نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار
جلد هشتم، شماره اول، ۱۳۹۷
http://ejsms.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/ejsms.2017.12547.1709

تأثیر بیوچار ذرت بر خصوصیات شیمیایی و میکروبیولوژیکی دو خاک آهکی رسی و شنی

الهیار خادم[1]*، فایز رئیسی[2] و حسین بشارتی[3]

[1]دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهرکرد، [2]استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهرکرد،
[3]استاد پژوهش مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۲/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۷

چکیده

سابقه و هدف: بیوچار ماده کربنی است که از گرماکافت بقایای آلی در محیط اکسیژن محدود یا غیاب اکسیژن تولید می‌شود. بیوچار با بهبود خصوصیات فیزیکوشیمیایی مانند افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، تغییر pH خاک و افزودن عناصر غذایی، فعالیت میکروبی را تحریک می‌نماید. دمای گرماکافت و بافت خاک از عوامل مهم مؤثر بر رفتار بیوچار در خاک هستند. علی‌رغم اهمیت این دو متغیر، مطالعات کمی در ارتباط با تأثیر آن‌ها بر خصوصیات شیمیایی و میکروبی خاک انجام شده است. هدف این پژوهش ارزیابی اثر بیوچارهای تهیه شده در دماهای متفاوت بر خصوصیات شیمیایی و میکروبیولوژیکی دو خاک آهکی با بافت رسی و شنی بود.

مواد و روش‌ها: خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش از لایه سطحی دو منطقه در اطراف کرج، استان البرز، نمونه‌برداری شدند. بقایای خام ذرت و بیوچارهای تهیه شده از بقایا در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس به‌میزان ۰/۵ و ۱ درصد وزنی با خاک مخلوط گردید. خصوصیات شیمیایی مانند pH و قابلیت هدایت الکتریکی، مواد آلی، نیتروژن معدنی، پتاسیم و فسفر قابل دسترس و خصوصیات میکروبیولوژیکی مانند تنفس ناشی از سوبسترا، کربن زیست‌توده میکروبی و فعالیت پروتئاز، ساکاراز، کاتالاز و هیدرولیز فلورسین دی‌استات اندازه‌گیری گردید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد با افزایش دمای گرماکافت pH (۹۷٪-۱۰)، درصد خاکستر (۳۷۸٪-۷۵)، سطح ویژه (۱۴۷۲٪-۱۲۱)، درصد کربن (۵۴٪-۱۹)، فاکتور غنی‌سازی کربن (۵۴٪-۲۰) بیوچار افزایش یافت، در حالی‌که محصول بیوچار (۷۰٪-۲۰)، ظرفیت تبادل کاتیونی (۴۵٪-۱۲)، غلظت هیدروژن (۷۶٪-۹) و مواد فرار (۷۰٪-۱۶) کاهش یافت. مصرف بیوچار باعث افزایش pH (۵٪-۲)، قابلیت هدایت الکتریکی (۶۶٪-۸)، ماده آلی (۱۶۱٪-۳۶)، نیتروژن آمونیومی (۲۸٪-۶)، پتاسیم قابل دسترس (۴۰٪-۱۲)، تنفس ناشی از سوبسترا (۲۱۶٪-۵۰)، فعالیت کاتالاز (۳۲۰٪-۳۴)، ساکاراز (۴۷۶٪-۲۶)، پروتئاز (۱۸۶٪-۳) و هیدرولیز فلورسین دی‌استات (۲۸۰٪-۲۷) در مقایسه با شاهد گردید، در حالی‌که نیتروژن نیتراتی (۷۷٪-۱۰) و فسفر قابل دسترس (۸۶٪-۲۳) خاک کاهش یافت. با افزایش دمای گرماکافت و بیوچار شدن بقایای ذرت، pH (۱۱٪-۱)، قابلیت هدایت الکتریکی (۳۸٪-۱)، ماده آلی (۱۷۹٪-۱۸)، فسفر قابل دسترس (۱۵۰٪-۲)، پتاسیم قابل دسترس (۲۵٪-۵) خاک را در مقایسه با بقایای خام ذرت افزایش داد، در حالی‌که نیتروژن آمونیومی (۴۳٪-۷)، نیتروژن نیتراتی (۷۷٪-۱۰)، کربن زیست‌توده میکروبی خاک (۲۷٪-۴)، تنفس

* مسئول مکاتبه: akhadem1361@gmail.com

ناشی از سوبسترا (٪۳۹-۲)، فعالیت کاتالاز (٪۵٤-۲۱)، ساکاراز (٪٦۲-٤)، پروتئاز (٪۵٤-۰) و هیدرولیز فلورسین دی‌استات (٪٦۰-۲۱) کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد تأثیر مثبت مصرف بیوچار بر خصوصیات شیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک‌های مورد مطالعه به‌میزان مصرف و بافت خاک بستگی دارد. بالاترین تأثیر بر خصوصیات شیمیایی و زیستی خاک در سطح مصرف ٪۱ مشاهده گردید. از متغیرهای بررسی شده، فعالیت آنزیمی خاک بیش‌ترین پاسخ را به کاربرد بیوچار نشان داد. بنابراین، بر اساس نقش بیوچار در افزایش ماده آلی و فعالیت میکروبی خاک، این ماده برای بهبود وضعیت میکروبیولوژیکی خاک و افزایش کیفیت خاک‌های آهکی ایران پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بیوچار، دمای گرماکافت، سطح مصرف، فعالیت آنزیمی

مقدمه

بیوچار (Biochar) یک ماده متخلخل کربنی است که از گرماکافت بقایای آلی مانند ضایعات گیاهی و کودهای دامی در دمای ۲۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس و در محیط بدون اکسیژن یا با میزان اکسیژن محدود به‌دست می‌آید (۵۱). تجزیه گرمایی زیست‌توده در یک محیط فاقد اکسیژن را گرماکافت (Pyrolysis) می‌گویند (۵۳). عموماً بیوچار برای بهبود شرایط خاک، مدیریت پسماندهای آلی، کاهش تغییرات اقلیمی و تولید انرژی تهیه و مصرف می‌شود (۳۸). علاوه بر این، مصرف خاکی و کشاورزی بیوچار پتانسیل زیادی برای مدیریت پسماندهای گیاهی و حیوانی دارد و بنابراین آلودگی‌های زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد (۲۹، ۳۰ و ٤٦). نتایج مطالعات متعدد نشان می‌دهد مصرف بیوچار از طریق بهبود خصوصیات فیزیکی (۳۰ و ۳۵) و شیمیایی (۱۵ و ۲۳) خاک باعث تحریک و افزایش فعالیت میکروبی مانند فعالیت آنزیمی، معدنی شدن عناصر و کاهش خروج گازهای گلخانه‌ای می‌گردد (۱۳، ۳۷، ٤۱ و ۵۲). از این‌رو تولید و مصرف بیوچار به‌منظور افزایش باروری و بهبود خصوصیات میکروبیولوژیکی خاک در کشاورزی پایدار دارای اهمیت است. نتایج مطالعه دمپستر و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد مصرف بیوچار موجب افزایش pH و کاهش میزان نیتروژن معدنی می‌شود که به توقف میکروبی نیتروژن و هم‌چنین جذب سطحی نیتروزاکسید در سطح بیوچار نسبت داده شد (۱٤). نتایج مطالعات متعدد نشان می‌دهد مصرف بیوچار علاوه بر افزایش pH خاک، میزان کربن آلی خاک را نیز افزایش می‌دهد (۱۱، ۳۳ و ٤۵). بنابراین، مصرف بیوچار به‌عنوان یک ماده اصلاحی، می‌تواند سبب افزایش کربن آلی خاک، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک با ماده آلی پایین گردد. واتزینگر و همکاران (۲۰۱٤) پاسخ جامعه میکروبی خاک را به افزودن بیوچار گندم و درخت بید مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند افزودن بیوچار موجب افزایش زیست‌توده و تغییرترکیب جامعه میکروبی گردید. افزایش زیست‌توده میکروبی به بهبود شرایط مختلف شیمیایی و فیزیکی مانند افزایش غلظت فسفر و پتاسیم قابل دسترس، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و ظرفیت نگه‌داری آب در خاک و بهبود شرایط تغذیه‌ای خاک نسبت داده شد (۵۲). با این‌حال، اثر بیوچار بر ویژگی‌های خاک به سه عامل میزان مصرف، دمای تولید بیوچار و شرایط خاک بستگی دارد. با افزایش مقدار مصرف بیوچار، خصوصیات شیمیایی و بیولوژیکی خاک تغییرات بیش‌تری می‌یابند (۹ و ۳۳). زانگ و همکاران (۲۰۱٤) طی پژوهشی

نشان دادند که با افزایش میزان مصرف بیوچار، کربن زیست‌توده میکروبی افزایش و تغییرات فصلی آن کاهش یافت (۵۷). نتایج مطالعه کویی (۲۰۱۳) و همکاران نشان داد با افزایش میزان مصرف بیوچار فعالیت آنزیمی خاک نیز همواره بهبود می‌یابد (۱۲). دمای تولید بیوچار و بافت خاک نیز از عوامل مهم و مؤثر بر رفتار بیوچار در خاک است. علی‌رغم اهمیت این دو متغیر مطالعه اندکی روی اثرات آن‌ها بر خصوصیات میکروبیولوژیکی خاک وجود دارد. نتایج مطالعه آملوت و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد با افزایش دمای تولید بیوچار، آلی شدن نیتروژن (N immobilization) افزایش یافته و نسبت جمعیت قارچی به باکتریایی کاهش می‌یابد (٤). آواد و همکاران (۲۰۱۲) اثر بیوچار را بر تجزیه بقایای گیاهی گزارش و دریافتند کاربرد بیوچار فعالیت آنزیمی را در خاک شنی بیش‌تر از خاک لومی افزایش می‌دهد (٦). اغلب مطالعات انجام شده روی بیوچار فقط خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را مورد بررسی قرار داده‌اند و خصوصیات میکروبیولوژیکی خاک کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به‌علاوه، اغلب مطالعات در مناطق حاره‌ای انجام شده است و در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران مطالعه اندکی وجود دارد (١٤ و ٢٠). از این‌رو، هدف این پژوهش بررسی اثر سطوح مختلف بیوچارهای تهیه شده در دماهای متفاوت بر خصوصیات شیمیایی و میکروبیولوژیکی دو خاک آهکی با بافت شنی و رسی بود. آزمایش کنونی جهت آزمون فرضیه‌های زیر به مرحله اجرا درآمد. ۱- بیوچار باعث بهبود خصوصیات شیمیایی و افزایش فعالیت میکروبیولوژیکی خاک می‌شود، ۲- اثر بیوچار بر خصوصیات شیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک به‌میزان مصرف آن بستگی دارد، ۳- اثر بیوچار بر خاک‌های دارای بافت مختلف متفاوت است و ٤- دمای تولید بیوچار اثر مهمی بر تغییرات ویژگی‌های آن و خصوصیات شیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک دارد.

مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده در این پژوهش از لایه سطحی (۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) نمونه‌برداری گردید. ملاک انتخاب خاک‌های مورد استفاده تفاوت در بافت آن‌ها بود به‌نحوی‌که یک خاک با بافت رسی و دیگری با بافت شنی انتخاب گردید. نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل و به‌مدت یک هفته هواخشک شدند و سپس از الک ۲ میلی‌متر گذرانده شدند. سپس یک زیرنمونه خاک برای تعیین ویژگی های اولیه برداشت گردید. نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است. بیوچار مورد استفاده در این پژوهش بقایای ذرت به‌عنوان ماده خام اولیه بود که در سه دمای ۲۰۰، ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس با استفاده از تجزیه حرارتی در کوره الکتریکی در شرایط اکسیژن محدود و به‌مدت ۲ ساعت تولید شد. پس از تهیه بیوچار یک زیرنمونه از آن‌ها برداشت و مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت. برخی خصوصیات بیوچارهای تولید شده در جدول ۲ ارائه شده است. مواد فرار، کربن تثبیت شده و درصد خاکستر (۱۲) محتوای کربن، هیدروژن، نیتروژن، گوگرد و اکسیژن توسط تجزیه عنصری با دستگاه CHNSO اندازه‌گیری گردید. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در شرایط آزمایشگاهی انجام شد. بیوچار در دو سطح ۰/۵ و ۱ درصد وزنی به‌طور یکنواخت با ۳۰۰ گرم خاک در چهار تکرار مخلوط و در ظروف مناسب ریخته شد. تیمارهای آزمایشی شامل شاهد (C)، کلش ذرت (B0)، بیوچار ۲۰۰ درجه سلسیوس (B2)، بیوچار ٤۰۰ درجه سلسیوس (B4)، بیوچار ٦۰۰ درجه سلسیوس (B6) بودند. رطوبت مخلوط خاک –بیوچار در محدوده ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه تنظیم و تا پایان آزمایش به‌صورت وزنی کنترل گردید.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و بیوچارهای مورد مطالعه.

Table 1. Selected physiochemical properties of the soils and biochars used in the study.

بافت خاک Soil texture		بیوچار Biochar				واحد Unit	متغیر Variable
شنی Sandy	رسی Clayey	بیوچار ۶۰۰ درجه 600°C Biochar (B6)	بیوچار ٤۰۰ درجه 400°C Biochar (B4)	بیوچار ۲۰۰ درجه 200°C Biochar (B2)	بقایای ذرت Corn Residue (B0)		
8.32 (0.35)	7.86 (0.40)	11.2 (0.36)	10.7 (0.50)	6.25 (0.34)	5.67 (0.13)	-	pH
0.37 (0.27)	0.33 (0.032)	4.75 (0.34)	3.38 (0.12)	3.67 (0.22)	3.68 (0.12)	$dS\ m^{-1}$	قابلیت هدایت الکتریکی EC
-	-	30.0 (4.58)	48.0 (8.14)	80.0 (11.3)	-	-	درصد بازیافت Recovery
-	-	39.0 (2.08)	26.0 (1.53)	14.0 (1.02)	8.00 (0.66)	%	خاکستر Ash
-	-	88.4 (0.34)	35.7(0.34)	12.4(0.34)	5.62(0.34)	$m^2\ g^{-1}$	سطح ویژه Surface area
0.220 (0.058)	0.423 (0.047)	63.0	56.4	48.7	40.8	%	کربن Carbon
-	-	4.83	11.1	24.9	29.7	%	اکسیژن Oxygen
0.022 (0.004)	0.034 (0.004)	1.61	2.55	1.61	1.07	%	نیتروژن Nitrogen
-	-	1.76	3.87	6.06	6.65	%	هیدروژن Hydrogen
10.0 (1.52)	12.5 (2.45)	39.1	22.1	30.3	38.1	-	نسبت کربن به نیتروژن C/N Ratio
-	-	0.077	0.197	0.51	0.73	-	نسبت اکسیژن به کربن O/C Ratio
-	-	0.027	0.069	0.124	0.163	-	نسبت هیدروژن به کربن H/C Ratio
-	-	0.36	0.35	0.24	0.22	-	نسبت هیدروژن به اکسیژن H/O Ratio
-	-	0.10	0.24	0.54	0.75	-	نسبت اکسیژن+نیتروژن به کربن (O+N)/C Ratio
8.80 (1.14)	26.5 (3.63)	11.7 (1.06)	14.3 (0.90)	18.6 (1.44)	21.2 (3.27)	$cmol^{(+)}\ kg^{-1}$	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC
-	-	1.54	1.38	1.20	1.00	-	فاکتور غنی‌سازی کربن Carbon Enrichment Factor
-	-	37	40	18	11	%	کربن تثبیت شده Fixed Carbon
-	-	24	34	68	81	%	مواد فرار Volatile Matter
100 (8.39)	150 (16.6)	1.57 (0.08)	1.20 (0.10)	0.62 (0.05)	0.42 (0.04)	%	پتاسیم Potassium
25.3 (2.35)	15.9 (1.59)	1.05 (0.08)	0.52 (0.06)	0.36 (0.02)	0.19 (0.01)	%	فسفر Phosphorous
80 (6.5)	10 (0.87)	-	-	-	-	%	شن Sand
10 (1.7)	38 (3.6)	-	-	-	-	%	سیلت Silt
10 (1.4)	52 (4.5)	-	-	-	-	%	رس Clay

B0: بقایای ذرت، B2: بیوچار ۲۰۰ درجه، B4: بیوچار ٤۰۰ درجه و B6: بیوچار ٦۰۰ درجه سلسیوس.

پس از سه ماه متغیرهای شیمیایی مانند pH و قابلیت هدایت الکتریکی خاک (۵۰)، ماده آلی خاک (۳۳)، نیتروژن معدنی (۲٦)، میزان پتاسیم قابل دسترس (۲۱) و خصوصیات میکروبیولوژیکی شامل تنفس ناشی از سوبسترا (۱)، کربن زیست‌توده میکروبی (۲٤)، فعالیت آنزیم‌های پروتئاز (۲۷)، ساکاراز (٤۵)، کاتالاز (۱۱) و هیدرولیز فلورسین دی‌استات (٤٤) اندازه‌گیری گردید. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها براساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار و با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. مقایسات میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵٪ آماری ($P<۰/۰۵$) انجام گردید.

نتایج و بحث

اثر دما بر ویژگی‌های بیوچار: با افزایش دما، محصول بیوچار از ۸۰ درصد در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس به ۳۰ درصد در دمای ٦۰۰ درجه سلسیوس کاهش یافت (جدول ۱). این کاهش عملکرد عمدتاً به‌دلیل تخریب ساختار ترکیباتی مانند سلولز و همی‌سلولز و سوختن ترکیبات آلی با افزایش دمای گرماکافت است (۷، ۲۵ و ٤۵). یانگ و همکاران (۲۰۰٤) پیشنهاد دادند که رطوبت در دمای ۲۲۰ درجه خارج می‌گردد، همی‌سلولز در دمای ۲۲۰ تا ۳۱۵ درجه و سلولز در دمای ۳۱۵ تا ٤۰۰ تجزیه می‌شود (٥٦). درصد خاکستر بیوچار روند عکس داشت و با افزایش دما بر میزان خاکستر بیوچار افزوده شد و از ۸ درصد در مواد اولیه خام به ۳۹ درصد در دمای ٦۰۰ درجه افزایش یافت (جدول ۱). علت افزایش درصد خاکستر را می‌توان به‌دلیل تشکیل نمک‌های معدنی به دنبال کربنی شدن بیان نمود. به‌طورکلی درصد بالای خاکستر موجود در بیوچارهای تولید شده به‌خاطر درصد بالای ترکیبات سیلیکاتی موجود در بقایای ذرت است. همچنین بقایای گیاهان علفی در مقایسه با بقایای خشبی خاکستر بیش‌تری تولید می‌نماید (۵). نتایج تجزیه نشان داد با افزایش دمای تولید، pH و EC بیوچار افزایش می‌یابد. علت افزایش pH بیوچار می‌تواند به‌دلیل تشکیل اکسیدهای فلزات و خروج دی اکسید کربن، دی اکسید نیتروژن و دی اکسید گوگرد در حین گرماکافت (٤۵)، افزایش گروه‌های عاملی قلیایی و کاهش گروه‌های عاملی اسیدی (۲)، جدا شدن نمک‌های قلیایی از ساختار مواد آلی (٥٦) و افزایش نسبت عناصر قلیایی باشد. هم‌چنین به‌دلیل تخریب ساختارهای مواد اولیه و آزاد شدن برخی از عناصر ساختمانی و خروج مواد فرار، EC بیوچار با افزایش دمای تولید افزایش می‌یابد (۵۲). میزان کربن بیوچار با افزایش دما افزایش یافت. نتایج نشان داد که میزان کربن بیوچاهای ۲۰۰، ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ٤۸/۷، ٥٦/٤ و ٦۳ درصد بود که به‌ترتیب افزایش ۱۹، ۳۸ و ٥٤ درصدی کربن را نسبت به بقایای خام ذرت نشان داد. با افزایش دما، با خروج مواد فرار درجه کربنی شدن افزایش می‌یابد که با افزایش میزان کربن و کاهش هیدروژن و اکسیژن بیوچار نشان داده می‌شود (۵۱). بر اساس مطالعه یانگ و شنگ (۲۰۱۲) میزان کربن بیوچار با افزایش دمای گرماکافت به ۳۵۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس از ۱۷/۳ درصد در مواد خام اولیه به‌ترتیب به ٦۱/۱ و ۷۹/۵ درصد و میزان خاکستر نسبت به بقایای خام اولیه ۵۰۰ و ۷۰۰ درصد افزایش یافت (۵۵). میزان نیتروژن بیوچار روند مشخص نداشت که با نتایج مطالعات دیگران مطابقت دارد (٤۹ و ۵۲). نتایج تجزیه بیوچار نشان داد با افزایش دمای تولید تا ٤۰۰ درجه، نسبت کربن به نیتروژن

کاهش یافته و مجدداً در ۶۰۰ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد (جدول ۱). علت این می‌تواند به‌دلیل تجزیه ترکیبات نیتروژنی موجود در بافت گیاه و خروج گازهای نیتروژن‌دار باشد. به‌دلیل افزایش غلظت کربن در بیوچار، نسبت هیدروژن به کربن، و نسبت اکسیژن به کربن با افزایش دما همواره و به‌طور ثابت کاهش یافت (جدول ۱). کاهش نسبت هیدروژن به کربن نشان‌دهنده فرایند آب‌زدایی و کاهش نسبت اکسیژن به کربن بیانگر واکنش‌های کربوکسیل‌زدایی و هر دو نسبت، شاخص و یا درجه آروماتیکی شدن (یا درجه تراکم) بیوچار را نشان می‌دهند. با کاهش این نسبت‌ها کربن زود تجزیه‌پذیر کاهش می‌یابد. نسبت اکسیژن به کربن بالا روی سطوح بیوچار نشان‌دهنده حضور گروه‌های عامل اکسید شده مانند کربوکسیل است و با افزایش دمای تولید بیوچار ترکیبات آروماتیک و aryl-C افزایش در حالی‌که ترکیبات O-alkyl-C کاهش می‌یابند (۱۱ و ۲۳).

