



## Synergistic Effect of Biochar and Microalgae on Improving the Physical Properties of a Fire-Affected Silt loam Soil

Mahsa Kouhestani Ordoomahaleh<sup>1</sup> , Sepideh Abrishamkesh<sup>2</sup> , Nasrin Ghorbanzadeh<sup>3</sup> , Nafiseh Yaghmaeian<sup>4</sup> 

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran; E-mail:

[mahsakordoo1380@gmail.com](mailto:mahsakordoo1380@gmail.com)

2. Corresponding Author, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of

Guilan, Rasht, Iran, E-mail: [sabrishamkesh@guilan.ac.ir](mailto:sabrishamkesh@guilan.ac.ir)

3. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran;

E-mail: [nghorbanzadeh@guilan.ac.ir](mailto:nghorbanzadeh@guilan.ac.ir)

4. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran;

E-mail: [yaghmaeian\\_na@guilan.ac.ir](mailto:yaghmaeian_na@guilan.ac.ir)

---

### Article Info

---

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Dec. 23, 2025

**Revised:** Feb. 1, 2026

**Accepted:** Feb. 28, 2026

**Published online:** March. 2026

**Keywords:**

Aggregate stability,  
Carbon sequestration,  
Fractal dimension,  
Mean weight diameter,  
Nature-based solution

Nature-based solutions for the restoration of damaged soils are of great importance due to their consideration of intrinsic resilience and ecosystem sustainability. However, the efficacy of such methods, such as the application of biochar and photosynthetic microorganisms, in improving the properties of damaged soils needs to be examined. In the present study, a loamy silt soil from a fire-affected forest area in Roudbar, Gilan province, was collected and treated with 2% and 5% by weight biochar produced from pine wood residues (treatments B2 and B5), the microalgae *Scenedesmus* sp. (treatment S), and their combinations (treatments SB2 and SB5). After a six-month incubation period, some chemical and structural properties of the soil were measured. The mean comparison results showed that biochar and microalgae, both individually and in combination, significantly increased pH, organic carbon content, bulk density, porosity, and aggregate stability. Except for treatment S, all other biochar and microalgae treatments increased the soil's electrical conductivity (EC). Treatment SB5 showed the greatest effect, increasing soil organic carbon content and porosity by approximately 117% and 30%, respectively. The highest increase in mean weight diameter (MWD) was observed in treatment S, while the greatest increase in geometric mean diameter (GMD) and decrease in fractal dimension (FD) of aggregates were related to treatment SB2. A higher GMD indicates a more uniform size distribution, and a lower FD suggests less aggregate fragmentation in treatment SB2. Therefore, biochar, with its recalcitrant carbon content and ability to create porosity, along with microalgae through photosynthetic carbon fixation and the secretion of adhesive polysaccharides that bind soil aggregates—particularly in combined applications with a synergistic effect—effectively contributes to enhancing carbon storage and improving the stability of degraded soils.

---

Cite this article: Kouhestani Ordoomahaleh, M., Abrishamkesh, S., Ghorbanzadeh, N. & Yaghmaeian, N. (2026). Synergistic Effect of Biochar and Microalgae on Improving the Physical Properties of a Fire-Affected Silt loam Soil, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (1), 169-188. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.408494.670077>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.408494.670077>





## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Wildfires are a global threat to forest ecosystems, causing significant soil degradation and nutrient loss through volatilization and erosion. In Iran, wildfire frequency has increased, with over a thousand events annually in forested areas. Fire can drastically alter soil physical, chemical, and biological properties, including organic matter loss, reduced aggregate stability, increased bulk density, formation of hydrophobic compounds, and enhanced runoff. While traditional post-fire rehabilitation relies on engineering interventions, nature-based solutions such as biochar and soil microorganisms are gaining attention. Biochar, produced from pyrolyzed biomass including fire-damaged or pruned residues, enhances soil quality, carbon sequestration, and fertility. Microalgae and biological soil crusts improve soil structure through carbon fixation and extracellular polysaccharide production. Although the benefits of biochar and microalgae individually are documented, their combined effects remain underexplored. This study evaluates the effectiveness of pine-derived biochar and the microalga *Scenedesmus* sp., applied alone and together, in improving chemical, physical, and structural properties of wildfire-affected forest soils.

### Materials and Methods

Soil samples were collected in autumn 2024 from three burned forest sites in Rudbar, Gilan Province, Iran, and combined to form representative composite samples. Biochar was produced from pine and fir branches via pyrolysis at 650 °C, followed by milling and sieving. The microalga *Scenedesmus* sp. was cultured to a concentration of  $10^8$  cells mL<sup>-1</sup> and applied to the soil at 60% of field capacity. Experimental treatments included a control, biochar at 2% and 5%, microalgae, and their combinations (SB2 and SB5). Each unit contained 8 kg of soil in metal microplots (40 × 45 × 4 cm) and was incubated for six months under controlled conditions (20–25 °C, 60% water holding capacity). After incubation, soil samples were collected for laboratory analyses. Chemical properties—pH, electrical conductivity (EC), and soil organic carbon (SOC)—were determined, followed by assessment of physical and structural characteristics, including mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), fractal dimension, bulk density, particle density, and porosity. Soil pH was measured in a saturated paste, EC from the corresponding extract, and SOC by wet oxidation. Bulk and particle densities were determined using the clod and pycnometer methods, respectively. All measurements followed standard soil science protocols to ensure accuracy and reproducibility.

### Results

The studied soil was alkaline with a silt loam texture. Pine-derived biochar had near-neutral pH, low electrical conductivity, and higher organic carbon with a reduced H/C ratio, indicating increased aromaticity and chemical stability, while SEM imaging revealed a highly porous structure that could enhance moisture and nutrient retention. Analysis of variance showed that treatments significantly affected chemical properties (pH, EC, organic carbon) at  $p < 0.01$ , and physical properties (MWD, GMD, fractal dimension, bulk density, porosity) at  $p < 0.01$ , with particle density significant at  $p < 0.05$ . Application of biochar, single microalgae (S), and their combinations improved both chemical and physical soil properties. The S treatment slightly increased pH and reduced EC, while organic carbon increased most in SB5, highlighting the synergistic effect of biochar and microalgae on carbon cycling. SB5 also showed the greatest increases in MWD and GMD, decreased fractal dimension (Df) in SB5 and SB2, reduced bulk density, and highest porosity, reflecting improved aggregate stability and soil structure. Overall, combining biochar and microalgae offers a sustainable, cost-effective, and eco-friendly strategy to rehabilitate fire-degraded soils, enhancing water infiltration, reducing erosion, supporting vegetation recovery, and promoting long-term resilience and functionality of forest ecosystems.

### Conclusion

This study showed that biochar and microalgae, particularly in combination, have strong potential to restore fire-affected forest soils. Combined treatments improved key soil properties, including bulk density, porosity, aggregate stability, and organic carbon content, more effectively than individual applications. SB2 (2% biochar + microalgae) optimized stable aggregate distribution and porosity, while SB5 (5% biochar + microalgae) achieved the highest increase in soil organic carbon. An antagonistic effect on soil salinity was noted, warranting further investigation. Overall, the integration of biochar and microalgae offers a sustainable, cost-effective strategy to enhance soil structure, water infiltration, and erosion control, promoting vegetation recovery and the resilience of degraded forest ecosystems.

### Funding:

The study was funded by the University of Guilan, Iran.

### Authorship contribution:

Conceptualization, Sepideh Abrishamkesh.; methodology, Sepideh Abrishamkesh. and Nasrin Ghorbanzadeh; software, Mahsa Kouhestani ordoomahaleh; validation, Sepideh Abrishamkesh. and Nasrin Ghorbanzadeh. and Nafiseh Yaghmaeian; formal analysis, Sepideh Abrishamkesh. and Mahsa Kouhestani ordoomahaleh; resources, Mahsa Kouhestani ordoomahaleh. and Sepideh Abrishamkesh; data curation, Mahsa Kouhestani ordoomahaleh; writing—original draft preparation, Mahsa Kouhestani ordoomahaleh; writing—review and editing, Sepideh Abrishamkesh. and Nasrin Ghorbanzadeh. and Nafiseh Yaghmaeian. supervision, Sepideh Abrishamkesh; project administration, Sepideh Abrishamkesh; funding acquisition, Sepideh Abrishamkesh. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript. Authorship must be limited to those who have contributed substantially to the work reported.

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

The authorships didn't use generative AI and AI-assisted technologies in the writing process.

**Data availability statement:**

Data available on request from the authors.

**Acknowledgements:**

The authors would like to thank all participants in the present study. The authors also would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

**Ethical considerations:**

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

**Conflict of interest:**

The authors declare no conflict of interest.

## اثر هم‌افزایی بیوچار و ریزجلبک در بهبود ویژگی‌های فیزیکی یک خاک لوم‌سیلتی متأثر از آتش

مهسا کوهستانی اردومحله<sup>۱</sup>، سپیده ابریشم‌کش<sup>۲</sup>، نسرين قربان‌زاده<sup>۳</sup>، نفیسه یغمائیان<sup>۴</sup>۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان؛ [mahsakordoo1380@gmail.com](mailto:mahsakordoo1380@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران؛

[sabrishamkesh@guilan.ac.ir](mailto:sabrishamkesh@guilan.ac.ir)۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران؛ [nghorbanzadeh@guilan.ac.ir](mailto:nghorbanzadeh@guilan.ac.ir)۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران؛ [yaghmaeian\\_na@guilan.ac.ir](mailto:yaghmaeian_na@guilan.ac.ir)

## چکیده

## اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

راه‌حل‌های طبیعت‌محور برای بازیابی خاک‌های آسیب‌دیده به دلیل درنظر گرفتن تاب‌آوری ذاتی و پایداری زیست‌بوم حائز اهمیت فراوان هستند، اما نیاز است کارایی چنین روش‌هایی در بهبود ویژگی‌های خاک‌های آسیب‌دیده مورد بررسی قرار گیرد. در پژوهش حاضر، یک خاک لوم‌سیلتی از منطقه جنگلی تحت‌تاثیر آتش واقع در روبر استان گیلان تهیه و تحت تیمار افزودن سطوح ۲ و ۵ درصد وزنی بیوچار تولیدی از بقایای چوبی درخت کاج (تیمارهای B2 و B5)، ریزجلبک *Scenedesmus* sp. (تیمار S) و ترکیب آنها (تیمارهای SB2 و SB5) به خاک قرار گرفت. پس از یک دوره انکوباسیون شش ماهه، برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی مرتبط با ساختمان خاک اندازه‌گیری شدند. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیوچار و ریزجلبک به‌صورت منفرد و ترکیبی موجب افزایش معنادار pH، کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری تخلخل و پایداری خاک شدند. به‌غیر از تیمار S، سایر تیمارها موجب افزایش مقدار EC خاک شدند. تیمار SB5 با افزایش به‌ترتیب حدود ۱۱۷ و ۳۰ درصد بیشترین اثرگذاری را بر مقدار کربن آلی و تخلخل خاک داشت. بیشترین افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) مربوط به تیمار S و بیشترین افزایش میانگین هندسی قطر خاکدانه (GMD) و کاهش بعد فرکتال خاکدانه (FD) مربوط به SB2 بود. GMD بیشتر، نشان‌دهنده بهبود یکنواخت توزیع اندازه و FD کمتر، بیان‌گر خردشدگی کمتر خاکدانه‌ها در تیمار SB2 است. بنابراین بیوچار با دارابودن کربن مقاوم و ایجاد تخلخل و ریزجلبک از طریق تثبیت فتوسنتزی کربن و ترشح پلی‌ساکاریدهای چسباننده خاکدانه‌ها، به‌ویژه در کاربرد ترکیبی با اثر هم‌افزایی، به‌طور مؤثر در افزایش کربن و بهبود پایداری خاک‌های آسیب‌دیده عمل می‌کنند.

