

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

AKBAR KARIMI^{1*}, ABDOLAMIR MOEZZI¹, MOSTAFA CHOROM¹ AND NAEIMEH ENAYATIZAMIR¹

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

پایامد کاربرد بیوپچار اصلاح شده با گوگرد بر برخی ویژگی های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک

اکبر کریمی^{۱*}، عبدالامیر معزی^۱، مصطفی چرم^۱، نعیمه عنایتی ضمیر^۱

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 بیوپچار در خاک می تواند در بهبود کربن آلی و کیفیت خاک مؤثر باشد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر بیوپچار و بیوپچار اصلاح شده با گوگرد (تهیه شده از باگاس نیشکر و بقایای ذرت) بر تغییرات کربن آلی و ویژگی های 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. بیوپچارهای بقایای ذرت و باگاس نیشکر و بیوپچارهای اصلاح شده آن ها، در سطح یک درصد وزنی با نمونه خاک ترکیب شده و کشت گیاه ذرت در گلدان های پنج کیلوگرمی انجام شد. نتایج نشان داد کاربرد بیوپچار و بیوپچار اصلاح شده با گوگرد سبب افزایش معنی دار 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 زیست توده میکروبی (۹۳/۴ - ۵۴/۸ درصد)، فعالیت دهیدروژناز (۱۱۴/۷ - ۱۰۸/۰ درصد) و کاتالاز (۱۵۱/۶ - ۱۰۵/۴ درصد) شد. مقایسه میان دو زیست توده نشان داد بیوپچار بقایای ذرت در مقایسه با بیوپچار باگاس نیشکر در بهبود کربن آلی کل و محلول خاک و ویژگی های بیوشیمیایی خاک، مؤثرتر بود. اثر مثبت بیوپچارهای اصلاح شده با گوگرد بر کربن آلی محلول، کربن زیست توده میکروبی و فعالیت کاتالاز، به طور معنی داری بیش تر از بیوپچارهای اولیه بود. بیش ترین مقدار کربن آلی محلول، تنفس میکروبی پایه و تنفس ناشی از سوبسترا و همچنین فعالیت دهیدروژناز و کاتالاز مربوط به تیمار بیوپچار بقایای ذرت اصلاح شده بود. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد بیوپچارهای تهیه شده از بقایای ذرت و باگاس نیشکر می توانند اصلاح کننده آلی مناسبی برای بهبود ماده آلی خاک و ویژگی های بیوشیمیایی خاک باشند. افزون بر این، اصلاح بیوپچار با گوگرد و تهیه بیوپچار اسیدی می تواند کارایی آن در بهبود بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک را افزایش دهد.

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

مقدمه

یکی از محدودیت های حاصلخیزی خاک های مناطق خشک و نیمه خشک موضوع کمبود مواد آلی خاک می باشد (El-Naggar *et al.*, 2019). مقدار مواد آلی در بخش عمده اراضی کشاورزی ایران بسیار کم تر از حد مطلوب است. بررسی ها نشان داده در بیش از ۶۳٪ از اراضی زیر کشت ایران مقدار ماده آلی کمتر از یک درصد می باشد (Shahbazi and Besharati, 2013). بنابراین برای حفظ کیفیت و حاصلخیزی خاک، بهبود ویژگی های خاک و حفظ تعادل در عوامل زیست محیطی، افزودن مواد آلی به خاک های کشاورزی مناطق خشک و نیمه خشک 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 می شود. سالانه میلیون ها تن ضایعات مختلف کشاورزی در کشور تولید می شود، که می تواند در تأمین ماده آلی

خاک مؤثر باشد؛ اما متأسفانه بخش عمده این ضایعات سوزانده می شود (Farzadkia *et al.*, 2015). کاربرد بیوپچار به عنوان یک اصلاح کننده های آلی، جهت افزایش مواد آلی خاک، در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است (Siedt *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021). بیوپچار یک ماده غنی از کربن است که از تجزیه حرارتی زیست توده های مختلف در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن کم تهیه می شود (Lehmann and Joseph, 2015; Yu *et al.*, 2019). نتایج مطالعات نشان داده افزودن بیوپچار به خاک به عنوان یک منبع کربن در اراضی کشاورزی می تواند در بهبود ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک (Siedt *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021)، ویژگی های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک (Song *et al.*, 2018; Karimi *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2020a) و کیفیت و حاصلخیزی خاک مؤثر باشد (Yu *et al.*, 2019; Siedt *et al.*, 2021; Karimi *et al.*, 2020a, b).