اثر بیوچار بر خصوصیات شیمیایی خاک: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر نوع و مقدار بیوچار مصرفی و نیز اثرات متقابل آن‌ها در هر دو خاک مورد آزمون، بر pH و قابلیت هدایت الکتریکی خاک در سطح ۵ درصد معنی‌دار می باشد (جدول ۲). بیوچار باعث افزایش معنی‌دار pH و قابلیت هدایت الکتریکی خاک گردید و این افزایش با دمای تولید و سطح مصرف بیوچار رابطه مستقیم دارد. بالاترین pH در خاک شنی و در سطح ۱ درصد بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس مشاهده گردید که افزایش ۰/۴۶ واحد را در مقایسه با شاهد نشان داد. هم‌چنین نتایج نشان داد که بقایای ذرت و بیوچار ۲۰۰ درجه سلسیوس موجب کاهش pH در مقایسه با شاهد گردید در حالی‌که بیوچارهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس آن را افزایش داد (جدول ۳). بقایای خام و بیوچار تولید شده در دماهای پایین‌تر دارای گروه‌های عامل اسیدی بیش‌تری بوده و قلیائیت کم‌تری دارند (۲۸ و ۴۹) و می‌توانند موجب کاهش pH خاک گردند. دلیل افزایش pH خاک بر اثر مصرف بیوچار تولید شده در دماهای بالاتر، pH بالای بیوچار، وجود فلزات قلیایی مانند پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم در بخش خاکستر بیوچار است که به راحتی در محلول خاک حل شده و باعث افزایش pH خاک می‌شوند (۱۰، ۲۰ و ۴۹). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر متقابل سه فاکتور بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک معنی‌دار بود (جدول ۲). بالاترین میزان قابلیت هدایت الکتریکی در خاک رسی در سطح ۱ درصد بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس مشاهده گردید که موجب افزایش ۶۴ درصدی قابلیت هدایت الکتریکی در مقایسه با شاهد گردید. هم‌چنین همین تیمار در خاک شنی باعث افزایش ۶۳ درصدی قابلیت هدایت الکتریکی گردید (جدول ۳). افزودن بیوچار به خاک به‌دلیل آزادسازی عناصر که به‌طور ضعیف به ساختار بیوچار پیوند یافته‌اند و همچنین وجود مقدار زیادی خاکستر موجب افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک می‌گردد (۸ و ۱۰). نتایج نشان داد اثر متقابل بافت خاک × نوع بیوچار و نوع بیوچار × سطح مصرف بر میزان ماده آلی خاک معنی‌دار است (شکل ۱) و میزان ماده آلی خاک در خاک رسی و بیوچار دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس بیش‌تر از خاک شنی بود. با افزایش دمای گرماکافت و سطح مصرف بیوچار، ماده آلی خاک افزایش یافت.

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرات اصلی و متقابل تیمارهای آزمایشی بر خصوصیات شیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک.

Table 2. Analysis of variance (mean square) for main and interaction effects of treatments on soil chemical and microbiological properties.

ضریب تغییرات Coefficient of Variation	خطا Error	اثرات متقابل Interactive Effects			اثرات اصلی Main Effects				
		بافت خاک × ماده اصلاحی × مقدار مصرف Texture × Amendment ×Rate	ماده اصلاحی × مقدار مصرف Amendment × Rate	بافت × مقدار مصرف Texture × Rate	بافت × ماده اصلاحی Texture × Amendment	مقدار مصرف Rate	ماده اصلاحی Amendment	بافت Texture	
	48	3	3	1	3	1	3	1	درجه آزادی
0.036	0.001 (0.71)	0.008 (0.28)**	0.12(4.07)**	0.0041(0.05)^{ns}	0.02 (0.70)**	0.038 (0.44)**	1.3(44.2)**	4.37 (49.5)**	پی‌اچ pH
0.007	0.00005 (2.19)	0.002 (0.33)**	0.003(0.47)**	0.0008(0.04)**	0.015 (2.57)**	0.23 (13.3)**	0.075(12.7)**	1.24 (70.4)**	قابلیت هدایت الکتریکی Electrical conductivity
0.029	0.0009 (1.30)	0.0009 (0.08)^{ns}	0.063(5.80)**	0.0006(0.02)^{ns}	0.02(1.90)**	0.79 (24)**	0.33(30.3)**	1.20 (36.6)**	ماده آلی خاک Soil Organic Matter
1.23	1.50 (0.82)	53.8 (1.81)**	59.7 (2.01)**	3.90 (0.04)^{ns}	70.5 (2.40)**	1008 (11.3)**	930.8 (31.4)**	4475.6 (50.3)**	نیتروژن نیتراتی Nitrate-Nitrogen
6.66	44.3 (17.4)	9.60 (0.24)^{ns}	43.9 (1.08)^{ns}	19.9 (0.16)^{ns}	187.2 (4.60)*	142.5 (1.17)^{ns}	1233.5 (30.3)**	5489 (45)**	نیتروژن آمونیومی Ammonium-Nitrogen
0.082	0.56 (1.78)	7.60 (1.50)**	5.40 (1.06)**	7.30 (0.48)**	1.80 (0.36)**	385.8 (25.5)**	147.0 (29.2)**	608.9 (40.2)**	فسفر قابل دسترس Available Phosphorous
7.50	57.1 (4.68)	3. 10 (0.02)^{ns}	19.4 (0.10)^{ns}	6.10 (0.01)^{ns}	45.3 (0.23)^{ns}	1376 (2.35)**	3877 (19.8)**	42641 (72.8)**	پتاسیم قابل دسترس Available Potassium
1.81	3.30 (3)	17.3 (0.98)**	246.7(13.9)**	19.5 (0.37)*	36.2(2.05)**	837.4 (15.8)**	661.9(37.4)**	1403.4 (26.4)**	تنفس ناشی از سوبسترا Substrate Induced Respiration
42	1767 (11.3)	1144(0.46)^{ns}	5149(2.06)*	2101(0.28)^{ns}	7238(2.89)*	87269 (11.6)**	97160(38.8)**	243999 (32.5)**	زیست‌توده میکروبی Microbial Biomass
1.95	3.82 (1.4)	2.73(0.6)^{ns}	27.6(0.65)**	15.2(0.12)^{ns}	15.8(0.37)*	933.5(7.36)**	2960(70)**	2530 (19.9)**	فعالیت کاتالاز Catalase Activity
0.69	0.48 (0.59)	1.43(0.11)*	31.8 (6.49)**	1.10(0.03)^{ns}	7.01(0.53)**	1288(32.6)**	473.9(36)**	928.7 (23.5)**	فعالیت ساکاراز Saccharase Activity
0.029	0.0009 (0.66)	0.008(0.36)**	0.022(1.05)**	0.009(0.15)**	0.002(0.10)^{ns}	1.32(20.8)**	1.34(63.4)**	0.85 (13.4)**	فعالیت پروتئاز Protease Activity
0.019	0.0003 (1.60)	0.002(0.50)**	0.007(2.03)**	0.001(0.15)*	0.006(1.83)**	0.139(13.2)**	0.227 (64.3)**	0.174 (16.4)**	هیدرولیز فلورسین دی‌استات Fluorescein di acetate hydrolysis

**، * و ^{ns} به‌ترتیب معنی‌دار در سطح ۱ و ۵ درصد و غیرمعنی‌دار می‌باشند.

اعداد داخل پرانتز سهم نسبی (درصد) هر کدام از منابع تغییر را برای هر پارامتر نشان می‌دهد (یعنی نسبت مجموع مربعات آن منبع تغییر به مجموع مربعات کل ضرب در ۱۰۰).

**, * and ^{ns} significant at 1% and 5% and non-significant, respectively.

Numbers in parentheses indicate the relative contribution (%) of each variable source for each parameter (i.e. the ratio of the sum of squares of the source multiplied by 100).

جدول ۳- اثر تیمارهای آزمایشی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک.

Table 3. Effects of treatments on soil chemical and microbiological properties.

نوع بیوچار Biochar Type	بافت شنی Sandy Texture		بافت رسی Clayey Texture		بافت شنی Sandy Texture		بافت رسی Clayey Texture	
	1%	0.5%	1%	0.5%	1%	0.5%	1%	0.5%
	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) Electerical Conductivity $EC_{1:2.5}$ (dS m^{-1})				پی‌اچ $pH_{1:2.5}$			
شاهد Control (C)	0.38 (0.006) B	0.38 (0.006)B	0.60 (0.000) B	0.60 (0.000) B	8.30 (0.031) B	8.30 (0.031) B	7.70 (0.018) B	7.70 (0.018) B
بقایای ذرت Corn Residue (B0)	0.53(0.002) Al	0.43 (0.002)Ap	0.65 (0.004) Ah	0.71 (0.002) Af	7.98 (0.009) Af	7.77 (0.017) Ah	7.37 (0.010) Al	7.52 (0.009) Ak
بیوچار ۲۰۰ درجه 200°C Biochar (B2)	0.57 (0.005)Ak	0.45 (0.005)Ao	0.68 (0.002) Ag	0.86 (0.002) Ac	8.06 (0.018) Ae	8.17 (0.017) Ad	7.52 (0.008) Ak	7.57 (0.015) Aj
بیوچار ٤۰۰ درجه 400°C Biochar (B4)	0.60 (0.003)Aj	0.47 (0.004)An	0.78 (0.002) Ae	0.91 (0.005) Ab	8.33 (0.022) Ac	8.46 (0.027) Ab	7.86 (0.010) Ag	7.75 (0.015) Ah
بیوچار ٦۰۰ درجه 600°C Biochar (B6)	0.63 (0.003)Ai	0.52 (0.003)Am	0.84 (0.004) Ad	0.98 (0.005)Aa	8.45 (0.019) Aa	8.67 (0.033) Ab	8.16 (0.016) Ad	7.94 (0.021) Af
$LSD_{0.05}$	0.01				0.045			
	فسفر قابل دسترس خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Available Phosphorous (mg kg^{-1})				نیتروژن نیتراتی خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Soil Nitrogen-Nitrate (mg kg^{-1})			
شاهد Control (C)	25.0 (0.56)B	25.0 (0.56)B	15.7 (0.45) B	15.7 (0.45) B	34.0 (0.51)A	34.0 (0.51)A	54.4 (0.83)A	54.4 (0.83)A
بقایای ذرت Corn Residue (B0)	9.75 (0.41)Ae	15.4 (0.32)Ac	10.1(0.20) Ae	3.20 (0.36) Ahi	21.9 (0.78)Bi	7.90 (0.70)Bm	29.4 (0.46)Bf	36.3 (1.01)Bd
بیوچار ۲۰۰ درجه 200°C Biochar (B2)	9.98 (0.21)Ae	16.6 (0.57)Ab	9.94 (0.34)Ae	5.63 (0.26)Ag	25.9 (0.51)Bgh	16.6 (0.74)Bjk	33.4 (0.61)Be	41.3 (0.67)Bc
بیوچار ٤۰۰ درجه 400°C Biochar (B4)	15.4 (0.42) Ac	18.9 (0.30)Aa	12.1 (0.25)Ad	8.07 (0.27) Af	26.6 (0.83)Bg	25.3 (0.57)Bh	45.8 (0.49)Bb	49.1 (0.55)Ba
بیوچار ٦۰۰ درجه 600°C Biochar (B6)	6.09 (0.48) Ag	12.6 (0.30)Ad	4.00 (0.57)Ah	2.30 (0.48) Ai	15.8 (0.39)Bk	10.6 (0.18)Bl	16.8 (1.58)Bj	32.4 (0.13)Be
$LSD_{0.05}$	1.07				1.75			

اعداد نشان‌دهنده میانگین چهار تکرار هستند. اعداد داخل پرانتز خطای استاندارد را نشان می‌دهند. حروف بزرگ در هر ستون فقط نمونه شاهد را با تیمارها در همان ستون با آزمون LSD در سطح ۵ درصد مقایسه می‌نمایند. حروف کوچک نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار اثرات متقابل دوطرفه با آزمون LSD در سطح ۵ درصد آماری هستند.

