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

Pardis Khaji[1], Abdolamir Moezzi[1*], Naeimeh Enayatizamir[1], Neda Moradi[2] and Akbar Karimi[3]

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

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%), soil organic carbon (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: Pyrolysis, Soil microbial respiration, Soil organic carbon, Sugarcane residues.

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

تأثیر بیوچار اصلاح‌شده و باکتری‌های حل‌کننده فسفر بر ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک آهکی تحت کشت نیشکر

پردیس خاجی[۱]، عبدالامیر معزی[۱*]، نعیمه عنایتی‌ضمیر[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 به¬زراعی، مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان، اهواز، ایران

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

نسخه پیش از انتشار

چکیده

خاک‌های آهکی به‌دلیل pH قلیایی، ظرفیت پایین نگه‌داشت عناصر غذایی و کمبود فسفر، دارای بهره‌وری پایین هستند. ازاین‌رو، استفاده از بیوچار اصلاح‌شده و باکتری‌های حل‌کننده فسفر، با بهبود ویژگی‌های خاک، به‌عنوان راهکاری مؤثر در افزایش حاصلخیزی و فراهمی فسفر در این خاک‌ها به‌شمار می‌رود. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر بیوچار تهیه شده از بقایای برداشت سبز نیشکر و بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید، همراه با تلقیح باکتری‌های حل‌کننده فسفر بر ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی یک خاک آهکی تحت کشت نیشکر انجام شد. آزمایش به‌صورت 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 غیر اصلاح‌شده یا خام، و بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید و همچنین مایه‌زنی باکتری‌های حل‌کننده فسفر به خاک در دو سطح: بدون باکتری (شاهد) و تلقیح باکتری بودند. نتایج نشان داد کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح‌شده تأثیر معنی‌داری بر pH، EC، کربن آلی و CEC خاک داشت، به‌طوری‌که کاربرد بیوچار اصلاح‌شده سبب کاهش معنی‌دار pH خاک (۰/۳۸ واحد) نسبت به تیمار شاهد شد. همچنین کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح شده سبب افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی (۶۴/۵۲–۴۵/۹۶ درصد)، کربن آلی خاک (۱۱۵/۵۹–۱۰۴/۳ درصد) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (۸۷/۸۸–۵۸/۶۱ درصد) نسبت به شاهد شد. نتایج همچنین نشان داد بیش‌ترین مقدار فسفر قابل‌دسترس، کربن زیست‌توده میکروبی و کربن آلی محلول خاک مربوط به تیمار کاربرد تلفیقی بیوچار اصلاح‌شده همراه با مایه‌زنی باکتری بود. به‌طور کلی، نتایج نشان داد کاربرد تلفیقی بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید و باکتری‌های حل‌کننده فسفر می‌تواند روشی مؤثر در بهبود ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک‌های آهکی مورد مطالعه و افزایش فراهمی فسفر باشد.

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

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

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 می‌باشد (Bolan *et al*., 2023). این خاک‌ها به‌دلیل 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 به‌عنوان 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 ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)[1] 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 تولید شده در دماهای پایین‌تر، به‌دلیل 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 مطالعه Sahin *et al*. (2022) نشان داد که اصلاح با اسیدهای معدنی نیتریک اسید و ترکیب نیتریک اسید با فسفریک اسید 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 اسیدی شده (اصلاح‌شده با گوگرد) تأثیر بیش‌تری در افزایش تنفس میکروبی و کربن زیست‌توده میکروبی (MBC)[2] در مقایسه با بیوچارهای اصلاح نشده داشت. اصلاح با اسیدهای آلی نیز موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از جمله سطح ویژه، اندازه منافذ، ظرفیت 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 از طریق روش‌های مختلفی این کار را انجام می‌دهند که رایج‌ترین آن‌ها ترشح اسیدهای آلی مانند سیتریک اسید، 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 عمدتاً برای تولید شکر، انرژی زیستی و محصولات جانبی استفاده می‌شود (Desalegn *et al*., 2023). ماده آلی کم و فراهمی کم فسفر یکی از مشکلات 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 اطلاعات در زمینه تأثیر بیوچار حاصل از بقایای برداشت سبز نیشکر و بیوچار اصلاح شده آن و همچنین تأثیر کاربرد تلفیقی بیوچار و باکتری

1. Cation exchange capacity

2. Microbial biomass carbon

نسخه پیش از انتشار

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

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

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

ویژگی	EC	pH	CEC	CCE	N	Available P	OC	Sand	Silt	Clay	Soil texture
واحد	dS m^{-1}	–	$cmol_c$ kg^{-1}	٪	%	mg kg^{-1}	٪	%	%	%	–
مقدار	1.98	7.89	9.15	44.6	0.052	4.53	0.42	22	43	35	لوم رسی

EC: هدایت الکتریکی؛ CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی؛ CCE: کربنات کلسیم معادل؛ N: نیتروژن خاک OC: کربن آلی

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

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک و اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی آن

این پژوهش، در گلخانه پژوهشی ایستگاه تحقیقاتی شماره یک مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان انجام شد. نمونه‌برداری خاک از عمق 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 وطول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی انجام شد. نمونه‌های خاک جمع‌آوری‌شده و پس از انتقال به آزمایشگاه از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. pH و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی (استات سدیم نرمال)، کربن آلی (اکسیداسیون تر)، غلظت نیتروژن کل (کجلدال) و فسفر قابل دسترس (اولسن) اندازه‌گیری شد (Carter and Gregorich., 2007). برخی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم رسی، pH قلیایی، غیر شور، آهکی و دارای ماده آلی کم بود.

