

Impact of Nano Poultry Bone Char on Phosphorus Dynamics and Mineral Forms in Calcareous Soil

Fatemeh Sawari¹, Abdolamir Moezzi², Neda Moradi^{3*}

(Received: January 2026

Accepted: February 2026)

Abstract

Low phosphorus availability in calcareous soils of arid and semi-arid regions is a major challenge for plant nutrition and crop productivity. Organic amendments, such as poultry bone char, can be an effective strategy to enhance phosphorus availability in these soils. Therefore, this study aimed to investigate the effect of nano bone char on phosphorus release and the distribution of different mineral phosphorus forms in calcareous soil. An incubation experiment was conducted in a completely randomized design with five treatments: control, poultry bone char at 200 and 400 mg P kg⁻¹ soil, and nano poultry bone char at 200 and 400 mg P kg⁻¹ soil, for 60 days at 25 ± 2°C. At the end of the incubation period, mineral phosphorus forms and phosphorus release kinetics from 1 to 72 hours were measured and fitted to pseudo-first-order, pseudo-second-order, and Elovich kinetic models. The results indicated that nano poultry bone char at 400 mg kg⁻¹ increased dicalcium phosphate and octacalcium phosphate by 3.02 and 3.10-fold, respectively, compared to the control. Poultry bone char at 400 mg kg⁻¹ increased the apatite form by 67.45% relative to the control. Based on the kinetic model fitting, the pseudo-second-order model provided the best fit, with the highest R² and the lowest standard error. The highest and lowest q_e values in the pseudo-second-order model occurred with nano poultry bone char at 400 mg kg⁻¹ and the control, respectively. Overall, the results showed that the application of bone char, especially nano poultry bone char, in phosphorus-deficient soils increased soil phosphorus availability. Therefore, the application of nano poultry bone char as an organic amendment is recommended to optimize phosphorus release and improve phosphorus availability in calcareous soils.

Keywords: Bone char, Calcareous soil, Phosphorus availability, Phosphorus release, Soil amendment.

Sawari F., Moezzi A. and Moradi N. 2026. Impact of Nano Poultry Bone Char on Phosphorus Dynamics and Mineral Forms in Calcareous Soil. *Applied Soil Research*, 14(2): 1-16.

1- Former MSc Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3- Associate professor, Soil and Water Research Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran.

* Corresponding Author Email: n_moradi18@yahoo.com

تأثیر نانوزغال استخوان مرغی بر پویایی و شکل‌های معدنی فسفر در خاک آهکی

فاطمه سواری^۱، عبدالامیر معزی^۲، ندا مرادی^{۳*}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۴)

چکیده

فراهمی کم فسفر در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک یک چالش عمده در تغذیه گیاهان و افزایش بهره‌وری محصولات می‌باشد. استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی مانند زغال استخوان مرغی می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود فراهمی فسفر در این خاک‌ها باشد. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر نانوزغال استخوان بر رهاسازی فسفر و توزیع شکل‌های معدنی فسفر در خاک آهکی انجام شد. آزمایش انکوباسیون به صورت طرح کاملاً تصادفی با پنج تیمار شامل (شاهد، زغال استخوان مرغی در سطح ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک) به مدت ۶۰ روز در دمای $25 \pm 2^\circ\text{C}$ اجرا گردید. پس از پایان انکوباسیون شکل‌های معدنی فسفر و سینتیک رهاسازی فسفر در زمان‌های ۱ تا ۷۲ ساعت اندازه‌گیری و به معادلات سینتیکی شبه درجه اول، شبه درجه دوم و ایلوویچ برازش داده شدند. نتایج نشان داد که نانوزغال استخوان مرغی در سطح ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مقدار دی‌کلسیم فسفات و اکتاکلسیم فسفات را به ترتیب ۳/۰۲ و ۳/۱ برابر در مقایسه با شاهد افزایش داد. زغال استخوان مرغی در سطح ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مقدار شکل آپاتیت را ۶۷/۴۵ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد. بر اساس نتایج برازش داده‌ها، مدل شبه درجه دوم با داشتن بالاترین مقدار R^2 و خطای استاندارد کمتر، بیشترین برازش را داشت. بیشترین و کمترین مقدار q_e در مدل شبه درجه دوم به ترتیب متعلق به تیمار نانوزغال استخوان مرغی در سطح ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و تیمار شاهد بود. نتایج کلی این تحقیق نشان داد که استفاده از زغال استخوان به‌ویژه نانوزغال استخوان در خاک‌های فقیر از فسفر، سبب افزایش فراهمی فسفر در خاک شد. بنابراین، استفاده از نانوزغال استخوان مرغی به عنوان اصلاح‌کننده آلی، برای بهینه‌سازی رهاسازی و افزایش فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اصلاح خاک، خاک آهکی، رهاسازی فسفر، زغال استخوان، فراهمی فسفر

سواری ف، معزی ا، مرادی ن. ۱۴۰۵. تأثیر نانوزغال استخوان مرغی بر پویایی و شکل‌های معدنی فسفر در خاک آهکی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۴، شماره ۲. ص: ۱-۱۶.

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران (مکاتبه کننده)

* پست الکترونیک: n_moradi18@yahoo.com

مقدمه

فسفر به عنوان یک منبع تجدیدناپذیر شناخته شده و انتظار می رود تا سال ۲۰۴۵، تقاضای فسفر در سطح جهانی از عرضه آن، بیشتر شود (Jiang et al., 2019). فسفر یک عنصر غذایی ضروری برای رشد و عملکرد گیاهان محسوب می شود و به شکل های آلی یا معدنی در خاک یافت می شود. فسفر نقش کلیدی در فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاهان مختلف از جمله در انتقال انرژی، فتوسنتز، تقسیم سلولی و توسعه ریشه ایفا می کند (Nedelciu et al., 2020).

با وجود اهمیت بالای این عنصر غذایی، فراهمی فسفر در بسیاری از خاک های زراعی، به ویژه خاک های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک، محدود بوده و این امر یکی از مهم ترین عوامل کاهش بهره وری تولید محصولات کشاورزی محسوب می شود. در خاک های آهکی، جذب فسفر در گیاهان کم است که علت عمده آن به دلیل مقدار زیاد کربنات کلسیم، مقدار کم ماده آلی و تثبیت فسفر به شکل های Ca-P می باشد (De ponti et al., 2012; Moradi & Rasouli-Sadaghiani, 2019). در خاک های ایران نیز کمبود فسفر یکی از مسائل مطرح و مهم می باشد (Jalali & SajadiTabar, 2011). در این خاک ها، فسفر افزوده شده به خاک، به سرعت با کلسیم واکنش داده و به شکل ترکیبات کم محلول مانند فسفات های کلسیمی پایدار تبدیل می شود که فراهمی آن برای گیاهان کاهش می یابد (Havlin et al., 2014). این پدیده منجر به کاهش کارایی مصرف کودهای فسفوری و افزایش هزینه های تولید و مخاطرات زیست محیطی می شود.

در سال های اخیر، استفاده از اصلاح کننده های آلی و معدنی جایگزین، به ویژه مواد حاصل از بازیافت پسماندها، به عنوان راهکاری پایدار برای بهبود پویایی فسفر خاک مورد توجه قرار گرفته است. زغال استخوان که از گرماکافت بقایای استخوانی دام و طیور تولید می شود، به عنوان منبعی آهسته رهش از فسفر شناخته شده و مطالعات متعددی نشان داده اند که این ماده می تواند توزیع شکل های معدنی فسفر را در خاک تغییر داده و سهم شکل های قابل دسترس تر فسفر را افزایش دهد (Vassilev et al., 2021; Chen et al., 2022). زغال استخوان در مقایسه با زغال های با منشأ گیاهی، کربن

کمتری دارد، اما فسفات کلسیم آن به علت وفور این ماده در استخوان های انسان و حیوان، بیشتر است (Bautinguiza et al., 2012). صنایع ماهی و گوشت، ضایعات زیادی دارند که بخش مهمی از آن را استخوان تشکیل می دهد (Toldra, 2016). بنابراین بررسی اهمیت این بقایا با فرآیندی که هدف آن توسعه مواد با عملکرد پیشرفته است، حائز اهمیت است (Ferraro et al., 2017). زغال استخوان نوعی متفاوت از مواد کربن دار است که منشأ حیوانی داشته و از استخوان حیوانات تهیه می شود (Aseem et al., 2022).