Each data point is mean value of four replications with standard errors. Different uppercase letters in the same column for each application rate represent significant differences between unamended (C) and amended (B0–B6) soils by LSD's test at =0.05. Different lowercase letters represent significant differences for two-way interaction terms by LSD's test at =0.05.

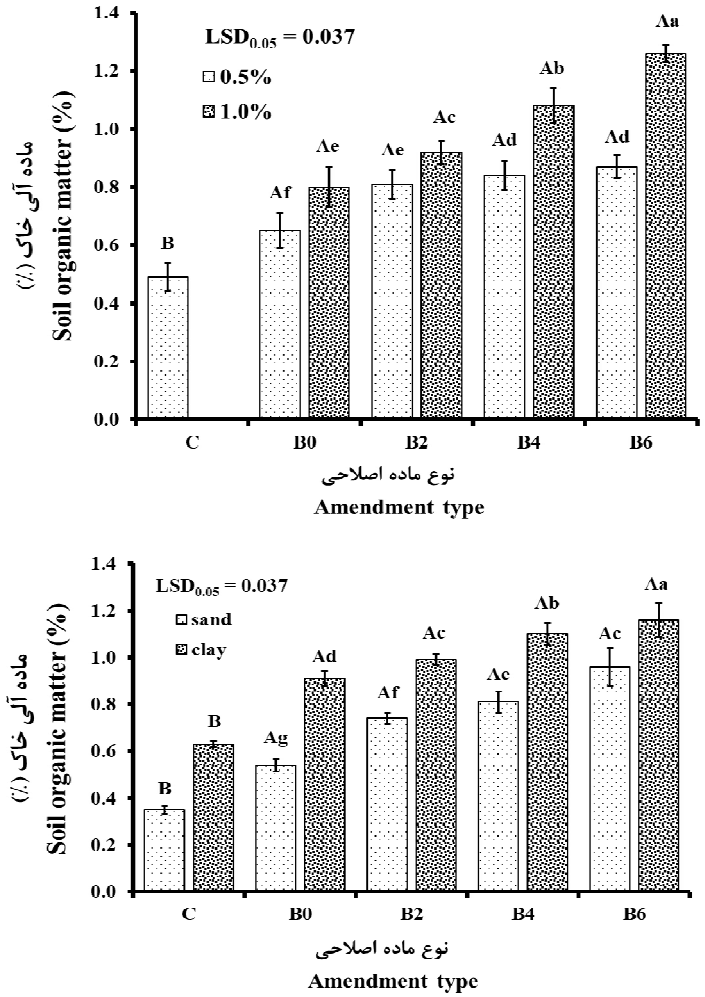
ادامه جدول ۳-

Continue Table 3.

	بافت شنی Sandy Texture		بافت رسی Clayey Texture		بافت شنی Sandy Texture		بافت رسی Clayey Texture	
	1%	0.5%	1%	0.5%	1%	0.5%	1%	0.5%
	هیدرولیز فلورسین دی استات (میکرومول فلورسین بر گرم بر ساعت) Fluorescein diacetate hydrolysis (µmol fluorecein $g^{-1}h^{-1}$)				تنفس ناشی از سوبسترا (میکروگرم دی اکسید کربن بر گرم بر ساعت) Substrate-Induced Respiration (µg CO_2 $g^{-1}h^{-1}$)			
شاهد Control (C)	0.23 (0.029)B	0.23 (0.029)B	0.15 (0.012)B	0.15 (0.012)B	14.4 (0.71)B	14.4(0.71) B	23.4 (1.10)B	23.4 (1.10)B
بقایای ذرت Corn Residue (B0)	0.64 (0.036)Aa	0.51 (0.027)Ac	0.57 (0.007)Ab	0.46 (0.029) Ae	45.5 (1.40)Ac	33.3 (0.62)Ah	62.0 (0.87)Aa	44.0 (0.74) Acd
بیوچار ۲۰۰ درجه 200°C Biochar (B2)	0.48 (0.020) Ad	0.39 (0.090)Ag	0.45 (0.015)Aef	0.28 (0.020)Aj	43.7 (0.71)Ade	31.4 (0.92)Aij	52.6 (1.56)Ab	40.7 (0.83)Ade
بیوچار ٤۰۰ درجه 400°C Biochar (B4)	0.42 (0.004)Af	0.35 (0.034)Ah	0.28 (0.015)Aj	0.19 (0.012)Al	27.7 (0.86)Ak	32.6 (0.23)Ahi	38.3 (1.13)Aef	37.5 (0.61)Aefg
بیوچار ٦۰۰ درجه 600°C Biochar (B6)	0.36 (0.005)Ah	0.32 (0.007)Ai	0.23 (0.029)Ak	0.19 (0.010)Al	31.8 (1.15)Ahi	26.9 (0.49)Ak	37.6 (0.66)Aefg	35.0 (0.78)Afgh
$LSD_{0.05}$	0.0247				2.60			

اعداد نشان‌دهنده میانگین چهار تکرار هستند. اعداد داخل پرانتز خطای استاندارد را نشان می‌دهند. حروف بزرگ در هر ستون فقط نمونه شاهد را با تیمارها در همان ستون با آزمون LSD در سطح ۵ درصد مقایسه می‌نمایند. حروف کوچک نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار اثرات متقابل دوطرفه با آزمون LSD در سطح ۵ درصد آماری هستند.

Each data point is mean value of four replications with standard errors. Different uppercase letters in the same column for each application rate represent significant differences between unamended (C) and amended (B0–B6) soils by LSD's test at =0.05. Different lowercase letters represent significant differences for two-way interaction terms by LSD's test at =0.05.



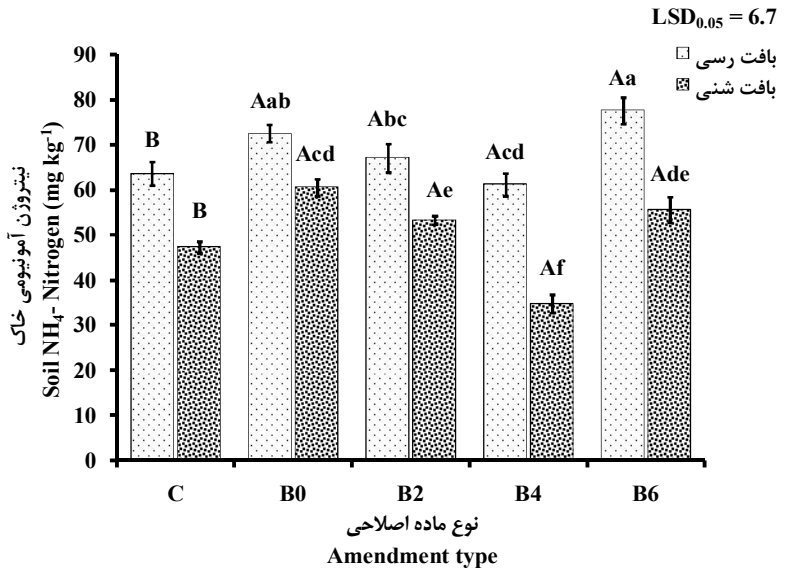
شکل ۱- تأثیر بیوچار بر میزان ماده آلی خاک. اعداد نشان‌دهنده میانگین‌های ۸ تکرار هستند و خط عمودی خطای استاندارد را برای هر میانگین نشان می‌دهد. حروف بزرگ نشان‌دهنده اختلاف تیمارها با شاهد (C) با آزمون LSD در سطح ۵ درصد آماری هستند. حروف کوچک اختلاف بین تیمارها براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد نشان می‌دهند). B0، B2، B4 و B6 به‌ترتیب بقایای بیوچار نشده و بیوچار تهیه شده در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس هستند.

Figure 1. Effect of biochar on soil organic matter (SOM). Values are mean (n = 8) and bars indicate S.E. Different uppercase letters represent significant differences between unamended (C) and amended (B0–B6) soils by LSD's test at α=0.05. Different lowercase letters represent significant differences among amended soils by LSD's test at α=0.05. B0, uncharred corn residue; B2, B4 and B6 corn biochars produced at 200 (B2), 400 (B4) and 600 °C (B6).

بالاترین میزان ماده آلی خاک در سطح یک درصد بیوچار دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس (۱/۲۶٪) و کم‌ترین میزان آن در تیمار شاهد (۰/۴۹٪) به‌دست آمد. هرچه دمای تولید بیوچار بالاتر باشد مقدار کم‌تری از کربن آن از خاک خارج می‌گردد. این نتیجه یکی از کاربردهای اصلی بیوچار، یعنی تثبیت کربن در خاک و افزایش ماده آلی خاک، را تبیین می‌نماید (۲۳).

مصرف بیوچار موجب کاهش میزان نیتروژن نیتراتی خاک گردید. بالاترین میزان نیتروژن نیتراتی در خاک رسی و سطح ۱٪ بیوچار ۴۰۰ درجه سلسیوس (۴۹/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کم‌ترین میزان آن در تیمار خاک شنی و سطح ۱٪ بقایای ذرت (۷/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به‌دست آمد (جدول ۳). حداکثر کاهش میزان نیتروژن نیتراتی در خاک رسی و

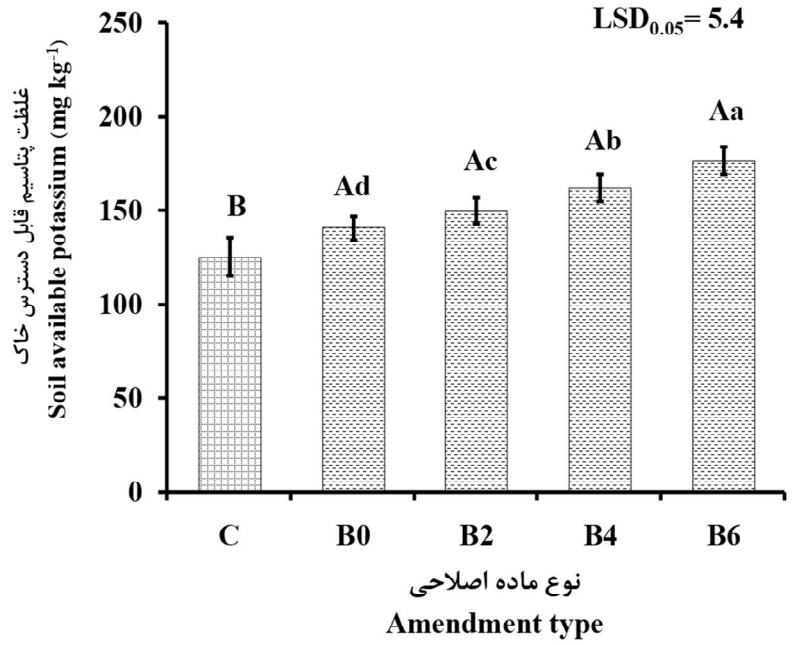
تیمارهای ۱٪ بقایای ذرت و بیوچار ۶۰۰ درجه به‌میزان ۴۵/۹ و ۶۹/۱ درصد مشاهده گردید. کم‌ترین میزان کاهش نیز در تیمار بیوچار ۴۰۰ درجه سلسیوس و در سطح ۱٪ به‌دست آمد. ایپولیتو و همکاران (۲۰۱۴) شستشوی کم‌تر نیترات از خاک تیمار شده با بیوچارهای تهیه شده در دماهای کم را به وجود مقدار زیادی کربن قابل تجزیه در این مواد نسبت داد که باعث توقف بیش‌تر نیتروژن می‌گردد (۲۲). آملوت و همکاران (۲۰۱۵) دریافتند که مصرف بیوچار موجب توقف نیتروژن می‌شود و شدت توقف به نوع مواد مورد استفاده در تولید بیوچار و دمای تهیه آن بستگی دارد (۴). نتایج مطالعه نلیسن و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که مصرف بیوچار باعث کاهش قابلیت دسترسی نیتروژن، می‌گردد. میزان این کاهش، به نوع بیوچار و دمای تهیه آن بستگی داشت و با افزایش دمای تولید بیوچار، بر شدت آن افزوده شد (۳۴). همچنین نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر متقابل بافت خاک و ماده اصلاحی بر آمونیوم خاک معنی‌دار است ($P<0/05$). بالاترین میزان آمونیوم خاک در خاک رسی و بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس (۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) ثبت شد و کم‌ترین مقدار آن در تیمار خاک شنی و بیوچار ۴۰۰ درجه سلسیوس (۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد (شکل ۲). روند تغییرات میزان آمونیوم در هر دو خاک یکسان بود و با افزایش دمای تولید بیوچار تا ۴۰۰ درجه کاهش و در دمای ۶۰۰ درجه افزایش یافت.



