# پاسخ برخی شاخص‌های زیستی خاک به برهم‌کنش بیوچار باگاس نیشکر و تنش شوری در یک خاک آلوده به کادمیم

**ناهید آزادی* و فایز رئیسی[1]**

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۲)

**چکیده**

**بیوچار به‌عنوان راهکاری کارآمد در بهبود ویژگی‌های خاک و مدیریت پسماندهای آلی موجب کاهش اثرات تنش‌های غیرزیستی و افزایش حاصلخیزی خاک می‌شود. اما، اثر آن بر شاخص‌های زیستی در خاک‌های تحت تنش‌های هم‌زمان شوری و آلودگی مورد مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین، هدف این پژوهش ارزیابی اثر بیوچار باگاس نیشکر بر شاخص‌های زیستی در یک خاک آلوده به کادمیم در شرایط شور و غیرشور بود. آزمایش به‌صورت فاکتوریل با ۲ فاکتور شوری (شاهد، ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار سدیم کلرید) و بیوچار باگاس نیشکر (خاک‌های اصلاح نشده با بهساز آلی، اصلاح شده با باگاس، بیوچار ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به میزان یک درصد) در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. نتایج نشان داد که شوری با افزایش ۱۷-۱۲ درصدی حلالیت کادمیم موجب تشدید سمیت آن برای ریزجانداران و کاهش محسوس فراوانی و فعالیت جمعیت میکروبی خاک شد. برعکس، کاربرد بیوچار با کاهش غلظت کادمیم (۱۴-۱۸ درصد)، افزایش کربن آلی (۱۲۷-۸۹ درصد) و کربن آلی محلول (۷۰-۴ درصد) موجب کاهش اثر این تنش‌ها بر جمعیت میکروبی و فعالیت آنزیمی خاک شد. به‌طور کلی، این پژوهش نشان داد که کاربرد بیوچار باگاس نیشکر با کاهش غلظت کادمیم قابل دسترس ناشی از شوری خاک موجب تعدیل نسبی اثر متقابل شوری و آلودگی کادمیم بر شاخص‌های زیستی خاک می‌شود.**

**واژه‌های کلیدی: آلودگی کادمیم، بیوچار، تنش شوری، جمعیت میکروبی خاک، دمای گرماکافت، فعالیت آنزیمی خاک**

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: nahidazadi93@gmail.com

## مقدمه

خاک به‌عنوان یک زیست‌بوم پویا، زیستگاه موجودات زنده متنوع و محیط رشد گیاه یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی محسوب می‌شود و نقش اساسی در تأمین نیازهای روز افزون بشر ایفا می‌کند. با این حال، دخالت مستمر و افزایش فعالیت‌های انسان و آلودگی‌های ناشی از این دخالت و فعالیت‌ها به‌صورت آگاهانه و غیرآگاهانه، همواره خاک را در معرض انواع تنش‌های غیرزیستی (Abiotic stresses) نظیر شوری، خشکی، اسیدی شدن، ماندابی شدن، فلزات سمی، آفت‌کش‌ها، آلاینده‌های نفتی و کمبود عناصر غذایی قرار می‌دهند و در نتیجه شرایط تخریب تدریجی خاک را فراهم می‌سازند. آلودگی کادمیم (۲۹ و ۳۳) و شوری ثانویه (۲۲ و ۲٤) از جمله تنش‌های مهم و متداول رو به گسترش در خاک است که فعالیت، فراوانی و تنوع جمعیت میکروبی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۲۱، ۲۲، ۲٤ و ۲۹). در زیست‌بوم این دو تنش ممکن است به‌تنهایی و یا حتی به‌صورت هم‌زمان و پی‌درپی وجود داشته باشند (۲۱، ۲۹ و ۳۳). در چنین شرایطی که خاک در معرض دو تنش قرار می‌گیرد، ممکن است تأثیر هم‌زمان یا مشترک تنش‌ها متفاوت از تأثیر آنها به‌تنهایی باشد و یک تنش ممکن است اثر تنش دیگر را تشدید، خنثی یا تعدیل نماید (۲۱ و ۲۹). معمولاً شوری از طریق سازوکارهای متفاوت باعث افزایش تحرک و فعالیت فلزات سمی (۱، ۲، ۱۱ و ۳۳) و به‌دنبال آن زیست‌فراهمی و سمیت آنها برای موجودات زنده از جمله گیاه (۱۱، ۲۹ و ۳٤) و ریزجانداران خاکزی (۲۱ و ۲۹) می‌شود. اگرچه خاک به لحاظ دارا بودن ویژگی‌های منحصربه‌فرد و ذاتی پایداری و مقاومت خود را در مقابل سمیت این گونه تنش‌ها حفظ می‌کند و تا حدودی اثرات منفی آنها را تعدیل می‌نماید، اما در بلندمدت با تشدید و ادامه این تنش‌ها خسارت‌های قابل توجهی به جمعیت میکروبی و ویژگی‌های مختلف خاک وارد می‌شود (۲۱، ۲۲، ۲٤ و ۲۹). همچنین، با توجه به اینکه سطح گسترده‌ای از خاک‌های مناطق مختلف جهان، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک، تحت تأثیر این تنش‌ها (آلودگی فلزات سمی و شوری) هستند، امروزه ارائه راهکاری مطمئن و عملی که ضمن کاهش آثار منفی این تنش‌ها، کم هزینه، به‌نسبت سریع و آثار جانبی نامطلوب برای سلامت محیط زیست نداشته باشد، ضروری است. بیوچار به‌عنوان یک ماده آلی غنی از کربن و یک راهکار کارآمد براساس ساختار بسیار متخلخل، حضور گروه‌های عامل مختلف، سطح ویژه و گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) بالا، منبع مواد مغذی، زیستگاه مناسب برای سکونت، رشد و تکثیر میکروب‌ها، کاهش مقاومت کششی خاک و نفوذ بهتر ریشه توانایی ویژه‌ای برای بهبود ویژگی‌های خاک، ترسیب کربن (کربن‌اندوزی)، ارتقاء حاصلخیزی و رشد گیاه و اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سمی و شور دارد (۱٤، ۱٦ و ۲۳). ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی بیوچار (درصد کربن، ترکیب عنصری، میزان خاکستر، میزان مواد فرار، گروه‌های عامل فراوان، جذب سطحی یون‌ها و pH) که تحت تأثیر دمای گرماکافت قرار می‌گیرند، با تبدیل آلاینده‌های معدنی به شکل‌های پایدار یا نیمه‌پایدار آلودگی و سمیت آنها را در خاک کاهش می‌دهد (۲۸ و ۳۳). بیوچار از طریق واکنش‌های جذب سطحی شامل تبادل یونی و تشکیل کمپلکس بین گروه‌های عامل بیوچار و یون‌های فلزات و تشکیل رسوب فلزی موجب کاهش حلالیت و زیست‌فراهمی فلزات سمی در خاک می‌شود (٦، ۱۸ و ۳۳). از سوی دیگر استفاده از بیوچار در خاک‌های شور با سازوکارهایی مانند افزایش محتوای کربن آلی خاک و CEC، فراهمی عناصر غذایی، ظرفیت نگه‌داری آب در خاک، بهبود و حفظ تخلخل و تهویه خاک و در نتیجه بهبود حرکت آب در خاک و کمک به افزایش آبشویی نمک‌های محلول و فراهم‌کردن مواد مغذی و زیستگاه مناسب برای سکونت جمعیت میکروبی خاک موجب کاهش آثار منفی شوری بر ویژگی‌های بیولوژیکی خاک می‌شود (۷، ۲۳ و ۲۵). با توجه به اینکه تنش‌های ناشی از شوری و آلودگی کادمیم در حال گسترش است و اغلب مطالعات به بررسی تأثیر این دو تنش به‌صورت جداگانه بر شاخص‌های زیستی خاک پرداخته‌اند (۲٤، ۲۵، ۳۱ و ۳۳)، اما ممکن است دو تنش آلودگی کادمیم و شوری در خاک به‌طور هم‌زمان و یا متوالی بروز نمایند، این

برهم‌کنش کمتر مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است (۲۱، ۲۹ و ۳۳). بنابراین، بررسی و شناخت برهم‌کنش تنش‌های چندگانه برای مدیریت و حفاظت از موجودات زنده خاک به‌منظور به حداقل رساندن آثار منفی آنها در سیستم خاک- گیاه لازم و ضروری است. از سوی دیگر تنها مطالعات بسیار اندکی به بررسی اثر مثبت کاربرد بیوچار بر ویژگی‌ها و عملکردهای میکروبی خاک‌های تحت تنش شوری و آلودگی فلزات سمی پرداخته است (٦، ۷، ۱۸، ۲۵ و ۳۱). از این جهت، در این پژوهش تأثیر بیوچار باگاس نیشکر و دمای تولید آن بر برخی شاخص‌های زیستی و بیوشیمیایی کیفیت خاک مانند فعالیت و فراوانی جمعیت میکروبی و نیز فعالیت آنزیمی در یک خاک آلوده به کادمیم در شرایط شور و غیرشور در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده در این پژوهش از دشت شهرکرد (عرض جغرافیایی ″٤١ ′١٩ °٣٢ و طول جغرافیایی ″٣٧ ′٤٧ °٥٠) و از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری شد و پس از انتقال به آزمایشگاه و هوا خشک کردن در دمای محیط از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ ارائه شده است. بیوچار مورد استفاده در این پژوهش باگاس نیشکر به‌عنوان ماده خام اولیه بود که از مجتمع‌های تولید نیشکر تهیه و پس از شست و شو به‌مدت یک هفته متوالی هوا خشک شد. پس از آسیاب کردن و عبور از الک ۲ میلی‌متری در داخل ظروف درپوش‌دار مخصوص در داخل کوره در دو دمای ٤٠٠ و ٦٠٠ درجه سلسیوس و با روش گرماکافت آهسته طی ۲ ساعت به مقدار کافی تهیه شد (١٤). سپس ۳ زیرنمونه از آن تهیه و مورد تجزیه فیزیکی و شیمیایی قرار گرفت. مواد فرار، کربن تثبیت شده و درصد خاکستر (۱۰)، سطح ویژه با روش BET (۸)، میزان کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن و گوگرد با استفاده از دستگاه آنالیزگر CHNSO (۲۸) اندازه‌گیری شدند. ویژگی‌های بیوچارهای تولید شده در جدول ۱ گزارش شده است. آزمایش به‌صورت فاکتوریل با ۲ فاکتور شوری: شامل (۱) خاک غیر شور (S0)، (۲) شوری متوسط (S2، ۲۰ میلی‌مولار سدیم کلرید یا ۱۱۷۰ میلی‌گرم سدیم کلرید بر کیلوگرم خاک) و (۳) شوری بالا (S4، ٤٠ میلی‌مولار سدیم کلرید یا ۲۳٤٠ میلی‌گرم سدیم کلرید بر کیلوگرم خاک) و مواد بهساز: شامل (۱) بدون مصرف بقایای خام و یا بیوچار باگاس نیشکر به‌عنوان شاهد منفی (CK)، (۲) مصرف یک درصد بقایای خام باگاس نیشکر به‌عنوان شاهد مثبت (B0)، (۳) مصرف یک درصد بیوچار ٤٠٠ درجه سلسیوس (B4) و (٤) یک درصد بیوچار ٦٠٠ درجه سلسیوس (B6) در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با ۳ تکرار در ظرف‌های پلاستیکی یک لیتری (در مجموع ٣٦ ظرف) اجرا شد. برای اعمال آلودگی کادمیم در سطح ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مقادیر لازم کادمیم از نمک کلرید کادمیم به خاک اضافه و به‌طور کامل با خاک مخلوط شد و به‌منظور برقراری حالت شبه‌تعادل و نیز نزدیک شدن خاک‌های تیمار شده به شرایط آلودگی به‌مدت یک ماه در داخل ظروف در شرایط آزمایشگاه قرار داده شدند. در ادامه مقادیر لازم نمک سدیم کلرید جهت اعمال تیمار شوری به نمونه‌های خاک اضافه و به‌مدت یک هفته در شرایط آزمایشگاه قرار داده شدند. سپس یک درصد بیوچار (۱۰ گرم به ازای هر کیلوگرم خاک) به خاک اضافه و به‌طور کامل مخلوط شد. در واقع، این شیوه اعمال تیمارها حالت شورشدن یک خاک آلوده را شبیه‌سازی و یا وانمود می‌نماید. به‌منظور نزدیک شدن خاک‌های تیمار شده به شرایط طبیعی و برقراری تعادل نسبی و نیز فعال شدن مجدد جامعه میکروبی به مدت ۳ هفته در دمای معمولی محیط پیش‌انکوباسیون شدند. در ادامه نمونه‌ها داخل انکوباتور و در دمای ۱±۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت آنها در محدوده ۷۰-٦٠ درصد ظرفیت مزرعه نگه‌داری شد و تا پایان دوره آزمایش (۱۲۰ روز) به‌صورت وزنی کنترل شد. پس از ٤ ماه انکوباسیون کادمیم قابل دسترس ($Cd_{ava}$ ,Available Cd) (۱۷)، قابلیت هدایت الکتریکی (Electrical conductivity, EC) (۳)،

**جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و مواد بهساز آلی مورد استفاده در پژوهش**

| متغیر | خاک | مواد بهساز | | |
|---|---|---|---|---|
| | | B0 | B4 | B6 |
| درصد بازیافت (٪) | _ | – | ۳۸/۸ | ۲۷/۲ |
| خاکستر (٪) | – | ۱۰/٤ | ۲۹/٦ | ٥۳/۳ |
| pH | ۷/۹۰ (۱:۲) | ٦/۸۰ (۱:۲۰) | ۹/۲۰ (۱:۲۰) | ۹/۹۰ (۱:۲۰) |
| قابلیت هدایت الکتریکی ($dS\ m^{-1}$) | ۰/۳۱ (۱:۲) | ۰/۸۰ (۱:۲۰) | ۱/۰۰ (۱:۲۰) | ۱/۹۰ (۱:۲۰) |
| سطح ویژه (٪) | | ٤/۳۰ | ۱۰/٤ | ۹۷/۳ |
| کربن (٪) | ۰/٤۷ | ۳۸/٤ | ٥۲/۹ | ٥٤/۷ |
| نیتروژن (٪) | – | ۰/۳٦ | ۰/٤۸ | ۰/٥٦ |
| هیدروژن (٪) | – | ٥/٥۰ | ۳/۱۰ | ۱/٤۰ |
| اکسیژن (٪) | – | ٤٥/۲ | ۱۳/٤ | ۸/٦۰ |
| کربن:نیتروژن | – | ۰/۸۸ | ۰/۱۹ | ۰/۱۲ |
| هیدروژن:کربن | – | ۱/۷۳ | ۰/۷۰ | ۰/۳۱ |
| هیدروژن:اکسیژن | – | ۲/۰۰ | ۳/۷۰ | ۲/٦۰ |
| کادمیم کل ($mg\ kg^{-1}$) | ۰/۲۰ | ۰/۱۰ | ۰/۱۸ | ۰/۲۰ |
| کادمیم قابل دسترس ($mg\ kg^{-1}$) | ۰/۰۰ | – | – | – |
| فسفر ($g\ kg^{-1}$) | – | ۷٤/۰ | ۱۸٦ | ۳٤۲ |
| سدیم ($mg\ kg^{-1}$) | – | ۰/٦۸ | ۱/۱٦ | ۱/۳۸ |
| مواد فرار (٪) | – | ۸۸/٦ | ٥٤/۱ | ٤۱/٤ |
| کربن تثبیت‌شده (٪) | – | ۱/۱۰ | ۲۳/۱ | ۳٦/۰ |
| شن ($g\ kg^{-1}$) | ۲۸٤ | – | – | – |
| رس ($g\ kg^{-1}$) | ٤۰۱ | – | – | – |
| سیلت ($g\ kg^{-1}$) | ۳۱٥ | – | – | – |
| بافت | لوم‌رسی | – | – | – |
| کربنات کلسیم ($g\ kg^{-1}$) | ۲۸۰ | – | – | – |

B0، بقایای خام باگاس نیشکر؛ B4 و B6 به‌ترتیب بیوچارهای فرآوری‌شده در دمای ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس

کربن آلی کل (Soil organic carbon, SOC) (۳)، کربن آلی محلول (Dissolved organic carbon, DOC) (۹)، کربن زیست‌توده میکروبی (Microbial biomass carbon, MBC) (۳)، تنفس پایه میکروبی (Microbial basal respiration, MBR) (۳)، تنفس باکتریایی (Bacterial respiration, BR) (٤)، تنفس قارچی (Fungal respiration, FR) (٤)، شمارش جمعیت میکروبی (۳)، شمارش نماتد (۱۲)، شمارش پروتوزوآ (۳) و فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز (Urease, URE)، آریل سولفاتاز (Arylsulphatase, ARY)، فسفومنواستراز قلیایی (Alkaline phosphomonoesterase, ALP)، دهیدروژناز (Dehydrogenase, DEH)، کاتالاز (Catalase, CAT) (۲۷) و هیدرولیز فلوروسین دی‌استات (Fluorescein diacetate, FDA) اندازه گیری شد (۳) و درنهایت میانگین هندسی فعالیت آنزیمی (Geometric mean of enzyme activities, GME) نیز محاسبه شد (۲۰). تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها براساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و با استفاده از نرم‌افزار Minitab 18.1 انجام شد. برای بررسی مقایسه میانگین‌ها از آزمون Tukey در سطح ۰/۰۵ =α استفاده شد.

## نتایج و بحث

### اثر دمای گرماکافت بر ویژگی‌های عمومی بیوچار

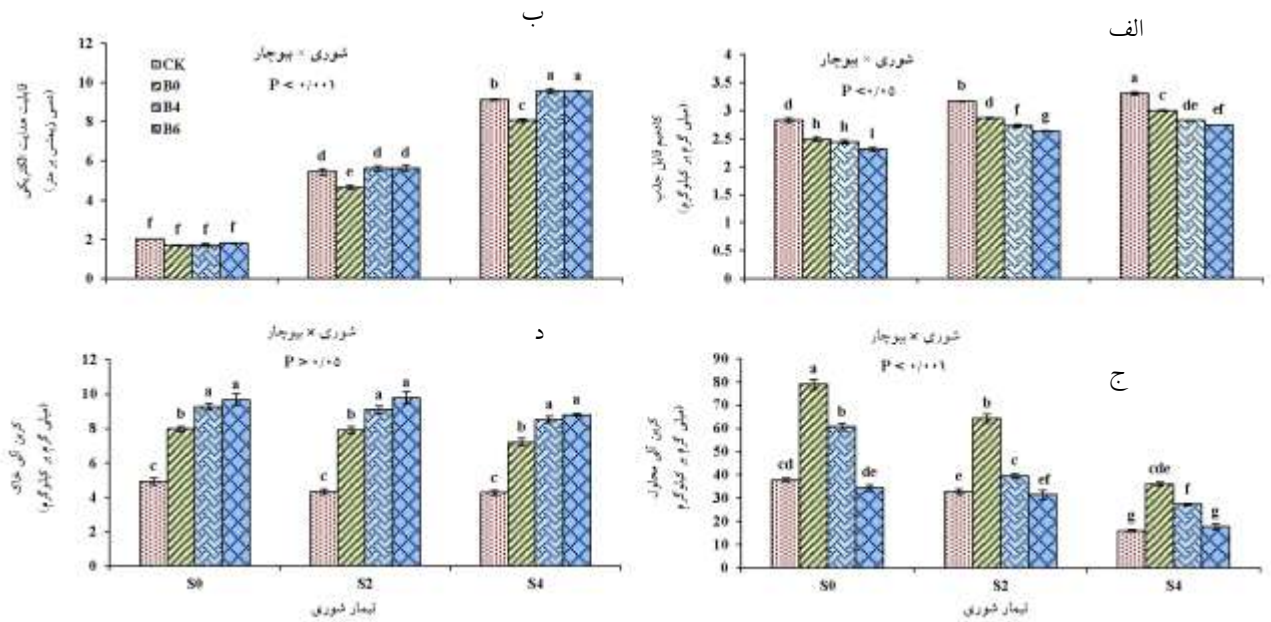
نتایج نشان داد که افزایش دمای گرماکافت موجب کاهش عملکرد بیوچار از ۳۹ درصد در دمای ٤۰۰ درجه سلسیوس به ۲۷ درصد در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس شد (جدول ۱). این کاهش عملکرد در اثر افزایش دمای گرماکافت می‌تواند به دلیل تجزیه ترکیبات لیگنین، همی‌سلولز و سلولز باشد، زیرا بخش زیادی از بقایای گیاهی از این ترکیبات تشکیل شده است (۳۲). یانگ و همکاران (۳۲) بیان کردند که رطوبت در دمای کمتر از ۲۲۰ درجه سلسیوس، سلولز در دمای بین ۲۲۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس، همی‌سلولز در دمای بین ۳۰۰ تا ۳٤۰ درجه سلسیوس و لیگنین در دمای بالاتر از ۳٤۰ درجه سلسیوس تجزیه می‌شوند.

