

Original Article



Production of Bio-Amendments Based on Nanobiochar and Investigation of Their Effect on Macronutrients and Soil Organic Carbon

Received: 2025.03.05

Accepted: 2025.10.19

Zahra Abbasnasab, Navazollah Moradi*, Yahya Esmaeilpour, Hamid Gholami, Mehdi Biniaz

Department of Natural
Resources Engineering,
Faculty of Natural
Resources and Agriculture,
University of Hormozgan,
Bandar Abbas, Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Iran generates a considerable volume of biowaste daily, stemming from agricultural, industrial, and domestic activities. Improper disposal of these organic residues not only contributes to environmental degradation but also leads to the loss of valuable nutrient-rich materials that could otherwise be repurposed for soil enhancement. In response to growing concerns over soil fertility depletion and the environmental impact of chemical fertilizers, recent approaches in sustainable agriculture have emphasized the utilization of organic waste as bio-amendments. Macronutrients such as nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K), along with organic carbon, are essential for maintaining soil health, improving crop productivity, and promoting long-term ecological balance.

Material and methods: This study was conducted to explore the potential of locally available biowaste in Minab County, Iran, specifically orchard and marine residues, for the development of innovative bio-amendments. Four types of soil conditioners were synthesized: two nanoscale biochar materials, nanobiochar derived from palm tree stems and nanobiochar from date pits, and two organic composite amendments formed by integrating chitosan with each nanobiochar type. The objective was to assess their effectiveness in enhancing soil macronutrient content and organic carbon levels under controlled greenhouse conditions. A factorial experiment was designed using a completely randomized layout, with three application rates (0%, 1%, and 2% by weight) and three replicates per treatment. The amendments were thoroughly mixed with soil and incubated in pots for a period of 90 days. Following the incubation, soil samples were collected and analyzed for NPK and organic carbon concentrations. Statistical analysis was performed using R software, and treatment comparisons were conducted using Tukey's post hoc test to determine significant differences.

Results and discussion: The results revealed that all bio-amendments significantly improved soil nutrient status compared to the untreated control. Notably, the chitosan–nanobiochar composite derived from date pits exhibited the highest efficacy in enhancing nitrogen, phosphorus, and potassium levels. In contrast, amendments derived from palm stems—both the nanobiochar and its chitosan composite—were more effective in increasing soil organic carbon, likely due to their higher lignocellulosic content and greater carbon stability. An increase in application rate positively influenced soil nitrogen content across most treatments, particularly in palm stem nanobiochar, date pit nanobiochar, and the palm stem composite. However, phosphorus levels remained statistically unchanged with increasing amendment rates, suggesting limited mobility or bioavailability under the given conditions. Potassium levels showed a significant response only in the date pit composite treatment, indicating a synergistic effect between chitosan and the biochar matrix. Organic carbon content increased significantly in both composite treatments as the application rate rose from 1% to 2%, underscoring the role of chitosan in enhancing carbon retention and microbial activity. These findings demonstrate that the studied bio-amendments possess strong potential to serve as sustainable alternatives to conventional chemical fertilizers. Their ability to enrich soil with essential nutrients and organic matter makes them particularly valuable for restoring degraded soils, especially in arid and semi-arid regions. Furthermore, the use of such amendments contributes to reducing environmental pressure from biowaste accumulation, promoting circular resource use, and supporting long-term agricultural sustainability.

Conclusion: The integration of nanotechnology and biopolymer composites in soil amendment strategies offers a promising pathway toward eco-friendly and cost-effective solutions for soil fertility management. Future research should focus on field-scale validation, long-term soil health monitoring, and optimization of amendment formulations tailored to specific crop and soil types.

Keywords: Biofertilizer, Sustainable Agriculture, Nanomaterials, Chitosan, Composite, Organic Carbon

How to cite this article:

Abbasnasab, Z., Moradi, N., Esmaeilpour, Y., Gholami, H., and Biniaz, M. 2026. Production of Bio-Amendments Based on Nanobiochar and Investigation of Their Effect on Macronutrients and Soil Organic Carbon. Adv. Environ. Sci. 24 (2):361-380.

* Corresponding Author Email Address: nvz.moradi@hormozgan.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2025.239038.1496



تولید بهسازهای زیستی بر پایه نانوبیوچار و بررسی تأثیر آن‌ها بر عناصر پرمصرف و کربن آلی خاک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷

زهره عباس‌نسب، نوازاله مرادی*، یحیی اسماعیل‌پور، حمید غلامی، مهدی بی‌نیاز

گروه مهندسی منابع طبیعی،
دانشکده کشاورزی منابع طبیعی،
دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: ایران روزانه حجم قابل توجهی از پسماندهای زیستی را از منابع کشاورزی، صنعتی و خانگی تولید می‌کند. دفع نامناسب این مواد آلی نه تنها موجب تخریب محیط زیست می‌شود، بلکه منجر به اتلاف منابع غنی از عناصر غذایی می‌گردد که می‌توانند در بهبود حاصلخیزی خاک مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به نگرانی‌های فزاینده در خصوص کاهش باروری خاک و پیامدهای زیست‌محیطی کودهای شیمیایی، رویکردهای نوین در کشاورزی پایدار بر بهره‌برداری از پسماندهای آلی به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های زیستی تأکید دارند. عناصر پرمصرف نظیر نیتروژن (N)، فسفر (P) و پتاسیم (K) به همراه کربن آلی، نقش اساسی در حفظ سلامت خاک، افزایش عملکرد گیاه و پایداری بلندمدت اکوسیستم ایفا می‌کنند.

مواد و روش‌ها: این پژوهش با هدف بررسی قابلیت پسماندهای زیستی محلی شهرستان میناب، شامل بقایای باغی و دریایی، در تولید اصلاح‌کننده‌های نوین خاک انجام شد. چهار نوع اصلاح‌کننده خاک سنتز گردید: دو نوع نانوبیوچار حاصل از ساقه نخل و هسته خرما و دو کامپوزیت آلی حاصل از تلفیق کیتوزان با هر یک از نانوبیوچارها. به‌منظور بررسی اثر این بهسازها بر میزان عناصر پرمصرف NPK و کربن آلی خاک، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا گردید. مواد اصلاحی در سه سطح (صفر، ۱ و ۲ درصد وزنی) و در سه تکرار به خاک افزوده، به صورت یکنواخت مخلوط و در گلدان‌ها قرار داده شدند. نمونه‌ها به مدت ۹۰ روز در شرایط گلخانه‌ای نگهداری شدند. پس از دوره استراحت، از تیمارهای مورد مطالعه نمونه‌برداری صورت گرفت و عناصر هدف اندازه‌گیری شدند. داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار R مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی بهره گرفته شد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که تمامی اصلاح‌کننده‌های زیستی به‌طور معناداری وضعیت عناصر غذایی خاک را نسبت به تیمار شاهد بهبود بخشیدند؛ به‌ویژه، کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار حاصل از هسته خرما بیشترین اثربخشی را در افزایش غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم داشت. در مقابل، اصلاح‌کننده‌های مشتق‌شده از ساقه نخل اعم از نانوبیوچار و کامپوزیت کیتوزانی آن در افزایش کربن آلی خاک مؤثرتر بودند که احتمالاً ناشی از محتوای بالای لیگنوسولوزی و پایداری بیشتر کربن در آن‌هاست. افزایش سطح کاربرد موجب ارتقای غلظت نیتروژن در اغلب تیمارها، به‌ویژه در نانوبیوچار ساقه نخل، نانوبیوچار هسته خرما و کامپوزیت ساقه نخل شد؛ باین‌حال، غلظت فسفر با افزایش سطح کاربرد تغییر معناداری نداشت که نشان‌دهنده تحرک محدود یا فراهمی زیستی پایین آن در شرایط آزمایش بود. در بررسی پتاسیم، تنها کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار هسته خرما در سطوح بالاتر کاربرد، اثر معنی‌داری نشان داد که حاکی از اثر هم‌افزایی بین کیتوزان و ماتریس بیوچار است. از طرفی، میزان کربن آلی در هر دو تیمار کامپوزیتی با افزایش سطح کاربرد از ۱٪ به ۲٪ به‌طور معناداری افزایش یافت که نقش کیتوزان در حفظ کربن و تحریک فعالیت میکروبی را برجسته می‌سازد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که اصلاح‌کننده‌های زیستی مورد مطالعه ظرفیت بالایی برای جایگزینی پایدار کودهای شیمیایی دارند. توانایی آن‌ها در غنی‌سازی خاک با مواد مغذی و آلی، آن‌ها را به گزینه‌ای ارزشمند برای احیای خاک‌های تخریب‌شده، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تبدیل می‌کند. افزون بر این، استفاده از این مواد موجب کاهش فشار زیست‌محیطی ناشی از انباشت پسماندهای زیستی، ارتقاء بهره‌وری چرخه منابع و پشتیبانی از پایداری بلندمدت کشاورزی می‌شود.

نتیجه‌گیری: درمجموع، تلفیق فناوری نانو و ترکیبات زیست‌پلیمری در راهبردهای اصلاح خاک، مسیر نویدبخشی برای مدیریت حاصلخیزی خاک به‌صورت زیست‌سازگار و مقرون‌به‌صرفه فراهم می‌سازد. تحقیقات آینده باید بر اعتبارسنجی میدانی، پایش بلندمدت سلامت خاک و بهینه‌سازی فرمولاسیون اصلاح‌کننده‌ها متناسب با نوع خاک و گیاه تمرکز یابد.

واژه‌های کلیدی: کود زیستی، کشاورزی پایدار، نانومواد، کیتوزان، کامپوزیت، کربن آلی

استناد به این مقاله: عباس‌نسب، ز.، مرادی، ن.، اسماعیل‌پور، ی.، غلامی، ح.، بی‌نیاز، ۱۴۰۵. تولید بهسازهای زیستی بر پایه نانوبیوچار و بررسی تأثیر آن‌ها بر عناصر پرمصرف و کربن آلی خاک. فصلنامه علوم محیطی نوین. ۳۸۰ (۲): ۲۴-۳۶۱.