واژه‌های کلیدی:  
بعد فرکتال،  
پایداری خاکدانه‌ها،  
ذخیره کربن،  
راه‌حل طبیعت‌محور،  
میانگین وزنی  
قطر خاکدانه

استناد: کوهستانی اردومحله، مهسا؛ ابریشم‌کش، سپیده؛ و یغمائیان، نفیسه (۱۴۰۵). اثر هم‌افزایی بیوچار و ریزجلبک در بهبود ویژگی‌های فیزیکی یک خاک لوم‌سیلتی متأثر از آتش، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۱)، ۱۶۹-۱۸۸.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.408494.670077>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.408494.670077>

## مقدمه

آتش‌سوزی به عنوان یک پدیده جهانی که اکثر مناطق خشک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، مورد توجه است (Chicco et al., 2023) و به‌عنوان تهدیدی جدی در اکثر زیست‌بوم‌های جنگلی مناطق استوایی، معتدل و شمالی محسوب می‌شود (García-Llamas et al., 2019) که از دلایل اصلی تخریب خاک و از دست‌رفتن مواد غذایی از طریق تصعید و فرسایش خاک است (Gómez-Rey et al., 2013). آتش‌سوزی‌های غیر قابل کنترل اغلب نتیجه فعالیت‌های انسانی هستند، در حالی که آتش‌سوزی‌های طبیعی تنها بخش کوچکی از آتش‌سوزی‌های جهانی را تشکیل می‌دهند (Knorr et al., 2016). گرمایش کنونی جهان، افزایش دما و خشکسالی‌های شدید، خطر آتش‌سوزی در جنگل‌ها را به شکل چشمگیری افزایش می‌دهد (Zhang & Biswas 2017). پدیده آتش‌سوزی در جنگل‌های ایران نیز به‌عنوان یک خطر جدی مورد توجه است که فراوانی آن نیز در سال‌های اخیر افزایش یافته است و روند آتش‌سوزی در جنگل‌ها و مراتع ایران طی دهه گذشته افزایشی بوده است. به طور متوسط سالانه بیش از ۱۰۰۰ رخداده آتش‌سوزی صرفاً در جنگل‌ها رخ می‌دهد (Shojaeizadeh et al., 2023). افزایش خطر آتش‌سوزی نه‌تنها پوشش گیاه جنگلی را تحت تأثیر قرار خواهد داد، بلکه بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک نیز اثرگذار است که این اثرات می‌توانند موقتی یا دائمی باشند (Romeo et al., 2020). خاک در مقیاس زمانی انسانی به دلیل تخریب سریع خاک و تشکیل کند آن، به عنوان یک منبع طبیعی غیر قابل تجدید محسوب می‌شود (Lal, 2015) و تخریب ویژگی‌های خاک‌های جنگلی، ظرفیت آن‌ها را برای ایفای کامل عملکرد موردانتظار کاهش می‌دهد (Agbeshie et al., 2022). آتش‌سوزی می‌تواند تأثیرات چشمگیری بر ویژگی‌های خاک داشته باشند و بسته به شدت آتش‌سوزی، تغییرات فیزیکی، شیمیایی، کانی‌شناسی و زیستی در خاک و مواد آلی آن ایجاد می‌شود (Certini, 2005; Ursino & Rulli, 2010). آتش‌سوزی می‌تواند موجب احتراق جزئی و یا کامل مواد آلی، تخریب ساختمان خاک، تغییر مقدار تخلخل، افزایش جرم مخصوص ظاهری (Fernández et al., 2004)، کاهش پایداری خاکدانه (Llovet et al., 2009; Úbeda et al., 2005) و کاهش مواد غذایی از طریق تصعید یا آبشویی و تغییرات قابل توجه در تعداد و ترکیب ریزجانداران و بی‌مهرگان موجود در خاک شود (Certini, 2005). آتش‌سوزی‌های شدید همچنین می‌توانند در اثر سوختن بقایای گیاهی و مواد آلی، برخی ترکیب‌ها با خاصیت آب‌گریزی را ایجاد کنند (Fernelius et al., 2017) که سبب کاهش نفوذ آب و در نتیجه افزایش رواناب می‌شوند (Stoof et al., 2015). پژوهش‌های انجام‌شده در ایران نیز تأثیرات منفی آتش‌سوزی بر خاک را تأیید کرده‌اند. به‌عنوان مثال، Faraji et al. (2019) گزارش کردند که آتش‌سوزی در مراتع تابستانه آذربایجان شرقی موجب کاهش حدود ۲۵ درصدی کربن آلی خاک در مقایسه با منطقه شاهد شد. با این حال، همان مطالعه نشان داد که اقدامات احیایی و مدیریتی می‌توانند این کاهش را جبران کرده و حتی کربن آلی خاک را تا ۵۵ درصد افزایش دهند. این یافته‌ها بر اهمیت توسعه روش‌های مؤثر، پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای بازسازی خاک‌های متأثر از آتش‌سوزی تأکید دارند که در این راستا راه‌حل‌های رایج و طبیعت‌محور برای بازسازی خاک‌های سوخته وجود دارد. روش‌های رایج معمولاً به مداخلات مهندسی نیاز دارند در حالی که راه‌حل‌های طبیعت‌محور، راهبردهای اکولوژیکی به‌شمار می‌آیند (Kalantari et al., 2023). راه‌کارهای مختلفی جهت کاهش اثرات آتش‌سوزی‌های غیر قابل کنترل؛ شامل شخم، پرچین‌کشی موقت، نصب پوشش‌های کنترل‌کننده فرسایش، احداث حصارهای رسوب‌گیر، مالچ‌پاشی، بذریاشی هوایی و تراس‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Robichaud et al., 2000). کارایی روش‌های مورد استفاده معمولاً به مقرون به صرفه بودن آن‌ها بستگی دارد (MacDonald & Larsen, 2009) و یک راه‌حل عملی، راه‌حلی است که در مناطق بحرانی موجب بیشترین اثر حفاظتی قابل توجه با صرف کمترین هزینه ممکن شود (Prats, 2014). اما چنین ارزیابی‌هایی غالباً تاب‌آوری اکولوژیکی و پایداری زیست‌بوم را در نظر نمی‌گیرند (Shtober-Zisu & Wittenberg, 2021). در مقابل، راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت یک الگوی در حال تکامل است که هدف آن مواجهه با چالش‌های زیست‌محیطی از طریق بهره‌گیری از تاب‌آوری ذاتی سامانه و فرآیندهای طبیعی و در عین حال ترویج توسعه پایدار و رفاه انسانی است (Welden et al., 2021). Shtober-Zisu & Wittenberg (2021) از کاربرد بیوپچار و بازسازی میکروبی خاک در کنار بذریاشی، بازسازی پوشش گیاهی، مالچ‌پاشی و اقدامات مدیریتی کنترل فرسایش و رسوب به‌عنوان راه‌حل‌های طبیعت‌محور بازسازی خاک‌های سوخته نام برده‌اند. استفاده از بیوپچار در محیط‌های پس از آتش‌سوزی می‌تواند نقش مهمی ایفا کند. بیوپچار ماده‌ای غنی از کربن و متخلخل است که از حرارت‌دهی زیست‌توده در محیط بدون یا محدودیت اکسیژن از طریق پیرولیز تولید می‌شود (Khan et al., 2024). بهبود کیفیت خاک، توان تولیدی، ترسیب کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از اثرات مشخص کاربرد بیوپچار در خاک می‌باشند (Sahota et al., 2018). مواد اولیه مورد استفاده برای تولید بیوپچار می‌تواند شامل پسماندهای آلی، بقایای گیاهی و زیست‌توده چوبی

باشد (Zhang et al., 2022). بقایای قطع درختان و برداشت انتخابی (یعنی بقایای هرس) ممکن است همچنان خطر آتش‌سوزی ایجاد کنند، تبدیل بقایای هرس در محل یا خارج از محل به بیوچار، با هدف استفاده مجدد، به‌عنوان جایگزینی برای سوزاندن بقایای هرس جمع‌آوری شده یا رهاکردن مواد برای تجزیه پیشنهاد شده‌است (Scott & Page-Dumroese, 2016). از سایر روش‌های بازسازی خاک پس از آتش‌سوزی می‌توان به بهره‌گیری از ریزجانداران بومی و غیربومی خاک اشاره کرد (Munoz-Rojas et al., 2021) و جوامع پوسته زیستی خاک با زندگی بر روی چند سانتی‌متر بالایی خاک به عنوان ابزاری زیستی، پتانسیل کاربرد جهت بازسازی زیست‌بوم‌ها پس از آتش‌سوزی را نشان داده‌اند (Chamizo et al., 2020). ریزجلبک‌ها گروهی گسترده از ریزجانداران فتوسنتزکننده هستند که هم شامل سیانوباکتری‌های پروکاریوتی و هم گونه‌های یوکاریوتی مانند جلبک‌های سبز، دیاتوم و گلنوتییدها هستند (Andersen, 2013). ریزجلبک‌ها به‌عنوان منبع مهمی از کربن آلی در خاک شناخته شده و نقش کلیدی در ارتقای پایداری زیست‌بوم‌های کشاورزی ایفا می‌کنند (Renuka et al., 2018). ریزجلبک‌ها از طریق فتوسنتز و تثبیت دی‌اکسید کربن موجب ذخیره کربن شده و با تولید پلی‌ساکاریدهای خارج‌سلولی<sup>۲</sup> (EPS) می‌توانند موجب بهبود ساختمان خاک شوند (Renuka et al., 2018). Yilmaz & Sönmez (2017) در بررسی تاثیر کودهای زیستی و آلی گزارش کردند که کاربرد کود زیستی ریزجلبک *Chlorella sp.* به‌صورت منفرد و یا همراه با ورمی‌کمپوست، موجب افزایش کربن آلی خاک و تقویت پایداری خاکدانه‌ها شد. اگرچه بررسی پژوهش‌های پیشین، بیان‌گر تاثیر مثبت بیوچار و ریزجلبک‌ها بر ویژگی‌های خاک است اما مطالعاتی محدودی در زمینه اثرات کاربرد ترکیبی ریزجلبک‌ها و بیوچار در خاک انجام شده‌است (Hue et al., 2019). (Nijjar et al., 2021) به‌عنوان مثال، نتایج پژوهش Hue et al. 2019 نشان داد که اثرگذاری ریزجلبک‌ها بر بهبود ظرفیت ذخیره کربن در خاک در حضور کود آلی و بیوچار بیشتر از اثر کاربرد آن به تنهایی بود. در مقابل، (Najjar et al. (2021) در پژوهشی گلخانه‌ای بر روی گیاه جو تحت شرایط تنش شوری گزارش نمودند که کاربرد بیوچار و ریزجلبک به‌صورت منفرد؛ رشد ساقه، طول ریشه و سطح برگ را بهبود بخشید، اما اثر تیمارهای ترکیبی به‌طور قابل‌توجهی کمتر از اثر منفرد آنها بود. اگرچه تاکنون در مورد اثربخشی کاربرد ترکیبی بیوچار و ریزجلبک بر بهبود ساختمان خاک جنگلی متاثر از آتش‌گزارشی ارائه نشده است. بنابراین پژوهش حاضر با هدف توسعه روش و فناوری‌های بازیابی خاک پس از آتش‌سوزی؛ درمورد کارایی روش طبیعت‌محور کاربرد بیوچار تولیدی از بقایای هرس درخت کاج و ریزجلبک *Scendesmous sp.* به‌صورت منفرد و ترکیبی بر ویژگی‌های مهم شیمیایی، فیزیکی و ساختمانی یک خاک جنگلی متاثر از آتش‌سوزی انجام گرفت.

## مواد و روش‌ها

### نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های اولیه خاک

نمونه خاک مورد استفاده این پژوهش در پاییز ۱۴۰۳ از منطقه‌ای جنگلی واقع در شهرستان رودبار، استان گیلان جمع‌آوری شد. بر اساس اطلاعات اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان و بررسی‌های میدانی، منطقه‌ی نمونه‌برداری در پاییز ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ دچار آتش‌سوزی‌هایی با شدت متوسط شده بود. با توجه به گذشت زمان یک تا دو ساله از زمان وقوع آتش‌سوزی، در این پژوهش از این خاک تحت عنوان "خاک تحت تاثیر آتش‌سوزی" نام برده خواهد شد. تصویری از مکان تحت تاثیر آتش‌سوزی و موقعیت دقیق محل برداشت نمونه‌ها که در مختصات جغرافیایی ۲۷°۹'۵۷" شمالی و ۴۹°۳۳'۵۱" شرقی قرار دارد در شکل ۱ آورده شده است. بر اساس داده‌های اقلیمی ماهواره‌ای CHIRPS و ERA5، میانگین بارش سالانه و دمای متوسط ۱۲ ساله (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲) در این منطقه به ترتیب برابر با ۱۴۲۷ میلی‌متر و ۱۴/۷ درجه سلسیوس است. در منطقه نمونه‌برداری، سه نقطه در بخش‌های تحت تاثیر آتش‌سوزی انتخاب و نمونه‌برداری تصادفی از لایه سطحی (۱۰-۰ سانتی‌متری) خاک انجام گرفت. در هر نقطه، سه نمونه جمع‌آوری و ترکیب شده تا یک نمونه مرکب نماینده ایجاد شود. در هر نقطه ۳ نمونه دست‌نخورده نیز توسط استوانه فلزی به‌منظور تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک تهیه شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، هواخشک و در ظروف دربسته نگهداری شدند. ویژگی‌های اولیه خاک با روش‌های متداول آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد (Shahbazi et al., 2024). مقادیر pH و قابلیت هدایت الکتریکی خاک به ترتیب در عصاره و گل اشباع اندازه‌گیری شدند. توزیع اندازه ذرات اولیه خاک به روش هیدرومتری و جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه و مقدار کربن آلی خاک توسط روش اکسیداسیون تر تعیین شدند. جهت اعمال تیمارهای مورد استفاده و انجام آنکوباسیون در مرحله بعدی، مقدار رطوبت ظرفیت زراعی خاک نیز به‌شیوه وزن‌سنجی تعیین شد.

### تهیه ریزجلبک *Scenedesmus sp.*

ریزجلبک *Scenedesmus sp.* از بخش زیست‌شناسی دانشکده علوم دانشگاه گیلان تهیه و در محیط کشت BG-11 با pH برابر ۷/۲، دمای ۲۵ درجه سلسیوس و زیر نور فلورسنت سفید (۱۲ ساعت روشنایی و ۱۲ ساعت تاریکی) به مدت ۱۰ روز بازکشت شدند.