تهیه بیوچار و بیوچار اصلاح شده با سیتریک اسید

در این پژوهش جهت تهیه بیوچار از زیست‌توده بقایای برداشت سبز نیشکر از محل کشت و صنعت دعبل خزاعی استفاده شد. بقایای برداشت سبز تهیه شده ابتدا هوا خشک و سپس در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شدند (Singh *et al*., 2017). فرآیند پیرولیز در کوره الکتریکی در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس با افزایش ۵ درجه سلسیوس در دقیقه به‌مدت ۳ ساعت در شرایط حداقل اکسیژن انجام شد (Arbelaez *et al*., 2021). برای اصلاح بیوچار با سیتریک اسید، به‌منظور 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 میلی‌لیتر محلول سیتریک اسید (0.01 M, pH = 2.74) به‌مدت ۲ ساعت در دمای اتاق (۲۵ درجه سلسیوس) مخلوط شد (Regmi *et al*., 2012). پس از فرآیند اصلاح، نمونه‌ها خشک و سپس برای حذف اسید باقی‌مانده با آب مقطر شسته شده و مجدداً خشک گردیدند (Regmi *et al*, 2012).

اندازه‌گیری ویژگی‌های بیوچار و بیوچار اصلاح شده

ویژگی‌های 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 به‌روش استخراج با اسید فرمیک ۲ درصد (Singh *et al*., 2017) و ظرفیت تبادل کاتیونی به‌روش اصلاح شده جانشینی با استات آمونیوم اندازه‌گیری شد (Domingues *et al*., 2017).

نسخه پیش از انتشار

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

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

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

ویژگی	واحد	BC	CAB
عملکرد	٪	45.62	-
خاکستر	٪	42.28	25.16
EC	$dS\ m^{-1}$	4.12	6.90
pH	-	7.95	5.17
CEC	$cmol\ kg^{-1}$	19.81	96.24
فسفر	$g\ kg^{-1}$	0.32	0.78
C	٪	46.16	40.69
H	٪	1.07	3.13
N	٪	2.13	3.97
O	٪	8.36	27.05
C/N	-	25.28	11.96
O/C	–	0.16	0.58
H/C	–	0.28	0.92

BC: بیوچار؛ CAB: بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید

کشت گلدانی

این پژوهش به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای مورد مطالعه 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 اصلاح‌شده) 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 برگی، یکی از گیاهان حذف شد. گلدان‌ها در شرایط گلخانه با دمای متوسط ۳۰ تا ۳۵ درجه سلسیوس به‌مدت ۴ ماه نگهداری شدند. در طول دوره آزمایش رطوبت گلدان‌ها در محدوده ۸۰ درصد ظرفیت زراعی با تعیین رطوبت در گلدان‌های تخریبی و به روش وزنی حفظ شد. در این مطالعه، از ترکیب سه سویه حل‌کننده فسفر شامل *Enterobacter cloacae*, *Bacillus* sp. و *Staphylococcus hominis* با کدهای دسترسی KX262857، OR816114 و MN227288 استفاده شد (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 $۱/۵×۱۰^{۸}\ cfu\ mL^{-1}$، در مرحله دوبرگی گیاه به خاک اطراف ریشه تلقیح شدند و در پایان دوره رشد گیاه ، برداشت و نمونه‌برداری از خاک گلدان‌ها انجام شد.

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 جهت اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی در دمای

نسخه پیش از انتشار

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

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

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

منابع تغییرات (S.O.V)	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square					
		pH خاک	هدایت الکتریکی خاک EC	کربن آلی خاک OC%	ظرفیت تبادل کاتیونی خاک CEC	فسفر قابل دسترس خاک Soil available P	کربن آلی محلول خاک DOC
بیوچار (B)	2	0.5086**	2.49**	0.5895**	117.44**	186.3510**	3061.88**
باکتری (Ba)	1	0.0123 ns	0.056ns	0.0004ns	0.0044ns	0.9203ns	21.6044**
B × Ba	1	0.0102 ns	0.054 ns	0.0001ns	0.0579ns	5.9406**	0.8694*
خطا Error	10	0.0047	0.048	0.0007	0.0685	0.1996	0.1680
ضریب تغییرات CV (%)		0.91	8.27	3.19	1.78	3.77	0.55

ns، *، ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد هستند.

ns, * and ** denote non-significant, significant at the 5% probability level, and significant at the 1% probability level, respectively.

