

پیامد زغال زیستی اصلاح شده ذرت بر برخی ویژگی‌های زیستی یک خاک آهکی آلوده به کادمیوم

* ندا مرادی^۱ و اکبر کریمی^۲

^۱ استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهید چمران اهواز
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۳۰

چکیده

سابقه و هدف: انباشتگی فلزهای سنگین در سال‌های گذشته بسته به کارکرد مردم روبه افزایش است. ریزجانداران خاک از بخش‌های مهم خاک بوده که کارکرد آن‌ها وابسته به زهری بودن فلزهای سنگین مانند کادمیوم است. فراسنجه‌های میکروبی می‌توانند برای ارزیابی کیفیت خاک‌های آلوده به کار روند. زغال زیستی همانند یک بهساز خاک می‌تواند با نشان بر زیست‌فراهمی فلزهای سنگین در خاک‌های آلوده، آسیب رسیدن آن‌ها به زنجیره خوراکی مردم را کاهش دهد. هدف از این پژوهش بررسی نشان زغال زیستی و زغال زیستی بهسازی شده ذرت بر فراهمی کادمیوم و دگرش ویژگی‌های زیستی یک خاک آلوده به کادمیوم بود.

مواد و روش‌ها: یک نمونه خاک روئین از لایه ۲۰-۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری شد، سپس با غلظت‌های گوناگون کادمیوم $(Cd(NO_3)_2)$ آلوده شد. خاک آلوده برای پنج ماه در تناوب‌های تر و خشک شدن گذاشته شد. زغال‌های زیستی مانده‌های ذرت (BC) و مانده‌های ذرت بهسازی شده با کلرید آهن (Fe-BC) در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس آماده شدند و در اندازه ۲ درصد وزنی با نمونه خاک آمیخته شدند. نمونه‌ها برای ۹۰ روز در ظرف‌های پلاستیکی منفذدار، در انکوباتور و در دمای ثابت (25 ± 2) ، نگهداری شدند. در پایان آزمایش برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک، غلظت فراهم کادمیوم و برخی ویژگی‌های زیستی خاک مانند تنفس میکروبی، تنفس برانگیخته با سوبسترا و کربن زیست‌توده میکروبی اندازه‌گیری شدند و بهره متابولیک (qCO_2) تعیین شد. این پژوهش به‌گونه آزمایش فاکتوریل، با دو فاکتور: آلودگی کادمیوم در سه اندازه صفر، ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک) و چگونگی زغال زیستی در سه تیمار بدون کاربرد زغال زیستی یا گواه آزمایش (CK)، زغال زیستی مانده‌های ذرت (BC) و زغال زیستی مانده‌های ذرت بهسازی شده با کلرید آهن (Fe-BC)، در چهارچوب طرح کاملاً تصادفی، در سه تکرار و در دمای آزمایشگاهی انجام شد.

یافته‌ها: این پژوهش نشان داد که افزودن زغال زیستی و زغال زیستی بهسازی شده سبب افزایش pH خاک (به‌ترتیب ۰/۱۹ و ۰/۲۱ واحد)، گنجایش تبادل کاتیونی (۶/۷ و ۱۰/۹ درصد) و کربن آلی خاک (۱۵۷ و ۲۰۰ درصد) و کاهش غلظت فراهم کادمیوم در خاک (۲۱/۸ تا ۴۱/۵ درصد) شد. روی هم‌رفته، آلودگی کادمیوم در خاک سبب کاهش معنی‌دار ($P < 0/05$) ویژگی‌های زیستی خاک شد. کاربرد زغال زیستی و زغال زیستی بهسازی شده تنفس میکروبی

* مسئول مکاتبه: n.moradi@scu.ac.ir

پایه (۲۴/۷-۵۸/۷٪)، تنفس برانگیخته با سوبسترا (۱۶/۸-۴۲/۵٪)، کربن زیست توده میکروبی (۲۴/۵-۵۸/۶٪) و کارکرد آنزیم دهیدروژناز (۲۸/۲-۱۰۸٪) را به گونه معنی داری ($P < 0.05$) افزایش داد. نشان تیمار Fe-BC بر دگرش فراهمی کادمیوم و ویژگی های زیستی خاک بیش تر از نشان تیمار BC بود.

نتیجه گیری: روی هم رفته، یافته های این پژوهش نشان داد که زغال زیستی ذرت بهسازی شده با کلرید آهن می تواند بهسازی آلی شایسته ای برای تثبیت کادمیوم در خاک و بهبود کارکرد میکروبی در خاک های آهنی آلوده به کادمیوم باشد.

واژه های کلیدی: آلودگی کادمیوم، بهسازی زغال زیستی، جاذب آلی، زیست توده میکروبی، کارکرد دهیدروژناز

مقدمه

گسترش و پیشرفت صنعت در دهه های گذشته و افزایش کارکردهای مردمی مانند استخراج معادن، بهره گیری از فاضلاب ها و پساب های خانگی و صنعتی در کشاورزی سبب افزایش آلودگی خاک ها به فلزهای سنگین شده است (۶). آلودگی فلزهای سنگین در خاک، تهدیدی برای کیفیت و بهداشت خاک و فراورده های کشاورزی به شمار می رود (۱۸). کادمیوم یکی از زهری ترین فلزهای سنگین است که در خاک جنبش بالایی دارد و می تواند نشانی بازدارنده بر کارکرد گیاهان و ریزجانداران خاک داشته باشد (۳۵).

ریزجانداران خاک مهم ترین بخش زنده خاک بوده که نقش بسیار مهمی در بسیاری از فرآیندهای خاک مانند تجزیه مواد آلی، چرخه کربن و عناصر غذایی و رشد و کارکرد گیاهان دارند (۴۲). بنابراین، بررسی کارکرد میکروبی خاک یکی از شاخص های مهم در ارزیابی کیفیت و بهداشت خاک می باشد (۹ و ۳۹). ریزجانداران خاک به شرایط تنش فلزهای سنگین حساس بوده و کارکرد میکروبی خاک وابسته به آلودگی فلزهای سنگین قرار می گیرد. در حالی که در این شرایط دگرش چندانی در میزان مواد آلی خاک دیده نمی شود، اما الگوی کاربرد کربن توسط

ریزجانداران خاک ممکن است دگرش کند (۳۹). بنابراین از شاخص های زیستی مانند تنفس میکروبی، کربن زیست توده میکروبی (MBC) و کارکرد آنزیمی جهت ارزیابی کارکرد ریزجانداران در خاک های آلوده به فلزهای سنگین بهره گیری می شود (۳۹). دهیدروژناز از جمله آنزیم های درون یاخته ای بوده که در فرآیندها و کارکرد ریزجانداران خاک نقش بسیار مهمی دارد. فعالیت این آنزیم نشان دهنده شدت فرآیندهای میکروبی خاک بوده و شاخص مناسبی برای ارزیابی پیامد کاربرد زغال زیستی و همچنین آلودگی فلزهای سنگین بر فعالیت میکروبی خاک می باشد (۱۷ و ۳۹).

در سال های گذشته به کاربرد بهسازی های آلی مانند زغال زیستی برای تثبیت فلزهای سنگین در خاک نگاه ویژه ای شده است (۱۸ و ۴۱). زغال زیستی یک ماده بسیار پرسوراخ، پوک و سرشار از کربن است که از گرماکافت زیست توده ها در دماهای گوناگون و بدون اکسیژن یا اکسیژن اندک فرآوری می شود (۱۷ و ۴۰). یافته های بسیاری از پژوهش ها نشان داده است که زغال زیستی با داشتن ساختار پرسوراخ می تواند همانند جاذب آلاینده های آلی و فلزهای سنگین در پالایش خاک ها و آب های آلوده بسیار کارا باشد (۳۳، ۳۶ و ۳۸). بهسازی شیمیایی زغال زیستی سبب

پژوهشگران گزارش کردند افزودن زغال زیستی به خاک سبب افزایش فعالیت میکروبی خاک می‌شود (۲، ۱۲ و ۳۲)، اما برخی دیگر از پژوهشگران گزارش کردند افزودن زغال زیستی اثر بازدارنده بر روی فعالیت میکروبی خاک داشته است (۱۹ و ۲۵). الوابل و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند کاربرد زغال زیستی پسماند نخل در یک خاک آهکی آلوده به فلزهای سنگین، با کاهش فراهمی فلزهای سنگین در خاک، سبب افزایش تنفس میکروبی و کربن زیست‌توده میکروبی خاک شد (۲).