نتایج تجزیه شیمیایی مواد بهساز نیز نشان داد با افزایش دمای گرماکافت میزان خاکستر بیوچار از ۱۰ درصد در باگاس خام به ۳۵ درصد در بیوچار ٦۰۰ درجه سلسیوس افزایش یافت (جدول ۱). این افزایش می‌تواند به دلیل تشکیل و افزایش غلظت مواد معدنی به دنبال کربنی شدن ناشی از گرماکافت باشد (۱٤) که با افزایش غلظت عناصر معدنی بیوچار با افزایش دمای گرماکافت در این پژوهش تأیید می‌شود (جدول ۱). با افزایش دمای گرماکافت تا ٦۰۰ درجه سلسیوس، pH و EC بیوچار به‌ترتیب ۳/۱ و ۱/۱ واحد افزایش یافت. علت افزایش pH بیوچار می‌تواند به‌دلیل افزایش درصد خاکستر و نسبت عناصر قلیایی، تشکیل اکسیدهای فلزات و خروج مواد فرار در حین گرماکافت و همچنین افزایش گروه‌های عامل قلیایی و کاهش گروه‌های عامل اسیدی باشد (۱٤). همچنین به دلیل افزایش درصد خاکستر و خروج مواد فرار و افزایش غلظت عناصر باقیمانده در خاکستر، EC بیوچار نیز با افزایش دمای گرماکافت افزایش یافت (۱٤). روند تغییرات کربن بیوچار با افزایش دمای گرماکافت با روند تغییرات pH و EC مشابه بود و میزان کربن بیوچارهای ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۵۳ و ۵۵ درصد بود که به‌ترتیب افزایش ۳۹ و ٤۵ درصدی کربن را در مقایسه با باگاس خام نشان دادند. میزان نیتروژن بیوچار روند مشخصی نداشت که با نتایج سایر مطالعات مطابقت دارد (۱٤). درصد اکسیژن و هیدروژن در باگاس خام (به‌ترتیب ٤۵ و ۵/۵ درصد) تا بیوچار تهیه شده در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس (به‌ترتیب ۸/٦ و ۱/٤ درصد) روند نزولی داشت (جدول ۱). با افزایش دما و خروج بیشتر مواد فرار درجه کربنی شدن افزایش می‌یابد که با افزایش میزان کربن و کاهش هیدروژن و اکسیژن بیوچار نشان داده می‌شود. با افزایش دما همواره نسبت هیدروژن به کربن (H/C) و نسبت اکسیژن به کربن (O/C) کاهش یافت (جدول ۱). کاهش نسبت H/C نشان‌دهنده فرایند آب‌زدایی و کاهش نسبت O/C بیانگر واکنش‌های کربوکسیل‌زدایی و هر دو نسبت، شاخص و یا درجه آروماتیکی شدن (درجه تراکم) بیوچار را نشان می‌دهند (۲٦). کاهش این نسبت‌ها در دمای بالای گرماکافت نشان‌دهنده کاهش کربن زود تجزیه‌پذیر و ترکیبات

آلیفاتیک مانند کربن فرار است در حالی که خاصیت آروماتیکی و آبگریزی بیوچار به تدریج افزایش می‌یابند (۲۶).

**اثر تیمارها بر ویژگی‌های شیمیایی خاک**

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اثر متقابل بیوچار و شوری بر EC، $Cd_{ava}$ و DOC خاک معنی‌دار ($P<0/05$) بود (شکل ۱). افزودن نمک سدیم کلرید در تمام تیمارها در هر دو سطح شوری موجب افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک تا سطوح مورد نظر شده است (شکل ۱- الف). بنابراین، سطوح شوری مورد نظر طی دوره انکوباسیون نوسان محسوسی نداشته و تنش شوری همچنان ثابت و برقرار بوده است. کاربرد بیوچار موجب افزایش بسیار اندک ولی معنی‌دار ($P<0/001$) EC خاک مورد آزمایش شد و بالاترین مقدار EC (۹/۶ دسی‌زیمنس بر متر) در بیوچار با دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در تیمار S4 مشاهده شد (شکل ۱- الف). در بسیاری از مطالعات کمیت و کیفیت خاکستر بیوچار، وجود درصد خاکستر بالا، خروج مواد فرار و آزاد شدن عناصر معدنی و کاتیون‌های بازی عامل اصلی افزایش EC خاک گزارش شده است (۱۴). نتایج این پژوهش نشان داد که به‌طور کلی شوری موجب افزایش ۱۷-۱۲ درصدی غلظت $Cd_{ava}$ در مقایسه با شاهد (خاک غیرشور) شد و این افزایش در تیمار S4 (۱۷ درصد) بیشتر از تیمار S2 (۱۲ درصد) بود. تشکیل کمپلکس کلر- فلز سمی، رقابت کاتیون همراه کلر برای قرار گرفتن در مکان‌های جذب و افزایش قدرت یونی محلول خاک از جمله دلایل افزایش حلالیت و تحرک فلزات سمی در خاک‌های تحت تنش شوری است (۱، ۲، ۱۱ و ۳۳). ژانگ و همکاران (۳۴) با بررسی تحرک و زیست‌فراهمی Cd در گیاه *Carpobrotus rossii* کشت شده در خاک با تنش شوری نشان دادند که شوری با افزایش قدرت یونی محلول خاک موجب افزایش حلالیت Cd در خاک می‌شود و افزایش جذب آن در بخش‌های مختلف گیاه را به همراه دارد. نتایج نشان داد که کاربرد بهساز آلی موجب کاهش ۱۸-۹ درصدی $Cd_{ava}$ در مقایسه با شاهد (خاک بدون کاربرد بهساز آلی) شد (شکل ۱- ب). کاربرد باگاس خام و بیوچارهای با دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس در تیمارهای S0 (به‌ترتیب ۱۲، ۱۴ و ۱۸ درصد)، S2 (به‌ترتیب ۱۰، ۱۴ و ۱۷ درصد) و S4 (به‌ترتیب ۹، ۱۵ و ۱۷ درصد) موجب کاهش غلظت $Cd_{ava}$ در مقایسه با شاهد (خاک بدون افزودن بهساز آلی) شد (شکل ۱). همچنین، کاهش غلظت $Cd_{ava}$ در تیمار بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس (۱۸-۱۷ درصد) بیشتر از بیوچار ۴۰۰ درجه سلسیوس (۱۵-۱۴ درصد) بود. علاوه بر این نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار (۱۸-۱۴ درصد) بیشتر از باگاس خام (۱۲-۹ درصد) غلظت $Cd_{ava}$ را در خاک کاهش داد. نتایج سایر بررسی‌ها نیز نشان می‌دهد که کاربرد بیوچار تهیه شده از باگاس نیشکر (۶، ۱۸ و ۳۳) و برخی بقایای دیگر (۲۸ و ۳۱) موجب کاهش محسوس مقدار $Cd_{ava}$ در خاک می‌شود. بیوچار با داشتن سطح ویژه و سطح جذب بالا، ساختار متخلخل، محتوای کربن و CEC بالا (۶، ۲۸ و ۳۳) و با مکانیسم‌هایی از قبیل جذب سطحی (اختصاصی و غیراختصاصی)، تبادل کاتیونی، تشکیل کمپلکس و هم‌رسوبی موجب کاهش قابلیت دسترسی فلزات سمی در خاک می‌شود (۶، ۱۸ و ۳۳). نتایج این پژوهش نشان داد که تنها اثرات اصلی بیوچار و تنش شوری بر SOC معنی‌دار بود ($P<0/001$). کاربرد باگاس خام و بیوچار با دماهای مختلف موجب افزایش SOC (۹۴ درصد) شد و با افزایش دمای گرماکافت، مقدار SOC همواره افزایش یافت (شکل ۱- ج). بالاترین مقدار SOC در تیمار بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس (۹/۴ گرم بر کیلوگرم) به دلیل داشتن محتوای بالای کربن مشاهده شد (جدول ۱) و کمترین مقدار آن در تیمار CK (۴/۵ گرم بر کیلوگرم) اندازه‌گیری شد. شوری ناشی از کاربرد نمک سدیم کلرید موجب کاهش غلظت DOC (۵۷-۱۳ درصد) خاک شد (شکل ۱- د). تنش شوری با کاهش میزان زیست‌توده میکروبی تولید DOC توسط میکروب‌های خاک را نیز کاهش می‌دهد (۱۹). درحالی‌که کاربرد باگاس خام و بیوچارهای تهیه شده از آن موجب افزایش معنی‌دار




**شکل ۱. برهم‌کنش شوری سدیم کلرید (غیرشور، شوری متوسط و شوری بالا به‌ترتیب شاهد، ۲۰ و ٤٠ میلی‌مولار سدیم کلرید) و بیوچار (شاهد منفی، بقایای خام باگاس نیشکر به‌عنوان شاهد مثبت و بیوچارهای فرآوری شده در دمای ٤٠٠ و ٦٠٠ درجه سلسیوس) بر ویژگی‌های شیمیایی خاک. میانگین‌های (n=۳) دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون Tukey در سطح ۵ درصد هستند. خطوط عمودی خطای استاندارد (SE) هستند (رنگی در نسخه الکترونیکی).**

(P<۰/۰۰۱) غلظت DOC (۱۲۵–۱۰ درصد) خاک در مقایسه با شاهد (خاک بدون کاربرد بهساز آلی) شد و این افزایش در باگاس خام (۱۲۵–۹٦ درصد) بیشتر از بیوچار (۷۰–۱۰ درصد) و همچنین بیوچار ٤٠٠ درجه سلسیوس (۷۰ درصد) بیشتر از بیوچار ٦٠٠ درجه سلسیوس (۱۰ درصد) بود. این افزایش می‌تواند به دلیل وجود محتوای بیشتر کربن زود تجزیه‌پذیر (مانند مواد فرار به‌عنوان کربن ناپایدار) در باگاس خام و بیوچار تهیه شده در دماهای پایین‌تر باشد (جدول ۱).

## اثر تیمارها بر ویژگی‌های میکروبیولوژیکی و فعالیت آنزیمی خاک

فراوانی، فعالیت و عملکرد ریزجانداران خاکزی از جمله شاخص‌های مهم برای ارزیابی کیفیت و سلامت خاک محسوب می‌شوند. در این پژوهش اثر متقابل بیوچار و شوری بر MBR، MBC و $qCO_2$ خاک معنی‌دار (P<۰/۰۰۱) شد (جدول ۲).