* Corresponding Author Email Address: nvz.moradi@hormozgan.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2025.239038.1496



مقدمه

خاک یکی از مهم‌ترین سرمایه‌های طبیعی هر کشور است و عامل مهم تأمین غذا و نیازمندی‌های دیگر نظیر چوب، پوشاک و غیره به شمار می‌رود. حاصلخیزی خاک و تخریب خاک در بسیاری از نقاط جهان در حال گسترش بوده و اثرات مخرب فراوانی را به مراکز اقتصادی و جوامع بشری وارد آورده است (Santra et al., 2017). خاک بزرگ‌ترین منبع کربن در زیست‌کره است و ذخیره کربن به‌عنوان ماده آلی خاک، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (et al., 2021). یکی از مؤلفه‌های اساسی افزایش عملکرد محصول‌های زراعی، مصرف متعادل عناصر غذایی کم‌مصرف و پرمصرف است. کاربرد بیش‌ازاندازه و یک‌جانبه کودهای شیمیایی به‌خصوص نیتروژن و فسفر می‌تواند این توازن و تعادل را بر هم زده سبب بروز مشکلات زیست‌محیطی، بهداشتی و حتی اقتصادی شود و تأثیر نامطلوبی بر چرخه زیستی و پایداری نظام‌های زراعی بگذارد (Zhang et al., 2018). مصرف کودهای زیستی در یک سیستم مبتنی بر کشاورزی پایدار، ضمن حفظ سلامت محیط‌زیست، موجب افزایش پایداری عملکرد و کیفیت محصول می‌شود. در بین عناصر غذایی محرک رشد و نمو، نیتروژن مهم‌ترین و پرمصرف‌ترین و موردنیازترین ماده غذایی است (et al., 2023). Zafar (2022) و پتاسیم نیز از دیگر مواد مغذی موردنیاز گیاهان جهت تنظیم رشد گیاه می‌باشند (Adnan et al., 2022; Khan et al., 2023). میزان مواد آلی خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله خاک‌های آهکی ایران کم بوده و به دلیل تجزیه سریع، اثر مواد آلی افزوده‌شده هم پس از گذشت مدت‌زمان نسبتاً کوتاهی کاهش می‌یابد (Bavariani et al., 2017). از طرفی رشد جمعیت جهان باعث افزایش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی می‌شود که به تبع آن تولید پسماندهای آلی افزایش می‌یابد. افزایش این پسماندها می‌تواند پیامدهای زیان‌بار بسیاری برای سلامتی انسان و محیط زیست ایجاد کند (Ahmad Yousefi et al., 2019). اخیراً استفاده از ضایعات کشاورزی و شهری به‌منظور

افزایش کیفیت خاک از طریق کاهش هدررفت خاک^۱ و افزایش مواد مغذی خاک را می‌توان به عنوان یک ایده نو در زمینه حفاظت خاک پیشنهاد کرد (Sadeghi et al., 2016). در سال‌های اخیر از بیوپچار به عنوان اصلاح‌کننده منبع کربن آلی خاک و به‌نوعی روشی برای ترسیب کربن در خاک‌های مناطق خشک و بیابانی استفاده شده است. مطالعات نشان داده بیوپچار می‌تواند تنوع، جمعیت و فعالیت میکروبی خاک را بهبود داده و حتی فعالیت آنزیمی خاک را نیز افزایش دهد. این مسئله در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت بسزایی دارد (Zhang et al., 2020). بیوپچارها موادی با تخلخل بسیار بالا و گروه‌های عاملی مختلفی هستند که از زیست‌توده‌های گیاهی و ضایعات کشاورزی در دماهای مختلف و در شرایط عدم حضور اکسیژن و یا اکسیژن کم تولید می‌شوند (Cui et al., 2020). افزودن بیوپچار به خاک باعث تغییر در برخی ویژگی‌های خاک مانند pH، مقدار کربن آلی، همچنین قابلیت استفاده برخی عناصر پرمصرف و کم‌مصرف به‌خصوص پتاسیم، کاهش Na، EC، Ca در یک خاک با بافت شنی (Moshtaghi et al., 2023)، افزایش ظرفیت زراعی و کاهش تخلخل خاک (Albuquerque et al., 2014) و تغییر در برخی از صفات کارکردی گیاه می‌گردد (et al., 2021). Abbasnasab (2022). همچنین کیتوزان که از پلی ساکاریدهای نیتروژن‌دار می‌باشد، یک محصول طبیعی، غیر سمی، قابل تجزیه و سازگار با محیط‌زیست است و می‌تواند با تحریک جذب مواد غذایی، جوانه‌زنی، فتوسنتز و رشد گیاه را تحت تأثیر قرار دهد (Deepmala et al., 2014). از طرفی قابلیت‌های موجود در فناوری نانو برای اصلاح خصوصیات خاک با به‌کارگیری انواع مختلف اصلاح‌کننده‌ها در مقیاس نانو مورد توجه قرار گرفته است. نتایج اولیه برخی مطالعات انجام‌شده در زمینه استفاده از نانوکودها برای تغذیه گیاه نشان می‌دهد که استفاده از این نوع کودها باعث افزایش راندمان کودی، کاهش قابل‌توجه در مقدار و تناوب کود مصرفی و در نتیجه

جهت اعمال تیمار، بهسازهای تولیدشده در سطوح مذکور در نسبت وزنی با خاک کاملاً مخلوط شد، سپس مخلوط خاک و بهساز به گلدان‌های پلاستیکی به ارتفاع ۱۸ و قطر ۱۶ سانتی‌متر، منتقل شدند و در شرایط گلخانه به مدت ۹۰ روز نگهداری شدند.

تولید بهسازها

بهبسازهای مورد مطالعه شامل نانوبیوچار، کیتوزان و کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوچار بودند که به صورت تجربی و در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی در آزمایشگاه آب و خاک دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه هرمزگان تولید و با استفاده از روش‌های استاندارد شیمیایی و فیزیکی، ویژگی‌های ساختاری و ترکیبی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. برای تولید نانوبیوچار، بقایای زیست توده نخل (شامل ساقه و هسته خرما) از مناطق روستایی میناب جمع‌آوری، پس از شستشوی دقیق با آب مقطر و خشک کردن هوایی در دمای محیط، به قطعات کوچک (کمتر از ۵ میلی‌متر) خرد شدند و تحت فرآیند پیرولیز بدون اکسیژن در کوره حرارتی با دمای 5 ± 350 درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۳ ساعت و ۳۰ دقیقه قرار گرفتند (Sadeghi et al., 2016). بیوچار (شکل ۱) حاصل با استفاده از آسیاب گلوله‌ای-سیاره‌ای (شرکت دانش بنیان فناوری مواد هوشمند نوین، ایران)، به ذرات نانومتری (نانوبیوچار) تبدیل گردید. جهت استخراج کیتوزان پس از جداسازی و شستشوی پوسته میگو، پوسته‌ها در آون در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت چهار روز خشک و سپس آسیاب و مراحل خالص سازی کیتین، کانی‌زدایی و فرآیند داستیلایسیون انجام شد (Takiguchi, 1991). آن‌گاه، کیتوزان به دست آمده برای انجام آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. به منظور تولید کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوچار (شکل ۲)، ابتدا ۳ گرم از کیتوزان تولیدی به کمک همزن در ۱۸۰ میلی‌لیتر از محلول اسید استیک ۲ درصد (۰/۳۳ مولار) حل شد. سپس ۳ گرم از نانوبیوچار تولیدشده نیز به محلول اضافه

کاهش هزینه‌ها می‌گردد. نانوکامپوزیت‌ها و مواد نانو متخلخل می‌تواند به منظور رهایش کنترل شده و هدفمند کود مورد استفاده قرار گیرد (Mastronardi et al., 2015). تبدیل بیوچار به نانو باعث تغییر برخی ویژگی‌های آن مانند افزایش ظرفیت جذب، بهبود خواص مکانیکی، افزایش گروه‌های عاملی، بزرگ تر شدن حجم منافذ، افزایش نسبت سطح به حجم و در نتیجه، افزایش کارایی آن خواهد شد (Chausali et al., 2021). اصلاح بیوچار به روش‌های مختلف با توجه به اهداف کاربرد آن در خاک، در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Jiang et al., 2020; Moradi and Karimi, 2021). مطالعات نشان داده که اصلاح و یا اختلاط بیوچار با استفاده از ترکیبات مختلف، می‌تواند ویژگی‌های آن را تحت تأثیر قرار دهد (Ramzani et al., 2017). در این پژوهش به منظور مدیریت پسماند محصولات باغی و دریایی استان هرمزگان که فراوان و بلا-استفاده مانده، بهسازهای زیستی بر پایه نانوبیوچار تولید گردید. در همین راستا، اثربخشی کاربرد چهار نوع بهساز زیستی شامل ۱- نانوبیوچار تولیدشده از ساقه‌های درخت نخل (NBS)، ۲- نانوبیوچار هسته خرما (NBK)، ۳- کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوچار ساقه نخل (ComS) و ۴- کامپوزیت کیتوزان-هسته خرما (ComK)، در سه سطح (صفر، ۱ و ۲ درصد وزنی) بر فراهمی عناصر غذایی پرمصرف (NPK) و کربن آلی خاک در یک خاک شنی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت فاکتوریل با دو فاکتور شامل نوع بهسازها در چهار سطح ۱- نانوبیوچار تولیدشده از ساقه‌های درخت نخل (NBS)، ۲- نانوبیوچار هسته خرما (NBK)، ۳- کامپوزیت کیتوزان-نانوبیوچار ساقه نخل (ComS) و ۴- کامپوزیت کیتوزان-هسته خرما (ComK) و سطوح مصرف با سه سطح (صفر، ۱ درصد و ۲ درصد) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار به صورت گلدانی در گلخانه انجام شد.

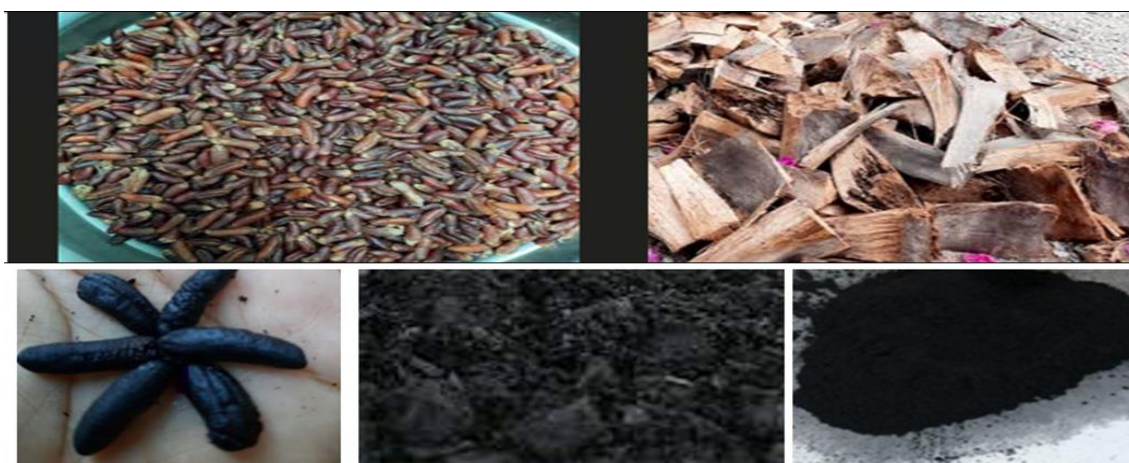
آنالیز عنصری، ترکیب عنصری نمونه را تعیین می‌کند. روش آن بر اساس اصل Dumas که شامل اکسیداسیون کامل و آبی یا احتراق سریع نمونه است. نتایج آنالیز عنصری، درصد ترکیبات کربن، هیدروژن، نیتروژن موجود در نمونه است. آنالیز عنصری با آنالیز کننده CHNS (Vario EL III) انجام گرفت.