بازیابی فسفر در بقایای مرغداری مانند استخوان که به طور معمول سرشار از فسفر است، برای کشاورزی پایدار و امنیت غذایی جهانی ضروری است (Sun et al., 2018). بازیافت بقایای کشتارگاهی به خصوص استخوان و تولید زغال استخوان یکی از راهکارهایی است که برای تأمین فسفر و حاصلخیزی خاک کاربرد دارد (Glaesner et al., 2019). ذرات تولید شده زغال استخوان حاوی ۱۳۰ تا ۱۵۰ گرم بر کیلوگرم فسفر به طور عمده به شکل هیدروکسی آپاتیت $(Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2)$ هستند. تبدیل استخوان حیوانات به زغال استخوان از طریق فرآیند گرماکافت مزایای زیست محیطی و اقتصادی زیادی دارد، زیرا با توجه به آلودگی زیست محیطی و قیمت های بالای بین المللی کودهای شیمیایی فسفر، ارزان و فاقد فلزات سنگین موجود در کودهای فسفاته است (Amin, 2020). بطور کلی زغال استخوان حاوی فلزات سنگین یا آلاینده های آلی نیست، اما سرشار از فسفر و کلسیم است؛ ولی فسفر در زغال زیستی حلالیت پایینی دارد. رهاسازی فسفر از زغال استخوان در خاک به مقدار زیادی تحت تأثیر ویژگی های شیمیایی خاک قرار می گیرد (Warren et al., 2009). همچنین فراهمی فسفر در خاک قلیایی به شدت تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله محتوای کربنات کلسیم (Leytemand Mikkelsen, 2005)، بافت خاک (Pizzeghello et al., 2012; Jalal, 2019)، شوری (Bai et al., 2017)، pH، کاتیون های محلول (سدیم، کلسیم و منیزیم) و آنیون های محلول (کلرید، نیترات و سولفات) و فسفر کل (Li et al., 2019) می باشد. با این حال، کارایی زغال استخوان ممکن است به دلیل اندازه نسبتاً درشت ذرات و سطح ویژه محدود، در برخی شرایط خاکی به ویژه خاک های آهکی، با محدودیت مواجه شود.

آلودگی‌های زیست‌محیطی، مدیریت پسماند و تحقق اصول اقتصاد چرخشی و کشاورزی پایدار قرار می‌گیرد (Lehmann & Joseph, 2015). بنابراین هدف از این پژوهش بررسی کارایی نانوزغال استخوان مرغی بر شکل‌های معدنی و سینتیک رهاسازی فسفر در خاک آهکی است. نوآوری اصلی این تحقیق در به‌کارگیری نانوزغال استخوان مرغی به‌عنوان منبع بازیافتی فسفر و ارزیابی همزمان تغییرات شکل‌های معدنی فسفر و رفتار سینتیکی رهاسازی آن نهفته است. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای توسعه اصلاح‌کننده‌های نوین خاک، افزایش کارایی مصرف فسفر و حرکت به‌سوی کشاورزی پایدار و اقتصاد چرخشی فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

تهیه زغال استخوان و نانوزغال استخوان مرغی و اندازه گیری ویژگی‌ها آنها

زغال استخوان مورد مطالعه از استخوان مرغی تهیه شد. ابتدا استخوان مرغی جمع‌آوری سپس بعد از خشک شدن، جهت چربی‌زدایی و برطرف کردن ناخالصی‌های دیگر، با آب جوش سه بار به مدت ۱۰ دقیقه شستشو شد و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس در آون خشک گردید (Amin, 2023). استخوان‌ها بعد از خشک شدن به قطعات بین ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر شکسته شدند. استخوان‌ها در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس برای ۲ ساعت در شرایط اکسیژن کم گرماگرفت شدند. سپس زغال استخوان خرد شده از الک ۱ میلی‌متر عبور داده شد (Amin, 2023). زغال استخوان مرغی تولید شده جهت تهیه نانوزغال استخوان (اندازه ذرات به‌طور متوسط نانو) بعد از عبور دادن زغال استخوان از الک ۵/۰ میلی‌متر، از دستگاه آسیاب گلوله‌ای دانشکده علوم دانشگاه شهید چمران اهواز به اندازه نانو استفاده شد (Liang et al., 2023) سپس برای تعیین توزیع اندازه ذرات زغال استخوان مرغی در ابعاد نانو از دستگاه Particle Size Analyzer استفاده شد.

در این راستا، پیشرفت‌های فناوری نانو امکان تولید نانوزغال استخوان را فراهم کرده است. کاهش اندازه ذرات تا مقیاس نانو موجب افزایش چشمگیر سطح ویژه، تعداد مکان‌های فعال سطحی و واکنش‌پذیری شیمیایی این ماده می‌شود که می‌تواند بر سینتیک رهاسازی فسفر و تعامل آن با اجزای خاک اثرگذار باشد (Liu et al., 2023). اخیراً پژوهشگران استفاده از ترکیبات نانو برای توسعه روش‌های اصلاح زغال استخوان را پیشنهاد نموده‌اند (Mahmoud et al., 2022; Rajput et al., 2022).

به‌علت ویژگی‌های فیزیکی خاص نانومواد مانند نسبت سطح به حجم و واکنش‌پذیری بالا، توانایی اصلاح شیمی سطح، فاصله انتشار دورن ذره کوچکتر، کارایی حذف آلاینده بالاتر، نانوبیوتکنولوژی برای کاربردهای زیست محیطی مورد توجه بسیاری قرار گرفته است (Xia et al., 2022). نانوبیوتکنولوژی در دهه کنونی گسترش فوق العاده‌ای داشته و موجب بهبود و رشد تمامی بخش‌های جامعه مانند: پزشکی، غذا، مهندسی، بخش پلیمر و الکترونیک شده است. علی‌رغم اینکه با کمک نانوبیوتکنولوژی می‌توان بخش کشاورزی، بیماری‌شناسی کشاورزی، اصلاح خاک و پایش آلودگی آب، کشاورزی پایدار، آفت‌کش‌های نانو، کشاورزی هوشمند و کودها را بهبود بخشید، اما فناوری نانو در کاربردهای کشاورزی به ویژه در زمینه‌های کوددهی هنوز در حال توسعه است (DeRosa, 2010; Mastronardi et al., 2015; Mahmoud et al., 2020; Mahaletchumi, 2021; Ibrahim and Hegab, 2022).

گزارش‌ها حاکی از آن است که مواد نانومقیاس قادرند سینتیک رهاسازی فسفر را بهبود بخشیده، تعادل بین جذب و واجذب فسفر را تغییر دهند و بخشی از فسفر پایدار را به شکل‌های قابل‌جذب برای گیاه تبدیل کنند (Liu et al., 2023; Zhang et al., 2024). بررسی تأثیر نانوزغال استخوان مرغی بر شکل‌های معدنی فسفر و سینتیک رهاسازی آن، می‌تواند درک عمیق‌تری از مکانیسم‌های کنترل‌کننده پویایی فسفر در خاک‌های آهکی فراهم آورد؛ موضوعی که تاکنون کمتر به‌صورت جامع مورد بررسی قرار گرفته است (Zhang et al., 2024). علاوه بر این، استفاده از نانوزغال استخوان مرغی از دیدگاه زیست‌محیطی نیز حائز اهمیت است؛ زیرا این ماده با تبدیل پسماندهای صنعت مرغداری به یک اصلاح‌کننده ارزشمند خاک، در راستای کاهش

اندازگیری ویژگی‌های زغال استخوان و نانوزغال استخوان

مقادیر pH و EC در نمونه‌های زغال استخوان و نانوزغال استخوان مرغی در نسبت ۱۰ : ۱ نمونه به آب مقطر پس از ۳۰ دقیقه شیکر کردن، اندازه‌گیری شد (Amin, 2020). فسفر قابل استفاده در زغال استخوان مرغی توسط NaHCO_3 نیم مولار در $\text{pH} = 8.5$ بر اساس روش تعیین شد (Olsen et al., 1954). گروه‌های عامل سطحی در زغال استخوان و نانوزغال استخوان توسط طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) در طیف ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. مورفولوژی نمونه‌ها از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM)، ترکیبات عنصری (C، N، H و S) با استفاده از دستگاه آنالیز عنصری و سطح ویژه توسط روش BET اندازه‌گیری گردید.

تهیه نمونه خاک و اندازه‌گیری ویژگی‌های آن

برای تهیه خاک مورد مطالعه ابتدا چند نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری از خاک شرکت کشت و صنعت نیشکر امام خمینی برداشته و بعد از هوا خشک کردن از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. سپس بعد از اندازه‌گیری فسفر قابل دسترس خاک‌ها، یک نمونه خاک با مقدار فسفر قابل دسترس پایین انتخاب شد (Olsen et al., 1954). سپس برخی از ویژگی‌های نمونه خاک انتخاب شده مانند بافت خاک به روش هیدرومتری، pH و EC در عصاره ۱:۵ خاک به آب مقطر (Page et al., 1982)، کربن آلی خاک به روش والکلی و بلک (Walkly & Black, 1934)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی کردن با اسید کلریدریک (Rayment, 1992)، فسفر قابل استفاده با روش اولسن اندازه‌گیری شدند (Olsen et al., 1954). فسفر کل خاک نیز به روش هضم با اسید نیتریک اندازه‌گیری شد (Olsen & sommer, 1982). بر اساس نتایج جدول ۱، خاک مورد مطالعه آهکی، غیرشور، با بافت لوم رسی و دارای ماده آلی کم بود. مقدار پایین فسفر قابل دسترس نشان‌دهنده فراهمی کم فسفر در این خاک بود که با pH نسبتاً بالا و مقدار زیاد کربنات کلسیم معادل همخوانی دارد.

