

Dynamics of changes in soil quality properties in a semi-arid ecosystem following poplar wood biochar application under field conditions

Ehsan Pourhossein¹, Hossein Kheirfam^{2*}, Kamran Zeinalzadeh³, Reza Esmailnezhad⁴,
Haniyeh Faramarzi⁵

¹ M.Sc Student, Rangeland and Watershed Engineering Department, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

² Associate professor, Rangeland and Watershed Engineering Department, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

³ Associate professor, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

⁴ Ph.D. Graduate, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

⁵ Ph.D. Student, Soil Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

Extended Abstract

Introduction

The rapid expansion of arid and semi-arid regions, driven by climate change and unsustainable land management, has led to severe soil degradation, fertility loss, and increasing threats to global food security. In this challenging context, biochar, as a highly stable carbon-based soil amendment, holds significant potential for improving critical soil chemical properties. However, most existing research focuses on short-term effects, and the long-term temporal dynamics of key soil indicators following a single biochar application in semi-arid ecosystems remain poorly understood. Current evidence suggests that initial agronomic benefits may gradually decline over time due to surface aging processes and nutrient leaching. Therefore, determining the optimal application rate and effective time horizon to sustain soil health is crucial for sustainable land restoration. This study aimed to monitor the three-year effects of a single application of poplar wood biochar at 25 and 50 t/ha on soil organic matter, total nitrogen, carbon-to-nitrogen ratio, pH, and electrical conductivity under semi-arid field conditions. The main hypothesis was that soil chemical responses to biochar would follow a non-linear trajectory, with higher application rates demonstrating greater functional stability over the three-year monitoring period. This targeted approach provides a robust scientific framework for cost-effective and ecologically sound decision-making in degraded land restoration programs worldwide.

Materials and Methods

This field experiment was conducted at the Urmia University research farm (37°39'N, 44°58'E; 1362 m a.s.l.) under a cold semi-arid climate with ~340 mm annual rainfall and 11.5°C mean temperature. A completely randomized design with three replications evaluated single applications of poplar wood biochar at 0 (control), 25, and 50 t/ha across nine 10-m² plots. Biochar was produced via slow pyrolysis at 450°C (120 min, 10–15°C/min heating rate), sieved to 0.5–1.0 mm, and uniformly incorporated into the top 25 cm of loam-clay soil (texture verified by hydrometer) at trial initiation, with no further amendments over three years. Composite soil samples were collected annually at the end of each cropping cycle. Soil organic matter was determined via the Walkley-Black wet oxidation method (Van-Bemmelen conversion factor 1.724), total nitrogen by standard Kjeldahl digestion-distillation-titration, and the C/N ratio was subsequently calculated. Soil pH and electrical conductivity were measured in saturated paste extracts following established laboratory protocols. Data normality and variance homogeneity were confirmed using Shapiro-Wilk and Levene's tests. Temporal and treatment effects were analyzed through repeated-measures ANOVA, with mean separations performed using the LSD test at $p \leq 0.05$ in SPSS v27. All experimental procedures strictly followed standardized agronomic and soil analytical guidelines.

Results and Discussion

Repeated measures ANOVA revealed significant effects of biochar application and time on all soil chemical properties ($p < 0.05$). Organic matter increased significantly in both biochar treatments: at 25 t/ha, values were 197%, 120%, and 95% higher than control in years one, two, and three, respectively, rising from 2.88% to 1.77% (w/w); at 50 t/ha, increases reached 267%, 195%, and 151%, with values increasing from 3.56% to 2.29% (w/w). Total nitrogen showed significant increases only at 50 t/ha across all three years (0.26%, 0.22%, 0.20%; representing 108%, 97%, and 67% above control), whereas the 25 t/ha rate yielded smaller gains of 65%, 42%, and 22%. The C/N ratio increased by 75%, 53%, and 62% at 25 t/ha and by 71%, 46%, and 52% at 50 t/ha relative to control, with no significant difference between application rates. pH increased modestly by 2.3%, 1.5%, and 1.6% at 25 t/ha and by 4.3%, 2.9%, and 2.2% at 50 t/ha versus control, converging by year three. Electrical

conductivity rose within the non-saline range: at 25 t/ha, values increased from 1.37 to 1.08 dS/m, representing a decline in relative enhancement from 40% to 5.2% above control; at 50 t/ha, values increased from 1.65 to 1.11 dS/m, with relative enhancement decreasing from 70% to 8.1%. The significant treatment×time interaction for organic matter and electrical conductivity indicates temporal sensitivity, whereas non-significant interactions for nitrogen, C/N ratio, and pH suggest stable, uniform effects. These quantitative patterns demonstrate that 25 t/ha suffices for structural and regulatory improvements, while 50 t/ha is necessary for sustained nitrogen retention in semi-arid soils over a three-year horizon.

Conclusion

The findings demonstrate that biochar's influence on soil chemical parameters follows a dynamic, non-linear trajectory over a three-year period. Initial application yields peak improvements, gradually transitioning toward surface aging and functional equilibrium by year three. While soil organic matter maintained significant enhancements at both 25 and 50 t/ha, long-term total nitrogen stabilization exclusively required the higher rate. Conversely, the C/N ratio, pH, and electrical conductivity reached practical saturation thresholds by the final year, indicating that doubling the application from 25 to 50 t/ha offered no additional agronomic benefit for these indicators. This divergent response highlights the necessity of a targeted, objective-driven biochar strategy in semi-arid agroecosystems. Farmers prioritizing structural improvement, chemical buffering, and runoff mitigation can confidently adopt 25 t/ha as a cost-effective solution. In contrast, low-input systems requiring sustained nitrogen autonomy must apply 50 t/ha to maintain adequate nutrient reservoirs across multiple cropping cycles. Uniform application guidelines without specific restoration objectives risk significant economic inefficiencies. Given the study's constraints to a single feedstock, pyrolysis temperature, and loam-clay texture, future research should emphasize multi-year monitoring, isotopic tracing of nutrient fluxes, and integration with complementary nature-based practices. These efforts will refine stability models and establish optimized, site-specific protocols for resilient dryland agriculture. Adaptive management frameworks remain essential for scaling implementation.

Keywords: Semi-arid lands, Soil amendments, Soil quality, Soil organic matter, Soil total nitrogen

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to Urmia University for the financial and logistical supports who significantly contributed during the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available at a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Ehsan Pourhossein: Sampling, measurements, software and statistical analysis, drafting the original manuscript; **Hossein Kheirfam:** Conceptualization, supervision, oversight of laboratory measurements, manuscript editing and review, validation of results; **Kamran Zeinalzadeh:** Conceptualization, supervision, manuscript review, verification of statistical analysis results; **Reza Esmailnezhad** and **Haniyeh Faramarzi:** Advising, manuscript review, statistical analysis, validation of results.

*Corresponding Author, E-mail: h.kheirfam@urmia.ac.ir

Citation: Pourhossein, E., Kheirfam, H., Zeinalzadeh, K., Esmailnezhad, R., & Faramarzi, H. (2026). Dynamics of changes in soil quality properties in a semi-arid ecosystem following poplar wood biochar application under field conditions. *Water and Soil Modeling and Management*, 6(3), 312-327.

doi: 10.22098/mmws.2026.19749.1812

Received: 11 May 2026, Received in revised form: 08 June 2026, Accepted: 22 June 2026, Published online: 27 August 2026. *Water and Soil Management and Modeling*, Year 2026, Vol. 6, No. 3, pp. 312-327

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





پویایی تغییرات ویژگی های کیفیت خاک یک زیست بوم نیمه خشک پس از کاربرد زغال زیستی چوب صنوبر در شرایط صحرایی

احسان پورحسین^۱، حسین خیرفام^{۲*}، کامران زینالزاده^۳، رضا اسماعیل نژاد^۴، هانیه فرامرزی^۵

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۳ دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۴ دانش آموخته دکتری، علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۵ دانشجوی دکتری، علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

در اراضی نیمه خشک، کیفیت پایین خاک یکی از موانع اصلی تولید پایدار است. زغال زیستی به عنوان یک اصلاح کننده کربن-بنیان، گرچه در بازه یک تا دو ساله بر کیفیت خاک مؤثر است، اما پایداری اثرات آن در مقیاس سه ساله همچنان عدم قطعیت دارد. از این رو پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر زغال زیستی حاصل از گرماکافت تدریجی چوب صنوبر در ۴۵۰ درجه سلسیوس در سطوح کاربرد صفر (شاهد)، ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار در سه بازه زمانی یک، دو و سه ساله بر ویژگی های مهم شیمیایی خاک در مزرعه بدون گیاه در کرت های ۱۰ مترمربعی واقع در دشت ارومیه تحت طرح کاملاً تصادفی طراحی و داده ها با آزمون تجزیه واریانس اندازه گیری های مکرر و آزمون تعقیبی حداقل اختلاف های معنادار تحلیل شدند. نتایج نشان داد پاسخ شاخص ها خطی نبوده و در سال اول به اوج اثرگذاری رسید، در سال دوم روندی کاهشی اما پایدار داشت و در سال سوم به تعادل نزدیک شد. پس از سه سال، ماده آلی در سطوح ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار به ترتیب ۹۵ و ۱۵۱ درصد و نیتروژن کل تنها در سطح ۵۰ تن با ۶۷ درصد نسبت به شاهد افزایش معنادار یافت. در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار، نسبت کربن به نیتروژن از ۵/۷۸ در شاهد به ۹/۳۷ و ۸/۸۲ pH خاک از ۷/۶۹ به ۷/۸۱ و ۷/۸۶ و هدایت الکتریکی از ۱/۰۳ به ۱/۰۸ و ۱/۱۱ دسی زیمنس بر متر افزایش یافت، اما تفاوت معناداری بین دو سطح مصرف نبود. یافته ها نشان داد برای تنظیم pH و شوری خاک، سطح ۲۵ تن بر هکتار در چرخه سه ساله کافی و اقتصادی است و برای حفظ نیتروژن در بلندمدت نیاز به ۵۰ تن بر هکتار است. این پویایی زمانی و پاسخ شاخص ها به زغال زیستی، انتخاب سطح مصرف بهینه را بر اساس هدف مدیریتی و افق زمانی پایش در کشاورزی مناطق نیمه خشک به طور علمی و عملیاتی امکان پذیر می سازد.

