



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



نقش بیوچار استخوان در پاکسازی زیستی فلزات سنگین و نفت در خاک‌های آلوده

مصطفی ایلخانی پور^{۱*}، مینا محرمی خواجه بلاغ^۱، حسن اعتصامی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و

منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران؛

*E-mail: m.eilkhani@ut.ac.ir

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

چکیده

پاکسازی خاک‌های آلوده به سطوح بالای فلزات سنگین و هیدروکربن‌های نفتی یک چالش بزرگ زیست‌محیطی است. یافتن فناوری‌های مقرون‌به‌صرفه برای پاکسازی و کاهش این آلاینده‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. امروزه یکی از رایج‌ترین منابع مورد استفاده برای تأمین مواد معدنی و آلی مورد نیاز در زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به این آلاینده‌ها انواع بیوچار است. بیوچار استخوان، بیوچار تهیه شده از استخوان حیواناتی مانند گاو و گوسفند است که در برخی از کشورها به دلیل ارزان بودن و پایدار بودن آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعات نشان می‌دهد که بیوچار استخوان یک جاذب و تثبیت‌کننده‌ی فلزات سنگین پایدار است. بیوچار تهیه شده از استخوان به دلیل بیشتر بودن محتوی نیتروژن، فسفر و پتاسیم نسبت به بیوچار تهیه شده از چوب و در مقایسه عملکرد آن با سایر منابع معدنی این عناصر غذایی در فرآیند تحریک زیستی، به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای این منابع در نظر گرفته می‌شود. طبق مطالعات، استفاده از بیوچار استخوان بیان ژن‌های مرتبط با تجزیه‌ی زیستی هیدروکربن‌های نفتی آروماتیک را افزایش می‌دهد. همچنین منافذ ریز و متوسط موجود در ساختار بیوچار استخوان می‌تواند یک زیستگاه مناسب برای میکروارگانیسم‌های نفت‌خوار باشد.

واژگان کلیدی: آلودگی فلزات سنگین، آلودگی نفتی، زیست‌پالایی خاک

مقدمه

آلودگی خاک یک معضل مهم برای سلامت انسان و محیط زیست است. از آلاینده‌های رایج خاک می‌توان به فلزات سنگین و نفت اشاره کرد. آلاینده‌های نفتی و عناصر سنگین مانند آرسنیک، کادمیوم، کروم و سرب می‌توانند در اکوسیستم خاک تجمع یافته و زنجیره‌ی غذایی و سلامت انسان را مختل کنند. نیاز به پاکسازی این خاک‌ها حیاتی است (Azeem et al., 2022; Okwonna & Otaraku, 2022). بیوچار^۱ نوعی زغال زیستی است که از حرارت دادن مواد آلی گیاهی و حیوانی مانند چوب و استخوان در محیط کم یا فاقد اکسیژن در فرآیندی به نام پیرولیز^۲ حاصل می‌شود. زغال ساخته شده از استخوان حیوانات، بیوچار استخوان^۳ نامیده می‌شود. بیوچار استخوان مزایای فراوانی مانند افزایش فراهمی فسفر در خاک، بهبود رشد گیاه و کمک به کاهش آلاینده‌ها در خاک دارد (Novak et al., 2009). بیوچار استخوان یک ماده گرانوله بوده که عمدتاً از هیدروکسی آپاتیت^۴ تشکیل شده است. بیوچار استخوان به دلیل جذب قوی یون‌های فلزات سنگین، به‌عنوان یک عامل تثبیت‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. تثبیت فلزات سنگین در خاک توسط بیوچار استخوان شامل مکانیسم‌های مختلفی از جمله تبادل یونی، تشکیل کمپلکس سطحی و جاذبه الکترواستاتیک است. به دلیل قلیایی بودن، بیوچار استخوان می‌تواند به‌طور مؤثری مقدار pH خاک را افزایش داده و شرایط مطلوبی را برای تثبیت برخی از فلزات سنگین کاتیونی فراهم کند (Azeem et al., 2021). بیوچار استخوان عمدتاً حاوی ۹۰٪ فسفات کلسیم و ۱۰٪ کربن است (Karppinen et al., 2017). در این مقاله، به بررسی تأثیر استفاده از بیوچار استخوان در زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و هیدروکربن‌های نفتی و بررسی امکان استفاده از آن به‌عنوان یک جاذب فلزات سنگین و یک منبع جایگزین برای تأمین عناصر غذایی مورد نیاز در تجزیه‌ی هیدروکربن‌های نفتی در جهت دستیابی به یک روش جدید برای افزایش بازده این فرآیندها پرداخته خواهد شد.

پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین توسط بیوچار استخوان

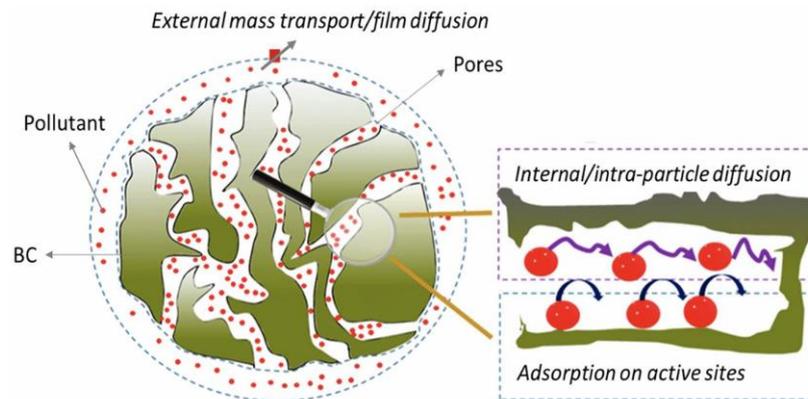
افزودن بیوچار استخوان تغییراتی در خواص پایه‌ی خاک ایجاد می‌کند. بیوچار استخوان منجر به افزایش قابل توجه pH و EC خاک شده که می‌تواند ناشی از قلیایی بودن بیوچار استخوان و آزاد شدن کاتیون‌های پایه مانند کلسیم و منیزیم به خاک باشد. افزایش pH شرایط مساعدی را برای تثبیت فلزات سنگین کاتیونی فراهم می‌کند. جذب فلزات سنگین توسط بیوچار استخوان شامل مکانیسم‌های مختلفی مانند تبادل یونی، جذب الکترواستاتیک، تشکیل کمپلکس سطحی و رسوب‌گذاری است. تشکیل کمپلکس فلزات سنگین با فسفر و کلسیم نیز برای پایداری طولانی مدت فلزات سنگین توسط بیوچار استخوان بسیار مهم است. فلزات سنگین بلافاصله با فسفر آزاد شده از بیوچار استخوان رسوب تشکیل می‌دهند. همچنین به دلیل وجود فسفات، کلسیم در فاز محلول پس از آزاد شدن آن کاهش می‌یابد که با فسفات واکنش و رسوب فسفات کلسیم تشکیل می‌دهد. بیوچار استخوان دارای سطح ویژه‌ی زیاد و گروه‌های عاملی فراوانی است که اتصال فلزات سنگین روی سطح را از طریق جاذبه الکترواستاتیکی افزایش می‌دهد (Mei et al., 2022). مطالعات نشان داده که استفاده از بیوچار استخوان به دلیل قیمت ارزان آن و عدم نیاز به هیچ‌گونه عملیات شیمیایی، یک راهکار مناسب در پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین است. ویژگی‌های جذب بیوچار استخوان برای پاکسازی فلزات سنگین به شدت به ترکیب معدنی این جاذب، به‌ویژه فسفات کلسیم، وابسته است. بیوچار استخوان آلاینده‌ها را تا حد زیادی از خاک جذب می‌کند و مکان‌های جذب هیدروکسی آپاتیت با پروتونه شدن و پروتون‌زدایی سطح باعث تغییر pH خاک می‌شوند. بطور خلاصه نحوه‌ی قرارگیری فلزات سنگین در بافت بیوچار استخوان در شکل ۱ نشان داده شده است (Hart et al., 2023).

¹ Bio-char

² Pyrolysis

³ Bone-char

⁴ Hydroxyapatite



شکل ۱- نحوه‌ی قرارگیری ذرات آلاینده در سطوح تبادل‌ی خارجی و داخلی بیوجار استخوان

مطالعات Mei و همکاران (2022) نشان داد که استفاده از بیوجار استخوان در خاک در مقایسه با شاهد آبشویی مس، روی، سرب و کادمیوم را به ترتیب ۹۱/۲٪، ۳۸/۶٪، ۶۷/۶٪ و ۵۴/۳٪ کاهش داد. همچنین رشد نخودفرنگی را بهبود بخشید و غلظت فلزات سنگین در اندام‌های هوایی گیاه را کاهش داد. در این آزمایش مشاهده شد که عوامل متعددی از جمله دمای پیرولیز، مقدار بیوجار استخوان مورد استفاده، زمان تیمار، نوع خاک، نوع فلز و pH خاک بر تثبیت فلزات سنگین در خاک توسط بیوجار استخوان تأثیر می‌گذارند.

