The effects of biochar-based modifiers on continuous nitrate leaching from urea fertilizer in soils with different textures

Sanaz Dadashi*, Mehdi Ghajar, Fardin Sadeghzadeh and Mohammad Ali Bahmanyar

Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
* Corresponding author, Email: Sanaz.dadshi@gmail.com

(Received: 21 July 2025; Revised: 20 September 2025; Accepted: 30 September 2025)

ABSTRACT

Background and Objectives: Nitrogen deficiency is a major limiting factor for plant growth. Although the use of urea fertilizer can compensate for this deficiency, its excessive application often results in nitrate leaching and contamination of surface and groundwater resources. Accordingly, this study aimed to evaluate the effectiveness of metal-modified biochars in reducing nitrate leaching from urea fertilizer in soils with different textures, providing a sustainable approach for environmental protection and improved soil management.

Materials and Methods: Biochar was produced from rice straw through pyrolysis at 350 °C and subsequently coated with iron, zinc, and copper. In addition, carbon–metal composites were synthesized by directly combining rice straw with these metals followed by pyrolysis. The performance of these amendments in reducing nitrate leaching was tested in three soil types—sandy clay loam, clay loam, and clay—under continuous irrigation with urea application. Nitrate concentrations in the leachates were determined spectrophotometrically.

Findings: Results indicated that soil texture had no significant effect on nitrate leaching, whereas metal modification of biochar exerted a pronounced impact. Among the treatments, copper-coated biochar showed the highest efficiency, reducing nitrate concentration to 21.79 mg L^{-1} compared to 187 mg L^{-1} in the control. Spectroscopic analyses confirmed the structural modifications induced by metal coatings.

Conclusion: The findings highlight that metal-modified biochars, particularly copper-coated biochar, can serve as effective tools to reduce nitrate leaching and prevent groundwater contamination. This technology offers strong potential as a key strategy for sustainable agriculture and for preserving soil and environmental health.

Keywords: Soil pollution, metal coating, surface adsorption, composite, sustainable agriculture.

How to Cite: Shirmardi, M., Hayatzadeh, M., Ghaneei-Bafghi, M.J., Hemmat, N., Fooladi Doghzloo, M., 2025. Soil fertility assessment in saffron (*Crocus sativus* L.) cultivated fields (case study: Bahabad city, Yazd province). J. Soil Plant Interact. 16(3), 1–17 (In Persian). https://doi.org/10.47176/jspi.16.3.20351

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-10]

تأثیر بایوچار با پوشش های مختلف سطحی بر آبشویی نیترات حاصل از کود اوره، در سه خاک لوم رسی شنی، لوم رسی و رسی

ساناز داداشی، مهدی قاجار سپانلو، فردین صادق زاده و محمدعلی بهمنیار

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

***نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: sanaz.dadashy@gmail.com**

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۸)

نسخه پیش از انتشار

چکیده

مقدمه و اهداف: کمبود نیتروژن یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد گیاهان است. هرچند کاربرد کود اوره می‌تواند این کمبود را جبران کند، اما کاربرد بیش از حد آن پیامدهای جدی همچون آبشویی نیترات و آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی را به دنبال دارد. از این رو، در پژوهش حاضر، به‌منظور ارائه راهکاری پایدار برای کاهش خطرات زیست‌محیطی شستشوی نیترات و بهبود مدیریت خاک، کارایی بیوچارهای اصلاح‌شده با فلزات مختلف، در کاهش آبشویی نیترات ناشی از کود اوره در خاک‌هایی با بافت متفاوت، مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: بیوچار مورد استفاده از کاه برنج طی فرایند پیرولیز در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد تهیه و سپس با فلزات آهن، روی و مس پوشش داده شد. علاوه بر این، به منظور تهیه کامپوزیت‌های کربن– فلز نیز، کاه برنج با این فلزات پوشش داده شد و سپس فرایند پیرولیز ثانویه بر روی آن‌ها صورت پذیرفت. عملکرد این مواد در کاهش آبشویی نیترات ناشی از کود اوره، در سه نوع خاک با بافت لوم رسی شنی، لوم رسی و رسی، تحت شرایط آبیاری پیوسته، با اندازه گیری غلظت نیترات در زهاب این خاک ها به روش اسپکتروفتومتری بررسی گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که نوع خاک تفاوت معناداری در میزان آبشویی ایجاد نکرد، در حالی که اصلاح بیوچار با فلزات نقش چشمگیری در کاهش نیترات داشت. از میان تیمارها، بیوچار با پوشش مس، بیشترین اثر را نشان داد و غلظت نیترات را به ۲۱/۷۹ (mgL^{-1}) کاهش داد که نسبت به تیمار شاهد با ۱۸۷(mgL^{-1})، تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشت. تحلیل‌های طیف‌سنجی نیز تغییرات ساختاری ناشی از پوشش‌دهی فلزی را تأیید کردند.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها بیانگر آن است که بیوچارهای اصلاح‌شده با فلزات، به‌ویژه نمونه پوشش‌دار با مس، می‌توانند رویکردی کارآمد برای کاهش آبشویی نیترات و جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی باشند. این فناوری ظرفیت بالایی برای به‌کارگیری در مدیریت پایدار کشاورزی و حفظ کیفیت خاک و محیط‌زیست دارد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، پوشش فلزی، جذب سطحی، کامپوزیت، کشاورزی پایدار.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-10]

۱- مقدمه

کمبود عنصر نیتروژن مهمترین عامل محدودکننده رشد در تمام ا کوسیستم‌های خشکی می‌باشد که به طور جدی میزان عملکرد و تولید گیاهان زراعی را متأثر می‌سازد. از این رو استفاده از کود-های شیمیایی یکی از کلیدی‌ترین عملیات کشاورزی می‌باشد. (Dawer et al., 2021).

استفاده از کودهای نیتروژنه، شایع‌ترین و مؤثرترین روش تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاه می‌باشد. اوره یک کود نیتروژنه جامد می‌باشد که به دلایل ویژگی‌هایی مثل درصد نیتروژن بالا (۴۶ ٪)، پایداری شیمیایی و قیمت پایین آن، بازار کودهای شیمیایی حاوی نیتروژن را تسخیر کرده است. اوره در خاک با استفاده از فرایندهای بیولوژیکی به نیترات (NO_3^-) تبدیل می‌شود (نیتریفیکاسیون) (Zaman et al., 2009). به علت حلالیت بالای نیترات، آلودگی به این آنیون تقریبا در تمامی عرصه‌های منابع آب مشاهده شده است که می‌تواند منجر به تهدیدات جدی برای محیط زیست و سلامت انسان به شمار آید (Long et al., 2018). علاوه بر مشکل غنی شدن دریاچه‌ها وجود یون نیترات می‌تواند مشکلات عمده‌ای را برای انسان ایجاد کند. از جمله: بروز عارضه مت‌هموگلوبین در کودکان که به عنوان سندروم [1]کبود بچه نیز شناخته می‌شود، تشکیل ترکیبی به نام نیتروزآمین در بدن انسان که می‌تواند به عنوان یک ماده سرطان‌زا عمل کند و این که یون نیترات می‌تواند منجر به کاهش تامین اکسیژن برای سلول‌های بدن انسان گردد (Long et al., 2018). از این رو استانداردهای سخت‌گیرانه‌ای برای غلظت مجاز نیترات در آب تعیین شده است. سازمان جهانی بهداشت حد مجاز غلظت نیترات را ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در آب آشامیدنی در نظر گرفته است (Zhao et al., 2022). از بین روش‌های مختلف ارائه شده، جذب ترکیبات آلاینده به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی مثل راندمان بالای حذف مواد آلاینده و فرایندهای دوست‌دار محیط زیست، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. از بین مواد مختلفی که به عنوان ماده جاذب مواد آلاینده مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ترکیبات کربن دار مورد توجه بیشتری واقع شده‌اند

بایوچار به علت بار سطحی منفی، ظرفیت نگهداری بالایی برای آلاینده‌های کاتیونی دارد ولی در مورد نیترات به دلیل آنیون بودن آن، نیاز است که بایوچار اصلاح گردد تا ظرفیت جذب افزایش یابد. امروزه از بایوچارهای دارای پوشش سطحی و همچنین کامپوزیت‌ها برای جذب آلاینده‌های آنیونی استفاده می-شود ولی در مورد نیترات کاربرد کامپوزیت‌های مذکور به خوبی مطالعه نشده است.