شوری ناشی از کاربرد نمک سدیم کلرید موجب کاهش ۴۳–۳۰ درصدی میزان MBR در مقایسه با خاک غیرشور شد. درحالی‌که کاربرد بهساز آلی میزان MBR خاک را بین ٦٨ تا ۲۱۷ درصد در مقایسه با شاهد (خاک بدون کاربرد بهساز آلی) افزایش داد (جدول ۲). باگاس خام (۲۱۷–۹۱ درصد) با داشتن درصد بالای مواد فرار و سوبسترای زود تجزیه‌پذیر، بیشتر از بیوچار (۱۵۳–٦٨ درصد) میزان MBR خاک را افزایش داد (جدول ۲). تنش شوری ناشی از مصرف سدیم کلرید موجب کاهش (٦٤–٤۷ درصد) MBC در مقایسه با خاک غیرشور شد. برعکس، MBC خاک بر اثر افزودن بهساز آلی بین ۹۱ تا ٤۲۰ درصد در مقایسه با شاهد (خاک بدون کاربرد بهساز آلی) افزایش یافت. همچنین، افزایش MBC خاک با کاربرد بهساز آلی در خاک شور (٤۲۰–۲۰۵ درصد) بیشتر از خاک غیرشور (۱۹۱–۱۳۸ درصد) بود. بالاترین میزان افزایش (٤۲۰ درصد) در خاک S4 و تیمار شده با باگاس خام مشاهده شد MBC

**جدول ۲. تأثیر تیمارهای آزمایشی بر ویژگی‌های میکروبی خاک. اعداد میانگین (n=۳) به‌همراه خطای استاندارد (SE) می‌باشند.**

| مواد بهساز | تیمار شوری | | | خلاصه تجزیه واریانس | |
|---|---|---|---|---|---|
| | غیرشور | شوری متوسط | شوری بالا | منابع تغییرات | آماره P |
| | تنفس پایه میکروبی ($mg\ C\ kg^{-1}\ day^{-1}$) | | | | |
| شاهد | ۳/٤±۰/۰۲$^{g}$ | ۲/٤±۰/۰۲$^{h}$ | ۱/۹±۰/۰۳$^{i}$ | شوری | <۰/۰۰۱ |
| باگاس نیشکر | ٦/٤±۰/۰۲$^{a}$ | ٦/۲±۰/۱۰$^{b}$ | ٦/۰±۰/۰٤$^{b}$ | بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۴۰۰ °C | ۵/۷±۰/۰٤$^{c}$ | ۵/۰±۰/۰٦$^{d}$ | ٤/۵±۰/۰٦$^{f}$ | بیوچار×شوری | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ٦۰۰ °C | ۵/٦±۰/۰٤$^{c}$ | ۵/۵±۰/۰۱$^{c}$ | ٤/۸±۰/۰۵$^{e}$ | | |
| | کربن زیست‌توده میکروبی ($mg\ kg^{-1}$) | | | | |
| شاهد | ۱۰۲/٤±۲/٤$^{f}$ | ۵٤/٤±۲/۵$^{g}$ | ۳۷/۳±۲/٦$^{h}$ | شوری | <۰/۰۰۱ |
| باگاس نیشکر | ۲٤۳/۷±۰/۳$^{a}$ | ۲۰۸/۷±۰/۲$^{b}$ | ۱۹٤/۱±۲/٤$^{bc}$ | بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۴۰۰ °C | ۲۰۷/۵±۲/٦$^{b}$ | ۱٦٦/۰±۲/٦$^{d}$ | ۱۳۹/۸±۵/۲$^{e}$ | بیوچار×شوری | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ٦۰۰ °C | ۱۹۵/۵±۰/۰۱$^{bc}$ | ۱۸۲/٦±۹/۰$^{c}$ | ۱۳٦/۳±٦/۷$^{e}$ | | |
| | ضریب ویژه تنفسی ($\mu g\ CO_2\ mg^{-1}\ MBC\ day^{-1}$) | | | | |
| شاهد | ۳۲/۹±۰/۷$^{cd}$ | ٤۳/۵±۱/۸$^{b}$ | ۵۱/۳±۳/۸$^{a}$ | شوری | <۰/۰۰۱ |
| باگاس نیشکر | ۲٦/٤±۰/۱$^{e}$ | ۲۹/٦±۰/٦$^{de}$ | ۳۱/۱±۰/٤$^{cde}$ | بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۴۰۰ °C | ۲۷/۵±۰/۵$^{de}$ | ۳۰/۳±۰/۸$^{cde}$ | ۳۲/۰±۰/۸$^{cde}$ | بیوچار×شوری | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ٦۰۰ °C | ۲۸/۹±۰/۲$^{de}$ | ۳۰/٤±۱/٤$^{cde}$ | ۳۵/۵±۱/۷$^{c}$ | | |

غیرشور، شوری متوسط و شوری بالا به‌ترتیب شاهد، ۲۰ و ٤۰ میلی‌مولار سدیم کلرید. میانگین‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون **Tukey** در سطح ۵ درصد هستند.

و کمترین میزان افزایش MBC (۱۰۳-۹۱ درصد) در خاک S0 و تیمار شده با بیوچار بود (جدول ۲). بیوچار ٤۰۰ درجه سلسیوس (۲۷٤-۱۰۳درصد) بیشتر از بیوچار ٦۰۰ درجه سلسیوس (۲٦٤-۹۱ درصد) موجب افزایش MBC خاک شد (جدول ۲). شوری از طریق افزایش فشار اسمزی و در پی آن کاهش آب قابل جذب، ایجاد سمیت یونی (مانند یون‌های سدیم و کلر) و کاهش جذب عناصر غذایی (مانند پتاسیم، کلسیم و منیزیم) ناشی از رقابت با سدیم مسیر متابولیکی

جمعیت میکروبی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۲۲، ۲۳ و ۲٤). بنابراین، فرایندهای مهم زیست‌بوم مانند سرعت تجزیه ماده آلی، معدنی‌شدن عناصر و سایر فرایندهای میکروبیولوژیکی اساسی در خاک نیز کاهش می‌یابند. درحالی‌که کاربرد مواد بهساز در خاک با جذب یون سدیم، کاهش قابلیت دسترسی فلزات سمی (شکل ۱) و فراهمی سوبسترای مورد نیاز جامعه میکروبی (شکل ۱) موجب تعدیل اثر تنش شوری و آلودگی کادمیم بر زیست‌توده میکروبی خاک می‌شود (جدول ۲). ضریب $qCO_2$ که از تقسیم MBR به MBC به‌دست می‌آید (۵)، می‌تواند برای بررسی تنش‌های محیطی، توزیع انرژی (سوبسترای کربن) لازم بین پایداری و بقاء زیست‌توده میکروبی، راندمان مصرف سوبسترا و ترکیب جمعیت میکروبی خاک استفاده کرد (۵، ۲۱، ۲٤ و ۳۱). نتایج این پژوهش نشان داد که در خاک آلوده به کادمیم تنش شوری موجب افزایش ۳۲ تا ٥٦ درصدی میزان $qCO_2$ در مقایسه با خاک غیرشور شد. اثر تنش شوری بر افزایش $qCO_2$ در خاک بدون کاربرد بهساز آلی (٥٦-۳۲ درصد) بیشتر از خاک تیمار شده با بهساز آلی (۱۹-۹ درصد) بود (جدول ۲). کاربرد بهساز آلی میزان $qCO_2$ خاک را در شرایط تنش شوری و آلودگی کادمیم بین ۱۲ تا ۳۹ درصد در مقایسه با شاهد (خاک بدون کاربرد بهساز آلی) کاهش داد. در تیمار S4، بیوچار ٤۰۰ درجه سلسیوس (۳۸ درصد) بیشتر از بیوچار ٦۰۰ درجه سلسیوس (۳۱ درصد) میزان $qCO_2$ خاک را کاهش داد. در این پژوهش همبستگی مثبت و معنی‌دار ($P<$ ۰/۰۰۱) بین ضریب $qCO_2$ و EC ($r=$ −۰/۵۲) و $Cd_{ava}$ ($r=$ −۰/۸۰) و همبستگی منفی و معنی‌دار ($P<$ ۰/۰۰۱) بین این شاخص میکروبی و MBR ($r=$ −۰/۸۷) و MBC ($r=$ −۰/۹۰) خاک وجود داشت. افزایش $qCO_2$ در خاک‌های تحت تنش شوری و آلودگی می‌تواند ناشی از ایجاد شرایط محیطی ناپایدار و کاهش بیشتر MBC (٦٤-٤۷ درصد) نسبت به MBR (٤۳-۳۰ درصد) باشد (جدول ۲). در چنین شرایطی کربن خاک بیشتر صرف تولید انرژی برای کارکرد حیاتی جمعیت میکروبی خاک شده و مقدار کمتری صرف رشد میکروبی و تولید زیست‌توده میکروبی شده است. تغییر ترکیب جمعیت میکروبی و کاهش کارایی آنها در استفاده از کربن و انرژی در خاک‌های تحت تنش شوری و آلودگی نیز می‌تواند از دیگر عوامل افزایش $qCO_2$ در این خاک‌ها باشد (۵، ۲۱ و ۳۱). اما کاهش میزان $qCO_2$ با کاربرد بهساز آلی در خاک‌های تحت تنش شوری و آلودگی نشان می‌دهد که بهساز آلی می‌تواند با کاهش حلالیت و فراهمی $Cd_{ava}$ و افزایش ماده آلی (شکل ۱) و در نتیجه فراهم کردن سوبسترای مورد نیاز جمعیت میکروبی موجب کاهش آثار منفی این تنش‌ها و افزایش راندمان میکروبی خاک شود.

پارامترهای BR، FR، نسبت F/B، فراوانی کل میکروبی، فراوانی پروتوزوآها و نماتدهای خاک نیز تحت تأثیر بیوچار و سطوح مختلف شوری ناشی از کاربرد نمک سدیم کلرید قرار گرفتند ولی اثر متقابل آنها (به جز فراوانی نماتدها) معنی‌دار نشد (شکل ۲ و جدول ۳). نتایج نشان داد که افزایش شوری موجب کاهش BR (۸ درصد)، FR (۲٤ درصد) و نسبت F/B (۱۸ درصد) در مقایسه با خاک غیرشور شد. فعالیت قارچی در مقایسه با فعالیت باکتریایی به شوری خاک حساسیت بیشتری نشان داد (جدول ۳). بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که جمعیت باکتریایی در پاسخ به تنش ناشی از شوری نمک سدیم کلرید نسبت به جمعیت قارچی خاک فعال‌تر هستند و حساسیت کمتری نشان می‌دهند (۲۹). همچنین، بین ضریب $qCO_2$ و FR ($r=$ −۰/٦٥) و BR ($r=$ −۰/۷۹) همبستگی منفی و معنی‌دار ($P<$ ۰/۰۰۱) وجود داشت. از این رو افزایش $qCO_2$ در خاک‌های تحت تنش می‌تواند به دلیل تغییر ترکیب جمعیت میکروبی در این خاک‌ها باشد. علاوه بر این بین MBC و FR ($r=$ ۰/۷٦) و BR ($r=$ ۰/۷۹) رابطه مثبت و معنی‌دار ($P<$ ۰/۰۰۱) مشاهده شد. بنابراین، کاهش فعالیت باکتریایی و قارچی می‌تواند به دلیل کاهش کربن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های تحت تنش شوری و آلودگی کادمیم باشد. تنش شوری و آلودگی نه‌تنها موجب تغییر ترکیب جمعیت میکروبی خاک می‌شوند بلکه با ایجاد شرایط محیطی ناپایدار موجب می‌شوند