واژه های کلیدی: اراضی نیمه خشک، افزودنی های خاک، کیفیت خاک، ماده آلی خاک، نیتروژن کل خاک

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h.kheirfam@urmia.ac.ir

استناد: پورحسین، احسان، خیرفام، حسین، زینالزاده، کامران، اسماعیل نژاد، رضا، و فرامرزی، هانیه (۱۴۰۵). پویایی تغییرات ویژگی های کیفیت خاک یک زیست بوم نیمه خشک پس از کاربرد زغال زیستی چوب صنوبر در شرایط صحرایی. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۳)، ۳۱۲-۳۲۷.

doi: 10.22098/mmws.2026.19749.1812

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵



مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۳۱۲ تا ۳۲۷

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

۱- مقدمه

تغییرات اقلیمی در کنار اثرات سوء و بهره‌بردای مازاد بر ظرفیت زیست‌بوم‌ها توسط انسان منجر به گسترش مناطق خشک و نیمه‌خشک در دنیا به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه شده که افت توان تولید اراضی، فرسایش و چالش‌های محیط زیستی از پیامدهای آن است (Zhou et al., 2022). در این بین، توسعه شرایط بیابانی در مناطق نیمه‌خشک از چالش‌های مدیریت منابع طبیعی در دنیا و به‌ویژه در ایران بوده که در صورت عدم مدیریت این مناطق، پیامدهای اجتماعی، محیط زیستی و اقتصادی قابل توجهی را در پی خواهد داشت (Kalankesh et al., 2022). بر اساس تخمین‌های موجود، افزایش تشدید جمعیت جهان و فعالیت‌های غیراصولی انسانی همچون چرای بیش از حد، جنگل‌زدایی، کشاورزی ناپایدار و توسعه زیرساخت‌های شهری منجر به افزایش قابل توجه تخریب خاک و بیابان‌زایی می‌شود (Ahmed et al., 2024)؛ به‌گونه‌ای که امروزه بیش از ۴۱ درصد از مساحت خشکی‌های زمین را مناطق خشک و نیمه‌خشک (بیابانی) تشکیل داده‌اند که سهم قابل توجهی در چرخه انرژی در زیست‌بوم‌های زمینی دارند (Torres-Cruz et al., 2018). از این‌رو، اهمیت محیط زیستی مناطق خشک و نیمه‌خشک در مدیریت منابع طبیعی به‌وضوح نمایان بوده و از طرفی، تخریب اراضی در این مناطق به‌ویژه در اراضی کشاورزی منجر به حذف یکپارچگی زیست‌بوم‌ها، کاهش حاصلخیزی خاک، کاهش ظرفیت نگهداشت آب و افزایش فرسایش شده و تهدیدی جدی برای معیشت جوامع بشری است.

تخریب زمین در اراضی کشاورزی، عمدتاً از طریق اختلال در تعادل عناصر غذایی خاک به‌ویژه ذخایر کربن و نیتروژن و همچنین مقادیر شوری و pH خاک نمود پیدا می‌کند (شاخص‌هایی کلیدی از سلامت و حاصلخیزی شیمیایی)؛ پدیده‌ای که علاوه بر کاهش ظرفیت حمل مواد مغذی و آب، به‌طور مستقیم بر پویایی جوامع میکروبی و متابولیسم زیستی خاک تأثیر می‌گذارد (Shahane and Shivay, 2021). از دیدگاه ژئوشیمیایی، خاک‌های مناطق نیمه‌خشک به‌ویژه در ایران، به‌دلیل شرایط اقلیمی خاص (بارش پایین و نامنظم، تبخیر بالا و نوسانات دما)، مستعد تحولات شیمیایی غیرمعکوس مانند رسوب کربنات‌ها، هوازگی شدید کانی‌های سیلیکاتی و تثبیت غیرقابل بازیابی نیتروژن در فاز جامد هستند (Kalinin et al., 2021). این فرآیندها، همراه با کشاورزی ناپایدار (شیوه‌های خاک‌ورزی مکانیزه فشرده‌کننده، استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی و برداشت دائمی بقایای گیاهی)، منجر به چرخه‌ای منفی از تحلیل ساختاری و شیمیایی خاک شده که بازگشت آن نیازمند راهکارهای اصلاح و احیای مطمئن خاک است. در این بین، ارتقاء کیفیت شیمیایی خاک، به‌عنوان یکی از ارکان

اصلی سلامت خاک (Calfapietra et al., 2025). نه تنها به‌معنای بازگرداندن حاصلخیزی، بلکه به‌عنوان استراتژی جامع برای تقویت تاب‌آوری زیست‌بوم‌های کشاورزی در برابر تنش‌های اقلیمی مطرح می‌شود؛ امری که مستلزم توجه ویژه به تثبیت بلندمدت ذخایر کربن، بهینه‌سازی چرخه نیتروژن و جلوگیری از افزایش شوری خاک است (Dutta et al., 2024). از این‌رو، کیفیت خاک به‌عنوان یکی از معیارهای اصلی ارزیابی پایداری زیست‌بوم‌های کشاورزی تلقی شده و لذا سرمایه‌گذاری بر روی روش‌هایی که بتوانند به‌صورت پایدار، تغییرات نامطلوب را در ویژگی‌های شیمیایی خاک بازگردانند، ضروری است. در این میان، در دهه اخیر، زغال‌زیستی به‌عنوان یک اصلاح‌کننده کربن-بنیان و راهکاری برای بهبود کیفیت شیمیایی خاک موردتوجه گسترده‌ای قرار گرفته است (Luo et al., 2023).

زغال‌زیستی، حاصل تبدیل حرارتی (گرماکرافت) زیست‌توده در شرایط کمبود اکسیژن در دماهای معمولاً بین ۳۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس بوده (Emenike et al., 2024) که ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا و پایداری شیمیایی و زیستی بالای آن (به‌ویژه در زغال‌های زیستی تولیدشده در دمای بالا)، آن را به ماده‌ای منحصربه‌فرد برای تغییر تدریجی و پایدار خواص شیمیایی خاک تبدیل کرده است (Emenike et al., 2024). در این راستا، کاربرد زغال‌زیستی در بسیاری از پژوهش‌ها، بهبود قابل توجهی در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک ایجاد کرده است؛ به‌طوری که افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت (Barbosa et al., 2025)، بهبود غلظت نیتروژن و فسفر (Gagnon et al., 2023)، بهبود رفتار هیدرولیکی خاک (Esmailnezhad et al., 2025)، بهبود نفوذیری خاک‌های سنگین بافت (اسماعیل‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۴)، بهبود پایداری خاک‌دانه‌ها (یکزبان و همکاران، ۱۴۰۲)، بهبود رطوبت خاک (توکلی و همکاران، ۱۴۰۳) و کاهش رواناب و فرسایش (Gholamahmadi et al., 2023) در مدت‌زمان یک تا دو فصل زراعی گزارش شده‌اند. این یافته‌های امیدوارکننده، زغال‌زیستی را در فاز اولیه به‌عنوان اصلاح‌کننده‌ای مؤثر معرفی کرده‌اند. با این حال، شواهد روزافزونی حاکی از آن است که بسیاری از این اثرات، به‌ویژه مؤلفه‌های شیمیایی و متغیر خاک، با گذشت زمان کاهش یافته یا حتی برگشت‌پذیر هستند (Zanutel et al., 2024). این روند، ضرورت کاربرد مجدد و مداوم زغال‌زیستی را برای حفظ اثربخشی را ضروری می‌کند؛ امری که علاوه بر افزایش هزینه‌های مالی و انرژی، در بستر مدیریت‌های کشاورزی مقیاس‌بزرگ، منجر به کاهش پذیرش فناوری توسط ذینفعان (به‌ویژه کشاورزان) می‌شود. اگرچه زغال‌زیستی به‌دلیل ساختار آروماتیک و مقاوم خود امکان پایداری در خاک تا صدها سال را دارد (Spokas, 2010)، اما اثرات عملکردی آن بر حاصلخیزی و

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ممکن است با گذشت زمان تعدیل شود. این پدیده ناشی از فرآیندهای پیرشدگی، شامل اکسیداسیون سطحی، شستشوی عناصر معدنی زودجذب و مسدودشدن منافذ توسط ذرات ریز خاک یا پوشش‌های میکروبی است (Spokas, 2010). بنابراین، در ارزیابی اثرگذاری زغال‌زیستی، تمایز میان پایداری کربن (به‌عنوان مخزن اقلیمی) و پایداری خدمات زیست‌بومی (به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک) ضروری است. از این‌رو، بررسی تغییرات اثربخشی زغال‌زیستی در بهبود توان تولید خاک قبل از کاربرد آن در مقیاس کلان ضروری هست. در این بین، ویژگی‌های شیمیایی خاک به‌ویژه ماده آلی، نیتروژن کل، نسبت کربن به نیتروژن، pH و هدایت الکتریکی خاک به‌دلیل وابستگی ذاتی به حضور فاز کربنی پایدار و تغییرات در ساختار سطحی خاک، از بالاترین درجه حساسیت و پایداری پاسخ نسبت به کاربرد زغال‌زیستی برخوردارند (Wang et al., 2023).

در راستای بررسی تغییرات اثرگذاری زغال‌زیستی در طول زمان، Dong et al. (2016) نشان دادند که کاربرد زغال‌زیستی بعد از سه سال نیز محتوای کربن و نیتروژن کل و همچنین ماده آلی خاک را افزایش داد. در پژوهشی، Criscuoli et al. (2021) میزان ماندگاری اثر مثبت ۲۵ و ۵۰ تن در هکتار از زغال‌زیستی بر محتوای ماده آلی را بررسی کرده و یافته‌های ایشان حاکی از ماندگاری اثر ۵۰ تن در هکتار از زغال‌زیستی در بهبود محتوای ماده آلی بعد از دو سال کاربرد زغال‌زیستی بود. یافته‌های Wang et al. (2023) نشان داد که اثربخشی زغال‌زیستی در تثبیت نیتروژن در خاک پس از پنج سال تا ۴۲ تا ۶۸ درصد کاهش یافت. از طرفی، Abdul-Aziz et al. (2025) گزارش کردند که کاربرد هشت تن در هکتار از زغال‌زیستی در سال دوم علی‌رغم اثرگذاری در محتوای ماده آلی و نیتروژن خاک، با این‌حال، مقادیر این دو متغیر کمتر از سال اول بعد از کاربرد زغال‌زیستی بود. همچنین یافته‌های Molnárová et al. (2025) نیز نشان داد که اثرات مثبت زغال‌زیستی بر ویژگی‌ها و عملکرد خاک در طول زمان کاهش یافت، به‌طوری که هفت سال پس از کاربرد اولیه و سه سال پس از کاربرد مجدد، تفاوت معناداری در عملکرد مشاهده نشد. همچنین، Li et al. (2026) تأثیر دو ساله انواع و سطوح مختلف کاربرد زغال‌زیستی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در مقیاس صحرایی را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که بعد از دو سال، مصرف بیش از ۲۰ تن بر هکتار از زغال‌زیستی منجر به بهبود مؤلفه‌های خاک شده و درحالی‌که، انواع مختلف زغال‌زیستی اثرات متفاوتی داشتند. در نهایت، Moafi et al. (2026) نشان دادند که بعد از دو سال با کاربرد ۳۲/۵ تن بر هکتار از زغال‌زیستی حاصل از شاخه‌های درخت صنوبر در اراضی دیم رهاشده، رواناب سطحی و فرسایش کاهش یافته و پایداری