تاکنون بررسی چندانی در زمینه نشان افزودن زغال‌های زیستی بهسازی‌شده بر تثبیت کادمیوم و ویژگی‌های زیستی خاک در خاک‌های آهکی آلوده انجام نشده است. بنابراین با نگر به پیامدهای منفی کادمیوم بر کیفیت و بهداشت خاک، هدف از این پژوهش بررسی نشان زغال زیستی مانده‌های ذرت و مانده‌های ذرت بهسازی شده با کلرید آهن بر فراهمی کادمیوم و برخی ویژگی‌های زیستی یک خاک آلوده به کادمیوم بود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از مانده‌های ذرت برای ساخت زغال‌های زیستی بهره‌گیری شد. مانده‌های ذرت از کشتزار پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز گردآوری شد. مانده‌های ذرت در آغاز هوا خشک شده و پس از آسیاب کردن، از الک ۲ میلی‌متری گذر داده شدند. مانده‌های ذرت برای بهسازی شیمیایی برای ۲ ساعت با نسبت ۱:۳ (وزنی-حجمی) در محلول کلرید آهن یک مولار غوطه‌ور و پس از آن در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شدند (۷). سپس زغال زیستی مانده‌های ذرت

دگرش ویژگی‌های شیمیایی آن مانند نسبت‌های اتمی، رویه ویژه و گنجایش تبادل کاتیونی شده و بنابراین توانایی زغال زیستی برای جذب آلاینده‌ها افزایش می‌یابد (۳۴ و ۴۰). برای بهسازی شیمیایی زغال زیستی و افزایش توانایی آن در تثبیت آلاینده‌ها، از برخی یون‌ها مانند منیزیم، آهن، منگنز و آلومینیوم بهره‌گیری شده است (۳۴ و ۳۷ و ۳۸). بهسازی شیمیایی زغال زیستی می‌تواند با دگرش اندوخته عناصر زغال زیستی و افزایش درصد اکسیژن آن، گروه‌های عاملی دارای اکسیژن مانند کربوکسیل و هیدروکسیل را در سطح زغال زیستی افزایش داده و توانایی زغال زیستی برای جذب فلزهای سنگین را افزایش دهد (۳۷ و ۳۸). یافته‌های پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۱۹) نشان داد بهسازی زغال زیستی تهیه شده از مانده‌های چای، با آهن و منگنز سبب افزایش رویه ویژه و گنجایش تبادل کاتیونی آن شد و در پی کاربرد زغال زیستی بهسازی شده با آهن و منگنز در سطح ۲ درصد وزنی، غلظت کادمیوم فراهم در خاک بیش از ۷۶ درصد کاهش یافت. آن‌ها همچنین گزارش کردند پیامد کاربرد زغال زیستی بهسازی شده در کاهش فراهمی کادمیوم بسیار بیش‌تر از کاربرد زغال زیستی بهسازی نشده بود (۳۷).

افزودن زغال زیستی به‌عنوان یک بهساز به خاک افزون بر تثبیت فلزات سنگین، می‌تواند با تأثیر بر ویژگی‌ها و فرآیندهای گوناگون خاک در بهبود کارکرد میکروبی خاک و کیفیت و بهداشت آن مؤثر باشد (۳۲ و ۵). تأثیر زغال زیستی بر کارکرد ریزجانداران و رفتار بیوشیمیایی خاک به گونه و ویژگی‌های خاک، گونه زغال زیستی و همچنین شرایط گرماکافت زغال زیستی مانند دمای گرماکافت بستگی دارد (۱۵ و ۲۹). در حالی‌که برخی از

نمونه خاک آزمون شده از کشتزار پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز از لایه ۰-۲۰ سانتی متری گردآوری شد. نمونه خاک پس از رساندن به آزمایشگاه، هوا- خشک شده و از الک ۲ میلی متری گذر داده شد. سپس برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اندازه‌گیری شد. بدین گونه که بافت خاک به روش هیدرومتر (۸)، پهاش و رسانندگی الکتریکی در عصاره اشباع، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (۲۰)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش خشتی کردن با اسید کلریدریک (۲۷)، گنجایش تبادل کاتیونی به روش جانشینی کاتیون‌ها با استات آمونیوم (۲۸) و نیتروژن کل خاک به روش کجلدال اندازه‌گیری شد (۳). غلظت فسفر فراهم خاک با بهره‌گیری از بی‌کربنات سدیم نیم‌مولار استخراج و به روش رنگ‌سنجی با بهره‌گیری از دستگاه اسپکتروفتومتر (Apel PD-303 UV) اندازه‌گیری شد (۲۳). غلظت پتاسیم فراهم خاک به روش استخراج با استات آمونیوم یک مولار عصاره‌گیری شد و غلظت پتاسیم در عصاره با بهره‌گیری از دستگاه فلیم‌فتومتر (Corning 410) اندازه‌گیری شد (۱۴). غلظت کادمیوم فراهم خاک با بهره‌گیری از DTPA عصاره‌گیری شد و غلظت در عصاره تهیه شده با بهره‌گیری از دستگاه جذب اتمی اسپکترومتری (Shimadzu-6300 AA) اندازه‌گیری شد (۱۶). خاک آزمون شده دارای بافتی لومی، آهکی، pH بالا، دارای ماده آلی کم و نالوده به کادمیوم بود (جدول ۱).

بهسازی نشده (BC) و مانده‌های بهسازی شده با کلرید آهن (Fe-BC) در کوره الکتریکی در شرایط گرماکافت آهسته، در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، برای ۲ ساعت و با نرخ افزایش دمای ۵ درجه سلسیوس در دقیقه تهیه شدند. برای دوری از اکسیژن هنگام گرماکافت از جریان گاز نیتروژن بهره‌گیری شد (۴). سپس ویژگی‌های زغال‌های زیستی مانند pH و رسانندگی الکتریکی (در عصاره ۱:۱۰ زغال زیستی به آب دیونیزه) و گنجایش تبادل کاتیونی بر اساس روش بهبودیافته جایگزینی با استات آمونیوم اندازه‌گیری شد (۳۱). کارکرد زغال زیستی از نسبت وزن زغال زیستی (W_B) حسب گرم به وزن زیست‌توده اولیه (W_{RB}) بر حسب گرم بر پایه رابطه ۱ محاسبه شد (۳۱).

$$Y_B(\%) = \frac{W_B}{W_{RB}} \times 100 \quad (1)$$

رویه ویژه زغال‌های زیستی به روش BET^۱ بر پایه هم‌دمای جذب و واجذب گاز نیتروژن و با بهره‌گیری از دستگاه سنجش گر رویه ویژه^۲ (Micromeritics, Gemini III 2372) اندازه‌گیری شد (۴). اندوخته کربن، نیتروژن، هیدروژن و گوگرد با بهره‌گیری از دستگاه CHNS analyzers (Vario EL III) اندازه‌گیری شد. غلظت کادمیوم زغال‌های زیستی به روش سوزاندن خشک و گوارش نمونه‌های خاکستر در اسید نیتریک غلیظ و آب اکسیژنه عصاره‌گیری شد (۳۱) و با دستگاه اسپکترومتر نشری پلاسمای جفت‌شده القایی^۳ (PerkinElmer Optima 8300, ICP-OES) اندازه‌گیری شد.

- 1- Brunauer-Emmett-Teller
- 2- Surface area analyzer
- 3- Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک آزمون شده.

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

مقدار Value	واحد Unit	ویژگی Property
40.6	(گرم بر صد گرم) (g 100g ⁻¹)	شن sand
38.0	(گرم بر صدگرم) (g 100g ⁻¹)	سیلت silt
21.4	(گرم بر صد گرم) (g 100g ⁻¹)	رس clay
0.41	(گرم بر صدگرم) (g 100g ⁻¹)	کربن آلی Organic carbon
41.3	(گرم بر صد گرم) (g 100g ⁻¹)	کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent
12.6	(سانتی مول بار بر کیلوگرم) (cmol _c kg ⁻¹)	گنجایش تبادل کاتیونی Cation exchange capacity
2.45	(دسی زیمنس بر متر) (dS m ⁻¹)	رسانندگی الکتریکی Electrical conductivity
7.7	-	پهاش pH
0.36	(گرم بر کیلوگرم) (g kg ⁻¹)	نیتروژن کل Total N
13.5	(میلی گرم بر کیلوگرم) (mg kg ⁻¹)	فسفر فراهم Olsen P
273.2	(میلی گرم بر کیلوگرم) (mg kg ⁻¹)	پتاسیم فراهم Available K
1.05	(میلی گرم بر کیلوگرم) (mg kg ⁻¹)	کادمیوم کل Total Cd
0.47	(میلی گرم بر کیلوگرم) (mg kg ⁻¹)	کادمیوم فراهم DTPA-extractable Cd