به منظور ارزیابی اثر مواد بهساز بر پارامترهای خاک، پس از نمونه‌برداری و خشک نمودن نمونه‌ها، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مورد مطالعه اندازه‌گیری شد. به همین منظور نیتروژن به روش کج‌دال، فسفر قابل جذب با روش اولسن (Olsen and Sommers, 1990)، پتاسیم قابل جذب با دستگاه فلام فتومتر و کربن آلی خاک را با روش والکلی بلاک (Nosetto *et al.*, 2006) اندازه‌گیری شد.

و محلول به‌دست‌آمده توسط همزن به مدت ۳۰ دقیقه همگن شد. پس از سپری شدن مدت زمان ۳۰ دقیقه، سوسپانسیون همگن کیتوزان-نانوبیوچار به‌صورت قطره-قطره به ۹۰۰ میلی‌لیتر از NaOH ۱/۲ درصد (۰/۳ مولار) اضافه و سپس محلول تهیه‌شده به مدت ۱۲ ساعت به حال خود رها شد. برای خروج NaOH اضافی، با آب دیونیزه شست‌وشو داده شده و در آخر نمونه به مدت ۲۴ ساعت، در آون و در دمای ۷۰ درجه سلسیوس، خشک شد (Zhou *et al.*, 2013).

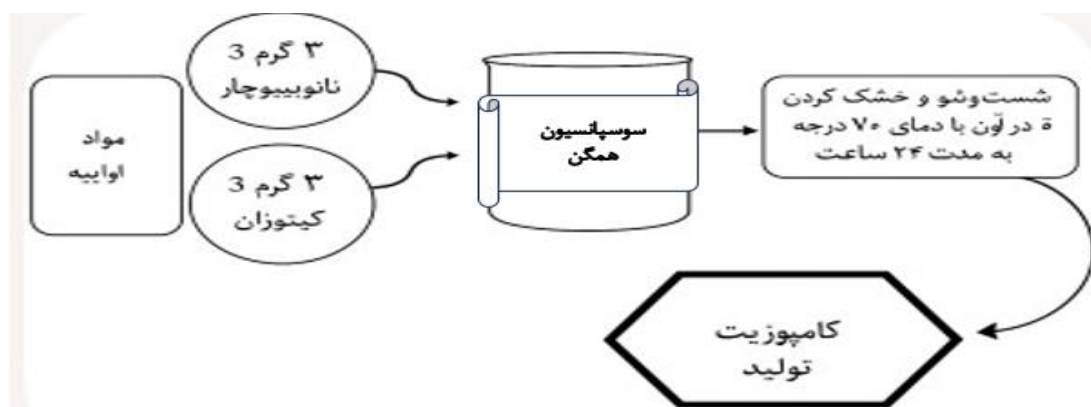
تجزیه آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی ویژگی‌های بهسازها اندازه‌گیری رطوبت، خاکستر و مواد فرار زیست‌توده‌های مورد استفاده برای تولید بهسازها، بر اساس روش ASTM² D5832-98 انجام شد و



شکل ۱- تصویر بقایای ساقه درخت نخل و هسته خرما و بیوچار حاصل از آن

Fig. 1- Image of date palm stem residues, date seeds, and derived biochar



شکل ۲- مراحل تولید کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار

Fig. 2- Production steps of chitosan-nanobiochar composite.

تجزیه زیست توده و بهسازهای تولیدشده از آن‌ها

مطابق نتایج جدول (۲) تجزیه زیست توده نشان می‌دهد که رطوبت هسته خرما از همه کم‌تر بوده و این نشان از مطلوبیت زیست توده برای تولید بیوچار است. چون آب (رطوبت) که ترکیب اصلی زیست توده است، تأثیر نامطلوبی بر فرآیند پیرولیز دارد. از جمله این که حرارت زیادی برای بخار کردن رطوبت و همچنین حرارت دادن بخار تا دمای پیرولیز لازم است. همچنین دارای مواد فرار زیاد و خاکستر کم می‌باشد که مطلوب به نظر می‌رسد و منجر به تولید بیوچار با کارایی بالایی می‌شود (Asadullah *et al.*, 2007).

پس از اتمام آزمایش‌ها، بانک اطلاعاتی در محیط نرم افزار Excel تشکیل شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها در نرم افزار R نسخه 4.0.5 انجام شد. به منظور مقایسه میانگین اثر بهسازها از آزمون توکی در سطح احتمال ۹۵ درصد و جهت رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج آزمون نمونه خاک مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است. طبق جدول، خاک با بافت شنی دارای pH نزدیک به خنثی و هدایت الکتریکی (EC) ۱۵/۰۴ دسی-زیمنس بر متر می‌باشد.

جدول ۱- برخی از خصوصیات نمونه خاک مورد مطالعه

Table 1- Some properties of the studied soil sample

بافت خاک Soil texture	رس (%) Clay (%)	سیلت (%) Silt (%)	شن (%) Sand (%)	هدایت الکتریکی (dS/m) EC (dS/m)	pH
شنی	4	6	90	15.04	7.04

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های زیست توده‌های مورد استفاده

Table 2- Some characteristics of the biomass used

نوع بهساز	رطوبت (%) Moisture (%)	مواد فرار (%) Volatile matter (%)	خاکستر (%) Ash (%)	کربن (%) Carbon (%)
هسته خرما Date kernel	3.5	73.67	0.86	21.98
ساقه نخل Palm stem	8.4	69	11.75	10.85
کیتوزان Chitosan	9		1.5	

با توجه به جدول (۳) آنالیز عنصری بهسازهای مورد مطالعه نشان می‌دهد که بالاترین درصد نیتروژن، هیدروژن و نسبت H/C مربوط به ComK می‌باشد. تغییرات نیتروژن کل تحت تأثیر زیست توده تولیدشده از آن‌ها است. هرچقدر، در ماده اولیه همی سلولز و لیگنین بیشتر باشد، دارای نیتروژن کل پایینی می‌باشند. این یافته‌ها با نتایج (Sun *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2013) که گزارش کردند، زیست توده‌های چوبی به دلیل وجود مقادیر بالای همی سلولز

و لیگنین دارای نیتروژن کل پایینی هستند و تغییرات نیتروژن تحت تأثیر زیست توده اولیه می‌باشد، مطابقت دارد. طبق دستورالعمل EBC^۳ نسبت H/C بیوچارهای استاندارد باید کمتر از ۰/۷ باشد. نسبت H/C بالاتر از ۰/۷ نشان دهنده پیرولیز ناقص است؛ بنابراین بهسازهای تولیدشده دارای استاندارد لازم می‌باشند. همچنین بالاترین درصد کربن مربوط به بهسازهای تولید ساقه از بقایای چوبی ساقه نخل یعنی نانوبیوچار ساقه نخل (NBS) و کامپوزیت کیتوزان-

نانوبیوچار ساقه نخل (ComS) است. بر همین اساس، بیوچار تولیدشده از زیست توده های چوبی، درصد کربن بیش تری دارند.

نانوبیوچار تولیدشده از هسته خرما (NBK) کمترین هدایت الکتریکی (EC) و نانوبیوچار تولیدشده از ساقه نخل (NBS) بیش ترین هدایت الکتریکی (EC) را نشان داد. علت بالاتر بودن مقدار هدایت الکتریکی در بهساز NBS مربوط به بیش تر بودن مقدار خاکستر موجود در زیست توده اولیه می باشد (Claoston *et al.*, 2014; Glaser *et al.*, 2002). همچنین بهسازهای NBS و NBK دارای pH نزدیک به خنثی می باشد. به طور کلی pH بیوچارهایی که در دمای بالاتر از ۳۵۰ درجه سلسیوس تولید می شوند به علت جدا شدن مواد معدنی از بخش آلی هنگام فرآیند پیرولیز، بالاتر است (Tsai *et al.*, 2012)؛ اما در این مطالعه بیوچارها در دمای کمتر از ۳۵۰ درجه سلسیوس تولید شد. احتمال می رود به همین دلیل بهسازهای مورد مطالعه دارای pH تقریباً خنثی هستند.

بر اساس داده های جدول ۳، نسبت کربن به نیتروژن (C:N) در میان بهسازهای تولیدشده، بیشترین مقدار را نانوبیوچار و کامپوزیت حاصل از هسته خرما دارا بودند. در مقابل، کمترین نسبت C:N به نانوبیوچار و کامپوزیت تولیدشده از ساقه نخل اختصاص داشت؛ به طوری که این مقدار نسبت به نمونه های متناظر حاصل از هسته خرما، کاهش قابل توجهی در حدود دو برابر را نشان داد. این اختلاف چشمگیر بیانگر تجزیه پذیری بالاتر و فعالیت زیستی مطلوب تر ترکیبات مبتنی بر ساقه نخل است که احتمالاً ناشی از محتوای نیتروژن بیشتر و/یا

ساختار کربنی ساده تر و قابل دسترس تر برای میکروارگانیسم های خاک می باشد (Singh and Cowie, 2014). چنین ویژگی هایی موجب تسهیل فرآیند مینرالیزاسیون و آزادسازی سریع تر نیتروژن معدنی شده و این نوع بهسازها را به منابع بالقوه نیتروژن برای تغذیه گیاهان در مراحل ابتدایی رشد تبدیل می کند. از سوی دیگر، تفاوت معنادار نسبت C:N میان دو نوع زیست توده اولیه (هسته خرما و ساقه نخل) نشان می دهد که منشأ و ترکیب شیمیایی ماده خام نقش تعیین کننده ای در ویژگی های تغذیه ای، پایداری زیستی و رفتار تجزیه پذیری محصولات نهایی ایفا می کند. به طور کلی، بهسازهایی با نسبت C:N بالا مانند نانوبیوچار و کامپوزیت هسته خرما به دلیل پایداری بیشتر در خاک و نرخ تجزیه پایین تر، برای اهداف بلندمدت زیست محیطی نظیر تثبیت کربن آلی، بهبود ساختار خاک و افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت مناسب تر هستند. در مقابل، بهسازهای با نسبت C:N پایین تر، به عنوان محرک های زیستی مؤثر در دوره های کوتاه مدت، می توانند نقش مهمی در تقویت چرخه نیتروژن و تحریک رشد گیاه ایفا کنند. این یافته ها بر ضرورت انتخاب هدفمند ماده اولیه بر اساس نوع کاربرد نهایی اعم از بهبود پایدار خاک یا تغذیه مستقیم گیاه تأکید دارند. در این رابطه بر اساس مطالعات جهت تولید مواد اصلاحی آلی نظیر کمپوست بر اساس استاندارد محدوده ۱۰ - ۲۰ گزارش شده است (Zazouli *et al.*, 2009) که هرچند در مطالعه حاضر نوع ماده اصلاحی متفاوت است، با این حال بهسازهای حاصل از ساقه خرما در محدوده مورد نظر قرار داشته و ساقه کمی بیشتر محدوده مورد نظر است.