طراحی آزمایش انکوباسیون

آزمایش انکوباسیون در آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. آزمایش انکوباسیون برای بررسی تأثیر نانوزغال استخوان گاوی و مرغی بر رهاسازی و شکل‌های معدنی فسفر در خاک آهکی اجرا شد. این تحقیق در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تیمار شامل: (شاهد، زغال استخوان مرغی در سطح ۲۰۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، زغال استخوان مرغی در سطح ۴۰۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، نانوزغال استخوان مرغی در سطح ۲۰۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک و نانوزغال استخوان مرغی ۴۰۰ در سطح میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک) در سه تکرار انجام شد. برای انجام آزمایش انکوباسیون ابتدا ۲۰۰ گرم از نمونه خاک در ظروف پلاستیکی ریخته و سپس تیمارهای آزمایشی مورد استفاده به نمونه‌های خاک اضافه شد. رطوبت نمونه خاک در تیمارهای مختلف در حدود ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه با اضافه کردن آب مقطر تنظیم گردید و در طول مدت انکوباسیون با استفاده از روش وزنی مقدار رطوبت مورد بررسی قرار گرفت و در صورت کمبود رطوبت، مجدد آب مقطر به نمونه‌ها اسپری شد. همه تیمارها در دمای ثابت (درجه سلسیوس 25 ± 2) به مدت ۶۰ روز نگهداری شدند. بعد از پایان دوره انکوباسیون نمونه‌ها هوا خشک شده و توزیع شکل‌های معدنی فسفر و سینتیک رهاسازی فسفر در خاک اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری شکل های معدنی فسفر

بعد از پایان دوره انکوباسیون (۶۰ روز) از هر تیمار ۱ گرم خاک وزن شد و سپس عصاره‌گیری متوالی شکل‌های معدنی فسفر شامل دی‌کلسیم فسفات ($\text{Ca}_2\text{-P}$)، اکتاکلسیم فسفات ($\text{Ca}_8\text{-P}$)، فسفات آلومینیوم (Al-P)، فسفات آهن (Fe-P) و آپاتیت ($\text{Ca}_{10}\text{-P}$) با روش جیانگ و گو اندازه‌گیری شد (Jiang and Gu, 1989). سپس در عصاره‌های به دست آمده از هر مرحله، مقدار فسفر به روش اسپکتروفتومتری تعیین شد. خلاصه روش عصاره‌گیری متوالی شکل‌های معدنی فسفر در جدول ۲ ارائه شده است.

سینتیک رهاسازی فسفر

در این تحقیق برای بررسی تأثیر تیمارهای مورد مطالعه بر سینتیک رهاسازی فسفر، ۱ گرم از هر تیمار در سه تکرار وزن شد و ۲۰ میلی لیتر محلول بیکربنات سدیم ۰/۵ مولار در pH=۸/۵ بر روی تیمارها اضافه شد و سپس به مدت زمان ۱، ۲، ۴، ۸، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت در دمای 25 ± 2 درجه سلسیوس تکان داده شد. بعد از اتمام زمان‌های ذکر شده، سوسپانسیون با ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ گردید و سوسپانسیون‌ها با استفاده از کاغذ صافی واتمن ۴۰ صاف شد. در نهایت غلظت فسفر در عصاره‌های تهیه شده به روش رنگ‌سنجی مولیبدات آمونیوم با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر تعیین شد (Murphy & Riley, 1962) نتایج به دست آمده از آزمایش سینتیک با معادلات شبه درجه اول، شبه درجه دوم و الوویچ برازش داده شدند:

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log} q_e - \frac{K_1 t}{2.303} \quad (1)$$

معادله شبه درجه دوم:

$$\frac{t}{q_t} = \left(\frac{1}{K_2 q_e^2} \right) \frac{t}{q_e} \quad (2)$$

معادله ایلویچ:

$$q_t = \left(\frac{1}{\beta} \right) \text{Ln}(\alpha\beta) + \left(\frac{1}{\beta} \right) \text{Lnt} \quad (3)$$

برای برازش بهتر مدل‌های مورد استفاده از ضریب رگرسیونی (R^2)، همچنین برای برازش بهتر بین نتایج حاصل از آزمایش و نتایج تخمینی توسط مدل‌ها، از اشتباه استاندارد (SE) استفاده شد. برای بررسی تأثیر تیمارها بر شکل‌های معدنی فسفر، آزمایش به صورت طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار انجام گرفت. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با نرم افزار SPSS 26 و مقایسه میانگین از طریق آزمون دانکن و برازش غیرخطی داده‌های سینتیک رهاسازی فسفر نیز با نرم افزار Excel-Solver صورت گرفت.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 1. Some physical and chemical properties of the studied soil

property	unit	value
Clay	%	39
Sand	%	21
Silt	%	40
Soil texture	-	Clay loam
pH	-	7.62
EC	dS m ⁻¹	2.56
OC	%	0.42
CCE	%	46.50
CEC	Cmol _c kg ⁻¹	11.20
Total N	g kg ⁻¹	0.51
Available P	mg kg ⁻¹	5.24
Available K	mg kg ⁻¹	124.5
Total P	mg kg ⁻¹	578.25

جدول ۲- خلاصه روش عصاره‌گیری متوالی شکل‌های معدنی فسفر

Table 2. Summary of the sequential extraction method for mineral phosphorus forms

Forms	Shaking time (h)	Extractant	Extractant concentration (M)
Ca ₂ -P	1	NaHCO ₃ و pH=7.5	0.25
Ca ₈ -P	1	NH ₄ OAc و pH= 4.2	0.5
Al-P	1	NH ₄ F و pH=8.2	0.5
Fe-P	2+2	NaOH و Na ₂ CO ₃	0.1-0.1
Ca ₁₀ -P	1	H ₂ SO ₄	0.25

نتایج و بحث

ویژگی‌های زغال استخوان و نانوزغال استخوان‌ها

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه زغال استخوان گاوی و زغال استخوان مرغی و نانوزغال استخوان گاوی و نانوزغال استخوان مرغی در جدول ۳ آورده شده است. نتایج حاصل از بررسی ویژگی‌های زغال استخوان مرغی و نمونه نانوزغال استخوان نشان داد که تمام نمونه‌ها دارای ماهیت قلیایی بودند؛ به‌طوری‌که pH آن‌ها در محدوده ۸/۵۸ تا ۹/۱۱ قرار دارد. این امر به‌واسطه وجود ترکیبات معدنی قلیایی مانند هیدروکسی‌آپاتیت $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ و کربنات کلسیم در ساختار زغال استخوان است که خاصیت بافری و قلیایی به محیط می‌دهند. مقادیر pH به‌دست‌آمده در این پژوهش با مقادیر گزارش‌شده برای زغال استخوان در مطالعات مختلف همخوانی دارد (Singh et al., 2024; Piccirillo et al., 2023). نانو کردن زغال استخوان سبب افزایش سطح ویژه شد. نانوزغال استخوان سطح تماس بیشتری دارد که به طور عمده به دلیل اندازه بسیار کوچک‌تر نانو ذرات است. کاهش اندازه ذرات نانوزغال

استخوان منجر به افزایش سطح ویژه و تعداد ذرات در واحد سطح می‌شود (Mahanta et al., 2019). نتایج مشابهی در پژوهش‌های پیترسون و همکاران (Peterson et al., 2022) و چن و همکاران (Chen et al., 2023)، گزارش شده که نشان می‌دهند فرآیند آسیاب گلوله‌ای می‌تواند سطح ویژه زغال استخوان را تا چند برابر افزایش دهد. از نظر ترکیب عنصری، نانو شدن موجب افزایش نسبی درصد کربن و کاهش عناصر معدنی مانند Ca و P شد. به‌عنوان مثال، در زغال استخوان مرغی درصد کربن از ۳۷/۸۴٪ به ۴۰/۴۶٪ افزایش یافت، در حالی‌که مقادیر کلسیم و فسفر کاهش یافتند. این تغییرات ممکن است ناشی از تخریب یا تغییر آرایش فازهای معدنی (مانند هیدروکسی‌آپاتیت) و افزایش سهم بخش آلی در اثر آسیاب و نانو شدن باشد. کاهش Ca و P همچنین ممکن است به دلیل حل‌شدن جزئی نمک‌های معدنی در مرحله آماده‌سازی و افزایش سهم نسبی کربن سطحی باشد (Piccirillo et al., 2023). همچنین درصد اکسیژن (O) در نانوزغال استخوان افزایش یافت که نشان‌دهنده حضور گروه‌های عاملی اکسیژنی فعال در سطح ذرات است.