خاک‌دانه‌ها و ویژگی‌های شیمیایی-زیستی خاک بهبود یافت. جمع‌بندی پیشینه پژوهشی نشان داد که اثرات مثبت زغال‌زیستی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک و به‌ویژه ماده آلی و نیتروژن در سال‌های اولیه (به‌ویژه در سطوح مصرف بالا) قابل توجه است، اما با گذشت زمان (معمولاً پس از سه تا پنج سال)، به‌طور معناداری کاهش می‌یابد. با توجه به تشدید تخریب اراضی در مناطق نیمه‌خشک و امکان کاهش پایداری اثرات کاربرد زغال‌زیستی در بازه‌های زمانی بیش از یک سال بر شاخص‌های کلیدی سلامت خاک، ماده آلی، نیتروژن کل، نسبت کربن به نیتروژن، pH و هدایت الکتریکی خاک، انجام پژوهشی برای ارزیابی سه ساله تأثیر کاربرد یک‌باره سطوح مختلف زغال‌زیستی بر بهبود کیفیت شیمیایی خاک در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک ضروری است که پیش از این کمتر مورد توجه قرار گرفته است. چرا که عدم شناخت سطح مصرف در کنار افق زمانی مؤثر و نیاز به کاربردهای مکرر، می‌تواند مانع از پذیرش مقیاس‌بزرگ این فناوری شود. تحلیل و ارزیابی پویایی زمانی اثرات کاربرد یک‌باره زغال‌زیستی در سطوح مختلف مصرف طی سه سال پیاپی (انتهای سال‌های اول، دوم و سوم) با بهره‌گیری از طرح اندازه‌گیری‌های مکرر، از نوآوری‌های این پژوهش بوده که در مطالعات پیشین کمتر به آن پرداخته شده است. از این‌رو، این پژوهش با هدف بررسی روند تغییرات و پایداری ویژگی‌های کلیدی شیمیایی خاک تحت تأثیر کاربرد یک‌باره زغال‌زیستی در سطوح ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار در سه بازه زمانی مجزا (انتهای سال‌های اول، دوم و سوم) در شرایط صحرایی مناطق نیمه‌خشک انجام شد. فرضیه اصلی پژوهش حاضر این است که پاسخ ویژگی‌های شیمیایی خاک به کاربرد زغال‌زیستی در طول زمان الگوی خطی نداشته و اثرات اصلاحی کاربرد یک‌باره آن، به‌ویژه در سطح ۵۰ تن بر هکتار، طی سه سال پیاپی پایدار خواهد بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه با مختصات عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ درجه و ۵۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳۶۲ متر از سطح دریا در شهر ارومیه (دشت ارومیه)، استان آذربایجان غربی انجام شد (شکل ۱). منطقه دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد با بارندگی سالانه حدود ۳۴۰ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه ۱۱/۵ سلسیوس است (Esmacilnezhad et al., 2025).

۲-۲- طراحی و اجرای آزمایش

به منظور ارزیابی اثربخشی کاربرد زغال‌زیستی روی محتوای ماده آلی، نیتروژن کل، نسبت کربن به نیتروژن، pH و هدایت الکتریکی خاک

در طول زمان سه سال در شرایط صحرایی، ۲۵ و ۵۰ تن زغال‌زیستی بر هکتار در یک مرحله و در قالب طرح کاملاً تصادفی (به دلیل وجود شرایط تقریباً یکسان در بستر اجرای آزمایش) در سال ۱۴۰۱ به خاک کرت‌های آزمایشی افزوده شد. بافت خاک بستر آزمایش لومی رسی (خاک نیمه سنگین) بوده که با روش هیدرومتری اندازه‌گیری شد. وسعت زمین مورد مطالعه ۳۲۴ مترمربع (۱۸×۱۸ متر) و شامل نه قطعه کرت به ابعاد ۱۰ متر مربع (۲×۵ متر) است (شکل ۱). در این پژوهش دو تیمار سطح مصرف زغال‌زیستی (۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار) و همچنین یک تیمار شاهد (بدون هیچ‌گونه اعمال زغال‌زیستی/صفر تن بر هکتار)، با سه تکرار و در مجموع نه کرت آزمایشی طراحی شد (Gao et al., 2020). به عبارتی، زغال‌زیستی در تیمارهای مطالعاتی در طول سه سال بازه زمانی آزمایش صرفاً یک بار و در ابتدای شروع آزمایش (سال ۱۴۰۱) اعمال شد. (شکل ۱).

ضایعات چوبی صنوبر (*Populus spp.*)، حاصل از جنگل‌کاری‌های در شمال غرب ایران برای تولید زغال‌زیستی انتخاب شدند (Randolph et al., 2017). این ضایعات ابتدا به قطعات کوچک‌تر از چهار میلی‌متر خرد شدند، سپس در معرض هوای آزاد تا رسیدن به محتوای رطوبت تعادلی خشک شده و در نهایت تحت شرایط حداقل حضور اکسیژن در کوره الکتریکی نیمه‌صنعتی، به مدت ۱۲۰ دقیقه و در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس و به‌صورت تدریجی با سرعت افزایش دمای ۱۰ تا ۱۵ درجه سلسیوس گرم‌اکرافت شدند (Jeon et al., 2021). زغال‌زیستی حاصل سپس آسیاب و از الک‌های استاندارد آمریکایی با مش‌های ۳۵ تا ۱۸ عبور داده شده ذراتی با اندازه ذرات بین ۰/۵ تا یک میلی‌متر به‌دست آید که برای استفاده در خاک‌های با بافت سنگین مناسب است (Bruun et al., 2023). بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام‌شده، مقادیر pH، هدایت الکتریکی، جرم ویژه ظاهری، نیتروژن کل و محتوای ماده آلی زغال‌زیستی تولیدشده به‌ترتیب برابر با ۹/۴۳، ۴/۹۰ دسی‌زیمنس بر متر، ۰/۴۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۰/۵۱ درصد و ۷/۴۸ درصد بود. همچنین، مقادیر pH، هدایت الکتریکی، جرم مخصوص ظاهری، نیتروژن کل و محتوای ماده آلی خاک محدوده مورد مطالعه (مزرعه تحقیقاتی، نه تیمارهای شاهد) به‌ترتیب برابر با ۷/۷۶، ۱/۳۹ دسی‌زیمنس بر متر، ۱/۲۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۰/۱۴ درصد و ۰/۹۸ درصد بود. افزودن زغال‌زیستی به‌صورت پاشش یکنواخت در سطح خاک انجام شد و با خاک سطحی تا عمق ۲۵ سانتی‌متر مخلوط شد (شکل ۱).

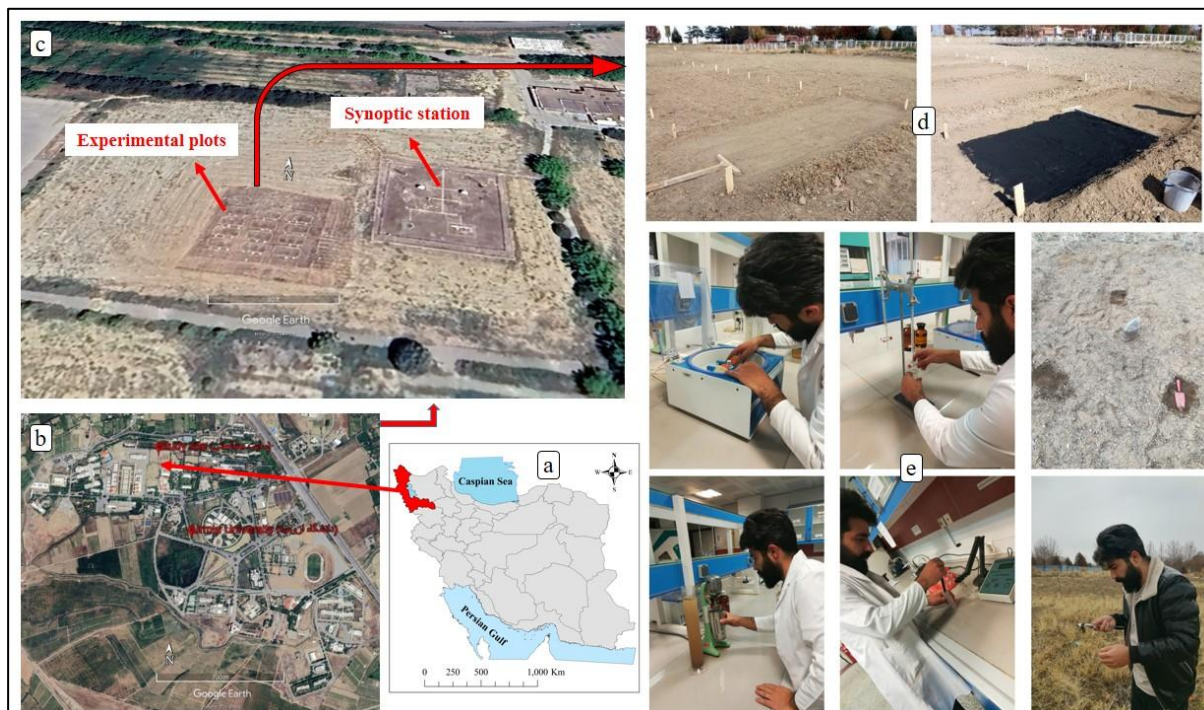
۲-۳- اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی مورد بررسی خاک

در این پژوهش، محتوای ماده آلی، نیتروژن کل، pH و هدایت الکتریکی خاک به‌عنوان ویژگی‌های مهم شیمیایی خاک در انتهای سال اول، دوم و سوم بعد از کاربرد زغال‌زیستی در هر سه تیمار

اندازه‌گیری شدند (شکل ۱). برای تعیین محتوای ماده آلی خاک، ابتدا کربن آلی خاک با روش اکسیداسیون تر والکی-بلک (Walkley and Black, 1934) اندازه‌گیری شد. برای تبدیل کربن آلی کل به ماده آلی کل از ضریب تبدیل استاندارد ۱/۷۲۴ استفاده شد. هرچند، تبدیل کربن آلی به ماده آلی خاک با استفاده از ضریب استاندارد ۱/۷۲۴، بر این فرض استوار است که ماده آلی دارای محتوای کربنی حدود ۵۸ درصد است. با توجه به اینکه زغال‌زیستی دارای غلظت کربن بالاتر و ساختار شیمیایی مقاوم‌تری است، این ضریب ممکن است به‌طور دقیق بازتاب‌دهنده نسبت‌های استوکیومتری ماده آلی مشتق‌شده از زغال‌زیستی نباشد. با این حال، این ضریب به‌منظور حفظ هماهنگی با دستورالعمل‌های استاندارد گزارش‌دهی ویژگی‌های خاک و اطمینان از قابلیت مقایسه نتایج با مطالعات پیشین که از روش‌های تحلیلی مشابهی استفاده کرده‌اند، به‌کار برده شد (Pribyl, 2020). برای اندازه‌گیری نیتروژن کل خاک، از روش کج‌لدال (Kjeldahl, 1883) استفاده شد که در سه مرحله اصلی، هضم، تقطیر و تیتراسیون، انجام گرفت. همچنین، بر اساس کربن آلی و نیتروژن کل اندازه‌گیری‌شده، نسبت کربن به نیتروژن (C/N) نیز محاسبه شد. در نهایت، pH و هدایت الکتریکی خاک در عصاره اشباع و مطابق با دستورالعمل‌های استاندارد و اندازه‌گیری شدند (Thomas, 1996).