اتاق هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. بخش دوم نیز جهت اندازه‌گیری ویژگی‌های زیستی در دمای ۴ درجه سلسیوس نگه‌داری شد. برخی از ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک شامل pH در گل اشباع و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی (استات سدیم نرمال)، کربن آلی (اکسیداسیون تر)، غلظت نیتروژن کل (کجلدال)، فسفر قابل دسترس (رنگ‌سنجی)، تنفس میکروبی خاک (گردآوری CO_2 آزاد شده در هیدروکسید سدیم و تیتراسیون مقدار باقی‌مانده آن با اسیدکلریدریک) (Anderson., 1982) و کربن زیست‌توده میکروبی خاک به‌روش 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

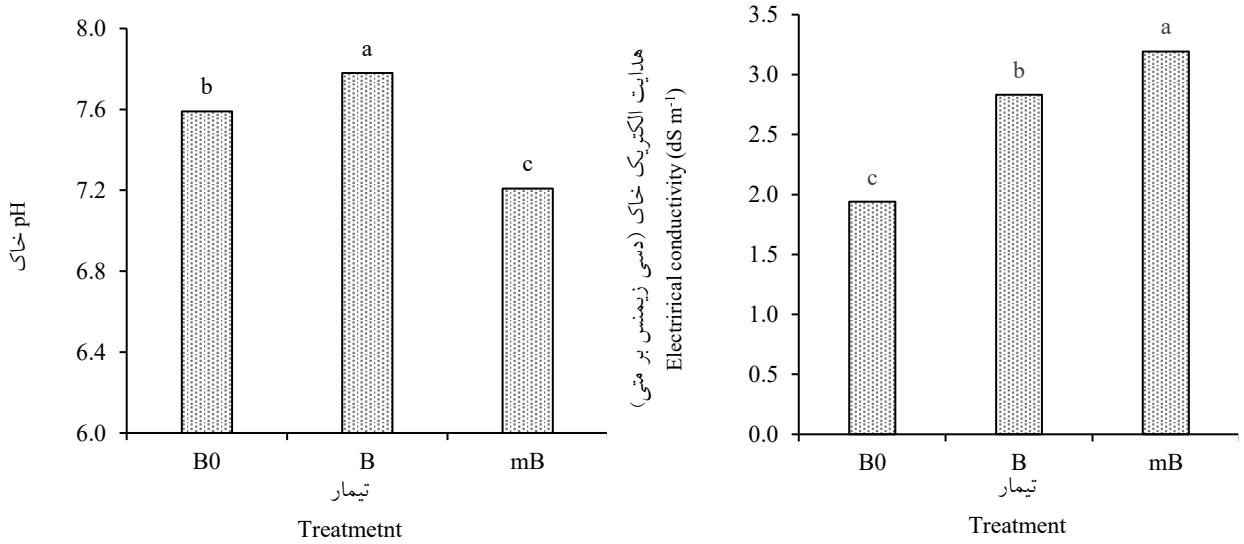
ویژگی‌های شیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳)، نشان داد که تیمار بیوچار (B) اثر معنی‌داری بر pH، هدایت الکتریکی، کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، فسفر قابل دسترس و کربن آلی محلول خاک داشت. همچنین اثر متقابل نوع بیوچار و مایه‌زنی باکتری بر فسفر قابل دسترس و کربن آلی محلول خاک معنی‌دار بود.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد نوع بیوچار اثر معنی‌داری بر pH و هدایت الکتریکی خاک داشت (جدول۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۱) نشان داد pH خاک در تیمار بیوچار ۰/۱۹ بیشتر از تیمار شاهد بود، درصورتی که تیمار بیوچار اصلاح شده با سیتریک اسید pH خاک را ۰/۳۸ نسبت به شاهد کاهش داد. در مطالعه حاضر دلیل افزایش pH خاک در تیمار بیوچار می‌تواند pH نسبتاً زیاد آن (جدول ۱) و همچنین گروه‌های عاملی قلیایی و مقدار بالای فلزات قلیایی در ساختار بیوچار باشد. گروه‌های عاملی قلیایی وابسته مانند گروه‌های OH و COOHموجود 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

نسخه پیش از انتشار

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



شکل ۱. مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر pH و هدایت الکتریکی خاک (EC)

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($P<0.05$) ندارند.

B0، B و mB به‌ترتیب تیمارهای شاهد (بدون کاربرد بیوچار)، کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح شده هستند.