نتایج آزمایشات Chen و همکاران (2006) نشان داد که غلظت سرب در هر دو بخش هوایی و ریشه گیاه کلم با افزایش مقدار بیوجار استخوان کاهش یافته و بیوجار استخوان تهیه شده از بریتانیا با نرخ ۱/۶ (w:w) بیشترین عملکرد را داشت. غلظت سرب در بخش هوایی و ریشه به ترتیب ۵۶٪ و ۷۵/۹٪ کاهش یافت، درحالی که کاربرد بیوجار استخوان تهیه شده از چین با نرخ ۱/۶ (w:w) غلظت سرب در بخش هوایی و ریشه را به ترتیب به ۲،۰۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۸،۴۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش داد که در مقایسه با شاهد به ترتیب ۴۵/۸٪ و ۳۰/۲٪ است. بنابراین افزودن بیوجار استخوان به‌عنوان یک عامل تثبیت‌کننده، باعث کاهش آلودگی سرب در خاک و جلوگیری از انتقال آن به گیاه می‌شود.

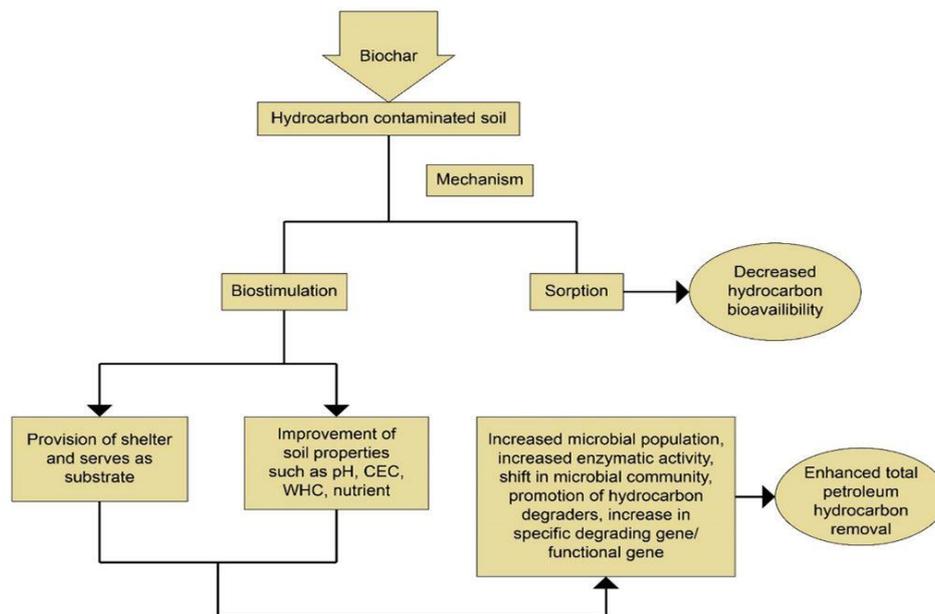
پاکسازی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی توسط بیوجار استخوان

زیست‌پالایی یک روش مناسب در مدیریت خاک‌های آلوده به نفت است. این تکنیک شامل استفاده از باکتری‌ها و قارچ‌ها برای تجزیه‌ی نفت است. زیست‌پالایی شامل روش‌هایی از جمله تحریک زیستی^۵ و تلقیح زیستی^۶ است (Okwonna & Otaraku, 2022). اصلاح خاک با بیوجار استخوان به‌دلیل سازگاری با محیط زیست و ارزانی آن در کاهش آلودگی نفت در خاک توصیه می‌شود (Momoh & Omotosho, 2018). ساختار بسیار متخلخل و سطح وسیع بیوجار و برهمکنش‌های خاک-بیوجار، مقدار رطوبت خاک را افزایش می‌دهد و نرخ تأمین مواد مغذی را افزایش می‌دهد که میزان تخریب هیدروکربن‌های نفتی را افزایش می‌دهد (Harvey et al., 2012). علاوه بر تغییر محیط خاک، ساختار متخلخل ذرات انواع بیوجار مانند بیوجار استخوان همچنین می‌توانند زیستگاه مناسبی را برای میکروارگانیسم‌ها فراهم کنند تا تقریباً مشابه با همان شرایطی که مواد آلی به خاک اضافه می‌شوند، رشد کنند. این امر باعث افزایش زیست‌توده‌ی میکروبی، فراوانی بیشتر میکروارگانیسم‌های قابل کشت و راندمان متابولیک بالاتر نسبت به خاک‌های اصلاح نشده می‌شود. بنابراین استفاده از بیوجار استخوان در خاک‌های آلوده به نفت باعث بهبود فرآیند تحریک زیستی و تأمین عناصر مورد نیاز در پاکسازی زیستی آلودگی نفتی در خاک است (Thies & Rillig, 2012).

