



Effect of Modified Biochar and Phosphorus-Solubilizing Bacteria on Soil Chemical and Biochemical Properties Under Sugarcane Cultivation

Pardis Khaji¹, Abdolamir Moezzi^{1*}, Naeimeh Enayatizamir¹, Neda Moradi² and Akbar Karimi³

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- Soil and Water Research Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran

3- Department of Agronomy, Khuzestan Sugarcane Research and Training Institute, Ahvaz, Iran

* Corresponding author, Email: moezzi151@scu.ac.ir

(Received: 6 August 2025; Revised: 6 September 2025; Accepted: 16 September 2025)

Abstract

Background and Objective: Calcareous soils are characterized by alkaline pH, low nutrient retention capacity, and phosphorus deficiency, which together result in low productivity. In this context, the application of modified biochar and phosphorus-solubilizing bacteria (PSB) has been recognized as a promising strategy for improving soil fertility and phosphorus availability. This study aimed to evaluate the effects of biochar produced from green sugarcane harvest residues and its citric acid-modified form, with PSB inoculation, on the chemical and biochemical properties of a calcareous soil under sugarcane cultivation.

Methods: The experiment was conducted under greenhouse conditions in a factorial arrangement based on a completely randomized design. The experimental treatments included biochar prepared from green sugarcane residues at three levels: without biochar (control), unmodified or raw biochar, and biochar modified with citric acid, as well as inoculation of phosphorus-solubilizing bacteria into the soil at two levels: without bacteria (control) and bacterial inoculation.

Results: The results showed that the application of both unmodified and modified biochar significantly affected soil pH, electrical conductivity (EC), organic carbon (OC), and cation exchange capacity (CEC). In particular, the application of modified biochar significantly reduced soil pH by 0.38 units compared to the control. Moreover, both types of biochar significantly increased EC (by 45.96–64.52%), OC (by 104.4–115.59%), and CEC (by 58.61–87.88%) compared to the control. The highest levels of available phosphorus, microbial biomass carbon, and dissolved organic carbon were observed in the combined treatment of modified biochar and PSB inoculation.

Conclusion: Overall, the findings suggest that the integrated application of citric acid-modified biochar and phosphorus-solubilizing bacteria is an effective strategy for improving the chemical and biochemical properties of calcareous soils and enhancing phosphorus availability.

Keywords: Citric acid, Pyrolysis, Soil microbial respiration, Soil organic carbon, Sugarcane residues.

How to Cite: Khaji, P., Moezzi, A., Enayatizamir, N., Moradi, N., Karimi, A., 2025. Effect of modified biochar and phosphorus-solubilizing bacteria on soil chemical and biochemical properties under sugarcane cultivation. J. Soil Plant Interact. 16(3), 59–72 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.16.3.21771>





تأثیر بیوچار اصلاح شده و باکتری‌های حل کننده فسفر بر ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک آهکی تحت کشت نیشکر

پردیس خاجی^۱، عبدالامیر معزی^{۱*}، نعیمه عنایتی ضمیر^۱، ندا مرادی^۲ و اکبر کریمی^۳

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران

۳- گروه تحقیقات به‌زراعی، مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان، اهواز، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: moezzi151@scu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۲۵)

چکیده

مقدمه و اهداف: خاک‌های آهکی به دلیل pH قلیایی، گنجایش کم نگه‌داشت عناصر غذایی و کمبود فسفر، دارای بهره‌وری کمی هستند. از این رو، استفاده از بیوچار اصلاح شده و باکتری‌های حل کننده فسفر (PSB)، با بهبود ویژگی‌های خاک، به عنوان راهکاری مؤثر در افزایش حاصلخیزی و فراهمی فسفر در این خاک‌ها به شمار می‌رود. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر بیوچار تهیه شده از بقایای برداشت سبز نیشکر و بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک، همراه با تلقیح PSB بر ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی یک خاک آهکی تحت کشت نیشکر انجام شد. **روش‌ها:** آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی و در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل بیوچار تهیه شده از بقایای سبز نیشکر در سه سطح: بدون بیوچار (شاهد)، بیوچار اصلاح نشده یا خام، و بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک و همچنین مایه‌زنی باکتری‌های حل کننده فسفر به خاک در دو سطح: بدون باکتری (شاهد) و تلقیح باکتری بودند. **نتایج:** نتایج نشان داد کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح شده تأثیر معنی داری بر pH، رسانایی الکتریکی (EC)، کربن آلی (OC) و گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) خاک داشت. کاربرد بیوچار اصلاح شده سبب کاهش معنی دار pH خاک (۳۸/۰ واحد) نسبت به تیمار شاهد شد. همچنین کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح شده سبب افزایش معنی دار EC (۶۴/۵۲-۴۵/۹۶ درصد)، OC (۱۱۵/۵۹-۱۰۴/۴ درصد) و CEC (۸۷/۸۸-۵۸/۶۱ درصد) خاک نسبت به شاهد شد. نتایج همچنین نشان داد بیشترین مقدار فسفر قابل دسترس، کربن زیست توده میکروبی و کربن آلی محلول خاک مربوط به تیمار کاربرد تلفیقی بیوچار اصلاح شده همراه با مایه‌زنی PSB بود. **نتیجه‌گیری کلی:** به طور کلی، نتایج نشان داد کاربرد تلفیقی بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک و باکتری‌های حل کننده فسفر می‌تواند روشی مؤثر در بهبود ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک‌های آهکی مورد بررسی و افزایش فراهمی فسفر باشد.

واژه‌های کلیدی: اسید سیتریک، بقایای نیشکر، پیرولیز، تنفس میکروبی خاک، کربن آلی خاک.



مقدمه

فراهمی کم عناصر غذایی از جمله فسفر، کم بودن ماده آلی و کم بودن فعالیت میکروبی از مهم‌ترین چالش‌های مرتبط با کشاورزی در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک جهان است (Bolan et al., 2023). این خاک‌ها به دلیل دارا بودن مقادیر زیاد کربنات کلسیم، معمولاً دارای pH قلیایی (در محدوده ۷/۵ تا ۸/۵)، کربن آلی کم و کمبود عناصر غذایی ضروری از جمله فسفر هستند (Hasanpour et al., 2022).

یکی از راهکارهای نوین که در سال‌های اخیر برای کاهش محدودیت خاک‌های آهکی مورد توجه قرار گرفته، استفاده از بیوچار به عنوان اصلاح‌کننده خاک است. بیوچار ماده‌ای متخلخل و غنی از کربن است که در فرآیند پیرولیز زیست‌توده‌های مختلف و در شرایط بدون اکسیژن یا با اکسیژن محدود تولید می‌شود (Hasanpour et al., 2022). بیوچار می‌تواند با افزایش ماده آلی و گنجایش تبادل کاتیونی (CEC)^۱ خاک، فراهمی عناصر غذایی را در خاک‌های آهکی بهبود بخشد. البته، تأثیر بیوچار بر فراهمی عناصر غذایی خاک به ویژگی‌های بیوچار از جمله نوع زیست‌توده، دمای پیرولیز و همچنین ویژگی‌های خاک بستگی دارد (Arbelaez et al., 2021). به‌طور کلی، بیوچارهای تولیدشده در دماهای کمتر، به دلیل داشتن گروه‌های عاملی اسیدی و pH کم‌تر، کارایی بهتری در اصلاح خاک‌های آهکی دارند (Karimi et al., 2019; Begum et al., 2024).