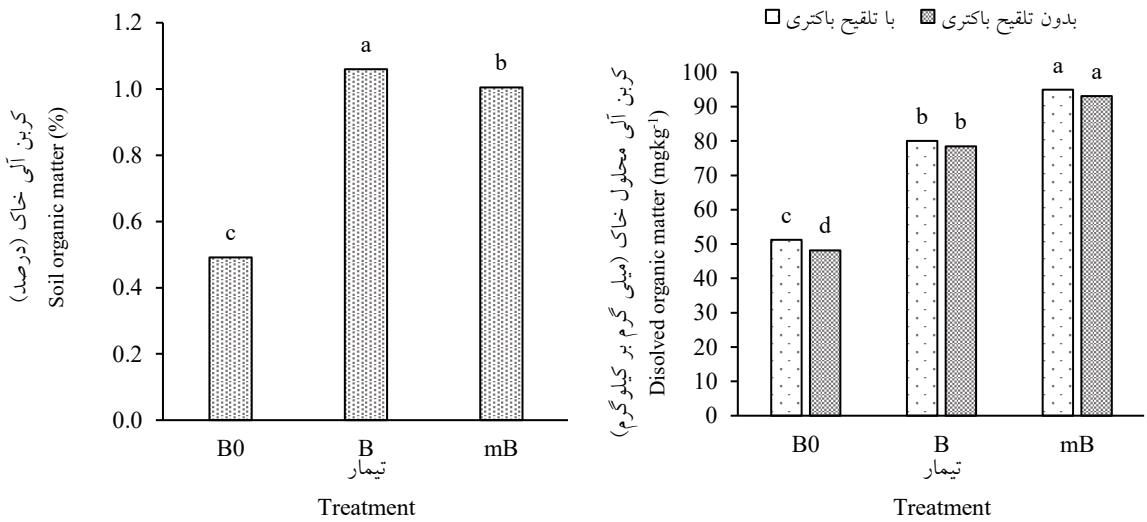
Fig 1. Means comparison of the effect of treatments on soil pH and electrical conductivity of soil
Means with similar letter(s) are not significantly different according to the LSD's test ($p<0.05$).
B0, B, and mB are the control (without biochar application), biochar, and modified biochar treatments respectively

اسیدهای آلی در طی تجزیه ماده آلی موجود در خاک دانست (Amed *et al*., 2021). نتایج این پژوهش با یافته‌های Ahmet *et al*. (2021) همخوانی دارد. آن‌ها مشاهده کردند که بیوچارهای بقایای سبز و بلال ذرت اصلاح‌شده با اسید به‌ترتیب موجب کاهش pH خاک به میزان ۲/۶۶ و ۲/۰۱ درصد نسبت به شاهد شدند، که احتمالاً ناشی از آزادسازی یون‌های H^+ از محل‌های تبادل بیوچار است.

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 هدایت الکتریکی خاک را به‌ترتیب ۴۵/۹۶ و ۶۴/۵۲ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند که دلیل آن احتمالاً ناشی از انحلال نمک‌های محلول موجود در بیوچار می‌باشد. نتایج این بخش از پژوهش با نتایج پژوهش Qayyum *et al* (2024) مطابقت دارد. تحقیقات آن‌ها نشان داد، اثر بیوچارهای اصلاح‌شده 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 هدایت الکتریکی خاک نسبت به تیمارهای بیوچارهای اصلاح نشده و تیمار شاهد شدند.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان دهنده تأثیر معنی‌دار نوع بیوچار بر کربن آلی خاک و اثرات متقابل نوع بیوچار و مایه‌زنی خاک با کنسرسیوم باکتری بر کربن آلی محلول خاک بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۲) نشان داد افزودن بیوچار و بیوچار اصلاح شده سبب افزایش معنی‌دار کربن آلی خاک نسبت به سطح 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 کربن آلی خاک در تیمار بیوچار اصلاح شده با سیتریک اسید 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

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



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

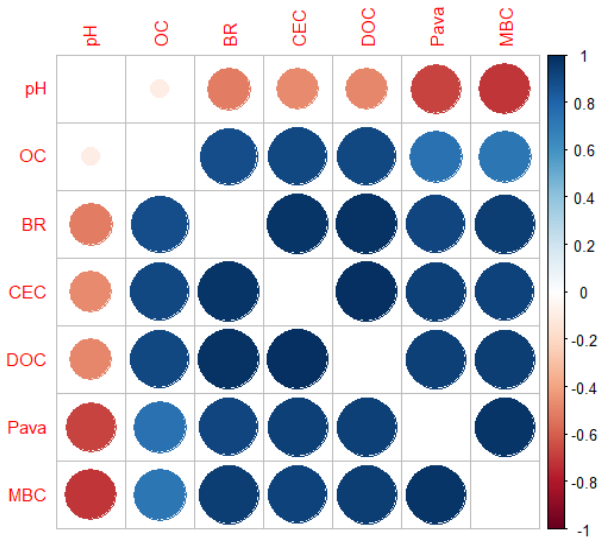
Fig 2. Means comparison of the effect of treatments on soil organic matter (OC%) and soil dissolved organig carbon (DOC)
Means with similar letter(s) are not significantly different according to the LSD's test (p<0.05).
B0, B, and mB are the control (without biochar application), biochar, and modified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

نیز بهبود بخشد. در مطالعه‌ای Saranya *et al* (2011) نشان دادند که کاربرد بیوچار به طور قابل توجهی فعالیت میکروبی خاک را افزایش داد. این افزایش فعالیت میکروبی احتمالاً موجب تجمع ماده آلی خاک شده و به نوبه خود در بهبود فراهمی عناصر غذایی نقش مهمی ایفا می‌کند و از این طریق موجب ارتقای حاصل‌خیزی خاک می‌گردد. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین کربن آلی و تنفس میکروبی خاک نیز تأیید کننده تأثیر مثبت فعالیت میکروبی بر کربن آلی خاک است (شکل ۶).