۴-۲- تحلیل‌های آماری

پس از جمع‌آوری داده‌های مربوط به محتوای ماده آلی، نیتروژن کل، نسبت کربن به نیتروژن، pH و هدایت الکتریکی خاک در هر یک از تیمارهای مطالعاتی در سه بازه زمانی انتهایی یک، دو و سه سال پس از شروع آزمایش، پایگاه داده در Microsoft Excel 2016 تهیه شد. سپس، با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک نرمال‌بودن توزیع داده‌ها بررسی و تأیید شد (de Souza et al., 2023). آزمون لوون نیز برای بررسی همگنی واریانس‌ها داده‌ها استفاده شد که در نهایت مورد تأیید قرار گرفتند (O'Neill and Mathews, 2002). سپس آزمون تجزیه واریانس اندازه‌گیری‌های مکرر برای بررسی اثر کاربرد سطوح مختلف (صفر (شاهد)، ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار) زغال‌زیستی در سه بازه زمانی یک، دو و سه ساله (کاربرد زغال‌زیستی صرفاً یک بار در ابتدای آزمایش) بر ویژگی‌های شیمیایی مورد بررسی خاک کل انجام شد ($p \geq 0.05$) (Liu et al., 2021). همچنین، برای مقایسه میانگین متغیرهای مورد بررسی در بین تیمارهای مطالعاتی از آزمون تعقیبی حداقل اختلاف‌های معنادار استفاده شد ($p \geq 0.05$). تمام تحلیل‌های آماری با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۷ انجام شد.



شکل ۱- موقعیت قرارگیری کرت‌های آزمایشی در نقشه ایران و استان آذربایجان غربی (الف)، مزرعه تحقیقاتی دانشگاه ارومیه (ب)، سایت تحقیقاتی (ج)، نحوه اعمال زغال‌زیستی با سطوح مختلف به خاک (د) و اندازه‌گیری متغیرهای پوسته زیستی خاک (ه)

Figure 1- Location of experimental plots on the map of Iran and West Azerbaijan Province (a), Urmia University Research Farm (b), research site (c), method of applying biochar at different levels to the soil (d), and measurement of soil biological crust variables (e).

در پژوهش حاضر، ماده آلی خاک در انتهای سال اول، دوم و سوم تحت تأثیر معنادر تیمار بایوجار و برهم‌کنش تیمار در زمان قرار گرفت. به‌گونه‌ای که در تیمار شاهد، مقادیر ماده آلی در هر سه سال تقریباً یکسان بود ($p > 0.05$)؛ درحالی‌که در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار از زغال‌زیستی، این مقدار به‌ترتیب از ۲/۸۸ و ۳/۵۶ درصد وزنی در سال اول به ۱/۷۷ و ۲/۲۹ درصد وزنی در سال سوم رسید (شکل ۲). معناداری اثر متقابل نشان داد که سرعت تغییرات ماده آلی در طول زمان بسته به سطح مصرف زغال‌زیستی متفاوت است؛ به‌طوری‌که در سطوح بالاتر زغال‌زیستی، نرخ کاهش ماده آلی در سال‌های دوم و سوم کندتر از شاهد بود. این رفتار احتمالاً ناشی از پایداری ساختار آروماتیک زغال‌زیستی و تشکیل کمپلکس‌های آلی-معدنی است که تجزیه میکروبی کربن را کند می‌کند (Emenike et al., 2024). در مجموع، مقادیر ماده آلی در تیمار ۲۵ تن بر هکتار از زغال‌زیستی در سال‌های اول، دوم و سوم به‌ترتیب ۱۹۷، ۱۲۰ و ۹۵ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد بود (شکل ۲). در تیمار ۵۰ تن بر هکتار از زغال‌زیستی در سال‌های اول، دوم و سوم نیز مقدار ماده آلی به‌ترتیب ۲۶۷، ۱۹۵ و ۱۵۱ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد بود (شکل ۲). برخلاف روند ماده آلی، نیتروژن کل خاک اگرچه تحت تأثیر معنادر تیمار و زمان قرار گرفت، اما اثر متقابل تیمار در زمان برای آن معنادر نبود ($p > 0.05$). این یافته نشان می‌دهد که

۳- نتایج و بحث

یافته‌های حاصل از تجزیه واریانس اندازه‌گیری‌های مکرر نشان داد که کاربرد یک‌باره زغال‌زیستی حاصل از گرماکرافت چوب صنوبر، در بازه زمانی سه‌ساله (انتهای سال‌های اول، دوم و سوم)، تأثیر معناداری ($p < 0.05$) بر ویژگی‌های شیمیایی مورد بررسی خاک (ماده آلی، نیتروژن کل، نسبت کربن به نیتروژن، pH و هدایت الکتریکی) داشت (جدول ۱). اثر عامل زمان نیز بر تمام متغیرهای مورد مطالعه معنادر بود که نشان‌دهنده پویایی ذاتی این شاخص‌ها در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک است. از سویی دیگر، اثر متقابل تیمار و زمان برای ماده آلی و هدایت الکتریکی نیز معنادر بود ($p < 0.01$)؛ درحالی‌که برای نیتروژن کل، نسبت کربن به نیتروژن و pH معنادر نبود ($p > 0.05$). این الگو حاکی از آن است که اگرچه پاسخ برخی متغیرها به زغال‌زیستی در طول زمان تغییر می‌کند، اما اثرات اصلاحی بر نیتروژن، نسبت کربن به نیتروژن و pH از پایداری ساختاری در بازه سه‌ساله برخوردار است. این یافته از اهمیت ویژه‌ای در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک برخوردار است؛ زیرا چنین شرایط اقلیمی معمولاً منجر به تسریع در فرآیندهای تخریب مواد آلی و هدررفت نیتروژن خاک و همچنین کاهش عمر مؤثر اصلاح‌کننده‌های خاک می‌شوند (Kalinin et al., 2021; Zhou et al., 2022).

الگوی تغییرات زمانی نیتروژن در تمام سطوح زغال زیستی مشابه بوده و زغال زیستی صرفاً به عنوان یک منبع افزایش نیتروژن عمل کرده، بدون آن که الگوی زمانی پاسخ را تغییر دهد. مقدار نیتروژن کل در تیمار شاهد در هر سه سال مورد بررسی ثابت و یکسان بود ($p > 0.05$)؛ در حالی که در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار از زغال زیستی و در سه بازه زمانی یک، دو و سه ساله، این مقادیر به ترتیب ۰/۲۰، ۰/۱۶ و ۰/۱۵ درصد وزنی و ۰/۲۶، ۰/۲۲ و ۰/۲۰ درصد وزنی بود (شکل ۲). عدم معناداری اثرات متقابل تیمار و زمان حاکی از آن است که زغال زیستی در تمام بازه های زمانی به طور یکنواخت بر حفظ نیتروژن اثرگذار بوده است. افزایش مقدار نیتروژن در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار از زغال زیستی در سه بازه زمانی یک، دو و سه ساله نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۶۵، ۴۲ و ۲۲ درصد و ۱۰۸، ۹۷ و ۶۷ درصد بود (شکل ۲).

افزایش ماده آلی خاک بعد از سه سال می تواند علاوه بر حضور مستقیم کربن زغال زیستی، ناشی از بهبود شرایط خاک، از جمله نگهداری رطوبت، تعدیل pH و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی نیز باشد (Randolph et al., 2017). این یافته با نتایج Dong et al. (2016) همخوانی دارد که نشان دادند زغال زیستی در بلندمدت، ظرفیت ادغام کربن از منابع غیرزغالی (مانند ریزوم ها و ترشحات ریشه ای) را در تجمعات خاکی بهبود می بخشد. همچنین، شکل غیرخطی روند افزایشی، که با دو برابر شدن سطح مصرف (۲۵ به ۵۰ تن بر هکتار)، افزایش نسبی ماده آلی در سه بازه زمانی یک، دو و سه سال به ترتیب تنها ۳۴، ۳۹ و ۲۹ درصد بوده است، احتمالاً نشان دهنده نزدیک شدن به ظرفیت بارگیری حداکثری سطوح جذب زغال است؛ در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس، سطح ویژه زغال زیستی چوبی معمولاً در محدوده ۱۰۰ تا ۲۰۰ مترمربع بر گرم قرار دارد (Emenike et al., 2024) و با حضور گروه های عاملی فعال (مانند کربوکسیل و هیدروکسیل)، قادر به جذب مواد آلی محلول و تشکیل کمپلکس های کربن-معدنی است.

از سوی دیگر، پایداری افزایش نیتروژن کل در تیمار ۵۰ تن بر هکتار طی سه سال، چالشی در درک نقش زغال زیستی در چرخه نیتروژن ایجاد می کند؛ زیرا در گذشته، زغال زیستی عمدتاً به عنوان یک ذخیره گاه غیرفعال برای یون های آمونیوم و نیتрат با فرآیند جذب غیرقابل بازایی در نظر گرفته می شد (Wang et al., 2023)، اما پایداری این افزایش در سال سوم حاکی از فعال شدن فرآیندهای پیچیده تر بیوشیمیایی است. به گونه ای که ساختار متخلخل زغال به عنوان محیط میکرومحفظه ای عمل کرده و پناهگاهی امن برای ریزوم وجودات تثبیت کننده نیتروژن و نیترات ساز فراهم آورده که با کاهش رقابت با ریشه های گیاه،

تثبیت زیستی گاز نیتروژن را تقویت می کند (Luo et al., 2023). از طرفی، زغال زیستی با افزایش pH و رطوبت محلی، قادر به فعال سازی ذخایر پنهان نیتروژن خاک، مانند ترکیبات هتروسیکلیک (پیریدین ها و کینولین های حاصل از تخریب گیاهی در شرایط خشک) یا کربنات های آمونیوم پایدار، است (Kalinin et al., 2021). از طرفی، کاهش نسبت کربن به نیتروژن ناشی از ورود انبوه کربن پایدار، از معدنی شدن تسریع یافته نیتروژن در شرایط نوسانات رطوبتی جلوگیری کرده و مزیت رقابتی بزرگی در محیط های خشک ایجاد نموده است (Dutta et al., 2024). نتایج نشان داد که نسبت افزایش نیتروژن (۳۶ درصد نسبی از ۲۵ به ۵۰ تن) بعد از سه سال کمی بیش از ماده آلی (۲۹ درصد) بوده است (شکل ۲)، که می تواند به دو عامل بازگردد؛ یکی اینکه نیتروژن به دلیل انحلال پذیری بیش تر، سریع تر به سایت های فعال زغال زیستی دسترسی یافته است و دیگری اینکه زغال زیستی در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس حاوی مقادیر قابل توجهی گروه های آمین و امید است که مستقیماً به ذخیره نیتروژن آلی خاک می افزایند (Emenike et al., 2024).