اصلاح به‌روش‌های مختلف از جمله اصلاح با اسیدهای معدنی و آلی، یکی از راهکارهای افزایش کارایی بیوچار در بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک و افزایش فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی است (Sahin et al., 2022). نتایج پژوهش Sahin et al. (2022) نشان داد که اصلاح با اسیدهای معدنی اسید نیتریک و ترکیب اسید نیتریک با اسید فسفریک سبب افزایش کارایی بیوچار در کاهش pH و افزایش فراهمی فسفر در خاک، و همچنین افزایش جذب فسفر در گیاه می‌شود. اصلاح بیوچار با اسیدهای مختلف همچنین می‌تواند کارایی بیوچار در بهبود

ویژگی‌های بیوشیمیایی خاک را نیز افزایش دهد (Karimi et al., 2021). Karimi et al. (2021) گزارش کردند که کاربرد بیوچار اسیدی‌شده (اصلاح‌شده با گوگرد) تأثیر بیش‌تری در افزایش تنفس میکروبی و کربن زیست‌توده میکروبی (MBC)^۲ در مقایسه با بیوچارهای اصلاح‌نشده داشت. اصلاح با اسیدهای آلی نیز سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از جمله سطح ویژه، اندازه منافذ، گنجایش تبادل کاتیونی، مقدار و نوع گروه‌های عاملی بیوچار می‌شود (Nazari et al., 2019). بیوچار همچنین می‌تواند موجب افزایش جمعیت میکروبی، فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز و بهبود چرخه فسفر در خاک‌های آهکی گردد (Begum et al., 2024).

استفاده از باکتری‌های حل‌کننده فسفر، یکی دیگر از راهکارهای افزایش فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی است (Karimi et al., 2025). این ریزجانداران خاک نقش مهمی در پویایی فسفر خاک و افزایش فراهمی آن برای گیاهان دارند (Liu et al., 2024; Nassef et al., 2025). این باکتری‌ها با روش‌های مختلفی این کار را انجام می‌دهند که رایج‌ترین آن‌ها ترشح اسیدهای آلی مانند اسید سیتریک، اسید لاکتیک یا اسید استیک است که می‌توانند مواد معدنی فسفاتی را حل کنند. علاوه بر این، باکتری‌های حل‌کننده فسفر با تولید آنزیم‌هایی همچون فسفاتازها که ترکیبات آلی فسفر را تجزیه می‌کنند، به چرخه فسفر در خاک‌ها کمک می‌کنند (Jamil et al., 2024).

نیشکر یکی از مهم‌ترین محصولات صنعتی مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری جهان است که به طور عمده برای تولید شکر، انرژی زیستی و محصولات جانبی استفاده می‌شود (Desalegn et al., 2023). ماده آلی کم و فراهمی کم فسفر یکی از دشواری‌های تولید نیشکر در خاک‌های آهکی تحت کشت نیشکر استان خوزستان است (Karimi et al., 2024a). با توجه به اهمیت تغذیه فسفر در نیشکر (Karimi et al., 2024b) و محدودیت دانسته‌ها در زمینه تأثیر بیوچار حاصل از بقایای برداشت سبز نیشکر و بیوچار اصلاح‌شده آن و همچنین تأثیر کاربرد تلفیقی بیوچار و

2. Microbial biomass carbon

1. Cation exchange capacity

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی

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

EC	pH	CEC	CCE	N	Available P	OC	Sand شن	Silt سیلت	Clay رس	Soil texture بافت خاک
dS m ⁻¹	—	cmol _c kg ⁻¹	%	%	mg kg ⁻¹	%	%	%	%	
1.98	7.89	9.15	44.6	0.052	4.53	0.42	22	43	35	Clay loam لوم رسی

EC: رسانایی الکتریکی، CEC: گنجایش تبادل کاتیونی، CCE: کربنات کلسیم معادل، N: نیتروژن کل، OC: کربن آلی

EC: Electrical conductivity, CEC: Cation exchange capacity, CCE: Calcium carbonate equivalent, N: Total nitrogen, OC: Organic carbon

تهیه بیوچار و بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک

در این پژوهش برای تهیه بیوچار از زیست توده بقایای برداشت سبز نیشکر از محل کشت و صنعت دعبل خزاعی استفاده شد. بقایای برداشت سبز تهیه شده ابتدا هوا خشک شده و سپس در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شدند (Singh et al., 2017). فرآیند پیرولیز در کوره الکتریکی با دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس با افزایش ۵ درجه سلسیوس در دقیقه به مدت ۳ ساعت در شرایط حداقل اکسیژن انجام شد (Arbelaez et al., 2021). برای اصلاح بیوچار با اسید سیتریک، به منظور جلوگیری از تخریب ساختار، از غلظت ۰/۰۱ مولار آن استفاده شد (Regmi et al., 2012). بدین منظور، مقدار ۲ گرم از بیوچار تهیه شده با ۱۰۰ میلی لیتر محلول اسید سیتریک (۰.۰۱ M, pH = 2.74) به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق (۲۵ درجه سلسیوس) مخلوط شد (Regmi et al., 2012). پس از فرآیند اصلاح، نمونه ها خشک شده، سپس برای حذف اسید باقی مانده با آب مقطر شسته شده و دوباره خشک شدند (Regmi et al., 2012).

اندازه گیری ویژگی های بیوچار و بیوچار اصلاح شده

ویژگی های بیوچار و بیوچار اصلاح شده شامل عملکرد، خاکستر، pH، EC، CEC و آنالیز عنصری (کربن، هیدروژن و نیتروژن) کل تعیین شد (Singh et al., 2017). غلظت فسفر قابل دسترس بیوچارها به روش استخراج با اسید فرمیک ۲ درصد (Singh et al., 2017) و گنجایش تبادل کاتیونی به روش اصلاح شده جانشین با استات آمونیوم اندازه گیری شد (Domingues et al., 2017). نتایج ویژگی های بیوچارها در جدول (۲) آمده است.

باکتری های حل کننده فسفر بر فراهمی فسفر در خاک و ویژگی های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک های آهکی با ماده آلی کم تحت کشت نیشکر، این پژوهش به منظور بررسی تأثیر کاربرد تلفیقی و بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک (تهیه شده از بقایای برداشت سبز نیشکر) و باکتری های حل کننده فسفر بر فراهمی فسفر و ویژگی های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک تحت کشت نیشکر انجام شد.

مواد و روش ها

نمونه برداری خاک و اندازه گیری ویژگی های شیمیایی آن

این پژوهش، در گلخانه پژوهشی ایستگاه تحقیقاتی شماره یک مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان انجام شد. نمونه برداری خاک از لایه ۰ تا ۳۰ سانتی متری در مزارع کشت و صنعت نیشکر دعبل خزاعی واقع در ۲۵ کیلومتری جنوب غربی شهر اهواز (استان خوزستان) با عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی انجام شد. نمونه های خاک جمع آوری شده و پس از انتقال به آزمایشگاه از الک ۲ میلی متری عبور داده شد. pH و رسانایی الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی (استات سدیم نرمال)، کربن آلی (اکسیداسیون تر)، غلظت نیتروژن کل (کج لدا) و فسفر قابل دسترس (اولسن) اندازه گیری شد (Carter and Gregorich, 2007). برخی ویژگی های خاک مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. خاک مورد بررسی دارای بافت لوم رسی، pH قلیایی، غیرشور، آهکی و دارای ماده آلی کم بود.