کیفیت خاک افزون بر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی آن،

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 سوستر، 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 نه تنها 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 به عنوان مخزن قابل توجه عناصر غذایی و تغییرات مواد آلی خاک مسلم است، به طوری که معدنی شدن پیش‌ماده‌های آلی اغلب ناشی از فعالیت زیست‌توده میکروبی خاک است (Knoblauch et al., 2021). آنزیم‌های خاک به عنوان شاخص‌های کیفیت و حاصلخیزی خاک، از جمله ویژگی‌های 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 به دلیل 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 به طور 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). اسید 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 بدین ترتیب 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 به دلیل 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

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). استفاده از ترکیبات مختلف

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 به ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۲۱ دسی‌زیمنس بر متر، ظرفیت تبادل کاتیونی به ترتیب ۰/۵۶ و ۰/۶۳ دسی‌زیمنس بر متر و سطح ویژه به ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۴۵ مترمربع بر گرم، افزایش یافت (جدول ۱). همچنین در اثر اسیدی شدن بیوچارها، کربن بیوچارها کاهش یافت. در حالی که 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).

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 با سطح یک درصد وزنی گوگرد، برای آزمایش‌های 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

جدول ۱- برخی ویژگی‌های بیوچارهای مورد مطالعه در این پژوهش

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

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

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

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

(Anderson, 1982)، تنفس ناشی از سوبسترا (SIR^4) (Alef and Nannipieri, 1995)، کربن زیست توده میکروبی (MBC^5) خاک به روش تدخین - عصاره گیری (Jenkinson and Ladd, 1981; Song et al., 2018) و همچنین فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز (DEH) (Alef and Nannipieri, 1995) و کاتالاز (CAT) (Liu et al., 2008) در خاک اندازه گیری شد. این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با پنج تیمار بدون کاربرد بیوجار (شاهد یا C)، بیوجار بقایای ذرت (CR) و باگاس نیشکر (SB)، بیوجار اسیدی شده بقایای ذرت (ACR) و بیوجار 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 بیوجار 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 زیست توده میکروبی و فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز و کاتالاز در خاک معنی‌دار بود (جدول ۲).

گلدان‌های پنج کیلوگرمی انتقال داده شدند. رطوبت خاک گلدان‌ها 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 (Herbert and analyzer Vario EL III) اندازه‌گیری شد (Bertsch, 1995). برای ارزیابی تأثیر تیمارهای بیوجار و بیوجار 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

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

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

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪

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

میان درصد کربن آلی در خاک‌های تیمار شده با بیوجارهای اسیدی در مقایسه با بیوجارهای اولیه آن‌ها، مشاهده نشد (شکل ۱). افزایش کربن آلی کل خاک در اثر افزودن بیوجار به خاک به دلیل کربن بالای بیوجارها می‌باشد (جدول ۱)، به دلیل این که

کربن آلی کل خاک (TOC)

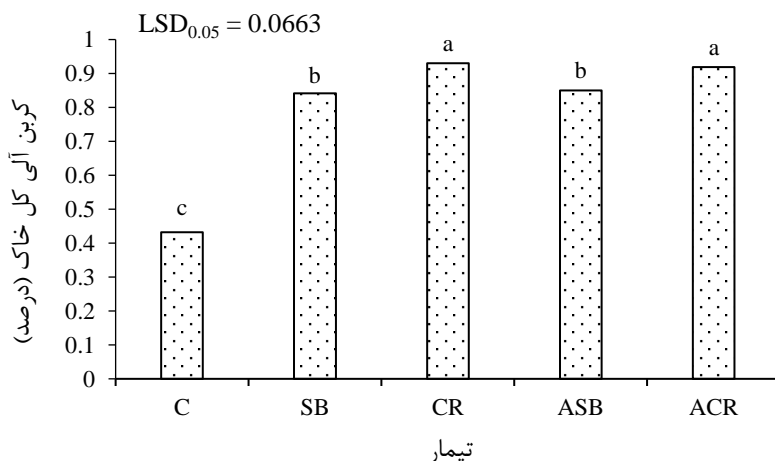
مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارها نشان داد در اثر کاربرد تمامی تیمارهای بیوجار، درصد کربن آلی کل خاک به‌طور معنی‌داری افزایش (۵۶/۸ تا ۱۱۶/۲٪) یافت (شکل ۱). اختلاف معنی‌داری