استفاده از بایوچار به عنوان یک ماده بهساز خاک، علاوه بر اینکه راه مناسبی برای بازیافت انواع بقایای آلی محسوب می‌شود، می‌تواند نقش مهمی در بهبود سلامت خاک، افزایش عملکرد گیاه و ترسیب کربن داشته باشد (Diatta et al., 2020). مطالعات زیادی در زمینه استفاده همزمان انواع بایوچار به همراه کودهای معدنی انجام شده است. این موضوع می‌تواند منجر به کند شدن رهاسازی عناصر غذایی در خاک شده و کارایی جذب آنها را در شرایط مختلف خاک افزایش دهد. همچنین بایوچار می‌تواند با جذب یون‌های آمونیوم و گاز آمونیاک، میزان تصعید این گاز را از خاک کاهش دهد (Zhang et al., 2017). از بین ترکیبات آلاینده، حذف و بی‌خطرسازی یون نیترات به علت حلالیت بالای آن چالش برانگیز است. این در حالی است که در مورد سایر آنیون‌ها، مثل فسفات، تثبیت و غیرمتحرک‌سازی آن، به راحتی و با واکنش با یون‌های فلزی بر روی سطح بایوچار، قابل انجام است. در مورد نیترات واکنش‌های شیمیایی اندکی برای غیرمتحرک‌سازی آن قابل انجام است. در مطالعه‌ای اثرات ۴ ترکیب مختلف بایوچار، بر میزان آبشویی نیترات در سه نوع خاک با بافتهای مختلف بررسی گردید. نتایج نشان داد که در خاک با بافت لوم رسی میزان آبشویی نیترات با کاربرد انواع مختلف بایوچار با منشأ کلش برنج، کود دامی، کود مرغی و بقایای ذرت تفاوت معنی داری را نشان نداد. در حالی که بیشترین میزان آبشویی نیترات در خاک با بافت لوم و با تیمار با بیوچار با منشا کود مرغی ثبت گردید. در خاک های با بافت لوم شنی نیز کاربرد

1. Blue Baby

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-10]

۲/۵ تا ۵ تن بر هکتار بیوچار با منشا کلش برنج و ۷/۵ تن بر هکتار با منشا کود دامی، کمترین میزان آبشویی را نشان داد. در حالی که در خاک های با بافت متوسط، کاربرد ۲/۵ ، ۵ و ۷/۵ تن بر هکتار بیوچار با منشا کود دامی و ۲/۵ تن بر هکتار بیوچار با منشا کلش برنج، بیشترین میزان کاهش نیترات را نشان دادند (Solomon et al., 2022). آهن یکی از متداول‌ترین عناصر مورد استفاده جهت بهبود ظرفیت جذب نیترات و فرآیندهای کاهش‌دهنده بیوشیمیایی بیوچار است. در همین رابطه در مطالعه دیگری بررسی کاربرد بیوچار بامبو اصلاح‌شده با اکسید آهن نشان داد که بیوچار غنی شده با آهن، دارای ظرفیت جذب نیترات به‌مراتب بالاتری نسبت به بیوچار خام است. این بهبود به دلیل حضور نانوذرات Fe_2O_3 بر سطح بیوچار و افزایش نقاط تبادل یونی فعال بود. همچنین، اصلاح با آهن باعث مغناطیسی شدن بیوچار شده که بازیابی آن در سیستم‌های آبی را تسهیل می‌کند (Viglašová et al., 2020). بیوچار اصلاح‌شده با مس، عمدتاً با هدف تقویت دنیتریفیکاسیون و تعاملات میکروبی به‌کار می‌رود. در پژوهشی بیوچار تولید شده از کود دامی غنی شده با نانوذرات اکسید مس (CuO) به خاک‌های تخریب‌شده‌ی زیر کشت گندم، اضافه گردید. ترکیب CuO بیوچار، باعث کاهش نشت نیترات به میزان حدود ۶۰٪ شد. همچنین بیوماس گیاهی، جذب نیتروژن و فعالیت میکروبی خاک را بهبود داد. در این پژوهش، عملکرد مثبت مس به تعدیل جامعه میکروبی خاک و ارتقاء جذب نیتروژن توسط گیاه نسبت داده‌شد (Shahzad et al., 2023).

در حال حاضر مشکلات زیست محیطی از جمله گازهای گلخانه‌ای و گرمایش زمین، سطح بالای عناصر غذایی از جمله نیتروژن در آب‌های سطحی و زیرسطحی و پدیده غنی شدن دریاچه‌ها، لزوم توجه به ارائه راهکارهای موثر برای حل این مسائل را مطرح می‌کند. ضرورت حذف نیترات به عنوان یک عامل آلاینده آب‌های زیرزمینی که منجر به بروز مشکلات متعدد زیست محیطی شده و تهدیدات عدیده‌ای را برای سلامت انسانها در پی دارد، انجام مطالعات در این زمینه را ایجاب می‌کند. افزودن بایوچار به خاک به عنوان یکی از راهکارهای موثر جهت کاهش آزاد شدن گازهای گلخانه‌ای، کمک به فرایند ترسیب کربن و کاهش آبشویی مواد غذایی از خاک مطرح شده است. در همین رابطه استفاده از اصلاح‌کننده‌های مبتنی بر بیوچار، به ویژه انواع پوشش‌دار با فلزات (آهن، روی و مس)، می‌تواند به طور معنی‌داری میزان آبشویی نیترات ناشی از مصرف کود اوره را در خاک‌های با بافت‌های مختلف و تحت شرایط آبشویی پیوسته، کاهش دهد. درحالی که اکثر مطالعات پیشین بر کاربرد بیوچار خام و یا اصلاح شده با مواد معدنی تمرکز داشته اند، در این پژوهش با استفاده از بیوچارهای با پوشش فلزی و نیز کامپوزیت‌های کربن و فلز، رویکردی تازه برای کاهش آبشویی ناشی از کود اوره ارائه می‌دهد. همچنین ارزیابی این اصلاح کننده‌ها در خاک‌هایی با بافت‌های متفاوت و تحت شرایط آبیاری پیوسته، نوآوری دیگری است که در این پژوهش ارائه شده است. لذا در این مطالعه اثرات سه نوع کامپوزیت کاه برنج شامل: کامپوزیت کاه برنج با آهن، کامپوزیت کاه برنج با مس و کامپوزیت کاه برنج با روی، همچنین سه نوع بایوچار با پوشش فلز شامل: بایوچار با پوشش آهن، بایوچار با پوشش مس و بایوچار با پوشش روی در میزان حذف نیترات از خاک بررسی شد.

روش کار

تهیه بیوچار

برای تولید بیوچار، از کلش برنج به عنوان ماده اولیه استفاده شد. فرآیند پیرولیز با استفاده از کوره ویژه طراحی شده برای این امر در محل آزمایشگاه تحقیقاتی گروه علوم خاک دانشگاه کشاورزی ومنابع طبیعی ساری انجام شد. به این صورت که کلش برنج پس از شستشوی اولیه با آب مقطر، هواخشک شده و سپس درون محفظه ویژه دستگاه قرار گرفته و به منظور به حداقل رساندن حضور اکسیژن با چندلایه محافظ مقاوم به حرارت پوشیده می شود سپس به صورت تدریجی دما به ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته تا حداکثر ویژگی‌های مطلوب حاصل شود. نمونه-های مواد خام درون کوره قرار داده شده و تا رسیدن به دمای

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-10]

۳۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت دیدند و به مدت ۳ ساعت در این دما نگهداری شدند. پس از اتمام فرآیند پیرولیز، نمونه‌ها با آب مقطر شستشو داده شده و تا اندازه ذرات ۰/۵ تا ۱ میلی‌متر آسیاب شدند(Lehmann, 2007) . ساختار اولیه بیوچار از نظر گروه‌های عاملی تشکیل‌دهنده با استفاده از دستگاه FTIR مورد بررسی قرار گرفت. طیف‌سنجی در محدوده طول موج ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ سانتی‌متر (Cm^{-1}) انجام شد.