جدول ۲. برخی ویژگی‌های بیوچار و بیوچار اصلاح شده مورد استفاده در این پژوهش

Table 2. Selected properties of the biochar and modified biochar used in this study

CAB	BC	واحد Unit	ویژگی Property
-	45.62	%	عملکرد
25.16	42.28	%	خاکستر
6.90	4.12	dS m ⁻¹	EC
5.17	7.95	-	pH
96.24	19.81	cmol kg ⁻¹	CEC
0.78	0.32	g kg ⁻¹	P
40.69	46.16	%	C
3.13	1.07	%	H
3.97	2.13	%	N
27.05	8.36	%	O
11.96	25.28	-	C/N
0.58	0.16	-	O/C
0.92	0.28	-	H/C

BC: بیوچار؛ CAB: بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک، EC: رسانایی الکتریکی، CEC: گنجایش تبادل کاتیونی، P: فسفر کل،

C: کربن کل، H: هیدروژن کل، N: نیتروژن کل، O: اکسیژن کل

BC: Biochar, CAB: Citric acid modified biochar, EC: Electrical conductivity, CEC: Cation exchange capacity,

P: Total phosphorus, C: Total carbon, H: Total hydrogen, N: Total nitrogen, O: Total oxygen

کشت گلدانی

دوره آزمایش رطوبت گلدان‌ها در محدوده ۸۰ درصد گنجایش مزرعه با تعیین رطوبت به‌روش وزنی حفظ شد. در این بررسی، از ترکیب سه سویه حل‌کننده فسفر شامل *Enterobacter cloacae* strain R33، *Bacillus* sp. strain CS1 و *Staphylococcus hominis* strain 9E با کدهای دسترسی MN227288، OR816114، KX262857 و Lamizadeh et al., 2016; Bakhtiyarifar et al., 2021; (Beitsayahi et al., 2025). سویه‌ها از کلکسیون میکروبی گروه علوم خاک دانشگاه شهید چمران اهواز تهیه شده و در محیط کشت مایع Nutrient Broth رشد داده شدند. پس از رشد در محیط کشت، سویه‌ها با تراکم 10^8 CFU mL⁻¹، در مرحله دوبرگی گیاه به خاک اطراف ریشه تلقیح شدند و در پایان دوره رشد گیاه، برداشت و نمونه‌برداری از خاک گلدان‌ها انجام شد.

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل تلقیح باکتری‌های حل‌کننده فسفر در دو سطح (شاهد و تلقیح باکتری) و کاربرد بیوچار در سه سطح (بدون بیوچار (شاهد)، بیوچار پایه و بیوچار اصلاح شده) بود. به‌منظور اعمال تیمارهای بیوچار ابتدا بیوچارها در سطح یک درصد وزنی با ۲۵ کیلوگرم خاک مخلوط شدند. سپس خاک تیمار شده با بیوچار در گلدان‌ها ریخته شد. سپس در هر گلدان ۳ قلمه تک جوانه نیشکر واریته CP69-1062، در عمق ۵ سانتی‌متری از سطح خاک، کشت شد. پس از اطمینان از سبز شدن جوانه‌ها در مرحله دو برگ، یکی از گیاهان حذف شد. گلدان‌ها در شرایط گلخانه با میانگین دمای ۳۰ تا ۳۵ درجه سلسیوس به مدت ۴ ماه نگهداری شدند. در طول

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

Table 3. Analysis of variance of the effect of treatments on soil chemical properties

میانگین مربعات Mean squares						درجه آزادی Df	منابع تغییر Sources of variation
DOC	Soil available P	CEC	OC	EC	pH		
3061.88**	186.3510**	117.44**	0.5895**	2.49**	0.5086**	2	بیوپچار (B)
21.6044**	0.9203 ^{ns}	0.0044 ^{ns}	0.0004 ^{ns}	0.056 ^{ns}	0.0123 ^{ns}	1	باکتری (Ba)
0.8694*	5.9406**	0.0579 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.054 ^{ns}	0.0102 ^{ns}	1	B × Ba
0.1680	0.1996	0.0685	0.0007	0.048	0.0047	10	خطا Error
0.55	3.77	1.78	3.19	8.27	0.91		ضریب تغییرات CV (%)

ns، * و ** به ترتیب بیانگر اثر غیرمعنی‌دار و آثار معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد هستند.

EC: رسانایی الکتریکی، OC: کربن آلی CEC: گنجایش تبادل کاتیونی، Soil available P: فسفر قابل دسترس خاک، N: نیتروژن کل، DOC: کربن آلی محلول
ns, * and ** denote non-significant effect, and significant effects at the 5% and 1% probability levels, respectively.

EC: Electrical conductivity, OC: Organic carbon, CEC: Cation exchange capacity, Soil available P: Soil available phosphorus, DOC: Dissolved organic carbon.

اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک

در پایان آزمایش، به منظور بررسی ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک‌های تیمار شده، از هر گلدان نمونه‌برداری شد. نمونه خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، به دو بخش تقسیم شد که یک بخش آن برای اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی در دمای اتاق هوا-خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. بخش دوم نیز برای اندازه‌گیری ویژگی‌های زیستی در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد. برخی از ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک شامل pH در گل اشباع و رسانایی الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک، گنجایش تبادل کاتیونی یا CEC (استات سدیم نرمال)، کربن آلی یا OC (اکسیداسیون تر)، کربن آلی محلول (DOC) به روش استخراج با سولفات پتاسیم نیم‌مولار (K₂SO₄) و با استفاده از دستگاه CHNS آنالیزر (CHNS analyzer Vario EL III) (Herbert and Bertsch, 1995)، غلظت نیتروژن کل (کجلدال)، فسفر قابل دسترس (رنگ‌سنجی)، تنفس میکروبی خاک (گردآوری CO₂ آزاد شده در هیدروکسید سدیم و تیتراسیون مقدار باقی‌مانده آن با اسید کلریدریک) (Anderson, 1982) و کربن زیست‌توده میکروبی خاک به روش تدخین

(گازدهی) با کلروفرم و استخراج با محلول سولفات پتاسیم (Jenkinson and Ladd, 1981) اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

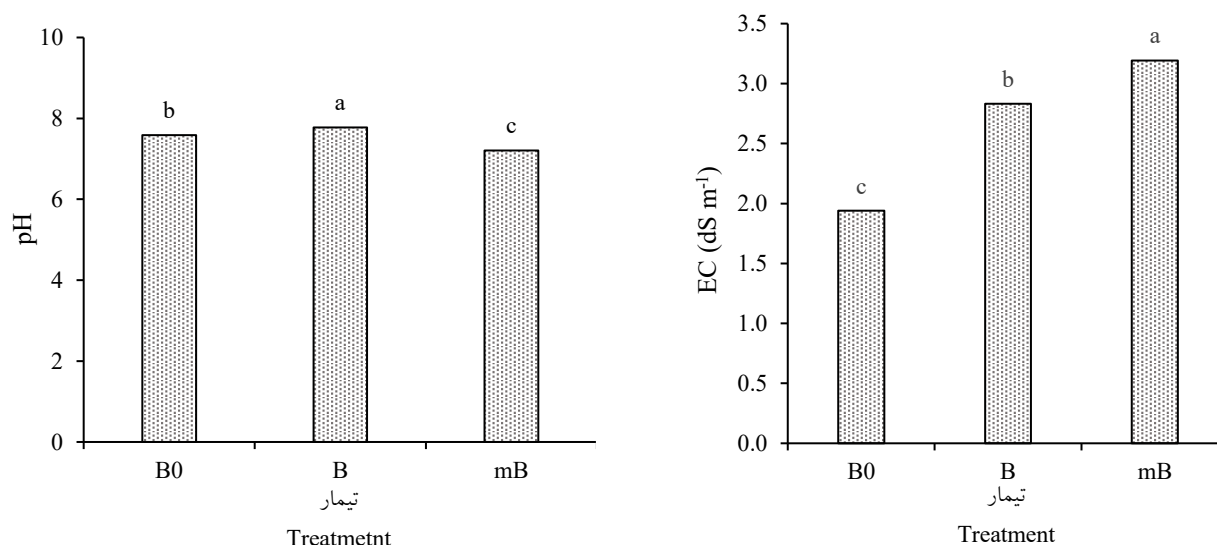
تجزیه آماری داده‌های این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.4 انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن و در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. همبستگی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار R بررسی شد. نمودارها نیز در محیط نرم‌افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