**جدول ۳. تأثیر تیمارهای آزمایشی بر تنفس باکتریایی، تنفس قارچی، نسبت تنفس قارچی به باکتریایی و فعالیت آنزیم کاتالاز. اعداد میانگین به‌همراه خطای استاندارد (SE) هستند.**

| مواد بهساز | تیمار شوری | | | | خلاصه تجزیه واریانس | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | غیرشور | شوری متوسط | شوری بالا | میانگین | منابع تغییرات | Pآماره |
| | | | تنفس باکتریایی ($mg\ C\ kg^{-1}\ h^{-1}$) | | | |
| شاهد | ۴۶/۶±۲/۵ | ۳۷/۹±۰/۹ | ۳۶/۸±۱/۷ | ۴۰/۴±۳/۱C | شوری | <۰/۰۰۱ |
| باگاس نیشکر | ۵۸/۳±۰/۱۶ | ۵۶/۷±۴/۲ | ۵۷/۳±۲/۱ | ۵۷/۴±۰/۵B | بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۴۰۰ °C | ۶۰/۹±۵/۲ | ۵۸/۰±۳/۰ | ۵۷/۳±۱/۱ | ۵۸/۷±۱/۱B | بیوچار×شوری | >۰/۰۵ |
| بیوچار ۶۰۰ °C | ۶۵/۵±۱/۶ | ۶۰/۸±۹/۰ | ۶۱/۱±۲/۷ | ۶۲/۵±۱/۵A | | |
| میانگین | ۵۷/۸±۴/۷A | ۶۵/۵±۰/۲A | ۵۳/۳±۶/۰A | | | |
| | | | تنفس قارچی ($mg\ c\ kg^{-1}\ h^{-1}$) | | | |
| شاهد | ۸/۵۰±۰/۴ | ۷/۰±۱/۱ | ۴/۵۰±۰/۲ | ۶/۷±۱/۲C | شوری | <۰/۰۰۱ |
| باگاس نیشکر | ۲۲/۲±۳/۶ | ۱۹/۳±۲/۱ | ۱۶/۸±۱/۷ | ۱۹/۴±۱/۵A | بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۴۰۰ °C | ۱۶/۹±۱/۱ | ۱۳/۱±۰/۶ | ۱۳/۳±۲/۱ | ۱۴/۴±۱/۲B | بیوچار×شوری | >۰/۰۵ |
| بیوچار ۶۰۰ °C | ۱۰/۴±۰/۸ | ۶/۳±۰/۲ | ۸/۴۰±۱/۶ | ۸/۴±۱/۲۵C | | |
| میانگین | ۱۴/۵±۳/۶A | ۱۱/۴±۳/۵B | ۱۰/۸±۳/۱B | | | |
| | | | نسبت تنفس قارچی به باکتریایی | | | |
| شاهد | ۰/۱۸۴±۰/۰۱ | ۰/۱۸۴±۰/۰۳ | ۰/۱۲۴±۰/۰۱ | ۰/۱۶۴±۰/۰۲C | شوری | <۰/۰۰۱ |
| باگاس نیشکر | ۰/۳۸۱±۰/۰۶ | ۰/۳۳۹±۰/۰۲ | ۰/۲۹۴±۰/۰۲ | ۰/۳۳۸±۰/۰۳A | بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۴۰۰ °C | ۰/۲۷۹±۰/۰۲ | ۰/۲۲۶±۰/۱ | ۰/۲۳۲±۰/۰۳ | ۰/۲۴۶±۰/۰۲B | بیوچار×شوری | >۰/۰۵ |
| بیوچار ۶۰۰ °C | ۰/۱۵۸±۰/۰۱ | ۰/۱۰۶±۰/۰۲ | ۰/۱۳۹±۰/۰۳ | ۰/۱۳۵±۰/۰۲C | | |
| میانگین | ۰/۲۵۱±۰/۰۶A | ۰/۲۱۴±۰/۰۶B | ۰/۱۹۷±۰/۰۵B | | | |
| | | | فعالیت کاتالاز ($\mu mol\ o_2\ g^{-1}\ h^{-1}$) | | | |
| شاهد | ۲/۳۱±۰/۰۱ | ۲/۱۵±۰/۰۸ | ۲/۰۹±۰/۰۵ | ۲/۱۹±۰/۰۷C | شوری | <۰/۰۰۱ |
| باگاس نیشکر | ۲/۸۶±۰/۰۷ | ۲/۷۵±۰/۰۶ | ۲/۷۱±۰/۰۱ | ۲/۷۷±۰/۰۵A | بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۴۰۰ °C | ۲/۵۱±۰/۰۶ | ۲/۴۲±۰/۴ | ۲/۳۸±۰/۰۳ | ۲/۴۴±۰/۰۴B | شوری×بیوچار | >۰/۰۵ |
| بیوچار ۶۰۰ °C | ۲/۴۷±۰/۰۴ | ۲/۳۸±۰/۰۳ | ۲/۳۷±۰/۰۳ | ۲/۴۱±۰/۰۳B | | |
| میانگین | ۲/۵۴±۰/۱۳A | ۲/۴۳±۰/۱۴B | ۲/۳۹±۰/۱۵B | | | |

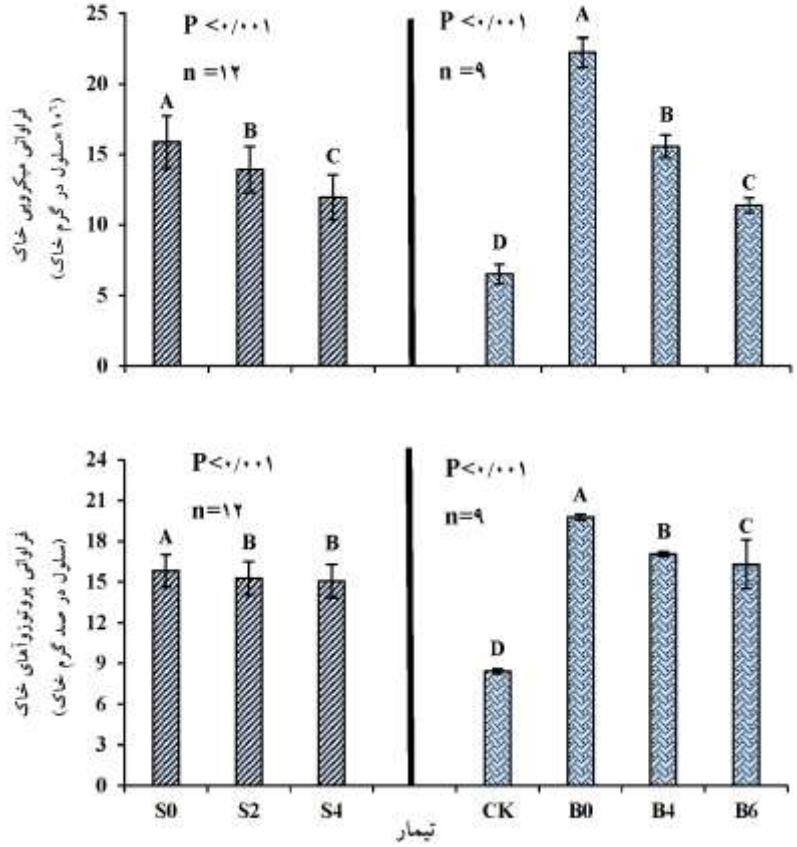
غیرشور، شوری متوسط و شوری بالا به‌ترتیب شاهد، ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار سدیم کلرید. میانگین‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون **Tukey** در سطح ۵ درصد هستند.

که ریزجانداران خاک برای حفظ زیست‌توده خود بیشتر کربن خاک را صرف تولید انرژی کنند (۲۲، ۲۵ و ۳۱).

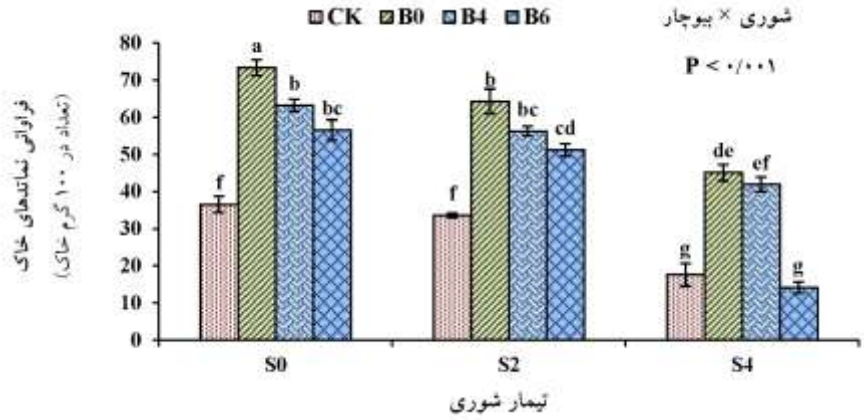
کاربرد بهساز آلی در خاک میزان BR، FR و نسبت F/B را به‌ترتیب ۵۵-۴۲، ۱۹۰-۲۵ و ۱۸-۱۰۶ درصد افزایش داد (جدول ۳). نسبت F/B به‌عنوان شاخص ترکیب و فعالیت جمعیت میکروبی خاک دارای اهمیت اکولوژیکی است (۳۰). مقادیر بالاتر این نسبت نشان‌دهنده کارآیی بیشتر قارچ‌ها در تبدیل کربن به زیست‌توده میکروبی است (۳۰). بیوچار با دماهای بالاتر با داشتن سطح ویژه و خلل و فرج ریز بیشتر در مقایسه با بیوچار تهیه شده در دماهای پایین‌تر (جدول ۱) می‌تواند آب لازم و مواد آلی محلول را برای متابولیسم و رشد باکتری‌ها ذخیره نماید. بنابراین، آنها را به نحو مؤثرتری نگه‌داری کرده و برای فعالیت باکتری‌های خاک مناسب‌تر است. این درحالی است که کاربرد باگاس خام در مقایسه با بیوچارهای تهیه شده از آن موجب افزایش بیشتر مقدار FR و نسبت F/B شد (جدول ۳). کاهش FR با افزایش دمای گرماکافت ممکن است به دلیل تغییر ویژگی‌های شیمیایی بیوچار به ویژه آروماتیکی شدن و آب گریزشدن آن باشد (جدول ۱). نتایج این پژوهش نشان داد که تنش شوری موجب کاهش فراوانی جمعیت میکروبی (۱۸ درصد)، پروتوزوآها (٤ درصد) و نماتدهای (۱۸ درصد) خاک شد (شکل ۲ و ۳). این نتایج نشان می‌دهد که فراوانی و عملکرد میکروبی هم‌زمان در خاک‌های شور کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، تنش شوری با غیرفعال یا از بین بردن بخشی از میکروفلور خاک تأثیر مخربی بر شاخص‌های میکروبی کیفیت خاک داشته است. این درحالی است که افزودن بهساز آلی فراوانی جمعیت میکروبی (۱۵۲ درصد)، پروتوزوآها (۱۱۰ درصد) و نماتدهای (۱۵۲ درصد) خاک را افزایش داد (شکل ۲ و ۳).