پایداری قابل توجه اثربخشی زغال زیستی بر متغیرهای ماده آلی (در هر دو سطح مصرفی ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار) و نیتروژن کل (در سطح مصرفی ۵۰ تن بر هکتار) در سال سوم بعد از کاربرد در این پژوهش با یافته های Abdul-Aziz et al. (2025) و Molnárová et al. (2025) که گزارش کرده اند کاهش اثربخشی پس از دو تا سه سال رخ می دهد، تا حدودی همخوانی ندارد. به عبارتی، استفاده پژوهش های یاد شده از سطوح مصرفی کم از زغال زیستی (کم تر از ۱۰ تن بر هکتار) و استفاده از مواد اولیه متفاوت برای تولید زغال زیستی می تواند از دلایل این عدم همخوانی با یافته های این پژوهش باشد. در این پژوهش، مقادیر ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار زغال زیستی مصرف شد که از حداقل مقدار لازم برای اثرگذاری پایدار در خاک های نیمه خشک (حدود ۲۰ تن بر هکتار؛ Gao et al., 2020) بیش تر بود؛ به همین دلیل، زغال زیستی توانست ارتباطات پایدار و مؤثری با ذرات خاک برقرار کند و اثرات خود را در طول زمان حفظ نماید. همچنین، زغال زیستی تولید شده در دمای متوسط (۴۵۰ درجه سلسیوس) تعادل بهینه ای بین پایداری ساختاری (ناشی از کربن آروماتیک) و فعالیت سطحی ناشی از گروه های عاملی مانند COOH- و OH- دارد؛ در حالی که زغال های دمای بالا (بیش تر از ۷۰۰ درجه سلسیوس) سطحی بی اثر تر و زغال های حاصل از زیست توده های نرم (مانند ضایعات کشاورزی) عمر مؤثر کوتاه تری دارند (Zanutel et al., 2024). از طرفی، خشکی طولانی مدت منطقه، به ویژه دو دوره متوالی خشکسالی در سال های دوم و سوم،

دوم در تیمار ۵۰ تن بر هکتار)، اما در هر دو تیمار ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار از زغال‌زیستی، این نسبت در سه بازه زمانی یک، دو و سه ساله به‌طور معنادار و به‌ترتیب ۷۵، ۵۳ و ۶۲ درصد و ۷۱، ۴۶ و ۵۲ درصد زیادت‌تر از شاهد بود ($p < 0.05$). هرچند، مقادیر نسبت کربن به نیتروژن بین دو تیمار ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار از زغال‌زیستی، در هیچ‌کدام از بازه‌های زمانی موردبررسی، اختلاف معناداری نداشتند ($p > 0.05$). افزایش نسبت کربن به نیتروژن می‌تواند ناشی از ورود مستقیم کربن پایدار زغال‌زیستی به خاک باشد. این پدیده در مناطق نیمه‌خشک که با محدودیت رطوبت مواجه هستند، می‌تواند به کاهش نرخ معدنی‌شدن نیتروژن و جلوگیری از هدررفت آن از طریق آبشویی یا تبخیر کمک نماید (Dutta et al., 2024). با این حال، افزایش بیش از حد این نسبت ممکن است منجر به بی‌حرکت‌سازی موقت نیتروژن شود، اما در این پژوهش، هم‌زمانی افزایش نیتروژن کل نشان می‌دهد که این افزودنی توانسته است تعادل مناسبی بین ذخیره کربن و فراهمی نیتروژن ایجاد کند.

احتمالاً فعالیت ریزموحودات تجزیه‌کننده را محدود کرده و به‌صورت موقت، ذخایر کربن و نیتروژن افزوده‌شده توسط زغال‌زیستی را ذخیره‌سازی نموده است؛ این پدیده که تأخیر اقلیمی نامیده می‌شود (Zhou et al., 2022)، با روند تدریجی افزایش نیتروژن نسبت به کربن در سال‌های میانی (سال دوم)، و شیب تندتر آن در سال سوم، هم‌خوانی دارد. نسبت کربن به نیتروژن خاک نیز تحت تأثیر کاربرد زغال‌زیستی قرار گرفت و در تیمارهای دریافت‌کننده زغال‌زیستی، مقادیر بالاتری را نسبت به شاهد نشان داد. مقدار این نسبت در تیمار شاهد برای سال‌های اول، دوم و سوم به‌ترتیب ۴/۷۱، ۵/۲۰ و ۵/۷۸ بوده که اختلاف معناداری با یک‌دیگر نداشتند ($p > 0.05$). درحالی‌که در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار از زغال‌زیستی، این مقادیر در سال‌های اول، دوم و سوم به‌ترتیب ۸/۲۷، ۷/۹۷ و ۹/۳۷ و همچنین ۸/۰۶، ۷/۶۳ و ۸/۸۳ بود (شکل ۲). اگرچه تفاوت آماری معناداری میان دو سطح مصرف ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار زغال‌زیستی از نظر این نسبت مشاهده نشد (به‌غیر از سال اول و

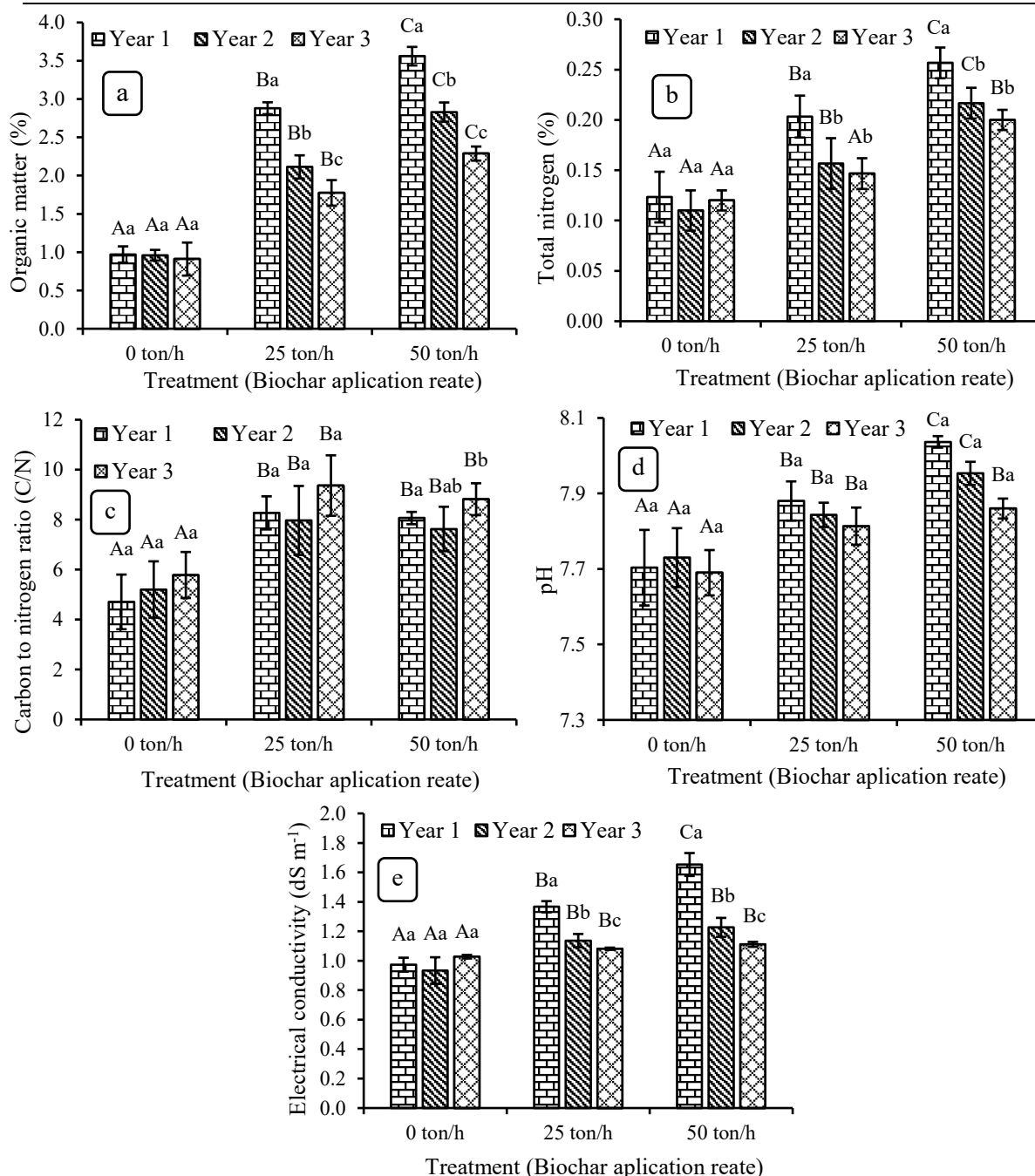
جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اندازه‌گیری‌های مکرر برای تخمین اختلافات ($p < 0.05$) اثرات مصرف یکباره سطوح مختلف

زغال‌زیستی در سه بازه زمانی یک، دو و سه ساله روی ماده آلی، نیتروژن کل، نسبت کربن به نیتروژن، pH و هدایت الکتریکی خاک.

Table 1. Results of repeated-measures analysis of variance (ANOVA) assessing the effects of a single application of different biochar rates (0, 25, and 50 t ha⁻¹) on soil organic matter, total nitrogen, carbon-to-nitrogen ratio, pH, and electrical conductivity measured over three-time intervals (1-, 2-, and 3-years post-application). Significant differences were considered at $p < 0.05$.

Variable	Sources	df	Mean Square	F-value	Sig.
Organic matter (%)	Treatment	2	8.860	320.08**	0.001
	Time	2	1.513	120.46**	0.001
	Treatment×Time	4	0.337	26.86**	0.001
Total nitrogen (%)	Treatment	2	0.026	57.63**	0.001
	Time	2	0.004	14.33**	0.001
	Treatment×Time	4	0.001	2.613ns	0.088
Carbon to Nitrogen (C/N)	Treatment	2	29.514	24.53**	0.001
	Time	2	3.113	3.91*	0.049
	Treatment×Time	4	0.238	3.00ns	0.873
pH	Treatment	2	0.133	77.80**	0.001
	Time	2	0.017	4.47*	0.035
	Treatment×Time	4	0.006	1.47ns	0.270
Electrical conductivity (dS m ⁻¹)	Treatment	2	0.284	175.71**	0.001
	Time	2	0.182	55.51**	0.001
	Treatment×Time	4	0.069	21.16**	0.001

**= significantly at $p < 0.01$; *= significantly at $p < 0.05$; ns= non significantly



شکل ۲- نمودار مقایسه‌ای ماده آلی (الف)، نیتروژن کل (ب)، نسبت کربن به نیتروژن (ج)، pH (د) و هدایت الکتریکی (ه) در تیمارهای سطوح مختلف مصرف زغال‌زیستی (صفر، ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار) بعد از یک، دو و سه سال از کاربرد. حروف بزرگ مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنادار ($p > 0.05$) در بین تیمارهای زغال‌زیستی در یک بازه زمانی مشخص و حروف کوچک مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنادار ($p > 0.05$) در بین زمان‌های اندازه‌گیری در یک تیمار مشخص هست.

Figure 2. Comparative variations in soil organic matter (a), total nitrogen (b), carbon-to-nitrogen ratio (c), pH (d), and electrical conductivity (e) across different biochar application rates (0, 25, and 50 t ha⁻¹) measured at 1, 2, and 3 years post-application. Within each sampling year, treatments sharing the same uppercase letters do not differ significantly ($p > 0.05$); within each biochar treatment, time points sharing the same lowercase letters do not differ significantly ($p > 0.05$).