4. Substrate induced respiration
5. Microbial biomass carbon

1. Total organic carbon
2. Dissolved organic carbon
3. Microbial basal respiration

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 Diamadopoulou (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.

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



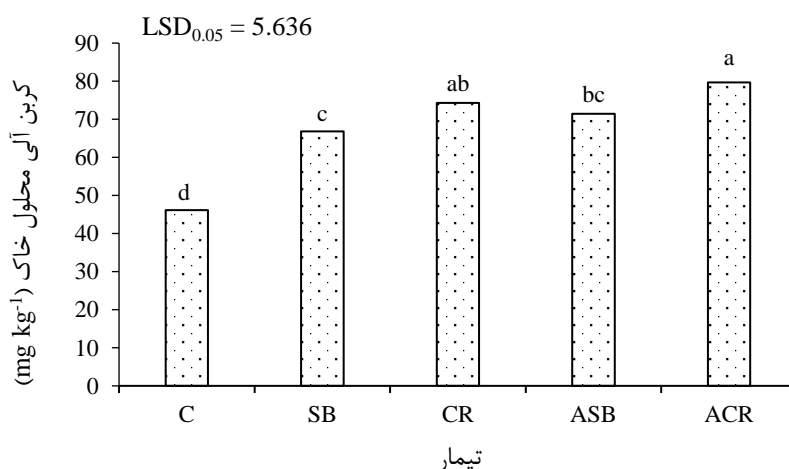
شکل ۱- مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر کربن آلی کل خاک

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 ($P \leq 0.05$) ندارند.

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).

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



شکل ۲- 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 ($P \leq 0.05$) ندارند.

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

۱۰۸/۷٪ و MBC را به ترتیب 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 به دلیل 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 بیوجار می‌تواند به دلیل مواد فرار و ترکیبات جذب سطحی شده بر روی سطح بیوجار باشد، به دلیل این‌که این ترکیبات می‌توانند به‌عنوان سوسترای قابل دسترس برای ریزجانداران خاک عمل نموده و سبب افزایش رشد و فعالیت میکروبی در خاک‌های تیمار شده با بیوجار شوند (Rutigliano et al., 2014). افزایش تنفس ناشی از سوستر در تیمارهای کاربرد بیوجارها نشان می‌دهد، در اثر کاربرد بیوجارها 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 بیوجارها، 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 سوستر افزایش می‌یابد (Song et al., 2018).

کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) در تمامی تیمارهای کاربرد بیوجار افزایش یافت که این نتیجه می‌تواند به دلیل افزایش کربن آلی خاک (شکل ۱ و ۲) و افزایش عناصر غذایی قابل دسترس برای ریزجانداران خاک، در اثر کاربرد بیوجارها باشد. ضریب همبستگی مثبت و معنی‌دار ($P < 0/001$) با MBC با TOC ($r = 0/58$) و DOC ($r = 0/88$) محلول خاک نیز تأیید کننده این نتایج می‌باشد (جدول ۳). همچنین افزایش کربن زیست‌توده میکروبی خاک در اثر افزودن بیوجار می‌تواند به این دلیل باشد که بیوجار 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 بیوجارهای بقایای ذرت در مقایسه با تیمارهای کاربرد بیوجارهای 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 بیوجارهای اولیه باگاس نیشکر و بقایای