$Cd(NO_3)_2$ بهره‌گیری شد. نیتروژن افزوده شده به خاک توسط نمک نیترات کادمیوم در همه تیمارها، بر اساس تیماری که بیش‌ترین نیتروژن را دریافت کرده بود، با افزودن مقادیر محاسبه شده اوره به تیمارهای مختلف تصحیح شد (۱۱). خاک آلوده برای پنج ماه در برابر تناوب‌های تر و خشک شدن گذاشته شد تا پخش کادمیوم در خاک به آلودگی طبیعی نزدیک‌تر شود (۱۱). سپس تیمارهای زغال زیستی به‌کار رفتند. بدین‌گونه که زغال‌های زیستی در سطح ۲ درصد وزنی به گونه یکنواخت با ۳۰۰ گرم خاک

این پژوهش به گونه آزمایشی فاکتوریل، با دو فاکتور آلودگی کادمیوم در سه اندازه صفر (گواه آزمایش)، ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک و گونه زغال زیستی در سه تیمار بدون کاربرد زغال زیستی یا گواه آزمایش (CK)، زغال زیستی مانده‌های ذرت (BC) و زغال زیستی مانده‌های ذرت بهسازی‌شده با کلرید آهن (Fe-BC)، در قالب طرح کاملاً تصادفی، در سه تکرار و در شرایط آزمایشگاهی انجام شد. برای آلوده کردن خاک با غلظت‌های گوناگون از روش اسپری و نمک نیترات کادمیوم

برانگیخته با سوسترا (SIR) با بهره‌گیری از سوسترای گلوکز اندازه‌گیری شد (۱). کربن زیست‌توده میکروبی خاک (MBC) به روش تدخین (گازدهی) با کلروفرم و استخراج با محلول سولفات پتاسیم اندازه‌گیری شد (۱۰). برای برآورد بهره یا بخش متابولیکی (qCO_2) از بخش کردن میزان تنفس پایه بر کربن زیست‌توده میکروبی بهره‌گیری گردید (۲۶). هم‌چنین کارکرد آنزیم دهیدروژناز در خاک به‌عنوان آنزیم کارا در سوخت و ساز یاخته‌های ریزجانداران خاک اندازه‌گیری شد (۱). تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزار SPSS انجام شد. هم‌چنین آزمون میانگین داده‌ها با بهره‌گیری از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های زغال زیستی: بررسی ویژگی‌های دو گونه زغال زیستی نشان داد بهسازی زغال زیستی با کلرید آهن سبب افزایش کارکرد زغال‌زیستی شد. در پی بهسازی زغال زیستی با کلرید آهن pH زغال زیستی کاهش (۰/۱۵ واحد) یافت و رسانندگی الکتریکی آن افزایش (۰/۱۶ دسی‌زیمنس بر متر) یافت (جدول ۲). گنجایش تبادل کاتیونی و رویه ویژه زغال زیستی بهسازی شده به‌ترتیب ۳/۲۵ و ۱/۹۵ برابر زغال زیستی بهسازی نشده بود. نتایج آنالیز عنصری نشان داد که در پی بهسازی با کلرید آهن مانده‌های ذرت، درصد نیتروژن و هیدروژن زغال زیستی دگرش‌چندانی نکرد، اما درصد کربن زغال زیستی کاهش یافت و درصد اکسیژن آن افزایش یافت.

آمیخته شدند و در ظروف پلاستیکی منفذدار (جهت تبادل تهویه‌ای) نگهداری شدند. رطوبت گنجایش زراعی خاک در هر تیمار پس از اعمال تیمارها، ابتدا با استفاده از دستگاه صفحات فشاری تعیین شد. سپس بر این اساس درصد رطوبت نمونه‌ها با افزودن آب مقطر به روش اسپری، در مرز ۷۰ درصد گنجایش زراعی رسانده و نگهداری شد. وزن هر نمونه بر روی آن یادداشت شد و در طول دوره آزمایش رطوبت نمونه‌ها به‌گونه وزنی (با وزن کردن هر نمونه در طول دوره آزمایش و افزودن مقدار آب مقطر مورد نیاز جهت جبران آب کاهش وزن ایجاد شده) کنترل شد (۱۲ و ۱۷). نمونه‌ها برای ۳ ماه در در انکوباتور در دمای ثابت (25 ± 2 درجه سلسیوس) نگهداری شدند. پس از سه ماه نمونه‌های خاک در تیمارهای گوناگون به دو بخش تقسیم شدند. بدین‌ترتیب که بخشی از هر نمونه برای اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی و فراهمی کادمیوم در خاک، هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. هم‌چنین بخش دیگر از نمونه خاک در هر تیمار برای اندازه‌گیری ویژگی‌های زیستی خاک در یخچال و در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد. ویژگی‌های شیمیایی خاک شامل pH و EC نمونه‌ها در عصاره ۱:۱ خاک به آب دیونیزه و کربن آلی به روش اکسیداسیون تر اندازه‌گیری شد (۲۰). غلظت کادمیوم فراهم خاک با بهره‌گیری از DTPA عصاره‌گیری شد و با دستگاه جذب اتمی اسپکترومتری (Shimadzu-6300 AA) اندازه‌گیری شد (۱۶). تنفس میکروبی پایه (BR) با روش گردآوری CO_2 آزاد شده در هیدروکسید سدیم و تیتراسیون برگشتی مانده آن با اسیدکلریدریک، اندازه‌گیری شد. تنفس

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی زغال‌های زیستی آزمون شده.

Table 2. Some physico-chemical properties of the studied biochars.

زغال زیستی بهسازی شده Modified biochar (Fe-BC)	زغال زیستی Biochar (BC)	واحد Unit	ویژگی Property
40.2	36.2	(گرم بر صد گرم) (g 100g ⁻¹)	کارکرد yield
9.04	9.19	-	پهاس (۱:۱۰) pH (1:10)
6.49	6.33	(دسی‌زیمنس بر متر) (dS m ⁻¹)	رسانندگی الکتریکی (۱:۱۰) Electrical conductivity (1:10)
89.7	27.6	(سانتی‌مول‌بار بر کیلوگرم) (cmol _c kg ⁻¹)	گنجایش تبادل کاتیونی Cation exchange capacity
127.6	65.3	(مترمربع بر گرم) (m ² g ⁻¹)	سطح ویژه Surface area
38.7	59.9	(گرم بر صد گرم) (g 100g ⁻¹)	کربن کل Total C
2.22	2.15	(گرم بر صد گرم) (g 100g ⁻¹)	هیدروژن کل Total H
1.41	1.55	(گرم بر صد گرم) (g 100g ⁻¹)	نیتروژن کل Total N
18.3	3.06	(گرم بر صد گرم) (g 100g ⁻¹)	اکسیژن کل Total O
32.02	45.08	-	نسبت کربن به نیتروژن C/N Ratio
0.35	0.038	-	نسبت اکسیژن به کربن O/C Ratio
0.69	0.43	-	نسبت هیدروژن به کربن H/C Ratio
ND	ND	(میلی‌گرم بر کیلوگرم) (mg kg ⁻¹)	کادمیوم کل Total Cd

ND: کم‌تر از حد قابل اندازه‌گیری دستگاه اسپکترومتر نشری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) بود.

ND: Was lower than the range of inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES) detection.

کربن آن کاهش و محتوای اکسیژن آن افزایش یافته و به‌دنبال آن گروه‌های عاملی دارای اکسیژن بر روی سطح آن افزایش می‌یابند (۲۲، ۳۴ و ۳۸). یافته‌های این پژوهش نیز نشان داد اندوخته اکسیژن زغال زیستی در پی بهسازی با کلرید آهن، بیش از ۱۵ درصد افزایش یافت (جدول ۲). بنابراین افزایش CEC در پی بهسازی زغال زیستی با کلرید آهن می‌تواند به‌دلیل کاهش درصد کربن و افزایش درصد اکسیژن آن و به‌دنبال آن افزایش گروه‌های عاملی

کاهش درصد کربن و افزایش اکسیژن در زغال زیستی بهسازی‌شده شاید وابسته به پیدایش گروه‌های دارای اکسیژن در رویه زغال زیستی بهسازی‌شده است. آزمون ویژگی‌های دو گونه زغال زیستی نشان داد بهسازی زغال زیستی با کلرید آهن سبب افزایش کارکرد، CEC و رویه ویژه زغال زیستی شد. افزایش کارکرد می‌تواند به‌دلیل آب‌زدایی و کاهش پیدایش مواد فرار باشد. یافته‌های پژوهش‌های گوناگون نشان داده در پی بهسازی شیمیایی زغال زیستی، محتوای

کاربرد زغال زیستی به گونه معنی داری ($P < 0.05$) بیش تر از تیمار گواه آزمایش شد. بدین ترتیب که در تیمارهای BC و Fe-BC مقدار کربن آلی خاک به ترتیب ۳/۰ و ۲/۶ برابر تیمار گواه آزمایش بود (جدول ۴).