جدول ۳- برخی از ویژگی های بهسازهای تولیدشده

Table 3- Some characteristics of the produced amendments.

pH	EC (dS/m)	C/N	H/C	H(%)	C(%)	N(%)	بیساز Amendment
6.9	8.08	23.518	0.089	5.697	63.448	2.697	NBS
7.06	4.76	11.725	0.085	4.355	50.715	4.325	NBK
7.76	7.81	22.903	0.089	5.647	63.325	2.764	ComS
7.6	6.48	11.008	0.108	5.836	53.605	4.869	ComK

تأثیر بهسازهای زیستی بر عناصر پرمصرف

(NPK) و کربن آلی خاک

عناصر پرمصرف (NPK) و کربن آلی خاک طبق جدول (۴)،

بهبازها بر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کربن آلی خاک در

سطح ۱ درصد دارای معنی‌داری است.

با توجه به نتایج اثر یک‌جانبه و متقابل بهسازها و سطوح بر

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس میانگین بهسازها و سطوح مصرف بر عناصر پرمصرف (NPK) و کربن آلی خاک

Table 4- The Results of variance analysis of the average amendments and concentration levels on soil macronutrients (NPK) and organic carbon.

p-value	F-value	درجه آزادی Degrade of freedom	منابع تغییرات Source of variation	پارامترها parameters
<0.001**	116.346	3	بهباز Amendment(A)	نیتروژن Nitrogen
0.412	0.993	2	سطح Rate(R)	
0.138	2.234	6	بهباز × سطح A×R	
<0.001**	90.807	3	بهباز Amendment(A)	فسفر phosphorus
0.582	0.580	2	سطح Rate(R)	
0.418	1.163	6	بهباز × سطح A×R	
<0.001**	147.456	3	بهباز Amendment(A)	پتاسیم Potassium
0.825	0.197	2	سطح Rate(R)	
0.794	0.547	6	بهباز × سطح A×R	
<0.001**	377.694	3	بهباز Amendment(A)	کربن آلی Organic carbon
<0.001**	59.893	2	سطح Rate(R)	
0.184	1.941	6	بهباز × سطح A×R	

*: معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، **: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، ns: عدم معنی‌داری.

*: Significant at $P < 0.05$. **: Significant at $P < 0.01$, ns: Non-significant

تأثیر به‌کارگیری سطوح مختلف بهسازها بر

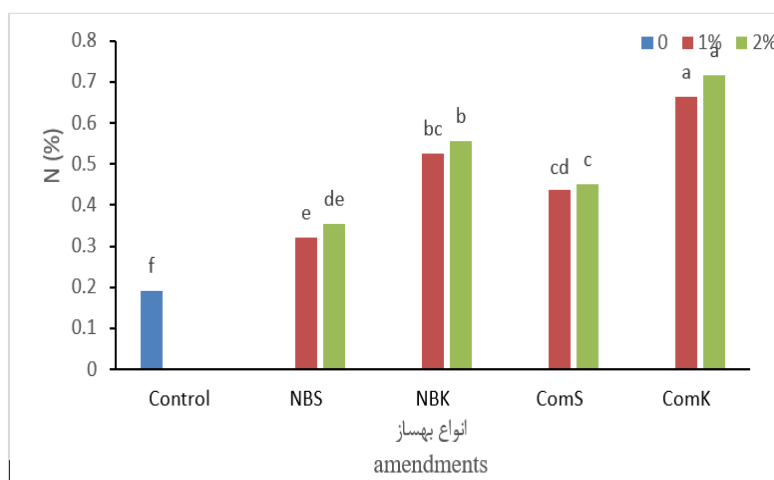
درصد نیتروژن خاک

کاربرد بهسازهای زیستی با سطوح مختلف باعث افزایش درصد نیتروژن خاک نسبت به شاهد شد (شکل ۳). با این وجود بهسازهای دارای ویژگی‌های متفاوت، رفتار متفاوتی نشان دادند. بیش‌ترین درصد نیتروژن خاک در بهساز کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار هسته خرما مشاهده شد. می‌توان چنین بیان کرد که این نوع بهساز به دلیل دارا بودن نیتروژن بالاتر (جدول ۳)، تأثیر بیش‌تری بر افزایش نیتروژن خاک داشته است. در بررسی اثر افزایش سطوح بهسازها بر درصد نیتروژن

خاک مشاهده شد که در بهسازهای نانوبیوچار ساقه نخل، نانوبیوچار هسته خرما و کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار ساقه نخل با افزایش سطوح مصرف، نیتروژن خاک افزایش یافته است، اما در بهساز کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار هسته خرما افزایش سطوح مصرف، تأثیر معنی‌داری بر افزایش درصد نیتروژن خاک نشان نداد. کیتوزان حاوی نیتروژن در ساختار شیمیایی خود بوده که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر غذایی برای گیاهان و خاک شناخته شده است. وقتی نیتروژن موجود در کیتوزان حل شود به تدریج نفوذ کرده و از این نظر می‌تواند مؤثر واقع شود (Becker et al., 2000). طبق نتایج *et al.*

تأثیر ترکیب بیوپچار و نوعی باکتری محرک رشد افزایش یافت. ترکیب بیوپچار و باکتری محرک رشد نسبت به کاربرد هر کدام از تیمارها به‌طور جداگانه، اثرگذاری بیشتری در افزایش مقدار نیتروژن کل را نشان داد. علت آن را وجود مواد مغذی در بیوپچار بیان کردند. دلیل دیگر ممکن است وجود کربن آلی در بیوپچار باشد که جمعیت باکتری‌ها را به عنوان منبع کربن آن‌ها افزایش داد و در فرآیند نیترات‌سازی دخیل بود. در نهایت، باعث افزایش نیتروژن کل در خاک گردید (Plaza *et al.*, 2013; *et al.*, 2017; Gao *et al.*, 2013). بیوپچار دارای قابلیت جذب آنیونی بوده و سطح ویژه بالایی داشته که قادر به جذب یون-های نیترات بوده و موجب نگهداری آن در خاک و کاهش آبشویی نیترات و افزایش نیتروژن در محدوده ریشه شده و در نهایت، باعث افزایش میزان نیتروژن گیاه شده است (Zhang *et al.*, 2014). همچنین بیوپچار دارای سطح ویژه بالاتر از طریق افزایش خاک، جمعیت باکتری‌های نیترات‌ساز را افزایش می‌دهد (Clough & Condron, 2010).

(Giroto 2017) کیتوزان می‌تواند به‌صورت تدریجی نیتروژن را در خاک رها کند و به گیاهان اجازه دهد تا نیازهای غذایی خود را در مراحل مختلف رشد برآورده کنند (Giroto *et al.*, 2017). گزارش شده است که کیتوزان با استفاده از افزایش فعالیت آنزیم‌های کلیدی در متابولیسم نیتروژن (نیترات ردکتاز، گلوتامین و پروتئاز سنتتاز (و بهبود انتقال نیتروژن، باعث توسعه و رشد گیاه می‌شود (Mondal *et al.*, 2012). در تحقیق Raza *et al.* (2023) ترکیب نانوبیوپچار و نوعی هورمون گیاهی بهترین عملکرد را نسبت به کاربرد هر کدام از این تیمارها به‌طور جداگانه نشان داد. کاربرد ترکیبی نانوبیوپچار و هورمون گیاهی به طور معنی‌داری باعث افزایش محتوای NPK خاک شد. این محققان اظهار داشتند که بیوپچار باعث افزایش ماده آلی در خاک و بهبود احتباس آب در خاک لوم شنی می‌شود و منجر به افزایش جذب NPK می‌شود. همچنین در تحقیق Ullah *et al.* (2019) نیتروژن کل، فسفر قابل‌دسترس، پتاسیم قابل‌استخراج و کربن آلی خاک تحت



شکل ۳- مقایسه میانگین تأثیر بهسازها با سطوح مختلف بر درصد نیتروژن خاک

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵٪ با استفاده از آزمون توکی است.

Fig. 3- Comparison of the mean effects of soil amendments at different levels on soil nitrogen content.

Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$ (Tukey's test).

افزایش مقدار فسفر در همه مواد اصلاحی نسبت به تیمار شاهد است (شکل ۴). بیشترین مقدار فسفر قابل جذب مربوط به غلظت ۲ درصد کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوپچار هسته خرما است که نسبت به تیمار شاهد افزایش

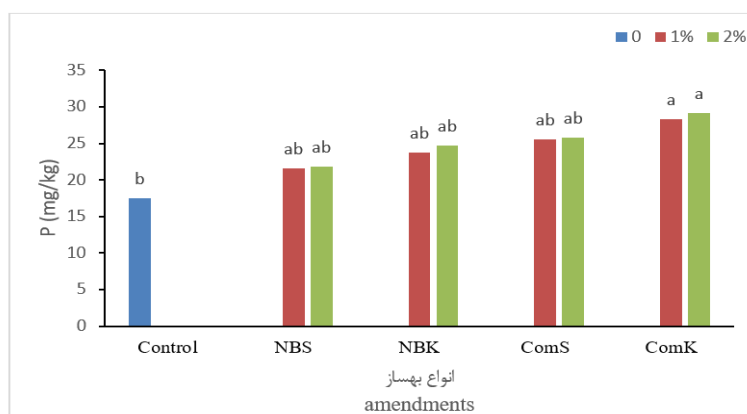
تأثیر به‌کارگیری سطوح مختلف بهسازها بر

فسفر خاک

نتایج مقایسه میانگین حاصل از بررسی هر چهار بهساز زیستی بر مقدار فسفر قابل جذب خاک نشان‌دهنده روند

آلی وجود دارد: ۱) استفاده از مواد ارگانیک با محتوای فسفر بالا می‌تواند میزان فسفر خاک را افزایش دهد؛ ۲) تجزیه مواد آلی در خاک می‌تواند غلظت اسیدهای آلی را در خاک افزایش دهد که این امر منجر به کاهش فسفر غیر قابل جذب (تثبیت‌شده) در خاک می‌شود و فراهمی فسفر را در خاک افزایش می‌دهد که از این طریق منجر به افزایش فسفر قابل دسترس می‌شود؛ ۳) افزایش زیست‌توده میکروبی می‌تواند قابلیت دسترس بودن فسفر در خاک را افزایش دهد. زیست‌توده میکروبی هنگامی که مواد آلی در خاک تجمع می‌یابند افزایش می‌یابد و منجر به آزادسازی CO_2 می‌شود که به نوبه خود باعث تشکیل اسیدکربنیک می‌شود. این اسید ضعیف نیز می‌تواند فسفر اولیه مواد معدنی را قابل حل کند و باعث افزایش فسفر قابل جذب شود (Gholamhoseini *et al.* 2013). افزودن کود آلی به خاک باعث تکثیر باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و باکتری‌های حل‌کننده فسفات می‌شود و با تولید انواع اسیدهای آلی توسط باکتری‌ها و کاهش اسیدیته خاک، حلالیت فسفر نامحلول بیش‌تر می‌شود و با آزاد شدن و افزایش نیتروژن و فسفر، رشد گیاه بهبود می‌یابد. در اثر افزایش فسفر خاک، رشد و توسعه ریشه نیز افزایش می‌یابد و باعث افزایش دسترسی و جذب پتاسیم توسط ریشه گیاه می‌شود (Courtney & Mullen, 2008).

