa, J., Ron`cevi`c, S. & Maleti`c, S. (2024). Enhanced retention of hydrophobic pesticides in subsurface soils using organic amendments. *Journal of Hazardous Materials*. 480, 135738. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135738>
- Khaefi, F., Hosseinpur, A.R. & Motaghian, H.R. (2022). Sewage sludge biochar: Physicochemical properties and fractionation of zinc and lead metals. *JWSS - Journal of Water and Soil Science*, 26(2), 61-73. (in Persian with English abstract) <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.26.2.5722>
- Khalid, S., Shahid, M., Murtaza, B., Bibi, I., Natasha Naeem, M.A. & Niazi N.K. (2020). A critical review of different factors governing the fate of pesticides in soil under biochar application. *Science of the Total Environment*, 711: 134645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134645>
- Li, H., Dong, X., Silva, E. & Oliveira, L. (2017). Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*, 178, 466e478. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.072>
- Lindhardt, J.H., Tobler, D.J., Holm, P.E., Li, H. Winter, N. & Hansen, H.C.B. (2025). Carbon dioxide activated biochars as mediators for reductive debromination of 1,2-dibromoethane. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 14661–14668. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06576-1>
- Liu, N., Charrua, A.B., Weng, C.H., Yuan, X.L. Ding, F. (2015). Characterization of biochars derived from agriculture wastes and their adsorptive removal of atrazine from aqueous solution: A

- comparative study. *Bioresource Technology*, 198, 55–62.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.129>
- Losacco, D., Campanale, C., Triozzi, M., Massarelli, C. & Uricchio, V.F. (2024). Application of wood and vegetable waste-based biochars in sustainable agriculture: Evaluation on nitrate leaching, pesticide fate, soil properties, and brassica oleracea growth. *Environments*, 11, 13.
<https://doi.org/10.3390/environments11010013>
- Mengesha, T., Ancha, V.R., Sundar, S. & Pollex, A. (2024). Review on the influence of pyrolysis process parameters for biochar production with minimized polycyclic aromatic hydrocarbon content. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 182, 106699. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106699>
- Nguyen, B.T., Lehmann, J., Hockaday, W.C., Joseph, S. & Masiello, C.A. (2010). Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation. *Environmental Science & Technology*, 44, 3324–3331. <https://doi.org/10.1021/es903016y>
- Pereira, H.A., Martinello, K., Vieira, Y., Diel, J.C., S. Netto aM, Reske G.D., Lorenzett, E., Silva, L.F.O., Burgo, T.A.L. & Dotto, G.L. (2023). Adsorptive behavior of multi-walled carbon nanotubes immobilized magnetic nanoparticles for removing selected pesticides from aqueous matrices. *Chemosphere*, 325, 138384. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138384>
- Rigi, M.R. & Farahbakhsh, M. (2018). Evaluation of leaching and degradation of metribuzin herbicide in different soils. *Iranian Soil and Water Research*, 50(1), 1–12. (in Persian with English abstract)
https://ijswr.ut.ac.ir/article_70097.html
- Sarker, A., Yoo, J. & Jeong, W.T. (2023). Environmental fate and metabolic transformation of two non-ionic pesticides in soil: Effect of biochar, moisture, and soil sterilization. *Chemosphere*, 345, 140458. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140458>
- Sefidgar Shahkolaie, S., Baranimotlagh, M., Dordipour, E. & Khormali, F. (2020). Effects of inorganic and organic amendments on physiological parameters and antioxidant enzymes activities in *Zea mays* L. from a cadmium-contaminated calcareous soil. *South African Journal of Botany*, 128, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.10.007>
- Shi, Y., Wang, S., Xu, M., Yan, X., Huang, J. & Wang, H.W. (2022). Removal of neonicotinoid pesticides by adsorption on modified *Tenebrio molitor* frass biochar: Kinetics and mechanism. *Separation and Purification Technology*, 297, 121506. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121506>
- Sorptive removal of neonicotinoid pesticides by nanobiochars: Efficiency, kinetics, and reusability