زمانی پیچیده حفظ نموده است. نسبت کربن به نیتروژن خاک نیز تحت تأثیر کاربرد زغال‌زیستی قرار گرفت و در تیمارهای دریافت‌کننده زغال‌زیستی، مقادیر بالاتری را نسبت به شاهد

عدم معناداری اثر متقابل تیمار و زمان برای نسبت کربن به نیتروژن نشان می‌دهد که زغال‌زیستی صرفاً به‌عنوان یک منبع کربنی پایدار عمل کرده و نسبت اولیه را بدون ایجاد الگوی

نشان داد. مقدار این نسبت در تیمار شاهد برای سال‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۴/۷۱، ۵/۲۰ و ۵/۷۸ بوده که اختلاف معناداری با یکدیگر نداشتند ($p > 0.05$). درحالی‌که در تیمارهای ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار از زغال‌زیستی، این مقادیر در سال‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۸/۲۷، ۷/۹۷ و ۹/۳۷ و همچنین ۸/۰۶، ۷/۶۳ و ۸/۸۳ بود (شکل ۲). اگرچه تفاوت آماری معناداری میان دو سطح مصرف ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار زغال‌زیستی از نظر این نسبت مشاهده نشد (به‌غیر از سال اول و دوم در تیمار ۵۰ تن بر هکتار)، اما در هر دو تیمار ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار از زغال‌زیستی، این نسبت در سه بازه زمانی یک، دو و سه ساله به‌طور معنادار و به ترتیب ۷۵، ۵۳ و ۶۲ درصد و ۷۱، ۴۶ و ۵۲ درصد زیاده‌تر از شاهد بود ($p < 0.05$). هرچند، مقادیر نسبت کربن به نیتروژن بین دو تیمار ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار از زغال‌زیستی، در هیچ‌کدام از بازه‌های زمانی موردبررسی، اختلاف معناداری نداشتند ($p > 0.05$). افزایش نسبت کربن به نیتروژن می‌تواند ناشی از ورود مستقیم کربن پایدار زغال‌زیستی به خاک باشد. این پدیده در مناطق نیمه‌خشک که با محدودیت رطوبت مواجه هستند، می‌تواند به کاهش نرخ معدنی‌شدن نیتروژن و جلوگیری از هدررفت آن از طریق آبشویی یا تبخیر کمک نماید (Dutta et al., 2024). با این‌حال، افزایش بیش از حد این نسبت ممکن است منجر به بی‌حرکت‌سازی موقت نیتروژن شود، اما در این پژوهش، هم‌زمانی افزایش نیتروژن کل نشان می‌دهد که این افزودنی توانسته است تعادل مناسبی بین ذخیره کربن و فراهمی نیتروژن ایجاد کند. عدم معناداری اثر متقابل تیمار و زمان برای نسبت کربن به نیتروژن نشان می‌دهد که زغال‌زیستی صرفاً به‌عنوان یک منبع کربنی پایدار عمل کرده و نسبت اولیه را بدون ایجاد الگوی زمانی پیچیده حفظ نموده است. مقادیر pH خاک در تیمارهای زغال‌زیستی افزایش معناداری ($p < 0.01$) را نسبت به شاهد نشان داد، اما در سال سوم بعد از کاربرد زغال‌زیستی، بین دو سطح مصرفی تفاوت آماری معناداری مشاهده نشد (شکل ۲). مقدار pH در تیمار شاهد در هر سه بازه زمانی یکسان بود ($p > 0.05$)؛ با این‌حال، در تیمار ۲۵ تن بر هکتار از زغال‌زیستی و در سال‌های اول، دوم و سوم، مقدار pH خاک نسبت به شاهد به ترتیب ۲/۳، ۱/۵ و ۱/۶ درصد و در تیمار ۵۰ تن بر هکتار نیز به ترتیب ۴/۳، ۲/۹ و ۲/۲ درصد افزایش یافت ($p < 0.05$). مقدار pH خاک در تیمار ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار از زغال‌زیستی تفاوت معنی‌معناداری در طول سه سال با یکدیگر نداشتند ($p > 0.05$)؛ اگرچه، در سال اول و دوم، مقدار pH در تیمار ۵۰ تن بر هکتار از زغال‌زیستی به ترتیب دو و ۱/۴ درصد بیش‌تر از تیمار ۲۵ تن بر هکتار از زغال‌زیستی بود. این یافته

نشان داد تعدیل pH خاک بعد از سه سال در هر دو سطح از زغال‌زیستی یکسان بوده و امکان کاهش آن در بازه‌های زمانی طولانی‌تر و برگشت به pH اولیه پیش‌بینی می‌شود (Blanco-Canqui et al., 2024)؛ از این‌رو، افزایش سطح مصرف زغال‌زیستی به ۵۰ تن بر هکتار، بعد از سه سال تأثیر اضافی معناداری بر pH نداشت. افزایش pH می‌تواند ناشی از حضور گروه‌های عاملی بازی و کاتیون‌های قلیایی در ساختار زغال‌زیستی باشد که این امر به نوبه خود بر فراهمی عناصر غذایی، مانند فسفر و مولیبدن و همچنین فعالیت میکروبی خاک تأثیرگذار است (Tusar et al., 2023). در خاک‌های نیمه‌خشک که معمولاً تمایل به قلیایی شدن دارند، این افزایش کم pH خطرناک نبوده و می‌تواند به حل‌شدگی برخی ریزمغذی‌ها کمک کند. هدایت الکتریکی خاک نیز پس از یک، دو و سه سال از شروع آزمایش در تیمار شاهد به ترتیب ۰/۹۷، ۰/۹۳ و ۱/۰۳ دسی‌زیمنس بر متر بوده که اختلاف معناداری بین آن‌ها مشاهده نشد ($p > 0.05$). با افزودن ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار از زغال‌زیستی و بعد از گذشت یک، دو و سه سال از آزمایش، مقادیر هدایت الکتریکی در تیمارهای مذکور به ترتیب ۱/۳۷، ۱/۱۴ و ۱/۰۸ دسی‌زیمنس بر متر و ۱/۶۵، ۱/۲۳ و ۱/۱۱ دسی‌زیمنس بر متر بود که منجر به افزایش به ترتیب ۴۰، ۲۲ و ۵/۲ درصدی و ۷۰، ۳۱ و ۸/۱ درصدی این متغیر شد (شکل ۲). از طرفی، صرفاً در بازه زمانی سال اول، مقدار هدایت الکتریکی در تیمار ۵۰ تن بر هکتار از زغال‌زیستی به‌صورت معنادار بیش‌تر (۲۱ درصد) از تیمار ۲۵ تن بر هکتار بود ($p < 0.05$). این رفتار نشان می‌دهد که اگرچه زغال‌زیستی حاوی مقداری املاح محلول است، اما در بازه مصرفی مورد مطالعه، خطر شوری‌زایی قابل‌توجهی برای خاک مورد مطالعه بعد از یک، دو و سه سال ایجاد نکرد و افزایش مشاهده‌شده در محدوده ایمن و حتی مفید (کم‌تر از دو دسی‌زیمنس بر متر) برای بهبود فعالیت میکروبی قرار دارد (Tusar et al., 2023). یافته‌های این پژوهش، که تحت شرایط میدانی و در خاک‌های نیمه‌خشک با بافت لومی رسی اجرا شد، نشان داد که اثربخشی زغال‌زیستی در مقیاس سه ساله تنها زمانی می‌تواند به‌عنوان راهکار پایدار معرفی شود که با تفکیک دقیق اهداف مدیریتی همراه باشد. در حالی که بعد از گذشت سه سال، ماده آلی خاک در هر دو مقدار مصرف زغال‌زیستی (۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار) افزایش معناداری نشان داد، نیتروژن کل تنها در مقدار ۵۰ تن بر هکتار افزایش آماری قابل‌توجهی داشت. این تفاوت نشان می‌دهد که فرآیندهای نگهداری کربن و نیتروژن، حساسیت متفاوتی به مقدار مصرف زغال‌زیستی و زمان دارند. این الگو با مدل ظرفیت جذب سطحی هم‌خوانی دارد (Luo et al., 2023) و بیانگر آن است که برای

تثبیت مؤثر نیتروژن، به‌ویژه به شکل آمونیوم یا ترکیبات آلی، باید مقدار زغال‌زیستی در خاک از یک حد مشخص فراتر رفته و یا هدف‌گذاری برای بازه زمانی کوتاه‌مدت (کم‌تر از سه سال) باشد (Emenike et al., 2024). به‌نظر می‌رسد در خاک‌های مورد مطالعه این پژوهش، مقدار ۲۵ تن بر هکتار برای رسیدن به این حد کافی نبوده است. در کنار تغییرات در ذخایر کربن و نیتروژن، نسبت کربن به نیتروژن، pH و هدایت الکتریکی نیز تغییراتی داشتند که الگوی این متغیرها با نیتروژن کل متفاوت بود. برخلاف نیتروژن کل که برای افزایش معنادار در بازه زمانی بیش از دو سال نیاز به سطح مصرف زیادتر از ۲۵ تن بر هکتار از زغال‌زیستی داشت، نسبت کربن به نیتروژن در هر دو سطح تیمار زغال‌زیستی نسبت به تیمار شاهد افزایش داشت، بدون آنکه افزایش سطح مصرف از ۲۵ به ۵۰ تن بر هکتار تفاوت آماری داشته باشد. این یکنواختی در پاسخ نسبت کربن به نیتروژن بیانگر آن است که سطح مصرف ۲۵ تن بر هکتار نیز برای بهبود این متغیر کفایت می‌کند. افزایش این نسبت نشان می‌دهد که کربن پایدار زغال‌زیستی وارد خاک شده است؛ این کربن باعث می‌شود نیتروژن آرام‌تر آزاد شود و در تغییرات رطوبت خاک، هدر نرود (Dutta et al., 2024). از نظر pH خاک، افزودن زغال‌زیستی باعث افزایش کم قلیائیت خاک شد. با این حال، بعد از گذشت سه سال، افزایش سطح مصرف زغال‌زیستی از ۲۵ به ۵۰ تن بر هکتار، تغییر معناداری در pH ایجاد نکرد. این موضوع نشان می‌دهد که افزودن زغال‌زیستی در سطح مصرف ۵۰ تن بر هکتار در دو سال اول کاربرد، منجر به افزایش بیش‌تر pH خواهد شد، اما با گذشت بیش از دو سال، اثرگذاری آن در افزایش این متغیر، همانند سطح مصرف ۲۵ تن بر هکتار شده در طولانی‌مدت، افزایش بیش‌تر سطح مصرف، اثر اضافی قابل‌توجهی بر این شاخص ندارد (Blanco-Canqui et al., 2024). این افزایش pH احتمالاً به دلیل ورود کاتیون‌های بازی (مانند کلسیم، منیزیم و پتاسیم) و ترکیبات قلیایی موجود در زغال‌زیستی است که با خنثی‌کردن یون‌های اسیدی، محیط خاک را برای جذب بهتر عناصری مانند فسفر و مولیبدن و نیز فعالیت ریزموجودات خاکری مناسب‌تر می‌کنند (Tusar et al., 2023). بررسی شوری خاک نشان داد که هدایت الکتریکی در خاک‌های تحت افزودن زغال‌زیستی کمی افزایش یافت، اما بعد از سال اول مصرف، بین دو سطح کاربرد ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار تفاوت معناداری وجود نداشت. با وجود ورود مقداری نمک همراه زغال‌زیستی، میزان شوری نهایی در محدوده سالم و غیرشور باقی ماند و جای نگرانی برای آسیب نمکی به خاک نبود. این افزایش ملایم در هدایت الکتریکی احتمالاً نشان‌دهنده آزاد شدن تدریجی مواد غذایی از