تهیه بیوچار با پوشش سطحی فلزات (آهن، روی و مس)

بیوچار حاصل از کاه برنج به منظور شستشوی املاح اضافی چندین بار با آب مقطر به نسبت ۱:۲۰ (۱ گرم بیوچار در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر) شسته شد و سپس در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. بیوچارهای شسته‌شده با نسبت ۱:۵۰ (۱ گرم بیوچار در ۵۰ میلی‌لیتر محلول فلز) با محلول‌های سولفات آهن، سولفات روی و سولفات مس با غلظت ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (mgL^{-1}) ، ترکیب شده و به مدت ۲۴ ساعت تحت هم‌زدن قرار گرفتند (Omiri et al., 2022). پس از فیلتراسیون، بیوچارها در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و برای انجام آزمایش‌های بعدی ذخیره شدند.

تهیه کامپوزیت کربن- فلز

ابتدا کاه برنج خردشده از الک با قطر ۲ میلی متر (mm) عبور داده شد و سپس در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید. کاه برنج به نسبت ۱:۵۰ (۱ گرم کاه برنج در ۵۰ میلی‌لیتر محلول فلز) با محلول‌های سولفات آهن، سولفات روی و سولفات مس با غلظت ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (mgL^{-1}) ترکیب شده و به مدت ۲۴ ساعت هم‌زده شد. پس از فیلتراسیون، نمونه‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. سپس نمونه‌ها در کوره با دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت قرار گرفتند تا به کامپوزیت تبدیل شوند (Hasan et al., 2024; Haghighi et al., 2022).

انکوباسیون

برای فعال‌سازی میکروارگانیسم‌های خاک، هر یک از نمونه‌های خاک و مواد بهساز به میزان ۴۰ درصد از ظرفیت نگهداشت رطوبت مرطوب شده و به مدت یک هفته در دمای محیط نگهداری شدند. پس از این مدت، هر نمونه خاک با اوره به میزان معادل کود مصرفی در مزارع کشاورزی (۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار) مخلوط شد. سپس رطوبت ستون‌های خاک به ۶۰ درصد رسانده شده و به مدت ۳ هفته در این شرایط نگهداری شدند. این میزان رطوبت بهینه برای انجام فرآیند نیتریفیکاسیون در نظر گرفته شد.

آماده‌سازی نمونه‌های خاک

هر یک از نمونه‌های خاک با بافت‌های سبک(SCL) ، متوسط(CL) و سنگین (C) با تیمارهای مختلف شامل کاه برنج، بیوچار کاه برنج، بیوچار غنی‌شده با آهن، بیوچار با پوشش مس، بیوچار با پوشش روی، کامپوزیت کاه برنج و آهن، کامپوزیت کاه برنج و مس، و کامپوزیت کاه برنج و روی به میزان ۱ درصد وزنی مخلوط شده و درون سیلندرهای پلاستیکی به قطر ۱۰ سانتی‌متر (cm) و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر ریخته شدند. سپس میزان آبشویی نیترات در حالت پیوسته اندازه‌گیری شد (اعمال بار ثابت (۳ سانتیمتر) آب مقطر بر روی هر ستون خاک در طول آزمایش). برای به دست آوردن مقدار حجم زهاب مورد نظر برای اندازه-گیری غلظت نیترات، در ابتدا برای تمام نمونه‌های خاک تیمار شده با نمونه‌های بایوچار، میزان تخلل محاسبه شد.(به ترتیب ۴۹/۵ ، ۵۴/۳ و ۵۸/۳ درصد برای خاکهای سبک متوسط و سنگین بافت) سپس زهاب ستون‌ها در حجم مشخص (یک حجم منفذی) جمع‌آوری شده و غلظت نیترات در آن‌ها به طور جداگانه محاسبه شد.

آزمایش ستون آبشویی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورها شامل ۹ نوع مواد اصلاحی، ۳ نوع خاک و ۳ تکرار بود. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون تعقیبی توکی (Tukey's HSD Test) در سطح احتمال ۱ درصد صورت گرفت.

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-10]

جدول ۱. ویژگی‌های ابتدایی خاک‌های مورد آزمایش

Tabel 1. Initial properties of the soils

نمونه	شن (درصد) (٪) Sand	سیلت (درصد) (٪) Silt	رس (درصد) (٪) Clay	مواد آلی (درصد) (٪) OM	pH	تخلخل (درصد) (٪) Porosity
لوم رسی شنی Sandy Clay Loam	57.8	36	20.2	0.6	7.8	49.5
لوم رسی Clay Loam	33.8	38	30.2	0.8	7.6	53.6
رسی Clay	17.8	12	70.2	0.8	7.5	58.3

اندازه‌گیری نیترات در زهاب

برای اندازه‌گیری نیترات، ۰/۲۵ میلی‌لیتر (ml) از زهاب به دست آمده به ظرف ارلن‌مایر ۵۰ میلی‌لیتری منتقل شد و به آن ۰/۸ میلی‌لیتر محلول ۵ درصد اسید سالیسیلیک (حل‌شده در اسید سولفوریک) اضافه گردید. پس از ۲۰ دقیقه، ۱۹ میلی‌لیتر محلول هیدروکسید سدیم ۲ نرمال به هر نمونه افزوده شد تا pH به بیش از ۱۲ افزایش یابد. پس از خنک‌شدن در دمای اتاق، غلظت نیترات با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۱۰ نانومتر (nm) اندازه‌گیری شد .(Pansu & Gautheyron, 2006)

نتایج

نتایج ابتدایی نمونه های خاک

ویژگی‌های بیوچار قبل و بعد از پوشش سطحی

تحلیل عنصری

تحلیل عنصری بر روی هر دو نوع بیوچار بدون پوشش و بیوچارهای پوشش‌دار با فلزات آهن، روی و مس انجام شد تا غلظت عناصر کربن (C)، هیدروژن (H)، نیتروژن (N)، گوگرد (S) و اکسیژن (O) تعیین شود. این تحلیل با استفاده از دستگاه تحلیل عنصری CHNSO Analyzer انجام شد. (جدول ۲)

نتایج حاصل از این تحلیل نشان داد (جدول ۲) که پوشش‌دهی با فلزات منجر به تغییرات قابل توجهی در ترکیب عنصری بیوچارها شده است. به این ترتیب که بالاترین مقدار کربن (۴۵/۳۱ ٪) در بیوچار بدون پوشش مشاهده شد که نشان‌دهنده حضور ساختارهای آروماتیک پایدار تشکیل‌شده در طی فرآیند پیرولیز است. در مقابل، بیوچارهای پوشش شده با آهن، روی و مس کاهش محتوای کربن (~۴۰–۳۹٪) را نشان دادند که احتمالاً به دلیل جایگزینی اتم‌های کربن با فلزات و تشکیل پیوندهای فلز- اکسیژن (M-O) است. به همین ترتیب بیوچار بدون پوشش، کمترین مقدار هیدروژن (۱/۹۷ ٪) را نشان داد که نشان‌دهنده کاهش گروه‌های آلیفاتیک در طی پیرولیز است. با این حال، بیوچارهای پوشش‌دار افزایش محتوای هیدروژن (تا حدود ~۴٪) را نشان دادند که احتمالاً به دلیل جذب رطوبت توسط فلزات یا تشکیل گروه‌های هیدروکسیل جدید (O-H) از طریق تعاملات فلز- اکسیژن است. در مورد عناصر نیتروژن و گوگرد نیز کاهش محتوای نیتروژن و گوگرد در بیوچارهای پوشش‌دار مشاهده شد. این کاهش ممکن است ناشی از تجزیه ترکیبات حاوی نیتروژن (مانند پروتئین‌ها) و ترکیبات آلی حاوی گوگرد در طی فرآیند پوشش‌دهی با فلزات باشد. علاوه بر این، تشکیل کمپلکس‌های فلز- نیتروژن یا فلز-گوگرد که در تحلیل CHNSO قابل تشخیص نیستند، می‌تواند به این روند کمک کند. در مورد اکسیژن بیوچار بدون پوشش مقدار بالایی از اکسیژن (۲۳/۳۲ ٪) را نشان داد که نشان‌دهنده حضور گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن (مانند O-H، C=O، C-O) است. در مقابل، بیوچارهای پوشش‌دار کاهش محتوای اکسیژن (~۱۶–۲۱٪) را نشان دادند که احتمالاً به دلیل تشکیل پیوندهای فلز- اکسیژن

