

The Effect of Biochar Produced from Plant Residues (Pruning Waste of Trees and Straw) on Some of the Microbiological Indices in Calcareous Soils

NEDA MORADI^{1*}, MIR HASSAN RASOULI-SADAGHIANI², EBRAHIM SEPEHR³

1. Ph.D. Graduate of Soil Science, Urmia University and Assistant Prof., Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
 2. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
 3. Associate, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
- (Received: Oct. 28, 2018- Revised: Jan. 15, 2019- Accepted: Jan. 21, 2019)

ABSTRACT

In order to investigate the effect of biochar on soil carbon mineralization and some of the microbiological indices, an incubation experiment was conducted as a factorial in a completely randomized design with 3 factors: 1. biochar type (apple pruning wastes (AB) and wheat straw (SB) for mineralization) and (apple pruning wastes (AB), grape pruning wastes (GB) and wheat straw (SB) for microbial indices), 2. biochar production temperature (350 and 500 °C) and 3. Soil type (with low organic matter (1) and high organic matter (2)) in three replications. To carry out the experiment, biochars were added to the soils at 2% by weight, and the mixtures were incubated for 90 days under standard laboratory conditions (25±2 °C). Unamended soils (without biochars) were also considered in the experiment as the controls. Respiration values were measured for carbon mineralization at different times in AB and SB and data were fitted to the first order equation and at the end of the incubation period (96 days) some microbiological indices were measured. The results showed that the highest and the lowest carbon mineralization potential (C₀) was obtained in the treatment of AB-350 in soil 2 and in soil 1, respectively. The amount of carbon mineralization, bacterial respiration (BR), substrate-induced respiration (SIR), microbial biomass carbon (MBC) and microbial biomass phosphorus (MBP) in the biochar treatments produced at 350 °C were more than the ones produced at 500 °C. Also, the value of biological indicators measured in soil 2 (with high organic matter content) was more than the ones in soil 1 (with low organic matter content). The amount of BR in AB, GB and SB produced at 350 °C were 1.75, 1.24 and 2.27 times greater than the ones in control treatment, respectively. This study provide clear evidence that the application of low temperature biochars (especially SB) improve soil quality. Generally, pyrolysis temperature, biochar type and soil type were the key factors affecting biological indices.

Keywords: Biochar, Biological indices, Carbon mineralization, Pruning wastes

تاثیر بیوچارهای تولید شده از بقایای گیاهی (هرس درختان و کاه و کلش) بر برخی شاخص‌های میکروبیولوژیکی در خاک‌های آهکی

ندا مرادی^{۱*}، میرحسن رسولی صدقیانی^۲، ابراهیم سپهر^۳

۱. دانش آموخته دکتری دانشگاه ارومیه و استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران.

۲. استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۳. دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۱/۱)