نتایج این پژوهش با یافته‌های Qayyum *et al* (2024) هم‌راستا بود. آن‌ها گزارش کردند کاربرد انواع بیوچار اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده حاصل از کاه برنج، پوسته برنج، کلش گندم، ساقه پنبه، کود طیور، ضایعات نیشکر و ضایعات سبزیجات باعث افزایش معنی‌دار ماده آلی خاک تحت کشت ذرت شد، هرچند این افزایش در بیوچارهای اصلاح‌شده با HCl کمتر بود. احتمالاً کاهش مواد آلی خاک به دلیل اسیدی شدن محیط، افزایش فعالیت میکروبی، تجزیه سریع‌تر ترکیبات آلی پیچیده و نیز کاهش پایداری ماده آلی در نتیجه‌ی رقابت کاتیون‌های آزادشده 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 به‌ترتیب در تیمار بیوچارهای اصلاح شده همراه با تلقیح میکروبی (۹۴/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و بدون تلقیح (۹۳/۱ میلی‌گرم 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) احتمالاً به دلیل کاهش کربن تثبت شده و افزایش نسبت‌های مولی بالاتر H/C و O/C در این نوع بیوچار است. این ویژگی موجب آزادسازی بیشتر کربن محلول در خاک می‌شود. میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه نیز نقشی کلیدی در پویایی کربن خاک دارند. یکی از مکانیسم‌های مهم باکتری‌های حل‌کننده فسفر، تولید اسیدهای آلی است که pH خاک را کاهش داده و موجب تجزیه مواد آلی تثبیت‌شده می‌شود. نتایج این پژوهش با تحقیقات Karimi *et al* (2021) همخوانی داشت. آن‌ها گزارش کردند کاربرد بیوچار، به‌ویژه نوع اصلاح‌شده

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

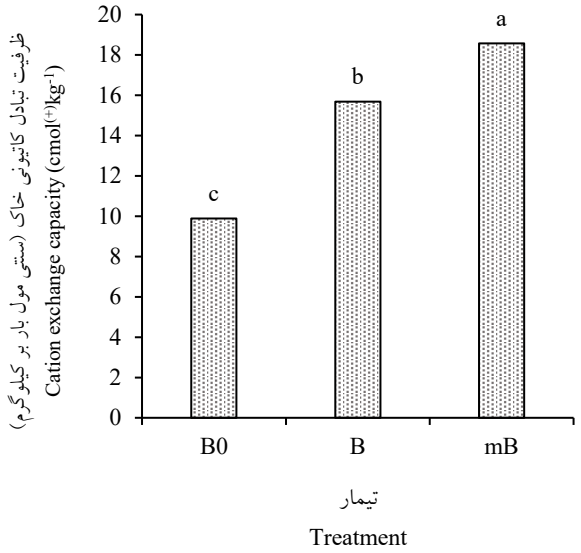


شکل ۶. ضریب همبستگی (نقشه حرارتی) میان پارامترهای شیمیایی و زیستی اندازه‌گیری شده در خاک

OC: کربن آلی خاک، BR: تنفس میکروبی خاک، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، DOC: کربن آلی محلول خاک، Pava: فسفر قابل دسترس خاک و MBC: تنس زیست‌توده میکروبی خاک.

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 حاوی مقادیر قابل‌توجهی کربن قابل دسترس بوده که با آزاد شدن 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 معنی‌داری بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک تأثیرگذار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۳) نشان داد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در تیمارهای بیوچار و بیوچار اصلاح شده به‌ترتیب ۵۸/۶۱ و ۸۷/۸۸ درصد نسبت به شاهد بیش‌تر بود. افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در تیمارهای بیوچار، به‌ویژه بیوچار اصلاح‌شده با اسید را می‌توان به بالاتر بودن مقدار CEC و محتوای مواد معدنی بیش‌تر آن نسبت داد (جدول ۲). نسبت‌های بالاتر H/C و O/C در بیوچار اصلاح‌شده نیز نشان‌دهنده پایداری



شکل ۳. مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC)

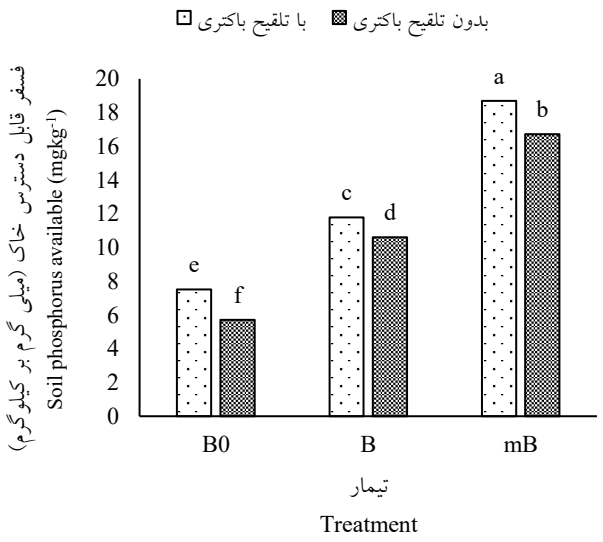
میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($P<0.05$) ندارند.

B0، B و mB به‌ترتیب تیمارهای شاهد (بدون کاربرد بیوچار)، کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح شده هستند.