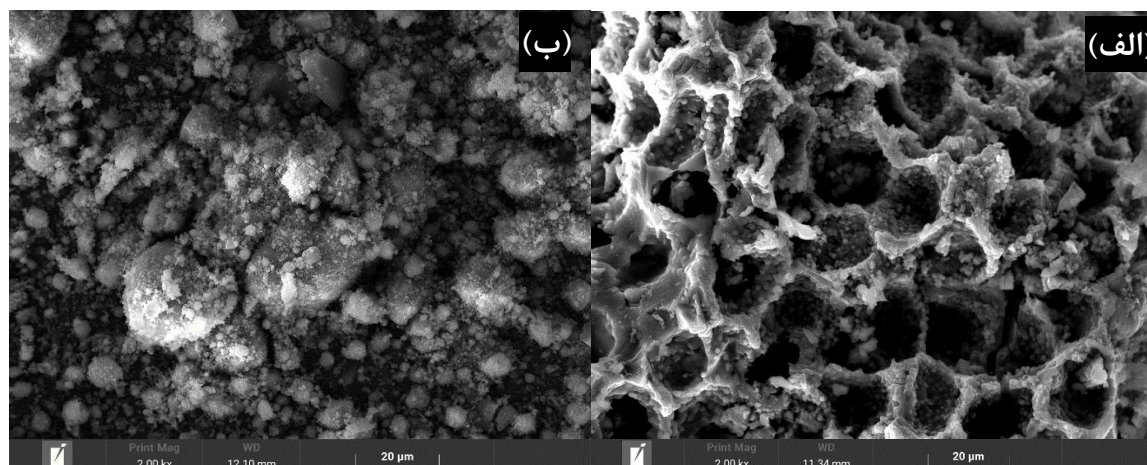
جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی زغال استخوان و نانوزغال استخوان مرغی مورد مطالعه

Table 3. Physicochemical properties of the studied poultry bone char and Nano-bone char.

	pH	EC (dS m^{-1})	BET ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	C	O	P	Ca	Ca:P
				%				
Poultry bone char (BP)	9.11	1.66	35.67	37.84	25.67	10.79	21.65	2.01
Nano- Poultry bone char (NBP)	8.58	1.11	54.15	40.46	29.91	9.08	18.34	2.02

کلوخه‌ای در نتیجه دمای پیرولیز را ارائه می‌دهند (Patel et al., 2015; Saleh et al., 2020). نانوزغال استخوان غالباً به شکل کروی است و ذرات کوچک‌تر تجمع یافته و توده‌های ذرات بزرگ‌تر را ایجاد نموده‌اند. نانو ذرات دارای بافت ناهموار و نامنظم با توزیع تصادفی اندازه ذرات می‌باشند (Imtiaz et al., 2024). بطور کلی ساختار متخلخل، ناهموار و تجمع ذرات ریز در نمونه نانویی، بیانگر افزایش سطح تماس و پتانسیل بالاتر برهم‌کنش با محلول خاک است.

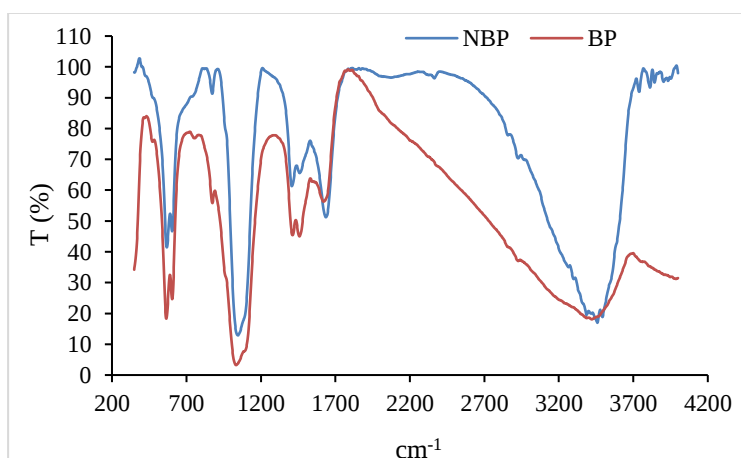
تصاویر FE-SEM (میکروسکوپ الکترونی روبشی نشرمیدانی) مربوط به زغال استخوان و نانوزغال استخوان مرغی در شکل ۱ نشان داده شده است. در تصویر (الف) زغال استخوان مرغی ظاهری ناهموار، خوشه‌ای و متشکل از ذرات کروی کوچک‌تر دارد که ساختاری متخلخل به آن داده است. طبق تحقیقات دارمایانتو (Darmayanto, 2009)، سطح کانی آپاتیت، تمایل به ناهمواری و متخلخل بودن دارد. تصویر (ب) مربوط به نانوزغال استخوان مرغی و ذراتی با ساختار متخلخل و



شکل ۱- تصاویر FE-SEM زغال استخوان مرغی (الف) و نانوزغال استخوان مرغی (ب)
Figure 1. FE-SEM images of poultry bone char (a) and nano-poultry bone char (b)

وجود دارند. باندهای قوی و شاخص در محدوده ۱۱۰۰- cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی فسفات (PO_4^{3-}) بوده و وجود ساختار آپاتیتی (هیدروکسی آپاتیت) را در نانوزغال استخوان به خوبی تأیید می‌کند. همچنین پیک‌های دوگانه واضح در ۶۰۰ و ۵۶۰ cm^{-1} مربوط به ارتعاشات خمشی P-O است. پهن‌تر بودن باندهای فسفات و هیدروکسیل در نانوزغال استخوان مرغی نسبت به نمونه زغال استخوان مرغی بیانگر کاهش بلورینگی و افزایش سطح فعال در اثر نانو سازی می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که نانوزغال استخوان دارای سطح ویژه بالا، گروه‌های فعال بیشتر و قابلیت مناسب برای کاربردهای جذب سطحی است.

طیف FT-IR مربوط به زغال استخوان و نانوزغال استخوان مرغی در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج مربوط به نانوزغال استخوان مرغی نشان داد که باند پهن و عمیق در محدوده حدود ۳۴۳۰-۳۵۰۰ cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی گروه‌های O-H است که بیانگر وجود گروه‌های هیدروکسیل و آب جذب‌شده روی سطح نانوذرات می‌باشد. باندهای ضعیف مشاهده‌شده در محدوده ۲۹۲۰ و ۲۸۵۰ cm^{-1} به کشش‌های C-H مربوط می‌شوند که منشأ آنها بقایای مواد آلی استخوان است. باند ۱۶۴۰ cm^{-1} نشان‌دهنده ارتعاش خمشی H-O-H بوده و وجود رطوبت و آب فیزیکی در ساختار را تأیید می‌کند. همچنین باندهای مشخص در ۱۴۳۰-۱۴۵۰ cm^{-1} مربوط به ارتعاشات گروه کربنات (CO_3^{2-}) هستند که به‌طور طبیعی در ساختار معدنی استخوان



شکل ۲- طیف مادون قرمز زغال استخوان مرغی و نانوزغال استخوان مرغی

Figure 2. The Fourier-transform infrared (FTIR) spectra of poultry bone char and Nano-poultry bone char.

تأثیر زغال استخوان بر شکل‌های معدنی فسفر

نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای زغال استخوان بر توزیع شکل‌های معدنی فسفر خاک در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس این نتایج اثر تیمارها بر همه شکل‌های

معدنی فسفر در خاک (دی‌کلسیم فسفات، اکتاکلسیم فسفات، فسفات آلومینیوم، فسفات آهن و آپاتیت) در سطح ۱ درصد اثر معنی‌دار داشت.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارها بر توزیع شکل‌های معدنی فسفر در خاک

Table 4. Analysis of variance of the effect of treatments on inorganic P fractions in the soil

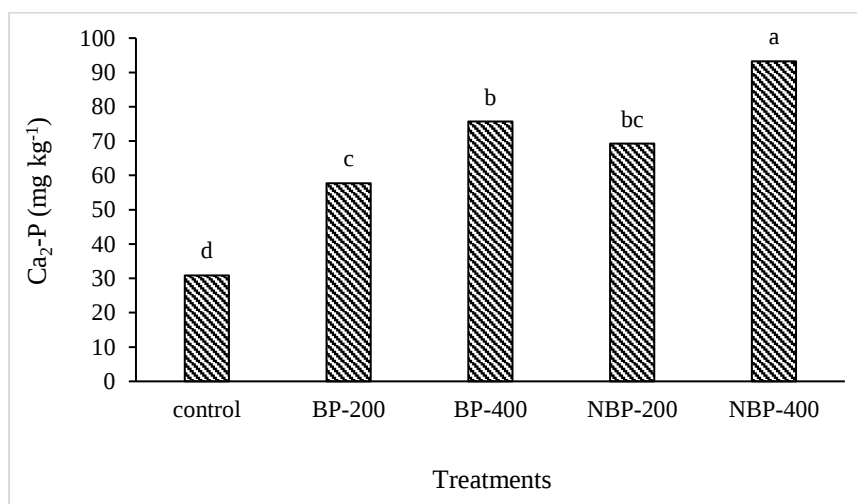
Source of variation	df	Mean square				
		Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	Ca ₁₀ -P
Treatment	4	419**	2619**	25.61**	8.86**	15087**
Error	10	2.33	2.34	1.00	0.25	2.33
CV (%)		2.94	1.18	7.74	7	3.49

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد می‌باشد.