ویژگی‌های شیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳)، نشان داد که تیمار بیوپچار (B) اثر معنی‌داری بر pH، EC، OC، CEC، فسفر قابل دسترس و کربن آلی محلول خاک داشت. همچنین اثر برهمکنش نوع بیوپچار و مایه‌زنی باکتری بر فسفر قابل دسترس و کربن آلی محلول خاک معنی‌دار بود.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد نوع بیوپچار اثر



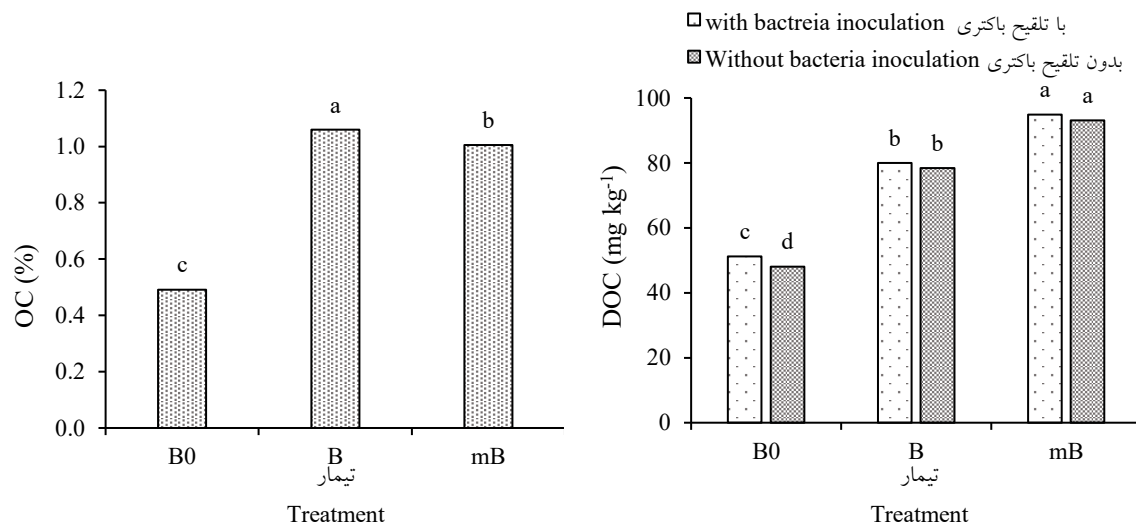
شکل ۱. مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر pH و رسانایی الکتریکی (EC) خاک. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($p < 0.05$) دارند. B0، B و mB به ترتیب تیمارهای شاهد (بدون کاربرد بیوچار)، کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح شده هستند.

Fig. 1. Means comparison of the effect of treatments on soil pH and electrical conductivity (EC) of soil. Means with dissimilar letters are significantly different according to the LSD's test ($p < 0.05$). B0, B, and mB are the control (without biochar application), biochar, and modified biochar treatments, respectively.

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۱) نشان داد کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح شده سبب افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی خاک نسبت به شاهد شد. نتایج (شکل ۱) نشان داد کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح شده EC خاک را به ترتیب ۴۵/۹۶ و ۶۴/۵۲ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند که دلیل آن می‌تواند ناشی از انحلال نمک‌های محلول موجود در بیوچار باشد. نتایج این بخش از پژوهش با نتایج پژوهش (Qayyum et al., 2024) هم‌خوانی دارد. پژوهش‌های آن‌ها نشان داد، اثر بیوچارهای اصلاح شده با HCl حاصل از کاه برنج، پوسته برنج، کلش گندم، ساقه پنبه، کود طیور، ضایعات نیشکر و ضایعات سبزیجات بر ویژگی‌های خاک تحت کشت ذرت (بجز بیوچار حاصل از کاه برنج) منجر به افزایش EC خاک نسبت به تیمارهای بیوچارهای اصلاح نشده و تیمار شاهد شدند.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان دهنده تأثیر معنی‌دار نوع بیوچار بر OC خاک و اثر برهمکنش نوع بیوچار و مایه‌زنی خاک با کنسرسیوم باکتری بر DOC خاک بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۲) نشان داد افزودن بیوچار و بیوچار اصلاح شده سبب افزایش معنی‌دار OC خاک نسبت به سطح

معنی‌داری بر pH و EC خاک داشت (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۱) نشان داد pH خاک در تیمار بیوچار ۱۹/۰ بیشتر از تیمار شاهد بود، در صورتی که تیمار بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک pH خاک را ۳۸/۰ نسبت به شاهد کاهش داد. در پژوهش حاضر دلیل افزایش pH خاک در تیمار بیوچار می‌تواند pH به نسبت زیاد آن (جدول ۲) و همچنین گروه‌های عاملی قلیایی و مقدار زیاد فلزات قلیایی در ساختار بیوچار باشد. گروه‌های عاملی قلیایی وابسته مانند گروه‌های OH و COOH موجود در ساختار بیوچار می‌توانند در افزایش pH خاک نقش داشته باشند (Vahedi et al., 2022). همچنین دلیل کاهش pH خاک در تیمارهای بیوچار اصلاح شده را می‌توان تولید اسیدهای آلی در طی تجزیه ماده آلی موجود در خاک دانست (Ahmed et al., 2021). نتایج این پژوهش با یافته‌های (Ahmet et al., 2021) هم‌خوانی دارد. آن‌ها مشاهده کردند که بیوچارهای بقایای سبزی و بلال ذرت اصلاح شده با اسید به ترتیب سبب کاهش pH خاک به میزان ۶۶/۲ و ۱/۲۰ درصد نسبت به شاهد شدند، که احتمالاً ناشی از آزادسازی یون‌های H^+ از محل‌های تبادل بیوچار است.



شکل ۲. مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر کربن آلی (OC%) و کربن آلی محلول (DOC) خاک. میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($p < 0.05$) ندارند. B0، B و mB به ترتیب تیمارهای شاهد (بدون کاربرد بیوچار) و کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح شده هستند.

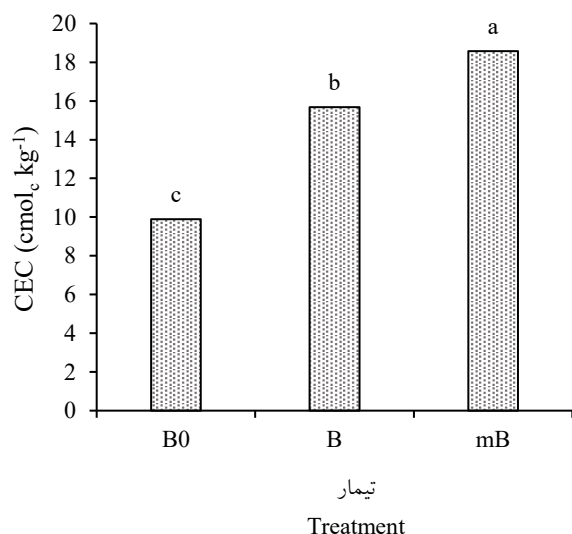
Fig. 2. Means comparison of the effect of treatments on soil organic matter (OC%) and dissolved organic carbon (DOC). Means with similar letters are not significantly different according to the LSD's test ($p < 0.05$). B0, B, and mB are the control (without biochar application), biochar, and modified biochar treatments, respectively.

و اصلاح نشده حاصل از کاه برنج، پوسته برنج، کلش گندم، ساقه پنبه، کود طیور، ضایعات نیشکر و ضایعات سبزیجات سبب افزایش معنی‌دار ماده آلی خاک تحت کشت ذرت شد، هرچند این افزایش در بیوچارهای اصلاح شده با HCl کمتر بود. به احتمال زیاد، کاهش مواد آلی خاک به دلیل اسیدی شدن محیط، افزایش فعالیت میکروبی، تجزیه سریع‌تر ترکیبات آلی پیچیده و نیز کاهش پایداری ماده آلی در نتیجه رقابت کاتیون‌های آزاد شده با نقاط اتصال ماده آلی خاک باشد (Qayyum et al., 2024).

بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۲)، کاربرد تیمارهای بیوچار منجر به افزایش معنی‌دار کربن آلی محلول در خاک شد. بیشترین مقدار DOC به ترتیب در تیمار بیوچارهای اصلاح شده همراه با تلقیح میکروبی (۹۴/۹ میلی گرم بر کیلوگرم) و بدون تلقیح (۹۳/۱ میلی گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد که هر دو نسبت به سایر تیمارها و شاهد تفاوت معنی‌داری داشتند. افزایش کربن آلی محلول در تیمارهای بیوچارهای اسیدی شده در مقایسه با بیوچارهای اولیه (جدول ۲) به احتمال زیاد به دلیل کاهش کربن تثبیت شده و نسبت‌های مولی زیادتیر H/C و O/C در این

شاهد شد. بیش‌ترین میزان کربن آلی خاک مربوط به تیمار بیوچار با میانگین ۱/۰۶ درصد بود که نسبت به تیمار شاهد ۱۱۵/۵۹ درصد افزایش داشت. همچنین OC خاک در تیمار بیوچار اصلاح شده با اسید سیتریک نیز ۱۰۴/۴۱ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت. در بسیاری از خاک‌های کشاورزی استان خوزستان، میزان ماده آلی کمتر از یک درصد است. در چنین شرایطی، افزودن بیوچار می‌تواند ضمن افزایش مستقیم کربن آلی خاک، جذب و نگهداشت ماده آلی موجود را نیز بهبود بخشد. (Saranya et al., 2011) نشان دادند که کاربرد بیوچار به طور قابل توجهی فعالیت میکروبی خاک را افزایش داد. افزایش فعالیت میکروبی می‌تواند سبب تجمع ماده آلی خاک شده و به نوبه خود در بهبود فراهمی عناصر غذایی نقش مهمی ایفا می‌کند و از این راه سبب ارتقای حاصل خیزی خاک می‌شود. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین OC و تنفس میکروبی خاک نیز تأییدکننده تأثیر مثبت فعالیت میکروبی بر کربن آلی خاک است (شکل ۳).

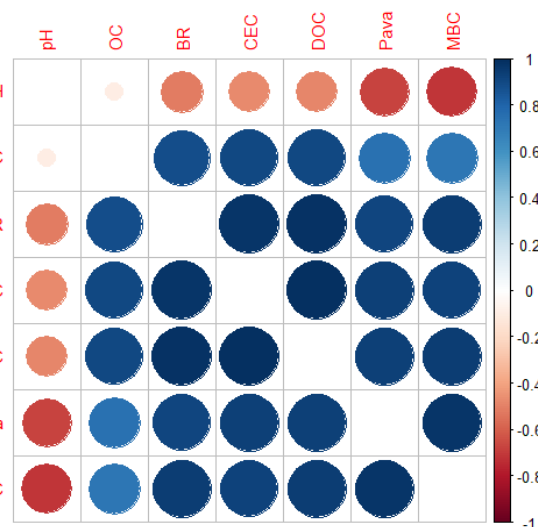
نتایج این پژوهش با یافته‌های (Qayyum et al., 2024) هم‌راستا بود. آن‌ها گزارش کردند کاربرد انواع بیوچار اصلاح شده



شکل ۴. مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر گنجایش تبادل کاتیونی خاک (CEC). میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($p < 0.05$) دارند. B0، B و mB به ترتیب تیمارهای شاهد (بدون کاربرد بیوچار)، کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده هستند.

Fig. 4. Means comparison of the effect of treatments on cation exchange capacity (CEC) of soil. Means with dissimilar letters are significantly different according to the LSD's test ($p < 0.05$). B0, B, and mB are the control (without biochar application), biochar, and modified biochar treatments, respectively.

معنی‌داری بر CEC خاک اثرگذار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۴) نشان داد CEC خاک در تیمارهای بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده به ترتیب ۵۸/۶۱ و ۸۷/۸۸ درصد نسبت به شاهد بیش‌تر بود. افزایش CEC خاک در تیمارهای بیوچار، به‌ویژه بیوچار اصلاح‌شده با اسید را می‌توان به زیاد بودن مقدار CEC و محتوای مواد معدنی آن نسبت داد (جدول ۲). نسبت‌های زیاده‌تر O/C و H/C در بیوچار اصلاح‌شده نیز نشان‌دهنده پایداری کمتر کربن و تجزیه‌پذیری بیشتر ترکیبات آلی آن است (Taheri et al., 2023). همبستگی مثبت CEC با OC خاک (شکل ۳) بیانگر نقش گروه‌های عاملی فعال در افزایش CEC خاک، به‌ویژه در بیوچار اصلاح‌شده است. Siedt et al. (2020) بیان کردند تولید گروه‌های کربوکسیلی و اکسیداسیون کربن‌های آروماتیک در ساختار بیوچار نقش کلیدی در افزایش CEC ایفا می‌کند. یافته‌های این پژوهش با نتایج Taheri et al. (2023) همخوانی



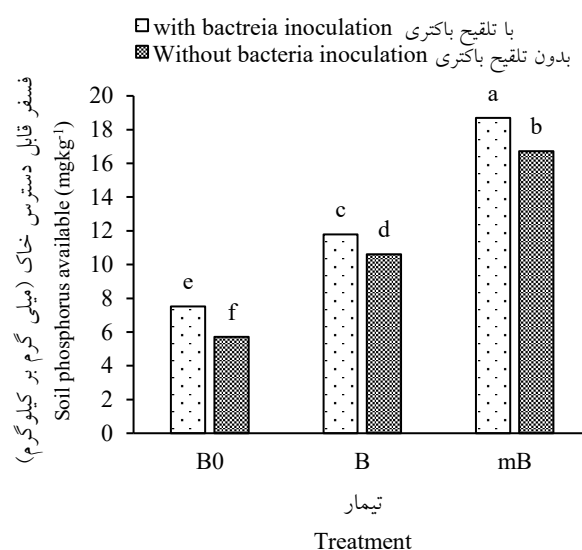
شکل ۳. ضریب همبستگی (نقشه حرارتی) میان ویژگی‌های شیمیایی و زیستی اندازه‌گیری‌شده در خاک. OC: کربن آلی، BR: تنفس میکروبی، CEC: گنجایش تبادل کاتیونی، DOC: کربن آلی محلول، Pava: فسفر قابل دسترس و MBC: زیست‌توده میکروبی خاک.

Fig. 3. Correlation coefficient (heat map) among the measured chemical and biological properties of soil. OC: Organic carbon, BR: Microbial respiration, CEC: Cation exchange capacity, DOC: Dissolved organic carbon, Pava: Soil available phosphorus, MBC: Microbial biomass carbon.

نوع بیوچار است. این ویژگی موجب آزادسازی بیشتر کربن محلول در خاک می‌شود. ریزجانداران محرک رشد گیاه نیز نقشی کلیدی در پویایی کربن خاک دارند. یکی از سازوکارهای مهم باکتری‌های حل‌کننده فسفر، تولید اسیدهای آلی است که pH خاک را کاهش داده و موجب تجزیه مواد آلی تثبیت‌شده می‌شود. نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های Karimi et al. (2021) همخوانی داشت. آن‌ها گزارش کردند کاربرد بیوچار، به‌ویژه نوع اصلاح‌شده با گوگرد حاصل از باگاس نیشکر و بقایای ذرت، موجب افزایش معنی‌دار کربن آلی محلول (۶۰/۹۰-۲۴/۳۰ درصد) در خاک آهکی تحت کشت ذرت شد. این افزایش بیانگر آن است که بیوچارهای به‌کاررفته دارای مقادیر قابل‌توجهی کربن قابل دسترس بوده که با آزادشدن در خاک، منبع انرژی و تغذیه مناسبی برای ریزجانداران فراهم می‌کنند (Karimi et al., 2021; Frene et al., 2021).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که نوع بیوچار به‌طور

