



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



مقایسه‌ی منابع مختلف بیوجار استخوان و تأثیر آن بر افزایش فراهمی فسفر در خاک

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

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

منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران؛

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

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

چکیده

فراهمی فسفر در خاک بر کیفیت محصولات کشاورزی تأثیر می‌گذارد. باتوجه به کاهش منابع معدنی فسفر در سال‌های آینده، روش‌های جایگزین برای تأمین فسفر برای تضمین کشاورزی پایدار مورد بررسی است. این روش‌ها شامل فراهم کردن فسفر غیرفراهم خاک یا استفاده از کودهای فسفره حاصل از محصولات بازیافتی است. بیوجار استخوان، حاصل از گرماکافت استخوان‌های حیوانی و غنی از فسفر، کلسیم و مواد آلی است که با افزایش فراهمی فسفر در خاک، به‌عنوان جایگزین مناسب و تجدیدپذیر برای کودهای فسفات شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. منابع مختلف استخوان حیوانی مانند استخوان گاو، گوسفند، مرغ و خوک دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی گوناگونی هستند. همچنین بخش‌های مختلف استخوان، مانند استخوان دنده، استخوان کتف، ستون مهره و قلم پا ویژگی‌های متفاوتی دارند. مطالعات نشان داده که استفاده از بیوجار استخوان، فعالیت آنزیم فسفاتاز را افزایش داده و عملکرد باکتری‌های حل‌کننده‌ی فسفات را در مقایسه با خاک‌های کودداده‌نشده تقویت می‌کند. همچنین استفاده از بیوجار استخوان، خطر کوددهی بیش از حد و آبشویی مواد مغذی از خاک که تأثیرات منفی بر اکوسیستم دارند را کاهش می‌دهد. در نتیجه، استفاده از بیوجار استخوان به حفظ محیط زیست کمک کرده و نقش مهمی در افزایش فراهمی فسفر در خاک و توسعه کشاورزی پایدار ایفا می‌کند.

واژگان کلیدی: بن چار، تغذیه‌ی گیاه، زیست‌فراهمی

مقدمه

فسفر یک عنصر غذایی پرمصرف و حیاتی برای رشد گیاهان است که نقش بسیار مهمی در بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی خاک و گیاه ایفا می‌کند. منبع اصلی کود فسفر، سنگ فسفات است که یک منبع تجدیدنپذیر محسوب می‌شود (Warren et al., 2009). کودهای فسفاته به دلیل دارا بودن عناصر سنگین فراوان، یکی از منابع آلودگی در خاک‌های کشاورزی هستند. تجمع این عناصر در خاک با استفاده مداوم از کودهای فسفاته می‌تواند به زنجیره‌ی غذایی منتقل شده و اثرات مضر بر سلامت انسان و حیوانات داشته باشد. همچنین، هزینه‌های بالای کودهای شیمیایی فسفاته به یک مسئله اقتصادی و زیست‌محیطی مهم تبدیل شده است (Gupta et al., 2014). دلایل فوق موجب می‌شود تا جایگزین‌های پایدار و مقرون به صرفه‌ای برای کودهای شیمیایی فسفاته مانند خاکستر استخوان پیدا کنیم. بازیافت زباله‌های کشتارگاه‌ها، به‌ویژه استخوان، و تبدیل آن به بیوپچار استخوان^۱، یکی از فرایندهایی است که برای افزایش فراهمی فسفر در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. بیوپچار استخوان به‌عنوان یک جایگزین مناسب و تجدیدپذیر برای کودهای فسفات شیمیایی در نظر گرفته می‌شود و همچنین با دفع ایمن زباله به حفاظت از جامعه و محیط زیست کمک می‌کند (Glæsner et al., 2019). مشتقات پودر گوشت و استخوان دارای مقادیر بالای کلسیم و فسفر (تا ۴۷٪) هستند (E. Saleh et al., 2023). این ماده حاوی مقادیر بالای آپاتیت^۲ است. آپاتیت موجود در بیوپچار استخوان دارای نسبت کربنات شش تا نه درصد است. بیوپچار استخوان طی عمل کلسیناسیون^۳ یا کلسینه شدن تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد آپاتیت کربناته تشکیل می‌دهد. درحالی که افزایش دمای کلسیناسیون به ۹۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد منجر به تشکیل هیدروکسی آپاتیت (HAP^۴) می‌شود (Figueiredo et al., 2010).