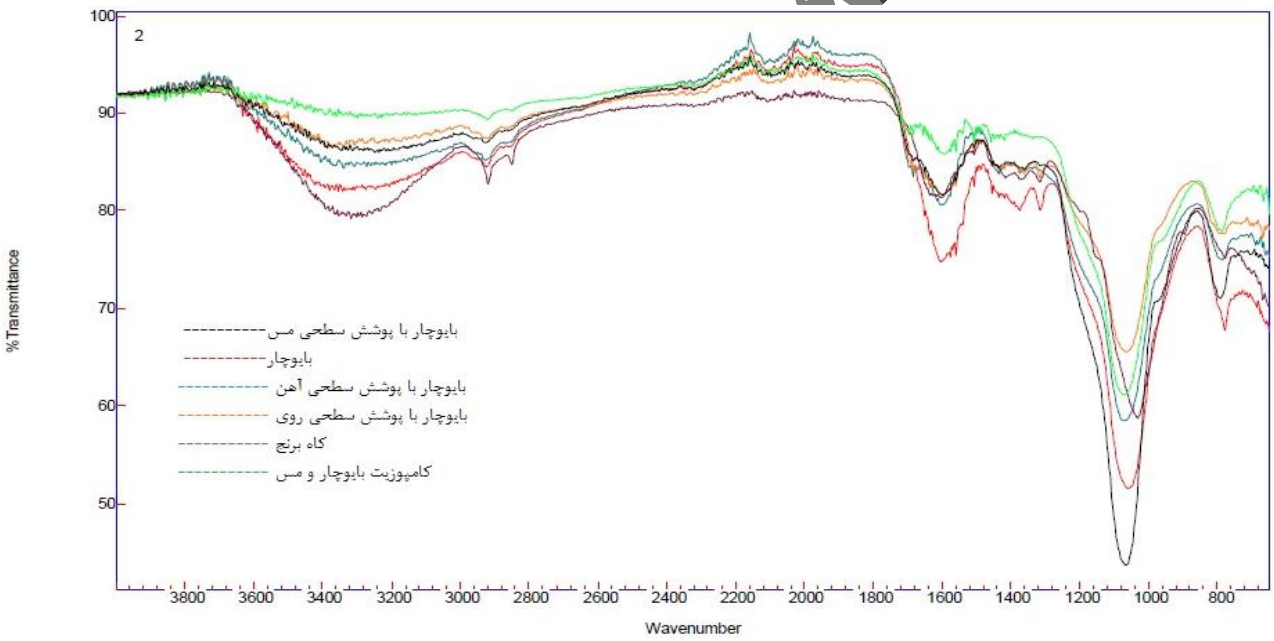
نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-10]

جدول ۲. آنالیز عنصری نمونه‌های بیوچار و بیوچار با پوشش سطحی

TABEL 2. ELEMENTAL ANALYSIS OF BIOCHAR SAMPLES AND SURFACE-COATED BIOCHAR

نمونه Sample	کربن C (درصد) (٪)	هیدروژن H (درصد) (٪)	نیتروژن N (درصد) (٪)	گوگرد S (درصد) (٪)	اکسیژن O (درصد) (٪)
بیوچار (Biochar)	45.31	1.96	1.2	4.03	23.32
بیوچار با پوشش آهن (Fe coated biochar)	42.42	3.3	1.4	2.15	21.09
بیوچار با پوشش روی (Zn coated biochar)	40.8	3.8	1.1	3.2	20.84
بیوچار با پوشش مس (Cu coated biochar)	39.49	4	1.4	2.57	16.83



شکل ۱. طیف مادون قرمز نمونه‌های بیوچار و بیوچار با پوشش سطحی فلزی

Fig 1. Infrared spectrum of biochar samples and metal surface-coated biochar.

(M-O) و اکسیداسیون انتخابی گروه‌های عاملی است. در مطالعات دیگری نیز نتایج مشابهی گزارش شده است (Alagha et al., 2020)

نتایج بررسی نمونه ها با FTIR:

نتایج بررسی نشان داد که بیوچار بدون پوشش دارای پیک‌های مشخصی از گروه‌های هیدروکسیل (O-H) در محدوده‌ی ۳۲۰۰ cm^{-1} – ۳۶۰۰ هیدروکربن‌های آلیفاتیک (C-H) در محدوده‌ی ۳۰۰۰–۲۸۰۰ cm^{-1} ، گروه‌های کربونیل (C=O) در محدوده‌ی ۱۷۵۰ –۱۷۰۰cm^{-1} ، حلقه‌های آروماتیک یا آلکن‌ها (C=C) در محدوده‌ی ۱۶۵۰–۱۶۰۰cm^{-1} و استرها، اترها یا الکل‌ها (C-O) در محدوده‌یcm^{-1} ۱۰۰۰–۱۳۰۰ می‌باشد. (شکل ۱)

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-10]

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس غلظت نیترات در زهاب، پس از آبشویی پیوسته

Table 2. The results of the analysis of variance (ANOVA) of nitrate concentration in leachate after continuous leaching.

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی df	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean of squares
اصلاح کننده	8	158939.613	19867.452**
خاک Soil	2	7005.845	3502.923ns
اصلاح کننده خاک (Soil × Treatments)	16	15317.743	957.359ns
خطا (Error)	54	82242.689	1523.013

** و NS به ترتیب به معنای معنی دار در سطح ۱ درصد و معنی دار نبودن می باشد.

ns and ** indicate none and significant effects at 1% probability levels, respectively

همچنین نتایج بررسی‌ها نشان داد که پوشش سطحی بیوچار و کاه برنج با آهن، روی و مس، به دلیل فرایند پیرولیز و برهمکنش با فلزات، منجر به کاهش شدید پیک‌های هیدروکسیل (O-H) و تغییرات قابل توجه در پیک‌های کربونیل (C=O) شده است.همچنین، تشکیل پیوندهای فلز- اکسیژن (Cu-O)، (Fe-O) و (Zn-O) در محدوده‌ی زیر $۸۰۰cm^{-1}$ به‌وضوح مشاهده شد

نتایج شکل ۱ نشان می‌دهد که به‌طور کلی پیرولیز باعث کاهش شدت پیک‌های O-H ، C-H و C-O و تقویت پیک‌های C=C در نمونه‌های کاه برنج و بیوچار شده است. این تغییرات نشان‌دهنده‌ی کربونیزه شدن مواد و تشکیل ساختارهای آروماتیک قوی‌تر در طی فرایند پیرولیز است. همچنین پوشش‌دهی با فلزات آهن، روی و مس علاوه بر ایجاد پیوندهای فلز- اکسیژن، باعث تغییرات ساختاری در گروه‌های عاملی موجود در نمونه‌ها شده است. این تغییرات شامل جابجایی یا کاهش شدت پیک‌های O-H و C=O و تقویت پیک‌های C=C به دلیل افزایش کربونیزاسیون می‌باشد. (شکل ۱)

در مجموع، نتایج بررسی‌ها نشان داد که فرایند پیرولیز و پوشش‌دهی با فلزات تأثیر قابل توجهی بر ساختار شیمیایی و گروه‌های عاملی نمونه‌های بیوچار و کاه برنج داشته و منجر به تشکیل پیوندهای جدید و تغییرات در پیک‌های مشخصه‌ی FTIR شده است.