شکل ۲- تأثیر بیوچار بر میزان نیتروژن آمونیومی خاک. اعداد نشان‌دهنده میانگین‌های ۸ تکرار هستند و خط عمودی خطای استاندارد را برای هر میانگین نشان می‌دهد. حروف بزرگ نشان‌دهنده اختلاف تیمارها با شاهد (C) با آزمون LSD در سطح ۵ درصد آماری هستند. حروف کوچک اختلاف بین تیمارها براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد نشان می‌دهند.). B0، B2، B4 و B6 به‌ترتیب بقایای بیوچار نشده و بیوچار تهیه شده در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس هستند.

Figure 2. Effect of biochar on soil ammonium nitrogen. Values are mean (n = 8) and bars indicate S.E. Different uppercase letters represent significant differences between unamended (C) and amended (B0–B6) soils by LSD's test at α=0.05. Different lowercase letters represent significant differences among amended soils by LSD's test at α=0.05. B0, uncharred corn residue; B2, B4 and B6 corn biochars produced at 200 (B2), 400 (B4) and 600 °C (B6).

دمپستر و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند با مصرف بیوچار تهیه شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس میزان نیتروژن معدنی خاک شنی از ۱۱ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار شاهد به‌ترتیب به ۷ و ۱ میلی‌گرم در کیلوگرم در سطوح ۵ و ۲۵ تن در هکتار بیوچار کاهش یافت (۱۵). نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد فقط اثرات اصلی تیمارها بر میزان پتاسیم خاک معنی‌دار است. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد پتاسیم قابل دسترس خاک در خاک رسی بیشتر از خاک شنی بود و با افزایش سطح مصرف بیوچار افزایش یافت (اعداد نشان داده نشده است). هم‌چنین با افزایش دمای تولید بیوچار پتاسیم قابل دسترس خاک افزایش یافت و بالاترین میزان آن در تیمار بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس (۱۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به‌دست آمد. با افزایش دمای تولید بیوچار، پتاسیم موجود در آن افزایش یافت (جدول ۲) و این پتاسیم در خاکستر بیوچار موجود است و با افزودن بیوچار به خاک باعث افزایش میزان پتاسیم خاک می‌گردد (شکل ۳).

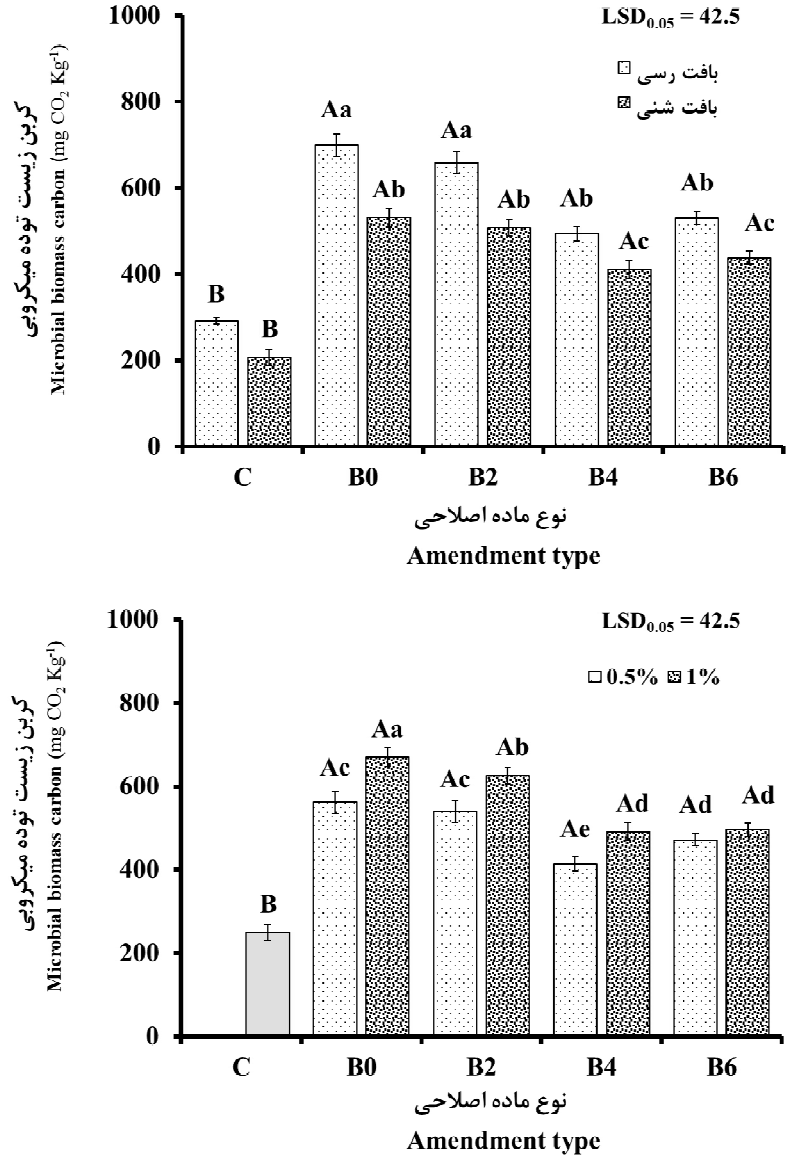


شکل ۳- تأثیر بیوچار بر پتاسیم قابل دسترس خاک. اعداد نشان‌دهنده میانگین‌های ۱۶ تکرار هستند و خط عمودی خطای استاندارد را برای هر میانگین نشان می‌دهد. حروف بزرگ نشان‌دهنده اختلاف تیمارها با شاهد (C) با آزمون LSD در سطح ۵ درصد آماری هستند. حروف کوچک اختلاف بین تیمارها براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد نشان می‌دهند). B0، B2، B4 و B6 به‌ترتیب بقایای بیوچار نشده و بیوچار تهیه شده در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس هستند.

Figure 3. Effect of biochar on soil available potassium. Values are mean (n = 8) and bars indicate S.E. Different uppercase letters represent significant differences between unamended (C) and amended (B0–B6) soils by LSD's test at α=0.05. Different lowercase letters represent significant differences among amended soils by LSD's test at α=0.05. B0, uncharred corn residue; B2, B4 and B6 corn biochars produced at 200 (B2), 400 (B4) and 600 °C (B6).

فسفر قابل دسترس خاک نیز همانند نیتروژن خاک با افزایش دمای تهیه بیوچار و همچنین سطح مصرف آن کاهش یافت. میزان فسفر قابل دسترس خاک در خاک رسی از ۱۵/۷ در تیمار شاهد به ۲/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار سطح ۱٪ بیوچار ۶۰۰ درجه سلسیوس و در خاک شنی از ۲۵ به ۶/۰۹ میلی‌گرم در کیلوگرم در همان تیمار کاهش یافت که به‌ترتیب کاهش ۸۵/۳ و ۷۵/۶ درصدی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج پژوهش ماستو و همکاران (۲۰۱۳) کاربرد بیوچار موجب افزایش، میزان مواد آلی خاک، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس خاک گردید. افزایش میزان این عناصر به افزایش pH خاک و اثر آهکی بیوچار در افزایش قابلیت جذب فسفر و افزوده شدن مستقیم پتاسیم توسط بیوچار نسبت داده شد (۳۰). علت عدم انطباق نتایج این مطالعه با مطالعه ماستو و همکاران (۲۰۱۳)، می‌تواند بالا بودن pH خاک مورد آزمایش در این پژوهش و همچنین pH بالای بیوچارهای مورد استفاده باشد که باعث فاصله گرفتن آن از محدوده حداکثر قابلیت دسترسی فسفر (pH=۶/۵) و کاهش قابلیت دسترسی آن می‌شود.

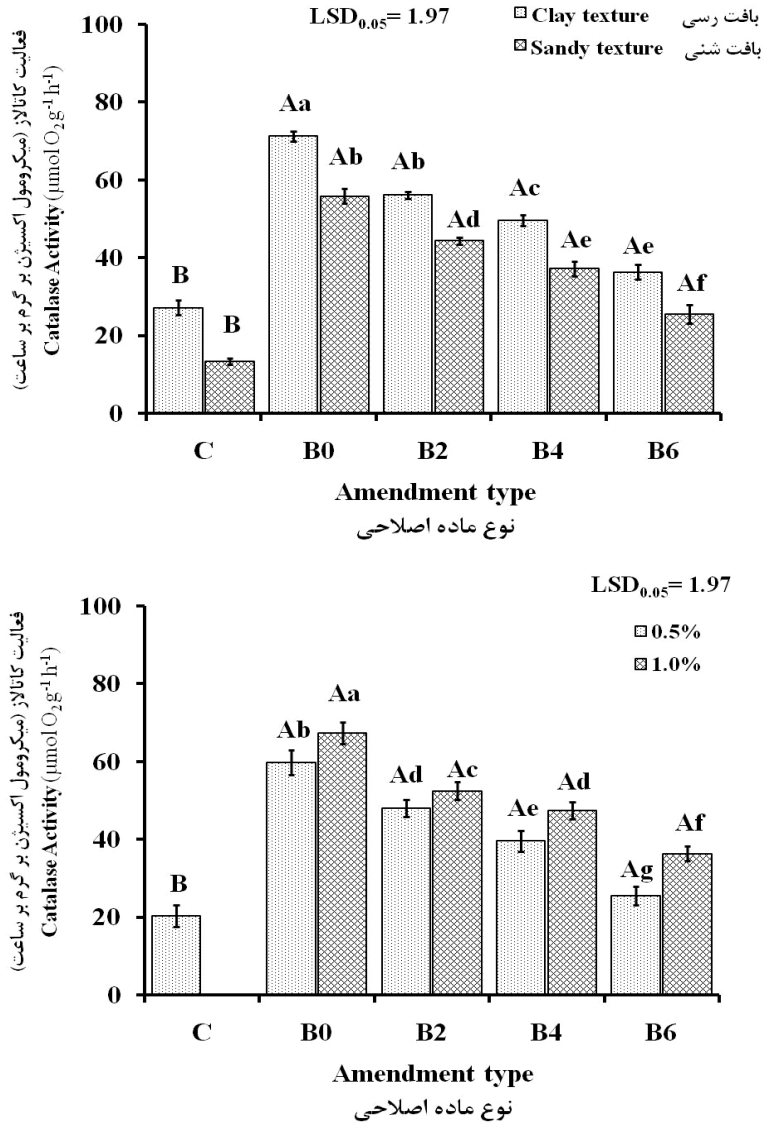
تأثیر بیوچار بر خصوصیات میکروبیولوژیکی خاک: نتایج نشان داد که بیوچار اثر معنی‌داری بر شاخص‌های میکروبیولوژیکی خاک از جمله تنفس ناشی از سوبسترا، زیست‌توده میکروبی و فعالیت آنزیمی خاک دارد (جدول ۲). طبق نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۳) مصرف بیوچار در هر دو خاک مورد مطالعه موجب افزایش تنفس ناشی از سوبسترا در مقایسه با شاهد گردید و شدت این افزایش با بالا رفتن دمای تهیه بیوچار کاهش یافت. همچنین بین دو نوع خاک نیز اختلاف معنی‌داری وجود داشت و تنفس ناشی از سوبسترا در خاک رسی بیش‌تر از خاک شنی بود. ولی افزایش تنفس ناشی از سوبسترا در خاک شنی بیش‌تر از خاک رسی بود، به‌طوری‌که مصرف بیوچار تنفس ناشی از سوبسترا را در خاک رسی بین ۵۰ تا ۱۶۵ درصد و در خاک شنی بین ۸۷ تا ۲۱۶ درصد افزایش داد که نشان‌دهنده تأثیر بیش‌تر این ماده بر متغیرهای میکروبیولوژیکی خاک شنی است. روتیگلیانو (۲۰۱۴) افزایش تنفس ناشی از ۱۶ سوبسترای مختلف را با مصرف بیوچار مشاهده نموده و پیشنهاد داد که مواد فرار و ترکیبات جذب سطحی شده روی سطح بیوچار بعد از گرماکافت ممکن است به‌عنوان سوبسترای قابل دسترس عمل نموده و موجب افزایش رشد و فعالیت میکروبی در چند ماه اول پس از مصرف بیوچار می‌گردد (۴۱). مصرف بیوچار سبب افزایش زیست‌توده میکروبی گردید که این افزایش به بافت خاک و سطح مصرف آن بستگی داشت (جدول ۲). با افزایش دمای تهیه بیوچار تا ۴۰۰ درجه زیست‌توده میکروبی در هر دو خاک کاسته شده و در بیوچار ۶۰۰ درجه مجدداً زیست‌توده میکروبی افزایش می‌یابد و تغییرات زیست‌توده میکروبی در خاک شنی بیش‌تر از خاک رسی بود (شکل ۴).