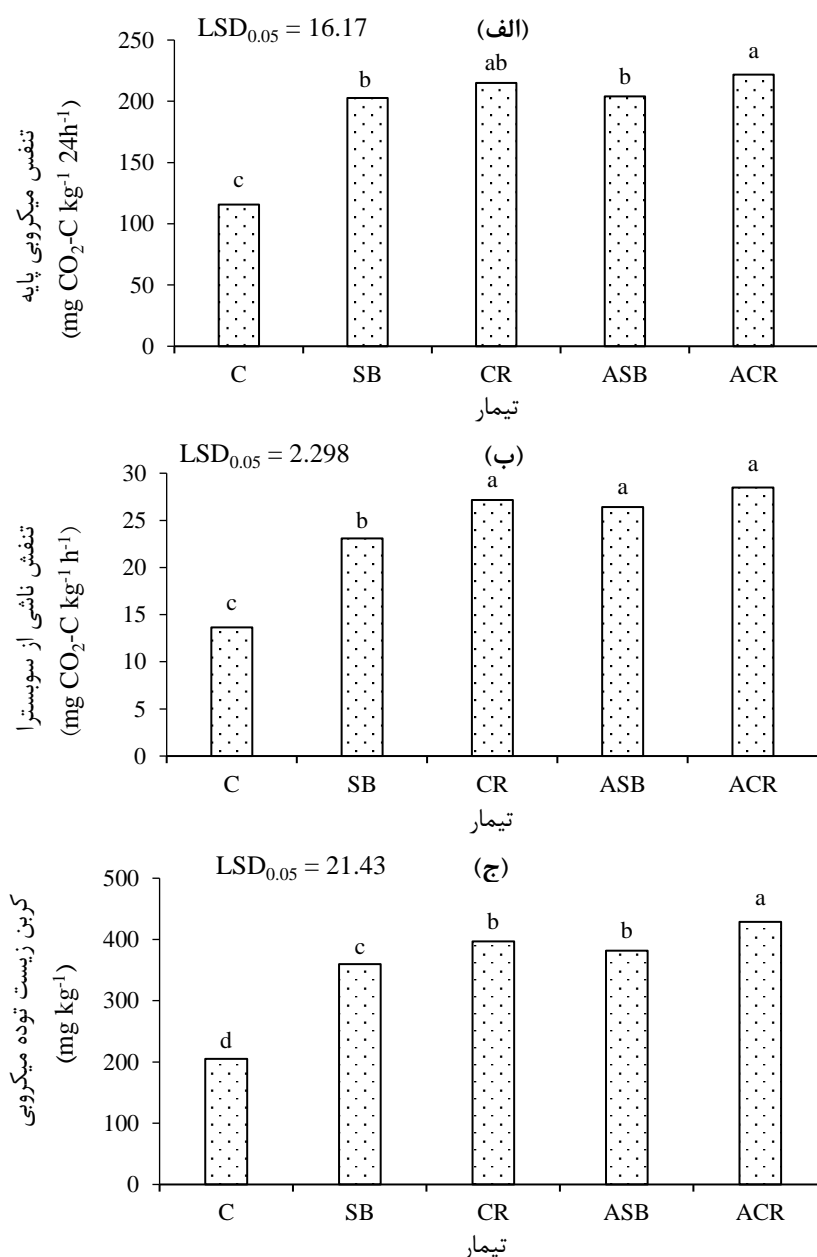
بیوجارهای تهیه شده در دماهای پایین دارای کربن قابل دسترس می‌باشند، بنابراین در اثر کاربرد بیوجارها، کربن آلی محلول خاک افزایش یافت. افزایش کربن آلی محلول خاک در اثر کاربرد بیوجارها نشان می‌دهد که این بیوجارها دارای کربن قابل دسترس بوده که می‌تواند در خاک آزاد شود و منبع انرژی و تغذیه مناسبی برای ریزجانداران خاک می‌باشد (Song et al., 2018; Frene et al., 2021). به‌طور کلی پایداری کربن ساختار بیوجار به ساختار آروماتیک کربن آن بستگی دارد. همچنین تغییرات کربن آلی محلول خاک در خاک‌های تیمار شده با بیوجار به ویژگی‌های ساختاری کربن بیوجار و نوع زیست‌توده آن بستگی دارد (Mierzwa-Hersztek et al., 2020). بیش‌تر بودن کربن آلی محلول در تیمارهای بیوجارهای اسیدی شده در مقایسه با تیمارهای بیوجارهای اولیه آن‌ها، می‌تواند به دلیل تفاوت ویژگی‌های بیوجارها باشد. بیوجارهای اسیدی شده احتمالاً به دلیل 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 بیش‌تری در افزایش کربن آلی محلول خاک داشتند. نتایج این پژوهش نشان داد با این‌که تفاوتی در مقدار کربن آلی کل خاک در تیمارهای مختلف بیوجار مشاهده