شاهد شدند. همچنین نتایج (شکل ۵) نشان داد افزایش فسفر قابل دسترس در تیمارهای بیوچار اصلاح شده گمان می‌رود به دلیل آزادسازی گروه‌های عاملی اسیدی، تولید اسیدهای آلی و کاهش موضعی pH در ریزوسفر خاک باشد. همچنین باکتری‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر دارای توانایی انحلال فسفات معدنی نامحلول در شرایط آزمایشگاهی بودند (Lamizadeh et al., 2016; Bakhtiyarifar et al., 2021; Beitsayahi et al., 2025) که با ترشح اسیدهای آلی، آنزیم فسفاتاز و سایر ترکیبات کلات‌کننده، می‌توانند موجب آزادسازی فسفر تثبیت شده در خاک‌های آهکی شوند (Jamil et al., 2024). همبستگی مثبت بین فسفر قابل دسترس با تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی خاک (شکل ۳) نیز تأییدی بر کارآمدی کاربرد تلفیقی بیوچار اصلاح شده و باکتری‌های حل‌کننده فسفر در بهبود حاصلخیزی خاک‌های آهکی است. (El-Sharkawy et al., 2022) نیز گزارش کردند بیوچار اصلاح شده با اسید می‌تواند باعث افزایش عناصر غذایی قابل دسترس در خاک شود که به احتمال زیاد به دلیل افزایش CEC، افزایش گنجایش جذب و تغییر در گروه‌های عاملی سطحی در اثر اسیدی شدن بیوچار است. همبستگی مثبت بین CEC و فسفر قابل دسترس خاک (شکل ۳) نیز نشان می‌دهد افزایش CEC به واسطه اصلاح بیوچار، باعث بهبود نگهداری عناصر غذایی و افزایش فسفر قابل دسترس در خاک شده است. (Vahedi et al., 2022) نیز گزارش کردند که باکتری‌های حل‌کننده فسفر با تجزیه ماده آلی و ترشح اسیدهای آلی به ناحیه ریزوسفری منجر به کاهش pH خاک و انحلال فسفر معدنی مانند $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ در خاک‌های قلیایی می‌شوند. همچنین، Ali et al. (2020) نشان دادند که کاربرد همزمان بیوچار و باکتری‌های حل‌کننده فسفر در خاک آهکی تحت کشت ذرت سبب افزایش فراهمی فسفر می‌شود که این امر به کاهش تثبیت فسفر و فراهم شدن بستر تغذیه‌ای مناسب برای ریزجانداران در اثر افزایش کربن آلی محلول نسبت داده شد. همبستگی مثبت بین فسفر قابل دسترس و DOC خاک (شکل ۳) تأییدی بر این موضوع است. از سوی دیگر، ساختار متخلخل بیوچار اصلاح شده محیط مناسبی برای



شکل ۵. مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر فسفر قابل دسترس خاک. میانگین‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($p < 0.05$) دارند. B0، B و mB به ترتیب تیمارهای شاهد (بدون کاربرد بیوچار)، کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح شده هستند.

Fig. 5. Means comparison of the effect of treatments on soil available phosphorus. Means with dissimilar letters are significantly different according to the LSD's test ($p < 0.05$). B0, B, and mB are the control (without biochar application), biochar, and modified biochar treatments, respectively.

داشت؛ آن‌ها دلیل افزایش CEC در اثر کاربرد بیوچارهای اسیدی شده با گوگرد را حضور گروه‌های عاملی سطحی مانند هیدروکسیل و کربوکسیل بیان کردند که با افزایش بار منفی سطح بیوچار، قابلیت نگهداری کاتیون‌ها در بیوچار افزایش می‌یابد (Janu et al., 2021).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر برهمکنش تیمارهای نوع بیوچار و تلقیح میکروبی بر فسفر معدنی خاک بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۵) نشان داد که بیش‌ترین مقدار فسفر قابل دسترس خاک (۱۸/۷ میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار تلفیقی بیوچار اصلاح شده و تلقیح باکتری مشاهده شد که این افزایش نسبت به سطح شاهد و سایر سطوح تیمارهای بیوچار از نظر آماری معنی‌دار بود. هر دو سطح تیمارهای بیوچار اصلاح شده، با تلقیح باکتری و بدون باکتری نیز باعث افزایش معنی‌دار فسفر قابل دسترس در خاک نسبت به تیمار

جدول ۴. تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های زیستی خاک

Table 4. Analysis of variance of the effect of treatments on soil microbial properties

میانگین مربعات Mean squares		درجه آزادی Df	منابع تغییر Sources of variation
تنفس میکروبی خاک Soil microbial respiration	کربن زیست‌توده میکروبی خاک Soil microbial biomass carbon		
18686.870**	51276.07**	2	بیوچار (B)
1048.667**	4929.914**	1	باکتری (Ba)
261.6459*	15.7149**	2	B × Ba
40.9578	0.0198	10	خطا
2.39	0.04		ضریب تغییرات CV (%)

* و ** به ترتیب بیانگر آثار معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد هستند.

* and ** denote significant effects at the 5% and 1% probability levels, respectively.

ریزجانداران فراهم کرده که منجر به افزایش زیست‌توده میکروبی خاک شده است.

مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۶) نشان داد افزودن بیوچار، به‌ویژه نوع اصلاح‌شده، تنفس میکروبی را نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش داد. این افزایش به احتمال زیاد ناشی از بهبود شرایط زیستی خاک، افزایش کربن آلی محلول و رشد بیشتر باکتری‌هاست. همچنین، همبستگی مثبت با کربن آلی و کربن آلی محلول این نتایج را تأیید می‌کند (شکل ۳). مقادیر بیش‌تر تنفس میکروبی و کربن زیست‌توده میکروبی خاک در تیمارهای بیوچار اصلاح‌شده نسبت به بیوچارهای اولیه را همچنین می‌توان به کم‌تر بودن نسبت‌های مولی O/C و H/C بیوچار اصلاح‌نشده نسبت داد (جدول ۲)؛ چرا که مقادیر کم‌تر نسبت‌های مولی O/C و H/C بیوچار نشان‌دهنده بیش‌تر بودن ساختار آروماتیک آن و پایداری بیش‌تر کربن آن در برابر تجزیه میکروبی است.

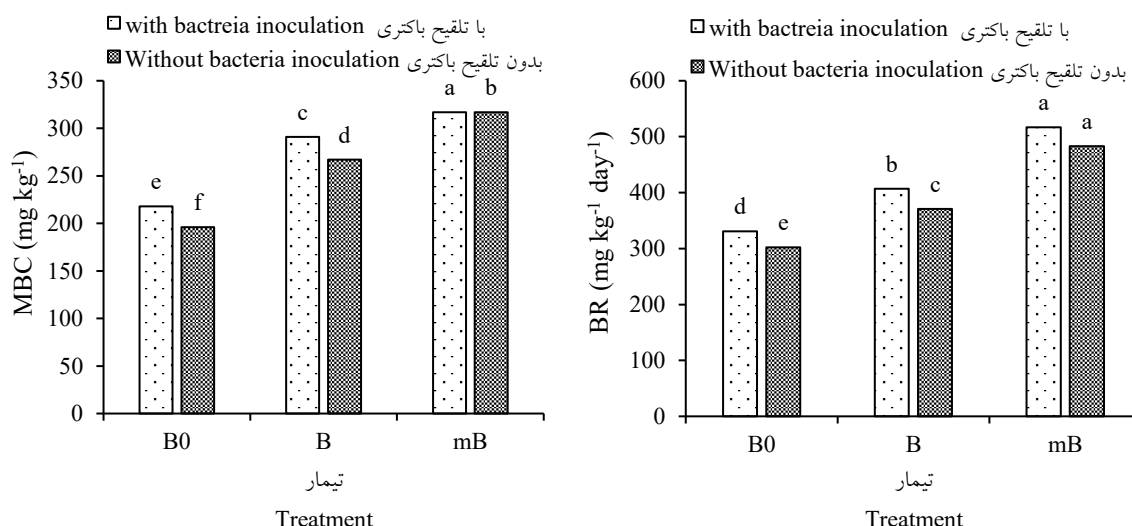
نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های Karimi et al. (2021) همخوانی داشت. آن‌ها با بررسی تأثیر کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با گوگرد حاصل از باگاس نیشکر و بقایای ذرت بر برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی یک خاک آهکی تحت کشت ذرت گزارش کردند کاربرد بیوچارهای اصلاح‌شده سبب بهبود تنفس

استقرار باکتری‌ها فراهم کرده و افزایش تراکم آن‌ها در ریزوسفر می‌تواند توان انحلال فسفر را بیشتر تقویت کند (Ali et al., 2020).