Radwan, I., Wang, C., Kim, J.H., Wei, H. & Wang, D. (2025). *Journal of Hazardous Materials*, 493, 138354. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138354>
- Suo, F., You, X., Ma, Y. & Li, Y. (2019). Rapid removal of triazine pesticides by P doped biochar and the adsorption mechanism. *Chemosphere*, 235, 918–925. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.158>
- Saffari, M. (2023) Optimization of nickel removal from aqueous solutions by physical-modified biochar. *Iranian Journal of Health and Environment*. 16 (3), 445–58. (in Persian with English abstract)
<http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6762-en.html>
- Tao, W., Duan, W., Liu, C., Zhu, D., Si, X., Zhu, R., Oleszczuk, P. & Pan, B. (2020). Formation of persistent free radicals in biochar derived from rice straw based on a detailed analysis of pyrolysis kinetics. *Science of The Total Environment*, 715, 136575. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136575>
- Wahla, A.Q., Iqbal, S., Mueller, J.A., Anwar, S., Arslan, M. (2019). Immobilization of metribuzin degrading bacterial consortium MB3R on biochar enhances bioremediation of potato vegetated soil and restores bacterial community structure. *Journal of Hazardous Materials*, 3894(19)31447–5. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121493>
- Wu, J., Jin, C., Yang, Z., Tian, J. & Yang, R. (2015). Synthesis of phosphorus-doped carbon hollow spheres as efficient metal-free electrocatalysts for oxygen reduction. *Carbon*, 82, 562–571. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.11.008>

- Wu, W., Li, J., Lan, T., Muller, K., Niazi, N.K. & Chen, X. (2017). Unraveling sorption of lead in aqueous solutions by chemically modified biochar derived from coconut fiber: a microscopic and spectroscopic investigation. *Science of The Total Environment*, 576, 766-774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.163>
- Wu, W., Li, J., Niazi, N.K., Muller, K., Chu, Y. & Zhang, L. (2016). Influence of pyrolysis temperature on lead immobilization by chemically modified coconut fiberderived biochars in aqueous environments. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 22890-22896. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7428-0>
- Xin, S., Yang, H., Chen, Y., Yang, M., Chen, L., Wang, X. & Chen, H. (2015). Chemical structure evolution of char during the pyrolysis of cellulose. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 116, 263-271. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jaap.2015.09.002>
- Yakout, S.M. (2015). Monitoring the changes of chemical properties of rice strawderived biochars modified by different oxidizing agents and their adsorptive performance for organics. *Bioremediation Journal*, 19, 171e182. <https://doi.org/10.1080/10889868.2015.1029115>
- You, X., Suo, F., Yin, S., Wang, X., Zheng, H., Fang, S., Zhang, C., Li, F. & Li, Y. (2021). Biochar decreased enantioselective uptake of chiral pesticide metalaxyl by lettuce and shifted bacterial community in agricultural soil. *Journal of Hazardous Materials*, 417, 126047. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126047>
- Zhang, H., Liu, M., Yang, H., Jiang, H., Chen, Y., Zhang, S. & Chen, H. (2022). Impact of biomass constituent interactions on the evolution of char's chemical structure: an organic functional group perspective. *Fuel*, 319, 123772. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123772>
- Zhang, P., Sun, H., Yu, L. & Sun, T. (2013). Adsorption and catalytic hydrolysis of carbaryl and atrazine on pig manure-derived biochars: Impact of structural properties of biochars. *Journal of Hazardous Materials*, 244– 245, 217– 224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.11.046>
- Zheng, W., Guo, M., Chow, T., Bennett, D.N. & Rajagopalan, N. (2010). Sorption properties of greenwaste biochar for two triazine pesticides. *Journal of Hazardous Materials*, 181, 121–126. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.103>
- Zhu L., Zhao, N., Tong, L., Lv, Y. & Li, G. (2018). Characterization and evaluation of surface modified materials based on porous biochar and its adsorption properties for 2,4-dichlorophenoxyacetic acid. *Chemosphere* 210, 734–744. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.09>