### تهیه و تعیین ویژگی‌های بیوچار

بیوچار مورد استفاده از بقایای چوبی هرس شده کاج و توسط پیرولیز در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس در کوره الکتریکی القایی آبتین مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آب دانشگاه تهران تولید شد. pH و قابلیت هدایت الکتریکی بیوچار با استفاده از نسبت ۱:۲۰ (بیوچار به آب) تعیین شد (International Biochar Initiative, 2015). درصد عناصر کربن، هیدروژن، نیتروژن و گوگرد بیوچار و ماده اولیه آن (بقایای چوبی هرس شده کاج) توسط روش احتراق خشک و با استفاده از دستگاه آنالیز عنصری CHNSO مدل FlashSmart ساخت کمپانی Thermo Fisher آزمایشگاه مرکزی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. تصاویر میکروسکوپی بیوچار نیز در دو بزرگنمایی ۳۰۰ و ۱۵۰۰ برابر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل SU3500 شرکت رشد نانوفناوران تهران تهیه شد.

### اعمال تیمارها و انکوباسیون

این پژوهش به منظور بررسی تاثیر تیمارهای منفرد و ترکیبی بیوچار و ریزجلبک در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. آزمایش در میکروپلات‌های فلزی با ابعاد ۴۰ سانتیمتر طول × ۴۵ سانتیمتر عرض و عمق ۴ سانتیمتر انجام شد. هر میکروپلات حاوی حدود ۸ کیلوگرم خاک بود که تا ارتفاع تقریبی ۳ سانتیمتر از کف میکروپلات پر شد و تحت تیمارهای موردنظر قرار گرفت. جهت اعمال تیمارهای منفرد و ترکیبی حاوی بیوچار، بیوچار با اندازه ذرات کوچکتر از ۲ میلی‌متر در دو سطح ۲ و ۵ درصد وزنی به خاک افزوده و با آن مخلوط و سپس به میکروپلات منتقل شدند. در تیمار ریزجلبک منفرد، پس از انتقال خاک به میکروپلات، محلول ریزجلبک *Scenedesmus sp.* (۱۰<sup>۴</sup> سلول بر گرم) بر اساس ۶۰ درصد رطوبت ظرفیت زراعی خاک به صورت محلول بر روی سطح خاک اسپری شد. در تیمارهای ترکیبی نیز پس از افزودن بیوچار به خاک و انتقال به میکروپلات، محلول ریزجلبک بر اساس ۶۰ درصد رطوبت ظرفیت زراعی بر روی سطح خاک اسپری شد. علاوه بر خاک‌های تیمار شده با بیوچار و ریزجلبک، سه میکروپلات حاوی خاک بدون بیوچار یا ریزجلبک نیز به عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شدند. به منظور یکسان بودن شرایط آماده‌سازی، تمامی تیمار و خاک‌های بدون بیوچار یا نیز به مقدار مشابه با تیمارهای حاوی بیوچار تحت اختلاط قرار گرفتند. تیمارها شامل شاهد (بدون بیوچار و ریزجلبک)، بیوچار در دو سطح دو و پنج درصد، ریزجلبک، ریزجلبک به همراه دو و پنج درصد بیوچار اختصاراً به ترتیب C، B2، B5، S، SB2 و SB5 نام‌گذاری شدند. پس از اعمال تیمارها، میکروپلات‌های خاک به مدت شش ماه تحت شرایط دمای ۲۵-۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت ۶۰ درصد ظرفیت زراعی در گلخانه گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان نگهداری شدند.

### تعیین ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و ساختمانی خاک

پس از پایان دوره شش ماهه انکوباسیون، نمونه‌های خاک از میکروپلات‌ها تهیه و pH در عصاره اشباع، قابلیت هدایت الکتریکی در گل اشباع و کربن آلی به روش اکسیداسیون تر تعیین شدند. جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک به ترتیب توسط روش کلوخه و پیکنومتر تعیین شدند. سپس مقدار تخلخل خاک به صورت محاسباتی طبق رابطه (۱) تعیین شد.

$$n = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن n: مقدار تخلخل بر حسب درصد،  $\rho_b$  و  $\rho_s$ : به ترتیب جرم مخصوص ظاهری و حقیقی ( $\text{g cm}^{-3}$ ) است.

توزیع اندازه خاکدانه‌های پایدار در آب به روش الک مرطوب (Nimmo & Perkins, 2002) انجام شد. بدین منظور، ۵۰ گرم خاک هواخشک عبور یافته از الک ۶ میلی‌متری به مدت ۲۴ ساعت توسط آب مرطوب و سپس خاک در یک ظرف محتوی آب شهر و بر روی سری الک با قطر منافذ ۴/۷۵، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵ قرار گرفت و الک کردن با ۳۵ دور در دقیقه (در امتداد ۳۸/۱ میلی‌متر) به مدت ۱۰ دقیقه انجام گرفت. خاک باقی‌مانده بر روی هر الک به دقت خارج و در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شدند. به منظور تصحیح مقدار شن، پس از خشک‌نمودن و توزین خاکدانه‌های باقیمانده بر روی هر الک، خاکدانه‌ها بر روی الک ۰/۰۵ میلی‌متر شسته شدند تا

بخش شن آن‌ها جدا شود. مقدار شن موجود در هر بخش اندازه‌های خاکدانه پس از خشک کردن در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلیسیوس توزین شد. جرم شن قبل از محاسبه شاخص‌های پایداری از جرم خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی هر الک و جرم کل خاک مورد استفاده کسر شد. سپس بر اساس جرم خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی هر الک (تصحیح شده بر اساس مقدار شن)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) بر حسب میلی‌متر به ترتیب توسط رابطه (۲) و (۳) محاسبه شدند.

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad \text{رابطه (۲)}$$

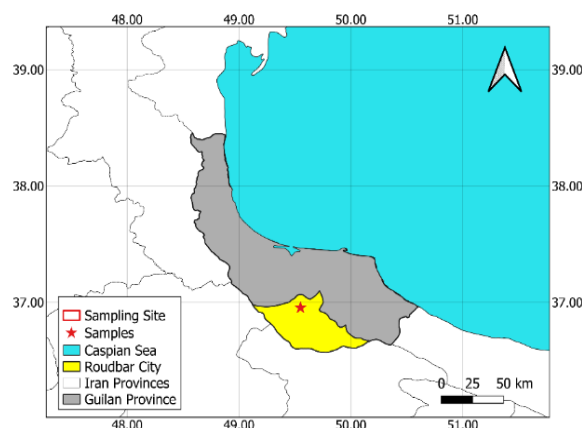
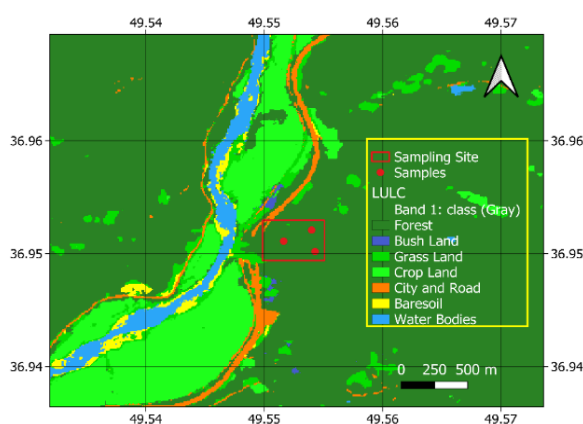
$$GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \log X_i}{\sum_{i=1}^n W_i}\right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه‌ها:  $X_i$ : میانگین قطر خاکدانه‌هایی که بر روی هر الک باقی مانده است (میانگین الک بالا و پایین) و  $W_i$ : نسبت جرم خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک به کل جرم خاک مورد استفاده در ابتدای آزمایش را نشان می‌دهد،  $n$ : تعداد الک به کار برده شده است،  $\log$ : لگاریتم طبیعی و  $\exp$ : تابع نمایی بر پایه عدد نپر  $e \approx 2.71828$  می‌باشد.

بعد فرکتال خاکدانه نیز بر اساس رابطه ارائه شده توسط Tyler & Wheatcraft (1992) و توسط رابطه (۴) محاسبه شد

$$\sum_{X=1}^X \frac{M(x)}{x^3} = Kx^{-D} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه، وقتی  $\log\left(\frac{M(x)}{x^3}\right)$  در مقابل  $\log x$  رسم گردد، شیب خط، مقدار بعد فرکتال خاکدانه‌ها را به دست می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت و محل برداشت نمونه خاک مورد مطالعه.

## تحلیل آماری

این مطالعه با هدف ارزیابی تأثیر بیوجار در دو سطح ۲ و ۵ درصد، ریزجلبک، و ترکیب آن‌ها بر ویژگی‌های یک خاک جنگلی متأثر از آتش، در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. تجزیه واریانس با استفاده از آزمون ANOVA و مقایسه میانگین داده‌ها توسط آزمون چنددامنه‌ای توکی در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد انجام شد. همبستگی بین ویژگی‌های مورد بررسی نیز توسط آزمون همبستگی پیرسون تحلیل و کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری توسط نرم‌افزار SPSS انجام شد.

## نتایج و بحث

### ویژگی‌های اولیه خاک و بیوپچار

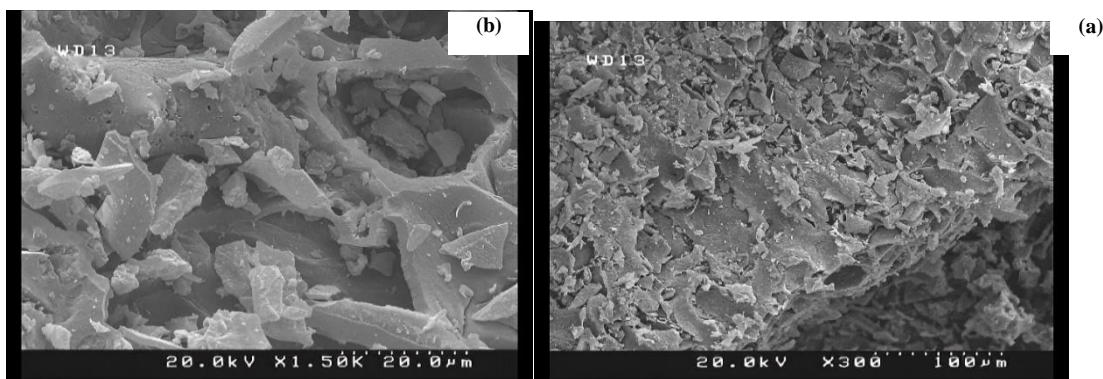
ویژگی‌های اولیه خاک و بیوپچار مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ و تصاویر میکروسکوپی بیوپچار در شکل ۲ آورده شده است. خاک مورد مطالعه دارای pH قلیایی و بافت لوم‌سیلتی بود. بیوپچار تولیدی از بقایای چوبی کاج دارای pH تقریباً خنثی و قابلیت هدایت الکتریکی نسبتاً کم بود. مقایسه ترکیب عنصری ماده اولیه و بیوپچار تولیدی نشان می‌دهد که درصد کربن از ۴۱/۶۰ به ۶۴/۰۱ افزایش و در مقابل، درصد هیدروژن از ۴/۹۱ به ۳/۳۵ کاهش یافته که ناشی از خروج ترکیب‌های فرار هیدروژنی و مولکول‌های آب بوده و در نهایت نسبت H/C را کاهش داده است. کاهش نسبت مولار H/C از ۱/۴۱ در ماده اولیه به ۰/۶۳ در بیوپچار نشان‌دهنده افزایش آروماتیک بودن و تراکم ساختمانی آن است که پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر تجزیه میکروبی و اکسیداسیون را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد (Méndez et al., 2012). این تغییرات موجب می‌شود بیوپچار مورد استفاده در این مطالعه احتمالاً ماندگاری بالایی در خاک داشته و به عنوان مخزن بلند مدت کربن عمل کند. تصویر SEM بیوپچار نیز نشان می‌دهد که این ماده دارای ساختمانی متخلخل و دارای خلل و فرج متعدد است که وجود این منافذ می‌تواند به عنوان مخزن رطوبت و مواد غذایی در خاک عمل کرده و موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شود (Chatterjee et al., 2020).

جدول ۱. ویژگی‌های اولیه خاک مورد مطالعه

ویژگی	pH	قابلیت هدایت الکتریکی	شن	سیلت	رس	کربن آلی	جرم مخصوص ظاهری
	-	(dS m <sup>-1</sup> )	(%)	(%)	(%)	(%)	(g cm <sup>-3</sup> )
	۸/۱۶	۱/۰۵	۲۹/۲	۵۴/۸	۱۶	۱/۹۵	۱/۳۳

جدول ۲. ویژگی‌های بیوپچار و ماده اولیه

نوع ماده	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	pH	قابلیت هدایت الکتریکی
	(%)	(%)	(%)	(%)	-	(dS m <sup>-1</sup> )
ماده اولیه	۴۱/۶۰	۴/۹۱	۲/۳۱	۰/۱۴	۵/۸۰	۰/۵۵۲
بیوپچار	۶۴/۰۱	۳/۳۵	۱/۳۵	۰/۰۶	۷/۱	۰/۲۸۸



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی بیوپچار. (a) و (b) به ترتیب بزرگنمایی ۳۰۰ و ۱۵۰۰ برابر.