شکل ٤- تأثیر بیوچار بر کربن زیست‌توده میکروبی خاک. اعداد نشان‌دهنده میانگین‌های ۸ تکرار هستند و خط عمودی خطای استاندارد را برای هر میانگین نشان می‌دهد. حروف بزرگ نشان‌دهنده اختلاف تیمارها با شاهد (C) با آزمون LSD در سطح ۵ درصد آماری هستند. حروف کوچک اختلاف بین تیمارها براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد نشان می‌دهند). B0، B2، B4 و B6 به‌ترتیب بقایای بیوچار نشده و بیوچار تهیه شده در دماهای ۲۰۰، ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس هستند.

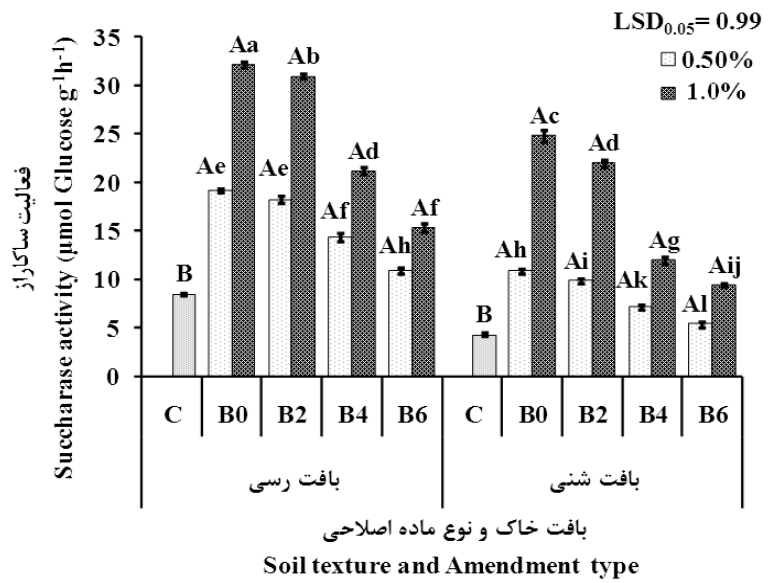
Figure 4. Effect of biochar on soil microbial biomass carbon (MBC). Values are mean (n = 8) and bars indicate S.E. Different uppercase letters represent significant differences between unamended (C) and amended (B0–B6) soils by LSD's test at α=0.05. Different lowercase letters represent significant differences among amended soils by LSD's test at α=0.05. B0, uncharred corn residue; B2, B4 and B6 corn biochars produced at 200 (B2), 400 (B4) and 600 °C (B6).

هم‌چنین سطح بیوچار اثر معنی‌دار بر زیست‌توده میکروبی هر دو خاک داشت و با افزایش میزان مصرف بیوچار بر زیست‌توده میکروبی افزوده شد. به‌طورکلی بالاترین زیست‌توده میکروبی در خاک رسی و در تیمار ۱ درصد بقایای ذرت ثبت شد. کم‌ترین میزان زیست‌توده میکروبی نیز در تیمار شاهد خاک شنی به‌دست آمد. افزودن بقایای ذرت به خاک همانند سایر مواد آلی موجب افزایش فعالیت و جمعیت میکروبی می‌گردد. بیوچار ۲۰۰ درجه نیز فقط آب‌زدایی شده و تغییر چندانی در ترکیب شیمیایی آن ایجاد نمی‌شود و مشابه به بقایای ذرت عمل کرده و موجب افزایش فعالیت و جمعیت میکروبی می‌شود. در بیوچارهای ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس مواد سهل‌الوصول به کلی تجزیه و یا تبدیل شده‌اند و نمی‌توانند به‌عنوان سوبسترا عمل نمایند و از این‌رو تأثیر چندانی در افزایش زیست‌توده میکروبی ندارند. افزایش زیست‌توده میکروبی با نتایج سایر پژوهشگران مطابقت دارد (١٤ و ٥٨). فعالیت آنزیمی خاک نیز به مصرف بیوچار واکنش مثبت نشان داد و با افزودن بیوچار به خاک افزایش محسوس یافت (جدول ۳). از چهار آنزیم مورد آزمایش اثر متقابل سه فاکتور آزمایشی بر همه آنزیم‌ها به‌جز کاتالاز معنی‌دار بود (جدول ۳، شکل‌های ٥، ٦ و ۷). فعالیت آنزیمی با افزایش سطح مصرف بیوچار رابطه مستقیم و با دمای تهیه بیوچار رابطه عکس داشت. از چهار آنزیم اندازه‌گیری‌شده در این پژوهش دو آنزیم جزء آنزیم‌های عمومی خاک (کاتالاز و هیدرولیز فلورسین) و دو آنزیم دیگر جزء آنزیم‌های اختصاصی هستند که در چرخه کربن و نیتروژن دخالت دارند. نتایج نشان داد در هر دو خاک مورد مطالعه، با افزایش سطح مصرف بیوچار فعالیت آنزیمی افزایش می‌یابد و با بالارفتن دمای تولید آن، از فعالیت آنزیمی خاک کاسته می‌شود. تغییرات فعالیت آنزیمی در خاک شنی بیش‌تر از خاک رسی بود. با افزودن بیوچار به خاک فعالیت آنزیم کاتالاز در خاک رسی و شنی به‌ترتیب بین ٣٤ تا ١٦٣ و ۹۲ تا ۳۲۰ درصد، ساکاراز ۲۷ تا ۲۷۹ و ۲٦ تا ٤٧٦ درصد، پروتئاز ٢٤ تا ١٨۰ و ۳ تا ١٨٦ درصد و هیدرولیز فلورسین دی‌استات ۲۷ تا ۲۸۰ و ٤۰ تا ۱۷۸ درصد افزایش یافت. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت افزودن بیوچار باعث افزایش کلی فعالیت آنزیمی خاک می‌گردد و این افزایش در خاک شنی بیش‌تر از خاک رسی است. با افزایش دمای تهیه بیوچار سهولت دسترسی ترکیبات کربن دار و قابل مصرف بیوچار برای ریزجانداران خاک کاسته شده و بنابراین تولید آنزیم توسط این جانداران کاهش می‌یابد. به‌علاوه با افزایش دمای گرماکافت سطح بیوچار افزایش یافته و مواد بیش‌تری روی سطح بیوچار جذب می‌شوند (۲۳) و جذب سطحی ملکول‌های آنزیم می‌تواند بسته به نوع آنزیم موجب افزایش فعالیت آن گردد (٤٩).



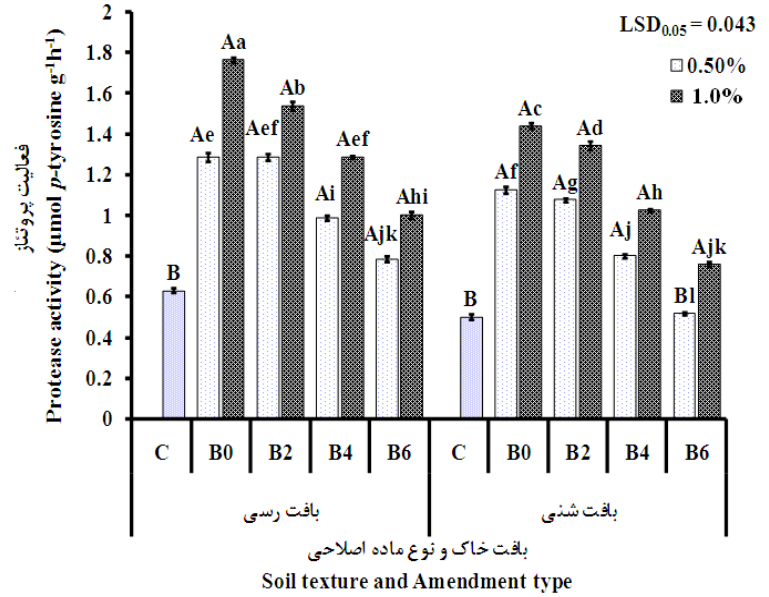
شکل ۵- تأثیر بیوچار بر فعالیت کاتالاز در خاک. اعداد نشان‌دهنده میانگین‌های ۸ تکرار هستند و خط عمودی خطای استاندارد را برای هر میانگین نشان می‌دهد. حروف بزرگ نشان‌دهنده اختلاف تیمارها با شاهد (C) با آزمون LSD در سطح ۵ درصد آماری هستند. حروف کوچک اختلاف بین تیمارها براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد نشان می‌دهند). B0، B2، B4 و B6 به‌ترتیب بقایای بیوچار نشده و بیوچار تهیه شده در دماهای ۲۰۰، ٤۰۰ و ٦۰۰ درجه سلسیوس هستند.

Figure 5. Effect of biochar on soil catalase activity. Values are mean (n = 8) and bars indicate S.E. Different uppercase letters represent significant differences between unamended (C) and amended (B0–B6) soils by LSD's test at α=0.05. Different lowercase letters represent significant differences among amended soils by LSD's test at α=0.05. B0, uncharred corn residue; B2, B4 and B6 corn biochars produced at 200 (B2), 400 (B4) and 600 °C (B6).