** is significant at the 1% probability level.

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد، همه تیمارهای حاوی زغال استخوان باعث افزایش معنی‌دار دی‌کلسیم فسفات نسبت به شاهد شدند (شکل ۳)، به‌طوری‌که بیشترین مقدار در تیمار نانوزغال استخوان مرغی در سطح ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. دی‌کلسیم فسفات به‌عنوان یکی از شکل‌های نسبتاً محلول و

قابل‌دسترس فسفر، نشان‌دهنده افزایش پویایی فسفر در خاک است. برتری نانوزغال استخوان نسبت به زغال استخوان معمولی را می‌توان به افزایش سطح ویژه، واکنش‌پذیری بیشتر و تسریع انحلال فسفات‌های کلسیمی نسبت داد؛ امری که در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است (Wang et al., 2020).



شکل ۳- تأثیر تیمارهای مختلف زغال استخوان بر مقدار دی‌کلسیم فسفات

Control: شاهد؛ BP: زغال استخوان مرغی؛ NBP: نانوزغال استخوان مرغی

میانگین‌ها با حروف مشترک، به روش آزمون چند دامنه‌های دانکن اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند

Figure 3. Effect of different bone char treatments on dicalcium phosphate content.

Control: control; BP: poultry bone char; NBP: nano-poultry bone char.

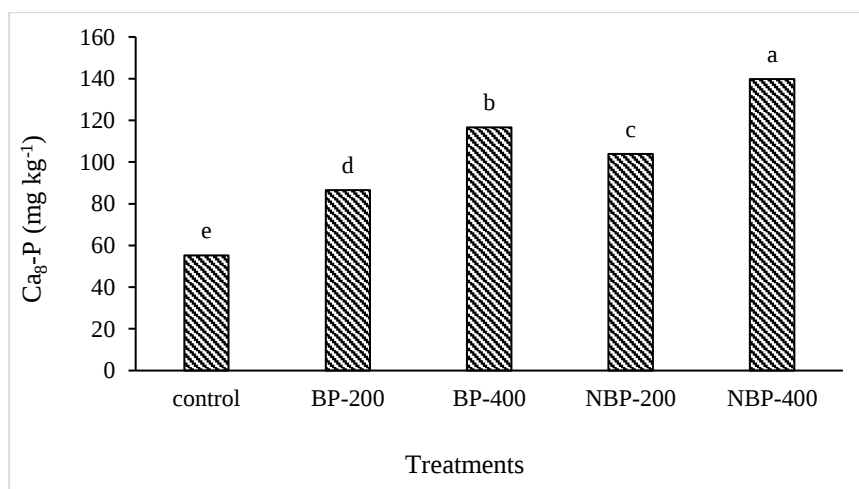
Means with the same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

مقدار اکتاکلسیم فسفات مربوط به تیمار نانوزغال استخوان مرغی در سطح ۴۰۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک و کمترین مقدار در تیمار شاهد مشاهده شد. شکل

میزان اکتاکلسیم فسفات (OCP) نیز در همه تیمارهای حاوی زغال استخوان و نانوزغال استخوان نسبت به خاک شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۴). بیشترین

بر رهاسازی فسفر در خاک آهکی اصلاح شده با زغال استخوان گاوی کاملاً مطابقت دارد که در آن زغال استخوان‌های گاوی در اندازه‌های ماکرو و نانو به سبب ترکیب شیمیایی غنی از هیدروکسی آپاتیت و فسفات کلسیم موجب افزایش شکل‌های فسفات کلسیم (به ویژه شکل اکتاکلسیم فسفات) در خاک آهکی شده است. میزان شکل اکتاکلسیم فسفات به علت انحلال کمتر در خاک‌های آهکی نسبت به دی کلسیم فسفات بیشتر است. وانگ و همکاران (Wang et al., 2020)، نیز تأیید کردند که کاربرد نانوزغال استخوان باعث افزایش تشکیل اکتاکلسیم فسفات نسبت به زغال استخوان معمولی می‌شود.

۴ نشان داد که هر دو عامل افزایش سطح مصرف زغال استخوان و نانو شدن باعث افزایش قابل‌توجه اکتاکلسیم فسفات در خاک گردید. افزایش مقدار اکتاکلسیم فسفات در خاک‌های تیمار شده با زغال استخوان نشان‌دهنده تبدیل تدریجی فسفر آزاد شده از زغال به فازهای کم‌محلول‌تر اما هنوز نسبتاً قابل‌دسترس است. حضور اکتاکلسیم فسفات نشان می‌دهد که بخشی از فسفر افزوده شده در طی ۶۰ روز انکوباسیون هنوز در حالت بینابینی (نیمه‌قابل‌استفاده) قرار دارد و می‌تواند در دوره‌های بعدی به آرامی آزاد شود. علت اثرات بیشتر نانوزغال استخوان در مقایسه با زغال استخوان ممکن است با خواص فیزیکی شیمیایی آن‌ها، از جمله سطح ویژه بالاتر قابل توجه باشد (جدول ۳). نتایج به‌دست آمده با نتایج مطالعه ال-دماروی (El-Damarawy et al., 2025)



شکل ۴- تأثیر تیمارهای مختلف زغال استخوان بر مقدار اکتاکلسیم فسفات

control: شاهد؛ BP: زغال استخوان مرغی؛ NBP: نانوزغال استخوان مرغی

میانگین‌ها با حرف مشترک، به روش آزمون چند دامنه ای دانکن اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Figure 4. Effect of different bone char treatments on octacalcium phosphate content.

BP: poultry bone char; NBP: nano-poultry bone char.

Means with the same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

این است که بخشی از فسفر آزاد شده از ترکیبات استخوانی به‌صورت موقت در فاز فسفات آلومینیوم تثبیت می‌شود. این فازها اگرچه نسبت به فازهای کلسیمی محلولیت کمتری دارند، اما در طول زمان و در اثر تغییرات شیمیایی خاک می‌توانند منبع آهسته‌رهش فسفر باشند. لی و همکاران (Li et al., 2019)، گزارش کردند که در خاک‌های آهکی تیمار شده با زغال استخوان، علاوه بر افزایش فازهای کلسیمی فسفر، بخشی از فسفر محلول نیز

میانگین تأثیر تیمارها بر فسفات آلومینیوم در جدول ۵ ارائه شده است. بنابر نتایج به‌دست آمده، اثر همه تیمارهای به کار برده شده نسبت به شاهد معنی‌دار بود. در این میان بیشترین تأثیر مربوط به زغال استخوان و نانوزغال استخوان مرغی در سطح ۴۰۰ بود اما هیچ یک از تیمارها در سطح ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند. افزایش فسفات آلومینیوم در تیمارهای دارای زغال استخوان و نانوزغال استخوان بیانگر

واکنش آن با آهن موجود در خاک است. لی و همکاران (Li *et al.*, 2019)، گزارش کردند که در خاک‌های آهکی تیمارشده با زغال استخوان، سهم فاز Fe-P از کل فسفر معدنی کمتر از ۱۰٪ بوده و افزایش آن نسبت به Ca-P بسیار محدود است، که با نتایج حاضر مطابقت دارد. بطور کلی در خاک‌های قلیایی با توجه به pH بالا، غلظت آهن و آلومینیوم کمتر از بقیه شکل‌های فسفر بوده است، بنابراین ترکیبات حاصل از آن‌ها نیز کمتر خواهند بود. افزایش سطح کاربرد زغال استخوان از ۲۰۰ به ۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم باعث افزایش محسوس آپاتیت شد (جدول ۵). این روند به وضوح نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین میزان فسفر افزوده شده و تشکیل فازهای پایدار کلسیمی در خاک است (Li *et al.*, 2019). با این حال، در مقایسه با زغال استخوان معمولی، نانوزغال استخوان مرگی مقدار کمتری آپاتیت تشکیل داد. این موضوع نشان می‌دهد که نانوزغال استخوان تمایل بیشتری به نگه‌داشت فسفر در شکل‌های پویاتر و قابل‌دسترس‌تر دارد و از انتقال سریع فسفر به فاز بسیار پایدار آپاتیت جلوگیری می‌کند.