### ضریب همبستگی بین ویژگی‌های خاک

نتایج آزمون همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و ساختمانی خاک در جدول ۳ آورده شده است. کربن آلی بیشترین همبستگی را به ترتیب با جرم مخصوص ظاهری ( $r = -0/83, p < 0/01$ ) و تخلخل خاک ( $r = 0/82, p < 0/01$ ) و سپس با میانگین هندسی

قطر خاکدانه ( $r=0/71$ ,  $p< 0/01$ )، بعد فرکتال خاکدانه ( $r=0/67$ ,  $p< 0/01$ ) و میانگین وزنی قطر خاکدانه ( $r=0/54$ ,  $p< 0/05$ ) نشان داد. همبستگی بسیار قوی کربن آلی با جرم مخصوص ظاهری و تخلخل و همبستگی قوی آن با نمایه‌های پایداری خاکدانه، بیان‌گر نقش بسیار مهم مواد آلی در کاهش تراکم خاک و بهبود ساختمان متخلخل خاک و پایداری خاکدانه‌ها از طریق اثرات چسبندگی و پیوند بین ذرات است. همبستگی قوی جرم مخصوص ظاهری با میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها ( $r=0/67$ ,  $p< 0/01$ ) و بعد فرکتال خاکدانه ( $r=0/63$ ,  $p< 0/01$ ) و همبستگی متوسط آن با میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها ( $r=0/56$ ,  $p< 0/01$ ) نیز نشان می‌دهد خاکدانه‌سازی بهتر و پایداری بیشتر خاکدانه‌ها موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری می‌شود.

جدول ۳. ضریب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های مورد مطالعه خاک.

تخلخل	جرم مخصوص	جرم مخصوص ظاهری	بعد فرکتال خاکدانه	میانگین هندسی قطر خاکدانه	میانگین وزنی قطر خاکدانه	کربن آلی	قابلیت هدایت الکتریکی	pH
							۱	۱
							۰/۱۵	۰/۴۸*
					۱	۰/۵۴*	۰/۳۰	۰/۵۰*
				۱	۰/۶۷**	۰/۶۷**	۰/۰۸	۰/۴۳
			۱	۰/۹۶**	۰/۶۷**	۰/۶۷**	۰/۰۸	۰/۴۲
		۱	۰/۶۳**	۰/۶۷**	۰/۵۶*	۰/۸۳**	۰/۰۸	۰/۷۴**
	۱	۰/۶۳**	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۳۲	۰/۵۸*	۰/۱۵	۰/۵۴*
۱	۰/۴۸*	۰/۹۸**	۰/۶۶**	۰/۷۱**	۰/۵۴*	۰/۸۲**	۰/۱۴	۰/۶۹**

\* و \*\* به ترتیب نشان‌دهنده‌ی معنادار بودن در سطح پنج و یک درصد می‌باشد.

### تاثیر بیوپچار و ریزجلبک بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

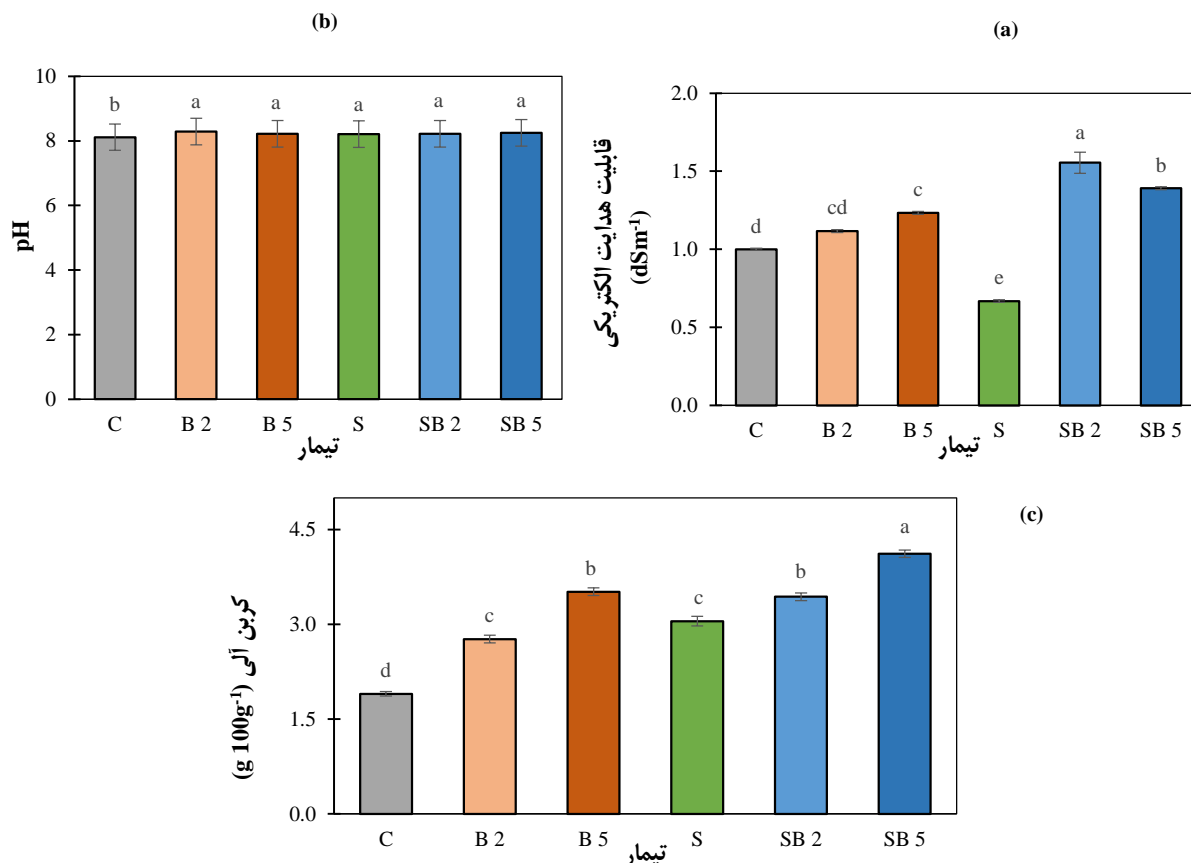
نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر تیمارها بر روی pH، قابلیت هدایت الکتریکی و کربن آلی در سطح احتمال یک درصد ( $p<0.01$ ) معنادار بود. مقایسه میانگین ویژگی‌های شیمیایی مورد بررسی خاک نیز در شکل ۳ آورده شده است.

جدول ۴. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارها بر ویژگی‌های خاک.

منبع تغییرات	درجه آزادی	واکنش	قابلیت هدایت الکتریکی	کربن آلی	میانگین وزنی قطر خاکدانه	میانگین هندسی قطر خاکدانه	بعد فرکتال خاکدانه	جرم مخصوص ظاهری	جرم مخصوص حقیقی	تخلخل
تیمار	۵	۰/۰۱**	۰/۳**	۱/۳۱**	۰/۹۸**	۰/۱۲۳**	۰/۰۲۶**	۰/۰۷۳**	۰/۰۱۲*	۰/۰۰۹**
خطای آزمایشی	۱۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۱۴	۰/۰۳۲	۰/۰۱۳	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰

\* و \*\* به ترتیب نشان‌دهنده‌ی معنادار بودن در سطح پنج و یک درصد می‌باشد.

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که تیمارهای منفرد و ترکیبی بیوپچار و ریزجلبک موجب افزایش معنادار و جزئی ۰/۱۰ تا ۰/۱۳ واحد pH خاک در مقایسه با تیمار C شدند اما با یکدیگر تفاوت معناداری را نشان ندادند (شکل ۳a). اثر تیمارهای منفرد و ترکیبی بیوپچار و ریزجلبک بر قابلیت هدایت الکتریکی نیز معنادار بود (شکل ۳b)؛ تیمار B5 و تیمارهای SB2 و SB5 سبب افزایش معنادار و تیمار S موجب کاهش معنادار قابلیت هدایت الکتریکی خاک در مقایسه با تیمار C شدند. همه تیمارهای منفرد و ترکیبی بیوپچار و ریزجلبک تاثیر معناداری بر افزایش کربن آلی داشتند، اما بیشترین تاثیر افزایشی را تیمار SB5 در مقایسه با تیمار شاهد داشت و پس از آن تیمارهای B5 و SB2 قرار داشتند (شکل ۳c).



شکل ۳. اثر انواع تیمار بر pH (a)، (b) قابلیت هدایت الکتریکی و (c) کربن آلی خاک، C: تیمار شاهد (بدون بیوجار و ریزجلبک)، S: تیمار دارای ریزجلبک، B2 و B5: به ترتیب تیمار دارای بیوجار ۲ و ۵ درصد، SB2 و SB5: به ترتیب تیمار دارای بیوجار ۲ و ۵ درصد بیوجار به همراه ریزجلبک. حروف متفاوت روی ستون‌ها بیانگر تفاوت معنادار بر اساس آزمون توکی در سطح آماری ۱ درصد است. نوارهای خطا نشان‌دهنده خطای استاندارد میانگین هستند. (n=3)

یافته‌های این پژوهش نشان داد که تیمارهای منفرد و ترکیبی بیوجار و ریزجلبک موجب افزایش جزئی ۱/۲۳ تا ۲/۱۸ درصدی مقدار pH خاک شدند. تیمار B5، SB2 و SB5 به ترتیب موجب افزایش ۲۳، ۵۵ و ۳۹ درصد قابلیت هدایت الکتریکی (EC) خاک در مقایسه با تیمار شاهد و تیمار S موجب کاهش ۳۳/۱۷ درصد مقدار قابلیت هدایت الکتریکی خاک شد. تیمار ریزجلبک منفرد موجب کاهش و تیمارهای ترکیبی موجب افزایش EC شدند.

پژوهش‌هایی در مورد اثر کاربرد بیوجار و ریزجلبک‌ها به صورت منفرد بر روی pH و EC خاک وجود دارد. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بیوجار معمولاً به دلیل خاصیت قلیایی و وجود کاتیون‌های بازی و کربنات‌ها، به‌مخصوص در خاک‌های اسیدی، باعث افزایش pH خاک می‌شود. به طور متداول، افزایش‌هایی در محدوده ۰/۱۵ تا ۱/۲ واحد pH گزارش شده است، به طوری که نرخ‌های کاربرد بالاتر و بیوجارهای قلیایی‌تر، تأثیر بیشتری در افزایش pH دارند (Ngalani et al., 2022; Chen et al., 2021). این افزایش pH در اثر کاربرد بیوجار در خاک‌های اسیدی بیشترین وضوح را دارد و می‌تواند به کاهش pH خاک و بهبود دسترسی به مواد غذایی کمک کند (Nguyen et al., 2022; Ngui et al., 2024). تأثیر ریزجلبک‌ها بر pH، وابسته به اسیدیته اولیه خاک است و ممکن باعث افزایش و یا کاهش pH شوند. نتایج پژوهشی در یک خاک اسیدی نشان داد که pH خاک در اثر تیمار با ریزجلبک‌هایی متحمل به اسید *Desmodium sp.* و *Heterochlorella sp.* به‌طور معناداری تا حدود یک واحد افزایش یافت، که به فعالیت‌های متابولیکی ریزجلبک‌ها، شامل مصرف پروتون و رهاسازی مواد قلیایی، نسبت داده می‌شود (Shanthakumar et al., 2020). در حالی که، در خاک‌های خنثی یا قلیایی (pH بالاتر از ۷)، تیمار با ریزجلبک‌ها اغلب منجر به کاهش pH می‌شود، که به بهبود کیفیت خاک و دسترسی به مواد غذایی کمک می‌کند. کاهش pH به افزایش فعالیت میکروبی، تولید ماده آلی و ترشح اسیدهای آلی و پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی نسبت داده می‌شود (Youssef et al., 2022; Zhang et al., 2024).