بیوپچارها معمولاً از نظر عناصر مغذی برای گیاه غنی نیستند، بنابراین زغال به‌دست‌آمده از گرماکافت^۵ (فرایند حرارت‌دهی مواد آلی تحت شرایط بدون اکسیژن در دماهای بالا) مواد استخوانی ممکن است ارزش بیشتری برای فراهمی فسفر در خاک داشته باشند، زیرا استخوان سرشار از فسفر، کلسیم و منیزیم هستند که همگی عناصر اصلی تغذیه گیاه هستند (Leinweber et al., 2018). یکی دیگر از مزایای استفاده از بیوپچار استخوان، عدم وجود فلزات سنگین در مقایسه با سنگ فسفات است که باعث حفظ سلامت خاک است. ترکیبات کربن آلی موجود در بیوپچار استخوان محتوای مواد آلی خاک را بهبود می‌بخشد (E. Saleh et al., 2023). کاربرد بیوپچار استخوان در خاک به‌طور قابل توجهی دردسترس بودن فسفر و رشد گیاه را افزایش می‌دهد. شیوه‌های کشاورزی مانند استفاده همزمان از اسیدهای آلی یا کودهای گوگردی یا نیتروژنی با بیوپچار استخوان در برخی از خاک‌ها نقش مهمی در افزایش فراهمی فسفر دارد (El et al., 2024). این خواص بیوپچار استخوان، آن را برای استفاده به‌عنوان کودهای فسفر کننده، بسیار مناسب می‌کند (Ahmed et al., 2023). هدف از انجام این مطالعه، معرفی بیوپچار استخوان به‌عنوان یک منبع جدید کود فسفاته و همچنین مقایسه‌ی منابع مختلف استخوان حیوانی مانند گاو، گوسفند، مرغ و خوک و مقایسه‌ی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بخش‌های مختلف استخوان مانند استخوان کتف، ستون مهره، قلم پا و استخوان دنده و بررسی تأثیر استفاده از بیوپچار استخوان بر افزایش فراهمی فسفر در خاک است.

فرایند تولید بیوپچار استخوان

بیوپچار استخوان از طریق فرایند گرماکافت استخوان‌های چربی‌زدایی شده و ژلاتین‌زدایی شده در محیطی با اکسیژن محدود یا شرایط بی‌هوازی در دمای ۳۰۰ تا ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شود. ماده‌ی حاصل از گرماکافت، پودر

¹ Bone-char

² Apatite

³ Calcination

⁴ Hydroxyapatite

⁵ Pyrolysis

سیاه متخلخل غنی از کلسیم و فسفر است که منبع عالی کود محسوب می‌شود. بیوچار استخوان به خودی خود به دلیل محتوای کم کربن آلی، بیوچار محسوب نمی‌شود (Glæsner et al., 2019). بیوچار استخوان طی فرایندهای گرمکافت، گازی‌سازی^۶ (تبدیل زیست‌توده‌ی حاوی کربن به کربن مونوکسید، هیدروژن و کربن‌دی‌اکسید) و کربنیزاسیون هیدروترمال^۷ (تبدیل ترکیبات آلی به کربن‌های ساختاریافته در شرایط مرطوب) تولید می‌شود (El et al., 2024).

مقایسه خصوصیات منابع مختلف استخوان حیوانی برای تولید بیوچار استخوان

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچار استخوان تحت تأثیر عوامل مختلفی است. یکی از مهم‌ترین این عوامل، نوع گونه‌ی حیوانی مورد استفاده مانند گاو، گوسفند، خوک و مرغ، همچنین بخش‌های مختلف از استخوان‌های آن حیوان مانند استخوان قلم پا، استخوان دنده، استخوان کتف و استخوان ستون فقرات است (El et al., 2024). تحقیقات نشان داده که بیوچار استخوان تهیه شده از دنده گاو، منافذ سطحی فراوان‌تر و گروه‌های عاملی بازی بیشتری نسبت به بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان سایر قسمت‌های بدن گاو دارد (Wang et al., 2020).