معنی‌داری در سطح ۵ درصد نشان داده است. افزایش سطوح مصرف هرچند سبب افزایش مقدار فسفر قابل جذب شده است؛ با این حال، در هیچ‌یک از بهسازهای زیستی مورد مطالعه افزایش غلظت تأثیر معنی‌دار نداشت که به نظر می‌رسد کمبود تنوع در سطوح آزمایشی (۱٪ و ۲٪) باعث شده تغییرات فیزیکوشیمیایی ناشی از افزایش دوز، کمتر از حد تشخیص آماری باقی بماند و به دلیل نزدیکی شدید این سطوح، تفاوت‌های واقعی در جذب فسفر قابل ردیابی نبوده باشد. از طرفی رقابت یون‌های موجود در محیط مانند Ca^{2+} ، Al^{3+} و Fe^{3+} بر سایت‌های جذب کیتوزان و بیوچار می‌تواند جذب فسفر را محدود کرده و اثر افزایش دوز ماده را خنثی نماید؛ علاوه بر آن، تغییرات pH محیط نیز ممکن است گروه‌های عاملی فعال آمید -NH_2 ، -COO^- را پروتونه کرده و ظرفیت جذب را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد که برخی مطالعات این مکانیسم را بررسی کرده‌اند (Moharami, 2024). از طرفی افزایش میزان فسفر خاک تحت تأثیر کاربرد بیوچار در مطالعات مشابهی صورت گرفته است (Masulili *et al.*, 2012; *al.*, 2010; Lehmann *et al.*, 2003; Nigussie). محققان مختلفی نشان دادند که کاربرد کود آلی ممکن است حلالیت فسفر در خاک را افزایش دهد (Mengistu *et al.*, 2017). مکانیسم‌های متعددی در خصوص قابل‌دسترس شدن فسفر و جذب آن با کاربرد مواد



شکل ۴- مقایسه اثر میانگین بهسازهای خاک در سطوح مختلف بر محتوای فسفر خاک.

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵٪ با استفاده از آزمون توکی است.

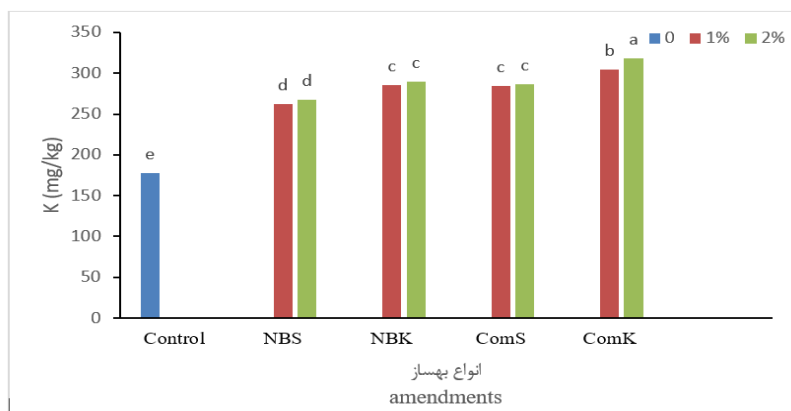
Fig. 4- Comparison of the mean effects of soil amendments at different levels on soil phosphorus content.

Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$ (Tukey's test).

تأثیر به کارگیری سطوح مختلف بهسازها بر پتاسیم خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد بهسازهای زیستی مورد مطالعه باعث افزایش معنی‌دار پتاسیم خاک نسبت به تیمار شاهد فاقد مواد اصلاحی گردید (شکل ۵). بالاترین میزان پتاسیم خاک در بهساز کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار هسته خرما، سپس در بهسازهای کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار ساقه نخل و نانوبیوچار هسته خرما مشاهده شد. افزایش سطوح مصرف از ۱ به ۲ درصد فقط در کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار هسته خرما تأثیر معنی‌دار داشت و باعث افزایش میزان پتاسیم خاک گردید. در دیگر بهسازهای مورد مطالعه با افزایش سطوح مصرف از ۱ به ۲ درصد، تفاوت معنی‌داری در میزان پتاسیم خاک نشان نداد. همان‌طور که در بخش فسفر بیان شده، عدم معنی‌داری مشاهده شده در سطوحی غلظتی ۱ و ۳ درصدی، لزوماً به معنای بی‌اثر بودن نانو بیوچار و کامپوزیت کیتوزان بر مقدار پتاسیم نیست به‌طوری‌که از نظر عددی مقدار قابل‌توجهی افزایش پیدا کرده، بلکه نشان‌دهنده این است که تأثیر این مواد بر پتاسیم خاک، در شرایط آزمایشی فعلی از نظر آماری معنادار نبوده است. بالاتر بودن پتاسیم خاک تحت تأثیر بهسازهای زیستی، در مقایسه با نمونه خاک شاهد، به دلیل وجود پتاسیم در محتویات خاکستر موجود در بیوچار است. در نتیجه باعث افزایش محتوای پتاسیم خاک نسبت به شاهد گردید (Yu et al., 2017). در مطالعه Salem et al. (2024) نانوذرات کیتوزان باعث فراهمی عناصر NPK و افزایش رشد و بهره‌وری گیاه گندم در خاک شنی شد. ممکن است به این دلیل باشد که کیتوزان به طور مستقیم بر بیان ژن، متابولیسم و ایجاد انواع پاسخ‌های بیولوژیکی گیاه تأثیر می‌گذارد. این اثرات می‌تواند جذب مواد مغذی را به طور مستقیم یا غیرمستقیم افزایش دهد (Ghormade et al., 2011).

(Battikha et al., 2023). در پژوهشی (۲۰۲) Mahmoodian et al. پیرامون بیوچار تولیدشده از شاخ و برگ هرس شده درخت هلو، بیان داشتند که بیوچار منبعی مستقیم برای عناصر پتاسیم، کلسیم و فسفر است و فراهم بودن عناصر غذایی بر اثر افزودن بیوچار به خاک، می‌تواند اسیدیته خاک (pH) و یا ظرفیت تبادل کاتیونی، افزایش یابد. بر اساس نتایج تحقیق (۲۰۱۵) Yousefzadeh et al. بقایای مواد آلی، باعث افزایش معنی‌دار میزان پتاسیم قابل دسترس خاک نسبت به شاهد شد که این موضوع باعث بهبود کارکردهای مختلف گیاه می‌شود؛ زیرا پتاسیم در پایداری اسیدیته خاک، تنظیم اسمزی، آنزیمی، فتوسنتز، سنتز پروتئین، توسعه سلولی و هدایت روزه‌ای نقش مهمی دارد. بدین ترتیب استفاده از مواد آلی، ضمن بهبود فعالیت‌های بیولوژیکی و میکروبی خاک، با افزایش انحلال و تحرک عناصر غذایی، دسترسی به آن‌ها را برای گیاه تسهیل می‌کند (Mengistu et al., 2017). اصلاح بیوچار با اسیدها باعث افزایش در دسترس بودن عناصر غذایی گیاهان در خاک- های شور و سدیمی می‌شود و اثر مثبت بیوچار اصلاح شده اسیدی بر رشد گیاه را می‌توان ناشی از افزایش عناصر غذایی گیاه در بیوچار و همچنین خاک دانست (Sahin et al., 2017). اصلاح شیمیایی بیوچار با اسیدها کارایی جذب سطحی آن و نیز سطح ویژه آن را افزایش و اثرات محدودکننده را کاهش می‌دهد (Taskin et al., 2019). برخی مطالعات نشان داده است که کاربرد بیوچار به عنوان یک اصلاح‌کننده در خاک‌هایی که محتوای عناصر غذایی آن‌ها پایین است، می‌تواند باعث تحریک رشد گیاه و دستیابی به عملکرد مناسب شود (Ahmad et al., 2017). برخی از محققین بیان داشته‌اند که مواد آلی به- طور مستقیم در غلظت پتاسیم خاک و جذب آن توسط گیاه دخیل می‌باشد (Mahmood et al., 2017; Gholami and Salehi, 2015).



شکل ۵- مقایسه اثر میانگین بهسازهای خاک در سطوح مختلف بر محتوای پتاسیم خاک.

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵٪ با استفاده از آزمون توکی است.

Fig. 5- Comparison of the mean effects of soil amendments at different levels on soil potassium content. Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$ (Tukey's test).

تأثیر به کارگیری سطوح مختلف بهسازها بر

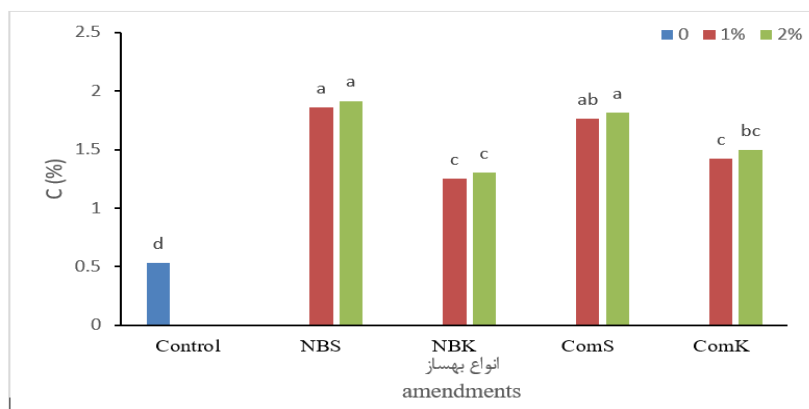
کربن آلی خاک

بر اساس شکل (۶) نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد بهسازهای زیستی مورد مطالعه باعث افزایش کربن آلی خاک گردید. بالاترین میزان کربن آلی در خاک تحت تأثیر بهساز نانوبیوچار ساقه نخل و سپس در کامپوزیت کیتوزان-نانو-بیوچار ساقه نخل مشاهده گردید. افزایش سطوح مصرف در کامپوزیت‌های مورد مطالعه باعث افزایش درصد کربن آلی خاک شد، اما در بهسازهای از نوع نانوبیوچار تأثیر معنی‌داری نشان نداد. بهسازهایی که کربن بیشتری داشته، اثر مثبت بیشتری در افزایش کربن آلی خاک داشتند. تغییر میزان کربن آلی خاک در اثر افزودن بیوچار در مطالعات متعددی دیده شده است (Abbas et al., 2019; Munda et al., 2018). در مطالعه‌ای به منظور بررسی تأثیر نوع و سطح بیوچار بر برخی ویژگی‌های خاک آهکی نشان دادند که به‌طور کلی با افزایش مقدار بیوچار، کربن آلی خاک و نیز شکل‌های قابل‌استفاده پتاسیم، فسفر و منگنز به‌طور معنی‌دار افزایش یافته است (Moradi et al., 2017). افزایش کربن آلی خاک ممکن است به دلیل وجود شکل پایدار کربن آلی باشد که برای مدت زمان طولانی باقی مانده و در نهایت باعث افزایش محتوای مواد آلی در خاک شده است (Han et al., 2019; Sarfraz et al., 2019; Plaza et al., 2013). علاوه بر این،