نتایج بررسی‌های آماری

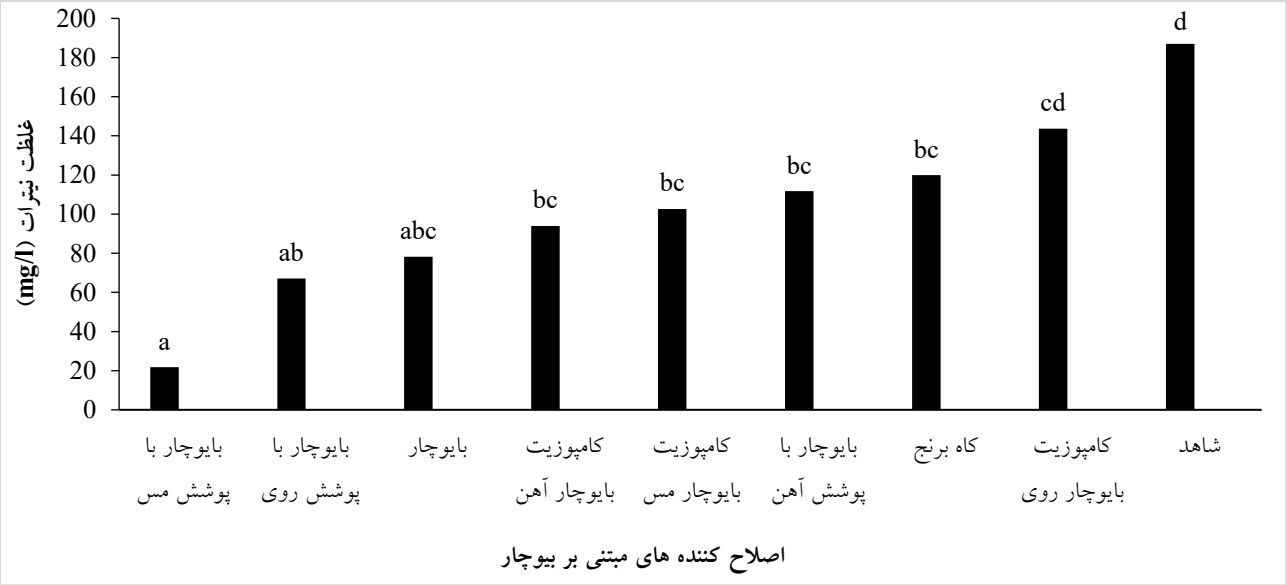
بررسی آماری نتایج به دست آمده از مقایسه غلظت نیترات در زهاب حاصل از آبشویی پیوسته ستون‌های خاک نشان داد که نوع بافت خاک، فاقد اثر معنی دار آماری بر غلظت نیترات زهاب در سطح یک درصد بود. (جدول ۳). در حالی که نتایج مقایسه میانگین‌های تاثیر اصلاح کننده های مبتنی بر بیوچار بر غلظت نیترات در زهاب حاصل از آبشویی پیوسته، نشان داد که غلظت نیترات در زهاب حاصل از آبشویی ستون خاک تیمار شده با بیوچار با پوشش سطحی مس به طور معنی داری در مقایسه با سایر تیمارها کمتر بود. به این ترتیب که در این تیمار غلظت نیترات ۲۱/۷۹ میلی‌گرم بر لیتر(mgL^{-1}) بود که در مقایسه با تیمار شاهد (۱۸۷ میلی‌گرم بر لیتر) به طور معنی داری کمتر می‌باشد. همچنین تیمار های بیوچار با پوشش سطحی روی و بیوچار نیز با غلظت های ۶۷/۰۵ و ۷۸/۲۶ میلی‌گرم بر لیتر (mgL^{-1}) به ترتیب در جایگاه دوم و سوم قرار گرفتند (شکل ۲).

منحنی‌های رخنه

نتایج حاصل از تحلیل منحنی رخنه در این مطالعه نشان‌دهنده تفاوت‌های معنادار در عملکرد تیمارهای مختلف در جذب نیترات از محیط خاک می‌باشد. در تیمار شاهد (بدون اصلاح) در هر سه خاک با بافت های سبک، سنگین و متوسط، نسبت غلظت

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-10]



شکل ۲. مقایسه تاثیر اصلاح‌کننده‌های مبتنی بر بیوچار بر غلظت نیترات در زهاب حاصل از آبشویی پیوسته

Fig 2. The impact of biochar-based amendments on nitrate concentration in the leachates from continuous leaching

نیترات در زهاب به غلظت اولیه (C/C_0) (غلظت نیترات در تیمار شاهد) در تمامی حجم‌های منفذی در محدوده ۱ باقی ماند که حاکی از عدم توانایی خاک طبیعی در جذب نیترات و انتقال کامل آن به محیط زهکشی است. این یافته اهمیت استفاده از مواد اصلاح‌کننده خاک را در جلوگیری از آلودگی منابع آبی زیرزمینی به نیترات برجسته می‌سازد (شکل ۴).

در مقابل، تیمارهای حاوی بیوچار اصلاح شده با فلزات، عملکرد به مراتب بهتری را از خود نشان دادند. به طور مشخص، تیمار بیوچار با پوشش مس در هر سه نوع خاک، موجب کاهش سریع غلظت نیترات در زهاب پس از گذشت یک حجم منفذی و رسیدن به صفر پس از دو حجم منفذی گردید. این نتایج بیانگر توانایی بالای این تیمار، در حذف کامل و سریع نیترات از سیستم خاک می‌باشد.