افزایش pH خاک بر اثر کاربرد زغال های زیستی (جدول ۴)، می تواند به دلیل pH بالای زغال زیستی و انباشتگی کاتیون های قلیایی در بخش خاکستر آن باشد. هم چنین هیدروکسیدها و کربنات های موجود در زغال زیستی می توانند سبب افزایش pH خاک شوند (۲). خادم و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش کردند کاربرد سطوح ۰/۵ و ۱ درصد وزنی زغال زیستی تهیه شده از ذرت در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس سبب افزایش معنی دار ($P < 0.05$) pH یک خاک آهکی شد (۱۳). دلیل افزایش CEC خاک در پی کاربرد زغال زیستی، رویه ویژه بالای زغال زیستی و ساختار پرسوراخ آن و هم چنین تراکم بار سطحی و وجود گروه های عاملی اکسیژن دار مانند کربونیل، کربوکسیل بر روی سطح زغال زیستی می باشد (۲).

دارای اکسیژن مانند گروه های کربوکسیل و هیدروکسیل باشد. افزایش رویه ویژه زغال زیستی در اثر بهسازی شیمیایی با کلرید آهن عمدتاً به دلیل جلوگیری از پیدایش تار (Tar) و مواد فرار گزارش شده است، چرا که این مواد در زمان فرآیند گرمایکافت مانع از پیدایش منافذ بیش تر می گردند (۳۵). پتانسیل تخلخل سازی (FeCl_2 (porogen) و نقش آن همانند آبزدای قوی از دیگر عوامل موثر در افزایش رویه ویژه می باشد (۳۵).

ویژگی های شیمیایی خاک: نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد تنها اثر اصلی زغال زیستی بر pH، CEC و کربن آلی خاک معنی دار بود ($P < 0.01$) و اثر اصلی کادمیوم و برهم کنش تیمارها بر این ویژگی های خاک معنی دار نبود ($P > 0.05$) (جدول ۳). آزمون میانگین داده ها نشان داد کاربرد هر دو گونه زغال زیستی سبب افزایش معنی دار ($P < 0.05$) pH خاک شد. در پی کاربرد زغال زیستی و زغال زیستی بهسازی شده CEC خاک به ترتیب ۶/۷ و ۱۰/۹ درصد افزایش یافت. کربن آلی خاک در تیمارهای

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) پیامد تیمارها بر ویژگی های شیمیایی خاک.

Table 3. Variance analysis (mean squares) of the treatment's effects on soil chemical properties.

میانگین مربعات Mean square			پ هاش Ph	درجه آزادی df	منبع دگرش Source of variation
کادمیوم فراهم DTPA-extractable Cd	کربن آلی Organic carbon	گنجایش تبادل کاتیونی Cation exchange capacity			
24.3**	0.001 ^{ns}	0.009 ^{ns}	0.003 ^{ns}	2	کادمیوم Cadmium
350**	2.2**	4.3**	0.12**	2	زغال زیستی Biochar
7.7**	0.0001 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.001 ^{ns}	4	کادمیوم × زغال زیستی Cadmium × Biochar
0.11	0.001	0.042	0.001	18	خطا Error
2.73	5.46	1.43	0.48		ضریب دگرش (%) Coefficient of Variation

^{ns} و ^{**} به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد است.

^{ns} and ^{**} are not significant and significant at $P < 0.01$ respectively.

جدول ۴- آزمون میانگین پیامد کاربرد زغال زیستی بر pH، CEC و کربن آلی خاک.

Table 4. Mean comparison of the effect of biochar application on pH, CEC and soil organic carbon.

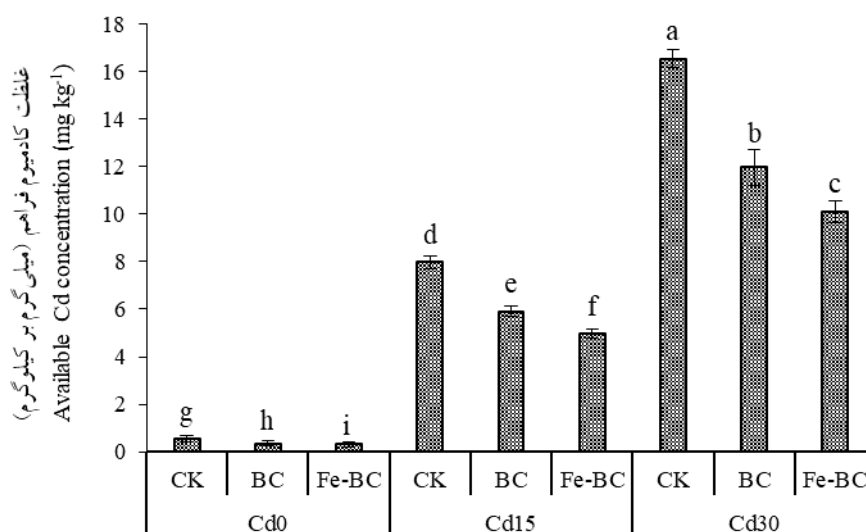
کربن آلی (درصد) Organic carbon (%)	گنجایش تبادل کاتیونی (سانتی مول بر کیلوگرم) Cation exchange capacity (cmol _c kg ⁻¹)	پهانش خاک Soil pH	تیمار Treatment
0.45 ^c	12.60 ^c	7.60 ^b	شاهد Control
1.35 ^a	13.45 ^b	7.79 ^a	زغال زیستی Biochar
1.16 ^b	13.97 ^a	7.81 ^a	زغال زیستی بهسازی شده Modified biochar

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند.

Means with similar letter(s) are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

گنجایش تبادل کاتیونی خاک در تیمارهای کاربرد زغال زیستی (جدول ۴) نیز می‌تواند یکی دیگر از دلایل کاهش غلظت کادمیوم فراهم خاک باشد. افزایش گنجایش تبادل کاتیونی و مکان‌های جذب خاک سبب افزایش پیدایش کمپلکس فلزهای سنگین در خاک می‌شود (۲). تثبیت بیش‌تر کادمیوم در تیمار زغال زیستی بهسازی شده در آزمون با زغال زیستی بهسازی‌نشده می‌تواند به جهت رویه ویژه بیش‌تر آن (جدول ۲)، بیش‌تر بودن CEC خاک در این تیمار (جدول ۴) و احتمالاً بیش‌تر بودن گروه‌های عاملی سطحی اکسیژن‌دار (مانند فنولیک و کربوکسیلیک) و در نتیجه افزایش پیدایش کمپلکس‌های پایدار کادمیوم- زغال زیستی در خاک باشد. یافته‌های پژوهش الوابل و همکاران (۲۰۱۷) نیز نشان داد کاربرد زغال زیستی مانده‌های نخل، سبب کاهش غلظت فراهم کادمیوم در یک خاک آهکی آلوده شد (۲). روی هم‌رفته تبادل یونی، برهم‌کنش الکتروستاتیک، ته‌نشست و پیدایش کمپلکس‌های سطحی مانند راهکارهای مؤثر در تثبیت فلزهای سنگین در خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی گزارش شده است (۳۶).

با افزایش اندازه آلودگی کادمیوم در خاک غلظت فراهم آن در خاک نیز افزایش یافت (شکل ۱). در هر سه اندازه کادمیوم در خاک کاربرد زغال‌های زیستی سبب کاهش معنی‌دار ($P < 0.05$) کادمیوم فراهم (۲۵/۸ تا ۴۱/۵ درصد) خاک شد. هم‌چنین در هر سه اندازه کادمیوم در خاک تأثیر زغال زیستی بهسازی شده در کاهش کادمیوم فراهم خاک به گونه معنی‌داری ($P < 0.01$) بیش‌تر از زغال زیستی بهسازی نشده بود (شکل ۱). غلظت کادمیوم فراهم در تیمارهای BC و Fe-BC در آزمون با تیمار گواه آزمایش در سطح Cd₁₅ به ترتیب ۲۵/۸ و ۳۷/۶ درصد و در سطح Cd₃₀ به ترتیب ۲۷/۶ و ۳۸/۹ درصد کم‌تر بود (شکل ۱). با توجه به مقدار زیاد کربنات کلسیم در خاک آزمون شده (۴۱/۳ گرم در صد گرم خاک، جدول ۲) و هم‌چنین این‌که زغال‌های زیستی دارای کربنات بوده و افزودن آن‌ها به خاک می‌تواند سبب افزایش مقدار کربنات‌ها در خاک شود (۲)، بنابراین یکی از دلایل کاهش فراهمی کادمیوم در خاک در تیمارهای کاربرد زغال زیستی می‌تواند تبادل یونی بین کادمیوم و کربنات کلسیم و تشکیل شکل نامحلول کربنات کادمیوم در خاک باشد. هم‌چنین افزایش



شکل ۱- آزمون میانگین برهمکنش کادمیوم و زغال زیستی بر کادمیوم فراهم خاک. میانگین‌های دارای حروف مشترک بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند. خط عمودی انحراف معیار را نشان می‌دهد ($n=3$).