استفاده از بیوچار پتانسیل جذب بیشتر مولکول‌های آلی را به دلیل ساختار متخلخل آن افزایش می‌دهد (Muhammad et al., 2017; Chen et al., 2008). مواد اصلاحی خاک به علت افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های خاکری، موجب فعال شدن واکنش‌های بیوشیمیایی (تجزیه ترکیبات پیچیده آلی) شوند و به تبع آن کربن آلی خاک را افزایش می‌دهند (Gholamhoseini et al., 2013). همچنین (۲۰۱۰). Masulili et al. افزایش ماده آلی را با استفاده از بیوچار مشاهده کردند. افزایش کربن آلی محلول خاک در اثر کاربرد بهسازها نشان می‌دهد که این بهسازها دارای کربن قابل دسترس بوده که می‌تواند در خاک آزاد شود و منبع انرژی و تغذیه مناسبی برای ریزجانداران خاک می‌باشد (Frene et al., 2021). افزایش کربن آلی خاک در این تحقیق، با پژوهش Zhang et al. (۲۰۱۸) پیرامون تأثیر بیوچار کاه گندم بر خاک هم‌خوانی دارد. طی تحقیق دیگری (۲۰۲۱). Shokuhifar et al. گزارش کردند که با کاربرد بیوچار، pH، کربن آلی و کربن زیست‌توده میکروبی خاک افزایش یافت. آنان مشاهده کردند که نوع و شدت تغییراتی که بیوچار در خاک ایجاد می‌کند، به ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی و همچنین میزان رطوبت خاک بستگی دارد. افزودن بیوچار به خاک باعث افزایش کربن آلی، نیتروژن، فسفر و پتاسیم شد که این خود باعث افزایش باروری خاک

طور معنی‌داری افزایش یافت. این پژوهشگران دلیل این تغییر در طی زمان را، تجزیه بیوپار و آزادسازی برخی از عناصر مانند کربن، فسفر، پتاسیم، سدیم و کلسیم اعلام کردند. بررسی‌ها نشان داده است که پسماندهای آلی شامل مقادیر قابل‌ملاحظه‌ای از عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف بوده که از طریق سازوکارهای مختلف مانند تشکیل کلات فراهمی عناصر غذایی موجود در خاک را افزایش می‌دهند و باعث کاهش شست‌وشوی عناصر غذایی خاک می‌گردد (Jones 2011). در مجموع، بر اساس نتایج پژوهش‌های انجام‌شده که برخی موارد در بالا بیان شده (Xie et al., 2022; Sarfraz et al., 2019; Han et al., 2019; Plaza et al., 2013; Gholamhoseini et al., 2013; Masulili et al., 2010)، افزودن بیوپار و کامپوزیت کیتوزان به خاک، از طریق سازوکارهای هم‌افزا، موجب افزایش پایداری ماده آلی خاک می‌شود. این فرآیند از سه مسیر صورت می‌گیرد: نخست، ورود مستقیم کربن پایدار به خاک از طریق ساختار آروماتیک و مقاوم بیوپار که در برابر تجزیه میکروبی بسیار مقاوم است؛ دوم، حفاظت فیزیکی و شیمیایی ماده آلی موجود از طریق محصورسازی در نانوحفره‌های بیوپار و تشکیل کمپلکس‌های پایدار میان کیتوزان و کانی‌های خاک که مانع از دسترسی عوامل تجزیه‌کننده به مواد آلی می‌شود؛ و سوم، تحریک زیستی خاک از طریق افزایش فعالیت میکروبی و ترشح ترکیبات آلی مانند پلی‌ساکاریدهای خارج‌سلولی و پیش‌سازهای ترکیبات هومیک که نقش مهمی در تثبیت کربن و بهبود ساختار خاک ایفا می‌کنند. این تعاملات چندلایه، موجب تبدیل بخش فعال به فرم‌های پایدارتر آن شده و در نتیجه، ماندگاری کربن در خاک افزایش می‌یابد. به‌ویژه، کامپوزیت کیتوزان-بیوپار با ایجاد یک سامانه نانوساختار دفاعی، به‌طور هم‌زمان نقش ذخیره‌سازی کربن، محافظت از مواد آلی و تحریک زیستی را ایفا می‌کند. این ویژگی‌ها، آن را به راهکاری مؤثر و پایدار برای ارتقاء حاصلخیزی خاک‌های تخریب‌شده و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تبدیل می‌سازد.

می‌شود (Novak et al., 2009). کاربرد مواد آلی، نقش مهمی در افزایش عناصر معدنی، آلی و بهبود ساختمان خاک دارد. مواد آلی علاوه بر افزودن نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سایر ریزمغذی‌ها به خاک، باعث بهبود ساختار خاک، تسهیل عملیات کاشت، رشد و توسعه ریشه و افزایش جذب عناصر غذایی و فعالیت میکروبی خاک می‌شوند (Hosseinzadeh et al., 2020). از طرفی، افزودن بیوپار به خاک باعث افزایش پایداری کربن آلی خاک در برابر عوامل محیطی و کاهش معدنی شدن آن می‌شود. همین امر موجب می‌گردد تا میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن به میزان قابل‌توجهی کاهش یابد. از سوی دیگر با تثبیت کربن آلی خاک منجر به افزایش کربن آلی می‌گردد. افزایش کربن آلی نیز اثراتی چون بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب، افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها و فراهمی هرچه بیشتر و بهتر عناصر غذایی برای خاک را به همراه دارد. کیتوزان به‌عنوان یک منبع کربن ممکن است رشد میکروب‌های مفید در خاک را تحریک کرده، فرآیند تبدیل مواد آلی به معدنی را افزایش داده و به سیستم ریشه گیاهان در جذب بیش‌تر مواد غذایی از خاک کمک کرده و می‌تواند رشد گیاهان را تحریک کند (Cho et al., 2008). بیوپار به دلیل داشتن کربن آروماتیک، برای صدها تا هزاران سال در خاک پایدار می‌ماند. همچنین، به دلیل داشتن ساختمان متخلخل، سطح ویژه زیاد و انواع گروه‌های عاملی، دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی است که بر مزایای کاربرد آن در خاک می‌افزاید (Xie et al., 2022). افزودن بیوپار به خاک باعث افزایش کربن آلی، نیتروژن کل و فسفر قابل جذب (Dume et al., 2015) و پتاسیم خاک (He et al., 2017) می‌شود. در تحقیقاتی که Jones انجام دادند، گزارش شده است که در سال اول پس از کاربرد بیوپار بقایای ذرت و چمن سوئیچ، بیوپار هیچ‌گونه تأثیر معنی‌داری بر عملکرد رشدی، قدرت جوانه‌زنی بذر و کلروفیل برگ گیاه ذرت نداشت، اما پس از بررسی‌های انجام‌شده به این نتیجه رسیدند که پس از گذشت یک سال از اعمال بیوپار به خاک، عملکرد رشدی گیاه در سال دوم به



شکل ۶- مقایسه میانگین تأثیر بهسازها با سطوح مختلف بر کربن آلی خاک.

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵٪ با استفاده از آزمون توکی است.

Fig. 6- Comparison of the mean effects of soil amendments at different levels on soil organic carbon content. Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$ (Tukey's test).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد بهسازهای مورد مطالعه باعث افزایش عناصر ضروری (NPK) و کربن آلی خاک نسبت به شاهد شد. اثرگذاری این بهسازها بر اساس نوع زیست‌توده اولیه، ویژگی‌های بهسازها و سطوح کاربرد متفاوت بوده است. در بررسی عناصر NPK بهساز زیستی از نوع کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار هسته خرما اثرگذاری مطلوب‌تری نشان داد. بهسازهای زیستی تولیدشده از ساقه نخل، یعنی نانوبیوچار ساقه نخل (NBS) و کامپوزیت کیتوزان- نانوبیوچار ساقه نخل (ComS) به دلیل چوبی بودن و محتوای کربن بیشتر، در مقایسه با دیگر بهسازها در افزایش کربن آلی خاک مؤثرتر بود. در یک فراتحلیل *et al.* (2017) Jeffery گزارش کردند که در خاک‌های با حاصلخیزی زیاد، بیوچار اثر قابل‌توجهی بر عملکرد محصول ندارد ولی در خاک‌های فقیر و با حاصلخیزی کم، عملکرد محصول را افزایش می‌دهد که نشان می‌دهد کارایی بیوچار با سطح حاصلخیزی خاک در ارتباط می‌باشد و نقش آن در بهبود حاصلخیزی خاک‌های با سطح حاصلخیزی کم مؤثرتر است. به نظر می‌رسد ویژگی‌های شیمیایی بیوچار مستقیماً بر تغییرات خصوصیات خاک مؤثر است. از سویی عدم آبشویی املاح و مواد مغذی خاک با استفاده از بیوچار از عوامل مهم در بهبود وضعیت خاک و شرایط کشت برای

گیاهان است که رشد بهتر را در پی داشته‌اند، در صورتی که تمام عناصر غذایی به مقدار کافی در خاک موجود بوده و خاک حاصلخیز باشد تفاوت کمی بین تیمارهای حاوی بیوچار و نمونه شاهد مشاهده می‌شود و تفاوت‌ها در خاک‌های تخریب‌شده و کم حاصلخیز بیشتر قابل مشاهده بوده درحالی‌که در خاک‌های ضعیف تا ۱۵ درصد افزایش در عملکرد دیده شده است (Chaudhry *et al.*, 2016). بنابراین، با توجه به این که در این مطالعه از یک خاک با بافت سبک و از نظر مواد غذایی ضعیف استفاده شد، عناصر غذایی خاک تحت تأثیر بهسازهای زیستی، افزایش پیدا کرد. به عبارتی، از مهم‌ترین اثرات بهسازهای زیستی مخصوصاً در خاک‌های فقیر، افزودن ماده آلی خاک می‌باشد. افزایش مقدار ماده آلی خاک موجب بهبود ساختار خاک و در نهایت موجب افزایش توانایی خاک در حفظ و نگهداشت رطوبت و مواد غذایی می‌باشد که شرایط مطلوب‌تری را برای رویش گیاه و بهبود عملکرد محصول فراهم می‌کند. بر اساس نتایج حاصل، به نظر می‌رسد بهسازهای زیستی مورد مطالعه می‌توانند بخش قابل‌توجهی از نیاز گیاهان به عناصر غذایی را تأمین کرده و زمینه‌ساز کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی باشند. این پژوهش می‌تواند نقطه آغاز تحقیقات کاربردی در زمینه توسعه بهسازهای طبیعت‌دوست و پایدار باشد. در همین راستا، پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی بر

تخریب‌شده باشند.