شکل ٦- تأثیر بیوچار بر فعالیت ساکاراز در خاک. اعداد نشان‌دهنده میانگین‌های ٨ تکرار هستند و خط عمودی خطای استاندارد را برای هر میانگین نشان می‌دهد. حروف بزرگ نشان‌دهنده اختلاف تیمارها با شاهد (C) با آزمون LSD در سطح ٥ درصد آماری هستند. حروف کوچک اختلاف بین تیمارها براساس آزمون LSD در سطح ٥ درصد نشان می‌دهند). B0، B2، B4 و B6 به‌ترتیب بقایای بیوچار نشده و بیوچار تهیه شده در دماهای ٢٠٠، ٤٠٠ و ٦٠٠ درجه سلسیوس هستند.

Figure 6. Effect of biochar on soil saccharase activity. Values are mean (n = 8) and bars indicate S.E. Different uppercase letters represent significant differences between unamended (C) and amended (B0–B6) soils by LSD's test at α=0.05. Different lowercase letters represent significant differences among amended soils by LSD's test at α=0.05. B0, uncharred corn residue; B2, B4 and B6 corn biochars produced at 200 (B2), 400 (B4) and 600 °C (B6).



شکل ٧- تأثیر بیوچار بر فعالیت پروتئاز در خاک. اعداد نشان‌دهنده میانگین‌های ٤ تکرار هستند و خط عمودی خطای استاندارد را برای هر میانگین نشان می‌دهد. حروف بزرگ نشان‌دهنده اختلاف تیمارها با شاهد (C) با آزمون LSD در سطح ٥ درصد آماری هستند. حروف کوچک اختلاف بین تیمارها براساس آزمون LSD در سطح ٥ درصد نشان می‌دهند). B0، B2، B4 و B6 به‌ترتیب بقایای بیوچار نشده و بیوچار تهیه شده در دماهای ٢٠٠، ٤٠٠ و ٦٠٠ درجه سلسیوس هستند.

Figure 7. Effect of biochar on soil protease activity. Values are mean (n = 4) and bars indicate S.E. Different uppercase letters represent significant differences between unamended (C) and amended (B0–B6) soils by LSD's test at α=0.05. Different lowercase letters represent significant differences among amended soils by LSD's test at α=0.05. B0, uncharred corn residue; B2, B4 and B6 corn biochars produced at 200 (B2), 400 (B4) and 600 °C (B6).

بالاترین میزان فعالیت آنزیمی در تیمار بقایای ذرت ثبت شد. بقایای ذرت مقدار زیادی ترکیبات قابل دسترس برای میکروب‌ها دارد و مصرف آن در خاک موجب افزایش فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک می‌گردد. به‌طورکلی افزودن بقایای آلی در نتیجه تکثیر میکروب‌ها و القاء فعالیت آنزیمی، افزایش حفاظت آنزیم بر اثر افزایش میزان هوموس خاک، تحریک ترشح آنزیم و ایجاد کمپلکس با فلزات سمی مانند سرب، نیکل و کادمیم موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های خاک می‌گردد (۱۸، ۲۵ و ۵۱). مستو و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر بیوچار سنبل آبی را بر فعالیت بیولوژیکی خاک مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها افزایش فعالیت فسفاتاز اسیدی (۳۲٪)، فسفاتاز قلیایی (۲۳٪)، هیدرولیز فلورسین دی‌استات (۵۰٪)، کاتالاز (۸۰٪)، دهیدروژناز (۲۱٪) را در سطح ۲ درصد بیوچار نشان داد. دلیل افزایش فعالیت آنزیمی بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله pH، ماده آلی و نگه‌داری آب در خاک بیان گردید (۳۰). نتایج پژوهش پازفریرو و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که افزودن بیوچار تولید شده در ۶۰۰ درجه سلسیوس موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های بتاگلوکوزیداز، ساکاراز، بتاگلوکزآمینیداز، اوره‌آز و آریل‌سولفاتاز در خاک لوم رسی‌شنی گردید. دلایل افزایش فعالیت آنزیمی در این مطالعه جذب سطحی باکتری‌ها توسط بیوچار و ممانعت از شکار شدن توسط سایر جانداران و همچنین شستشوی آن‌ها از خاک، حفاظت باکتری‌ها و قارچ‌ها در مقابل چرا شدن توسط سایر جانداران، تأمین بخشی از نیاز غذایی میکروب‌ها توسط بیوچار و در نهایت اثر آهکی بیوچار (افزایش pH خاک) عنوان گردید (۳۹). هم‌چنین نتایج این پژوهش با مطالعه اویانگ و همکاران (۲۰۱٤) و اککا و ناملی (۲۰۱۵) مطابقت دارد (۳۸ و ۳).

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد مصرف بیوچار اثرات مثبت معنی‌دار بر خصوصیات شیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک‌های مورد مطالعه دارد. اگرچه با مصرف بیوچار فسفر قابل دسترس و نیتروژن نیتراتی خاک کاهش یافت، با این وجود، اثرات مثبت این ماده اصلاحی در ارتقاء فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک بسیار بیش‌تر از اثرات منفی آن بود. از آن‌جا که یکی از مشکلات عمده خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران کمبود مواد آلی و در نتیجه خصوصیات نامطلوب ناشی از این کمبود است، افزودن بیوچار به این نوع خاک‌ها باعث افزایش سطح مواد آلی خاک و متعاقب آن باعث بهبود خصوصیات شیمیایی خاک می‌گردد. با این‌حال، تأثیر بیوچار بر خصوصیات خاک به‌میزان مصرف و نوع بافت خاک و حتی نوع ویژگی اندازه‌گیری‌شده بستگی داشت. بالاترین اثر بیوچار بر خصوصیات شیمیایی و میکروبی خاک در سطح مصرف ۱٪ به‌دست آمد. از طرفی تأثیر بیوچار بر اصلاح خصوصیات خاک شنی فقیرتر از نظر مواد آلی بیش‌تر بود، به‌عنوان مثال میانگین افزایش ماده آلی و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و ساکاراز در این نوع خاک حدود ۲ برابر خاک رسی بود در حالی‌که افزایش فعالیت پروتئاز در هر دو خاک تقریباً مساوی بود و هیدرولیز فلورسین دی‌استات در خاک رسی ۱/۵ برابر خاک شنی بود. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت افزودن بیوچار باعث افزایش کلی فعالیت آنزیمی خاک می‌گردد و این افزایش در خاک شنی بیش‌تر از خاک رسی است. از متغیرهای مورد آزمایش، فعالیت آنزیمی بیش‌ترین عکس‌العمل را به مصرف بیوچار نشان داد. از این‌رو با توجه به نقش بیوچار در افزایش

مواد آلی و هم‌چنین بهبود فعالیت میکروبی خاک توصیه می‌گردد از این ماده اصلاحی جهت اصلاح و بهبود وضعیت میکروبیولوژیکی خاک و کیفیت آن استفاده گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه شهرکرد به‌دلیل تأمین هزینه این پژوهش سپاسگزاری می‌نمایند.

منابع

1.Alef, K., and Nannipieri, P. 1995. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Academic Press. Pp: 214-216.
2.Al-Wabel, M., Al-Omran, A., El-Naggar, A.H., Nadeem, M., and Usman, A.R.A. 2013. Pyrolysis temperature induced changes in characteristics and chemical composition of biochar produced from conocarpus wastes. Biores. Technol. 131: 374-379.
3.Akca, M.O., and Namli, A. 2015. Effects of poultry litter biochar on soil enzyme activities and tomato, pepper and lettuce plants growth. Eurasian. J. Soil. Sci. 4: 161-168.
4.Ameloot, N., Sleutel, S., Das, K.S., Kanagaratnam, J., and De Neve, S. 2015. Biochar amendment to soils with contrasting organic matter level: effects on N mineralization and biological soil properties. Glob. Chang. Biol. Bioenergy. 7: 135-144.
5.Amonette, J.E., and Joseph, S. 2009. Characteristics of biochar: Micro chemical properties. P 33-52, In: J. Lehmann and S. Joseph (Eds.), Biochar for Environmental Management. Science and Technology. Earthscan, United Kingdom.
6.Awad, Y.M., Blagodatskaya, E., Ok, Y.S., and Kuzyakov, Y. 2012. Effects of polyacrylamide, biopolymer and biochar on decomposition of soil organic matter and plant residues as determined by 14 ºC and enzyme activities. Eur. J. Soil. Biol. 48: 1-10.
7.Cao, X., and Harris, W. 2010. Properties of dairy manure derived biochar pertinent to its potential use in remediation. Biores. Technol. 101: 5222-5228.
8.Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meazaros, I., Downie, A., and Joseph, S. 2008. Poultry litter biochars as soil amendments. Aust. J. Soil Res. 46: 437-444.
9.Chintala, R., Mollinedo, J., Schumacher, T.E., Malo, D.D., and Julson, J.L. 2013. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. Arch. Agron. Soil Sci. 60: 393-404.
10.Cimo, G., Kucerik, J., Berns, A.E., Schaumann, G.E., Alonzo, G., and Conte, P. 2014. Effect of heating time and temperature on the chemical characteristics of biochar from poultry manure. J. Agric. Food Chem. 62: 1912-1918.
11.Cohen, G.J., Dembiec, D., and Marcus, J. 1970. Measurement of catalase activity in tissue extracts. Anal. Biochem. 34: 30-38.
12.Crombie, K., Masek, O., Sohi, S.P., Brownsort, P., and Cross, A. 2013. The effect of pyrolysis conditions on biochar stability as determined by three methods. Glob. Chang. Biol. Bioenergy. 5: 122-131.
13.Cui, L., Yan, J., Yang, Y., Li, L., Quan, G., Ding, C., Chen, T., Fu, Q., and Chang, A. 2013. Biochar for heavy metals in soil. Biores. Technol. 8: 5536-5548.
14.Demisie, W., and Zhang, M. 2015. Effect of biochar application on microbial biomass ad enzymatic activity in degraded red soil. Afr. J. Agric. Res. 10: 755-766.
15.Dempster, D.N., Gleeson, D.B., Solaiman, Z.M., Jones, D.L., and Murphy, D.V. 2012. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralization with eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. Plant Soil. 354: 311-324.
16.El-Mahrouky, M., El-Naggar, A.H., Usman, A.R., and Al-Wabel, M. 2015. Dynamics of CO_2 emission and biochemical properties of a sandy calcareous soil amended with conocarpus waste and biochar. Pedosphere. 25: 46-56.