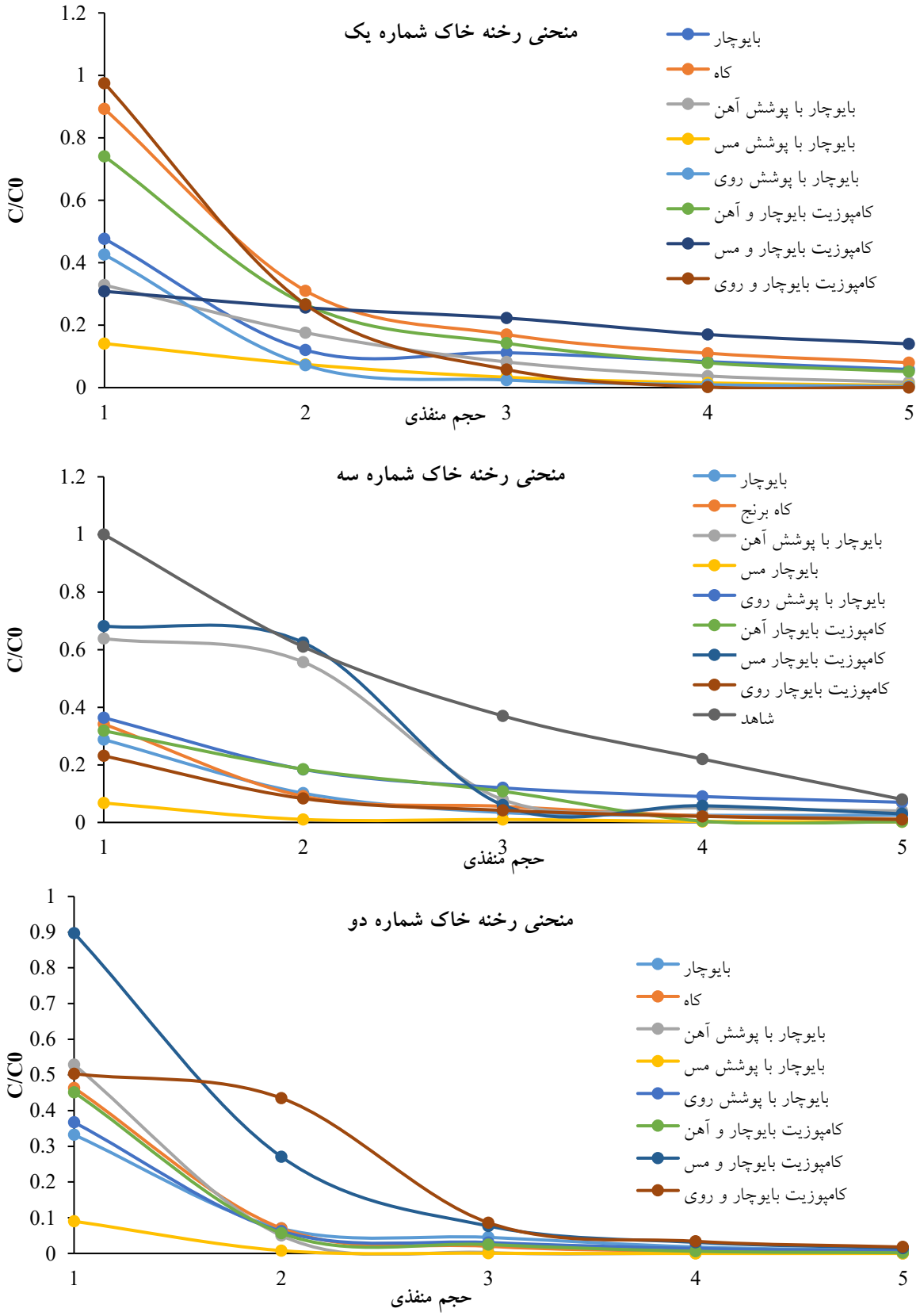
تیمار بیوچار با پوشش آهن نیز اگرچه سرعت عمل کمتری داشت، اما پس از گذشت پنج حجم منفذی توانست نسبت C/C_0 را به حدود صفر برساند که نشان‌دهنده ظرفیت جذب قابل توجه این تیمار از طریق مکانیسم‌های یونی و شیمیایی است. در مقایسه، تیمارهای بیوچار با پوشش روی و کامپوزیت بیوچار مس عملکرد متوسطی داشتند که به ترتیب پس از سه حجم منفذی به مقادیر ۰/۱ و ۰/۲ رسیدند. این تفاوت‌ها احتمالاً ناشی از اختلاف در ویژگیهای جذب سطحی و مکانیسم‌های واکنش فلزات مختلف با یون نیترات می‌باشد.

نتایج مربوط به تیمارهای کاه برنج و بیوچار خالص حاکی از عملکرد ضعیف این مواد در جذب نیترات بود، به طوری که حتی پس از پنج حجم منفذی، نسبت C/C_0 در این تیمارها به ترتیب تنها به ۰/۷ و ۰/۵ کاهش یافت (در دو خاک یک و سه). این مشاهدات مؤید آن است که مواد آلی به تنهایی توانایی محدودی در جلوگیری از شستشوی نیترات از خاک دارند.

بحث

در مطالعه حاضر، مشاهده شد که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچارها (مانند گروه‌های عاملی سطحی و توزیع عناصر معدنی) نقش مهمی در عملکرد جذب نیترات ایفا می‌کنند. این یافته‌ها با نتایج مطالعات قبلی همخوانی دارد. به عنوان مثال (Zhang et al., 2020) نشان دادند که بیوچارهای اصلاح‌شده با فلزات و اکسیدهای فلزی (مانند MgO) ، ظرفیت جذب نیترات را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. این افزایش به دلیل ایجاد سایت‌های جذب مثبت و کاهش دافعه الکترواستاتیک بین بیوچار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-10]



شکل ۴. منحنی‌های رخنه نیترات در سه خاک با بافت‌های متفاوت

Fig 4. Nitrate breakthrough curves for the three soils with different textures

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-10]

و یون‌های منفی است. با این حال، (Cui et al., 2021) نشان دادند که خصوصیات پایه بیوچار (مانند محتوای کربن و سطح ویژه) ممکن است همبستگی ضعیفی با حذف نیترات داشته باشند، که نشان‌دهنده نقش غالب مواد معدنی بارگذاری‌شده در بهبود عملکرد بیوچار است. این نتیجه با یافته‌های این مطالعه همخوانی دارد، زیرا در مطالعه حاضر نیز مشاهده شد که بیوچارهای اصلاح‌شده با مواد معدنی عملکرد بهتری نسبت به بیوچار بدون پوشش دارند. استفاده از اصلاح‌کننده‌های معدنی مانند Ca، Mgو Fe به طور معنی‌داری عملکرد بیوچار را در حذف نیترات بهبود می‌بخشد. در مطالعه حاضر، بیوچارهای اصلاح‌شده با فلزات آهن و روی عملکرد بهتری نسبت به بیوچار خالص نشان دادند، که با نتایج (Cui and Zhang et al., 2021) همخوانی دارد. این بهبود به دلیل افزایش بار مثبت سطحی و تشکیل رسوب‌های نیترات با فلزات است. با این حال، نوع خاک و شرایط محیطی می‌تواند تأثیر این اصلاح‌کننده‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. به عنوان مثال، در خاک‌های کشاورزی، بیوچارهای بارگذاری‌شده با Ca عملکرد بهتری نسبت به بیوچارهای بارگذاری‌شده با Mg دارند، در حالی که در خاک‌های مرطوب، بیوچارهای بارگذاری‌شده با Mg عملکرد بهتری نشان می‌دهند. این نتیجه نشان‌دهنده اهمیت طراحی هوشمندانه بیوچار بر اساس شرایط خاص خاک است.

نتایج حاصل از آزمون‌های طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) نشان داد که فرآیند پوشش‌دهی بیوچار با فلزات سنگین (مس، آهن و روی) تغییرات قابل‌توجهی در ساختار شیمیایی و بلوری آن ایجاد کرده است. کاهش شدت باندهای O–H و C=O در FTIR و ظهور باندهای مشخصه‌ی Cu–O و Fe–O در محدوده‌ی پایین‌تر از ۸۰۰ cm^{-1} بیانگر برهم‌کنش گروه‌های عاملی بیوچار با فلزات پوششی است. این یافته‌ها با نتایج (Rahman et al., 2024; Choi et al., 2019) هم‌خوانی دارد که گزارش کردند اصلاح فلزی منجر به تغییر در گروه‌های سطحی و افزایش سایت‌های جذب می‌شود.

از نظر کارایی در حذف نیترات، بیوچار پوشش‌دار با مس بهترین عملکرد را نشان داد و موجب کاهش چشمگیر نیترات در شرایط آبشویی پیوسته گردید. این نتیجه مشابه یافته‌های (Shahzad et al., 2023) است که در آن بیوچار غنی‌شده با CuO منجر به کاهش حدود ۶۰٪ آبشویی نیترات و بهبود جذب نیتروژن گیاه شد. آن‌ها این امر را به افزایش فعالیت میکروبی خاک و تحریک فرآیند دنیتریفیکاسیون نسبت دادند.

در خصوص بیوچار پوشش‌دار با آهن، نتایج نشان دادند که این تیمارها عملکرد مطلوبی در کاهش نسبت C/C_0 دارند. این موضوع با مطالعه (Sharma et al., 2021) هم‌راستا است که تأکید کردند نانوذرات اکسید آهن از طریق افزایش بار مثبت سطحی، جذب آنیون‌هایی نظیر نیترات و فسفات را بهبود می‌بخشند.

این یافته‌ها با نتایج (Long et al., 2018) همسو هستند که گزارش کردند افزایش پتانسیل سطحی مثبت بیوچار پس از اصلاح با فلزات، دافعه الکترواستاتیکی با یون‌های نیترات را کاهش داده و فرآیند جذب را تسهیل می‌کند همچنین (Zhang et al., 2020) بیان کردند که ویژگی‌های اولیه بیوچار مانند سطح ویژه و درصد کربن نقش محدودی در حذف نیترات دارند و این اصلاح سطحی است که اهمیت اصلی را دارد؛ موضوعی که در پژوهش حاضر نیز با مقایسه بیوچار خام و پوشش‌دار تأیید شد.