مطالعات انجام شده توسط Ahmed و همکاران (2023) نشان داده که صرف نظر از روش و دمای فرآوری، محتوای فسفر کل در بیوچار استخوان خوکی نسبت به بیوچار استخوان گوسفندی و بیوچار استخوان مرغی بیشتر بود. از سوی دیگر، فسفر محلول در بیوچار استخوان مرغی نسبت به بیوچار استخوان گوسفندی و بیوچار استخوان خوکی بیشتر بود. همچنین مقدار هدایت الکتریکی (EC^8) در بیوچار استخوان گوسفندی $1/58 \text{ ds.m}^{-1}$ ، در بیوچار استخوان مرغی $1/02 \text{ ds.m}^{-1}$ و در بیوچار استخوان خوکی $0/61 \text{ ds.m}^{-1}$ بود.

Wang و همکاران (2020) گزارش دادند که استفاده از بخش‌های مختلف استخوان، بر خواص فیزیکی و شیمیایی بیوچار استخوان تأثیر دارد. کل محتوای فسفر موجود در بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان قلم پا (۱۷۸/۸ گرم در کیلوگرم) < بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان کتف (۱۷۴/۱ گرم در کیلوگرم) < بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان دنده (۱۶۵/۴ گرم در کیلوگرم) < بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان ستون فقرات (۱۳۷/۰ گرم در کیلوگرم) مشتق شده است. در حالی که کل محتوای کلسیم موجود در بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان قلم پا < بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان کتف < بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان ستون فقرات < بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان دنده است. از طرفی محتوای کربن موجود در بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان دنده < بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان کتف < بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان ستون فقرات < بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان قلم پا است. همچنین کل محتوای نیتروژن موجود در بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان دنده < بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان ستون فقرات < بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان کتف < بیوچار استخوان تهیه شده از استخوان قلم پا است.

تأثیر بیوچار استخوان بر فراهمی فسفر در خاک

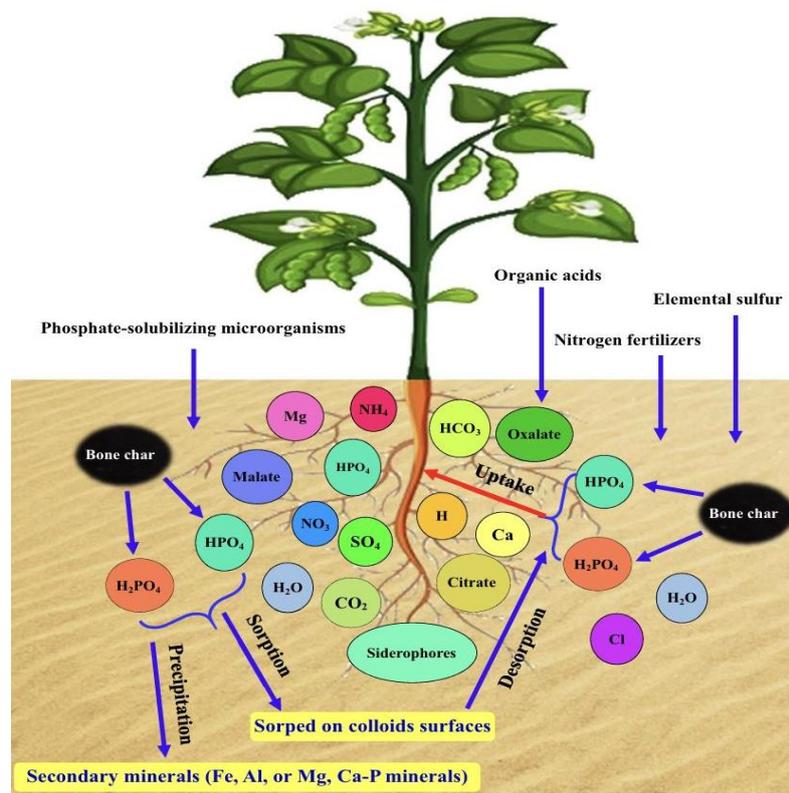
اصلاح خاک‌های اسیدی با بیوچار استخوان باعث می‌شود قابلیت فراهمی فسفر هفت برابر بیشتر از خاک اصلاح‌نشده بهبود یابد. سرنوشت بیوچار استخوان در خاک و اثرات آن بر رشد گیاه در شکل ۱ نشان داده شده است (El et al., 2024). فسفر قابل جذب بیوچار استخوان دو تا پنج برابر بیشتر از فسفر قابل جذب سنگ فسفات و ۲۴ درصد کمتر از کود سوپرفسفات تریپل (TSP^9) بود. در خاک‌های با تثبیت فسفر بالا، بیوچار استخوان کارایی خود را به‌عنوان منبع جایگزین کود فسفات، همانند کود سوپرفسفات تریپل، ثابت کرد (Zwetsloot et al., 2015).