به صورت فسفات آلومینیوم تثبیت می‌شود. همچنین وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2020)، نشان دادند که استفاده از نانوزغال استخوان علاوه بر افزایش فسفر قابل‌دسترس، باعث افزایش اندک فسفات آلومینیوم به دلیل افزایش سطح تماس و واکنش میان فسفر و آلومینیوم می‌شود. همچنین کاربرد همه تیمارها بر مقدار فسفات آهن نیز نسبت به شاهد سبب افزایش معنی‌داری گردید (جدول ۵) که از میان آن‌ها زغال استخوان مرگی در سطح ۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم بیشترین تأثیر را داشت و توانست شکل فسفات آهن را ۳۹/۶۲ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش دهد. نانوزغال استخوان مرگی نسبت به زغال معمولی افزایش چشمگیری در Fe-P نشان ندادند. علت این امر را می‌توان به پایداری پایین Fe^{3+} در محیط‌های قلیایی و رقابت Ca^{2+} برای تشکیل فازهای Ca-P نسبت داد. بنابراین در حضور Ca زیاد، تشکیل Fe-P مهار می‌شود و فسفر تمایل بیشتری به تشکیل فازهای کلسیمی دارد (Li *et al.*, 2019). همچنین افزایش سطح کاربرد از ۲۰۰ به ۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم موجب افزایش Fe-P شد که این امر نشان‌دهنده ارتباط مستقیم بین مقدار فسفر افزوده شده و

جدول ۵- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت فسفات آلومینیوم، فسفات آهن و آپاتیت در خاک

Table 5. Comparison of the mean effects of treatments on Aluminum phosphate, Iron phosphate and Apatite in the soil

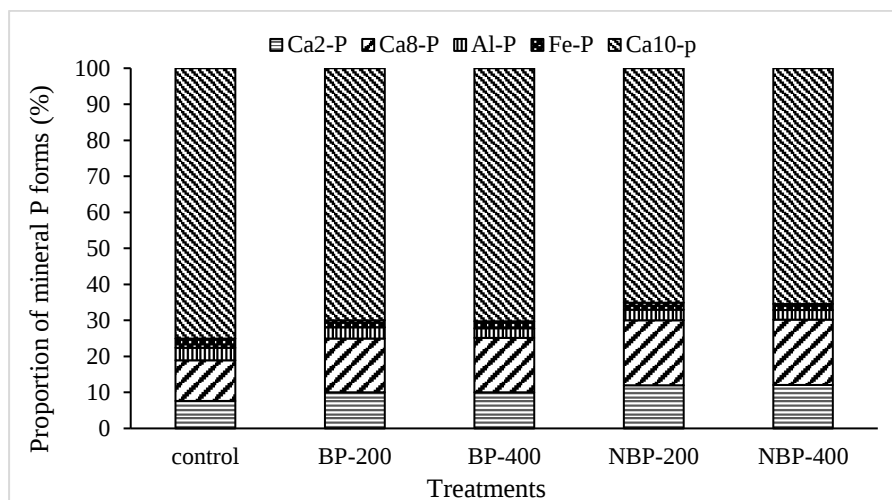
Treatment	Al-P	Fe-P	Ca ₁₀ -P
	(mg kg ⁻¹)		
Control	13.8 ^c	10.6 ^c	301.6 ^e
BP-200	17.5 ^b	11.3 ^c	403.9 ^c
BP-400	21.2 ^a	14.8 ^a	543.9 ^a
NBP-200	16.9 ^b	11.1 ^c	375.05 ^d
NBP-400	20.2 ^a	12.9 ^b	505.05 ^b

میانگین‌ها دارای حرف مشترک در هر ستون، به روش آزمون چند دامنه ای دانکن اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Means with the same letter within each column are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

اتفاق می‌افتد (Foth & Ellis, 1997). با این حال، کاهش نسبی سهم آپاتیت و افزایش فازهای Ca₂-P و Ca₈-P در تیمارهای نانوزغال استخوان مرگی نشان‌دهنده پتانسیل بالاتر این ماده در تبدیل فسفر تثبیت‌شده به شکل‌های با دسترسی بیشتر است؛ نتیجه‌ای که با گزارش‌های لی و همکاران (Li *et al.*, 2019) و وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2020) همخوانی دارد.

توزیع شکل‌های معدنی فسفر برای تیمارهای مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. توزیع شکل‌های معدنی فسفر در تیمارهای مورد مطالعه به صورت: آپاتیت < اکتاکلسیم فسفات < دی‌کلسیم فسفات < فسفات آلومینیوم < فسفات آهن بود. در همه تیمارها بخش آپاتیت بیشتر از بخش‌های دیگر فسفر معدنی بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، اجزای معدنی فسفر می‌توانند به شکل پایدار آپاتیت رسوب کنند و به عبارتی تثبیت فسفر



شکل ۵- توزیع شکل‌های معدنی فسفر حاصل از عصاره‌گیری متوالی در تیمارهای مختلف

BP: زغال استخوان مرغی؛ NBP: نانوزغال استخوان مرغی

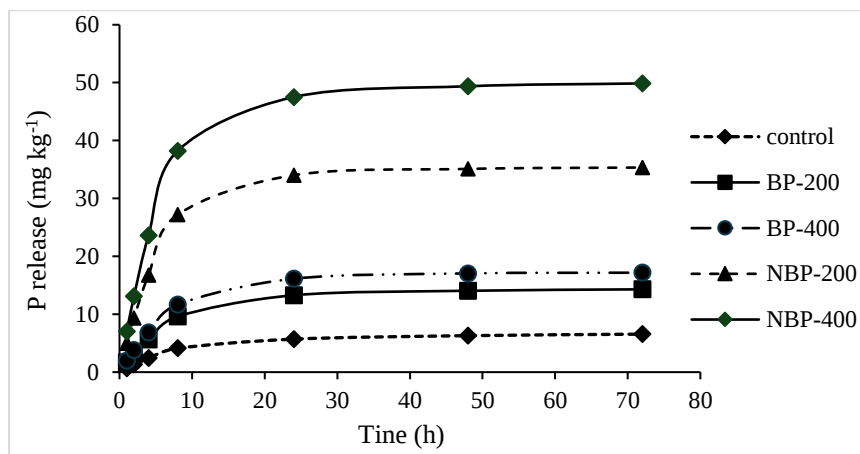
Figure 5. Distribution of mineral phosphorus forms as determined by sequential extraction in different treatments. BP: poultry bone char; NBP: nano-poultry bone char.

همکاران (Rashid *et al.*, 2021)، این مرحله بازتاب‌دهنده «تثبیت ثانویه» فسفر در خاک‌های آهکی است که موجب ذخیره تدریجی فسفر در فازهای معدنی پایدار می‌شود.

مقدار فسفر آزادشده در تیمارهای نانوزغال استخوان مرغی به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از زغال استخوان معمولی بود. ترتیب رهاسازی تجمعی فسفر توسط تیمارهای مختلف به‌صورت: نانوزغال استخوان مرغی < ۴۰۰ < نانوزغال استخوان مرغی < ۲۰۰ < زغال استخوان مرغی < ۴۰۰ < زغال استخوان مرغی < ۲۰۰ < تیمار شاهد بود. از مقایسه تأثیر تیمارهای مختلف می‌توان به این نتیجه رسید که همه تیمارهای زغال استخوان نسبت به شاهد اثر افزایشی بر رهاسازی فسفر داشتند اما نانوزغال استخوان مرغی در همه سطوح نسبت به زغال استخوان مرغی معمولی عملکرد بهتری نشان داد.

تأثیر زغال استخوان بر رهاسازی فسفر خاک

الگوی رهاسازی تجمعی فسفر خاک تحت کاربرد تیمارهای مختلف زغال استخوان در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج رهاسازی تجمع فسفر در زمان‌های ۱، ۴، ۸، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت و برای تیمارهای شاهد، زغال استخوان مرغی و نانوزغال استخوان مرغی در دو سطح ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بررسی شد. در همه تیمارها با گذشت زمان، مقدار فسفر آزادشده افزایش یافته و پس از حدود ۴۸ تا ۷۲ ساعت به حالت تقریباً پایدار رسیده است. به‌طور کلی در ساعات اولیه (به‌ویژه تا ۴ ساعت)، سرعت آزادسازی فسفر بسیار زیاد است. از ۸ تا ۲۴ ساعت، رهاسازی فسفر ادامه دارد اما نرخ آن کاهش می‌یابد. پس از ۴۸ ساعت، سرعت رهاسازی فسفر تقریباً متوقف می‌شود و سیستم به تعادل می‌رسد. فسفر در این زمان به‌طور عمده در فازهای پایدار آپاتیت قرار دارد که به سختی حل می‌شوند. مطابق با نتایج رشید و



شکل ۶- سینتیک رهاسازی فسفر خاک در تیمارهای مختلف

BP: زغال استخوان مرغی؛ NBP: نانوزغال استخوان مرغی

Figure 6. P release kinetics of soil in different treatments.