Fig 3. Means comparison of the effect of treatments on cation exchange capacity (CEC) of soil
Means with similar letter(s) 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

کمتر کربن و تجزیه‌پذیری بیشتر ترکیبات آلی آن است (Taheri *et al*., 2023). همبستگی مثبت ظرفیت تبادل کاتیونی با کربن آلی خاک (شکل ۶) بیانگر نقش گروه‌های عاملی فعال در افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی 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 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 را افزایش می‌دهد (Janu *et al*., 2021).

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



شکل ۴. مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر فسفر قابل دسترس خاک
میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($P<0.05$) ندارند.
B0، B و mB : به‌ترتیب تیمارهای شاهد (بدون کاربرد بیوچار)، کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح شده هستند.

Fig 4. Means comparison of the effect of treatments on soil phosphorus available
Means with similar letter(s) 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

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر متقابل تیمارهای نوع بیوچار و تلقیح میکروبی بر فسفر معدنی خاک بود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۴) نشان داد که بیش‌ترین مقدار فسفر قابل دسترس خاک (۱۸/۷ میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار تلفیقی بیوچار اصلاح‌شده 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 تلفیح باکتری و بدون باکتری نیز باعث افزایش معنی‌دار فسفر قابل‌دسترس در خاک نسبت به تیمار شاهد شدند. همچنین نتایج (شکل ۴) نشان داد، افزایش فسفر قابل دسترس در تیمارهای بیوچار اصلاح شده احتمالا 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 تثبیت‌شده در خاک‌های آهکی شوند (Jamil *et al*., 2024). همبستگی مثبت بین فسفر قابل دسترس با تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی خاک (شکل ۶) نیز تأییدی بر کارآمدی کاربرد تلفیقی بیوچار اصلاح‌شده و باکتری‌های حل‌کننده فسفر در بهبود حاصلخیزی خاک‌های آهکی است. El-Sharkawy *et al* (2022) نیز گزارش کردند بیوچار اصلاح‌شده با اسید می‌تواند باعث افزایش عناصر غذایی قابل دسترس در خاک شود که احتمالاً به‌دلیل افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، افزایش ظرفیت جذب و تغییر در گروه‌های عاملی سطحی در اثر اسیدی‌شدن بیوچار است. همبستگی مثبت بین ظرفیت تبادل کاتیونی و فسفر قابل دسترس خاک (شکل ۶) نیز نشان می‌دهد افزایش CEC به‌واسطه 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 $Ca_3(PO_4)_2$ 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 موجب افزایش فراهمی فسفر می‌شود که این امر به کاهش تثبیت فسفر و فراهم شدن بستر تغذیه‌ای مناسب برای میکروارگانیسم‌ها در اثر افزایش کربن آلی محلول نسبت داده شد. همبستگی مثبت بین فسفر قابل دسترس و کربن آلی محلول خاک (شکل ۶) تأییدی بر این موضوع است. از سوی دیگر، ساختار متخلخل بیوچار اصلاح‌شده محیط مناسبی برای استقرار باکتری‌ها فراهم کرده و افزایش تراکم آن‌ها در ریزوسفر می‌تواند توان انحلال فسفر را بیشتر تقویت کند (Ali *et al*., 2020).

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

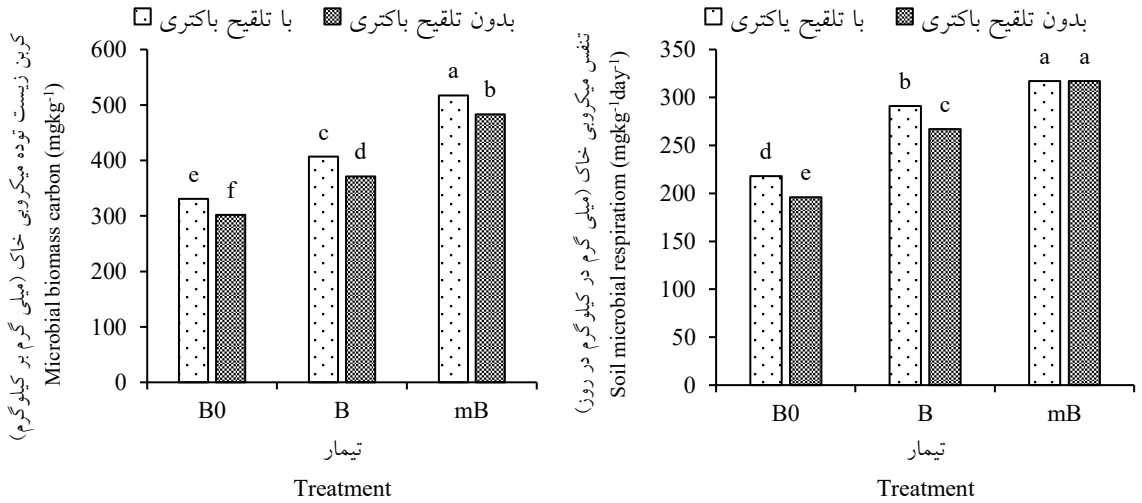
جدول ۴. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های زیستی خاک

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

منابع تغییرات (S.O.V)	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	
		کربن زیست توده میکروبی خاک Microbial Biomass carbon	تنفس میکروبی خاک Soil microbial respiration
بیوچار (B)	2	51276.07**	18686.870**
باکتری (Ba)	1	4929.914**	1048.667**
B × Ba	2	15.7149**	261.6459*
خطا	10	0.0198	40.9578
ضریب تغییرات (%) CV		0.04	2.39

*و **: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد هستند.