⁶ Gasification

⁷ Hydrothermal carbonization

⁸ Electrical conductivity

⁹ Triple superphosphate



شکل ۱- سرنوشت بیوچار استخوان در خاک و اثرات آن بر رشد گیاه

به‌طور کلی، جامعه میکروبی خاک با تسریع انحلال و معدنی کردن فسفر، نقش مهمی در فراهمی فسفر در خاک ایفا می‌کند. با این حال، میکروارگانیزم‌ها نیز برای منابع فسفر با گیاهان رقابت می‌کنند، زیرا دارای سیستم‌های جذب فسفر مؤثر و القایی هستند. گزارش شده است که هم محتوای اولیه فسفر خاک و نوع کود فسفره بر چرخه فسفر و عملکرد باکتری‌های مؤثر در چرخه فسفر در خاک تأثیر می‌گذارند. در مورد محتوای اولیه فسفر خاک، نشان داده شده است که در خاک‌های غنی از فسفر، ابتدا منبع فسفر معدنی تخلیه می‌شود و منبع فسفر آلی تحت محدودیت فسفر معدنی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (Blake et al., 2003). استفاده از باکتری‌های معدنی‌کننده فسفر که حامل ژن *phoD* (کدکننده آنزیم فسفاتاز) هستند با افزایش فراهمی فسفر موجود در بیوچار استخوان می‌تواند باعث بهبود عملکرد گیاهان شود. همچنین کاربرد کودهای فسفره کندرها مانند سنگ فسفات یا بیوچار، فعالیت‌های بالقوه فسفاتاز را افزایش داده و باکتری‌های حل‌کننده فسفات را در مقایسه با خاک‌های کود داده نشده، تقویت می‌کند. شیوه‌های کشاورزی مانند استفاده هم‌زمان از اسیدهای آلی یا کودهای گوگردی یا نیتروژنی با بیوچار استخوان در برخی از خاک‌ها نقش مهمی در افزایش در دسترس بودن فسفر دارد (Anderson et al., 2011).

نتیجه‌گیری

استفاده از بیوچار استخوان به‌عنوان یک جایگزین تجدیدپذیر برای کودهای فسفات شیمیایی، مزایای متعددی را در بهبود سلامت خاک و تغذیه گیاه دارد. منابع مختلف بیوچار استخوان مانند استخوان گاو، گوسفند، مرغ و خوک حاوی مقادیر متفاوتی از فسفر هستند، به‌طوری که فسفر محلول در بیوچار استخوان مرغی بیشتر از سایر منابع گزارش شده است. همچنین محتوای فسفر کل موجود در استخوان قلم پا بیشتر از سایر بخش‌های استخوان بود. این کود

علاوه بر تأمین عناصر اصلی مورد نیاز گیاه، با افزایش قابلیت در دسترس بودن فسفر رشد گیاهان را به طور قابل توجهی تقویت می‌کند. اثرات مثبت بیوچار استخوان بر فعالیت میکروارگانیسم‌های حل‌کننده‌ی فسفات، نقش مهمی در چرخه فسفر خاک دارد و می‌تواند روند آزادسازی و معدنی کردن فسفر را تسریع کند. بنابراین بیوچار استخوان به‌عنوان یک گزینه مناسب و پایدار در کشاورزی معرفی می‌شود که می‌تواند نقش مهمی در کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی و حفظ منابع معدنی محدود داشته باشد.

