تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۲، شماره ۹، آذر ۱۴۰۰ (ص ۲۳۴۴-۲۳۳۳)
https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.326780.669017 (علمی - پژوهشی)

Impact of Application of Sulfur Modified Biochar on Some Biochemical and Microbiological Attributes of Soil

AKBAR KARIMI[1*], ABDOLAMIR MOEZZI[1], MOSTAFA CHOROM[1] AND NAEIMEH ENAYATIZAMIR[1]
1. Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
(Received: July. 6, 2021- Revised: July. 31, 2021- Accepted: Aug. 22, 2021)

ABSTRACT

Biochar application to soil improve organic carbon and soil quality. The objective of this study was to investigate the effect of biochar and sulfur modified biochar (prepared from sugarcane bagasse and corn residue) on changes in organic carbon and biochemical and microbiological characteristics of a calcareous soil under corn cultivation. This study was conducted in a completely randomized design with five treatments and four replications. Corn residue and sugarcane bagasse biochar and their modified biochar were mixed at 1% (w/w) with the soil sample, and corn was grown in 5 kg pots. The results indicated that the application of biochar and biochar modified with sulfur caused a significant increase in total (56.7-115.4%) and dissolved organic carbon (24.3-60.9%) of the soil, microbial basal respiration (43.8-85.8%), substrate-induced respiration (44.5-98.9%), microbial biomass carbon (54.8-93.4%), dehydrogenase (108.0-114.7) and catalase (105.4-151.6%) activity. Comparison between the two feedstock has revealed that corn residue biochar was more effective in improving total and dissolved organic carbon and soil biochemical attributes than sugarcane bagasse biochar. The positive impact of sulfur-modified biochar on dissolved organic carbon, microbial biomass carbon and catalase activity was significantly greater than the raw biochar. The greatest value of dissolved organic carbon, microbial basal respiration, and substrate induced respiration as well as dehydrogenase, and catalase activity, were related to the biochar treatment of modified corn residue. In general, the results of this study demonstrated that biochar derived from corn residue and sugarcane bagasse could be a suitable organic amendment to improve soil organic matter and soil biochemical properties. In addition, modification of biochar with sulfur and production of acidic biochar can increase its efficiency in improving soil microbial activity.

Keywords: Enzyme Activity, Feedstock, Organic Matter, Soil Microorganisms, Soil Quality**.**

* Corresponding Author's Email: akbar.karimi84@yahoo.com

پیامد کاربرد بیوچار اصلاح‌شده با گوگرد بر برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک

اکبر کریمی[1*]، عبدالامیر معزی[1]، مصطفی چرم[1]، نعیمه عنایتی ضمیر[1]

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

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۱۵- تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۵/۹- تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۵/۳۱)

چکیده

کاربرد بیوچار در خاک می‌تواند در بهبود کربن آلی و کیفیت خاک مؤثر باشد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر بیوچار و بیوچار اصلاح شده با گوگرد (تهیه شده از باگاس نیشکر و بقایای ذرت) بر تغییرات کربن آلی و ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی یک خاک آهکی تحت کشت ذرت بود. این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تیمار و در چهار تکرار انجام شد. بیوچارهای بقایای ذرت و باگاس نیشکر و بیوچارهای اصلاح شده آن‌ها، در سطح یک درصد وزنی با نمونه خاک ترکیب شده و کشت گیاه ذرت در گلدان‌های پنج کیلوگرمی انجام شد. نتایج نشان داد کاربرد بیوچار و بیوچار اصلاح شده با گوگرد سبب افزایش معنی‌دار کربن آلی کل (۱۱۵/۴- ۵۶/۷ درصد) و محلول (۶۰/۹- ۲۴/۳ درصد) خاک، تنفس میکروبی (۱۱۴/۷- ۱۰۸/۰ درصد)، تنفس برانگیخته با سوبسترا (۹۸/۹- ۴۴/۵ درصد)، کربن زیست‌توده میکروبی (۹۳/۴ – ۵۴/۸ درصد)، فعالیت دهیدروژناز (۱۱۴/۷- ۱۰۸/۰ درصد) و کاتالاز (۱۵۱/۶- ۱۰۵/۴ درصد) شد. مقایسه میان دو زیست‌توده نشان داد بیوچار بقایای ذرت در مقایسه با بیوچار باگاس نیشکر در بهبود کربن آلی کل و محلول خاک و ویژگی‌های بیوشیمیایی خاک، مؤثرتر بود. اثر مثبت بیوچارهای اصلاح شده با گوگرد بر کربن آلی محلول، کربن زیست‌توده میکروبی و فعالیت کاتالاز، به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از بیوچارهای اولیه بود. بیش‌ترین مقدار کربن آلی محلول، تنفس میکروبی پایه و تنفس ناشی از سوبسترا و همچنین فعالیت دهیدروژناز و کاتالاز مربوط به تیمار بیوچار بقایای ذرت اصلاح شده بود. به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد بیوچارهای تهیه شده از بقایای ذرت و باگاس نیشکر می‌توانند اصلاح کننده آلی مناسبی برای بهبود ماده آلی خاک و ویژگی‌های بیوشیمیایی خاک باشند. افزون بر این، اصلاح بیوچار با گوگرد و تهیه بیوچار اسیدی می‌تواند کارایی آن در بهبود بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک را افزایش دهد.

واژه های کلیدی: ریزجانداران خاک، زیست‌توده، فعالیت آنزیمی، کیفیت خاک، ماده آلی.

مقدمه

یکی از محدودیت های حاصلخیزی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک موضوع کمبود مواد آلی خاک می‌باشد (El-Naggar *et al.*, 2019). مقدار مواد آلی در بخش عمده اراضی کشاورزی ایران بسیار کم‌تر از حد مطلوب است. بررسی‌ها نشان داده در بیش از ۶۳٪ از اراضی زیر کشت ایران مقدار ماده آلی کمتر از یک درصد می‌باشد (Shahbazi and Besharati, 2013). بنابراین برای حفظ کیفیت و حاصلخیزی خاک، بهبود ویژگی‌های خاک و حفظ تعادل در عوامل زیست محیطی، افزودن مواد آلی به خاک‌های کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک امری ضروری است (El-Naggar *et al.*, 2019).

توجه به مدیریت مواد آلی، افزون بر بهبود کیفیت خاک، سبب کاهش تصاعد کربن آلی به اتمسفر و پیامدهای نامطلوب ناشی از آن می‌شود. سالانه میلیون‌ها تن ضایعات مختلف کشاورزی در کشور تولید می‌شود، که می‌تواند در تأمین ماده آلی خاک موثر باشد؛ اما متاسفانه بخش عمده این ضایعات سوزانده می‌شود (Farzadkia *et al.*, 2015). کاربرد بیوچار به‌عنوان یک اصلاح‌کننده‌های آلی، جهت افزایش مواد آلی خاک، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است (Siedt *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021). بیوچار یک ماده غنی از کربن است که از تجزیه حرارتی زیست‌توده‌های مختلف در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن کم تهیه می‌شود (Lehmann and Joseph, 2015; Yu *et al.*, 2019). نتایج مطالعات نشان داده افزودن بیوچار به خاک به‌عنوان یک منبع کربن در اراضی کشاورزی می‌تواند در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (Siedt *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021)، ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک (Song *et al.*, 2018; Karimi *et* Sheng and Zhu, 2018; Yu *et al.*, 2020a) و کیفیت و حاصلخیزی خاک مؤثر باشد (2019; Siedt *et al.*, 2021; Karimi *et al.*, 2020a,b).