اگرچه در شرایط مخصوص که مسیرهای متابولیکی خاصی غالب باشند (مانند جذب نیترات) ممکن است در خاک‌های غیراسیدی نیز افزایش متوسطی در مقدار pH ایجاد شود (Zhao et al., 2020). افزودن بیوجار به طور کلی باعث افزایش EC خاک می‌شود که

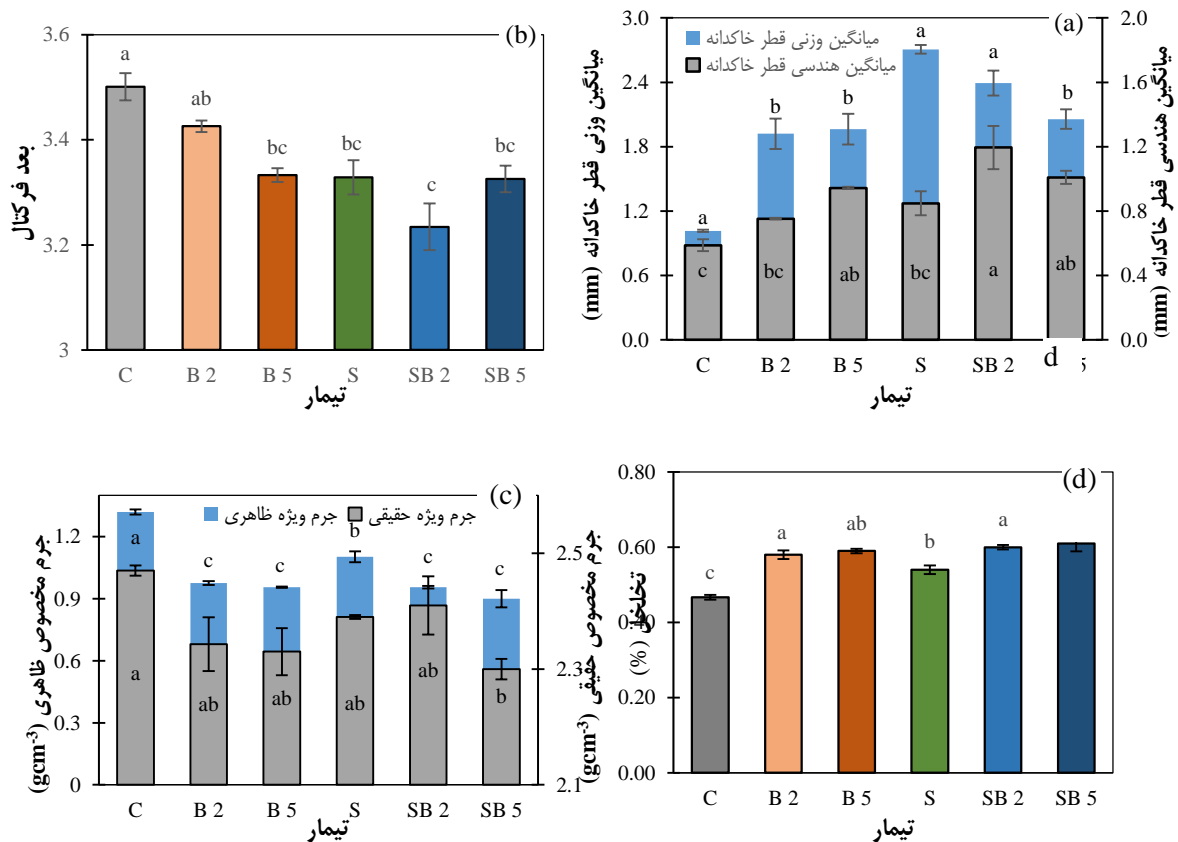
منعکس کننده غلظت بالاتر نمک و یون‌های محلولی است که توسط بیوپچار وارد خاک می‌شوند (Sun et al., 2023). (Khaji et al., 2025). نیز افزایش EC خاک در اثر کاربرد بیوپچارهای اصلاح شده در یک خاک لومرسی آهکی را گزارش نمودند و این افزایش را به آزاد شدن یون‌های معدنی از بیوپچار و افزایش غلظت یون‌های محلول در خاک نسبت دادند. افزایش EC تحت تأثیر ماده اولیه، دمای پیرولیز و نرخ کاربرد بیوپچار است، به طوری که مقدار مصرف بیشتر و بیوپچارهای غنی از خاکستر باعث افزایش بیشتر EC می‌شوند (Ngalani et al., 2025). (Lopičić et al., 2022; 2022) اما در برخی موارد، به‌مخصوص در خاک‌های تحت تأثیر نمک، بیوپچار می‌تواند EC را از طریق بهبود ساختمان خاک و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی کاهش دهد، اما این حالت کمتر رایج است و به شوری اولیه خاک و ویژگی‌های بیوپچار بستگی دارد (Su et al., 2024) و در طول زمان، EC ممکن است کاهش یابد زیرا نمک‌های محلول شسته شده یا تثبیت می‌شوند (Chen et al., 2021) پژوهش‌ها نشان داده‌اند که کودهای زیستی مبتنی بر ریزجلبک‌ها می‌توانند EC را به‌طور قابل توجهی کاهش دهند، به‌مخصوص زمانی که با سایر اصلاح‌کننده‌های آلی ترکیب شوند. به‌عنوان مثال، ترکیب ریزجلبک *Tribonema sp.* با پودر صدف موجب کاهش EC خاک به مقدار ۳۳/۷ درصد شد که احتمالاً به دلیل جذب و تثبیت یون‌های نمکی توسط ریزجلبک‌ها در طول رشد است که به کاهش شوری خاک کمک می‌کند (Song et al., 2024). در پژوهش‌هایی که از گونه‌های ریزجلبکی متحمل به شوری استفاده شد، EC محیط رشد پس از یک دوره رشد به مقدار ۰/۲۱ تا ۱/۷۸ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر کاهش یافت که این امر نقش ریزجلبک‌ها را در کاهش غلظت نمک‌های محلول بیشتر تأیید می‌کند (Chen et al., 2024). مکانیسم فرایند کاهش مقدار EC شامل جذب مستقیم یون‌ها و همچنین تشکیل ماده آلی است که ساختمان خاک را پایدار کرده و تحرک نمک را کاهش می‌دهد (Chen et al., 2024).

براساس یافته‌های پژوهش حاضر، مقدار کربن آلی خاک در تمامی تیمارهای منفرد و ترکیبی بیوپچار و ریزجلبک افزایش یافت. بیشترین (حدود ۱۱۷ درصد) مقدار افزایش کربن آلی مربوط به تیمار SB5 بود. در حالی که تیمارهای B2 و B5 به ترتیب موجب افزایش ۴۵ و ۸۵ درصد مقدار کربن آلی در مقایسه با تیمار C شدند و این افزایش در مورد تیمارهای S و SB2 به ترتیب حدود ۶۱ و ۸۱ درصد بود. با افزایش سطح کاربرد بیوپچار در تیمارهای منفرد و همچنین ترکیبی، مقدار کربن آلی خاک افزایش بیشتری را نشان داد. بیوپچار به‌طور مستقیم با تأمین کربن پایدار و مقاوم به تجزیه، موجب افزایش کربن آلی خاک می‌شود. علاوه بر این، بیوپچار از طریق بهبود ساختمان خاک و تشکیل خاکدانه‌های پایدار، کربن آلی موجود در خاک را در داخل خاکدانه‌ها محافظت کرده و همچنین با فراهم‌آوری زیستگاه مناسب برای ریزجانداران، تولید کربن میکروبی را تحریک می‌کند (Osman et al., 2022). (Khaji et al., 2025) افزایش ۲/۲۱ تا ۲/۲۹ برابری مقدار کربن آلی خاک را در اثر کاربرد بیوپچارهای اصلاح‌شده در یک خاک لومرسی آهکی را گزارش دادند و این افزایش را به مقدار کربن آلی بیشتر در این بیوپچارها نسبت دادند. بیوپچار از طریق سازوکارهای بیوشیمیایی، مانند افزایش آروماتیسیته و تعاملات آلی-معدنی، تشکیل ذخایر کربن پایدار را تقویت کرده و از کربن آلی خاک محافظت می‌کند (Chen et al., 2024). مطالعات متاآنالیز، افزایش ۲۰ تا ۸۴ درصدی در کربن آلی خاک را بسته به نوع خاک، ویژگی‌های بیوپچار و مقدار کاربرد گزارش کرده‌اند، که بیشترین افزایش در خاک‌های با بافت ریز و استفاده درازمدت مشاهده می‌شود (Gross et al., 2021; Chagas et al., 2022). از دلایل افزایش مقدار کربن آلی در تیمار ریزجلبک باید به رشد سریع و کارایی بالای فتوسنتزی آنها اشاره کرد، زیرا ریزجلبک‌ها توانایی بالقوه‌ای در جذب و ذخیره‌سازی CO<sub>2</sub> اتمسفر دارند و در این زمینه از گیاهان خشکی‌زیست نیز عملکرد بالاتری نشان می‌دهند (Brennan & Owende, 2010). همچنین ریزجلبک‌ها می‌توانند در روش‌های نوین ذخیره‌سازی کربن، از جمله تولید بیوپچار و ذخیره‌سازی زمین‌شناختی، نقش مؤثری ایفا کنند؛ بیوپچار حاصل از پیرولیز زیست‌توده جلبکی، کربن را به شکلی پایدار در خاک تثبیت کرده و کیفیت خاک را بهبود می‌بخشد، که به افزایش ذخیره‌سازی طولانی‌مدت کربن کمک می‌کند (Leong & Chang, 2023). ریزجلبک‌ها با ورودی مستقیم کربن و تحریک فعالیت میکروبی به افزایش مقدار کربن آلی خاک کمک می‌کنند اما اثر بخشی آنها کمتر از بیوپچار گزارش شده است (Hue et al., 2019). (Hu et al., 2019) در یک پژوهش آنکوباسیون آزمایشگاهی گزارش دادند که پس از اصلاح خاک با ترکیبی که شامل ریزجلبک، بیوپچار و بالاترین سطح کود دامی بود، کربن آلی به‌طور قابل توجهی (تا ۲/۹ برابر سطح اولیه) افزایش یافت. این پژوهش‌گران بیان کردند که متابولیت‌های ریزجلبکی توسط ریزجانداران خاک به عنوان منبع کربن مورد استفاده قرار گرفتند، بیوپچار غلظت پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی را کاهش داد، در حالی که کود آلی، غلظت پروتئین خارج سلولی را افزایش داد. این متابولیت‌ها بر نسبت گروه‌های مختلف ریزجانداران خاک تأثیر گذاشتند که این امر یک اثر هم‌افزایی مثبت بر کربن آلی خاک ایجاد کرد و ظرفیت خاک برای تثبیت کربن را بالا برد. در پژوهشی دیگر؛ Zhang et al. (2017) تأثیر بیوپچار، کود آلی و ریزجلبک بر ظرفیت ذخیره کربن در خاک را بررسی کردند. نتایج نشان داد که کربن آلی کل خاک در تیمارهای ریزجلبک-کود آلی، ریزجلبک-بیوپچار و ریزجلبک-کود آلی-بیوپچار به ترتیب حدود ۱۶، ۶۷ و ۵۸ درصد بالاتر از تیمار ریزجلبک به تنهایی بود. کود آلی می‌تواند با افزایش تولید پلی‌ساکارید درون سلولی

ریزجلبک‌ها، تبدیل کربن جلبکی به مولکول‌های سلولی را تحریک کند و بیوپچار می‌تواند مسیر متابولیسم کربن ریزجلبک‌ها را از طریق تغییر در بازده ساکاریدهای درون سلولی و بازده و نوع ساکاریدهای خارج سلولی تغییر دهد (Zhang et al., 2017).

### تأثیر بیوپچار و ریزجلبک بر ویژگی‌های فیزیکی و ساختمانی خاک

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثر تیمارها بر روی میانگین وزنی و هندسی و بعد فرکتال خاکدانه، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک در سطح احتمال یک درصد ( $p < 0.01$ ) و بر جرم مخصوص حقیقی در سطح احتمال پنج درصد ( $p < 0.05$ ) معنادار بود. مقایسه میانگین ویژگی‌های موردبررسی در شکل ۴ آورده شده است. نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تمامی تیمارهای منفرد و ترکیبی بیوپچار و ریزجلبک موجب افزایش معناداری میانگین وزنی و (MWD) و هندسی قطر خاکدانه (GMD) و کاهش بعد فرکتال خاکدانه (FD) در مقایسه با تیمار شاهد شدند. بیشترین افزایش MWD مربوط به تیمار S بود اما بیشترین افزایش GMD کاهش FD در مقایسه با تیمار شاهد مربوط به تیمار SB5 بود. MWD در تیمار SB5 به‌طور معنادار کمتر از تیمار SB2 بود و در مورد GMD و FD تفاوت معناداری بین دو تیمار فوق‌الذکر وجود نداشت. (شکل‌های ۴a و ۴b). تمامی تیمارهای منفرد و ترکیبی بیوپچار و ریزجلبک موجب کاهش معنادار جرم مخصوص ظاهری و افزایش مقدار تخلخل خاک در مقایسه با تیمار C شدند. جرم مخصوص حقیقی خاک تنها در تیمار SB5 در مقایسه با تیمار C به‌طور معنادار کمتر بود و سایر تیمارهای بیوپچار و ریزجلبک تفاوت معناداری را در مقایسه با تیمار C نشان ندادند (شکل‌های ۴c و ۴d). کمترین جرم مخصوص ظاهری و بیشترین تخلخل مربوط به تیمارهای SB5 و SB2 بود اما تفاوت معنادار با یکدیگر و تیمارهای B2 و B5 نداشتند. جرم مخصوص ظاهری و تخلخل کل در تیمار S به‌طور معنادار کمتر از سایر تیمارهای بیوپچار و ریزجلبک بود. با افزایش سطح کاربرد بیوپچار در تیمارهای منفرد و ترکیبی بیوپچار و ریزجلبک، مقدار جرم مخصوص ظاهری و تخلخل به‌ترتیب کاهش و افزایش جزئی اما غیرمعناداری را نشان دادند (شکل ۴c و ۴d).