فهرست منابع

- Ahmed, M., Nigussie, A., Addisu, S., Belay, B., Lehmann, J., & Sato, S. (2023). Valorization of animal bone waste for agricultural use through biomass co-pyrolysis and bio-augmentation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(14), 12823–12832. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02100-w>
- Anderson, C. R., Condon, L. M., Clough, T. J., Fiers, M., Stewart, A., Hill, R. A., & Sherlock, R. R. (2011). Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. *Pedobiologia*, 54(5–6), 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2011.07.005>
- Blake, L., Johnston, A. E., Poulton, P. R., & Goulding, K. W. T. (2003). Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. *Plant and Soil*, 254(2), 245–261. <https://doi.org/10.1023/A:1025544817872>
- E. Saleh, M., Khaled, I., El-Gamal, E., Abdelsalam, A., & Kamh, M. (2023). Available Phosphorous and Organic Carbon as an Indication for the Evaluation of Bone Char and Bone Ash Applied to Calcareous Soil. *Alexandria Science Exchange Journal*, 44(2), 175–192. <https://doi.org/10.21608/asejaiqsae.2023.305025>
- El, A., Abu, E., & Amin, Z. (2024). Using Bone Char as a Renewable Resource of Phosphate Fertilizers in Sustainable Agriculture and its Effects on Phosphorus Transformations and Remediation of Contaminated Soils as well as the Growth of Plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(4), 6980–6998. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-02018-y>
- Figueiredo, M., Fernando, A., Martins, G., Freitas, J., Judas, F., & Figueiredo, H. (2010). Effect of the calcination temperature on the composition and microstructure of hydroxyapatite derived from human and animal bone. *Ceramics International*, 36(8), 2383–2393. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.07.016>
- Glæsner, N., Hansen, H. C. B., Hu, Y., Bekiaris, G., & Bruun, S. (2019). Low crystalline apatite in bone char produced at low temperature ameliorates phosphorus-deficient soils. *Chemosphere*, 223, 723–730. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.048>
- Gupta, D. K., Chatterjee, S., Datta, S., Veer, V., & Walther, C. (2014). Role of phosphate fertilizers in heavy metal uptake and detoxification of toxic metals. *Chemosphere*, 108(May 2018), 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.01.030>
- Leinweber, P., Hagemann, P., Kebelmann, L., Kebelmann, K., & Morshedizad, M. (2018). Bone char as a novel phosphorus fertilizer. *Phosphorus Recovery and Recycling*, 419–432. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8031-9_29
- Wang, M., Liu, Y., Yao, Y., Han, L., & Liu, X. (2020). Comparative evaluation of bone chars derived from bovine parts: Physicochemical properties and copper sorption behavior. *Science of the Total Environment*, 700, 134470. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134470>
- Warren, G. P., Robinson, J. S., & Someus, E. (2009). Dissolution of phosphorus from animal bone char in 12 soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 84(2), 167–178. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9235-6>
- Zwetsloot, M. J., Lehmann, J., & Solomon, D. (2015). Recycling slaughterhouse waste into fertilizer: How do pyrolysis temperature and biomass additions affect phosphorus availability and chemistry? *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(2), 281–288. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6716>

Comparison of different sources of bone char and its effect on increasing phosphorus availability in soil

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

The availability of phosphorus in soil affects the quality of agricultural products. Given the decline in mineral phosphorus resources in the coming years, alternative methods for providing phosphorus are being investigated to ensure sustainable agriculture. These methods include providing non-available phosphorus from soil or using phosphorus fertilizers from recycled products. Bone char, obtained from the pyrolysis of animal bones and rich in phosphorus, calcium and organic matter, is used as a suitable and renewable alternative to chemical phosphate fertilizers by increasing the availability of phosphorus in soil. Different sources of animal bone such as cattle, sheep, chicken and pig bones have different physical and chemical properties. Also, different parts of the bone, such as ribs, scapulae, vertebrae and scapulae have different properties. Studies have shown that the use of bone char increases the activity of the phosphatase enzyme and enhances the function of phosphorus-solubilizing bacteria compared to unfertilized soils. The use of bone char also reduces the risk of overfertilization and leaching of nutrients from soil, which have negative effects on the ecosystem. As a result, the use of bone char helps to preserve the environment and plays an important role in increasing the availability of phosphorus in soil and developing sustainable agriculture

Keywords: Bone char, Plant nutrition, Bioavailability