کیفیت خاک افزون بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن،

* نویسنده مسئول: akbar.karimi84@yahoo.com

ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های بیولوژیکی آن دارد. ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت خاک می‌باشند. برای ارزیابی تغییرات کیفیت خاک شاخص‌های بیوشیمیایی مانند تنفس میکروبی پایه، تنفس ناشی از سوبسترا، زیست‌توده میکروبی و فعالیت آنزیمی، که نشان‌دهنده تنوع و چگونگی فعالیت ریزجانداران خاک هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند (Karimi *et al*., 2020b; Manirakiza *et al*., 2021). تنفس میکروبی نه‌تنها نشان‌دهنده وضعیت و فعالیت میکروب‌های خاک است، بلکه مشخص کننده روند، تعادل و چگونگی تجزیه ماده آلی، فعالیت آنزیمی و چرخه برخی عناصر غذایی خاک نیز می‌باشد (Gogoi *et al*., 2020) فراوانی ترکیبات آلی در ریزوسفر، سبب افزایش تنفس میکروبی می‌شود، چرا که این مواد منبع عناصر غذایی و انرژی لازم برای ریزجانداران خاک می‌باشند. نقش زیست‌توده میکروبی به‌عنوان مخزن قابل‌توجه عناصرغذایی و تغییرات مواد آلی خاک مسلم است، به‌طوری که معدنی شدن پیش‌ماده‌های آلی اغلب ناشی از فعالیت زیست‌توده میکروبی خاک است (Knoblauch *et al*., 2021). آنزیم‌های خاک به‌عنوان شاخص‌های کیفیت و حاصلخیزی خاک، از جمله ویژگی های میکروبیولوژیکی خاک هستند که سریع‌تر از سایر ویژگی‌های خاک به تغییرات محیطی پاسخ می‌دهند (Azeem *et al*., 2020; Asirifi *et al*., 2021). افزودن اصلاح کننده‌های آلی مانند بیوچار، به خاک احتمالاً می‌تواند راهکار مناسبی برای بهبود فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک باشد (Song *et al*., 2018; Frimpong *et al*., 2021; Asirifi *et al*., 2021). بیوچار با ایجاد تغییرات مثبت در ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک می‌تواند در عملکرد ریزجانداران خاک موثر باشد (Song *et al*., 2019; Frene *et al*., 2021). بیوچار به‌دلیل داشتن ساختار متخلخل و سطح ویژه زیاد، می‌تواند زیستگاه‌های مناسبی را برای ریزجانداران فراهم نموده و فعالیت میکروبی خاک را افزایش دهد (Frene *et al*., 2021). همچنین بیوچار می‌تواند با بهبود ظرفیت نگهداشت آب در خاک و یا وجود ترکیبات کربنی قابل دسترس برای استفاده ریزجانداران خاک، فعالیت میکروبی خاک را تحت تأثیر قرار دهد (Song *et al*., 2018). نتایج مطالعه Lopes *et al*. (2021) نشان داد کاربرد بیوچار بقایای اوکالیپتوس در یک خاک تحت کشت نیشکر، فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک را به‌طور معنی‌داری افزایش داد.

اصلاح بیوچار به روش‌های مختلف با توجه به اهداف کاربرد آن در خاک، در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است (Jiang *et al*., 2019; Khajavi-Shojaei *et al*., 2021; Moradi and Karimi, 2021a, b). استفاه از ترکیبات مختلف اسیدی و اسیدی کردن بیوچار یکی از روش‌های اصلاح بیوچارها است. اصلاح بیوچار با استفاده از ترکیبات مختلف مانند گوگرد، اسیدهای آلی و معدنی، می‌تواند افزون بر کاهش pH بیوچار، سایر ویژگی‌های آن را تحت تأثیر قرار دهد (Ramzani *et al*., 2017). همچنین اسیدی کردن بیوچار احتمالاً می‌تواند سبب افزایش انحلال عناصر غذایی و ترکیبات موجود در ساختار بیوچار شده و بدین‌ترتیب اثرات آن بر ویژگی‌های خاک‌های آهکی را تحت تأثیر قرار دهد (Sahin *et al*., 2017). یکی از ترکیبات پیشنهاد شده جهت اسیدی کردن بیوچار، گوگرد است (Ramzani *et al*., 2017). در ایران سالانه بیش از دو میلیون تن گوگرد، از فعالیت پالایشگاه‌های نفت و گاز تولید می‌شود و به آسانی در دسترس است (Besharati, 2017). اکسیداسیون گوگرد عنصری با تولید اسید سولفوریک می‌تواند سبب کاهش pH بیوچار و سایر اصلاح کننده‌های آلی شود (Ramzani *et al*., 2017).

تأثیر بیوچار بر فعالیت ریزجانداران خاک و ویژگی‌های بیوشیمیایی خاک به‌دلیل تفاوت در نوع خاک، نوع بیوچار و ویژگی‌های آن، و نوع زیست‌توده و شرایط گرماکافت بیوچار متفاوت می‌باشد (Karimi *et al*., 2020a, b; Siedt *et al*., 2021; Brtnicky *et al*., 2021). تاکنون مطالعات چندانی در زمینه تأثیر بیوچارهای اصلاح شده با گوگرد و یا بیوچارهای اسیدی شده بر ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک‌های آهکی با ماده آلی کم، انجام نشده است، بنابراین هدف از این پژوهش بررسی تأثیر کاربرد بیوچارهای اصلاح شده با گوگرد (تهیه شده از بقایای ذرت و باگاس نیشکر) بر کربن آلی، برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی یک خاک آهکی تحت کشت ذرت بود.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده سازی بیوچار و بیوچار اصلاح شده با گوگرد

در این مطالعه از دو زیست‌توده بقایای گیاهی ذرت و باگاس نیشکر برای تهیه بیوچارها استفاده شد. زیست‌توده بقایای ذرت (دانه‌ای هیبرید KSC704) از مزارع تحقیقاتی دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز و زیست‌توده باگاس نیشکر از کشت و صنعت نیشکر دهخدا در شهرستان اهواز تهیه شد. زیست‌توده های گیاهی تهیه شده ابتدا هوا خشک شده و پس از آسیاب کردن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. سپس در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شدند (Singh *et al*., 2017). بیوچارها در کوره الکتریکی در شرایط گرماکافت آهسته، به مدت ۳ ساعت، در دماهای ۲۰۰ درجه سلسیوس و با نرخ افزایش دمای پنج درجه سلسیوس در دقیقه تهیه شدند. برای ایجاد شرایط

بدون اکسیژن از جریان گاز نیتروژن استفاده شد (Cantrell *et al*., 2012; Karimi *et al*., 2020a, b).

به‌منظور اصلاح بیوچارها، در آزمایشی تأثیر سطوح مختلف گوگرد بر تغییرات ویژگی‌های بیوچار بررسی شد. بدین ترتیب که ۱۵۰ گرم از هر کدام از بیوچارها انتخاب شده از آزمایش اول (دو نوع) در ظروف پلاستیکی درب‌دار (دارای منافذ) با سطوح مختلف گوگرد (۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، و ۱٪ وزنی) و در سه تکرار ترکیب شدند. برای تسهیل اکسیداسیون گوگرد مقدار محاسبه شده سوسپانسیون باکتری *Thiobacillus thioparus* PTCC1668 به هر یک از نمونه‌ها اضافه شد (Ramzani *et al*., 2017). باکتری مورد استفاده به‌صورت کشت فعال از مرکز کلکسیون قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی ایران در سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی تهیه شد. در پایان این آزمایش و بر اساس نتایج بدست آمده، بیوچارهای باگاس نیشکر و بقایای ذرت اصلاح شده شده با سطح یک درصد وزنی گوگرد، برای آزمایش گلدانی انتخاب شدند.