سیاسگزاری

بدین‌وسیله از داوران ارجمند به جهت ارائه نظرات ارزشمند و راهگشای علمی، صمیمانه قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

¹ Soil Loss

² American society for testing and materials

³ European Biochar Certificate

References

Abbas, M., Ijaz, S. S., Ansar, M., Hussain, Q., Hassan, A., Akmal, M., Tahir, M., Iqbal, M., & Bashir, K. 2019. Impact of biochar with different organic materials on carbon fractions, aggregate size distribution, and associated polysaccharides and soil moisture retention in an arid soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(20), 626. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4792-3>

Abbasnasab, Z., Abedi, M., & Sadati, S. E. 2021. Effect of biochar on some morphological and physiological traits in *Medicago sativa* and *Bromus tomentellus*. *Plant Process and Function*, 10(41), 145-156. (In Persian with English abstract)

Adnan, M., Fahad, S., Saleem, M. H., Ali, B., Mussart, M., Ullah, R., & Marc, R. A. 2022. Comparative efficacy of phosphorus supplements with phosphate-solubilizing bacteria for optimizing wheat yield in calcareous soils. *Scientific Reports*, 12, 1-17. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16035-3>

Ahmad, M., Lee, S. S., Lee, S. E., Al-Wabel, M. I., Tsang, D. C., & Ok, Y. S. 2017. Biochar-induced changes in soil properties affected immobilization/mobilization of metals/metalloids in contaminated soils. *Journal of soils and sediments*, 17, 717-730. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1339-4>

Ahmad Yousefi, M., Kamkar, B., Amiri Nezhad, M., & Gharekhloo, J. 2019. Assessment of the effect of different chemical fertilizers, biochar, and *Trichoderma* fungi treatments at mother plant on germination and other hybrid corn KSC 704 seed germination components in maternal growth under accelerated aging test. *Iranian Journal of Seed Sciences and Research*, 6(1), 133-144. (In Persian) <https://doi.org/10.22124/jms.2019.3593>

Albuquerque, J. N., Calero, J. M., Barrón, V., Torrent, J., Campillo, M. C. D., Gallardo, A., & Villar, R. 2014. Effects of biochars produced from different

محورهای زیر متمرکز شوند: ارزیابی بلندمدت پایداری اثرات بهسازها، آزمون‌های میدانی در شرایط واقعی کشت، بهینه‌سازی دوز و فرمولاسیون، بررسی تعامل با میکروارگانیسم‌های مفید خاک، تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی در مقایسه با کودهای شیمیایی، بهره‌گیری از منابع زیست‌توده محلی برای تولید بهسازهای مقرون‌به‌صرفه و بررسی نقش این مواد در افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی. این اقدامات می‌توانند گامی مؤثر در جهت توسعه کشاورزی پایدار و احیای خاک‌های

منابع

feedstocks on soil properties and sunflower growth. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(1), 16-25. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200652>

Asadullah, M., Rahman, M. A., Ali, M. M., Rahman, M. S., Motin, M. A., Sultan, M. B., & Alam, M. R. 2007. Production of bio-oil from fixed-bed pyrolysis of bagasse. *Fuel*, 86(16), 2514-2520. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.02.007>

Battikha, A. A., Abdelaal, H., Abdalla, A., & Ebraheem, H. H. 2023. Influence of nano particles of chitosan with 15% nano nitrogen on growth, yield, and quality of faba bean. *Journal of Environmental Studies and Research*, 10, 1360-1370. <https://doi.org/10.21608/jesr.2023.287069>

Becker, T., Schlaak, M., & Strasdeit, H. 2000. Adsorption of nickel (II), zinc (II), and cadmium (II) by new chitosan derivatives. *Reactive and Functional Polymers*, 44(3), 289-298. [https://doi.org/10.1016/S1381-5148\(99\)00104-2](https://doi.org/10.1016/S1381-5148(99)00104-2)

Chan, K., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., & Joseph, S. 2008. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Soil Research*, 45(8), 629-634. <https://doi.org/10.1071/SR07109>

Chaudhry, U. K., Shahzad, S., Naqqash, M. N., Saboor, A., Yaqoob, S., Abbas, M. S. & Saeed, F., 2016. Integration of biochar and chemical fertilizer to enhance the quality of soil and wheat crop (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 9(1), 348-358. <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.1631v1>

Chausali, N., Saxena, J., & Prasad, R. 2021. Nanobiochar and biochar-based nanocomposites: Advances and applications. *Journal of Agriculture and Food Research*, 5, 100191. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100191>

Cho, M.H., No, H.K., & Prinyawiwatkul, W. 2008.

- Chitosan treatments affect growth and selected quality of sunflower sprouts. *Journal of Food Science*, 73(1), S70–S77. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00607.x>
- Claoston N., Samsuri AW., Ahmad Husni MH., & Mohammad AMS. 2014. Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of empty fruit bunch and rice husk biochars. *Waste management and research*, 32(4), 331-339. <https://doi.org/10.1177/0734242X14525822>
- Clough, T. J., & Condon, L. M. 2010. Biochar and the nitrogen cycle: Introduction. *Journal of Environmental Quality*, 39, 1218–1223. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0204>
- Courtney, R. G., & Mullen, G. J. 2008. Soil quality and barley growth as influenced by the land application of two compost types. *Bioresource Technology*, 99, 2913–2918. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.034>
- Cui, H., Ou, Y., Wang, L., Yan, B., Li, Y., & Ding, D. 2020. The passivation effect of heavy metals during biochar-amended composting: Emphasize on bacterial communities. *Waste Management*, 118, 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.043>
- Deepmala, K., Hemantaranjan, A., Bharti, S., & Nishant Bhanu, A. 2014. A Future Perspective in Crop Protection: Chitosan and its Oligosaccharides. *Advances in Plants and Agriculture Research*, 1(1), 23-30. <https://doi.org/10.15406/apar.2014.01.00006>
- Dume, B., Berecha, G., & Tulu, S. 2015. Characterization of biochar produced at different temperatures and its effect on acidic nitosol of Jimma, southwest Ethiopia. *International Journal of Soil Science*, 10(2), 63-73. <https://doi.org/10.3923/ijss.2015.63.73>
- Frene, J. P., Frazier, M., Liu, S., Clark, B., Parker, M., & Gardner, T. 2021. Early effect of pine biochar on peach-tree planting on microbial community composition and enzymatic activity. *Applied Sciences*, 11(4), 1473. <https://doi.org/10.3390/app11041473>
- Gao, L., Wang, R., Shen, G. M., Zhang, J. X., Meng, G. X., & Zhang, J. 2017. Effects of biochar on nutrients and the microbial community structure of tobacco-planting soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(4), 884–896. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017000400004>
- Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Khodaei-Joghan, A., Dolatabadian, A., Zakikhani, H., & Farmanbar, E. 2013. Zeolite-amended cattle manure effects on sunflower yield, seed quality, water use efficiency, and nutrient leaching. *Soil and Tillage Research*, 126, 193–202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.08.00>
- Gholami Ganjeh, S., & Salehi, A. 2015. Effects of different levels of vermicompost and biofertilizers on essential oil content and uptake of some elements in cumin (*Cuminum cyminum* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 31(5), 822-830. (In Persian) <http://dx.doi.org/10.22092/ijmapr.2015.103618>
- Ghormade, V., Deshpande, M. V., & Paknikar, K. M. 2011. Perspectives for nanobiotechnology-enabled protection and nutrition of plants. *Biotechnology Advances*, 29, 792–803. <https://doi.org/10.1038/srep46032>
- Glaser, B.; Lehmann, J., & Zech, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biology and fertility of soils*, 35, 219-30. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>
- Giroto, A. S., Guimarães, G. G. F., Foschini, M., & Ribeiro, C. (2017). Role of slow-release nanocomposite fertilizers on nitrogen and phosphate availability in soil. *Scientific Reports*, 7, 46032. <https://doi.org/10.1038/srep46032>
- Han, G., Chen, Q., Zhang, S., Li, G., Yi, X., Feng, C., Wang, X., Yu, C., & Lan, J. 2019. Biochar effects on bacterial community and metabolic pathways in continuously cotton-cropped soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19, 249–261. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0014-z>
- Hosseinzadeh, M. H., Ghalavand, A., Mashhadi Akbar Boojari, M., Modarres-Sanavy, S. A. M., & Mokhtassi-Bidgoli, A. 2020. Effect of deficit irrigation, mycorrhiza, and nitrogen nutrition system on some chemical properties of soil, oil content, and biological yield of purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Iranian Journal of Field Crops Science*, 51(2), 29-48. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2019.267828.654535>
- Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A. C., Van Groenigen, J. W., & Hungate, B. A. 2023. Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters*, 12(5), 053001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa67bd>
- Jiang, Z., Lian, F., Wang, Z., & Xing, B. 2020. The role of biochars in sustainable crop production and soil resiliency. *Journal of Experimental Botany*, 71(2), 520-542. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz301>
- Jones, D. L., Murphy, D. V., Khalid, M., Ahmad, W., Edwards-Jones, G., & DeLuca, T. H. 2011. Short-term biochar-induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(8), 1723–1731. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.018>
- Khan, J., Saeed, I., Fayaz, M., Zada, M., & Jan, D. 2023. Perceived overqualification? Examining its nexus with cyberloafing and knowledge hiding behaviour: Harmonious passion as a moderator. *Journal of Knowledge Management*, 27, 460–484. <https://doi.org/10.1108/JKM-09-2021-0700>