⁵ Bio-stimulation

⁶ Bio-augmentation

همچنین مشاهده شده که به کارگیری بیوچار استخوان برای پاکسازی زیستی خاک‌های آلوده به نفت می‌تواند منجر به افزایش بیان ژن‌هایی نظیر *nahAc* که مرتبط با تولید آنزیم‌های دخیل در تجزیه‌ی ترکیبات آروماتیک توسط باکتری‌ها در خاک هستند شود (Karppinen et al., 2017). خلاصه‌ای از نقش بیوچار در پاکسازی زیستی خاک‌های آلوده به نفت در شکل ۲ نشان داده شده است (Vadakkan et al., 2024).



شکل ۲- خلاصه‌ای از فرآیند تأثیر بیوچار بر خصوصیات خاک و ارتباط آن با پاکسازی زیستی خاک‌های آلوده به نفت

نتایج به دست آمده از مطالعه‌ی Nkereuwem و همکاران (2021) نشان می‌دهد که استفاده از بیوچار استخوان به‌طور قابل توجهی ($p < 0.05$) میزان تجزیه‌ی هیدروکربن‌های نفتی (از ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به ۱۳۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و جمعیت باکتری‌ها را در مقایسه با بیوچار مشتق شده از چوب افزایش داد. همچنین کاربرد ترکیبی بیوچار استخوان و بیوچار مشتق شده از چوب منجر به کاهش معنی‌دار ($p < 0.05$) هیدروکربن‌های نفتی باقی‌مانده در خاک آلوده در مقایسه با استفاده از بیوچار استخوان یا بیوچار مشتق شده از چوب به تنهایی شد.

در مطالعه انجام شده توسط Okwonna و Otaraku (2022) رابطه مستقیمی بین مقدار مورد استفاده و عملکرد کودها مشاهده شد. با جرم ۳/۵ کیلوگرم کود، ثابت‌های سرعت ۰/۰۱۸ و ۰/۰۱۹ در روز به ترتیب برای حذف آلاینده‌های هیدروکربنی کل و کربن آلی کل خاک با استفاده از بیوچار استخوان به دست آمد، در حالی که کود NPK به ترتیب نرخ‌های ۰/۰۳ و ۰/۰۲۳ در روز را نشان داد. جرم بیشتری از هر دو ماده، جمعیت باکتریایی کل و در نتیجه عملکرد آن‌ها در فرآیند تجزیه‌ی هیدروکربن‌های نفتی را بهبود بخشید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بیوچار استخوان می‌تواند جایگزینی مناسب برای کودهای NPK (کود معدنی) در فرآیند زیست‌پالایی خاک آلوده به نفت باشد.

نتیجه‌گیری

اصلاح خاک‌ها با بیوچار استخوان می‌تواند یک راهبرد مؤثر و نسبتاً جدید برای کاهش خطر آلودگی و مواجهه با آلاینده‌های آلی در خاک باشد. تشکیل کمپلکس و معدنی شدن فلزات سنگین با فسفات و کلسیم و اتصال آن‌ها به سطح بیوچار استخوان در منافذ ریز و متوسط خارجی و داخلی آن باعث تثبیت فلزات سنگین در خاک و کاهش

دردسترس بودن و سمیت آن برای گیاهان می‌شود. استفاده از بیوچار استخوان در پاکسازی خاک‌های آلوده به نفت باعث افزایش بازده تحریک زیستی در این خاک‌ها می‌شود. همچنین بیوچار استخوان می‌تواند با افزایش بیان ژن‌های دخیل در تخریب هیدروکربن‌های نفتی و با تغییر ساختار جامعه میکروبی، فعالیت متابولیزه کردن هیدروکربن‌های آروماتیک را افزایش دهد. طبق مطالعات انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از بیوچار استخوان در زیست‌پالایی خاک‌های آلوده می‌تواند آن را به جایگزینی مناسب برای سایر منابع معدنی و آلی مورد استفاده در این فرآیند تبدیل کند.