چکیده

به منظور بررسی تاثیر بیوچار ضایعات هرس درختان سیب و کلش گندم بر معدنی شدن کربن خاک و برخی شاخص‌های میکروبیولوژیکی، آزمایش انکوباسیون به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با ۳ فاکتور: ۱. نوع بیوچار (هرس شاخ و برگ سیب (AB) و کاه و کلش گندم (SB) برای آزمایش معدنی شدن کربن و ضایعات هرس سیب (AB)، ضایعات هرس انگور (GB) و کاه و کلش گندم (SB) برای آزمایش اندازه‌گیری ویژگی‌های میکروبیولوژیکی، ۲. دمای تولید بیوچار (۳۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس) و ۳. نوع خاک (با ماده آلی پایین (۱) و ماده آلی بالا (۲)) با سه تکرار اجرا گردید. برای اجرای آزمایش ابتدا مقدار ۲ درصد (وزنی/وزنی) از بیوچارها به خاک‌ها افزوده، سپس برای بررسی معدنی شدن کربن در زمان‌های مختلف انکوباسیون، مقدار تنفس در بیوچارهای AB و SB اندازه‌گیری گردید و داده‌های حاصل به معادله سنتیکی مرتبه اول برازش داده شدند و در پایان دوره انکوباسیون (۹۶ روز) برخی شاخص‌های میکروبیولوژیکی نیز اندازه‌گیری گردیدند. نتایج نشان داد، بیشترین پتانسیل معدنی شدن کربن (C₀) در تیمار AB-350 در خاک ۲ و کمترین مقدار آن در خاک ۱ بود. مقدار معدنی شدن کربن، تنفس باکتریایی (BR)، تنفس برانگیخته با سوبسترا (SIR)، کربن زیست توده میکروبی (MBC) و فسفر زیست توده میکروبی (MBP) در تیمارهای بیوچار تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس بیشتر از بیوچارهای تولیدی در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس بود. همچنین مقدار شاخص‌های میکروبی اندازه‌گیری شده در خاک ۲ با مقدار ماده آلی بالا بیشتر از خاک ۱ بود. مقدار BR در بیوچار ضایعات هرس سیب، هرس انگور و کاه و کلش گندم تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با شاهد به ترتیب ۱/۷۵، ۱/۲۴ و ۲/۲۷ برابر بیشتر بود. مطالعه بطور واضح نشان می‌دهد که استفاده از بیوچارهای تولید شده در دمای پایین به خصوص بیوچار SB سبب بهبود کیفیت خاک می‌شود. به‌طور کلی، دمای پیرولیز، نوع بیوچار و نوع خاک فاکتورهای کلیدی تأثیرگذار بر شاخص‌های میکروبی بودند.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های بیولوژیک، معدنی شدن کربن، بقایای هرس، بیوچار

مقدمه

استفاده قرار گیرند (Gil-Sotres et al., 2005). Herrick (2000) بیان نمود که شاخص‌های میکروبیولوژیک خاک از جنبه‌های مهم کیفیت خاک هستند و به همین دلیل کیفیت خاک با استفاده از خواص مختلف میکروبیولوژیک نیز اندازه‌گیری می‌شود. اصولاً خاکی که از تنوع و توزیع مناسب میکروبی برخوردار باشد و ریزموجودات آن به خوبی فعالیت کنند، از نظر کیفی در سطح بالایی است. فعالیت آنزیمی و زیست توده میکروبی (کربن و فسفر زیست توده میکروبی) از مهم‌ترین شاخص‌های میکروبی خاک محسوب می‌شوند. ورود مواد آلی اصلاح کننده اغلب می‌تواند راهکاری مناسب در بازسازی و بهبود باروری خاک باشد. یکی از راه‌های صحیح و عملی برای بهبود ماده آلی خاک، مدیریت

حفظ سطح آستانه مواد آلی در خاک با توجه به تاثیرات نامناسب تغییر اقلیمی جهانی بر سلامت خاک و باروری محصول، برای حفظ خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک و همچنین محصولات کشاورزی و عملکرد زیست محیطی ضروری است. خاک‌های مناطق مختلف جهان به دلایل متعدد برای انجام عملیات کشاورزی نامناسب شده است. از جمله عوامل نامطلوب می‌توان به کاهش مواد آلی اشاره نمود (Qi et al., 2017). برای ارزیابی تغییرات عملکردهای خاک و تغییرات آن بهتر است پارامترها و نمایه‌های زیست شیمیایی که نشان دهنده تنوع، توزیع زیستی و چگونگی فعالیت ریزموجودات خاک هستند، مورد

Khademi and Raiesi (2017) با مطالعه‌ای که بر روی بیوچارهای بقایای ذرت تولید شده در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ در دو سطح بیوچار ۰/۵ و ۱ درصد انجام دادند، بیان کردند که بیشترین پاسخ توسط شاخص‌های میکروبی در بیوچار ذرت تولید شده در دمای ۲۰۰ درجه و در سطح بیوچار ۱ درصد مشاهده گردید. کاربرد بیوچارهای مختلف احتمالاً به افزایش و یا حداقل به ننگداری سطح مواد آلی خاک و بهبود حاصلخیزی و کیفیت خاک در اراضی خشک و نیمه خشک کمک می‌کند (Khadem and Raiesi, 2017) بیوچار با تغییری که در جمعیت میکروبی خاک ایجاد می‌کند، می‌تواند موجب تغییر در چرخه‌ی عناصر غذایی و تغذیه و رشد گیاه شود (Elzobair *et al.*, 2016). بیوچار می‌تواند از راه‌های مختلفی بر زیست‌توده میکروبی تأثیر گذار باشد، به‌عنوان مثال بیوچار با فراهم نمودن زیستگاه‌های کوچک برای ریزجانداران خاک، این ریزجانداران را از گزند شکارچیان محافظت می‌کند. از طرفی می‌توان گفت که تغییر در فعالیت میکروبی و ساختار جمعیتی میکروارگانیسم‌ها یکی از اثرات غیرمستقیم بیوچار است که در اثر تغییر در pH خاک و فراهمی عناصر غذایی در خاک حاصل شده است (Lehmann and Joseph, 2015).