بر اساس نتایج این مطالعه و مقایسه آن با مطالعات قبلی، می‌توان نتیجه گرفت که بیوچارهای اصلاح‌شده با مواد معدنی به دلیل بهبود خصوصیات سطحی و افزایش سایت‌های جذب مثبت، عملکرد بهتری در حذف نیترات نسبت به بیوچار خالص دارند. با این حال، عملکرد این بیوچارها به شدت تحت تأثیر خصوصیات خاک، شرایط محیطی و نوع اصلاح‌کننده معدنی قرار دارد. بنابراین، ایجاد تغییرات در بیوچار بر اساس شرایط خاص خاک و محیط ضروری است. همچنین، بررسی بلند مدت اثرات بیوچار بر تبدیل ترکیبات آلی به معدنی و رفتار شست‌وشوی عناصر غذایی نیازمند تحقیقات بیشتری است. در نهایت، این مطالعه اطلاعات مفیدی برای استفاده از بیوچارهای اصلاح‌شده در بهبود عملکرد سیستم‌های آبی و خاکی ارائه می‌دهد و می‌تواند به عنوان راهنمایی برای توسعه فناوری‌های جدید در مدیریت

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-10]

آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری کلی

یافته‌های این پژوهش نشان داد که استفاده از بیوچارهای اصلاح‌شده با فلزات، به‌ویژه نمونه پوشش‌دار با مس، می‌تواند به‌طور مؤثری آبشویی نیترات ناشی از مصرف کود اوره را در خاک‌های مختلف کاهش دهد. در حالی‌که بافت خاک تأثیر معناداری بر میزان آبشویی نیترات نداشت، اصلاح بیوچار با فلزات توانست تفاوت چشمگیری در کاهش غلظت نیترات ایجاد کند. این نتایج بیانگر آن است که پوشش‌دهی بیوچار با فلزات، با تغییر ویژگی‌های سطحی و ایجاد سایت‌های جذب فعال، ظرفیت بالایی برای جلوگیری از آلودگی منابع آب زیرزمینی دارد.

به‌طور کلی، این فناوری می‌تواند به عنوان رویکردی کارآمد در مدیریت پایدار خاک و کاهش تهدیدات زیست‌محیطی ناشی از مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی مطرح شود. همچنین، انجام پژوهش‌های تکمیلی در مقیاس‌های مزرعه‌ای و در دوره‌های زمانی بلندمدت می‌تواند به درک بهتر اثرات این اصلاح‌کننده‌ها و بهینه‌سازی کاربرد آن‌ها در نظام‌های کشاورزی کمک کند.

تشکر و سپاسگزاری

در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچگونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

نسخه پیش از انتشار

منابع مورد استفاده

References

1. Algha, O., Manzar, M.A., Qureshi, A., 2020. Comparative adsorptive removal of phosphate and nitrate from wastewater using biochar Mg Al LDH nanocomposites: coexisting anions effect and mechanistic studies. *Nano Mater*; 10(2):336.
2. Bae, B., Juang, Y., Han, W., 2002. Improved brine recycling during nitrate removal using ion exchange. *Water Res*; 36:3330.
3. Bian, Z., Wang, Y., Zhang, X., Li, T., 2020. A review of environment effects on nitrate accumulation in leafy vegetables grown in controlled environment. Foods; 9:732.
4. Blake, G.R., Hartage, K.H., 1986. Bulk density. In: Klute A, editor. Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd Edition. Madison, WI: Am. Soc. Agron. p. 363–375.
5. Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.*; 54:464–465.
6. Cantrell, K., Hunt, P., Uchimya, M., 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical properties of biochar. *Bioresour. Technol*; 107:419–428.
7. Chen, X., Hou, Z., Wang, B., 2020. Nano biochar reduced soil erosion and nitrate loss in sloping fields on the Loess Plateau of China. Catena; 187:104346.
8. Danleson, R.E., Sutherland, P.L., 1986. Porosity. In: Klute A, editor. Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd Edition. Madison, WI: Am. Soc. Agron; p. 443–460.
9. Dawer, K., Fahad, S., Jahangir, M., 2021. Biochar and urea inhibitor mitigate NH_3 and N_2O emissions and improve wheat yield in a urea fertilized alkaline soil. Nature; 11:17413.
10. Diatta, A., Fike, A., Battaglia, H., 2020. Effect of biochar on soil fertility and crop productivity in arid regions: a review. *Arab. J. Geosci*; 13:595.
11. Du, C., Cui, C.W., Qiu, S., Shi, S.N., Li, A., Ma. F., 2017. Nitrogen removal and microbial community shift in an aerobic denitrification reactor bioaugmented with a Pseudomonas strain for coal-based ethylene glycol industry wastewater treatment. *Environ. Sci. Pollut. Res.*; 24:11435–11445.
12. Fan, C., Duan, P., Zhang, X., Shen, H., Chen, M., Xiong, Z., 2020. Mechanisms underlying the mitigation of both N_2O and NO emissions with field-aged biochar in an Anthrosol. Geoderma; 364:114–117.
13. Fidel, R., Larid, D., Spokas, K., 2018. Sorption of ammonium and nitrate to biochar is electrostatic and pH dependent. *Sci. Rep.*; 8:17627.
14. Guo, X., Peng, Y., Li, N., 2022. Effect of biochar-derived DOM on the interaction between Cu (II) and biochar prepared at different pyrolysis temperature. *J. Hazard. Mater.*; 428:126739.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-10]