Figure 1. Mean comparison of the effect of Cd and biochar on DTPA-extractable Cd. Means with similar letter(s) are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($p < 0.05$). Error bars indicate the standard deviation ($n=3$).

میکروبی پایه و تنفس برانگیخته با سوبسترا در تیمارهای کاربرد زغال زیستی به گونه معنی‌داری ($P < 0.05$) بیش‌تر از تیمار گواه آزمایش بود. همچنین تفاوت تنفس پایه و برانگیخته با سوبسترا در هر دو تیمار کاربرد زغال زیستی در سطح Cd_{30} با مقدار آن‌ها در سطح Cd_0 در تیمار گواه آزمایش (CK) معنی‌دار نبود (شکل ۲). این یافته نشان‌دهنده تأثیر بسیار چشم‌گیر کاربرد زغال زیستی در کاهش پیامدهای آلودگی کادمیوم و بهبود فعالیت میکروبی خاک می‌باشد. یافته‌ها همچنین نشان داد که در هر سه اندازه کادمیوم در خاک تنفس میکروبی پایه و برانگیخته با سوبسترا در تیمار Fe-BC بیش‌تر از تیمار زغال زیستی BC بود، اگرچه این تفاوت تنها در سطح Cd_{30} از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.05$) (شکل ۲).

ویژگی‌های زیستی خاک: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر کادمیوم و زغال زیستی بر تمامی ویژگی‌های زیستی خاک معنی‌دار ($P < 0.01$) بود (جدول ۵). همچنین برهم‌کنش کادمیوم و زغال زیستی بر تمامی ویژگی‌های زیستی خاک به‌جز بهره متابولیک معنی‌دار ($P < 0.05$) بود (جدول ۵). نتایج آزمون میانگین داده‌ها نشان داد در پی افزایش آلودگی کادمیوم در خاک از Cd_0 به Cd_{15} تنفس میکروبی پایه و تنفس میکروبی برانگیخته در خاک کاهش یافت (شکل ۲). کم شدن تنفس میکروبی پایه در سطح Cd_{15} نسبت به Cd_0 تنها در تیمار گواه آزمایش (بدون کاربرد زغال زیستی) معنی‌دار ($P < 0.05$) بود. افزایش آلودگی کادمیوم در خاک از Cd_{15} به Cd_{30} سبب کاهش معنی‌دار ($P < 0.05$) تنفس میکروبی پایه و تنفس برانگیخته با سوبسترا شد (شکل ۲). در هر سه اندازه آلودگی کادمیوم در خاک مقادیر تنفس

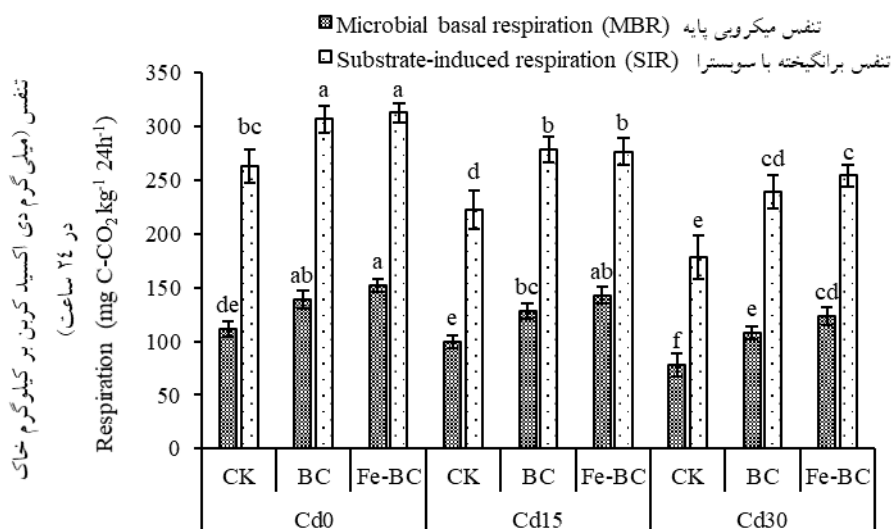
جدول ۵- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارها بر ویژگی‌های میکروبی خاک.

Table 5. Variance analysis (mean squares) of the treatment's effects on soil microbial properties.

میانگین مربعات Mean square					درجه آزادی df	منبع دگرش Source of variation
کارکرد دهیدروژناز Dehydrogenase activity	بهره متابولیک Metabolic quotient (qCO ₂)	کربن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass carbon	تنفس برانگیخته باسویسترا Substrate induced respiration	تنفس میکروبی پایه Microbial basal respiration		
7.6**	0.039**	17056**	11096**	2232**	2	کادمیوم Cadmium
8.9**	0.022**	18336**	11322**	4319**	2	زغال زیستی Biochar
0.058*	0.001 ^{ns}	124*	201.5*	302*	4	کادمیوم × زغال زیستی Cadmium × Biochar
0.019	0.002	26.2	50.4	66.9	18	خطا Error
8.73	1.62	7.21	3.97	4.87		ضریب دگرش (%) Coefficient of Variation

^{ns}, * and ** are not significant, significant at P<0.05 and significant at P<0.01, respectively.

^{ns}, * and ** are not significant, significant at P<0.05 and significant at P<0.01, respectively.



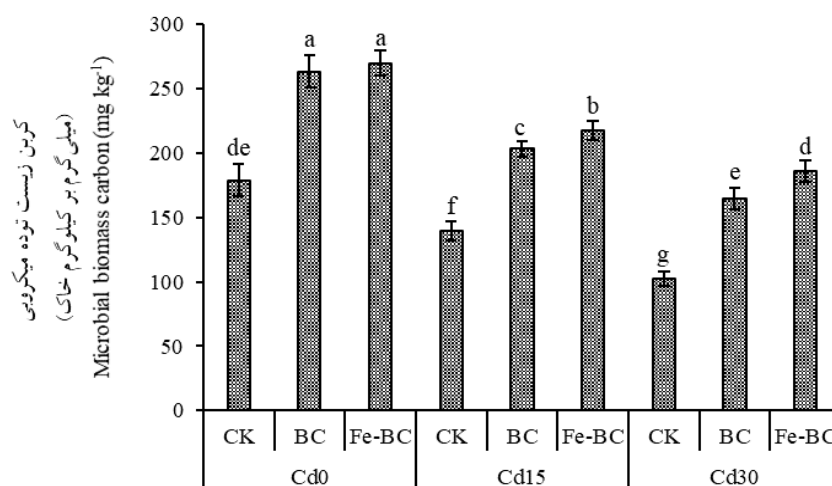
شکل ۲- آزمون میانگین برهم‌کنش کادمیوم و زغال زیستی بر تنفس میکروبی پایه (MBR) و تنفس برانگیخته با سویسترا (SIR). میانگین‌های دارای حروف مشترک برای هر ویژگی بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری (P<0/05) ندارند. خط عمودی انحراف معیار را نشان می‌دهد (n=3).

Figure 2. Mean comparison of the effect of Cd and biochar on microbial basal respiration (MBR) and substrate-induced respiration (SIR). Means with similar letter(s) for each property are not significantly different according to the Duncan's multiple range test (P<0.05). Error bars indicate the standard deviations (n=3).