ویژگی‌های بیوچارها و بیوچارهای اصلاح شده با گوگرد اندازه‌گیری شد (Singh *et al*., 2017). نتایج بررسی ویژگی‌های بیوچارهای اصلاح شده با گوگرد و مقایسه آن‌ها با بیوچارهای اولیه نشان داد اصلاح با گوگرد افزون بر کاهش pH، سبب شد سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچارها تغییر کنند (جدول ۱). در اثر اصلاح بیوچارها با گوگرد، هدایت الکتریکی بیوچارهای باگاس نیشکر و بقایای ذرت به‌ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۲۱ دسی‌زیمنس بر متر، ظرفیت تبادل کاتیونی به‌ترتیب ۰/۵۶ و ۰/۶۳ دسی زیمنس بر متر و سطح ویژه به‌ترتیب ۰/۶۳ و ۰/۴۵ مترمربع بر گرم، افزایش یافت (جدول ۱). همچنین در اثر اسیدی شدن بیوچارها، کربن بیوچارها کاهش یافت. در حالی‌که هیدروژن، گوگرد، اکسیژن و نسبت هیدروژن به کربن (H/C) و اکسیژن به کربن (O/C) آن‌ها افزایش یافت (جدول ۱). افزایش نسبت هیدروژن به کربن (H/C) و اکسیژن به کربن (O/C) بیوچارهای اصلاح شده با گوگرد، نشان دهنده کاهش درصد آروماتیک بودن کربن آن‌ها و بیش‌تر بودن قطبیت و بار منفی آن‌ها می‌باشد (Karimi *et al*., 2019 a, b; Khajavi-Shojaei *et al*., 2020). نتایج همچنین نشان داد تغییر چندانی در غلظت کل عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم در اثر اصلاح با گوگرد مشاهده نشد (جدول ۱).

جدول ۱- برخی ویژگی‌های بیوچارهای مورد مطالعه در این پژوهش

ویژگی	واحد	SB	CR	ASB	ACR
pH		۶/۷۶	۶/۶۲	۴/۳۶	۴/۱۲
قابلیت هدایت الکتریکی	$dS\ m^{-1}$	۰/۸۶	۳/۴۳	۰/۹۹	۳/۶۱
ظرفیت تبادل کاتیونی	$cmol_c\ kg^{-1}$	۳۳/۸۵	۳۵/۴۴	۳۴/۴۱	۳۶/۰۴
سطح ویژه	$m^2\ g^{-1}$	۱۰/۱۵	۱۲/۴۶	۱۰/۷۸	۱۲/۹۱
کربن	٪	۴۵/۱۵	۴۸/۷۰	۴۳/۹۱	۴۷/۵۳
هیدروژن	٪	۲/۶۰۴	۲/۷۹۱	۳/۵۸۳	۳/۸۲۸
نیتروژن	٪	۰/۵۷۵	۱/۰۴۲	۰/۵۸۳	۱/۰۵۴
گوگرد	٪	۰/۲۸۷	۰/۳۸۶	۰/۳۳۲	۰/۴۳۹
اکسیژن	٪	۳۸/۸۹	۳۴/۵۶	۳۹/۴۹	۳۵/۰۱
نسبت کربن به نیتروژن (C/N)	-	۷۸/۵	۴۶/۷۳	۷۵/۳۱	۴۵/۰۹
نسبت مولی هیدروژن به کربن (H/C)	-	۰/۶۸۷	۰/۶۸۲	۰/۹۷۲	۰/۹۳۶
نسبت مولی اکسیژن به کربن (O/C)	-	۰/۶۴۷	۰/۵۳۳	۰/۶۷۵	۰/۵۵۳
فسفر	$g\ kg^{-1}$	۰/۱۵۶	۰/۷۸۶	۰/۱۶۲	۰/۷۹۴
پتاسیم	$g\ kg^{-1}$	۰/۸۱۶	۲۳/۴۳	۰/۸۲۸	۲۳/۴۳

SB: بیوچار باگاس نیشکر؛ CR: بیوچار بقایای ذرت؛ ASB: بیوچار اسیدی شده باگاس نیشکر؛ ACR: بیوچار اسیدی شده بقایای ذرت

اعمال تیمارها و کشت گلخانه‌ای

برای انجام این پژوهش یک نمونه خاک از زمین‌های زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری شد. نمونه خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا-خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. سپس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اندازه‌گیری شد. خاک مورد مطالعه دارای بافت لومی، هدایت الکتریکی ۲/۴۵ دسی زیمنس بر متر، pH معادل ۷/۷، ماده آلی ۰/۷۱٪، کربنات کلسیم معادل ۴۱/۳٪، نیتروژن کل ۰/۳۶ گرم بر کیلوگرم، فسفر قابل دسترس ۱۳/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و پتاسیم قابل دسترس ۲۷۳/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. برای اعمال تیمارها، ابتدا بیوچارها آماده شده با نمونه‌های پنج کیلوگرمی از خاک هوا خشک شده، به‌طور یکنواختی درون کیسه‌های پلاستیکی ترکیب شدند، سپس نمونه‌های آماده شده (ترکیب خاک و بیوچار) به

گلدان‌های پنج کیلوگرمی انتقال داده شدند. رطوبت خاک گلدان ها با افزودن آب مقطر به حد رطوبت ظرفیت زراعی رسانده شد. جهت جلوگیری از تنش تغذیه‌ای، نیتروژن مورد نیاز از منبع اوره و بر اساس نتایج آزمون خاک، به خاک اضافه شد. پس از اعمال تیمارها و آماده سازی گلدان‌ها، تعداد ۶ بذر ذرت (دانه‌ای هیبرید KSC704) در عمق حدود ۲ سانتی‌متری کشت شد. نمونه‌ها در شرایط کنترل شده در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز نگه‌داری شدند. در طول دوره رشد، آبیاری گلدان‌ها با آب مقطر انجام شد و رطوبت گلدان‌ها روزانه بصورت وزنی با افزودن آب مقطر (بدون ایجاد زهاب) در حد ۸۰٪ ظرفیت زراعی کنترل شد. پس از برداشت گیاه، از نمونه‌های خاک گلدان‌ها نمونه‌برداری شد. بخشی از خاک گلدان‌ها برای اندازه‌گیری ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک جدا شده و به آزمایشگاه منتقل و در یخچال نگه‌داری شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک پس از برداشت

کربن آلی کل (TOC[1]) خاک به روش اکسیداسیون تر اندازه‌گیری شد (Nelson and Sommers, 1996). کربن آلی محلول (DOC[2]) خاک با سولفات پتاسیم نیم‌مولار (K_2SO_4) استخراج شد و پس از عبور عصاره‌های استخراج شده از فیلتر ۰/۴۵ میکرون، مقدار DOC در عصاره‌ها با استفاده از دستگاه CHNS آنالیزر (CHNS analyzer Vario EL III) اندازه‌گیری شد (Herbert and Bertsch, 1995). برای ارزیابی تأثیر تیمارهای بیوچار و بیوچار اسیدی شده بر ویژگی‌های زیستی خاک تنفس میکروبی پایه (MBR[3]) با روش گردآوری CO_2 آزاد شده در هیدروکسید سدیم و تیتراسیون برگشتی مقدار باقی‌مانده‌ی آن با اسیدکلریدریک (Anderson, 1982)، تنفس ناشی از سوبسترا (SIR[4]) (Alef and Nannipieri, 1995)، کربن زیست‌توده میکروبی (MBC[5]) خاک به روش تدخین- عصاره‌گیری (Jenkinson and Ladd, 1981; Song *et al*., 2018) و همچنین فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز (Alef and Nannipieri, 1995) و کاتالاز (Liu *et al*., 2008) در خاک اندازه‌گیری شد. این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تیمار بدون کاربرد بیوچار (شاهد یا C)، بیوچار بقایای ذرت (CR) و باگاس نیشکر (SB)، بیوچار اسیدی شده بقایای ذرت (ACR) و بیوچار باگاس نیشکر اسیدی شده (ASB)، در شرایط گلخانه‌ای و در چهار تکرار انجام شد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

تجزیه واریانس داده‌های این پژوهش و برآورد ضرایب همبستگی میان ویژگی‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 انجام شد. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD و در سطح احتمال ۵٪ انجام شد. نمودارها در محیط نرم افزار Excel 2013 رسم شدند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات اصلی نوع و سطح کاربرد بیوچار و اثر متقابل آن‌ها بر تمامی ویژگی‌های بررسی شده شامل کربن آلی کل (TOC)، کربن آلی محلول (DOC)، تنفس میکروبی پایه، تنفس ناشی از سوبسترا، کربن زیست‌توده میکروبی و فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز و کاتالاز در خاک معنی‌دار بود (جدول ۲).