ویژگی‌های بیوشیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر برهمکنش تیمارها بر کربن زیست‌توده میکروبی و تنفس میکروبی خاک معنی‌دار بود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۶) نشان داد بیش‌ترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در تیمار بیوچار اصلاح‌شده با تلقیح میکروبی اندازه‌گیری شد (۵۱۷ میلی گرم بر کیلوگرم) که تفاوت معنی‌داری با شاهد داشت. در تمامی تیمارها، تلقیح باکتری به‌طور معنی‌داری سبب افزایش این ویژگی نسبت به تیمار مشابه بدون تلقیح شد. گمان می‌رود این افزایش ناشی از فراهم شدن بستر مناسب برای رشد ریزجانداران در حضور بیوچار و تحریک زیستی توسط تلقیح باکتریایی است (Hosseini et al., 2021).

کربن زیست‌توده میکروبی به‌عنوان کربن فعال نشان‌دهنده حضور ریزجانداران در یک نمونه خاک و مقدار کربن تثبیت‌شده در سلول‌های میکروبی است (Rouydel et al., 2021). همبستگی مثبت بین کربن زیست‌توده میکروبی و کربن آلی خاک (شکل ۳) نشان می‌دهد افزایش کربن آلی خاک، منبع تغذیه مناسبی برای



شکل ۶. مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) و تنفس میکروبی (BR) خاک. میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($p < 0.05$) ندارند. B0، B و mB به ترتیب تیمارهای شاهد (بدون کاربرد بیوچار)، کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده هستند.

Fig. 6. Means comparison of the effect of treatments on soil microbial biomass (MBC) and microbial respiration (BR). Means with similar letters are not significantly different according to the LSD's test ($p < 0.05$). B0, B, and mB are the control (without biochar application), biochar, and modified biochar treatments, respectively.

کلی نتایج نشان داد بیوچار اصلاح‌شده با اسید سیتریک با ایجاد شرایط مناسب در ناحیه ریزوسفری، کارایی باکتری‌های حل‌کننده فسفر را افزایش داد. از سوی دیگر، باکتری‌های حل‌کننده فسفر نیز با استفاده از منابع کربنی و سطوح متخلخل بیوچار، رشد و فعالیت بیش‌تری نشان دادند که منجر به بهبود حاصلخیزی خاک شد. با توجه به شرایط خاک‌های آهکی مانند کم‌بودن ماده آلی و تثبیت زیاد فسفر، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد کاربرد تلفیقی بیوچار اصلاح‌شده و ریزجانداران حل‌کننده فسفر، می‌تواند راهکاری مؤثر و پایدار برای بهبود حاصلخیزی خاک‌های آهکی تحت کشت نیشکر باشد.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز، مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان و کشت و صنعت دعبل خزاعی خوزستان برای مساعدت در مراحل مختلف اجرای این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌کنند.

میکروبی و کربن زیست‌توده میکروبی خاک شد. آن‌ها دلیل این یافته را تأثیر بیش‌تر بیوچارهای اصلاح‌شده بر تغییرات pH و حالیت عناصر غذایی در خاک دانستند. Hosseini et al. (2021) نیز با بررسی اثر بیوچار حاصل از باگاس نیشکر و کودهای زیستی در یک خاک آهکی گزارش کردند کاربرد همزمان بیوچار و ریزجانداران محرک رشد سبب بهبود فعالیت زیستی خاک شد. پژوهش‌های پیشین نیز نشان داده‌اند که استفاده هم‌زمان از بیوچار و باکتری‌های محرک رشد می‌تواند فعالیت میکروبی خاک را بیش‌تر از کاربرد جداگانه آن‌ها افزایش دهد (Sadeghkasmaei et al., 2019).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان‌دهنده اثر مثبت و معنی‌دار کاربرد همزمان بیوچار اصلاح‌شده با اسید سیتریک و باکتری‌های حل‌کننده فسفر بر بهبود ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک از جمله pH، رسانایی الکتریکی، کربن آلی، کربن آلی محلول، گنجایش تبادل کاتیونی، تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی خاک بود. به‌طور

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منفعی با شخص،

شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

References

1. Anderson, J.P., 1982. Soil respiration. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed., ASA/SSSA, Madison, WI, pp. 831–871. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c41>.
2. Arbelaez Breton, L., Mahdi, Z., Pratt, C.E., Hanandeh, A., 2021. Modification of hardwood derived biochar to improve phosphorus adsorption. *Environ.* 8(5), 41. <https://doi.org/10.3390/environments8050041>.
3. Bakhtiyarifar, M., Enayatizamir, N., Mehdi Khanlou, K., 2021. Biochemical and molecular investigation of non-rhizobial endophytic bacteria as potential biofertilisers. *Arch. Microbiol.* 203(2), 513–521. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-02038-z>.
4. Beitsayahi, F., Enayatizamir, N., NejadSadeghi, L., Nasernakhaei, F., 2025. Plant growth-promoting bacteria associated with some salt-tolerant plants. *J. Basic Microbiol.* 65(2), e2400446. <https://doi.org/10.1002/jobm.202400446>.
5. Bolan, N., Srivastava, P., Rao, C.S., Satyanaraya, P.V., Anderson, G.C., Bolan, S., Nortjé, G.P., Kronenberg, R., Bardhan, S., Abbott, L.K., Zhao, H., 2023. Distribution, characteristics and management of calcareous soils. *Adv. Agron.* 182, 81–130. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2023.06.002>.
6. Desalegn, B., Kebede, E., Legesse, H., Fite, T., 2023. Sugarcane productivity and sugar yield improvement: Selecting variety, nitrogen fertilizer rate, and bioregulator as a first-line treatment. *Heliyon* 9(4), 15520. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15520>.
7. Domingues, R.R., Trugilho, P.F., Silva, C.A., Melo, I.C.N.D., Melo, L.C., Magriotis, Z.M., Sánchez-Monedero, M.A., 2017. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PLoS One* 12(5), e0176884. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176884>.
8. El-Sharkawy, M., El-Naggar, A.H., Al-Huqail, A.A., Ghoneim, A.M., 2022. Acid-modified biochar impacts on soil properties and biochemical characteristics of crops grown in saline-sodic soils. *Sustainability*. 14(13), 8190. <https://doi.org/10.3390/su14138190>.
9. Frene, J.P., Frazier, M., Liu, S., Clark, B., Parker, M., Gardner, T., 2021. Early effect of pine biochar on peach-tree planting on microbial community composition and enzymatic activity. *Appl. Sci.* 11(4), 1473. <https://doi.org/10.3390/app11041473>.
10. Hasanpour, I., Shirvani, M., Hajabbasi, M.A., Majidi, M.M., 2022. Effect of acidic biochars on some chemical properties and nutrient availabilities of calcareous soils. *J. Water Soil Sci.* 26(2), 39–59. (In Persian with English abstract)
11. Herbert, B.E., Bertsch, P.M., 1995. Characterization of dissolved and colloidal organic matter in soil solution: A review. In: McFee, W.W., Kelly, J.M. (Eds.), *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*. ASA/SSSA, Madison, WI, pp. 63–88. <https://doi.org/10.2136/1995.carbonforms.c5>.
12. Hosseini, E., Zarei, M., Sepehri, M., Safarzadeh, S., 2021. Do bagasse biochar and microbial inoculants positively affect barley grain yield and nutrients, and microbial activity? *J. Plant Nutr.* 45(4), 522–539. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1952229>.
13. Jamil, M., Aftab, K., Sheikh, A.A., Masood, S.A., Bilal, M., Fatimah, T., Ijaz, F., Mansoor, M., Hanif, M., Ahmad, N.H., Kanwal, S., Bibi, A., Ahmad, I., Akbar, M.T., Muslim, N., Hayat Khan, M.U., Nazar, S., Abdul Rauf, H., Hafeez-u-Rehman, 2024. Investigating the role of solubilizing bacteria in the phosphorus cycling and organic matter dynamics. *J. Agric. Vet. Sci.*, 3(2), 371–382.
14. Janu, R., Mrlik, V., Ribitsch, D., Hofman, J., Sedláček, P., Bielská, L., Soja, G., 2021. Biochar surface functional groups as affected by biomass feedstock, biochar composition and pyrolysis temperature. *Carbon Resour. Convers.* 4, 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2021.01.003>.
15. Jenkinson, D.S., Ladd, J.N., 1981. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: Paul, E.A., Ladd, J.N. (Eds.), *Soil Biochemistry*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 415–472.
16. Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., Enayatizamir, N., 2021. Impact of application of sulfur modified biochar on some biochemical and microbiological attributes of soil. *Iran. J. Soil Water Res.*, 52(9), 2333–2344. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.326780.669017>.
17. Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., Enayatizamir, N., 2019. Chemical fractions and availability of Zn in a calcareous soil in response to biochar amendments. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 19, 851–864. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00084-1>.
18. Karimi, A., Safirzadeh, S., Zakavi, N., Khajavi-Shojaei, S., Masoudian, K., Khaji, P., Enayatizamir, N., Noroozi, H., 2025. Impact of plant growth promoting bacteria inoculation on phosphorus uptake and quantitative and qualitative yield