- Lehmann, J., da Silva Jr., J. P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., & Glaser, B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure, and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249(2), 343–357. <https://doi.org/10.1023/A:1022833116184>
- Lu, X., Vitousek, P. M., Mao, Q., Gilliam, F. S., Luo, Y., Turner, B. L., & Mo, J. 2021. Nitrogen deposition accelerates soil carbon sequestration in tropical forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(16), 1–7. <https://doi.org/10.1073/pnas.2020790118>
- Mahmood, F., Khan, I., Ashraf, U., Shahzad, T., Hussain, S., Shahid, M., Abid, M., & Ullah, S. 2017. Effects of organic and inorganic manures on maize and their residual impact on soil physio-chemical properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(1), 22–32. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000002>
- Mahmoodian Choplou, A., Niknahad Gharmakher, H., & Yousefi, H. 2020. Biochar production from peach trees pruned foliage and its qualitative properties at different temperatures. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(3), 105–124. (In Persian with English abstract) <http://dx.doi.org/10.22069/jwsc.2020.17476.3294>
- Mastronardi, E., Tsae, P., Zhang, X., Monreal, C., & DeRosa, M.C. 2015. Strategic Role of Nanotechnology in Fertilizers: Potential and Limitations. In: Rai, M., Ribeiro, C., Mattoso, L., Duran, N. (eds) *Nanotechnologies in Food and Agriculture*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14024-7_2
- Masulili, A., Utomo, W. H., & Syechfani, M. 2010. Rice husk biochar for rice-based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia. *Journal of Agricultural Science*, 2(1), 39–47. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v2n1p39>
- Mengistu, T., Gebrekidan, H., Kibret, K. W., Oldetsadik, K., Shimelis, B., & Yadav, H. 2017. The integrated use of excreta-based vermicompost and inorganic NP fertilizer on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit yield, quality and soil fertility. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6, 63–77. <https://doi.org/10.1007/s40093-017-0153-y>
- Moharami, S. 2024. Effect of pH and Ionic Strength on the Removal Phosphorus Efficiency from Aqueous Solution Using Modified Mineral Adsorbents. *Environment and Water Engineering*, 10(1), 18–36. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.377337.1834>
- Moradi, N., Rasouli-Sadaghiani, M., & Sepehr, E. 2017. Effect of biochar types and rates on some soil properties and nutrients availability in a calcareous soil. *Water and Soil*, 31(4), 1232–1246. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i4.61298>
- Moradi, N., & Karimi, A. 2021. Fe-Modified common reed biochar reduced cadmium (Cd) mobility and enhanced microbial activity in a contaminated calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(1), 329–340. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00363-2>
- Mondal, M. A., Malek, M. A., Puteh, A. B., Ismail, M. R., Ashrafuzzaman, M., & Naher, L. 2012. Effect of foliar application of chitosan on growth and yield in okra. *Australian Journal of Crop Science*, 6(5), 918–921.
- Moshtagh, R., Moradi, N., & Gholami, H. 2023. The effect of using two types of agricultural and marine waste biochar on some characteristics of sandy soil. *Iranian Scientific Association of Desert Management and Control*, 10(4), 81–92. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22034/jdmal.2022.563479.1398>
- Munda, S., Bhaduri, D., Mohanty, S., Chatterjee, D., Tripathi, R., Shahid, M., Kumar, U., Bhattacharyya, P., Kumar, A., Adak, T., & Jangde, H. K. 2018. Dynamics of soil organic carbon mineralization and C fractions in paddy soil on application of rice husk biochar. *Biomass and Bioenergy*, 115, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.002>
- Muhammad, N., Aziz, R., Brookes, P. C., & Xu, J. 2017. Impact of wheat straw biochar on yield of rice and some properties of Psammaquent and Plinthudult. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(3), 808–823. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017000300019>
- Nigussie, A., Kissi, E., Misganaw, M., & Ambaw, G. 2012. Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of lettuces (*Lactuca sativa*) grown in chromium polluted soils. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 12, 369–376. <http://10.1405.162/handle/123456789/2246>
- Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., & Paruelo, J. M. 2006. Carbon sequestration in semi-arid rangelands: comparison of *Pinus ponderosa* plantations and grazing exclusion in NW Patagonia. *Journal of Arid Environments*, 67(1), 142–156. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.12.008>
- Novak JM., Busscher WJ., Watts DW., Amonette J., Ippolito JA., Lima IM., Gaskin J., Das KC., Steiner C., & Ahmedna M. 2012. Biochars impact on soil moisture storage in an Ultisol and two Aridisols. *Soil Science*, 177, 310–320. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31824e5593>
- Olsen, S.R., & Sommers, L.E. 1990. Phosphorus. 403–431. In: A.L. Page (ed), *Method of soil analysis*. Part 2.
- Plaza, C., Courtier-Murias, D., Fernández, JM.,

- Polo, A., & Simpson A.J. 2013. Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: a central role for microbes and microbial by-products in C sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.07.026>
- Ramzani, P. M. A., Shan, L., Anjum, S., Ronggui, H., Iqbal, M., Virk, Z. A., & Kausar, S. 2017. Improved quinoa growth, physiological response, and seed nutritional quality in three soils having different stresses by the application of acidified biochar and compost. *Plant Physiology and Biochemistry*, 116, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.05.003>
- Raza, M. A. S., Ibrahim, M. A., Ditta, A., Iqbal, R., Aslam, M. U., Muhammad, F., ... & Elshikh, M. S. 2023. Exploring the recuperative potential of brassinosteroids and nano-biochar on growth, physiology, and yield of wheat under drought stress. *Scientific Reports*, 13(1), 15015. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42007-2>
- Sadeghi, SHR. Hazbavi, Z., & Kiani Harchegani, M. 2016. Controllability of runoff and soil loss from small plots treated by vinasse-produced biochar. *Science of the Total Environment*, 541, 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.068>
- Sahin, O., Taskin, M. B., Kaya, E. C., Atakol, O., Emir, E., Inal, A., & Gunes, A. 2017. Effect of acid modification of biochar on nutrient availability and maize growth in a calcareous soil. *Soil Use and Management*, 33(3), 447–456. <https://doi.org/10.1111/sum.12360>
- Salem, T. S. A., Elskhariy, E. M., Zayed, A. M., Mohamed, A. I., & Mahgoub, N. A. 2024. Nano-chitosan-loaded N application for improving wheat plants' yield: Impacts on soil nutrient availability. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 13, 384–395. <https://doi.org/10.4236/jacen.2024.134026>
- Santra, P., Moharana, P. C., Kumar, M., Soni, M. L., Pandey, C. B., Chaudhari, S. K., & Sikka, A. K. 2017. Crop production and economic loss due to wind erosion in hot arid ecosystem of India. *Journal of Aeolian Research*, 28, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2017.07.009>
- Shokuhifar, Y., Ghahsareh, A. M., Shahbazi, K., Tehrani, M. M., & Besharati, H. 2023. Biochar and wheat straw affecting soil chemistry and microbial biomass carbon countrywide. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(6), 5407–5417. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01471-4>
- Sarfraz, R., Hussain, A., Sabir, A., Fekih, I. B., Ditta, A., & Xing, S. 2019. Role of biochar and plant growth promoting rhizobacteria to enhance soil carbon sequestration—a review. *Environmental Monitoring & Assessment*, 191(4), 251. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7400-9>
- Singh, B., & Cowie, A. 2014. Long-term influence of biochar on native organic carbon mineralisation in a low-carbon clayey soil. *Scientific Reports*, 4, 3687. <https://doi.org/10.1038/srep03687>
- Sun, Y., Gao, B., Yao, Y., Fang, J., Zhang, M., Zhou, Y., Chen, H., & Yang, L. 2014. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. *Chemical engineering journal*, 240, 574–578. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2013.10.081>
- Sun, Y., Wang, T., Sun, X., Bai, L., Han, C., & Zhang, P. 2021. The potential of biochar and lignin-based adsorbents for wastewater treatment: Comparison, mechanism, and application—A review. *Industrial Crops and Products*, 166, 113473. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113473>
- Taskin, M. B., Kadioglu, Y. K., Sahin, O., Inal, A., & Gunes, A. 2019. Effect of Acid-Modified Biochar on the Growth and Essential and Non-Essential Element Content of Bean, Chickpea, Soybean, and Maize Grown in Calcareous Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50 (13): 1604–1613 <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1631326>
- Takiguchi, Y. 1991. Chitosan-Jikken Manual, Advances in chitin science, Proceedings from the Asia-Pacific. In: Chen R.H. and Chen H. C. (ed) Physical properties of chitinous material Chitin, Gihodou Shupan Kabushki Kaisha, Japan, pp.1-7.
- Tsai, W. T., Liu, S. C., & Hsieh, C. H. 2012. Preparation and fuel properties of biochars from the pyrolysis of exhausted coffee residue. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 93, 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.09.010>
- Ullah, N., Ditta, A., Khalid, A., Mehmood, S., Rizwan, M. S., Ashraf, M., & Iqbal, M. M. 2019. Integrated effect of algal biochar and plant growth-promoting rhizobacteria on physiology and growth of maize under deficit irrigations. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 346–356. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00112-0>
- Wang, Y., Hu, Y., Zhao, X., Wang, S., & Xing, G. 2013. Comparisons of biochar properties from wood material and crop residues at different temperatures and residence times. *Energy & fuels*, 27(10), 5890–5899.
- Yu, K. L., Lau, B. F., Show, P. L., Ong, H. C., Ling, T. C., Chen, W. H., Poh, N. E., & Chang, J. S. 2017. Recent developments on algal biochar production and characterization. *Bioresource Technology*, 246, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.009>
- Yousefzadeh, S., Modarres-Sanavy, S. A. M., & Baghbani-Arani, A. 2015. Effect of biofertilizers, azocompost and nitrogen on the soil properties and yield of essential oil of *Dracocephalum moldavica* L. *Journal of Agroecology*, 2(5), 37–50. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2013.2867>

- Xie, Y., Wang, L., Li, H., Westholm, L.J., Carvalho, L., Thorin, E., Yu, Z., Yu, X., & Skreiberg, O. 2022. A critical review on production, modification and utilization of biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 161, 105405. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105405>
- Zafar, M., Ahmed, S., Munir, M. K., Zafar, N., Saqib, M., Sarwar, M. A., & Gulnaz, A. 2023. Application of zinc, iron, and boron enhances productivity and grain biofortification of mungbean. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 92, 983–999. <https://doi.org/10.32604/phyton.2023.025813>
- Zazouli, M. A., Bagheri, M., Ghahramani, E., & Ghorbanian, M. 2009. *Compost Production Technology*. 1th ed. Tehran: Khaniran; p. 65-72. [in Persian]
- Zhang, A. P., Liu, R. L., Gao, J., Zhang, Q. W., Xiao, J. N., Chen, Z., Yang, S. Q., Hui, J. Z., & Yang, L. Z. 2014. Effects of biochar on nitrogen losses and rice yield in anthropogenic alluvial soil irrigated with Yellow River water. *Journal of Agro-Environment Science*, 33(12), 2395-2403.
- Zhang, Y., Wang, S., Wang, H., Wang, R., Wang, X., & Li, J. 2018. Crop yield and soil properties of dryland winter wheat-spring maize rotation in response to 10-year fertilization and conservation tillage practices on the Loess Plateau. *Field Crops Research*, 225, 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.07.003>
- Zhang, X., Qu, J., Li, H., La, S., Tian, Y., & Gao, L. 2020. Biochar addition combined with daily fertigation improves overall soil quality and enhances water-fertilizer productivity of cucumber in alkaline soils of a semi-arid region. *Geoderma*, 363(1), 114170. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114170>
- Zhou, Y., Gao, B., Zimmerman, A.R., Fang, J., Sun, Y., & Cao, X. 2013. Sorption of heavy metals on chitosan-modified biochars and its biological effects. *Chemical Engineering Journal*, 231, 512-518. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.07.036>
- Zolfi Bavariani, M., Ronaghi, A., Karimian, N., Yasrebi, J., & Ghasemi, R. 2017. Influence of biochars prepared from poultry manure on phosphorus availability and recovery in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil Science*, 21, 23–35. (In Persian) <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.21.1.23>



*This page is intentionally
left blank.*