ریزجانداران خاک در شرایط آلودگی کادمیوم در خاک برای بردباری به زهری بودن ایجاد شده به انرژی بیشتری نیاز دارند، به همین دلیل کربن جذب شده کمتری در ساختار ترکیب‌های آلی میکروبی شرکت می‌نماید (۳۹). افزایش کربن زیست‌توده میکروبی در پی کاربرد زغال‌های زیستی می‌تواند به دلیل افزایش کربن آلی خاک (جدول ۴) و افزایش کربن و عناصر غذایی فراهم برای ریزجانداران خاک در اثر افزودن زغال‌های زیستی باشد (۱۲). همچنین افزایش کربن زیست‌توده میکروبی خاک در اثر افزودن زغال زیستی می‌تواند به این دلیل باشد که زغال زیستی با داشتن ساختار متخلخل و رویه ویژه بالا زیستگاه شایسته‌ای را برای ریزجانداران خاک فراهم کرده است (۳۲) و (۴۳). سونگ و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش کردند که افزودن زغال زیستی ذرت به یک خاک آهکی، کربن زیست‌توده میکروبی خاک را افزایش داد (۳۲). بیش‌تر بودن کربن زیست‌توده میکروبی در تیمار Fe-BC نسبت به تیمار BC را می‌توان به غلظت کم‌تر کادمیوم فراهم در این تیمار نسبت داد (شکل ۱).

نتایج آزمون میانگین برهم‌کنش تیمارها نشان داد با افزایش آلودگی کادمیوم در خاک کربن زیست‌توده میکروبی خاک (MBC) در همه تیمارها کاهش یافت (شکل ۳). این کاهش (در سطح Cd₃₀ در آزمون با Cd₀) در تیمارهای BC (۲۲/۳ درصد) و Fe-BC (۱۸/۶ درصد) کم‌تر از تیمار گواه آزمایش (۳۰/۱ درصد) بود. در هر سه اندازه آلودگی کادمیوم در خاک کربن زیست‌توده میکروبی خاک در تیمارهای کاربرد زغال زیستی به گونه معنی‌داری (P<۰/۰۱) بیش‌تر از تیمار گواه آزمایش بود. بدین ترتیب که کربن زیست‌توده میکروبی خاک در سطح Cd₀ در تیمارهای BC و Fe-BC به ترتیب ۲۴/۵ و ۳۶/۰ درصد، در سطح Cd₁₅ به ترتیب ۲۸/۷ و ۴۳/۰ درصد و در سطح Cd₃₀ به ترتیب ۳۸/۴ و ۵۸/۶ درصد بیش‌تر از تیمار گواه آزمایش بود. روی هم رفته کربن زیست‌توده میکروبی خاک در هر سه اندازه کادمیوم در تیمارهای گوناگون بدین ترتیب بود: CK < BC < Fe-BC.

کاهش کربن زیست‌توده میکروبی خاک در پی آلودگی کادمیوم، احتمالاً به این دلیل است که

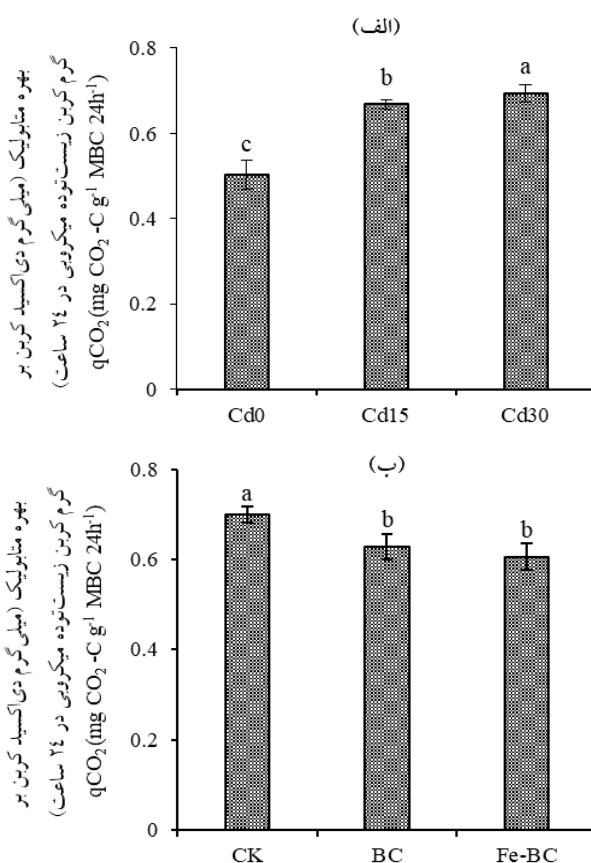


شکل ۳- آزمون میانگین برهم‌کنش کادمیوم و زغال زیستی بر کربن زیست‌توده میکروبی خاک. میانگین‌های دارای حروف مشترک بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری (P<۰/۰۵) ندارند. خط عمودی انحراف معیار را نشان می‌دهد (n=۳).

Figure 3. Mean comparison of the effect of Cd and biochar on microbial biomass carbon (MBC). Means similar letter(s) are not significantly different according to the Duncan's multiple range test (P<0.05). Error bars indicate the standard deviations (n=3).

زیستی نشان داد کاربرد هر دو گونه زغال زیستی سبب کاهش معنی دار ($P < 0.05$) مقدار qCO_2 شد. هم‌چنین qCO_2 در تیمار زغال زیستی بهسازی شده به گونه معنی داری ($P < 0.05$) بیش‌تر از زغال زیستی بهسازی نشده بود (شکل ۴-ب).

آزمون میانگین اثر اصلی تیمارها بر بهره متابولیک (qCO_2) نشان داد که با افزایش آلودگی کادمیوم در خاک qCO_2 به گونه معنی داری ($P < 0.05$) افزایش یافت (شکل ۴-الف). بدین ترتیب که مقدار qCO_2 در تیمار Cd_{30} در آزمون با تیمار Cd_0 ۳۸/۳ درصد افزایش یافت. آزمون میانگین اثر اصلی کاربرد زغال



شکل ۴- آزمون میانگین اثر اصلی کادمیوم (الف) و زغال زیستی (ب) بر بهره متابولیک (qCO_2). میانگین‌های دارای حروف مشترک بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن اختلاف معنی داری ($P < 0.05$) ندارند. خط عمودی انحراف معیار را نشان می‌دهد ($n=3$).

Figure 4. Mean comparison of the effect of Cd (A) and biochar (B) on metabolic quotient (qCO_2). Means with similar letter(s) are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($p < 0.05$). Error bars indicate the standard deviations ($n=3$).

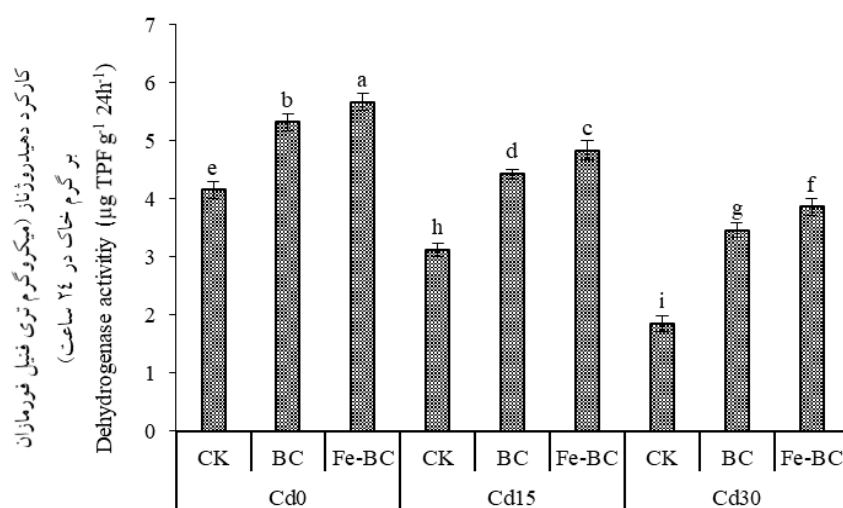
که افزایش آلودگی کادمیوم در خاک بررسی شده سبب ایجاد شرایط ناپایدار در خاک شده است (شکل ۴-الف) و کاربرد هر دو گونه زغال زیستی با کاهش مقدار qCO_2 در آزمون با تیمار گواه آزمایش (شکل ۴-ب) سبب بهبود این شاخص در شرایط آلودگی

بهره متابولیک به‌عنوان مقدار انرژی لازم برای زنده‌مانی و رشد یاخته، نسبت به کربن زیست‌توده میکروبی خاک است (۳۶). خاکی که qCO_2 بالایی دارد نشان‌دهنده شرایط محیطی ناپایدار و یا شرایط نامناسب خاک می‌باشد (۳۹). این نتایج نشان می‌دهد

کادمیوم شده است. دگرش شاخص qCO_2 در شرایط آلودگی فلزهای سنگین در خاک به این دلیل است که در شرایط آلودگی خاک، ریزجانداران خاک کربن موجود را صرف اعمال حیاتی می‌نمایند و کربن کمتری را برای پیدایش بافت‌های جدید میکروبی به کار می‌برند (۳۹). بنابراین افزایش qCO_2 در شرایط آلودگی کادمیوم در خاک نشان‌دهنده اثر بازدارنده کادمیوم بر کارایی کربن زیست‌توده میکروبی می‌باشد (۴۲). مقادیر کم‌تر بهره متابولیک در تیمارهای کاربرد زغال زیستی در آزمون با تیمار گواه آزمایش نشان‌دهنده بهبود شرایط ریزجانداران خاک در تبدیل کربن به زیست‌توده جدید می‌باشد (۳۹).