Marzooqi and Yousef (2017) در مطالعه‌ای تاثیر بیوچار سالیکورنیا (پیرولیز در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۶ ساعت) بر ویژگی‌های میکروبی یک خاک آهکی شنی (pH=۷/۴۶) را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد افزودن بیوچار (pH=۸/۶) سبب افزایش کربن آلی از ۱۰ به ۲۶ گرم بر کیلوگرم شد، اما تاثیر معنی‌داری در آب قابل استفاده برای گیاه نداشت. تنفس میکروبی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت.

Subedi *et al.* (2016) در مطالعه‌ای تاثیر بیوچار کود مرغی تهیه شده در دماهای ۴۰۰ به مقدار ۲ درصد (pH و CEC به- ترتیب برابر ۹/۵ و ۳۰/۲ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم) و ۶۰۰ درجه سلسیوس (pH و CEC به‌ترتیب برابر ۱۰/۴ و ۲۷/۵ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم) بر کربن زی‌توده میکروبی یک خاک آهکی شنی (pH و CEC مطالعه شده به‌ترتیب برابر ۸/۳ و ۵/۴ سانتی-مول بار بر کیلوگرم بود). را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد بیوچارهای تهیه شده در هر دو دما سبب افزایش کربن زی‌توده میکروبی خاک شدند.

کربن زیست توده میکروبی به عنوان مخزن قابل توجه عناصر غذایی و تغییر و تبدیلات مواد آلی خاک است، سرعت تجزیه فسفر زیست توده میکروبی از سرعت تجزیه کربن زیست توده میکروبی سریعتر است. بنابراین، فسفر زیست توده میکروبی می‌تواند منبع مهمی در تأمین فسفر مورد نیاز گیاه باشد. به نظر

استفاده از ضایعات هرس درختان میوه است که متاسفانه قسمت اعظم آن سوزانده و یا در جایی رها گردیده و از اینرو آلودگی محیط زیست را سبب می‌شود (Cakmak *et al.*, 2001; Khanmohammadi *et al.*, 2016). حال با توجه به صدمات زیست‌محیطی که این ضایعات وارد می‌کنند، کشورهای توسعه یافته بدنبال روش‌هایی نوین برای کنترل این موضوع هستند. یکی از راه‌کارهای افزایش مواد آلی خاک که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، پیرولیز بقایای گیاهی و زی‌توده‌ها و تولید بیوچار است (Elzobair *et al.*, 2016).

بیوچار، کربن غنی تهیه شده از زیست توده‌های گیاهی و ضایعات کشاورزی است که طی فرآیند پیرولیز در شرایط کمبود اکسیژن تولید می‌شود (Zhao *et al.*, 2015). بیوچار علاوه بر اصلاح خاک از طریق بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک (Purakayastha *et al.*, 2016)، به عنوان یک جاذب برای حذف آلودگی‌های آلی و غیرآلی استفاده می‌شود (Zhou *et al.*, 2016). این ماده به علت سرعت تجزیه بسیار کند نسبت به سایر مواد آلی، ظرفیت زیادی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای از قبیل دی‌اکسید کربن و متان که از ضایعات آزاد می‌شود، دارد و می‌تواند کربن را برای دوره‌های طولانی ذخیره کند. مواد اولیه برای تولید بیوچار می‌تواند شامل مواد چوبی (ضایعات درختان)، ضایعات کشاورزی مانند کاه و کلش و بقایای ذرت، کودهای حیوانی و دیگر مواد آلی باشد (Yang *et al.*, 2017).