BP: poultry bone char; NBP: nano-poultry bone char.

استخوان معمولی متناظر بود که این امر نشان دهنده ظرفیت بالای نانوزغال استخوان در رهاسازی فسفر است. در این پژوهش، مقادیر R^2 برای مدل شبه درجه اول بین ۰/۹۱ تا ۰/۹۵ بود که نشان دهنده برازش به نسبت خوب است. با این حال، مقدار فسفر پیش‌بینی شده (q_e) توسط این مدل معمولاً کمتر از مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده، به‌ویژه در تیمارهای نانو بود. مقدار q_e به‌دست آمده از معادله شبه درجه اول که بیانگر میزان رهاسازی فسفر پس از برقراری تعادل است، برای تیمارهای مورد مطالعه بین ۵۰/۰۹-۶/۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که بیشترین مقدار آن مربوط به تیمار نانوزغال استخوان در سطح ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین مقدار آن مربوط به تیمار شاهد بود. K_1 نیز نشان‌دهنده ثابت سرعت معادل شبه درجه اول است که با کاربرد تیمارهای مختلف زغال استخوان نسبت به شاهد افزایش پیدا کرد. این نتایج با یافته‌های ژنگ و همکاران (Zheng *et al.*, 2013) و وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2020) هم‌راستا است. ظرفیت رهاسازی (q_e) فسفر محاسبه شده از مدل شبه درجه دوم برای نانوزغال استخوان مرغی در دو سطح ۲۰۰ و ۴۰۰ به‌ترتیب ۴۹/۸۷، ۳۵/۳۴ و زغال استخوان مرغی در دو سطح ۲۰۰ و ۴۰۰ به‌ترتیب ۱۷/۱۸ و ۱۴/۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که بیانگر ظرفیت جذب بالای خاک تیمار شده نانوزغال استخوان در مقایسه با تیمارهای دیگر است. این افزایش نشان‌دهنده توان بالای نانوزغال

بررسی سینتیک رهاسازی فسفر در خاک، اطلاعات ارزشمندی در مورد مکانیسم آزادسازی، پایداری و قابلیت دسترسی فسفر فراهم می‌کند. به‌طور کلی، فرآیند آزادسازی فسفر از منابع معدنی و آلی می‌تواند شامل چند مرحله مانند انحلال فیزیکی، تبادل یونی، جذب و واجذب سطحی و رسوب مجدد فسفات‌ها باشد. برای توصیف رفتار فسفر آزادشده از زغال استخوان و نانوزغال استخوان مرغی در خاک آهکی، سه مدل سینتیکی شبه درجه اول، شبه درجه دوم و الوویچ مورد استفاده قرار گرفتند. بر اساس نتایج برازش داده‌ها مدل شبه درجه دوم با داشتن بالاترین مقدار R^2 (۰/۹۷-۰/۹۴) و خطای استاندارد کمتر (۰/۸۵-۰/۱) بیشترین برازش را داشت. مطالعه ال-رفایی و همکاران (El-Refaei *et al.*, 2022) بر فرآیند آزادسازی سریع و آهسته فسفر از نانوزغال استخوان نیز نشان داد، مدل سنتیکی شبه درجه دوم با داشتن R^2 به مقدار ۰/۸۹۴ و ۰/۹۰۱ به‌ترتیب برای زغال استخوان گاو و نانوزغال استخوان گاو بهترین برازش را بر رهاسازی فسفر در تیمارهای مختلف نشان داد. مقایسه میزان رهاسازی (q_e) در مدل‌های شبه درجه اول و درجه دوم نشان داد که اضافه کردن همه تیمارها (زغال استخوان مرغی، نانوزغال استخوان مرغی در دو سطح ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به خاک سبب افزایش رهاسازی فسفر در خاک نسبت به تیمار شاهد شد. مقدار رهاسازی فسفر در نانوزغال استخوان بیشتر از زغال

۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد مشاهده شد که نشان دهنده رهاسازی سریع اولیه فسفر در ساعات ابتدایی انکوباسیون است. اما ثابت β که ثابت واجذب است، در همه تیمارهای مورد مطالعه کمتر از تیمار شاهد بود. یعنی بیشترین و کمترین مقدار ثابت β به ترتیب در شاهد و نانوزغال استخوان در سطح ۴۰۰ گرم بر کیلوگرم به دست آمد که بیانگر کاهش تدریجی سرعت آزادسازی در طول زمان به دلیل تثبیت فسفر در فازهای آپاتیتی و کلسیمی است. مقادیر بالاتر ظرفیت رهاسازی (q_e) و سرعت جذب اولیه (α) در تیمارهای نانوزغال استخوان مرغی نشان دهنده توان بالای این ماده در تأمین فسفر کوتاه مدت و ایجاد یک منبع آهسته رهش در بلندمدت است؛ در حالی که کاهش β بیانگر افت تدریجی سرعت رهاسازی به دلیل بازتشکیل فازهای پایدار کلسیمی است (Li et al., 2019; Rashid et al., 2021).

استخوان در تأمین فسفر قابل استفاده و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک است. نتایج به دست آمده با گزارش‌های لی و همکاران (Li et al., 2019)، رشید و همکاران (Rashid et al., 2021) و ژنگ و همکاران (Zheng et al., 2013) همخوان است؛ این پژوهشگران نیز بیان کردند که رهاسازی فسفر از زغال استخوانی در خاک‌های آهکی به طور عمده از مدل شبه درجه دوم پیروی می‌کند. بررسی مقدار ضریب سرعت K_2 برای مدل شبه درجه دوم نشان داد که سرعت رهاسازی فسفر در خاک‌های تیمار شده کمتر از خاک شاهد است. همچنین α و β که ضرایب مدل ایلوویچ هستند، به ترتیب نشان دهنده سرعت جذب اولیه (میلی گرم بر کیلوگرم در ساعت) و ثابت الوویچ مربوط به پوشش سطحی و انرژی فعال سازی برای جذب شیمیایی هستند. سرعت اولیه جذب (α) با کاربرد تیمارهای مورد مطالعه افزایش یافت و بیشترین مقدار در تیمار نانوزغال استخوان در سطح

جدول ۶- پارامترهای مدل‌های سینتیکی رهاسازی فسفر توسط خاک تیمار شده با زغال استخوان و نانوزغال استخوان مرغی

Table 6. Kinetic model parameters of phosphorus release from soil treated with poultry bone char and nano-bone char.

Treatments	Pseudo-first-order model				Pseudo-second-order model				Elovich			
	q_e (mg kg ⁻¹)	K_1	R^2	SE	q_e (mg kg ⁻¹)	K_2	R^2	SE	α (mg kg ⁻¹ h ⁻¹)	β (mg kg ⁻¹) ⁻¹	R^2	SE
control	6.92	0.065	0.95	0.12	6.92	0.021	0.96	0.10	2.19	0.67	0.92	0.20
BP-200	14.40	0.084	0.94	0.25	14.30	0.012	0.97	0.20	5.38	0.31	0.90	0.40
BP-400	17.43	0.10	0.93	0.28	17.18	0.011	0.96	0.23	6.56	0.26	0.89	0.45
NBP-200	35.41	0.11	0.92	0.82	35.34	0.0057	0.95	0.68	17.43	0.13	0.85	0.82
NBP-400	50.09	0.095	0.91	1.05	49.87	0.004	0.94	0.85	24.44	0.093	0.83	1.05

BP: زغال استخوان مرغی؛ NBP: نانوزغال استخوان مرغی

BP: poultry bone char; NBP: nano-poultry bone char.