نتایج نشان داد که در پی افزایش آلودگی کادمیوم در خاک، کارکرد آنزیم دهیدروژناز در همه تیمارها به گونه معنی‌داری ($P < 0.05$) کاهش یافت (شکل ۵). در هر سه غلظت کادمیوم در خاک، کارکرد دهیدروژناز در تیمارهای کاربرد زغال زیستی به گونه معنی‌داری ($P < 0.05$) بیش‌تر از تیمار گواه آزمایش بود (شکل ۵). همچنین کارکرد این آنزیم در تیمار

Fe-BC به گونه معنی‌داری ($P < 0.05$) بیش‌تر از تیمار BC بود. کاهش کارکرد دهیدروژناز در خاک در پی آلودگی کادمیوم می‌تواند به دلیل واکنش کادمیوم با کمپلکس‌های آنزیم-سوبسترا و گروه‌های فعال پروتئین و یا تخریب پروتئین آنزیم باشد (۳۰). همچنین کادمیوم می‌تواند در سنتز آنزیم‌ها در یاخته ریزجانداران اثر منفی داشته باشد (۲۴). این پژوهش نشان‌دهنده اثر چشم‌گیر زغال‌های زیستی در افزایش کارکرد آنزیم دهیدروژناز به‌عنوان آنزیم‌های درون یاخته‌ای مؤثر در متابولیسم‌های یاخته‌ای بود. بیش‌تر بودن کارکرد آنزیمی در تیمارهای کاربرد زغال زیستی می‌تواند به دلیل افزایش کربن و فراهمی عناصر غذایی برای ریزجانداران خاک و در نتیجه افزایش کارکرد میکروبی و تحریک کارکرد آنزیمی باشد (۲۱). همچنین بیش‌تر بودن کارکرد دهیدروژناز در تیمار Fe-BC در آزمون با تیمار BC را می‌توان به کم‌تر بودن غلظت کادمیوم فراهم در این تیمار نسبت داد (شکل ۱).



شکل ۵- آزمون میانگین برهم‌کنش کادمیوم و زغال زیستی بر کارکرد آنزیم دهیدروژناز. میانگین‌های دارای حروف مشترک بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند. خط عمودی انحراف معیار را نشان می‌دهد ($n=3$).

Figure 5. Mean comparison of the effect of Cd and biochar on dehydrogenase activity. Means with similar letter(s) are not significantly different according to the Duncan's multiple range test ($P < 0.05$). Error bars indicate the standard deviations ($n=3$).

فراهمی کادمیوم و بهبود کارکرد میکروبی و آنزیمی در خاک‌های آلوده به کادمیوم باشد. هم‌چنین در پی کاربرد زغال زیستی بهسازی شده با کلرید آهن، با ورود آهن به‌عنوان یک عنصر غذایی کم‌مصرف به خاک، احتمالاً بتواند سبب بهبود غلظت آهن در خاک‌های آهنکی شود، البته انجام پژوهش‌ها در آینده در زمینه پیامد زغال زیستی بهسازی‌شده با آهن در غلظت و فراهمی آهن در خاک‌های آهنکی، برای تأیید این موضوع لازم است.

سیاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز برای تأمین اعتبار این طرح تشکر می‌گردد. هزینه اجرای این طرح به شماره ۱۳۰۷ از محل اعتبارات پژوهانه واحد پژوهشی دانشگاه شهید چمران (اهواز) تأمین شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که آلودگی کادمیوم در خاک سبب کاهش چشم‌گیر ویژگی‌های زیستی خاک و کارکرد آنزیم دهیدروژناز شد. با توجه به اهمیت کارکرد میکروبی در کیفیت و حاصل‌خیزی خاک، بنابراین آلودگی کادمیوم در درازمدت می‌تواند پیامدهای منفی بر کیفیت و حاصل‌خیزی خاک داشته باشد. نتایج این پژوهش هم‌چنین نشان داد کاربرد زغال زیستی به‌ویژه زغال زیستی بهسازی‌شده به جهت ویژگی‌های آن و بهبود ویژگی‌های خاک مانند pH، گنجایش تبادل کاتیونی و کربن آلی سبب کاهش فراهمی کادمیوم در خاک و به‌دنبال آن کاهش پیامدهای نامطلوب کادمیوم بر ویژگی‌های زیستی خاک شد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد زغال زیستی بهسازی‌شده با کلرید آهن، می‌تواند به‌ساز آلی شایسته‌ای برای کاهش

منابع

1. Alef, K., and Nannipieri, P. 1995. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, London. 608p.
2. Al-Wabel, M.I., Hussain, Q., Usman, A.R., Ahmad, M., Abduljabbar, A., Sallam, A.S., and Ok, Y.S. 2017. Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review. *Land Degradation and Development*. 29: 2124-2161.
3. Bremner, J.M. 1960. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *J. Agric. Sci.* 55: 11-33.
4. Cantrell, K.B., Hunt, P.G., Uchimiya, M., Novak, J.M., and Ro, K.S. 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology*. 107: 419-428.
5. El-Naggar, A., Lee, S.S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A.K., immerman, A.R., Ahmad, M., Shaheen S.M., and Ok, Y.S. 2019. Biochar application to low fertility soils: a review of current status and future prospects. *Geoderma*. 337: 536-554.
6. Fajardo, C., Costa, G., Nande, M., Botías, P., García-Cantalejo, J., and Martín, M. 2019. Pb, Cd, and Zn soil contamination: Monitoring functional and structural impacts on the microbiome. *Applied Soil Ecology*. 135: 56-64.
7. Fang, C., Zhang, T., Li, P., Jiang, R.F., and Wang, Y.C. 2014. Application of magnesium modified corn biochar for phosphorus removal and recovery from swine wastewater. *Inter. J. Environ. Res. Pub. Health*. 11: 9217-9237.
8. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. P 383-410, In: A. Klute (ed.), *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.

9. Igalavithana, A.D., Farooq, M., Kim, K.H., Lee, Y.H., Qayyum, M.F., Al-Wabel, M.I., Lee, S.S., and Ok, Y.S. 2017. Determining soil quality in urban agricultural regions by soil enzyme-based index. *Environmental geochemistry and health*. 39:1531-1544.
10. Jenkinson, D.S., and Ladd, J.N. 1981. Microbial biomass in soil measurement and turnover. P 415-471, In: E.A. Paul, and J.N. Ladd (eds.), *Soil Biochemistry*, Marcel Dekker, Inc., New York.
11. Karimi, A., Khodaverdiloo, H., and Rasouli-Sadaghiani, M. 2017. Characterisation of growth and biochemical response of *Onopordum acanthium* L. under lead stress as affected by microbial inoculation. *Chemistry and Ecology*. 33: 963-976.
12. Khadem, A., and Raiesi, F. 2017. Responses of microbial performance and community to corn biochar in calcareous sandy and clayey soils. *Applied Soil Ecology*. 114: 16-27.
13. Khadem, A., Raiesi, F., and Besharati, H. 2018. The effects of corn biochar on the chemical and microbiological characteristics of two calcareous clay and sandy soils. *J. Soil Manage. Sust. Prod.* 8: 25-47. (In Persian)
14. Knudsen, D., Peterson, G.A., and Pratt, P.F. 1982. Lithium, sodium and potassium. P 225-246, In: A.L. Page (ed.), *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. Madison, WI: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
15. Lian, F., and Xing, B. 2017. Black carbon (biochar) in water/soil environments: Molecular structure, sorption, stability, and potential risk. *Environmental Science and Technology*. 51: 13517-13532.
16. Lindsay, W.L., and Norvel, W.A. 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 42: 421-428.
17. Liu, J., Xie, J., Chu, Y., Sun, C., Chen, C., and Wang, Q. 2008. Combined effect of cypermethrin and copper on catalase activity in soil. *J. Soil Sed.* 5: 327-332.
18. Lu, K., Yang, X., Gielen, G., Bolan, N., Ok, Y.S., Niazi, N.K., Xu, S., Yuan, G., Chen, X., Zhang, X., and Liu, D. 2017. Effect of bamboo and rice straw biochars on the mobility and redistribution of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in contaminated soil. *J. Environ. Manage.* 186: 285-292.
19. Mukherjee, S., Weihermueller, L., Tappe, W., Vereecken, H., and Burauel, P. 2016. Microbial respiration of biochar-and digestate-based mixtures. *Biology and Fertility of Soils*. 52: 151-164.
20. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. P 961-1010, In: D.L. Sparks (ed.), *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
21. Nie, C., Yang, X., Niazi, N.K., Xu, X., Wen, Y., Rinklebe, J., Ok, Y.S., Xu, S., and Wang, H. 2018. Impact of sugarcane bagasse-derived biochar on heavy metal availability and microbial activity: A field study. *Chemosphere*. 200: 274-282.
22. Novais, S.V., Zenero, M.D.O., Tronto, J., Conz, R.F., and Cerri, C.E.P. 2018. Poultry manure and sugarcane straw biochars modified with MgCl₂ for phosphorus adsorption. *J. Environ. Manage.* 214: 36-44.
23. Olsen, S.R., and Sommers, L.E. 1982. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties of Phosphorus*. American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI. 1143p.
24. Pan, J., and Yu, L. 2011. Effects of Cd or/and Pb on soil enzyme activities and microbial community structure. *Ecological Engineering*. 37: 1889-1894.
25. Paz-Ferreiro, J., Gascó, G., Gutiérrez, B., and Méndez, A. 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: 511-517.
26. Pereira, J.L., Picanco, M.C., Silva, A.A., Santos, E.A., Tome, H.V.V., and Olarte, J.B. 2008. Effects of glyphosate and endosulfan on soil microorganisms in soybean crop. *Planta Daninha*. 26: 56-62.