15. Gurav, K.V., Geng, M.G., Shina, S.W., 2014. Gas sensing properties of hydrothermally grown ZnO nano rods with different aspect ratio. *Sens. Actuators*; 190:439–445.
16. Haghighi Mood, S., Pelaez-Samaniego, M.R., Garcia-Perez, M., 2022. Perspectives of engineered biochar for environmental applications: A review. Energy Fuells; 36: 7940-7986.
17. Hasan, M., Chakma, S., Liang, X., Sutradhar, S.h., Kozinski, J., Kang, K., 2024. Engineered Biochar for Metal Recycling and Repurposed Applications. Energies, 17, 4674.
18. Hu, H., Goto, N., Fujie, K., 2001. Effects of pH on the reduction of nitrate in water by metallic iron. *Water Res*; 35(11):2789–2793.
19. Hu, X., Xue, Y., Long, L., Zhang, K., 2018. Characteristics and batch experiments of acid- and alkali-modified corncob biomass for nitrate removal from aqueous solution. *Environ. Sci. Pollut. Res*; 25:1–9.
20. Kang, J., Duan, X., Wang, C., Sun, H., Tan, X., Tade, M.O., Wang, S., 2018. Nitrogen-doped bamboo-like carbon nanotubes with Ni encapsulation for persulfate activation to remove emerging contaminants with excellent catalytic stability. *Chem. Eng. J.*; 332:398–408.
21. Katukurunda, KG., Gamage, M.K.W., Buddhika, H.A.A.Y., Prabhashini, S.D., Senaratna, D., 2013. Turmeric powder (Curcuma longa) affected on microbial dynamics, ammonia emission rate and some chemical properties of layer litter. In: Proceedings of the Second International Symposium of Minor Fruits and Medicinal Plants for Better Lives (2nd ISMF & MP). University of Ruhuna, Sri Lanka. p. 134–138.
22. Lehmann, J., 2007. A handful of carbon. Nature; 447:143–144.
23. Lei, Y., Zhang, Y., Yuan, L., 2022. Biochar supported Cu nano cluster as an electrochemical ultrasensitive interface for ractopamine sensing. *Food Chem*;
24. Liu, G., Zhou, Y., Liu, Z., Zhang, J., Tang, B., Yang, S., Sun, C., 2016. Efficient nitrate removal using micro-electrolysis with zero valent iron/activated carbon nanocomposite. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*; 91:2942–2949.
25. Liu, Z., Yang, E., Lan, Y., 2021. Effect of biochar on urea hydrolysis rate and soil ureC gene copy numbers. *J. Soil Sci. Plant Nutr*.
26. Long, L., Xu, Y., Hu, X., Zhu, Y., 2018. Study on the influence of surface potential on the nitrate adsorption capacity of metal-modified biochar. *Environ. Sci. Pollut. Res.*; 26:3065–3074.
27. McGeough, K., Watson, L.C., Müller, C., Laughlin, J.R.J., Chadwick, D.R., 2016. Evidence that the efficacy of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) is affected by soil properties in UK soils. Soil Biology & *Soil Biol. Biochem.* 94:222–232.
28. Mclean, E.O., 1988. Soil pH and lime requirement. In: Page AL, editor. Methods of Soil Analysis, Part 2. Madison, WI: Am. Soc. Agron. p. 199–224.
29. Molins, C., Meseguer, S., Moliner, Y., 2006. A guide for selecting the most appropriate method for ammonium determination in water analysis. *TrAC Trends Anal. Chem*;25(3).
30. Nazmol, H., Mia, S., Hassan, M., 2022. Chemical and biological activation of biochar favors N immobilization in biochar and its release to plant. Pedosphere;
31. Norman, R.J., Stuck, J.W., 1981. The determination of nitrate and nitrite in soil extracts by ultraviolet spectrophotometry.
32. Novak, J.M., Ippolito, J.A., Watts, D.W., Sigua, G.C., Ducey, T.F., Johnson, M.G., 2019. Biochar compost blends facilitate switchgrass growth in mine soils by reducing Cd and Zn bioavailability. Biochar; 1:97–114.
33. Omiri, J., Snoussi, Y., Bhakta, A.K., Truong, S., Ammar, S., Khalil, A.M., Jouini, M., Chehimi, M.M., 2022. Citric-Acid-Assisted Preparation of Biochar Loaded with Copper/Nickel Bimetallic Nanoparticles for Dye Degradation. Colloids Interfaces. 6:18
34. Page, A.L., Miller, R., Keeney, D., 1982. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. 2nd ed. Madison, WI: Am. Soc. Agron
35. Page, M.C., Sparks, D.L., Woll, M.R., Hendricks, G.J., 1987. Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy middle Atlantic coastal plain soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*; 51:1460–1465.
36. Pansu, M., Gautheyrou, J., 2006. Handbook of soil analysis. Springer; p. 778.
37. Quardi, M., Qourzal, E., Alahian, S., 2015. Effective removal of nitrate ions from aqueous solution using new clay as potential low-cost adsorbent. *J. Encapsulation Adsorpt*; 5:178–190.
38. Sadeghi, M., Marandi, G.B., Zohuriaan, M.J., 2020. Nitrate removal from aqueous solutions by adsorption onto hydrogel–rice husk biochar composite. *Water Environ. Res.*; 92(6):934–947.
39. Shahzad, M., Akhtar, T., Mehmood, M., Shah, G.M., 2023. Nanobiochar-supported CuO improves soil nitrogen retention and wheat productivity in degraded soils. Plants; 12:332.
40. Sharma, R.K., Solanki, K., Dixit, R., Sharma, S., Dutta, S., 2021. Nanoengineered iron oxide-based sorbents for separation of various water pollutants: current status, opportunities and future outlook. Envron. Sci: Water Res. Technol. 7: 818
41. Schipper, L., Vojodic, A., 2001. Five years of nitrate removal, denitrification and carbon dynamics in a denitrification

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-10]

wall. *Water Res*; 35(14):3473–3477.
42. Shung, GF, Kong, Y., 2021. Effect of mineral loaded biochar on the leaching performance of phosphate and nitrate in two contrasting soils from coastal estuary area. *Sci. Total Environ.*; 779:146346.
43. Simha, P., Yadav, A., Pinjari, D., 2016. On the behavior, mechanistic modeling and interaction of biochar and crop fertilizer in aqueous solution. *Resour. Eff. Technol*; 2:133–142.
44. Solomon, R.I., 2022. Biochar amendment for reducing nitrate leaching from soils of different textural classes in the Nigerian savanna. *Turk. J. Agric*; 10:1363–1368.
45. Sumner, M., Miller, W., 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficient. In: Sparks DL, editor. Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods. Madison, WI: Am. Soc. Agron; p. 1201–1229.
46. Taghizadeh-Toosi, A., Clough, T., Condron, L., 2011. Biochar incorporation into pasture soil suppresses in situ nitrous oxide emissions from ruminant urine patches. *J. Environ. Qual.*; 40:468–479.
47. Villegas-Guzman, P., Hofer, F., Silva-Agredo, J., Torres-Palma, R.A., 2017. Role of sulfate, chloride, and nitrate anions on the degradation of fluoroquinolone antibiotics by photoelectro-Fenton. *Environ. Sci. Pollut. Res*; 24:28175–28189.
48. Viglašová, E., Zbořil, R., Klementová, M., Tuček, J., Prucek, R., 2020. Engineered magnetic biochars for nitrate removal from water: influence of iron oxide nanostructures. *Desalin. Water Treat*; 182:260–269.
49. Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science; 37:29–37.
50. Wan, S., Wang, S., Li, Y., Gao, B., 2017. Functionalizing biochar with Mg–Al and Mg–Fe layered double hydroxides for removal of phosphate from aqueous solutions. *J. Ind. Eng. Chem.*; 47:246–253.
51. Wang, B., 2016. Removal of nitrate from constructed wetland in winter in high latitude area with modified hydrophyte biochar. *Korean J. Chem. Eng*; 34:717–722.
52. Wang, S., Li, X., Liu, Y., 2017. Nitrogen-containing amino compounds functionalized graphene oxide: synthesis, characterization and application for removal pollutants from wastewater. Journal of Hazardous Materials; 342:177.
53. Xue, L., Gao, B., Wan, Y., Fang. J., Wang, S., Li, Y., Muñoz-Carpena, R., Yang, L., 2016. High efficiency and selectivity of MgFe-LDH modified wheat-straw biochar in the removal of nitrate from aqueous solutions. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng*; 63:312–317.
54. Yang, X., Li, J., Wen, T., 2013. Adsorption of naphthalene and its derivatives on magnetic graphene composites and the mechanism investigation. *Colloids Surf.*; 422:118–125.
55. Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M., Zimmerman, A.R., 2012. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. Chemosphere;89(11):1467–1471.
56. Yavari, S., Malakahmad, A., Sapari, N.B., 2015. Biochar efficiency in pesticide sorption as a function of production variable. *Environ. Sci. Pollut. Res*; 22:13824–13841.
57. You, H., Lin, H., Li, Y., 2022. Iron aluminum and aluminum single impregnated biochar composite for nitrate adsorption in rare earth wastewater: behavior and mechanism. *Biomass Convers. Biorefin*.
58. Yughi, L., Liu, S., Xiao, L., 2021. Synergetic effects of biochar and denitrifier on nitrate removal. *Bioresour. Technol*; 335.
59. Zaman, M., Saggar, S., Blennerhassett, J.D., Singh, J., 2009. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system. *Soil Biol. Biochem*; 41:1270–1280.
60. Zhang, M., Song, G., Gelardi, D.L, Huang, L., Khan, E., Masek, O., Parikh, S.J, Ok, Y.S., 2020. Evaluating biochar and its modifications for the removal of ammonium, nitrate, and phosphate in water. Water research. 186: 116303
61. Zhang, J., 2017. Biochar compound fertilizer increases nitrogen productivity and economic benefits but decreases carbon emissions of maize production. *Agric. Ecosyst. Environ.*;241:70–78.
62. Zhao, B., Zhanxue, S., Yajie, L., 2022. An overview of in-situ remediation for nitrate in groundwater. *Sci. Total Environ*; 804:149981.
63. Zuolin, L., Brandon, D., Carolin, A., Gonnermann, H.M., 2017. Biochar particle size, shape and porosity act together to influence soil water properties. PLoS One.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-10]