یکی از ویژگی‌های مهم بیوچار، پایداری آن پس از افزودن به خاک است که بستگی به دما و شرایط تولید بیوچار و نوع خاک دارد که این خصوصیت بیوچار برای ترسیب کربن در خاک بسیار مهم است (Lehmann and Joseph, 2015) Fang *et al.* (2014) پایداری دو نوع بیوچار چوبی تولید شده در دماهای ۴۵۰ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مقدار ۲ درصد را در چهار خاک مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که پس از گذشت یک سال تنها ۳/۳-۰/۳ درصد کربن بیوچار معدنی می‌شود و با افزایش دمای گرم‌ماکافت، پایداری کربن بیوچار افزایش می‌یابد. پایداری بیشتر کربن بیوچار تولید شده در دماهای بالاتر به درصد نسبی کربن الکیل و آروماتیک، میزان تراکم کربن آروماتیک، نوع مواد اولیه مورد استفاده برای تولید بیوچار و کاهش بخش ناپایدار کربن نسبت داده می‌شود. شواهد نشان می‌دهد که کربن بیوچار بسیار مقاوم و پایدار بوده و زمان ماندگاری آن‌ها در مورد بیوچار چوب در دامنه ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ سال قرار می‌گیرد که ۱۰ تا ۱۰۰۰ برابر زمان ماندگاری کربن آلی خاک است. بنابراین افزودن بیوچار به خاک می‌تواند مخزن بالقوه‌ای از کربن را در خاک فراهم آورد (Verheijen *et al.*, 2010).

خاک، کربن آلی و کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش استاندارد در آزمایشگاه گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه، از بین نمونه‌های خاک ۲ نمونه براساس مقدار مواد آلی انتخاب گردید. خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش از دو سری خاک در شهرستان ارومیه نمونه‌برداری شدند. رده‌بندی این خاک‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری گردیدند.

ساخت بیوپچار

برای تهیه بیوپچار، نظر به اهمیت موضوع مقادیر بالایی از شاخه‌های هرس (ترجیحاً شاخه‌های یک یا دو ساله) از باغ‌های شهرستان ارومیه جمع‌آوری گردیدند. ضایعات هرس درختان سیب و انگور (اندازه ۳۰-۲۰ میلی متر) و کاه و کلش گندم (اندازه ۱۰-۲۰ میلی متر) خرد و با آب مقطر شسته شدند. سپس به مدت ۲ روز در دمای ۷۵ درجه سلسیوس داخل آون قرار داده شدند. سپس بقایا در داخل استوانه فلزی به قطر ۷ و ارتفاع ۳۱ سانتی‌متر در داخل کوره الکتریکی قرار گرفتند. بقایا به مدت ۲ ساعت (Cantrell et al., 2012)، در دمای ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس در شرایط بدون حضور گاز اکسیژن (وارد کردن گاز N₂ از طریق محفظه ورودی راکتور) با سرعت افزایش دمای ۳ درجه سلسیوس بر دقیقه حرارت داده شدند. بعد از اتمام زمان پیرولیز، راکتورها از کوره خارج شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای معمولی اتاق قرار داده شدند تا در دمای محیط خنک شوند. سپس بیوپچارها از الک نیم میلی‌متر عبور داده شدند.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوپچار

درصد عملکرد بیوپچارهای (Y_B) تهیه شده در دماهای مختلف از نسبت وزن بیوپچار (W_B) بر حسب گرم به وزن آون خشک زیست-توده اولیه (W_{RB}) بر حسب گرم مطابق رابطه (۱) محاسبه شد (Singh et al., 2017):

$$Y_B (\%) = \frac{W_B}{W_{RB}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