- of ratoon sugarcane. *J. Soil Plant Interact.* 16(1), 55–70 <https://doi.org/10.47176/jspi.16.1.20201>. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.16.1.20201>.
19. Karimi, A., Zakavi, N., Safirzadeh, S., Noroozi, H., Ariz, A., 2024a. Evaluation of sugarcane nutritional status by deviation from optimum percentage (DOP) method in Khuzestan province. *Iran. J. Soil Water Res.* 55(3), 449–466. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.371718.669657>.
20. Karimi, A., Zanganeh-Yusefabadi, E., Safirzadeh, S. 2024b. Comparison of availability and uptake of phosphorus and potassium in sugarcane under subsurface drip irrigation and furrow irrigation. *Irrig. Sci Eng.* 47(3), 53–67. (In Persian with English abstract)
21. Lamizadeh, E., Enayatizamir, N., Motamedi, H., 2016. Isolation and identification of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) from the rhizosphere of sugarcane in saline and non-saline soil. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 5(10), 1072–1083. <http://dx.doi.org/10.20546/ijcmas.2016.510.113>.
22. Liu, F., Qian, J., Zhu, Y., Wang, P., Hu, J., Lu, B., He, Y., Tang, S., Shen, J., Liu, Y., Li, F., 2024. Phosphate solubilizing microorganisms increase soil phosphorus availability: a review. *Geomicrobiol. J.* 41(1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2272620>.
23. Nassef, K., Sahli, A., Bouhdid, S., Mezzoug, N., Abrini, J., Khay, E.O., 2025. Phosphate solubilizing microorganisms and their use in sustainable agriculture: A review. *Geomicrobiol. J.* 42(3), 224–243. <https://doi.org/10.1080/01490451.2025.2457660>.
24. Nazari, S., Rahimi, G., Nezhad, A. K. J. 2019. Effectiveness of native and citric acid-enriched biochar of chickpea straw in Cd and Pb sorption in an acidic soil. *J. Environ. Chem. Eng.* 7(3), 103064. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103064>.
25. Olsen, S. R., Sommers, E. L., 1982. Phosphorus availability indices. Phosphorus soluble in sodium bicarbonate. In: Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed., ASA/SSSA, Madison, WI, pp. 404–430.
26. Qayyum, M.F., Khan, D.E.S., Alghanem, S.M.S., Sakit Alhaithloul, H.A., Alsudays, I.M., Rizwan, M., Hong Yong, J.W., 2024. Agricultural waste-based modified biochars differentially affected the soil properties, growth, and nutrient accumulation by maize (*Zea mays* L.) plants. *BMC. Plant Biol.* 24(1), 498. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05202-5>.
27. Qayyum, M.F., Liaquat, F., Rehman, R.A., Gul, M., ul Hye, M.Z., Rizwan, M., Rehman, M.Z.U., 2017. Effects of co-composting of farm manure and biochar on plant growth and carbon mineralization in an alkaline soil. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24(33), 26060–26068. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0227-4>.
28. Regmi, P., Moscoso, J.L.G., Kumar, S., Cao, X., Mao, J., Schafran, G., 2012. Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process. *J. Environ. Manage.* 109, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.047>.
29. Ren, H., Huang, B., Fernández-García, V., Miesel, J., Yan, L., Lv, C., 2020. Biochar and rhizobacteria amendments improve several soil properties and bacterial diversity. *Microorganisms.* 8(4), 502. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8040502>.
30. Rouydel, Z., Barin, M., Rasouli-Sadaghiani, M.H., Khezri, M., Vetukuri, R.R., Kushwaha, S., 2021. Harnessing the potential of symbiotic endophytic fungi and plant growth-promoting rhizobacteria to enhance soil quality in saline soils. *Processes.* 9(10), 1810. <https://doi.org/10.3390/pr9101810>.
31. Sadegh Kasmaei, L., Yasrebi, J., Zarei, M., Ronaghi, A., Ghasemi, R., Saharkhiz, M.J., Ahmadabadi, Z., Schnug, E., 2019. Influence of plant growth promoting rhizobacteria, compost, and biochar of *Azolla* on rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) growth and some soil quality indicators in a calcareous soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 50(2), 119–131. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1554669>.
32. Sahin, O., Gunes, A., Babar, S. K., Deniz, K., Kadioglu, Y. K., Ozturk, S., Inal, A., 2023. Phosphorus-enriched rice husk biochar affected growth and mineral nutrition of wheat and its residual effects on maize production. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 23(3), 3085–3094. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01284-6>.
33. Saranya, K., Kumutha, K., Krishnan, P.S., 2011. Influence of biochar and *Azospirillum* application on the growth of maize. *Madras Agric. J.* 98, 158–16.
34. Siedt, M., Schäffer, A., Smith, K.E., Nabel, M., Roß-Nickoll, M., Van Dongen, J.T., 2021. Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides. *Sci. Total Environ.* 751, 141607. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141607>.
35. Singh, B., Camps-Arbestain, M., Lehmann, J. eds., 2017. *Biochar: a guide to analytical methods*. CSIRO Publishing, Melbourne, Australia, pp. 1–310.
36. Taheri, M.A.R., Astaraci, A.R., Lakzian, A., Emami, H., 2024. The role of biochar and sulfur-modified biochar on soil water content, biochemical properties and millet crop under saline-sodic and calcareous soil. *Plant Soil* 499(1), 221–236. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05912-z>.
37. Vahedi, R., Rasouli-Sadaghiani, M.H., Barin, M., Vetukuri, R.R., 2022. Effect of biochar and microbial inoculation on P, Fe, and Zn bioavailability in a calcareous soil. *Processes.* 10(2), 343. <https://doi.org/10.3390/pr10020343>.