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



شکل۵. مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر کربن زیست توده (MBC) و تنفس میکروبی خاک (BR)

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($P<0.05$) ندارند.

B0، B و mB به‌ترتیب تیمارهای شاهد (بدون کاربرد بیوچار)، کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح شده هستند.

Fig 5. Means comparison of the effect of treatments on soil microbial biomass (MBC) and microbial respiration of soil (RS)
Means with similar letter(s) 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

ویژگی‌های بیوشیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر متقابل تیمارها بر کربن زیست‌توده میکروبی و تنفس میکروبی خاک معنی‌دار بود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۵) نشان داد بیش‌ترین مقدار کربن زیست توده 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. این افزایش احتمالاً ناشی از فراهم شدن بستر مناسب برای رشد میکروارگانیسم‌ها در حضور بیوچار و

نسخه مشاور

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

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 تثبیت شده در سلول‌های میکروبی است (Rouydel *et al*., 2021). همبستگی مثبت بین کربن زیست‌توده میکروبی و کربن آلی خاک (شکل۶) نشان می‌دهد افزایش کربن آلی خاک، منبع تغذیه مناسبی برای میکروارگانیسم‌ها فراهم کرده که منجر به افزایش زیست‌توده میکروبی خاک شده است.

مقایسه میانگین داده‌ها (شکل ۵) نشان داد افزودن بیوچار، به‌ویژه نوع اصلاح‌شده، تنفس میکروبی را نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش داد. این افزایش احتمالاً 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 ۶). بیش‌تر بودن 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 آن‌ها 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 درمقابل تجزیه میکروبی می‌باشد.

نتایج این پژوهش با مطالعه 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 میکروبی و کربن زیست‌توده میکروبی خاک شد که دلیل آن را تأثیر بیش‌تر بیوچارهای اصلاح‌شده بر تغییرات pH و حلالیت 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 میکروارگانیسم‌های محرک رشد سبب بهبود فعالیت زیستی خاک شد. مطالعات قبلی 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 نشان دهنده تأثیر مثبت و معنی‌دار کاربرد همزمان بیوچار اصلاح‌شده با سیتریک اسید و باکتری‌های حل‌کننده فسفر بر بهبود ویژگی‌های شیمیایی و بیوشیمیایی خاک از جمله pH، هدایت الکتریکی، کربن آلی، کربن آلی محلول ، ظرفیت تبادل کاتیونی، تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی خاک بود. بطور کلی نتایج نشان داد بیوچاراصلاح‌شده با سیتریک اسید 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 گردید. با توجه به شرایط خاک‌های آهکی مانند کم‌بودن ماده آلی و تثبیت بالای فسفر، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد کاربرد تلفیقی بیوچار اصلاح‌شده و میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفر، می‌تواند راهکاری مؤثر و پایدار جهت بهبود حاصلخیزی خاک‌ها خاک‌های آهکی تحت کشت نیشکر باشد.