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارها بر ویژگی‌های خاک

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		SOC	DOC	MBR	SIR	MBC	DEH	CAT
تیمار	۴	۰/۱۷۸**	۷۲۴/۳**	۷۷۹۰**	۱۴۴/۹**	۳۷۶۳۵**	۱۵/۲۶**	۱۳۵۸**
خطا	۱۵	۰/۰۰۲۵	۱۰/۷۲	۱۳۷/۴	۱/۸۲۱	۱۴۷/۹	۰/۰۳۷	۱۱/۵۸
ضریب تغییرات (٪)		۶/۹۴	۵/۱۷	۶/۳۵	۵/۲۴	۶/۱۵	۴/۹۳	۷/۱۸

** **معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪**

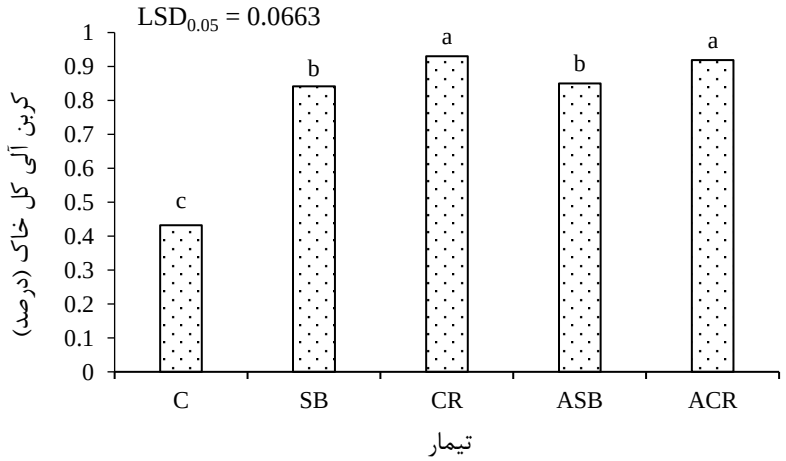
MBR: تنفس میکروبی پایه؛ SIR: تنفس ناشی از سوبسترا؛ MBC: کربن زیست‌توده میکروبی؛ DEH: فعالیت دهیدروژناز، CAT: فعالیت کاتالاز

کربن آلی کل خاک (TOC)

مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارها نشان داد در اثر کاربرد تمامی تیمارهای بیوچار، درصد کربن آلی کل خاک به‌طور معنی‌داری افزایش (۵۶/۸ تا ۱۱۶/۲٪) یافت (شکل ۱). اختلاف معنی‌داری میان درصد کربن آلی در خاک‌های تیمار شده با بیوچارهای اسیدی در مقایسه با بیوچارهای اولیه آن‌ها، مشاهده نشد (شکل ۱). افزایش کربن آلی کل خاک در اثر افزودن بیوچار به خاک به‌دلیل کربن بالای بیوچارها می‌باشد (جدول ۱)، به‌دلیل این‌که

1. Total organic carbon
2. Dissolved organic carbon
3. Microbial basal respiration
4. Substrate induced respiration
5. Microbial biomass carbon

بخش کربن فعال موجود در بیوچارها پس از افزوده شدن به خاک تجزیه شده و بخشی از کربن موجود در ساختار آن‌ها به ذخایر کربن در خاک اضافه شده و سبب افزایش سطح کربن آلی خاک می‌شود. افزایش کربن آلی کل خاک در خاک‌های آهکی با ماده آلی کم، در اثر افزودن بیوچارهای مختلف به خاک، توسط سایر پژوهش‌گران نیز گزارش شده است (Karimi *et al*., 2020a, b; Moradi and Karimi, 2021a, b). تأثیر بیش‌تر بیوچارهای بقایای ذرت در افزایش کربن آلی خاک را می‌توان به محتوای کربن آلی بیش‌تر در بیوچارهای بقایای ذرت (جدول ۱) نسبت داد. به‌طور مشابه با این پژوهش، Manolikaki and Diamadopoulos (2019) با بررسی تأثیر کاربرد سطح ۲٪ وزنی بیوچار تهیه شده از سبوس برنج، در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، به یک خاک آهکی تحت کشت ذرت دریافتند کاربرد بیوچار سبب افزایش معنی‌دار کربن آلی خاک شد.



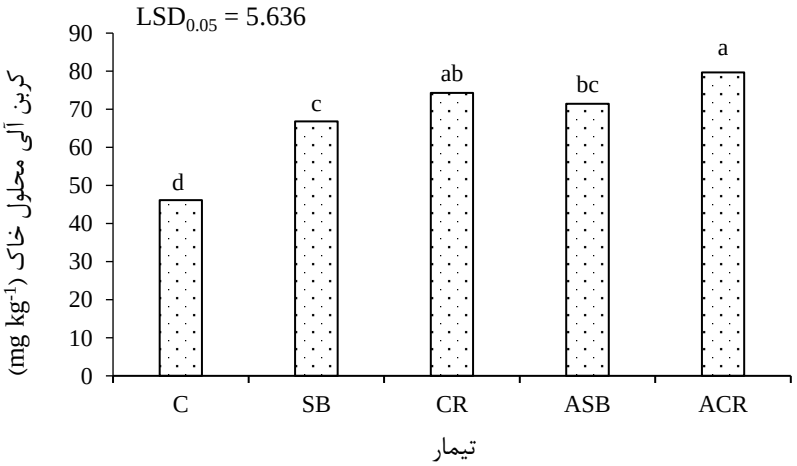
شکل ۱- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر کربن آلی کل خاک

C: شاهد؛ SB: بیوچار باگاس نیشکر؛ CR: بیوچار بقایای ذرت؛ ASB: بیوچار اسیدی شده باگاس نیشکر؛ ACR: بیوچار اسیدی شده بقایای ذرت.

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری (P≤۰/۰۵) ندارند.

کربن آلی محلول (DOC) خاک

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع و سطح کاربرد بیوچار نشان داد کربن آلی محلول خاک، در اثر کاربرد تمامی تیمارهای بیوچار، به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۲). مقدار کربن آلی محلول خاک در تیمارهای کاربرد بیوچارهای اسیدی بقایای ذرت و باگاس نیشکر بیش‌تر از تیمارهای کاربرد بیوچارهای اولیه آن‌ها بود، اگرچه اختلاف آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۲).



شکل۲- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر کربن آلی محلول خاک

C: شاهد؛ SB: بیوچار باگاس نیشکر؛ CR: بیوچار بقایای ذرت؛ ASB: بیوچار اسیدی شده باگاس نیشکر؛ ACR: بیوچار اسیدی شده بقایای ذرت.

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری (P≤۰/۰۵) ندارند.