نتیجه‌گیری کلی

اکتاکلسیم فسفات منتقل کنند. این تغییر در الگوی توزیع فسفر معدنی بیانگر افزایش پتانسیل دسترسی تدریجی فسفر برای گیاهان و کاهش تثبیت بلندمدت آن در خاک‌های آهکی است. در مقابل، سهم فازهای فسفات آهن و آلومینیوم در همه تیمارها محدود باقی ماند که نشان می‌دهد در شرایط قلیایی خاک مورد مطالعه، کنترل اصلی پویایی فسفر به طور عمده توسط فازهای کلسیمی انجام می‌شود. افزایش قابل توجه ظرفیت رهاسازی فسفر (q_e) در تیمارهای نانوزغال استخوان مرغی، بیانگر کارایی بالاتر این ماده نسبت به زغال استخوان معمولی در تأمین

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد زغال استخوان مرغی و به ویژه نانوزغال استخوان مرغی می‌تواند به طور معنی‌داری پویایی فسفر را در خاک‌های آهکی بهبود بخشد و محدودیت دسترسی فسفر برای گیاهان را کاهش دهد. بررسی توزیع شکل‌های معدنی فسفر نشان داد که تیمارهای حاوی نانوزغال استخوان مرغی، به ویژه در سطح ۴۰۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، توانستند فسفر تثبیت شده در فازهای پایدار کلسیمی (آپاتیت) را به طور مؤثری به شکل‌های پویاتر نظیر دی کلسیم فسفات و

پایدار و اقتصاد چرخشی کمک کند. با وجود نتایج امیدبخش این پژوهش، انجام مطالعات تکمیلی در شرایط مزرعه‌ای، بررسی اثرات بلندمدت نانوزغال استخوان مرغی بر رشد و جذب فسفر گیاهان و ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی احتمالی آن، برای توسعه توصیه‌های کاربردی و ایمن در مقیاس وسیع ضروری به نظر می‌رسد.

سیاسگذاری

نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی، فناوری و ارتباط با جامعه دانشگاه شهید چمران اهواز جهت حمایت‌های مالی از این پژوهش (پژوهانه به شماره SCU.AS1404.449) تشکر و قدردانی می‌نمایند.

فسفر قابل استفاده است. این ویژگی می‌تواند منجر به افزایش همزمان تأمین کوتاه مدت فسفر و حفظ یک منبع ذخیره‌ای با رهش تدریجی در خاک شود که از منظر مدیریت تغذیه گیاه و کاهش نیاز به مصرف مکرر کودهای شیمیایی فسفوری حائز اهمیت است. در مجموع، نانوزغال استخوان مرغی نه تنها به عنوان یک منبع بازیافتی و پایدار فسفر، بلکه به عنوان یک اصلاح‌کننده فعال خاک، قادر است تعادل بین شکل‌های پایدار و قابل‌دسترس فسفر را در خاک‌های آهکی به نفع شکل‌های پویاتر تغییر دهد. استفاده از این ماده می‌تواند ضمن ارتقای کارایی مصرف فسفر، به کاهش تثبیت غیرقابل‌برگشت فسفر، بهبود بهره‌وری خاک‌های فقیر از فسفر و تحقق اصول کشاورزی

References

- Amin, M. (2020). Poultry bone char as a slow-release phosphorus fertilizer: Environmental and economic benefits. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120645.
- Amin, M. (2023). Preparation and characterization of bone char for soil amendment. *Waste Management*, 150, 125-134.
- Aseem, S., Kumar, P., & Singh, R. (2022). Animal-derived biochars: Properties, applications, and environmental benefits. *Bioresource Technology Reports*, 18, 100955.
- Bai, H., Wang, X., & Li, J. (2017). Salinity effects on phosphorus availability in calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal*, 81(2), 371–380.
- Bautinguiza, A., Gil, J., & Cordeiro, C. (2012). Bone biochar as a source of phosphorus for plant growth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(40), 10115–10122.
- Chen, L., Zhang, Y., & Liu, Y. (2022). Bone char nanomaterials for enhanced phosphorus availability in soils. *Environmental Science and Technology*, 56(12), 7982–7992.
- De ponti, T., Rijk, B., & van Ittersum, M. (2012). The crop yield gap between potential and actual yields in the European Union. *Agricultural Systems*, 108, 58–69.
- DeRosa, M. C., Monreal, C., Schnitzer, M., Walsh, R., & Sultan, Y. (2010). Nanotechnology in fertilizers. *Nature Nanotechnology*, 5(2), 91–98.
- El-Damarawy, M., Wang, Y., & Zhao, F. (2025). Effect of bovine bone char on phosphorus fractions in calcareous soils. *Soil Use and Management*, 41(1), 112–124.
- El-Refaey, A., Zhang, Y., & Liu, L. (2022). Phosphorus release kinetics from nano bone char: Application in calcareous soils. *Journal of Soils and Sediments*, 22(7), 3345–3358.
- Ferraro, V., Giorcelli, M., & Kenny, J. (2017). Advanced materials from animal by-products. *Materials Today*, 20(10), 540–552.
- Foth, H. D., & Ellis, B. G. (1997). *Soil fertility* (7th ed.). CRC Press.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., & Nelson, W. L. (2014). *Soil fertility and fertilization: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson.
- Imtiaz, M., Khan, M. A., & Akhtar, J. (2024). Structural and morphological properties of poultry bone char nanomaterials. *Journal of Materials Science*, 59, 14512–14526.
- Jalali, M., & SajadiTabar, F. (2011). Phosphorus deficiency in calcareous soils of Iran. *Journal of Plant Nutrition*, 34(5), 712–722.
- Jiang, W., Li, Y., & Chen, J. (2019). Global phosphorus demand and supply forecast. *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 1–10.
- Jiang, Z., & Gu, B. (1989). Sequential extraction of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Soil Science*, 147(5), 346–353.
- Leytem, A. B., & Mikkelsen, R. L. (2005). Soil properties affecting phosphorus availability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(15-16), 2117–2135.

- Li, H., Zhang, Y., & Li, F. (2019). Phosphorus dynamics in calcareous soils amended with bone char. *Geoderma*, 337, 408–418.
- Liu, X., Zhang, X., & Chen, Y. (2023). Nano-bone char for sustainable phosphorus management. *Environmental Technology and Innovation*, 31, 103326.
- Mahanta, C., Kundu, S., & Das, S. (2019). Surface area enhancement of bone char via ball milling. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(6), 103446.
- Mahaletchumi, R., Sivasakthi, D., & Rajendran, R. (2021). Nanotechnology in agriculture: A review. *Materials Today: Proceedings*, 44, 1113–1120.
- Mahmoud, M., El-Morshedy, M., & Hassan, M. (2020). Nano-fertilizers for sustainable agriculture. *Sustainability*, 12, 6452.
- Mahmoud, M., Rajput, S., & Singh, A. (2022). Nanomaterials for improved soil fertility. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(2), 414–426.
- Moradi, N., & Rasouli-Sadaghiani, M. (2019). Effect of Phosphate-solubilizing bacteria (PSB) on distribution of phosphorus forms in a calcareous soil. *Applied Soil Research*, 7(2), 67-81. (In Persian)
- Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31–36.
- Nedelciu, C. E., Mot, A. C., & Popescu, R. (2020). Role of phosphorus in plant physiology. *Agriculture*, 10(7), 298.
- Olsen, S. R., & Sommer, W. (1982). Phosphorus. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis*, Part 2 (pp. 403–430). American Society of Agronomy.
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S., & Dean, L. A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *USDA Circular*, 939, 1–19.
- Patel, P., Sharma, V., & Singh, R. (2015). Morphological characterization of bone char materials. *Materials Today: Proceedings*, 2(10), 4002–4010.
- Piccirillo, C., Vassilev, S., & Ferrero, F. (2023). Structural and chemical analysis of bone char nanomaterials. *Journal of Hazardous Materials*, 450, 131019.
- Pizzeghello, D., Francioso, O., & Ertani, A. (2012). Soil properties influencing phosphorus availability. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(3), 509–522.
- Rajput, S., Mahmoud, M., & Singh, A. (2022). Nanotechnology applications for soil improvement. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 23456–23467.
- Rashid, S., Mahmood, T., & Iqbal, M. (2021). Phosphorus release from bone char in calcareous soils. *Soil Science*, 186(3), 101–110.
- Singh, R., Kumar, S., & Aseem, S. (2024). Bone char properties and phosphorus release kinetics. *Environmental Technology and Innovation*, 30, 103168.
- Sun, J., Zhang, Q., & Liu, W. (2018). Recycling phosphorus from poultry waste. *Waste Management*, 78, 412–421.
- Toldra, F. (2016). Meat industry by-products and their utilization. *Meat Science*, 120, 85–92.
- Vassilev, S., Petrov, K., & Ferrero, F. (2021). Phosphorus bioavailability from bone char in soils. *Applied Soil Ecology*, 158, 103794.
- Wang, Y., El-Damarawy, M., & Zhao, F. (2020). Nano-bone char for phosphorus release in calcareous soils. *Journal of Soil Science*, 71(4), 781–793.
- Warren, G. P., Le Roux, C., & Haynes, R. J. (2009). Biochar and phosphorus dynamics in soil. *Soil Use and Management*, 25(2), 149–158.
- Zhang, L., Liu, Y., & Chen, X. (2024). Nano-bone char improves phosphorus availability in calcareous soils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72, 2134–2145.
- Zheng, Q., Li, F., & Wang, Y. (2013). Phosphorus fractionation in calcareous soils amended with biochar. *Journal of Soils and Sediments*, 13, 1077–1086.