شکل ۴. اثر انواع تیمار بر (a) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها، (b) بعد فرکتال خاکدانه، (c) جرم مخصوص ظاهری و جرم مخصوص حقیقی، (d) تخلخل خاک. C: تیمار شاهد (بدون بیوپچار و ریزجلبک)، S: تیمار دارای ریزجلبک، B2 و B5: به‌ترتیب تیمار دارای بیوپچار ۲ و ۵ درصد، SB2 و SB5: به‌ترتیب تیمار دارای بیوپچار ۲ و ۵ درصد بیوپچار به‌همراه ریزجلبک. حروف متفاوت بر روی ستون‌ها بیانگر تفاوت معنادار تیمارها بر اساس آزمون توکی هستند؛ به‌گونه‌ای که تمام متغیرها، به استثنای جرم مخصوص حقیقی، در سطح احتمال ۱٪ معنادار شدند، در حالی که جرم مخصوص حقیقی در سطح ۵٪ تفاوت معنادار نشان داد. نوارهای خطا نشان‌دهنده خطاهای استنادی میانگین‌ها هستند (n=3).

## اثر بیوپچار و ریزجلبک بر ویژگی‌های فیزیکی و ساختمانی خاک

یافته‌های این مطالعه نشان داد که همه تیمارهای منفرد و ترکیبی بیوپچار بر شاخص‌های پایداری خاکدانه اثر مثبتی داشتند؛ که بیشترین افزایش MWD مربوط به تیمار S بود که توانست MWD را نسبت به تیمار C به مقدار ۱۶۶ درصد افزایش دهد. اما بیشترین افزایش GMD و کاهش بعد فرکتال خاکدانه (FD) در مقایسه با تیمار شاهد مربوط به تیمار SB2 بود. شاخص‌های خاکدانه شامل MWD و GMD هر دو برای کمی‌سازی اندازه متوسط خاکدانه‌ها به کار می‌روند؛ مقادیر بالاتر آن‌ها نشان‌دهنده خاکدانه‌های بزرگتر، پایدارتر و ساختمان بهبود یافته خاک است، با این تفاوت که MWD حساسیت بیشتری به خاکدانه‌های بزرگ دارد و GMD توزیع کلی اندازه‌ها را نشان می‌دهد. این دو شاخص با کربن آلی خاک همبستگی مثبت دارند و به‌طور گسترده برای ارزیابی تأثیر عملیات مدیریتی، کاربری زمین و کاربرد اصلاح‌کننده‌ها بر پایداری خاک استفاده می‌شوند (Li et al., 2024; Zhou et al., 2020). نتایج پژوهش حاضر نیز موید ارتباط مثبت معنادار MWD و GMD با مقدار کربن آلی خاک بود (جدول ۳). در مقابل، شاخص FD، مقدار پیچیدگی و خردشدگی توزیع اندازه خاکدانه‌ها را مشخص می‌کند و اطلاعات مکملی ارائه می‌دهد. مقادیر پایین‌تر FD به معنای خاکدانه‌سازی بهتر و پایداری بالاتر و مقادیر بالاتر آن نشان‌دهنده خاک‌های ناپایدارتر است (Mikha et al., 2023; Dai et al., 2024; Li et al., 2024). مقدار GMD بیشتر و FD کمتر تیمار SB2 ( $FD=3/23$  و  $GMD=1/20$ ) در مقایسه با تیمار S ( $FD=3/33$  و  $GMD=0/84$ ) با وجود کمتر بودن MWD تیمار SB2، نشان‌دهنده بهبود یکنواخت و عمومی توزیع اندازه خاکدانه‌ها در کل طیف اندازه‌های و بیان‌گر کمترین مقدار خرد شدن و بیشترین پایداری ذاتی و ساختمان‌یافتگی در برابر نیروهای مخرب می‌باشد. پایداری خاکدانه یک ویژگی مهم از ساختمان خاک را نشان می‌دهد که ارتباط نزدیکی با رژیم رطوبتی (Rallo et al., 2014) و فرسایش‌پذیری خاک (Cantón et al., 2009) دارد. علاوه بر این، پایداری خاکدانه نقشی اساسی در تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع ایفا می‌کند (Baiamonte and Singh, 2017). افزایش پایداری خاکدانه باعث کاهش هدرفت خاک، کربن، نیتروژن و فسفر شده و میزان خاکدانه‌های بزرگ و همچنین تخلخل کلی را افزایش می‌دهد (Kasper et al., 2009). علاوه بر پایداری خاکدانه، کمی‌سازی تغییرات ساختمان خاک اغلب از طریق اندازه‌گیری‌های مرسوم ویژگی‌های فیزیکی مانند جرم مخصوص ظاهری و تخلخل، منحنی نگهداری آب، منحنی هدایت هیدرولیکی خاک نیز انجام می‌شود که این ویژگی‌ها به شدت با ساختمان خاک مرتبط هستند (Pagliai et al., 2004). براساس یافته‌های این پژوهش، بیشترین مقدار تخلخل خاک نیز در تیمارهای SB2 و SB5 مشاهده شد که در آنها مقدار تخلخل نسبت به تیمار C به ترتیب حدود ۲۸ و ۳۰ درصد افزایش یافت. تیمار S با افزایش ۱۵ درصدی مقدار تخلخل خاک، دارای اثرگذاری کمتری بر مقدار تخلخل در مقایسه با سایر تیمارهای بیوپچار و ریزجلبک بود. نتایج این مطالعه نشان داد که کاربرد بیوپچار و ریزجلبک به صورت منفرد و ترکیبی موجب افزایش کربن آلی خاک (شکل ۳c) و بهبود شاخص‌های پایداری خاکدانه (شکل ۴) شد. مواد آلی با دارا بودن چگالی کم، جرم کلی در واحد حجم خاک را کاهش داده و همچنین می‌توانند ساختمان خاک را بهبود بخشند و موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش مقدار تخلخل خاک نیز می‌شوند (Robinson et al., 2022). باتوجه به آنچه در مورد اثرگذاری تیمارهای بیوپچار و ریزجلبک بیان شد؛ در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که تیمار ترکیبی دارای ریزجلبک و ۲ درصد بیوپچار، بیشترین اثرگذاری را در ارتقای ساختمان و بهبود خواص فیزیکی خاک نشان داده است. مطالعات در مورد اثرات کاربرد منفرد بیوپچار نشان داده‌اند که بیوپچار می‌تواند بر ساختمان خاک و الگوی تخلخل خاک تأثیر بگذارد. متاآنالیزها و مطالعات آزمایشی نشان می‌دهند که بیوپچار می‌تواند تخلخل کل خاک را در حدود ۸ تا ۶۶ درصد افزایش دهد، که مقدار این اثر به نرخ کاربرد، اندازه ذرات بیوپچار، مواد اولیه مورد استفاده جهت تولید و دمای پیرولیز وابسته است (Singh et al., 2022; Edeh et al., 2020). کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل خاک، مزایای متعددی مانند بهبود تهویه و نفوذ آب، کاهش رواناب سطحی، تسهیل توسعه ریشه گیاهان را به دنبال دارد (Downie et al., 2009). این تغییرات فیزیکی به همراه افزایش ظرفیت نگهداری آب و تجمع مواد آلی، شرایط زیستی مناسب را برای فعالیت ریزجانداران و بازسازی زیست‌بوم فراهم می‌کنند (Schmidt et al., 2011). تخلخل خاک پس از افزودن بیوپچار ممکن است از طریق دو مکانیسم اصلی شامل تخلخل ذاتی ذرات بیوپچار (Yi et al., 2020) و یا موقعیت و تعامل آن با ساختمان خاک تغییر یابد. مکانیسم دوم شامل سه حالت است: (الف) پر کردن فضاهای خالی بین ذرات معدنی، به‌ویژه در خاک‌های با بافت درشت (Edeh et al., 2020)، (ب) اشغال فضایی که قبلاً توسط ذرات معدنی یا ریزتوده آلی-معدنی اشغال شده بود، یا (ج) عملکرد به عنوان یک عامل چسباننده که منجر به ایجاد یک اثر ساختمان‌دهی در خاک، مشابه افزودن مواد آلی غیرزغالی می‌شود (Burgeon et al., 2021). علاوه بر این، افزودن بیوپچار به خاک ممکن است از طریق تأثیرات غیرمستقیم بر بیولوژی خاک (Li et al., 2020) و محتوای مواد آلی غیرزغالی (Burgeon et al., 2021) نیز منجر به یک اثر ساختمان‌دهی شود، هرچند که تفکیک این تأثیرات غیرمستقیم از تأثیرات مستقیم افزودن بیوپچار به خاک امکان‌پذیر نیست (et al., 2023). (Zanutel) به‌عنوان نمونه، سان و همکاران (Sun et al., 2023) در

یک مطالعه میدانی دوساله بر روی خاک لوم رسی در شمال چین، اثر کاربرد بیوپچار حاصل از بقایای گیاهی را بر پویایی خاکدانه‌ها بررسی کردند و گزارش دادند که افزودن ۱۰ تن بیوپچار در هکتار موجب افزایش حدود ۲۵ درصدی مقدار GMD شد. مطالعات انجام‌شده بر روی ترکیب بیوپچار و اصلاح‌کننده‌های آلی مانند کود دامی، بهبودهای هم‌افزایی را در تخلخل و ساختمان خاک نشان می‌دهند (Sun et al., 2025). Shang et al. (2023) در چین نشان دادند که افزودن بیوپچار همراه با کود مایع جلبکی به خاک‌های اسیدی موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل و بهبود تهویه خاک شد. ریزجلبک‌ها با تولید مواد پلی‌مری خارج سلولی (EPS) و تشکیل پوسته زیستی، ذرات خاک را به هم متصل کرده و خاکدانه‌های بزرگتر و مقاوم‌تر در برابر آب ایجاد می‌کنند می‌توانند باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها و بهبود ساختمان خاک شوند (Crouzet et al., 2019). EPS مستقیم با جذب شدن بر روی سطوح معدنی و تشکیل پل‌های آلی-معدنی، خاکدانه‌سازی را تقویت می‌کنند که این امر باعث پایداری هم‌افزایی ریز و هم‌افزایی خاکدانه‌های درشت می‌شود. غلظت بالاتر EPS با افزایش پایداری خاکدانه‌ها و MWD همبستگی بالایی دارد (Luo et al., 2024). پژوهش‌های موجود در زمینه بهره‌گیری از ریزجلبک‌ها بیان‌گر کارایی آنها برای بهبود ویژگی‌های ساختمانی خاک است. به‌عنوان مثال، تلقیح ریزجلبک *Microcoleus vaginatus* در خاک تخریب‌یافته، محتوای خاکدانه‌های درشت را ۳۳/۸ درصد، MWD و GMD را به ترتیب ۱۱۰ و ۱۰۱ درصد افزایش داد (Wang et al., 2025). نتایج مشابهی در خاک‌های کشاورزی مشاهده شد، به‌طوری‌که ریزجلبک‌ها و پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی آن‌ها بسته به روش‌های مدیریتی، بزرگ‌ترین کسر خاکدانه‌ها را تا ۲۷ برابر و MWD را ۲/۴ تا ۴/۲ برابر افزایش دادند (Crouzet et al., 2019). Wang et al. (2025) امکان استفاده از ترکیبی آلژینات سدیم، ریزجلبک *Chlorella* و مونت‌موریلونیت برای بهبود خاک باطله‌های مس را بررسی کردند و نتایج آن مطالعه نشان داد که کاربرد این ترکیب موجب افزایش معنادار شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها شامل GMD و MWD شد که نشان‌دهنده بهبود ساختمان خاک است. در شرایط بهینه، پوسته‌های ریزجلبکی می‌توانند بزرگترین خاکدانه‌ها را تا ۲۷ برابر و MWD را تا ۴/۲ برابر افزایش دهند (Crouzet et al., 2019). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که کودهای زیستی مبتنی بر ریزجلبک‌ها، به‌زمانی که با اصلاح‌کننده‌های آلی ترکیب شوند، باعث بهبود ساختمان خاک، تنوع میکروبی و چرخه مواد غذایی می‌شوند (Ning et al., 2025)، که همگی از تخلخل بالاتر خاک حمایت می‌کنند.