با توجه به این‌که بیوچارهای استفاده شده در این پژوهش در دمای پایین ۲۰۰ درجه سلسیوس تهیه شده بودند و

بیوچارهای تهیه شده در دماهای پایین دارای کربن قابل دسترس می‌باشند، بنابراین در اثر کاربرد بیوچارها، کربن آلی محلول خاک افزایش یافت. افزایش کربن آلی محلول خاک در اثر کاربرد بیوچارها نشان می‌دهد که این بیوچارها دارای کربن قابل دسترس بوده که می‌تواند در خاک آزاد شود و منبع انرژی و تغذیه مناسبی برای ریزجانداران خاک می‌باشد (Song *et al*., 2018; Frene *et al*., 2021). به‌طور کلی پایداری کربن ساختار بیوچار به ساختار آروماتیک کربن آن بستگی دارد. همچنین تغییرات کربن آلی محلول خاک در خاک‌های تیمار شده با بیوچار به ویژگی‌های ساختاری کربن بیوچار و نوع زیست‌توده آن بستگی دارد (Mierzwa-Hersztek *et al*., 2020). بیش‌تر بودن کربن آلی محلول در تیمارهای بیوچارهای اسیدی شده در مقایسه با تیمارهای بیوچارهای اولیه آن‌ها، می‌تواند به‌دلیل تفاوت ویژگی‌های بیوچارها باشد. بیوچارهای اسیدی شده احتمالاً به‌دلیل کربن تثبیت شده کم‌تر و نسبت مولی بالاتر H/C و O/C (جدول ۱)، کربن آلی محلول بیش‌تری داشته و به‌همین دلیل اثر مثبت بیش تری در افزایش کربن آلی محلول خاک داشتند. نتایج این پژوهش نشان داد با این‌که تفاوتی در مقدار کربن آلی کل خاک در تیمارهای مختلف بیوچار مشاهده نشد (شکل ۱) و کربن آلی بیوچارهای اسیدی مقداری جزئی کم‌تر از بیوچارهای اولیه آن‌ها بود (جدول ۱)، اما کربن آلی محلول خاک در تیمارهای بیوچارهای اصلاح شده با گوگرد به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از بیوچارهای اولیه بود. این نتایج می‌تواند به‌دلیل پایداری بالای کربن آلی بیوچارهای اولیه باشد و نشان می‌دهد اسیدی شدن بیوچارها سبب افزایش فراهمی کربن آن‌ها شده و بیوچارهای اسیدی می‌توانند اثر مثبت بیش‌تری بر کربن آلی محلول خاک داشته باشند. نتایج مطالعه Asirifi *et al*. (2021) نشان داد در اثر کاربرد بیوچار پوسته برنج در یک خاک با ماده آلی کم (۰/۷۱٪)، کربن آلی محلول در آب گرم، ۱۱ تا ۲۶٪ افزایش یافت. Mierzwa-Hersztek *et al*. (2020) نیز گزارش کردند کاربرد سطوح مختلف (۰/۵، ۱ و ۲٪ وزنی) بیوچار کاه و کلش گندم در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، سبب افزایش معنی‌دار کربن آلی محلول در خاک شد.

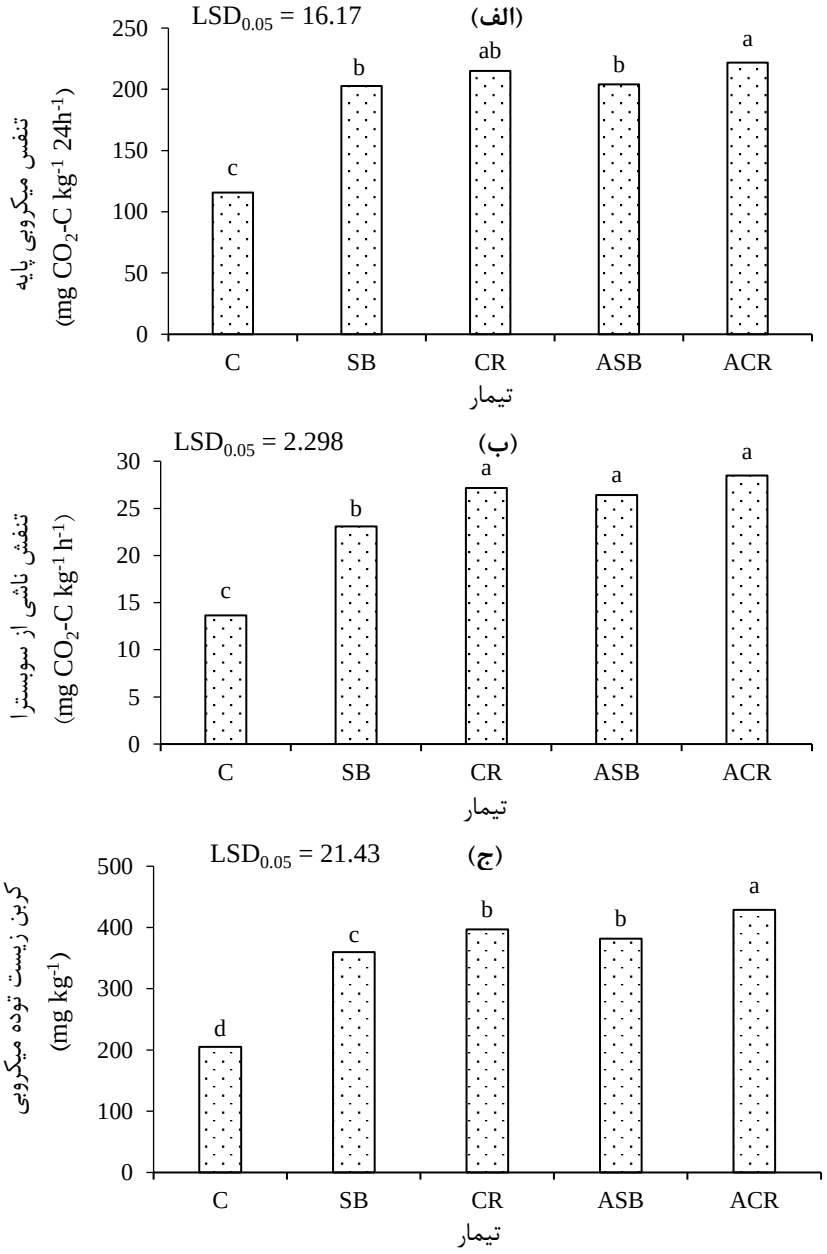
تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی

کاربرد تمامی تیمارهای بیوچار سبب افزایش معنی‌دار تنفس میکروبی پایه (MBR)، تنفس ناشی از سوبسترا (SIR) و کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) شد (شکل ۳، ۴ و ۵). کاربرد تیمارهای SB، CR، ASB و ACR مقدار MBR را به‌ترتیب ۷۵/۱، ۸۵/۸، ۷۶/۳ و ۹۱/۶٪، SIR را به‌ترتیب ۶۹/۱، ۹۸/۹، ۹۳/۶ و ۱۰۸/۷٪ و MBC را به‌ترتیب ۷۵/۳، ۹۳/۴، ۸۶/۲ و ۱۰۹/۱٪ افزایش داد. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد اختلاف معنی‌داری میان مقادیر MBR در تیمارهای ACR، ASB و CR وجود نداشت؛ اما مقدار SIR در این سه تیمار بیش‌تر از مقدار آن در تیمار SB بود (شکل ۲). این نتیجه احتمالاً به‌دلیل بیش‌تر بودن کربن آلی محلول و مقدار کربن قابل دسترس برای ریزجانداران خاک، در تیمارهای ACR, ASB و CR نسبت به تیمار SB بوده است (شکل ۲).