زغال‌زیستی است که در شرایط خشک، به فعالیت بهتر ریزموجودات و دسترسی گیاه به عناصر کمک می‌کند (Zhou et al., 2022). در مجموع، در سال سوم اجرای آزمایش، برای شاخص‌هایی مانند نسبت کربن به نیتروژن، pH و شوری، سطح مصرف ۲۵ تن بر هکتار کارایی لازم را داشت و افزایش آن به ۵۰ تن بر هکتار، برتری خاصی برای این موارد ایجاد نکرد. به‌عبارتی، یافته‌های این پژوهش نشان داد که سطح مصرف بهینه برای تمام اهداف یکسان نیست. در اراضی کشاورزی با محدودیت‌های فیزیکی ذاتی (مانند کم بودن تخلخل مؤثر، تمایل به پوسته‌شدگی و نفوذپذیری کم)، سطح ۲۵ تن بر هکتار می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای اقتصادی-کارآمد برای بهبود ساختار خاک، افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها، تقویت ظرفیت بافری pH و تنظیم نسبت کربن به نیتروژن عمل کند؛ چراکه رسیدن ماده آلی به بیش از ۱/۵ درصد، آستانه‌ای شناخته‌شده برای ثبات حاصلخیزی در خاک‌های نیمه‌خشک است (Calfapietra et al., 2025). این سطح، با افزایش نفوذپذیری و کاهش رواناب (Gholamahmadi et al., 2023)، پتانسیل بهبود شرایط زراعی را بدون نیاز به سرمایه‌گذاری زیاد فراهم می‌آورد. در مقابل، در سامانه‌هایی که هدف، کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی، به‌ویژه نیتروژن می‌باشد (مانند کشت ارگانیک یا سامانه‌های کم‌نهاد)، تنها سطح ۵۰ تن بر هکتار می‌تواند ذخیره نیتروژن را به حدی افزایش دهد که آزادسازی تدریجی آن در طول فصل رشد، تضمین‌کننده تغذیه پایدار گیاه باشد (Gagnon et al., 2021). این افزایش، در شرایط تنش رطوبتی، که در مناطق نیمه‌خشک شایع است، از معدنی‌شدن تسریع‌یافته جلوگیری کرده و از هدررفت نیتروژن می‌کاهد (Dutta et al., 2024). هم‌چنین، اگرچه به‌طور نظری انتظار می‌رود که افزودن زغال‌زیستی باعث افزایش کربن آلی خاک شود، اما یافته مهم این پژوهش آن است که در شرایط صحرایی منطقه نیمه‌خشک این پژوهش و پس از سه سال، ویژگی‌های مختلف خاک واکنش‌های متفاوتی به زغال‌زیستی نشان دادند. درحالی‌که ماده آلی در هر دو سطح مصرف ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار بهبود یافت، نیتروژن کل تنها در سطح مصرف زیادتر (۵۰ تن بر هکتار) از زغال‌زیستی افزایش معناداری داشت. در مقابل، متغیر نسبت کربن به نیتروژن، حتی در سطح مصرف کم‌تر (۲۵ تن بر هکتار) از زغال‌زیستی به حداکثر اثر خود رسیدند و افزایش سطح مصرف به ۵۰ تن، تغییر اضافی در آن ایجاد نکرد. این الگوی غیرخطی نشان می‌دهد که فرآیندهای تثبیت عناصر غذایی توسط زغال‌زیستی، پیچیده‌تر از یک رابطه ساده میان مقدار مصرف و اثرگذاری است. بنابراین، برای مدیریت بهینه خاک، لازم است بر اساس هدف مورد نظر (افزایش کربن،

نیترژن یا اصلاح شیمیایی)، سطح مصرف مناسب و همچنین بازه زمانی پایداری اصلاح‌گر شناسایی شود (Blanco-Canqui et al., 2024). بر اساس نتایج این پژوهش، کاربرد یک‌باره زغال زیستی اثرات ماندگاری حداقل تا سه سال داشته و برخلاف کودهای شیمیایی مرسوم، فاقد نیاز به تمدید سالانه است؛ ویژگی‌ای که امکان سرشکن‌شدن هزینه‌های اولیه را در افق زمانی بهره‌برداری فراهم می‌کند. با این حال، به‌منظور تضمین پذیرش مطمئن‌تر این فناوری توسط بهره‌برداران، انجام ارزیابی‌های اقتصادی جامع و میدانی برای سطح کاربرد ۲۵ تن در هکتار (به‌عنوان گزینه‌ای متعادل جهت حفظ سلامت پایه خاک) ضروری می‌نماید. یافته‌های حاضر نشان داد که تعمیم نرخ‌های کاربرد زغال زیستی بدون در نظر گرفتن پاسخ‌های تفکیک‌شده مؤلفه‌های خاک، می‌تواند منجر به ناکارآمدی عملیاتی شود. اثرات زغال زیستی در سال سوم از بین نرفته، بلکه به‌صورت ناهمگون در پارامترهای مختلف خاک تداوم یافته است. تلفیق این بینش زمانی با تحلیل‌های اقتصادی آتی، مسیر را برای مدیریت هوشمند، پایدار و عملیاتی اراضی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هموار خواهد ساخت.

۴- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که پاسخ ویژگی‌های شیمیایی خاک به کاربرد یک‌باره زغال زیستی، الگویی ثابت و خطی ندارد، بلکه پویایی آن تحت تأثیر افق‌های زمانی یک، دو و سه‌ساله پس از کاربرد قرار دارد. در بازه‌ی یک‌ساله (سال اول)، زغال زیستی با بیشینه شدت اثر، موجب افزایش قابل توجه تمامی شاخص‌های مورد بررسی شد؛ به‌طوری‌که در سطح ۵۰ تن بر هکتار، مقادیر ماده آلی، نیترژن کل، pH و هدایت الکتریکی به اوج خود رسیدند. با ورود به بازه دوساله (سال دوم)، اگرچه مقادیر ماده آلی و هدایت الکتریکی روندی کاهشی نسبت به سال اول نشان دادند، اما همچنان به‌طور معناداری بالاتر از تیمار شاهد حفظ شدند. در این بازه، اثرات تعدیل‌کننده زغال زیستی از فاز اوج اولیه عبور کرده و به‌نظر می‌رسد فرآیندهای پیرشدگی سطحی و تثبیت کمپلکس‌های آلی-معدنی آغاز شد. در بازه سه‌ساله (سال سوم)، پدیده‌ی تعادل‌یابی و پایداری نسبی رخ داد؛ بدین معنا که اثرات اصلاحی زغال زیستی به یک سطح پایدار نزدیک شد. در پایان سال سوم، ماده آلی خاک در هر دو سطح ۲۵ و ۵۰ تن بر هکتار افزایش معناداری را حفظ کرد، اما نیترژن کل تنها در سطح ۵۰ تن بر هکتار از پایداری آماری برخوردار بود. از سوی دیگر، شاخص‌های نسبت کربن به نیترژن، pH و هدایت الکتریکی پس از سه سال به حد اشیاع عملکردی خود رسیده بودند و افزایش سطح مصرف از ۲۵ به ۵۰ تن بر هکتار، برتری معناداری در سال سوم ایجاد نکرد. عدم معناداری برهم‌کنش تیمار و زمان برای نیترژن، نسبت‌کربن به نیترژن و pH

حاکمی از آن است که زغال زیستی در طول این سه سال به‌صورت یکنواخت و بدون نوسان شدید بر این متغیرها اثرگذار بوده، درحالی‌که معناداری این برهم‌کنش برای ماده آلی و هدایت الکتریکی نشان‌دهنده حساسیت این دو شاخص به گذر زمان و فرآیندهای طبیعی خاک است. این الگوی نوسانی-پایدار در طول سه سال نشان می‌دهد که کارایی زغال زیستی وابسته به هم‌زمانی سطح مصرف و بازه زمانی مورد انتظار است. در کوتاه‌مدت (سال اول)، حتی سطوح پایین‌تر پاسخ‌های سریع نشان می‌دهند، اما برای تداوم اثرات در میان‌مدت و بلندمدت (سال‌های دوم و سوم)، سطح ۲۵ تن بر هکتار برای شاخص‌های ساختاری و تنظیم‌کننده (نسبت کربن به نیترژن، هدایت الکتریکی و pH) کافی و اقتصادی است، درحالی‌که حفظ ذخایر نیترژن در افق سه‌ساله نیازمند سطح ۵۰ تن بر هکتار است. بنابراین، انتخاب سطح مصرف باید مبتنی بر هدف مدیریتی و بازه زمانی پایش باشد. به‌گونه‌ای که برای احیای پایه سلامت خاک و بهبود ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی در اراضی با محدودیت نفوذپذیری، ۲۵ تن بر هکتار گزینه‌ای پایدار در چرخه سه‌ساله است؛ اما در سامانه‌های کم‌نهاده یا ارگانیک که هدف، کاهش وابستگی به کودهای نیترژنی طی چندین فصل زراعی است، سطح ۵۰ تن بر هکتار ضرورت می‌یابد. این دیدگاه هدف‌محور و زمان‌آگاه، از هدررفت منابع جلوگیری کرده و پایه‌ای برای طراحی برنامه‌های حمایتی مشروط به اهداف احیاء فراهم می‌آورد. با وجود دستاوردهای این پژوهش، یافته‌ها محدود به شرایط اقلیمی نیمه‌خشک، بافت لومی رسی و زغال زیستی چوب صنوبر (دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس) است. با توجه به مشاهده روند تثبیت تدریجی اثرات تا پایان سال سوم، پیشنهاد می‌شود پایش‌های بلندمدت‌تر (پنج تا ۱۰ ساله) برای شناسایی نقطه دقیق شروع افت اثرگذاری یا زمان‌بندی بهینه مصرف مجدد در کنار تحلیل‌های اقتصادی جامع انجام شود. همچنین، مطالعات آتی با بهره‌گیری از ردیابی ایزوتوپی، تفکیک کسرهای کربن آلی، اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی و ارزیابی ترکیب زغال زیستی با روش‌های مدیریت طبیعت‌محور، می‌توانند چارچوب دقیق‌تری برای تعیین منحنی پایداری زمانی زغال زیستی و سطح اقتصادی آن در چرخه‌های چندساله‌ی کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه دهند.

سیاس‌گذاری

این پژوهش در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد انجام شده که از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه ارومیه نهایت قدردانی را دارد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

احسان پورحسین: نمونه‌برداری، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **حسین خیرفام:** مفهوم‌سازی، راهنمایی، نظارت بر اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **کامران زینالزاده:** مفهوم‌سازی، راهنمایی، بازبینی متن مقاله، کنترل نتایج تحلیل‌های آماری؛ **رضا اسماعیل‌نژاد و هانیة فرامرزی:** مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری، کنترل نتایج.