27. Rayment, G.E., and Higginson, F.R. 1992. Laboratory handbook of soil and water chemical methods. Inkata Press, Melbourne. 330p.
28. Rengasamy, P., and Churchman, G.J. 1999. Cation exchange capacity, exchangeable cations 415 and sodicity. P 147-157, In: K.I. Peverill, L.A. Sparrow and D.J. Reuter (eds.), Soli analysis: an interpretation manual. Melbourne, CSIRO Publishing.
29. Rutigliano, F.A., Romano, M., Marzaioli, R., Baglivo, I., Baronti, S., Miglietta, F., and Castaldi, S. 2014. Effect of biochar addition on soil microbial community in a wheat crop. *Europ. J. Soil Biol.* 60: 9-15.
30. Sethi, S., and Gupta, S. 2014. Heavy metal impact on soil microbial biomass, soil dehydrogenase activity and soil respiration rate. *Inter. J. Adv. Res. Biol. Sci.* 1: 29-34.
31. Singh, B., Camps-Arbestain, M., and Lehmann, J. 2017. Biochar: A Guide to Analytical Methods. Csiro Publishing. 320p.
32. Song, D., Tang, J., Xi, X., Zhang, S., Liang, G., Zhou, W., and Wang, X. 2018. Responses of soil nutrients and microbial activities to additions of maize straw biochar and chemical fertilization in a calcareous soil. *Europ. J. Soil Biol.* 84: 1-10.
33. Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., and Yang, Z. 2015. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere.* 125: 70-85.
34. Tao, Q., Li, B., Li, Q., Han, X., Jiang, Y., Jupa, R., and Li, T. 2019. Simultaneous remediation of sediments contaminated with sulfamethoxazole and cadmium using magnesium-modified biochar derived from *Thalia dealbata*. *Science of the Total Environment.* 659: 1448-1456.
35. Wang, L., Wang, Y., Ma, F., Tankpa, V., Bai, S., Guo, X., and Wang, X. 2019. Mechanisms and reutilization of modified biochar used for removal of heavy metals from wastewater: A review. *Science of the Total Environment.* 668: 1298-1309.
36. Wang, M., Zhu, Y., Cheng, L., Anderson, B., Zhao, X., Wang, D., and Ding, A. 2018. Review on utilization of biochar for metal-contaminated soil and sediment remediation. *J. Environ. Sci.* 63: 56-173.
37. Wang, Y.Y., Ji, H.Y., Lyu, H.H., Liu, Y.X., He, L.L., You, L.C., Zhou, C.H., and Yang, S.M. 2019. Simultaneous alleviation of Sb and Cd availability in contaminated soil and accumulation in *Lolium multiflorum Lam.* after amendment with Fe-Mn-modified biochar. *J. Clean. Prod.* 231: 556-564.
38. Wu, C., Shi, L., Xue, S., Li, W., Jiang, X., Rajendran, M., and Qian, Z. 2019. Effect of sulfur-iron modified biochar on the available cadmium and bacterial community structure in contaminated soils. *Sci. Total Environ.* 647: 1158-1168.
39. Xu, Y., Seshadri, B., Sarkar, B., Wang, H., Rumpel, C., Sparks, D., Farrell, M., Hall, T., Yang, X., and Bolan, N. 2018. Biochar modulates heavy metal toxicity and improves microbial carbon use efficiency in soil. *Science of the Total Environment.* 621: 148-159.
40. Yu, H., Zou, W., Chen, J., Chen, H., Yu, Z., Huang, J., Tang, H., Wei, X., and Gao, B. 2019. Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. *J. Environ. Manage.* 232: 8-21.
41. Yuan, P., Wang, J., Pan, Y., Shen, B., and Wu, C. 2019. Review of biochar for the management of contaminated soil: Preparation, application and prospect. *Science of the Total Environment.* 659: 473-490.
42. Zhang, F.P., Li, C.F., Tong, L.G., Yue, L.X., Li, P., Ciren, Y.J., and Cao, C.G. 2010. Response of microbial characteristics to heavy metal pollution of mining soils in central Tibet, China. *Applied Soil Ecology.* 45: 144-151.
43. Zhu, X., Chen, B., Zhu, L., and Xing, B. 2017. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review. *Environmental Pollution.* 227: 98-115.



Effect of corn stover-modified biochar on some biological properties of a Cd-contaminated calcareous soil

*N. Moradi¹ and A. Karimi²

¹Assistant Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran,

²Ph.D. Student, Dept. of Soil Science and Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 05.03.2019; Accepted: 07.21.2019

Abstract

Background and Objectives: In the past few decades, accumulation of heavy metals in soils has increased as a result of human activities. Microorganisms are one of the important parts of soil, that their activity can be affected by the high levels of heavy metals such as Cadmium (Cd). Soil biological parameters can be used for evaluating the quality of contaminated soils. Biochar as a soil amendment can control bioavailability of heavy metals in contaminated soils and reduce their transfer risk to the food chain. The objective of this study was to evaluate the effect of corn stover biochar and modified- corn stover biochar on cadmium (Cd) availability and microbiological properties of a Cd-contaminated soil.

Materials and Methods: A soil sample was collected from the surface layer (0-20 cm) and spiked with different concentrations of Cd ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$). The contaminated soil was placed in periodic wetting-drying (WD) cycles for about five months in room temperature. Then, corn stover biochar (BC) and modified corn stover biochar with FeCl_2 (Fe-BC) were prepared at 500°C and mixed with the Cd-contaminated soil at 2% (w/w). The soil samples were incubated for 90 days. At the end of incubation period, Cd availability and some of microbiological properties of soil including soil microbial respiration (BR), substrate induced respiration (SIR), microbial biomass carbon (MBC) and dehydrogenase activity were measured and metabolic quotient ($q\text{CO}_2$) were determined. This study was carried out as a factorial experiment based on a randomized complete design with two factors including Cd contamination (0, 15 and 30 mg Cd kg^{-1} soil) and biochar type (control (CK), corn stover biochar (BC) and modified-corn stover biochar (Fe-BC)) in three replications under laboratory condition.

Results: The results indicated that application of corn biochar and modified-corn biochar led to increase of soil pH (0.19 and 0.21 unit respectively), cation exchange capacity (6.7 and 10.9%), organic carbon (157 and 200%) and decrease of concentration of available Cd (21.8-41.5%) in the soil compared to the control. In general, soil Cd contamination led to a significant reduction in the soil microbiological properties. Application of corn stover biochar and modified-corn stover biochar significantly increased microbial respiration (24.7-58.7%), substrate-induced respiration (16.8-42.5%), microbial biomass carbon (24.5-58.6%) and dehydrogenase activity (28.8-108%). The effects of Fe-BC treatment on changes in Cd availability and soil biological properties were greater than BC treatment.

Conclusion: In general, results of this study indicated that FeCl_2 modified-corn stover biochar can be suitable organic amendment for Cd stabilization and may improve soil microbial activities in calcareous Cd-contaminated soils.

Keywords: Biochar modification, Cd contamination, Dehydrogenase activity, Microbial biomass, Organic adsorbents

* Corresponding Author; Email: n.moradi@scu.ac.ir