افزایش تنفس میکروبی خاک در اثر کاربرد تیمارهای بیوچار می‌تواند به‌دلیل مواد فرار و ترکیبات جذب سطحی شده بر روی سطح بیوچار باشد، به‌دلیل این‌که این ترکیبات می‌توانند به‌عنوان سوبسترای قابل دسترس برای ریزجانداران خاک عمل نموده و سبب افزایش رشد و فعالیت میکروبی در خاک‌های تیمار شده با بیوچار شوند (Rutigliano *et al*., 2014). افزایش تنفس ناشی از سوبسترا در تیمارهای کاربرد بیوچارها نشان می‌دهد، در اثر کاربرد بیوچارها زیست‌توده فعال ریزجانداران خاک افزایش می‌یابد، زیرا این شاخص جمعیت فعال میکروبی خاک را نشان می‌دهد (Song *et al*., 2018). بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک و افزایش زیست‌توده میکروبی (شکل ۴) در اثر کاربرد بیوچارها، می‌تواند از دیگر دلایل افزایش تنفس میکروبی خاک در این تیمارها باشد. همچنین افزایش فراهمی مواد آلی و کربن آلی محلول خاک (شکل ۲)، افزایش رشد گیاه و ریشه آن شده و جمعیت میکروبی و فعالیت ریزجانداران خاک را افزایش داده که به دنبال آن میزان تنفس میکروبی و تنفس ناشی از سوبسترا افزایش می‌یابد (Song *et al*., 2018).

کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) در تمامی تیمارهای کاربرد بیوچار افزایش یافت که این نتیجه می‌تواند به‌دلیل افزایش کربن آلی خاک (شکل ۱ و ۲) و افزایش عناصر غذایی قابل دسترس برای ریزجانداران خاک، در اثر کاربرد بیوچارها باشد. ضریب همبستگی مثبت و معنی‌دار (P< ۰/۰۰۱) MBC با TOC (r = ۰/۵۸) و DOC (r = ۰/۸۸) محلول خاک نیز تأیید کننده این نتایج می‌باشد (جدول ۳). همچنین افزایش کربن زیست‌توده میکروبی خاک در اثر افزودن بیوچار می‌تواند به این دلیل باشد که بیوچار با داشتن ساختار متخلخل و سطح ویژه بالا می‌تواند میکروزیستگاه مناسبی برای ریزجانداران خاک فراهم کند (Frene *et al*., 2021). بیش‌تر بودن MBC در تیمارهای کاربرد بیوچارهای بقایای ذرت در مقایسه با تیمارهای کاربرد بیوچارهای باگاس نیشکر (شکل ۳) را می‌توان به بیش‌تر بودن کربن آلی محلول در این تیمارها نسبت داد (شکل ۲). کم‌تر بودن MBC در خاک‌های تیمار شده با بیوچارهای اولیه باگاس نیشکر و بقایای

ذرت، در مقایسه با خاک‌های تیمار شده با بیوچارهای اصلاح شده آن‌ها، می‌تواند به‌دلیل کم‌تر بودن کربن آلی محلول خاک در این تیمارها (شکل ۲) و همچنین کم‌تر بودن نسبت‌های مولی O/C و H/C آن‌ها باشد (جدول ۱)؛ چرا که مقادیر کم‌تر نسبت‌های مولی O/C و H/C بیوچار نشان‌دهنده بیش‌تر بودن ساختار آروماتیک آن و پایداری بیش‌تر کربن آن در مقابل تجزیه میکروبی می‌باشد (Karimi *et al*., 2019a; Leng *et al*., 2019; Khajavi-Shojaei *et al*., 2020). افزون بر این، احتمالاً تأثیر بیش‌تر بیوچارهای اصلاح شده با گوگرد بر تغییرات pH و حلالیت عناصر غذایی در خاک سبب افزایش اثر مثبت آن‌ها بر کربن زیست‌توده میکروبی خاک شده است. به‌طور مشابه با این پژوهش Song *et al*. (2018) گزارش کردند که افزودن بیوچار ذرت به یک خاک آهکی تحت کشت ذرت، MBC خاک را افزایش داد. نتایج پژوهش Vahedi *et al*. (2019) نیز نشان داد کاربرد بیوچار بقایای هرس سیب و انگور سبب افزایش چشم‌گیر تنفس میکروبی پایه، تنفس ناشی از سوبسترا و کربن زیست‌توده میکروبی در یک خاک آهکی (ریزوسفری و غیر ریزوسفر) تحت کشت گندم شد.



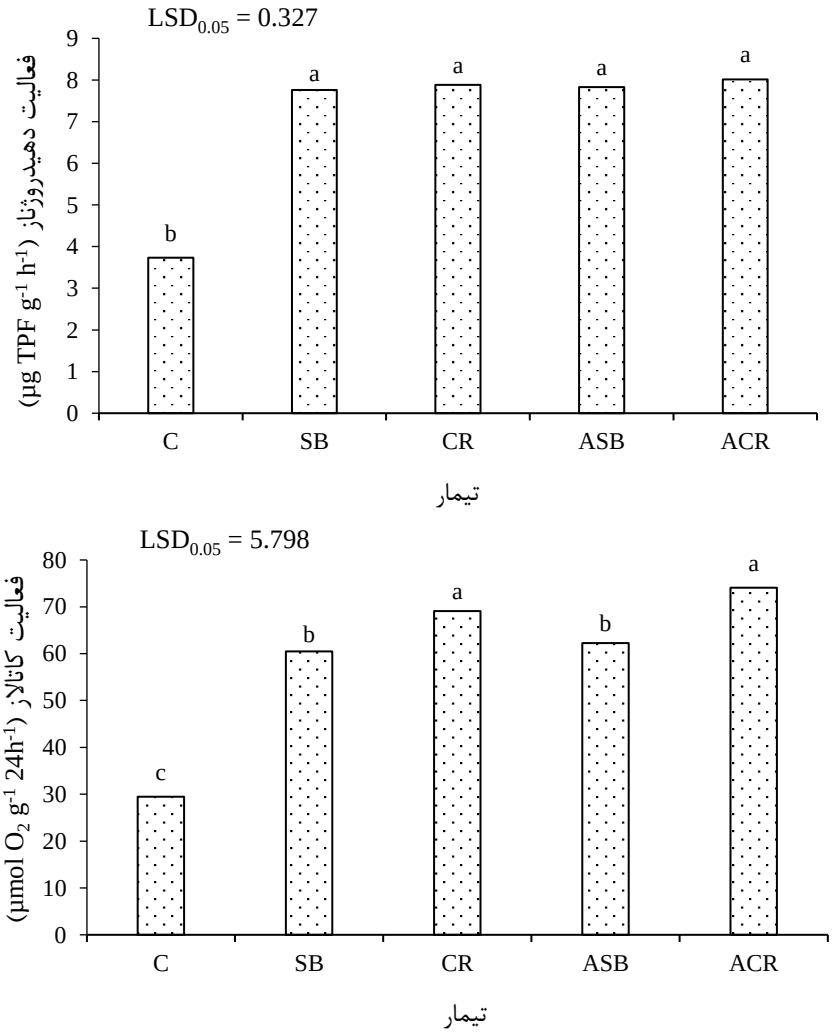
شکل ۳- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر تنفس میکروبی پایه (MBR) (الف)، تنفس ناشی از سوبسترا (SIR) (ب) و کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) (ج)

C: شاهد؛ SB: بیوچار باگاس نیشکر؛ CR: بیوچار بقایای ذرت؛ ASB: بیوچار اسیدی شده باگاس نیشکر؛ ACR: بیوچار اسیدی شده بقایای ذرت.

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری (P≤۰/۰۵) ندارند.