17.Farrell, M., Kuhn, T.K., Macdonald, L.M., Maddern, T.M., Murphy, D.V., Hall, P.A., Singh, B.P., Baumann, K., Krull, E.S., and Baldock, J.A. 2013. Microbial utilization of biochar derived carbon. Sci. Total. Environ. 465: 288-297.
18.Galvez, A., Siniccoa, T., Cayuelac, M.L., Mingoranceb, M.D., Fornasiera, F., and Mondinia, C. 2012. Short term effects of bioenergy byproducts on soil C and N dynamics, nutrient availability and biochemical properties. Agr. Ecosyst. Environ. 160: 3-14.
19.Gianfreda, L., and Ruggiero, P. 2006. Enzyme activities in soil. P 257-311, In: P. Nannipieri and K. Smalla (Eds.), Nucleic acids and proteins in soil. Soil Biology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
20.Gul, S., Whalen, J.K., Thomas, B.W., Sachdeva, V., and Deng, H. 2015. Physicochemical properties and microbial responses in biochar amended soils: Mechanisms and future directions. Agr. Ecosys. Environ. 206: 46-59.
21.Helmke, P.A., and Sparks, D.L. 1996. Lithium, sodium, potassium, rubidium and cesium. P 551-574, In: D.L. Sparks (Ed.), Methods of soil analysis. Part 3: Chemical properties. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
22.Ippolito, J.A., Stromberger, M.E., Lentz, R.D., and Dungan, R.S. 2014. Hardwood biochar influences calcareous soil physicochemical and microbiological status. J. Environ. Qual. 43: 681-689.
23.Jindo, K., Mizumoto, H., Sawada, Y., Sanchez-Monedero, M.A., and Sonoki, T. 2014. Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. Biogeoscience. 11: 6613-6621.
24.Joergensen, R.G. 1995. Microbial biomass estimation: the fumigation incubation method. P 376-381, In: K. Alef and P. Nannipieri (Eds.), Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Academic Press.
25.Karami, N., Clemente, R., Jimenez, E.M., Lepp, N.W., and Beesley, L. 2011. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass. J. Hazard. Mater. 191: 41-48.
26.Keeney, D.R., and Nelson, D.W. 1982. Nitrogen-inorganic forms. P 643-698, In: A.L. Page, D.R. Miller and D.R. Keeney (Eds.), Method of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, American Society of Agronomy.
27.Ladd, J.N., and Butler, J.H.A. 1972. Short term assay of soil proteolytic enzyme activities using proteins and dipeptide derivatives as substrates. Soil. Biol. Biochem. 4: 19-30.
28.Lehmann, J., Gaunt, J., and Rondon, M. 2006. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems – a review. Mitigat. Adap. Strat. Glob. Chang. 11: 403-427.
29.Lehmann, J., and Joseph, S. 2009. Biochar for environmental management- an introduction. P 1-11, In: J. Lehmann and S. Joseph (Eds.), Biochar for environmental management: Science and Technology. Earthscan, London.
30.Masto, R.E., Kumar, S., Rout, T.K., Sarkar, P., George, J., and Ram, L.C. 2013. Biochar from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and its impact on soil biological activity. Catena. 111: 64-71.
31.Mukherjee, A., and Lal, R. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. Agronomy. 3: 313-339.
32.Mukherjee, A., Lal, R., and Zimmerman, A.R. 2014. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. Sci. Total. Environ. 487: 26-36.
33.Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. P 539-577, In: A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney (Eds.), Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, American Society of Agronomy.
34.Nelissen, V., Ruysschaert, G., Stover, D.M., Bode, S., Cook, J., Ronsse, F., Shackley, S., Boeckx, P., and Nielsen, H.H. 2014. Short term effect of feedstock and pyrolysis temperature on biochar characteristics, soil and crop response in temperate soils. Agronomy. 4: 52-73.

35.Njoku, C., Uguru, B.N., and Chibuike, C.C. 2016. Use of biochar to improve selected soil chemical properties, carbon storage and maize yield in an ultisol in Abakaliki Ebonyi State, Nigeria. Int. J. Environ. Agric. Res. 2: 15-22.
36.Novak, J.M., Busscher, W.J., Laird, D.L., Ahmedna, M., Watts, D.W., and Niandou, M.A.S. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. Soil Sci. 174: 105-112.
37.Ouyang, L., Wang, F., Tang, J., Yu, L., and Zhang, R. 2013. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. J. Soil. Sci. Plant. Nutr. 13: 991-1002.
38.Ouyang, L., Tang, Q., Yu, L., and Zhang, R. 2014. Effects of amendment of different biochars on soil enzyme activities related to carbon mineralization. Soil Res. 52: 706-716.
39.Paz-Ferreiro, J., Gasco, G., Gutierrez, B., and Mendez, A. 2012. Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil. Biol. Fertil. Soils. 48: 511-517.
40.Rodriguez, M. 2010. Biochar as a strategy for sustainable land management, poverty reduction and climate change mitigation/adaptation. Master of Science Thesis. University of Amsterdam, the Netherland.
41.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. Eur. J. Soil Biol. 60: 9-15.
42.Sagrilo, E., Ritt, T.F., Hoffland, E., Alves, J.R., Meh, H.U., and Kuyper, T.W. 2015. Rapid decomposition of traditionally produced biochar in an Oxisol under savannah in Northeastern Brazil. Geoder. Region. 6: 1-6.
43.Salem, M., Kohler, J., Wurst, S., and Rillig, M.C. 2013. Earthworms can modify effects of hydrochar on the growth of *Plantagolanceolata* and performance of arbuscular mycorrhizal fungi. Pedobiologia. 56: 219-224.
44.Schnurer, J., and Rosswall, T. 1982. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. Appl. Environ. Microbiol. 43: 1256-1261.
45.Shiner, F., and Von Mersi, W. 1990. Xylanase, CM-cellulose and invertase activity in soil: an improved method. Soil. Biol. Biochem. 22: 511-515.
46.Singh, A., Biswas, A.K., Singhai, R., Lakaria, L.B., and Dubey, A.K. 2015. Effect of pyrolysis temperature and retention time on mustard straw derived biochar for soil amendment. J. Basic. Appl. Sci. Res. 5: 31-37.
47.Ścisłowska, M., Włodarczyk, R., Kobyłecki, R., and Bis, Z. 2015. Biochar to improve the quality and productivity of soils. J. Ecol Engin. 16: 31-35.
48.Spokas, K.A., and Reicosky, D.C. 2009. Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production. Annal. Environ. Sci. 3: 179-193.
49.Sun, Z., Bruun, E.W., Arthur, E., Jonge, L.W., Moldrup, P., Nielsen, H.H., and Elsgaard, L. 2014. Effect of biochar on aerobic processes, enzyme activity and crop yields in two sandy loam soils. Biol. Fertil. Soils. 50: 1087-1097.
50.Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. P 475-483, In: D.L. Sparks (Ed.), Methods of soil analysis. Part 3: Chemical properties. Soil Science Society of America and America Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
51.Uchimiya, M., Wartelle, L.H., Klasson, K.T., Fortier, C.A., and Lima, I.M. 2011. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil. J. Agric. Food Chem. 59: 2501-2510.
52.Wang, S., Gao, B., Zimmerman, A.R., Li, Y., Mad, L., Harris, W.G., and Migliaccio, K.W. 2015. Physicochemical and sorptive properties of biochars derived from woody and herbaceous biomass. Chemosphere. 134: 257-262.
53.Watzinger, A., Feichtmair, S., Kitzler, B., Zehetner, F., Kloss, S., Wimmer, B., Boltenstern, S.Z., and Soja, G. 2014. Soil microbial communities responded to biochar application in temperate soils and slowly metabolized ^{13}C-labelled biochar as revealed by ^{13}C PLFA analysis: results from a short term incubation and pot experiment. Eur. J. Soil Sci. 65: 40-51.

54. Wu, F., Jia, Z., Wang, S.S., Chang, X., and Startse, A. 2013. Contrasting effects of wheat straw and its biochar on greenhouse gas emissions and enzyme activities in a Chernozemic soil. Biol. Fertil. Soils. 49: 555-565.
55. Yang, H., and Sheng, K. 2012. Characterization of biochar properties affected by different pyrolysis temperatures using visible near infrared spectroscopy. Int. Schol. Res. Net. Spect. ID: 712837.
56. Yang, H.P., Yan, R., Chin, T., Liang, D.T., Chen, H.P., and Zheng, C.G. 2004. Thermogravimetric analysis - Fourier transform infrared analysis of palm oil wastes pyrolysis. Energ. Fuel. 18: 1814-1821.
57. Yuan, J.H., and Xu, R.K. 2011. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. Soil Use. Manag. 27: 110-115.
58. Zhang, Q.Z., Dijkstra, F.A., Liu, X., Wang, Y., Huang, J., and Lu, N. 2014. Effects of biochar on soil microbial biomass after four years of consecutive application in the north china plain. PLOS ONE, 9: e1020.

J. of Soil Management and Sustainable Production, Vol. 8(1), 2018
http://ejsms.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/ejsms.2017.12547.1709

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

The effect of corn biochar on chemical and microbiological properties of two calcareous soils with clayey and sandy texture

***A. Khadem[1], F. Raiesi[2] and H. Besharati[3]**
[1]Ph.D. Student, Dept. of Soil Science and Engineering, Shahrekord University,
[2]Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, Shahrekord University, [3]Research Professor,
Soil and Water Research Institute, Agricultural Research and Education Organization, Karaj, Iran
Received: 05/19/2017; Accepted: 11/28/2017

Abstract

Background and Objectives: Biochar is a carbon-rich material that is obtained by heating organic feedstock in a limited or absence of oxygen. In general, biochar stimulates soil microbial activity by improvements in soil physiochemical properties such as increasing cation exchange capacity, altering soil pH and direct addition of nutrients, porosity and water holding capacity. Pyrolysis temperature and soil texture are the significant factors affecting soil responses to biochar application. However, there are very limited studies on biochar impact on chemical and microbiological properties of calcareous soils. The aim of this study was to evaluate the effect of corn biochars obtained at different temperatures on the chemical and microbiological characteristics of two calcareous soils with sandy and clayey texture.

Materials and Methods: The soils used in this study were sampled from the surface layer at two different sites around Karaj city, Alborz province, Iran. Corn raw material and biochars produced at 200, 400 and 600 ºC were mixed at 0.5 and 1% (w/w) with the soils and incubated for 90 days. Soil chemical parameters such as pH and electrical conductivity, organic matter, inorganic nitrogen, available K and P; microbiological characteristics including substrate-induced respiration, microbial biomass carbon and enzyme activities (protease, saccharase, catalase and fluorescein diacetate hydrolysis) were measured.

Results: The results showed that with increasing pyrolysis temperature, biochar pH (10-97%), ash content (378-75%), specific surface area (214-1472%), carbon content (19-54%) and carbon enrichment factor (20-54%) were increased, while the cation exchange capacity (12-45%), concentration of hydrogen (76-9%) and volatile matter (16-70%) were reduced. Biochar application increased soil pH (2-5%), electrical conductivity (8-66%), organic matter (36-161%), ammonium-nitrogen (6-28%), available potassium (12-40%), substrate-induced respiration (50-216%), catalase activity (34-320%), saccharase (26-476%), protease (3-186%) and hydrolysis of fluorescein diacetate (27-280%) relative to the control, whereas nitrate-nitrogen (10-77%) and available phosphorus (23-86%) tended to decrease with biochar addition. Increasing pyrolysis temperature increased soil pH (1-11%), electrical conductivity (1-38%), organic matter (18-179%), available phosphorus (2-150%), available potassium (5-25%) when compared with the raw corn residues, while decreased ammonium-nitrogen (7-43%), nitrate-nitrogen (10-77%), microbial biomass carbon (4-27%), substrate-induced respiration (2-39%), catalase activity (21-54%), saccharase (3.7-62%), protease (0-54%) and fluorescein diacetate hydrolysis (21-60%).

Conclusions: The findings demonstrated that the positive effect of biochar application on soil chemical and microbiological properties depends upon its application rate, soil texture and the soil attributes involved. The most desirable effect of corn biochars on soil chemical and microbiological properties was observed at 1% application rate in sandy soil. Of the evaluated soil variables, enzyme activity showed the greatest response to biochar application. In brief, biochar is a valuable soil amendment with a positive effect on soil quality in arid and semi-arid environments. Therefore, biochar application is recommended for increasing soil organic matter pool and consequently improving chemical and microbiological conditions of calcareous soils in Iran.

Keywords: Application rate, Biochar, Enzyme activity, Pyrolysis temperature

* Corresponding Author; Email: akhadem1361@gmail.com