منابع

اسماعیل‌نژاد، رضا، زینالزاده، کامران، بشارت، سینا، و خیرفام، حسین (۱۴۰۴). تأثیر نرخ‌های کاربرد زغال‌زیستی بر

Results from a two-year field experiment. *Forests*, 12(10), 1350. doi:10.3390/f12101350.

de Souza, R.R., Toebe, M., Mello, A.C. & Bittencourt, K.C. (2023). Sample size and Shapiro-Wilk test: An analysis for soybean grain yield. *European Journal of Agronomy*, 142, 126666. doi:10.1016/j.eja.2022.126666.

Dong, X., Guan, T., Li, G., Lin, Q., & Zhao, X. (2016). Long-term effects of biochar amount on the content and composition of organic matter in soil aggregates under field conditions. *Journal of Soils and Sediments*, 16(5), 1481-1497. doi:10.1007/s11368-015-1338-5.

Dutta, D., Meena, A.L., Bhanu, C., Ghasal, P.C., Choudhary, J., Kumar, S., Mishra, R.P., Ansari, M.A., KJ, R., Prusty, A.K., & Jat, P.C. (2024). Sustainable soil management for climate resilience: Long-term management effects on soil carbon sequestration and nitrogen dynamics in a semi-arid tropical Inceptisol of India. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(3), 4407-4426. doi:10.1007/s42729-024-01844-4.

Emenike, E.C., Iwuozor, K.O., Ighalo, J.O., Bamigbola, J.O., Omonayin, E.O., Ojo, H.T., Adeleke, J., & Adeniyi, A.G. (2024). Advancing the circular economy through the thermochemical conversion of waste to biochar: a review on sawdust waste-derived fuel. *Biofuels*, 15(4), 433-447. doi:10.1080/17597269.2023.2255007.

Esmailnezhad, R., Zeinalzadeh, K., Besharat, S., & Kheirfam, H. (2025). Field study on the hydraulic behavior of heavy soil: Effects of biochar application rates. *Science of the Total Environment*, 1004, 180752. doi:10.1016/j.scitotenv.2025.180752.

Gagnon, B., Ziadi, N., & Manirakiza, E. (2021). Co-application of wood biochar and paper mill

تغییرات زمانی مشخصات نفوذ در یک خاک سنگین.

مدیریت آب در کشاورزی، ۱۱۲(۱)، ۱۲۳-۱۳۸. doi: 10.22034/wmaj.2025.209549.

توکلی، الهام، قاسمی، احمدرضا، و متقیان، حمیدرضا (۱۴۰۳). تأثیر استفاده ترکیبی از زغال‌زیستی و بنتونیت بر میزان تبخیر و رطوبت خاک. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۴(۳)، ۱۸۶-۱۷۳. doi: 10.22098/mmws.2023.13053.1297.

یکزبان، عباس، موسوی، سید علی‌اکبر، ثامن، عبدالمجید، و رضایی، مهروز (۱۴۰۲). تأثیرگذاری زغال‌زیستی برگ نخل و تفاله لیموترش بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی یک خاک لوم شنی. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۱)، ۸۳-۶۹. doi: 10.22098/mmws.2022.11264.1111.

References

Abdul-Aziz, A.L., Abukari, I.A., Galadima, M.M., Haruna, A., Abubakari, M., & Abdulai, R. (2025). Biochar effects on soil properties and yield of maize in Northern region, Ghana. *Discover Agriculture*, 3(1), 103. doi:10.1007/s44279-025-00271-y.

Ahmed, Z., Gui, D., Abd-Elmabod, S.K., Murtaza, G., & Ali, S. (2024). An overview of global desertification control efforts: Key challenges and overarching solutions. *Soil Use and Management*, 40(4), e13154. doi:10.1111/sum.13154.

Barbosa, T.A., Gomes Filho, R.R., Wisniewski Jr, A., & Mašek, O. (2025). Biochar physical degradation: Long-term effects as soil amendments. *Biomass and Bioenergy*, 203, 108284. doi:10.1016/j.biombioe.2025.108284.

Blanco-Canqui, H., Creech, C.F., & Easterly, A.C. (2024). How does biochar impact soils and crops in a semi-arid environment? A 5-yr assessment. *Field Crops Research*, 310, 109340. doi: 10.1016/j.fcr.2024.109340.

Bruun, E.W., Ravenni, G., Müller-Stöver, D., & Petersen, C.T. (2023). Small biochar particles added to coarse sandy subsoil greatly increase water retention and affect hydraulic conductivity. *European Journal of Soil Science*, 74(6), e13442. doi:10.1111/ejss.13442.

Calfapietra, C., Di Lonardo, S., Peruzzi, E., Doni, S., & Masciandaro, G. (2025). Perspectives from nature-based solutions to restore soil and ecosystems. *European Journal of Soil Science*, 76(6), 70134. doi:10.1111/ejss.70134.

Criscuoli, I., Ventura, M., Wiedner, K., Glaser, B., Panzacchi, P., Ceccon, C., Loesch, M., Raifer, B., & Tonon, G. (2021). Stability of woodchips biochar and impact on soil carbon stocks:

- biosolids affects yield and short-term nitrogen and phosphorus availability in temperate loamy soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 102(1), 131-146. doi:10.1139/cjss-2021-0025.
- Gao, Y., Li, T., Fu, Q., Li, H., Liu, D., Ji, Y., Li, Q., & Cai, Y. (2020). Biochar application for the improvement of water-soil environments and carbon emissions under freeze-thaw conditions: An in-situ field trial. *Science of the Total Environment*, 723, 138007. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138007.
- Gholamamjadi, B., Jeffery, S., Gonzalez-Pelayo, O., Prats, S.A., Bastos, A.C., Keizer, J.J., & Verheijen, F.G. (2023). Biochar impacts on runoff and soil erosion by water: A systematic global scale meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 871, 161860. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.161860.
- Jeon, J., Kim, H.I., Park, J.H., Wi, S., & Kim, S. (2021). Evaluation of thermal properties and acetaldehyde adsorption performance of sustainable composites using waste wood and biochar. *Environmental Research*, 196, 110910. doi:10.1016/j.envres.2021.110910.
- Kalankesh, L.R., Rodriguez-Couto, S., Alami, A., Khosravan, S., Meshki, M., Ahmadov, E., Mohammadpour, A., & Bahri, N. (2022). Socio-environmental determinants and human health exposures in arid and semi-arid zones of Iran-narrative review. *Environmental Health Insights*, 16, 1-10. doi:10.1177/11786302221089738.
- Kalinin, P.I., Kudrevatykh, I.Y., Malyshev, V.V., Pilguy, L.S., Buhonov, A.V., Mitenko, G.V., & Alekseev, A.O. (2021). Chemical weathering in semi-arid soils of the Russian plain. *Catena*, 206, 105554. doi:10.1016/j.catena.2021.105554.
- Kjeldahl, J. (1883). A new method for the determination of nitrogen in organic matter. *Zeitschrift für Analytische Chemie*, 22, 366-382. doi:10.1007/BF01338151.
- Li, C., Li, C., Chen, M., Li, C. & Li, C. (2026). Effects of biochar type and application rate on the labile organic carbon fractions of soil aggregates in tropical agricultural fields. *Plant and Soil*, 518(1), 917-932. doi:10.1007/s11104-025-08036-8.
- Liu, B., Li, H., Li, H., Zhang, A. & Rengel, Z. (2021). Long-term biochar application promotes rice productivity by regulating root dynamic development and reducing nitrogen leaching. *Gcb Bioenergy*, 13(1), 257-268. doi:10.1111/gcbb.12766.
- Luo, L., Wang, J., Lv, J., Liu, Z., Sun, T., Yang, Y., & Zhu, Y.G. (2023). Carbon sequestration strategies in soil using biochar: advances, challenges, and opportunities. *Environmental Science & Technology*, 57(31), 11357-11372. doi:10.1021/acs.est.3c02620.
- Moafi, G., Gholami, L., Kavian, A. & Kheirfam, H. (2026). Two-year monitoring of biochar effects on soil and water conservation in USLE plots under field conditions. *International Soil and Water Conservation Research*, 100665. doi:10.1016/j.iswcr.2026.100665.
- Molnárová, M., Aydın, E., Šimanský, V., Čimo, J., Mirzaei, M., Buchkina, N.P., & Horák, J. (2025). Persistence of biochar effects on soil and nitrous oxide emissions: Evaluating single vs. repeated applications in multi-year field trial. *Agriculture*, 15(21), 2259. doi:10.3390/agriculture15212259.
- O'Neill, M.E. & Mathews, K.L. (2002). Levene tests of homogeneity of variance for general block and treatment designs. *Biometrics*, 58(1), 216-224. doi:10.1111/j.0006-341X.2002.00216.x.
- Pribyl, D.W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*, 156(3-4), 75-83. doi:10.1016/j.geoderma.2010.02.003.
- Randolph, P., Bansode, R.R., Hassan, O.A., Rehrah, D.J., Ravella, R., Reddy, M.R., Watts, D.W., Novak, J.M., & Ahmedna, M. (2017). Effect of biochars produced from solid organic municipal waste on soil quality parameters. *Journal of Environmental Management*, 192, 271-280. doi:10.1016/j.jenvman.2017.01.061.
- Shahane, A.A., & Shivay, Y.S. (2021). Soil health and its improvement through novel agronomic and innovative approaches. *Frontiers in Agronomy*, 3, 680456. doi:10.3389/fagro.2021.680456.
- Spokas, K.A. (2010). Review of the stability of biochar in soils: predictability of O: C molar ratios. *Carbon Management*, 1(2), 289-303. doi:10.4155/cmt.10.32.
- Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. Pp. 475-490, In: Methods of soil analysis: part 3 chemical methods, 5. doi:10.2136/sssabookser5.3.c16.
- Tusar, H.M., Uddin, M.K., Mia, S., Suhi, A.A., Wahid, S.B.A., Kasim, S., Sairi, N.A., Alam, Z., & Anwar, F. (2023). Biochar-acid soil interactions-a review. *Sustainability*, 15(18), 13366. doi:10.3390/su151813366.
- Torres-Cruz, T.J., Howell, A.J., Reibold, R.H., McHugh, T.A., Eickhoff, M.A., & Reed, S.C. (2018). Species-specific nitrogenase activity in lichen-dominated biological soil crusts from the Colorado Plateau, USA. *Plant and Soil*, 429, 113-125. doi:10.1007/s11104-018-3580-2.
- Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38. doi:10.1097/00010694-193401000-00003.

- Wang, S., Gao, P., Zhang, Q., Shi, Y., Guo, X., Lv, Q., Wu, W., Zhang, X., Li, M., & Meng, Q. (2023). Biochar improves soil quality and wheat yield in saline-alkali soils beyond organic fertilizer in a 3-year field trial. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(7), 19097-19110. doi:10.1007/s11356-022-23499-3.
- Zanutel, M., Garré, S., Sanglier, P., & Biolders, C. (2024). Biochar modifies soil physical properties mostly through changes in soil structure rather than through its internal porosity. *Vadose Zone Journal*, 23(1), e20301. doi:10.1002/vzj2.20301.
- Zhou, Y., Li, Y., Li, W., Li, F., & Xin, Q. (2022). Ecological responses to climate change and human activities in the arid and semi-arid regions of Xinjiang in China. *Remote Sensing*, 14(16), 3911. doi:10.3390/rs14163911.