نشد (شکل ۱) و کربن آلی بیوجارهای اسیدی مقداری جزئی کم‌تر از بیوجارهای اولیه آن‌ها بود (جدول ۱)، اما کربن آلی محلول خاک در تیمارهای بیوجارهای اصلاح شده با گوگرد به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از بیوجارهای اولیه بود. این نتایج می‌تواند به دلیل پایداری بالای کربن آلی بیوجارهای اولیه باشد و نشان می‌دهد اسیدی شدن بیوجارها سبب افزایش فراهمی کربن آن‌ها شده و بیوجارهای اسیدی می‌توانند اثر مثبت بیش‌تری بر کربن آلی محلول خاک داشته باشند. نتایج مطالعه Asirifi et al. (2021) نشان داد در اثر کاربرد بیوجار پوسته برنج در یک خاک با ماده آلی کم (۱۷/۱٪)، کربن آلی محلول در آب گرم، ۱۱ تا ۲۶٪ افزایش یافت. Mierzwa-Hersztek et al. (2020) نیز گزارش کردند کاربرد سطوح مختلف (۵/۰، ۱ و ۲٪ وزنی) بیوجار 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 بیوجار سبب افزایش معنی‌دار تنفس میکروبی پایه (MBR)، تنفس ناشی از سوستر (SIR) و کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) شد (شکل ۳، ۴ و ۵). کاربرد تیمارهای SB، CR، ASB و ACR مقدار MBR را به ترتیب ۷۵/۱، ۸۵/۸، ۷۶/۳ و ۹۱/۶٪، SIR را به ترتیب ۶۹/۱، ۹۸/۹، ۹۳/۶ و