کاربرد مواد بهساز با افزایش SOC و همچنین DOC (شکل ۱) که به‌عنوان بخش کربن ناپایدار و منبع انرژی قابل دسترس برای متابولیسم میکروبی مورد استفاده قرار می‌گیرد، موجب افزایش فراوانی و فعالیت جمعیت میکروبی خاک می‌شود (١٤). همچنین، با توجه به اینکه بیوچار ظرفیت نگه‌داری آب و میزان رطوبت خاک را بهبود می‌بخشد، ممکن است به رقیق‌شدن غلظت نمک در محلول خاک و در نتیجه کاهش فشار اسمزی کمک کند. بنابراین، به‌طور غیرمستقیم فراوانی و فعالیت جمعیت میکروبی خاک را افزایش دهد (۷ و ۲۵). کاربرد باگاس خام بیشتر از بیوچارهای تهیه شده از آن موجب افزایش فراوانی جمعیت میکروبی، پروتوزوآها و نماتدهای خاک شد (شکل ۲ و ۳). با افزایش دمای گرماکافت و کاهش مواد آلی ساده قابل دسترس برای جمعیت میکروبی، زیست‌توده میکروبی نیز کاهش یافته (جدول ۲) و به تبع آن با کاهش فراوانی میکروبی مواد غذایی قابل دسترس برای پروتوزوآها و نماتدهای خاک نیز کاهش و از این‌رو فراوانی آنها کم شده است. همچنین با افزایش دمای گرماکافت و افزایش درصد تخلخل ریز بیوچار، میکروب‌های خاک با اندازه کوچک‌تر در این منافذ مستقر شده و از دسترس نماتدها و پروتوزوآها خارج شده، بنابراین تغذیه این جانداران تحت تأثیر قرار می‌گیرد (١٤). در این پژوهش همبستگی مثبت و معنی‌دار ($P < ۰/۰۱$) بین تنفس قارچی و فراوانی نماتدها ($r= ۰/۷۳$) و پروتوزوآها ($r= ۰/۷۵$) مشاهده شد که به نوعی بر قارچ‌خوار بودن نماتدها و پروتوزوآهای خاک دلالت دارد.

فعالیت آنزیمی خاک تا اندازه‌ای سرعت و شدت فعالیت میکروبی یا کاتابولیکی خاک را نشان می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد بیوچار در خاک آلوده به کادمیم و با سطوح مختلف شوری موجب افزایش فعالیت آنزیمی خاک می‌شود (جدول ۳ و ٤). اثر متقابل دو عامل آزمایش بر همه آنزیم‌ها به‌جز CAT معنی‌دار ($P<۰/۰۰۱$) شد (جدول ۳ و ٤). از شش آنزیم اندازه‌گیری شده در این پژوهش سه آنزیم جزء آنزیم‌های برون سلولی و اختصاصی خاک (شامل URE، ARY و ALP) هستند که به‌ترتیب در چرخه‌های نیتروژن، گوگرد و فسفر دخالت دارند و دو آنزیم دیگر (شامل DEH و CAT) جزء آنزیم‌های درون سلولی و عمومی خاک هستند و FDA که




**شکل ۲. برهم‌کنش شوری سدیم کلرید (غیرشور، شوری متوسط و شوری بالا به‌ترتیب شاهد، ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار سدیم کلرید) و بیوچار (شاهد منفی، بقایای خام باگاس نیشکر به‌عنوان شاهد مثبت و بیوچارهای فرآوری‌شده در دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) بر فراوانی جمعیت میکروبی (الف) و پروتوزآهای (ب) خاک. میانگین‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون Tukey در سطح ۵ درصد هستند. خطوط عمودی خطای استاندارد (SE) هستند.**




**شکل ۳. برهم‌کنش شوری سدیم کلرید (غیرشور، شوری متوسط و شوری بالا به‌ترتیب شاهد، ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار سدیم کلرید) و بیوچار (شاهد منفی، بقایای خام باگاس نیشکر به‌عنوان شاهد مثبت و بیوچارهای فرآوری‌شده در دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) بر فراوانی نماتدهای خاک. میانگین‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون Tukey در سطح ۵ درصد هستند. خطوط عمودی خطای استاندارد (SE) هستند (رنگی در نسخه الکترونیکی).**

فعالیت هیدرولیتیک خاک را نشان می‌دهد و برای ارزیابی فعالیت طیف گسترده‌ای از آنزیم‌ها (شامل استرازها، پروتئازها و لیپازها) مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۳). نتایج این پژوهش نشان داد که تنش ناشی از کاربرد نمک سدیم کلرید موجب کاهش فعالیت آنزیم URE (۲۳-۸ درصد)، ARY (۴۲-۲۵ درصد)، ALP (۳-۲ درصد)، DEH (۱۷-۶ درصد) و FDA (۳۳-۱۹ درصد) در مقایسه با شاهد (خاک غیرشور) شد (جدول ٤). در خاک‌های آلوده به فلزات سمی، افزایش سطوح شوری نه تنها با تغییر ترکیب جمعیت میکروبی (جدول ۲، ۳، شکل ۲ و ۳) و به دنبال آن تأثیر بر سنتز و تولید آنزیم موجب کاهش فعالیت آنزیمی خاک می‌شود (جدول ۳ و ٤) بلکه با افزایش حلالیت، تحرک و فراهمی فلزات سمی (شکل ۱) موجب تشدید سمیت آنها می‌شود که کاهش جمعیت میکروبی و فعالیت آنزیمی خاک را به همراه دارد (جدول ۲، ۳، ٤، شکل ۲ و۳). فلزات سمی به‌طور مستقیم با ایجاد کمپلکس با بستره مورد نیاز آنزیم و خارج کردن بستره از دسترس آنها، برهم‌کنش با کمپلکس آنزیم- بستره، تغییر شکل پروتئین آنزیم و برهم‌کنش با محل فعال آنزیم سبب کاهش فعالیت آنزیم و عمل کاتالیزوری آنها می‌شود (۳۱). از سوی دیگر فلزات سمی با تغییر در فراوانی، تنوع و فعالیت جمعیت میکروبی تولیدکننده آنزیم به‌طور غیر مستقیم فعالیت آنزیمی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۳۱). درحالی‌که افزودن مواد بهساز به خاک به کاهش اثرات منفی ناشی از شوری و آلودگی خاک کمک می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن بیوچار باگاس نیشکر به خاک آلوده به کادمیم موجب افزایش فعالیت آنزیم URE در تیمارهای S0، S2 و S4 به‌ترتیب ۷۰-۶۳، ۷۸-۵٦ و ۱۰۵-۸۰ درصد در مقایسه با شاهد (خاک بدون کاربرد بهساز آلی) شد (جدول ٤). علاوه بر این نتایج نشان داد که در تمام سطوح شوری کاربرد بیوچار ٤۰۰ درجه سلسیوس (۱۰۵-۷۰ درصد) بیشتر از بیوچار ٦۰۰ درجه سلسیوس (۸۰-۵٦ درصد) فعالیت این آنزیم را افزایش داد. همچنین، افزایش فعالیت آنزیم ARY در تیمار باگاس خام (۲۵۹-۱۷۰ درصد) و بیوچار (۱۸۲-۷۹ درصد) در مقایسه با شاهد (خاک بدون کاربرد بهساز آلی) مشاهده شد (جدول ٤) و بیشترین فعالیت این آنزیم در تیمار باگاس خام (۲۵۹ درصد) در سطح شوری S4 مشاهده شد. همچنین، نتایج نشان داد که کاربرد باگاس خام (۱۵۱-۸٦ درصد) بیشتر از بیوچار (۳۹-۱٦ درصد) فعالیت آنزیم ALP را افزایش داد (جدول ٤) و افزایش فعالیت این آنزیم در تیمار بیوچار ٤۰۰ درجه سلسیوس (۳۹-۱۷درصد) بیشتر از بیوچار ٦۰۰ درجه سلسیوس (۲۳-۱٦ درصد) در تمام سطوح شوری بود. نتایج جدول ٤ افزایش میزان فعالیت آنزیم DEH با کاربرد باگاس نیشکر (۱٦۸-۱۵٤ درصد) و بیوچار (۱٤٦-۱۰۸ درصد) در مقایسه با شاهد (خاک بدون کاربرد بهساز آلی) را نشان داد (جدول ٤). بیشترین فعالیت این آنزیم در تیمار باگاس خام (۱٦۸ درصد) و بیوچار ٤۰۰ درجه سلسیوس (۱٤٦ درصد) در سطح شوری S4 مشاهده شد (جدول ٤). میزان FDA با کاربرد بیوچار ۸۲-٦۱، ۹۸-٦۳ و ۱۲۳-۵۵ درصد به‌ترتیب در تیمارهای S0، S2 و S4 در مقایسه با شاهد (خاک بدون کاربرد بهساز آلی) افزایش یافت (جدول ٤). کاربرد باگاس خام (۱۳٤-۱۰۰ درصد) بیشتر از بیوچار (۱۲۳-۵۵ درصد) میزان FDA را افزایش داد. همچنین نتایج (جدول ۳) نشان داد که شوری فعالیت آنزیم CAT (۵ درصد) را نیز کاهش داد و افزودن مواد بهساز موجب افزایش فعالیت این آنزیم (۱٤ درصد) شد. کاربرد باگاس خام و بیوچارهای تهیه شده از آن، مقادیر قابل توجهی از آنزیم‌ها و کوفاکتورهای ضروری (به‌عنوان مثال، یون‌های فلزی مانند Fe، Zn، Cu و Mg) (جدول ۱) به خاک اضافه کرده که موجب افزایش فعالیت آنزیمی در خاک‌های تیمار شده با بهساز آلی می‌شود. علاوه بر این، کاربرد بهساز آلی با تأمین بخشی از نیاز غذایی میکروب‌ها و افزودن ترکیبات سهل‌الوصول به‌خصوص انواع کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها موجب تحریک فراوانی جمعیت هتروتروف خاک شده و در نتیجه فعالیت میکروبی و تولید آنزیم افزایش می‌یابد (٦، ۱٤، ۲۹ و ۳۱). در مجموع یافته‌های این پژوهش نشان داد که