فهرست منابع

- Azeem, M., Ali, A., Arockiam Jeyasundar, P. G. S., Bashir, S., Hussain, Q., Wahid, F., Ali, E. F., Abdelrahman, H., Li, R., Antoniadis, V., Rinklebe, J., Shaheen, S. M., Li, G., & Zhang, Z. (2021). Effects of sheep bone biochar on soil quality, maize growth, and fractionation and phytoavailability of Cd and Zn in a mining-contaminated soil. *Chemosphere*, 282(May). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131016>
- Azeem, M., Shaheen, S. M., Ali, A., Jeyasundar, P. G. S. A., Latif, A., Abdelrahman, H., Li, R., Almazroui, M., Niazi, N. K., Sarmah, A. K., Li, G., Rinklebe, J., Zhu, Y. G., & Zhang, Z. (2022). Removal of potentially toxic elements from contaminated soil and water using bone char compared to plant- and bone-derived biochars: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 427(June 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128131>
- Chen, S. B., Zhu, Y. G., Ma, Y. B., & McKay, G. (2006). Effect of bone char application on Pb bioavailability in a Pb-contaminated soil. *Environmental Pollution*, 139(3), 433–439. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.06.007>
- Hart, A., Porbeni, D. W., Omonmhenle, S., & Peretomode, E. (2023). Waste bone char-derived adsorbents: characteristics, adsorption mechanism and model approach. *Environmental Technology Reviews*, 12(1), 175–204. <https://doi.org/10.1080/21622515.2023.2197128>
- Karppinen, E. M., Stewart, K. J., Farrell, R. E., & Siciliano, S. D. (2017). Chemosphere Petroleum hydrocarbon remediation in frozen soil using a meat and bonemeal biochar plus fertilizer. *Chemosphere*, 173, 330–339. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.016>
- Mei, H., Huang, W., Wang, Y., Xu, T., Zhao, L., & Zhang, D. (2022). Science of the Total Environment One stone two birds : Bone char as a cost-effective material for stabilizing multiple heavy metals in soil and promoting crop growth. *Science of the Total Environment*, 840(April), 156163. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156163>
- Nkereuwem, M. E., Amoo, A. O., Adeleye, A. O., Abubakar, H. S., Onokebhagbe, O., & Kamaldeen, F. (2021). Biostimulatory Influence of Biochar on Degradation of Petroleum Hydrocarbon Impacted Soil. *2(3)*, 227–234. <https://doi.org/10.47540/ijsei.v2i3.333>
- Novak, J. M., Novak, J. M., Busscher, W. J., Laird, D. L., Ahmedna, M., Watts, D. W., & Niandou, M. A. S. (2009). Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science*, 174(2), 105–112.
- Okwonna, O. O., & Otaraku, I. J. (2022). Kinetic modelling of in situ treatment of petroleum hydrocarbon contaminated soil using bone char and NPK fertilizers.
- Thies, J. E., & Rillig, M. C. (2012). Characteristics of biochar: Biological properties. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, March, 85–105. <https://doi.org/10.4324/9781849770552>
- Vadakkan, K., Sathishkumar, K., Raphael, R., Ouseph, V., Mathew, J., & Jose, B. (2024). Science of the Total Environment Review on biochar as a sustainable green resource for the rehabilitation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 941(June), 173679. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173679>

The role of bone char in the bioremediation of heavy metals and oil in contaminated soils

Mostafa Eilkhani Pour^{1*}, Mina Moharami Khajeh Bolagh¹, Hassan Etesami²

1- M.Sc. Student in Soil Biology and Biotechnology, Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

*E-mail: m.eilkhani@ut.ac.ir

2- Associate Professor, Department of Soil Science, Faculties of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Abstract

Remediation of soils contaminated with high levels of heavy metals and petroleum hydrocarbons is a major environmental challenge. Finding cost-effective technologies for the cleanup and reduction of these contaminants is very important. Today, one of the most common sources used to provide the mineral and organic nutrients needed for the bioremediation of soils contaminated with these contaminants is biochar. Bone char is a kind of biochar made from the bones of animals such as cow and sheep, which is used in some countries because of its cheapness and sustainability. Studies show that bone char is a sustainable adsorbent and stabilizer of heavy metals. Biochar made from bone is considered a suitable alternative to biochar made from wood due to its higher nitrogen, phosphorus and potassium content compared to other mineral sources of these nutrients in the biostimulation process. According to studies, the use of bone char increases the expression of genes related to the biodegradation of aromatic petroleum hydrocarbons. Also, the micro-pores and meso-pores in the structure of the bone char can be a suitable habitat for oil-eating microorganisms.

Keywords: Heavy metals contamination, Oil contamination, Soil bioremediation