## نتیجه‌گیری

یافته‌های حاصل، نشان‌دهنده اثربخشی مثبت تیمارهای منفرد و ترکیبی بر پارامترهای کلیدی خاک از جمله کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل، بهبود پایداری خاکدانه و افزایش محتوای کربن آلی بود. اما در مجموع تیمارهای ترکیبی بیوپچار و ریزجلبک کارایی بهتری در مقایسه با کاربرد منفرد هر یک از آنها نشان دادند. در میان تیمارهای مورد بررسی، تیمار SB2 (بیوپچار ۲ درصد + ریزجلبک) را می‌توان به‌عنوان کارآمدترین تیمار معرفی نمود که موجب بهینه‌سازی توزیع اندازه خاکدانه‌های پایدار و همچنین بهبود قابل‌ملاحظه تخلخل و مقدار کربن آلی در خاک لوم‌سیلنتی مورد مطالعه نیز گردید. تیمار SB5 (بیوپچار ۵ درصد + ریزجلبک) بیشترین افزایش در کربن آلی خاک را به همراه داشت و پس از آن تیمار SB2 (بیوپچار ۲ درصد + ریزجلبک) قرار داشت. با این حال، لازم به ذکر است که کاربرد ترکیبی بیوپچار و ریزجلبک اثری آنتاگونیستی بر شوری خاک نشان داد که نیازمند بررسی‌های تکمیلی در مطالعات آتی است. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که ترکیب بیوپچار و ریزجلبک می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی کم‌هزینه، پایدار و زیست‌سازگار برای بازسازی خاک مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد ضمن بهبود ساختمان خاک احتمالاً با افزایش نفوذپذیری و کاهش فرسایش، زمینه مناسبی برای بازگشت پوشش گیاهی و احیای زیست‌بوم‌های جنگلی آسیب‌دیده فراهم می‌آورد و می‌تواند در برنامه‌های مدیریت پایدار خاک و حفاظت از منابع طبیعی مورد توجه قرار گیرد.

## ملاحظات اخلاقی

### حامی مالی:

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه گیلان، دانشکده علوم کشاورزی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

### مشارکت نویسندگان:

نویسنده اول: مهسا کوهستانی اردومحله، تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل

آماري داده‌ها، تحليل و تفسير اطلاعات و نتايج، تهيه پيشنويس مقاله  
 نويسنده دوم: سپيده ابريشم‌کش، طراحي پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، تجزيه و تحليل آماري داده‌ها، بررسي و کنترل نتايج،  
 اصلاح، بازبيني و نهايي‌سازي مقاله

نويسنده سوم: نسرین قربان‌زاده، مشارکت در طراحي پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبيني مقاله  
 نويسنده چهارم: نفیسه یغمائیان، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبيني مقاله  
 نويسندگان از ابزارهای هوش مصنوعي مولد و فناوري‌های مبتني بر هوش مصنوعي در فرايند نگارش مقاله استفاده نموده‌اند.

**بيانيه دسترسي به داده‌ها و سياست اشتراك‌گذاري داده‌ها:**

داده‌های پژوهش حاضر از طريق درخواست از نويسندگان قابل دسترسي است.

**سياسگزاري:**

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاري می‌شود.

**پيروي از اصول اخلاق پژوهش:**

نويسندگان اصول اخلاقي را در انجام و انتشار اين پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و اين موضوع مورد تأييد همه آنهاست.

**تعارض منافع:**

بنا بر اظهار نويسندگان اين مقاله تعارض منافع ندارد.

## REFERENCES

- Abiven, S., Menasseri, S., & Chenu, C. (2009). The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability: A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 41, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>
- Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., & Asare, R. O. (2022). A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, 33, 1419–1441. <http://dio.org/10.1007/s11676-022-01475-4>
- Andersen, R.A., (2013). The microalgal cell, in: Richmond, A., Hu, Q. (Eds.), *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology & Biotechnology*. Wiley Blackwell, Hoboken, NJ, pp. 3–20. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch1>
- Baiamonte, G., & Singh, V. P. (2017). Modelling the probability distribution of peak discharge for infiltrating hillslopes. *Water Resources Research*, 53(1), 1–16. <https://doi.org/10.1002/2016WR019864>
- Barszcz, W., Koncewicz-Baran, M., & Skiba, D. (2024). Impact of pyrolysis process conditions on the structure of biochar. *Applied Sciences*, 14(3), 1105. <http://dio.org/10.1038/s41598-024-61394-8>
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. In *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods* (pp. 363–375). *Soil Science Society of America, Inc.* <http://dio.org/10.12691/aees-3-5-1>
- Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, & extractions of biofuels & co-products. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 557–577. <http://dio.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>
- Burgeon, V., Fouché, J., Garré, S., Dekhordi, R. H., Colinet, G., & Cornelis, J.-T. (2022). Young and century-old biochars strongly affect nutrient cycling in a temperate agroecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 328, 107847. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107847>
- Cantón, Y., Solé-Benet, A., Asensio, C., Chamizo, S., & Puigdefábregas, J. (2009). Aggregate stability in range sandy loam soils: Relationships with runoff and erosion. *Catena*, 77(3), 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.09.008>
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia*, 143(1), 1–10. <http://dio.org/10.1007/s00442-004-1788-8>
- Chagas, J. K. M., Figueiredo, C. C. de, & Ramos, M. L. G. (2022). Biochar increases soil carbon pools: Evidence from a global meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 305, 114403. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114403>
- Chamizo S, Adessi A, Certini G, De Philippis R. (2020). Cyanobacteria inoculation as a potential tool for stabilization of burned soils. *Restor Ecol*, 28:S106-S114. <http://dio.org/10.1111/rec.13092>
- Chatterjee, R., Madras, G., & Suresh, A. K. (2020). Effect of pyrolysis temperature on physico-chemical properties & gasification reactivity of sugarcane bagasse derived biochar. *Frontiers in Energy Research*, 8, 85. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00085>
- Chen, H., Yu, S., Yu, Z., Liu, M., & Pei, H. (2024). Phycoremediation potential of salt-tolerant microalgal species: Motion, metabolic characteristics, and their application for saline-alkali soil improvement in eco-farms. *Microorganisms*, 12(4), 0676. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12040676>
- Chen, X., Lewis, S., Heal, K., Lin, Q., & Sohi, S. (2021). Biochar engineering and ageing influence the spatiotemporal

- dynamics of soil pH in the charosphere. *Geoderma*, 383, 114919. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114919>
- Chicco, J. M., Mandrone, G., & Vacha, D. (2023). Effects of wildfire on soils: Field studies and modelling on induced underground temperature variations. *Frontiers in Earth Science*, 11, Article 1307569. <http://dio.org/10.3389/feart.2023.1307569>
- Crouzet, O., Consentino, L., Pétraud, J.-P., Marraud, C., Aguer, J.-P., Bureau, S., Le Bourvellec, C., Touloumet, L., & Bérard, A. (2019). Soil photosynthetic microbial communities mediate aggregate stability: Influence of cropping systems and herbicide use in an agricultural soil. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1319. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019>
- Dai, W., Feng, G., Huang, Y., Tewolde, H., Shankle, M., & Jenkins, J. (2024). Cover crops and poultry litter impact on soil structural stability in dryland soybean production in Southeastern United States. *Soil Science Society of America Journal*, 88(1), e20676. <https://doi.org/10.1002/saj2.20676>
- Dekker, L. W., & Jungerius, P. D. (1990). Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena*, 17(2), 173–183. <http://dio.org/10.1016/B978-0-444-51269-7.50012-6>
- Edeh, I. G., Joseph, S., Dufresne, A., & Lehmann, J. (2020). A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties. *Geoderma*, 357, 113974. <http://dio.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857>
- Edeh, I., Mašek, O., & Buss, W. (2020). A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties: New insights and future research challenges. *The Science of the Total Environment*, 714, 136857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857>
- Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S., & Lehmann, J. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance & agronomic performance. *Bioresource Technology*, 114, 644–653. <http://dio.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022>
- Faraji, F., Alijanpour, A., Sheidai Karkaj, E., & Motamedi, J. (2019). Effect of fire and rangeland banqueting on soil carbon sequestration in Atbatan summer rangelands, East Azerbaijan Province. *ECOPERSIA*, 7(1), 29–37. <https://ecopersia.modares.ac.ir/article-24-18060-fa.html>
- Fernelius, K.J. Madsen, M.D. Hopkins, B.G. Bansal, Sh. Anderson, V.J. Eggett, D.L. & Roundy, B.A. (2017). Post-fire interactions between soil water repellency, soil fertility & plant growth in soil collected from a burned piñon-juniper woodland. *Journal of Arid Environments*, 114:98–109. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140196317300721>
- García-Carmona, M., Arcenegui, V., García-Orenes, F., Mataix-Solera, J., (2020). The role of mosses in soil stability, fertility and microbiology six years after a post-fire salvage log ging management. *J. Environ. Manag.* 262, 110287. <http://dio.org/10.1016/j.jenvman.2020.110287>
- García-Llamas, P., Suárez-Seoane, S., Fernández-Guisuraga, J. M., Fernández-García, V., Fernández-Manso, A., Quintano, C., et al. (2019). Evaluation and comparison of Landsat 8, Sentinel-2 and Deimos-1 remote sensing indices for assessing burn severity in Mediterranean fire-prone ecosystems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 80, 137–144. <http://dio.org/10.1016/j.jag.2019.04.006>
- Gómez-Rey, M. X., Otero, X. L., & López, R. (2013). Long-term effects of biochar on soil quality & fertility. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 178, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.06.020>
- Gross, A., Bromm, T., & Glaser, B. (2021). Soil organic carbon sequestration after biochar application: A global meta-analysis. *Agronomy*, 11(12), 2474. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122474>
- Gufwan, L. A., Peng, L., Gufwan, N. M., Lan, S., & Wu, L. (2025). Enhancing soil health through biocrusts: A microbial ecosystem approach for degradation control and restoration. *Soil Biology and Biochemistry*, 160, 108–118. <http://dio.org/10.1007/s00248-025-02504-5>
- Heydari Nezhad, A. M. (2023). The effect of green microalgae *Scenedesmus obliquus* aqueous extract on enzyme production ability of *Trichoderma* species. *MG Genetics*, 1(1), 1735. <http://mg.genetics.ir/article-1-1735-en.html>
- Hu, J., Guo, H., Xue, Y., Gao, M.-T., Zhang, S., Tsang, Y. F., Li, J., Wang, Y., & Wang, L. (2019). Using a mixture of microalgae, biochar, & organic manure to increase the capacity of soil to act as a carbon sink. *Journal of Soils & Sediments*, 19(11), 3718–3727. <http://dio.org/10.1007/s11368-019-02337-z>
- International Biochar Initiative. (2015). Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil (Version 2.1). International Biochar Initiative. <https://www.biochar-international.org>
- Kalantari, Z., Ferreira, C. S. S., Pan, H., & Pereira, P. (2023). Nature-based solutions to global environmental challenges. *Science of The Total Environment*, 880, Article 163227. <http://dio.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163227>
- Kasper, M., Buchan, G. D., Mentler, A., & Blum, W. E. H. (2009). Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions. *Soil & Tillage Research*, 105(1), 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.06.010>
- Khaji, P., Moezzi, A., Enayatizamir, N., Moradi, N., & Karimi, A. (2025). Effects of modified biochars on some biological and chemical properties of calcareous soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(2), 373–388. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.384714.669826>
- Khan, T. F., & Nipu, A. A. M. (2019). Interaction between biochar & algae on problem soil. *Journal of Materials Science & Chemical Engineering*, 12, 56–68. <https://doi.org/10.4236/msce.2024.121005>
- Knorr W, Arneth A, Jiang L (2016) Demographic controls of future global fire risk. *Nat Clim Change*, 6(8):781–785. <http://dio.org/10.1038/nclimate2999>

- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895. <http://dio.org/10.3390/su7055875>
- Leong, Y. K., & Chang, J. S. (2023). Microalgae-based biochar production & applications: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 389, 129782. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128515>
- Liang, B., Lehmann, J., Sohi, S. P., Thies, J. E., O'Neill, B., & Trujillo, L. (2010). Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soils of the western Amazon region. *Biogeochemistry*, 100(1), 235–246. <http://dio.org/10.1016/j.orggeochem.2009.09.007>
- Li, J., Li, J., Hua, D., Li, S., Pang, Z., & Jiang, H. (2024). Research on the enhancement material and culture method of soil aggregates composed of feldspathic sandstone and sand. *Scientific Reports*, 14, 67073. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67073-y>
- Li, K., Yang, H., Han, X., Xue, L., Lv, Y., Li, J., Fu, Z., Li, C., Shen, W., Guo, H., & Zhang, Y. (2018). Fractal features of soil particle size distributions and their potential as an indicator of Robinia pseudoacacia invasion. *Scientific Reports*, 8, 7075. <http://dio.org/10.1038/s41598-018-25543-0>
- Li, M., Wang, Q., Shen, S., Li, F., & Li, L. (2020). Heterogeneity of soil structure and fertility during desertification of alpine grassland in northwest Sichuan. *Ecosphere*, 11(11), e03161. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3161>
- Li, Y., Yang, J., Yang, M., Wang, B., & Zhang, F. (2025). Biochar application reduces soil detachment capacity by overland flow under a continuous three-year field experiment on the Loess Plateau of China. *International Soil & Water Conservation Research*, 13(12), 687–698. <http://dio.org/10.1016/j.iswcr.2025.04.002>
- Liu, Z., Dugan, B., Masiello, C. A., & Gonnermann, H. M. (2020). Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *PLoS ONE*, 15(1), e0227989. <http://dio.org/10.1371/journal.pone.0179079>
- Llovet, J., Ruiz-Valera, M., Josa, R., & Vallejo, V. R. (2009). Soil responses to fire in Mediterranean forest landscapes in relation to the previous stage of land abandonment. *International Journal of Wildland Fire*, 18(2), 222–232. <http://dio.org/10.1071/WF07089>
- Lopičić, Z., Antanasković, A., Milojković, J., Adamović, V., Mišić, M., Janjićijević, A., & Šoštarić, T. (2025). Physicochemical characterization and stability of biochars intended to be applied as soil amendments. *Metallurgical & Materials Engineering Congress of South-East Europe*. <https://doi.org/10.30544/mmesee54>
- MacDonald, L.H., Larsen, I., (2009). Effects of forest fires & post-fire rehabilitation: a Colorado, USA case study. In: Cerdá, A., Robichaud, P.R. (Eds.), *Fire Effects on Soils & Restoration Strategies*. Science Publishers, Enfield, NH, USA, pp. 423–452. <https://doi.org/10.1201/9781439843338-c16>
- Méndez, A., Terradillos, M., & Gascó, G. (2012). Physicochemical & agronomic properties of biochar from sewage sludge pyrolysed at different temperatures. *Journal of Analytical & Applied Pyrolysis*, 102, 124–130. <http://dio.org/10.1016/j.jaap.2013.03.006>
- Mikha, M., Green, T., Untiedt, T., & Hergret, G. (2023). Land management affects soil structural stability: Multi-index principal component analyses of treatment interactions. *Soil and Tillage Research*, 237, 105890. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105890>
- Muñoz-Rojas, M., Machado de Lima, N. M., Chamizo, S., & Bowker, M. A. (2021). Restoring post-fire ecosystems with biocrusts: Living, photosynthetic soil surfaces. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 23, 100273. <http://dio.org/10.1016/j.coesh.2021.100273>
- Najjar, A. A., Kuhn, A. J., Al-Tardeh, S. M., & Kuchendorf, C. M. (2021). Microalgae & biochar agro-fertilization of the Palestinian Rehan barley cultivar under salinity stress. *Agronomy*, 11(11), 2309. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112309>
- Ngalani, G., Kagho, F., Peguy, N., Prudent, P., Ondo, J., & Ngameni, E. (2022). Effects of coffee husk and cocoa pods biochar on the chemical properties of an acid soil from West Cameroon. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69, 744–758. <https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2033733>
- Ngui, M., Lin, Y., Wei, I., Wang, C., Xu, Y., & Lin, Y. (2024). Effects of the combination of biochar and organic fertilizer on soil properties and agronomic attributes of soybean (*Glycine max* L.). *PLOS ONE*, 19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0310221>
- Nguyen, B., Dinh, G., Nguyen, T., Nguyen, D., Vu, T., Tran, H., Van Thai, N., Vu, H., & D., D. (2022). The potential of biochar to ameliorate the major constraints of acidic and salt-affected soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22, 1340–1350. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00736-1>
- Ning, Y., Han, L., Zhu, Y., & Li, H. (2025). Microalgae enhance the ameliorative effects of organic materials on soil treated by thermal desorption: Soil properties and nutrient cycling. *Journal of Environmental Management*, 392, 126737. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126737>
- Novak, J. M., Busscher, W. J., Laird, D. L., Ahmedna, M., Watts, D. W., & Niandou, M. A. S. (2009). Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science*, 174(2), 105–112. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181981d9a>
- Osman, A., Fawzy, S., Farghali, M., El-Azazy, M., Elgarahy, A., Fahim, R., Maksoud, M., Ajlan, A., Yousry, M., Saleem, Y., & Rooney, D. (2022). Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20, 2385–2485. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01424-x>
- Pagliai, M., Vignozzi, N., & Pellegrini, S. (2004). Soil structure and the effect of management practices. *Soil & Tillage Research*, 79, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.002>

- Prats, S. A., Malvar, M. C., Vieira, D. C. S., MacDonald, L. H., & Keizer, J. J. (2014). Effectiveness of hydromulching to reduce runoff & erosion in a recently burnt pine plantation in central Portugal. *Land Degradation & Development*, 25(5), 433–444. <http://doi.org/10.1002/ldr.2236>
- Rallo, G., Baiamonte, G., Juárez, J., & Provenzano, G. (2014). Improvement of FAO-56 model to estimate transpiration fluxes of drought tolerant crops under soil water deficit: Application for olive groves. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(7), 04014026. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000760](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000760)
- Renuka, N., Guldhe, A., Prasanna, R., Singh, P., & Bux, F. (2018). Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: Current trends, prospects and challenges. *Biotechnology Advances*, 36(4), 1255–1273. <http://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.04.004>
- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 3—Chemical Methods* (pp. 417–435). Soil Science Society of America. <http://doi.org/10.2136/amsa2015.0039>
- Robichaud, P.R., Beyers, J.L., Neary, D.G., (2000). Evaluating the effectiveness of postfire rehabilitation treatments. GTR 63. USDA, Forest Service, *Rocky Mountain Research Station*, p. 85.
- Robinson, D., Thomas, A., Reinsch, S., Lebron, I., Feeney, C., Maskell, L., Wood, C., Seaton, F., Emmett, B., & Cosby, B. (2022). Analytical modelling of soil porosity and bulk density across the soil organic matter and land-use continuum. *Scientific Reports*, 12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11099-7>.
- Romeo, S., Certini, G., Fernández, C., Santín, C., & De La Rosa, J. M. (2020). Short-term effects of different fire severities on soil properties & *Pinus halepensis* regeneration. *Forest Ecology & Management*, 474. <http://doi.org/10.1007/s11676-019-00884-2>
- Sahota, S., Vijay, V. K., Subbarao, P. M. V., Chandra, R., Ghosh, P., Shah, G., Kapoor, R., Vijay, V., Koutu, V., & Thakur, I. S. (2018). Characterization of leaf waste based biochar for cost effective hydrogen sulphide removal from biogas. *Bioresource Technology*, 250, 635–641. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.093>
- Schjønning, P., McBride, R., Keller, T., & Obour, P. (2017). Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. *Geoderma*, 286, 83-87. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.020>.
- Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., ... & Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367), 49–56. <http://doi.org/10.1038/nature10386>
- Scott, D. A., & Page-Dumroese, D. S. (2016). Biochar as a soil amendment: A review of the literature. *Forest Ecology & Management*, 380, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.008>
- Shahbazi, K., Marzi, M., Mohammadi, M.H., Asadi, H., Fathi Garlidani, A., Hashemi, Nesb Zavareh, K.S., Tolo, R., Beheshti, M., Avizhgan, A. and Cheraghi, M. (2024). Methods of soil analysis: Sampling, chemical, and physical methods. *Soil and Water Research Institute of Iran*. ISBN: 978-622-6705-36-3. ISBN: 978-622-6705-36-3
- Shang, X.-C., Zhang, M., Zhang, Y., Li, Y., Hou, X., & Yang, L. (2023). Combinations of waste seaweed liquid fertilizer & biochar on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedling growth in an acid-affected soil of Jiaodong Peninsula, China. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 260, 115075. <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115075>
- Shanthakumar, S., Abinandan, S., Venkateswarlu, K., Subashchandrabose, S., & Megharaj, M. (2020). Algalization of acid soils with acid-tolerant strains: Improvement in pH, carbon content, exopolysaccharides, indole acetic acid and dehydrogenase activity. *Land Degradation & Development*, 32, 3157–3166. <https://doi.org/10.1002/ldr.3849>
- Shojaeizadeh, K., Ahmadi, M., & Dadashi-Roudbari, A. (2023). Spatiotemporal changes of forest fire in vegetation areas of Iran based on MODIS sensor. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(36). <http://doi.org/10.22111/jneh.2022.41725.1881>
- Shtober-Zisu, N., & Wittenberg, L. (2021). Long-term effects of wildfire on rock weathering and soil stoniness in the Mediterranean landscapes. *Science of The Total Environment*, 762, 143125. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143125>
- Singh, H., Northup, B., Rice, C., & Prasad, P. (2022). Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: A meta-analysis. *Biochar*, 4, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1>
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105, 47–82. [http://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](http://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
- Song, X., Liu, J., Feng, Y., Zhou, C., Li, X., Yan, X., Ruan, R., & Cheng, P. (2024). Microalgae-based biofertilizers improve fertility and microbial community structures in the soil of potted tomato. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1461945. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1461945>
- Stoof, C.R. Ferreira, A.J.D. Mol, W. Van den Berg, J. De Kort, A. Drooger, S. Slingerland, E.C. Mansholt, A.U. Ferreira C.S.S. & Ritsma, C.J. (2015). Soil surface changes increase runoff & erosion risk after a low–moderate severity fire. *Geoderma*. 239– 240: 58–67. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.020>
- Sun, J., Lu, X., Chen, G., Luo, N., Zhang, Q., & Li, X. (2023). Biochar promotes soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration and regulates microbial community structures in Mollisols from northeast China. *SOIL*, 9, 261-275. <https://doi.org/10.5194/soil-9-261-2023>
- Sun, J., Tu, S., Lu, X., & Li, X. (2025). Coupling of Biochar and Manure Improves Soil Carbon Pool Stability, Pore Structure, and Microbial Diversity. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061384>.
- Šurda, P., Vitková, J., Lichner, L., Botková, N., & Toková, L. (2024, May 22). Effect of wetttable and hydrophobic biochar

- addition on properties of sandy soil. *Biologia*, 80(5), 1247–1258. <http://dio.org/10.1007/s11756-024-01702-9>
- Su, Z., Liu, X., Wang, Z., & Wang, J. (2024). Biochar effects on salt-affected soil properties and plant productivity: A global meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 366, 121653. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121653>
- Tyler, S. W., & Wheatcraft, S. W. (1992). Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal*, 56(2), 362–369. [http://dio.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00138-1](http://dio.org/10.1016/S0016-7061(03)00138-1)
- Úbeda, X., & Bernia, S. (2005). Effects of prescribed fire on soil quality in Mediterranean grassland (Prades Mountains, north-east Spain). *International Journal of Wildland Fire*, 14(4), 379–384. <http://dio.org/10.1071/WF05040>
- Ursino, N., & Rulli, M. C. (2010). Combined effect of fire & water scarcity on vegetation patterns in arid lands. *Ecological Modelling*, 221(19), 2353–2362. <http://dio.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.06.018>
- 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(1), 29–38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wang, Z., Pan, J., Lu, Z., Xia, L., Song, S., Hu, Y., & Li, Y. (2025). Microcoleus vaginatus: A novel amendment for constructing artificial soil from tailings. *Environmental Technology & Innovation*. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103939>
- Wang, Z., Tan, J., Wu, C., Xia, L., & Song, S. (2025). Improving soil properties and microbial communities in copper tailings using montmorillonite-based Chlorella gel beads. *Science of the Total Environment*, 974, 179232. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025>
- Welden, E. A., Chausson, A., & Melanidis, M. S. (2021). Leveraging nature-based solutions for transformation: *Reconnecting people and nature*. *People and Nature*, 3(5), 966–977. <http://dio.org/10.1002/pan3.10212>
- Yi, S., Chang, Y. C., & Imhoff, P. T. (2020). Predicting water retention of biochar enriched soil from independent measurements of biochar and soil properties. *Advances in Water Resources*, 142, 103638. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103638>
- Zanutel, M., Garré, S., Sanglier, P., & Biolders, C. (2023). Biochar modifies soil physical properties mostly through changes in soil structure rather than through its internal porosity. *Vadose Zone Journal*. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20301>
- Zhang, X., Liu, Y., & Zhang, L. (2017). The influence of microalgae on vegetable production & quality in hydroponic systems. *Science of the Total Environment*, 574, 1336–1343. <http://dio.org/10.1016/j.jclepro.2019.118563>
- Zhang, X., Zhang, Y., & Wang, H. (2022). Soil algae for combating soil degradation: Greenhouse experiment with different soil amendments. *Soil Research*, 60(4), 309–318. <https://doi.org/10.1071/SR22074>
- Zhang Y, Biswas A (2017) The effects of forest fire on soil organic matter & nutrients in boreal forests of North America: a review. *Adapt Soil Manage 2017*:465–476. [http://dio.org/10.1007/978-981-10-3638-5\\_21](http://dio.org/10.1007/978-981-10-3638-5_21)
- Zhang, Y., Miao, S., Song, Y., Wang, X., & Jin, F. (2024). Biochar Application Reduces Saline–Alkali Stress by Improving Soil Functions and Regulating the Diversity and Abundance of Soil Bacterial Community in Highly Saline–Alkali Paddy Field. *Sustainability*, 16(3), 1001. <http://dio.org/10.3390/su16031001>
- Zhao, Y., Wu, T., Wang, W., Zhao, L., Liu, J., Jiang, Y., Zhou, W., & Hao, J. (2020). Research on the treatment of soil leachate by using microalgae. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 615, 012113. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/615/1/012113>
- Zhou, M., Liu, C., Wang, J., Meng, Q., Yuan, Y., Liu, X., Zhu, Y., Ding, G., Zhang, J., Zeng, X., & Du, W. (2020). Soil aggregates stability and storage of soil organic carbon respond to cropping systems on Black Soils of Northeast China. *Scientific Reports*, 10, 10991. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57193-1>