**جدول ٤. تأثیر تیمارهای آزمایشی بر فعالیت آنزیم‌های خاک. اعداد میانگین (n=۳) به‌همراه خطای استاندارد (SE) هستند.**

| مواد بهساز | تیمار شوری | | | خلاصه تجزیه واریانس | |
|---|---|---|---|---|---|
| | غیرشور | شوری متوسط | شوری بالا | منابع تغییرات | آمارهP |
| | | | فعالیت اوره‌آز ($\mu mol\ NH_4\text{-}N\ g^{-1}\ h^{-1}$) | | |
| شاهد | ۲/۵±۰/۰۲$^{f}$ | ۲/۳±۰/۰۱$^{g}$ | ۱/۹±۰/۰۳$^{h}$ | شوری | <۰/۰۰۱ |
| باگاس نیشکر | ٤/۷±۰/۰۳$^{a}$ | ٤/۵±۰/۰۱$^{b}$ | ۳/۹±۰/۰۱$^{d}$ | بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۴۰۰ °C | ٤/۲±۰/۰۲$^{c}$ | ٤/۰±۰/۱۳$^{d}$ | ۳/۹±۰/۰۲$^{d}$ | شوری×بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۶۰۰ °C | ٤/۰±۰/۰۳$^{d}$ | ۳/۵±۰/۰۱$^{e}$ | ۳/٤±۰/۰۱$^{e}$ | | |
| | | | فعالیت آریل سولفاتاز ($\mu mol\ PNP\ g^{-1}\ h^{-1}$) | | |
| شاهد | ۲/٤±۰/۱۱$^{g}$ | ۱/۸±۰/۰۳$^{h}$ | ۱/٤±۰/۰۷$^{i}$ | شوری | <۰/۰۰۱ |
| باگاس نیشکر | ٦/٤±۰/۱۱$^{a}$ | ۵/٤±۰/۰۳$^{b}$ | ٤/۹±۰/۱۳$^{c}$ | بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۴۰۰ °C | ٤/۸±۰/۰٤$^{c}$ | ۳/۵±۰/۰۹$^{f}$ | ۳/۲±۰/۰٦$^{f}$ | شوری×بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۶۰۰ °C | ٤/۲±۰/۰۵$^{d}$ | ٤/۰±۰/۰۳$^{de}$ | ۳/۹±۰/۰۳$^{e}$ | | |
| | | | فعالیت فسفومنواستراز قلیایی ($\mu mol\ PNP\ g^{-1}\ h^{-1}$) | | |
| شاهد | ۹/۸±۰/۲$^{f}$ | ۹/٦±۰/۲$^{f}$ | ۹/۵±۰/۰۳$^{f}$ | شوری | <۰/۰۰۱ |
| باگاس نیشکر | ۲٤/۵±۰/۵$^{a}$ | ۲۰/۳±۰/۲$^{b}$ | ۱۷/٦±۰/۵$^{c}$ | بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۴۰۰ °C | ۱۳/۵±۰/۲$^{d}$ | ۱۱/٦±۰/٤$^{e}$ | ۱۱/۱±۰/۳$^{e}$ | شوری×بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۶۰۰ °C | ۱۲/۰±۰/٤$^{e}$ | ۱۱/٤±۰/۲$^{e}$ | ۱۱/۰±۰/۲$^{e}$ | | |
| | | | فعالیت دهیدروژناز ($\mu mol\ TPF\ g^{-1}\ h^{-1}$) | | |
| شاهد | ۰/۱٦۷±۰/۰۰۱$^{i}$ | ۰/۱۵٦±۰/۰۰۱$^{j}$ | ۰/۱۳۸±۰/۰۰۱$^{k}$ | شوری | <۰/۰۰۱ |
| باگاس نیشکر | ۰/٤۱۰±۰/۰۰۱$^{a}$ | ۰/٤۰۱±۰/۰۰۱$^{b}$ | ۰/۳۷۱±۰/۰۰۱$^{c}$ | بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۴۰۰ °C | ۰/۳٦۹±۰/۰۰۱$^{c}$ | ۰/۳۵۹±۰/۰۰۲$^{d}$ | ۰/۳٤۰±۰/۰۰۱$^{f}$ | شوری×بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۶۰۰ °C | ۰/۳٤۸±۰/۰۰۱$^{e}$ | ۰/۳۳٤±۰/۰۰۱$^{g}$ | ۰/۳۲٦±۰/۰۰۱$^{h}$ | | |
| | | | هیدرولیز فلوروسین دی استات ($\mu mol\ Fluorescein\ g^{-1}\ h^{-1}$) | | |
| شاهد | ۰/۱٦۳±۰/۰۰۲$^{f}$ | ۰/۱۳۲±۰/۰۰۲$^{g}$ | ۰/۱۰۹±۰/۰۰۱$^{h}$ | شوری | <۰/۰۰۱ |
| باگاس نیشکر | ۰/۳۲۷±۰/۰۰۲$^{a}$ | ۰/۲۹۹±۰/۰۰۲$^{b}$ | ۰/۲۵۵±۰/۰۰۱$^{c}$ | بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۴۰۰ °C | ۰/۲۹٦±۰/۰۰۱$^{b}$ | ۰/۲٦۲±۰/۰۰۱$^{c}$ | ۰/۲٤۳±۰/۰۰۲$^{d}$ | شوری×بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۶۰۰ °C | ۰/۲٦۲±۰/۰۰۳$^{c}$ | ۰/۲۱٦±۰/۰۰۳$^{e}$ | ۰/۱٦۹±۰/۰۰۳$^{f}$ | | |
| | | | میانگین هندسی فعالیت آنزیمی | | |
| شاهد | ۱/۲±۰/۰۱$^{i}$ | ۱/۱±۰/۰۱$^{j}$ | ۱/۰±۰/۰۱$^{k}$ | شوری | <۰/۰۰۱ |
| باگاس نیشکر | ۲/٦±۰/۰۱$^{a}$ | ۲/٤±۰/۰۱$^{b}$ | ۲/۱±۰/۰۲$^{c}$ | بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۴۰۰ °C | ۲/۱±۰/۰۱$^{d}$ | ۱/۸±۰/۰۳$^{f}$ | ۱/۸±۰/۰۱$^{g}$ | شوری×بیوچار | <۰/۰۰۱ |
| بیوچار ۶۰۰ °C | ۱/۹±۰/۰۱$^{e}$ | ۱/۸±۰/۰۱$^{g}$ | ۱/۷±۰/۰۱$^{h}$ | | |

غیرشور، شوری متوسط و شوری بالا به‌ترتیب شاهد، ۲۰ و ٤۰ میلی‌مولار سدیم کلرید. میانگین‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار بر اساس آزمون **Tukey** در سطح ۵ درصد هستند.

افزودن بیوچار باگاس نیشکر به خاک با کاهش حلالیت و فراهمی فلزات سمی، افزایش مواد آلی، افزایش فراوانی و فعالیت گروه‌های مختلف میکروبی موجب افزایش فعالیت آنزیمی خاک می‌شود. در هماهنگی با نتایج این پژوهش سایر مطالعات نیز تأثیر مثبت بیوچارهای مختلف بر زیست‌توده و فعالیت میکروبی و آنزیمی در خاک‌های آلوده به فلزات سمی (٦، ١٨ و ٣١) و شور (٧ و ٢٥) را گزارش کردند. همچنین، در بیوچار با دمای بالا از سهولت دسترسی ترکیبات کربن‌دار و قابل مصرف آن برای ریزجانداران خاک کاسته شده و با تغییر فراوانی جمعیت میکروبی سنتز، تولید و فعالیت آنزیمی در خاک‌های تیمار شده با این بیوچارها کاهش می‌یابد. علاوه بر این، بیوچار تهیه شده در دمای بالا با داشتن سطح ویژه زیاد، خلل و فرج ریز فراوان و گروه‌های عامل سطحی آن (١٥ و ١٦) نه‌تنها موجب تثبیت و نگه‌داری (به‌طور فیزیکی و شیمیایی) آنزیم می‌شود بلکه مقدار زیادی بستره را جذب سطحی کرده و قابلیت دسترسی بستره‌های محلول را کاهش داده و از فعالیت آنزیمی ممانعت می‌نماید (١٥).

درنهایت برای بررسی اثر تیمارها بر فعالیت آنزیم‌های خاک GME به‌عنوان شاخصی برای همسان‌سازی و خلاصه کردن فعالیت‌های آنزیم‌هایی که دامنه و واحد فعالیت متفاوت دارند، استفاده شد (٢٠). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ٤) نشان داد تیمارهای آزمایش تأثیر معنی‌دار (P<٠/٠٠١) بر GME داشتند. به‌طور کلی GME در تیمارهای باگاس خام، بیوچارهای ٤٠٠ و ٦٠٠ درجه سلسیوس در تیمارS0 به‌ترتیب ١١٠، ٦٨ و ٥٤ درصد، در تیمار S2 به‌ترتیب ١١٧، ٦٩ و ٦٠ درصد و در تیمار S4 به‌ترتیب ١٢٣، ٨٣ و ٧٢ درصد بیشتر از شاهد (خاک بدون کاربرد بهساز آلی) بود (جدول ٤). کاربرد باگاس خام (١٢٣ درصد) بیشتر از بیوچار (٨٣-٥٤ درصد)، و بیوچار ٤٠٠ درجه سلسیوس (٨٣-٦٨ درصد) بیشتر از بیوچار ٦٠٠ درجه سلسیوس (٧٢-٥٤ درصد) موجب افزایش GME شد. این شاخص افزایش کیفیت خاک را با افزودن باگاس خام و بیوچارهای تهیه شده از آن را نشان می‌دهد. همچنین، همبستگی مثبت و معنی‌دار بین شاخص GME و زیست‌توده میکروبی (P< ٠/٠١، r= ٠/٩٦) منشأ میکروبی آنزیم‌های خاک را تأیید می‌کند. از طرفی همبستگی مثبت کربن آلی خاک و شاخص GME (P< ٠/٠١، r= ٠/٦٦) نشان می‌دهد که با افزودن بهساز آلی و فراهمی بستره، آنزیم‌های برون سلولی به مقدار زیاد ترشح می‌شوند. نتایج این پژوهش این فرضیه را که افزایش ماده آلی خاک و جزء کربن ناپایدار با افزایش فراوانی میکروبی و تولید آنزیم همراه است را تأیید می‌کند.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش جامعه میکروبی خاک در معرض تنش مستقیم ناشی از شوری و تنش غیرمستقیم افزایش سمیت کادمیم ناشی از شوری قرار گرفت. اثرات هم‌زمان تنش‌های آلودگی کادمیم و شوری موجب کاهش فعالیت، فراوانی و رشد جامعه میکروبی و فعالیت آنزیمی خاک شد. درحالی که مصرف بیوچار باگاس نیشکر به‌عنوان یکی از راهکارهای مدیریت بقایای گیاهی با ایجاد کمپلکس و یا از طریق تبادل کاتیونی با کادمیم و کاهش غلظت قابل‌دسترس آن، افزایش سطح مواد آلی خاک و فراهمی سوبسترای مورد نیاز جامعه میکروبی پتانسیل بالایی در تعدیل اثر هم‌زمان آلودگی کادمیم و تنش شوری را نشان می‌دهد و می‌تواند یک جامعه میکروبی با فعالیت بالا، تولید زیست‌توده و آنزیم در این خاک‌ها ایجاد کند. نتایج حاکی است که کاربرد مواد بهساز آلی با تأثیر مستقیم (افزایش سوبسترای قابل دسترس) و غیرمستقیم (کاهش سمیت فلزات سمی) خود در خاک‌های آلوده به فلزات سمی و شور نقش بسیار مهمی در کاهش آثار منفی این تنش‌ها بر جامعه میکروبی