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 بیوجار ذرت به یک خاک آهکی تحت کشت ذرت، MBC خاک را افزایش داد. نتایج پژوهش Vahedi *et al.* (2019) نیز نشان داد کاربرد بیوجار 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.

ذرت، در مقایسه با خاک‌های تیمار شده با بیوجارهای 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 بیوجار 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 بیوجارهای اصلاح شده با گوگرد بر تغییرات pH و حلالیت عناصر غذایی در



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

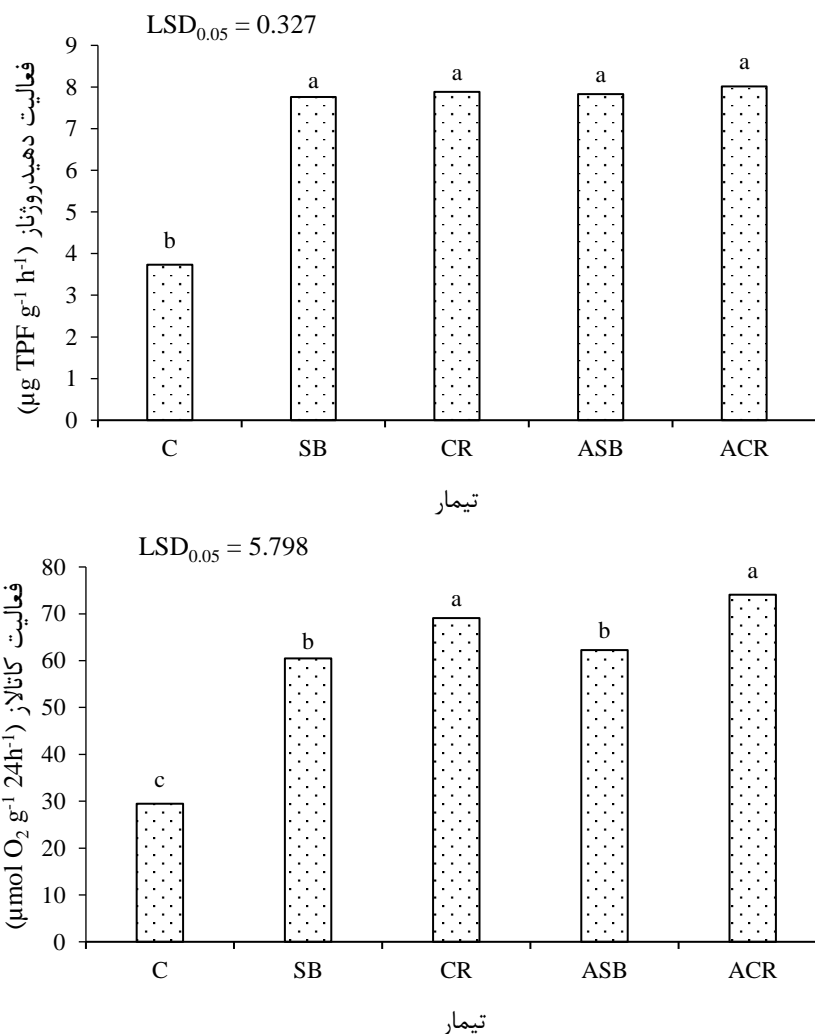
C: شاهد؛ SB: بیوجار باگاس نیشکر؛ CR: بیوجار بقایای ذرت؛ ASB: بیوجار اسیدی شده باگاس نیشکر؛ ACR: بیوجار اسیدی شده بقایای ذرت.

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($P \leq 0.05$) ندارند.

فعالیت دهیدروژناز و کاتالاز

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد افزودن بیوجارها 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 بیوجار وجود نداشت؛ اما فعالیت کاتالاز در تیمارهای بیوجارهای اسیدی شده بیش‌تر از تیمارهای بیوجارهای اولیه آن‌ها بود. این نتیجه احتمالاً به دلیل بیش‌تر بودن فراهمی عناصر غذایی در خاک تیمار شده با بیوجارهای اسیدی شده بود.



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

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

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

ترکیبات فرار، کربوهیدرات‌های قابل دسترس مانند سلولز و همی سلولز و ترکیبات غنی از نیتروژن مانند پروتئین‌ها در بیوجارها باشد (Al-Wabel *et al.*, 2018). نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده بیوجارها 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

به‌طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد بیوجارها 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 بیوجارهای استفاده شده در این پژوهش در دمای پایین تهیه شده بودند، بنابراین افزایش فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز و کاتالاز در خاک در اثر کاربرد بیوجارها می‌تواند به دلیل وجود

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 کاهش گندم و کود گاوی (تهیه شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس) به طور معنی داری افزایش یافت.

بررسی شده به ویژه 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

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

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

***, **, * و * به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۵

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

نتیجه‌گیری

آلی پایین، می‌تواند در بهبود کربن آلی و ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک، بسیار مؤثر باشد. باتوجه به این که 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 به ویژه 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

نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد بیوچارهای بقایای ذرت و باگاس نیشکر و بیوچارهای اصلاح شده با گوگرد، سبب افزایش کربن آلی و کربن زیست توده میکروبی و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و دهیدروژناز به عنوان شاخص‌های بیوشیمیایی کیفیت خاک شدند. تغییرات ویژگی‌های بیوشیمیایی و میکروبیولوژیکی خاک به نوع زیست توده 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 زیست توده میکروبی و فعالیت کاتالاز را افزایش می‌دهد. بر اساس نتایج این پژوهش، کاربرد بیوچار بقایای ذرت و باگاس نیشکر در خاک‌های با ماده

- 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., Hammerschmidt, 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 Engineering*, 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 Katak, 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 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,

- K., Gałazka, A. and Gawryjolek, 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 analysis*. 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.