فعالیت دهیدروژناز و کاتالاز

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد افزودن بیوچارها به خاک سبب افزایش معنی‌دار فعالیت دهیدروژناز (۷۵/۶ تا ۱۱۴/۷٪، شکل ۶) و کاتالاز (۷۴/۵ تا ۱۵۱/۷٪، شکل ۷) خاک شد. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد اختلاف معنی‌داری میان فعالیت دهیدروژناز در تیمارهای مختلف بیوچار وجود نداشت؛ اما فعالیت کاتالاز در تیمارهای بیوچارهای اسیدی شده بیش‌تر از تیمارهای بیوچارهای اولیه آن‌ها بود. این نتیجه احتمالاً به‌دلیل بیش‌تر بودن فراهمی عناصر غذایی در خاک تیمار شده با بیوچارهای اسیدی شده بود.



شکل ۴- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر فعالیت دهیدروژناز و کاتالاز در خاک

C: شاهد؛ SB: بیوچار باگاس نیشکر؛ CR: بیوچار بقایای ذرت؛ ASB: بیوچار اسیدی شده باگاس نیشکر؛ ACR: بیوچار اسیدی شده بقایای ذرت.

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری (P≤۰/۰۵) ندارند.

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد بیوچارها سبب افزایش بسیار چشم‌گیر فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز و کاتالاز، به‌عنوان آنزیم‌های درون سلولی موثر در متابولیسم‌های سلولی و حفاظت سلول در برابر گونه‌های فعال اکسیژن از جمله پراکسید هیدروژن، در خاک تحت کشت ذرت شد. با توجه به این‌که بیوچارهای استفاده شده در این پژوهش در دمای پایین تهیه شده بودند، بنابراین افزایش فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز و کاتالاز در خاک در اثر کاربرد بیوچارها می‌تواند به‌دلیل وجود ترکیبات فرار، کربوهیدرات‌های قابل دسترس مانند سلولز و همی سلولز و ترکیبات غنی از نیتروژن مانند پروتئین‌ها در بیوچارها باشد (Al-Wabel *et al*., 2018). نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده بیوچارها تهیه شده در دماهای پایین می‌توانند سوبسترای قابل دسترس (کربن و عناصر غذایی) را برای جمعیت میکروبی فراهم نموده و سبب تحریک فعالیت آنزیمی خاک شوند (Karimi *et al*., 2020b). کاهش کربن پایدار و محتوای کربن آروماتیک می‌تواند یکی از دلایل احتمالی بیش‌تر بودن فعالیت آنزیم‌های

بررسی شده به‌ویژه کاتالاز در تیمارهای بیوچارهای اسیدی، نسبت به بیوچارهای اولیه آن‌ها باشد؛ چرا که بیوچارهای اسیدی شده در مقایسه با بیوچارهای اولیه آن‌ها نسبت‌های H/C و O/C بالاتری داشتند (جدول ۱). همچنین احتمالاً افزایش فراهمی مواد فرار موجود در ساختار بیوچار در اثر اصلاح آن با گوگرد، یکی از دلایل افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز تیمارهای بیوچارهای اسیدی شده باشد. نتایج پژوهش Beheshti *et al.* (2018) نیز نشان داد فعالیت آنزیم دهیدروژناز در یک خاک آهکی تیمار شده با بیوچارها کاه گندم و کود گاوی (تهیه شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس) به‌طور معنی‌داری افزایش یافت.

جدول ۳- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین ویژگی‌های خاک (n=۲۰)

	TOC	DOC	MBR	SIR	MBC	DEH	CAT
TOC	۱/۰۰						
DOC	۰/۶۱**	۱/۰۰					
MBR	۰/۵۱*	۰/۷۴***	۱/۰۰				
SIR	۰/۵۳*	۰/۷۸***	۰/۹۲***	۱/۰۰			
MBC	۰/۵۸**	۰/۸۸***	۰/۸۷***	۰/۹۱***	۱/۰۰		
DEH	۰/۵۴*	۰/۸۰***	۰/۹۱***	۰/۸۸***	۰/۸۶***	۱/۰۰	
CAT	۰/۶۵**	۰/۷۱***	۰/۸۵***	۰/۹۲***	۰/۸۹***	۰/۹۰***	۱/۰۰

***، ** و * به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۱، ۱ و ۵٪

TOC: کربن آلی کل خاک؛ DOC: کربن آلی محلول خاک؛ MBR: تنفس میکروبی پایه؛ SIR: تنفس ناشی از سوبسترا؛ MBC: کربن زیست‌توده میکروبی؛ DEH: فعالیت دهیدروژناز؛ CAT: فعالیت کاتالاز.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد بیوچارهای بقایای ذرت و باگاس نیشکر و بیوچارهای اصلاح شده با گوگرد، سبب افزایش کربن آلی و کربن زیست‌توده میکروبی و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و دهیدروژناز به‌عنوان شاخص‌های بیوشیمیایی کیفیت خاک شدند. تغییرات ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک به نوع زیست‌توده بیوچار و ویژگی‌های آن‌ها بستگی داشت. به طوری که بیوچار بقایای ذرت در بهبود کربن آلی و ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک، مؤثرتر از بیوچار باگاس نیشکر بود. همچنین نتایج نشان داد اصلاح بیوچارهای بقایای ذرت و باگاس نیشکر با گوگرد، با تغییرات ویژگی‌های آن، کارایی آن در بهبود کربن آلی محلول، تنفس و کربن زیست‌توده میکروبی و فعالیت کاتالاز را افزایش می‌دهد. بر اساس نتایج این پژوهش، کاربرد بیوچار بقایای ذرت و باگاس نیشکر در خاک‌های با ماده آلی پایین، می‌تواند در بهبود کربن آلی و ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک، بسیار مؤثر باشد. باتوجه به این‌که یکی از مشکلات عمده خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک ایران کمبود مواد آلی و پیامدهای نامطلوب ناشی از این کمبود است، بنابراین کاربرد بیوچارهای تهیه شده از بقایای ذرت و باگاس نیشکر در دماهای پایین و بیوچارهای اسیدی شده آن‌ها در خاک‌های آهکی ایران می‌تواند سبب بهبود ماده آلی خاک شود. افزون بر این، با توجه به حجم بسیار بالای تولید سالانه باگاس نیشکر و بقایای ذرت در ایران به‌ویژه در استان خوزستان و آهکی بودن اغلب خاک‌های زراعی ایران و خوزستان، اصلاح بیوچارهای بقایای ذرت و باگاس نیشکر با گوگرد و کاربرد آن‌ها در خاک، می‌تواند راهکار مناسبی در بهبود کیفیت و حاصلخیزی خاک باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Alef, K. and Nannipieri P. (1995). Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press, London. 608p.

Al-Wabel, M. I., Hussain, Q., Usman, A. R., Ahmad, M., Abduljabbar, A., Sallam, A. S. and Ok, Y. S. (2018). Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review. *Land Degradation and Development*, 29(7), 2124-2161.

Anderson, J. P. E. (1982). Soil respiration. In: A.L. and R. H. Mille (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy. Madison, WI.

Asirifi, I., Werner, S., Heinze, S., Saba, C. K., Lawson, I. Y. and Marschner, B. (2021). Short-term effect of biochar on microbial biomass, respiration and enzymatic activities in wastewater irrigated soils in urban agroecosystems of the West African savannah. *Agronomy*, 11(2), 271.

Azeem, M., Hale, L., Montgomery, J., Crowley, D. and McGiffen Jr, M. E. (2020). Biochar and compost effects on soil microbial communities and nitrogen induced respiration in turfgrass soils. *Plos one*, 15(11), 0242209.

Beheshti, M., Etesami, H. and Alikhani, H. A. (2018). Effect of different biochars amendment on soil

amendments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(4), 851-864.

Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M. and Enayatizamir, N. (2019b). Investigation of physicochemical characteristics of biochars derived from corn residue and sugarcane bagasse in different pyrolysis temperature. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(3), 725-739. (In Farsi)

Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., and Enayatizamir, N. (2020a). Application of biochar changed the status of nutrients and biological activity in a calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(2), 450-459.

Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M. and Enayatizamir, N. (2020b). Influence of sugarcane bagasse biochar on nutrient availability and biological properties of a calcareous soil. *Applied Soil Research*, *8*(1), 1-17. (In Farsi)

Khajavi-Shojaei, S., Moezzi, A., Norouzi Masir, M., and Taghavi, M. (2020). Characteristics of conocarpus wastes and common reed biochars as a predictor of potential environmental and agronomic applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-18.

Khajavi-Shojaei, S., Moezzi, A., Norouzi Masir, M., and Taghavi, M. (2021). Evaluation of nitrate sorption potential from aqueous solution using common reed-iron modified biochar. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(11), 2853-2864.

Knoblauch, C., Priyadarshani, S. R., Haefele, S. M., Schröder, N. and Pfeiffer, E. M. (2021). Impact of biochar on nutrient supply, crop yield and microbial respiration on sandy soils of northern Germany. *European Journal of Soil Science*. 72(4), 1885-1901.

Lehmann, J. and Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: science, technology and implementation. Routledge.

Leng, L., Huang, H., Li, H., Li, J. and Zhou, W. (2019). Biochar stability assessment methods: a review. *Science of the Total Environment*, 647, 210-222.

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. *Journal of Soils and Sediments*, 8(5), 327-332.

Lopes, E. M. G., Reis, M. M., Frazão, L. A., da Mata Terra, L. E., Lopes, E. F., dos Santos, M. M. and Fernandes, L. A. (2021). Biochar increases enzyme activity and total microbial quality of soil grown with sugarcane. *Environmental Technology and Innovation*, 21, 101270.

Manirakiza, E., Ziadi, N., Hamel, C., Lévesque, V., Antoun, H. and Karam, A. (2021). Soil microbial community dynamics after co-application of biochar and paper mill biosolids. *Applied Soil Ecology*, 165, 103960.

Manolikaki, I. and Diamadopoulos, E. (2019). Positive effects of biochar and biochar-compost on maize growth and nutrient availability in two agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(5), 512-526.

Mierzwa-Hersztek, M., Wolny-Koładka, K., Gondek, biological indicators in a calcareous soil. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(15), 14752-14761.

Besharati, H. (2017). Effects of sulfur application and *Thiobacillus* inoculation on soil nutrient availability, wheat yield and plant nutrient concentration in calcareous soils with different calcium carbonate content. *Journal of Plant Nutrition*, 40(3), 447-456.

Brtnicky, M., Hammerschmiedt, T., Elbl, J., Kintl, A., Skulcova, L., Radziemska, M., Latal, O., Baltazar, T., Kobzova, E. and Holatko, J., (2021). The potential of biochar made from agricultural residues to increase soil fertility and microbial activity: impacts on soils with varying sand content. *Agronomy*, 11(6), 1174.

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.

El-Naggar, A., Lee, S. S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A. K., Zimmerman, 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.

Farzadkia, M., Fallah Jokandan, S., Yegane Badi, M. 2015. Compost Management in Iran: Opportunities and Challenges. *Journal of Environmental Health Enginering*, 2 (3), 211-223. (In Farsi)

Frene, J. P., Frazier, M., Liu, S., Clark, B., Parker, M. and Gardner, T. (2021). Early Effect of Pine Biochar on Peach-Tree Planting on Microbial Community Composition and Enzymatic Activity. *Applied Sciences*, 11(4), 1473.

Frimpong, K. A., Abban-Baidoo, E. and Marschner, B. (2021). Can combined compost and biochar application improve the quality of a highly weathered coastal savanna soil? Heliyon, 7(5), 07089.

Gogoi, L., Narzari, R., Gogoi, N., Borkotoki, B. and Kataki, R. (2020). Effect of biochar on soil respiration from a semi-evergreen, moist deciduous forest soil. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, *6*, 1-9.

Herbert, B.E. and Bertsch, P.M. (1995). Characterization of dissolved and colloidal organic matter in soil solution: a review. *Carbon forms and functions in forest soils*, 63-88.

Jenkinson, D. S. and Ladd J. N. (1981). Microbial biomass in soil measurement and turnover. P415-471, In: Paul E. A., Ladd, J. N. (Ed.). Soil Biochemistry, Marcel Dekker, Inc., NY.

Jiang, Z., Lian, F., Wang, Z. and Xing, B. (2020). The role of biochars in sustainable crop production and soil resiliency. *Journal of Experimental Botany*, 71(2), 520-542.

Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M. and Enayatizamir, N. (2019a). Chemical fractions and availability of Zn in a calcareous soil in response to biochar

K., Gałązka, A. and Gawryjołek, K. (2020). Effect of coapplication of biochar and nutrients on microbiocenotic composition, dehydrogenase activity index and chemical properties of sandy soil. *Waste and Biomass Valorization*, 1-13.

Moradi, N. and Karimi, A. (2021a). Fe-Modified common reed biochar reduced cadmium (Cd) mobility and enhanced microbial activity in a contaminated calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(1), 329-340.

Moradi, N. and Karimi, A. (2021b). Effect of modified corn residue biochar on chemical fractions and bioavailability of cadmium in contaminated soil. *Chemistry and Ecology*, 37(3), 252-267.

Nelson, D. W. and Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon and organic matter. P. in D. L. Sparks *et al*., (eds). Methods of soil analaysis. Part III. 3rd Ed., American Society of Agronomy, Madison, WI.

Ramzani, P. M. A., Shan, L., Anjum, S., Ronggui, H., Iqbal, M., Virk, Z. A. and Kausar, S. (2017). Improved quinoa growth, physiological response, and seed nutritional quality in three soils having different stresses by the application of acidified biochar and compost. *Plant Physiology and Biochemistry*, 116, 127-138.

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. *European Journal of Soil Biology*, 60, 9-15.

Sahin, O., Taskin, M.B., Kaya, E.C., Atakol, O., Emir, E., Inal, A. and Gunes, A. 2017. Effect of acid modification of biochar on nutrient availability and maize growth in a calcareous soil. *Soil Use and Management*, 33(3), 447-456.

Shahbazi, K. and Besharati, H. (2013). Overview of agricultural soil fertility status of Iran, *Land Management Journal*, 1(1), 1-15. (In Farsi)

Sheng, Y. and Zhu, L. (2018). Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential across different soil pH. *Science of the Total Environment*, 622, 1391-1399.

Siedt, M., Schäffer, A., Smith, K. E., Nabel, M., Roß-Nickoll, M. van Dongen, J. T. (2020). Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides. *Science of the Total Environment*, 751, 141607.

Singh, B., Camps-Arbestain, M. and Lehmann, J. (2017). Biochar: a guide to analytical methods. Cairo Publishing.

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. *European Journal of Soil Biology*, 84, 1-10.

Song, D., Xi, X., Zheng, Q., Liang, G., Zhou, W. and Wang, X., (2019). Soil nutrient and microbial activity responses to two years after maize straw biochar application in a calcareous soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 180, 348-356.

Vahedi, R., Rasouli-Sadaghiani, M., and Barin, M. (2019). Evaluation of the qualitative characteristics of the treated calcareous soils with compost and biochar in the presence of plant growth promoting bacteria. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(2), 259-272. (In Farsi)

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. *Journal of Environmental Management*, 232, 8-21.

Zhang, Y., Wang, J. and Feng, Y. (2021). The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: A review. *Catena*, 202, 105284.