تشکر و سپاسگزاری

تضاد منافع

منابع مورد استفاده

References

نسخه پیش از انتشار

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

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. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, pp. 831–871.
2. Arbelaez Breton, L., Mahdi, Z., Pratt, C. and El Hanandeh, A., 2021. Modification of hardwood derived biochar to improve phosphorus adsorption. Environ., 8(5), p.41.
3. Bakhtiyarifar, M., Enayatizamir, N. and Mehdi Khanlou, K., 2021. Biochemical and molecular investigation of non-rhizobial endophytic bacteria as potential biofertilisers. Arch. Microbiol., 203(2), pp.513-521.
4. Beitsayahi, F., Enayatizamir, N., Nejadsadeghi, L. and Nasernakhaei, F., 2025. Plant Growth-Promoting Bacteria Associated With Some Salt-Tolerant Plants. J. Basic Microbiol., 65(2), p.e2400446.
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. and Zhao, H., 2023. Distribution, characteristics and management of calcareous soils. Adv. Agron., 182, pp.81-130.
6. Desalegn, B., Kebede, E., Legesse, H. and Fite, T., 2023. Sugarcane productivity and sugar yield improvement: Selecting variety, nitrogen fertilizer rate, and bioregulator as a first-line treatment. Heliyon, *9*(4).
7. Domingues, R.R., Trugilho, P.F., Silva, C.A., Melo, I.C.N.D., Melo, L.C., Magriotis, Z.M. and 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), p.e0176884.
8. El-Sharkawy, M., El-Naggar, A.H., Al-Huqail, A.A. and Ghoneim, A.M., 2022. Acid-modified biochar impacts on soil properties and biochemical characteristics of crops grown in saline-sodic soils. Sust., 14(13), p.8190.
9. Frene, J.P., Frazier, M., Liu, S., Clark, B., Parker, M. and Gardner, T., 2021. Early effect of pine biochar on peach-tree planting on microbial community composition and enzymatic activity. Appl. Sci., 11(4), p.1473.
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. JWSS-Isfahan Univ. Technol., 26(2), 39-59. (In Persian with English abstract)
11. Hosseini, E., Zarei, M., Sepehri, M. and Safarzadeh, S., 2021. Do bagasse biochar and microbial inoculants positively affect barley grain yield and nutrients, and microbial activity?. J. Plant Nutr., 45(4), pp.522-539.
12. 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. and Hafeez-u-Rehman, 2024. Investigating the role of solubilizing bacteria in the phosphorus cycling and organic matter dynamics. J. Agric. Vet. Sci., 3(2), pp.371–382.
13. Janu, R., Mrlik, V., Ribitsch, D., Hofman, J., Sedláček, P., Bielská, L. and Soja, G., 2021. Biochar surface functional groups as affected by biomass feedstock, biochar composition and pyrolysis temperature. Carbon Resour. Convers., 4, pp.36-46.
14. Jenkinson, D.S. and Ladd, J.N., 1981. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In Soil Biochem.(pp. 415-472. CRC Press.
15. Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M. and 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), pp.2333-2344. (In Persian with English abstract)
16. 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.
17. Karimi, A., Safirzadeh, S., Zakavi, N., Khajavi-Shojaei, S., Masoudian, K., Khaji, P., Enayatizamir, N. and Noroozi, H., 2025. Impact of plant growth promoting bacteria inoculation on phosphorus uptake and quantitative and qualitative yield of ratoon sugarcane. JSPI, pp.19-20. (In Persian with English abstract)
18. Karimi, A., Zakavi, N., Safirzadeh, S., Noroozi, H. and 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), pp.449-466. (In Persian with English abstract)
19. Karimi, A., Zanganeh-Yusefabadi, E. and Safirzadeh, S. 2024b. Comparison of availability and uptake of phosphorus and potassium in sugarcane under subsurface drip irrigation and furrow irrigation. JISE, 47(3), pp, 53-67. (In Persian with English abstract)
20. Lamizadeh, E., Enayatizamir, N. and 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), pp.1072-83.
21. Liu, F., Qian, J., Zhu, Y., Wang, P., Hu, J., Lu, B., He, Y., Tang, S., Shen, J., Liu, Y. and Li, F., 2024. Phosphate solubilizing microorganisms increase soil phosphorus availability: a review. Geomicrobiol. J, 41(1), pp.1-16.
22. Nassef, K., Sahli, A., Bouhdid, S., Mezzoug, N., Abrini, J. and Khay, E.O., 2025. Phosphate solubilizing microorganisms and their use in sustainable agriculture: A review. Geomicrobiol. J, 42(3), pp.224-243.
23. Nazari, S., Rahimi, G., and Nezhad, A. K. J. 2019. Effectiveness of native and citric acid-enriched biochar of Chickpea

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

straw in Cd and Pb sorption in an acidic soil. J. Environ. Chem. Eng, 7(3), 103064.
24. Olsen, S.R. and Sommers, E.L., 1982. Phosphorus soluble in sodium bicarbonate. Methods Soil Anal., part, 2, pp.404-430.
25. Qayyum, M.F., Khan, D.E.S., Alghanem, S.M.S., Sakit Alhaithloul, H.A., Alsudays, I.M., Rizwan, M. and 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), p.498.
26. Qayyum, M.F., Liaquat, F., Rehman, R.A., Gul, M., ul Hye, M.Z., Rizwan, M. and Rehaman, 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), pp.26060-26068.
27. Regmi, P., Moscoso, J.L.G., Kumar, S., Cao, X., Mao, J. and Schafran, G., 2012. Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process. J. Environ. Manage, 109, pp.61-69.
28. Ren, H., Huang, B., Fernández-García, V., Miesel, J., Yan, L. and Lv, C., 2020. Biochar and rhizobacteria amendments improve several soil properties and bacterial diversity. Microorg., 8(4), p.502.
29. Rouydel, Z., Barin, M., Rasouli-Sadaghiani, M.H., Khezri, M., Vetukuri, R.R. and Kushwaha, S., 2021. Harnessing the potential of symbiotic endophytic fungi and plant growth-promoting rhizobacteria to enhance soil quality in saline soils. Proc, 9(10), 1810. DOI: 10.3390/pr9101810
30. Sadegh Kasmaei, L., Yasrebi, J., Zarei, M., Ronaghi, A., Ghasemi, R., Saharkhiz, M.J., Ahmadabadi, Z. and 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), pp.119-131.
31. 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.
32. 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
33. Siedt, M., Schäffer, A., Smith, K.E., Nabel, M., Roß-Nickoll, M. and 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, p.141607.
34. Singh, B., Camps-Arbestain, M. and Lehmann, J. eds., 2017. Biochar: a guide to analytical methods. Csiro Publishing.
35. Taheri, M.A.R., Astaraei, A.R., Lakzian, A. and 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), pp.221-236.
36. Vahedi, R., Rasouli-Sadaghiani, M.H., Barin, M. and Vetukuri, R.R., 2022. Effect of biochar and microbial inoculation on P, Fe, and Zn bioavailability in a calcareous soil. Proc, 10(2), p.343.

نسخه پیش از انتشار

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