خاک دارد. در واقع، اهمیت نقش تغذیه‌ای و زیست‌محیطی بیوچار باگاس نیشکر برای جامعه میکروبی و کیفیت خاک‌های آلوده به فلز و تحت تنش شوری را نشان می‌دهد. بنابراین، استفاده از این ماده بهساز برای ترسیب بلندمدت کربن خاک و افزایش مواد آلی خاک‌های تحت تنش آلودگی و شوری که سطح مواد آلی آنها بحرانی است، ضروری است. یافته‌های این مطالعه حاکی است که هنگام ارزیابی و تعیین پتانسیل خطر اکولوژیکی کادمیم برای جامعه میکروبی و جانوری و نیز شاخص‌های زیستی خاک در مناطق آلوده مبتلا به شوری ثانویه، اثر شوری و بیوچار بر زیست‌فراهمی و سمیت کادمیم باید مد نظر قرار گیرد.

**سپاسگزاری**

بدین‌وسیله از دانشگاه شهرکرد به خاطر حمایت‌های مالی این پژوهش قدردانی می‌شود.

## منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, A., M. Kalbasi, S. Hajrasuliha and A. Fotovat. 2008. Effect of organic matter and salinity on ethylenediaminetetraacetic acid–extractable and solution species of cadmium and lead in three agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 39(7-8): 983-1005.
2. Acosta, J. A., B. Jansen, K. A. Kalbitz Faz and S. Martinez-Martinez. 2011. Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere* 85(8): 1318-1324.
3. Alef, K. and P. Nannipieri. 1995. Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry, Academic Press, London.
4. Ananyeva, N. D., E. A. Susyan, O. V. Chernova, I. Y. Chernove and O. L. Makarova. 2006. The ratio of fungi and bacteria in the biomass of different types of soil determined by selective inhibition. *Microbiology* 75(6): 702-707.
5. Anderson, T. H. and K. H. Domsch. 2010. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach. *Soil Biology and Biochemistry* 42(12): 2039-2043.
6. Bashir, S., Q. Hussain, M. Akmal, M. Riaz, H. Hu, S. S. Ijaz, M. Iqbal, S. Abro, S. Mehmood and M. Ahmad. 2018. Sugarcane bagasse-derived biochar reduces the cadmium and chromium bioavailability to mash bean and enhances the microbial activity in contaminated soil. *Journal of Soils and Sediments* 18(3): 874-886.
7. Bhaduri, D., A. Saha, D. Desai and H. N. Meena. 2016. Restoration of carbon and microbial activity in salt-induced soil by application of peanut shell biochar during short-term incubation study. *Chemosphere* 148: 86-98.
8. Brunauer, S., P. H. Emmett and E. Teller. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society* 60(2): 309-319.
9. Corre, M. D., R. R. Schnabel and J. A. Shaffer. 1999. Evaluation of soil organic carbon under forests, cool-season and warm-season grasses in the northeastern US. *Soil Biology and Biochemistry* 31(11): 1531-1539.
10. Crombie, K., O. Masek, S. P. Sohi, P. Brownsort and A. Cross. 2013. The effect of pyrolysis conditions on biochar stability as determined by three methods. *Global Change Biology Bioenergy* (GCB) 5(2): 122-131.
11. Ghallab, A. and A. R. A. Usman. 2007. Effect of sodium chloride-induced salinity on phyto-availability and speciation of Cd in soil solution. *Water, Air, and Soil Pollution* 185(1-4): 43-51.
12. Gooris, J. and C. J. d'Herde.1972. A method for the quantitative extraction of eggs and second stage juveniles of meloidogyne spp from soil. State Nematology and Entomology Research Station, Merelbeke, Belgium.
13. Green, V. S., D. E. Stott and M. Diack. 2006. Assay for fluorescein diacetate hydrolytic activity: optimization for soil samples. *Soil Biology and Biochemistry* 38(4): 693-701.
14. Khadem, A. and F. Raiesi. 2017. Responses of microbial performance and community to corn biochar in calcareous sandy and clayey soils. *Applied Soil Ecology* 114: 16-27.
15. Khadem, A. and F. Raiesi. 2017. Influence of biochar on potential enzyme activities in two calcareous soils of contrasting texture. *Geoderma* 308: 149-158.
16. Lehmann, J., M. C. Rillig, J. Thies, C. A. Masiello, W. C. Hockaday and D. Crowley. 2011. Biochar effects on soil biota – a review. *Soil Biology and Biochemistry* 43(9): 1812-1836.
17. Lindsay, W. L. and W. A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42(3): 421-428.
18. Nie, C., X. Yang, N. K. Niazi, X. Xu, Y. Wen, J. Rinklebe, Y. S. Ok, S. Xu and H. Wang. 2018. Impact of sugarcane bagasse-derived biochar on heavy metal availability and microbial activity: a field study. *Chemosphere*

200: 274-282.
19. Ondrasek, G., Z. Rengel, D. Romic and R. Savic. 2012. Salinity decreases dissolved organic carbon in the rhizosphere and increases trace element phyto-accumulation. *European Journal of Soil Science* 63(5): 685-693.
20. Paz-Ferreiro, J., G. Gascó, B. Gutiérrez and A. Méndez. 2012. Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil. *Biology and Fertility of Soils* 48(5): 511-517.
21. Raiesi, F. and E. Sadeghi. 2019. Interactive effect of salinity and cadmium toxicity on soil microbial properties and enzyme activities. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 168: 221-229.
22. Rietz, D. and R. Haynes. 2003. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry* 35(6): 845-854.
23. Saifullah, D. S., A. Naeem, Z. Rengel and R. Naidu. 2018. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment* 625: 320-335.
24. Singh, K. 2016. Microbial and enzyme activities of saline and sodic soils. *Land Degradation and Development* 27(3): 706-718.
25. Singh, R., M. S. Mavi and O. P. Choudhary. 2019. Saline soils can be ameliorated by adding biochar generated from rice-residue waste. *Clean Soil Air Water* 47(2): 1700656.
26. Suliman, W., J. B. Harsh, N. I. Abu-Lail, A. M. Fortuna, I. Dallmeyer and M. Garcia-Perez. 2016. Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties. *Biomass Bioenergy* 84: 37-48.
27. Trasar-Cepeda, C., F. Camiña, M. C. Leirós and F. Gil-Sotres. 1999. An improved method to measure catalase activity in soils. *Soil Biology and Biochemistry* 31(3): 483-485.
28. Uchimiya, M., S. Chang and K. T. Klasson. 2011. Screening biochars for heavy metal retention in soil: Role of oxygen functional groups. *Journal of Hazardous Materials* 190 (1-3): 432-441.
29. Wang, M., S. Chen, L. Chen and D. Wang. 2019. Responses of soil microbial communities and their network interactions to saline-alkaline stress in Cd-contaminated soils. *Environmental Pollution* 252: 1609-1621.
30. Wang, X., W. Zhang, Y. Shao, J. Zhao, L. Zhou, X. Zou and S. Fu. 2019. Fungi to bacteria ratio: Historical misinterpretations and potential implications. *Acta Oecologica* 95: 1-11.
31. Xu, Y., B. Seshadri, B. Sarkar, H. Wang, C. Rumpel, D. Sparks, M. Farrell, T. Hall, X. Yang and N. Bolan. 2018. Biochar modulates heavy metal toxicity and improves microbial carbon use efficiency in soil. *Science of the Total Environment* 621: 148-159.
32. Yang, H. P., R. Yan, T. Chin, D. T. Liang, H. P. Chen and C. G. Zheng. 2004. Thermogravimetric analysis - Fourier transform infrared analysis of palm oil wastes pyrolysis. *Energy and Fuels* 18(6): 1814-1821.
33. Zahedifar, M. and A. A. Moosavi. 2020. Assessing cadmium availability of contaminated saline-sodic soils as influenced by biochar using the adsorption isotherm models. *Archives of Agronomy and Soil Science* 66(12): 1735-1752.
34. Zhang, C., P. W. G. Sale and C. Tang. 2016. Cadmium uptake by Carpobrotus rossii (Haw.) Schwantes under different saline conditions. *Environmental Science and Pollution Research* 23(13): 13480-13488.

**Journal of Water and Soil Science**
**Vol. 26, No. 1, Spring 2022, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.**

# Responses of Some Soil Bioindicators to the Interaction Between Sugarcane Bagasse Biochar and Salinity Stress in a Cadmium-Polluted Soil

**N. Azadi[*1] and F. Raiesi[1]**

(Received: March 1-2021; Accepted: June 23-2021)

## Abstract

Biochar as an efficient strategy for the improvement of soil properties and organic waste management may reduce the potential effects of abiotic stresses and increase soil fertility. However, the effects of this organic amendment on soil microbial indicators under combined salinity and pollution have not been studied yet. Therefore, the objective of this study was to evaluate the influence of sugarcane bagasse biochar on some soil bioindicators in a Cd-polluted soil under saline and non-saline conditions. A factorial experiment was carried out with two factors, including NaCl salinity (control, 20 and 40 m*M* NaCl) and sugarcane bagasse biochar (soils unamended with biochar, amended with uncharred bagasse, 400 $^{o}$C biochar, and 600 $^{o}$C) at 1% (w/w) using a completely randomized design. Results showed that salinity increased the mobility of Cd (12-17%), and subsequently augmented its toxicity to soil microorganisms as indicated by significant decreases in the abundance and activities of the soil microbial community. Conversely, sugarcane bagasse biochar application reduced the concentration of soil available Cd (14-18%), increased the contents of soil organic carbon (89-127%), and dissolved organic carbon (4-70%), and consequently alleviated the effect of both abiotic stresses on soil microbial community and enzyme activity. In conclusion, this experiment demonstrated that the application of sugarcane bagasse biochar could reduce the salinity-induced increases in available Cd and mitigate the interaction between salinity and Cd pollution on the measured soil bioindicators.

**Keywords**: Cadmium toxicity, Biochar, Salinity stress, Soil microbial community, Pyrolysis temperature, Soil enzyme activity

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
*: Corresponding author, Email: nahidazadi93@gmail.com