برای اندازه‌گیری درصد خاکستر بیوپچارهای تولید شده، ۵ گرم از هر نمونه آون خشک شده، داخل بوتله چینی قرار داده و به مدت ۶ ساعت در کوره الکتریکی در دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس در شرایط اکسیژن کافی قرار داده شد. سپس درصد خاکستر از نسبت وزن خاکستر (W_A) بر حسب گرم به وزن آون خشک بیوپچار (W_B) بر حسب گرم (رابطه ۲) برآورد شد (Singh et al., 2017):

$$\text{Ash} (\%) = \frac{W_A}{W_S} \times 100 \quad (\text{رابطه ۲})$$

برخی از ویژگی‌های بیوپچارها مانند pH (در نسبت ۱:۱۰ آب و بیوپچار) و هدایت الکتریکی (در نسبت ۱:۲۰ آب و بیوپچار)

می‌رسد که بیوپچار قادر به تحریک و افزایش زیست توده و فعالیت میکروبی، همچنین فعالیت‌های آنزیمی در خاک است. افزایش زیست توده میکروبی در اثر بیوپچار بخاطر حضور بخش لبایل کربن مشاهده شده است (Xu et al., 2016). مطالعات دیگری گزارش کردند که بیوپچار تأثیری بر زیست توده میکروبی خاک ندارد (Elzobair et al., 2016) حتی تا حدودی تأثیر منفی دارند. Dempster et al. (2012)، گزارش کردند که بیوپچار چوب جارا تهیه شده در دمای ۶۰۰ درجه در مقدار ۲۵ تن در هکتار به دلیل فراهم کردن زیستگاه‌های مناسب برای میکروب‌ها سبب کاهش زیست توده میکروبی خاک می‌گردد. همچنین مقدار کاربرد بیوپچار و نوع خاک در پاسخ زیست توده میکروبی خاک موثر است (Lehmann and Joseph, 2015).

برگشت بقایای آلی گیاهان و ضایعات کشاورزی در اولویت اول و روش بازچرخ این بقایا به خاک در مرحله دوم از مهمترین دغدغه‌های امروزه کشاورزی است. متأسفانه در سال‌های اخیر گزارش‌های زیادی مبنی بر سوزاندن و اتلاف کربن آلی بقایای گیاهی در کشور گزارش شده است که علاوه بر هدررفت منابع عظیمی از کربن آلی، موجبات تخریب محیط زیست و افزایش دی اکسیدکربن اتمسفر را نیز فراهم آورده است. بنابراین با توجه به حجم بالای بقایای هرس درختان سیب و انگور و کاه و کلش در استان آذربایجان غربی، یکی از راه‌های مدیریت آنها کمپوستینگ است که به دلیل زمان‌بر بودن آن به‌خصوص در بقایای چوبی و لیگنینی، روش جایگزین دیگر، تبدیل بقایا به بیوپچار است. اطلاعات کم و محدودی در مورد تأثیر افزودن بیوپچار در فعالیت میکروبی در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک با مقدار مواد آلی بسیار کم وجود دارد (Elzobair et al., 2016). همچنین تاکنون درک کاملی از اثر بیوپچار بقایای هرس درختان سیب و انگور و کاه و کلش گندم و تأثیر آن‌ها بر شاخص‌های میکروبیولوژیکی در خاک‌های آهکی حاصل نشده است. لذا هدف از این تحقیق مطالعه تأثیر بیوپچار حاصل از بقایای هرس درختان سیب، هرس انگور و کاه و کلش گندم بر برخی شاخص‌های میکروبیولوژیکی خاک بود تا با فهم اثرات این بیوپچارها بتوان مدیریت خوبی بر مقدار ضایعات فراوان هرس درختان سیب و انگور اتخاذ کرد.

مواد و روشها

خاک‌های مورد مطالعه

برای انجام مطالعه تعداد ۵ نمونه خاک از زمین‌های زراعی شهرستان ارومیه از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری شدند و سپس بعد از انجام آزمایش‌های اولیه مانند اندازه‌گیری بافت

در پایان دوره انکوباسیون کربن زیست توده میکروبی به روش تدخین-استخراج، از اختلاف مقادیر محاسبه شده برای نمونه‌های تدخین شده و تدخین نشده، فسفر زیست توده میکروبی به روش تدخین-استخراج، تنفس باکتریایی به روش اندرسون (Anderson, 1982) و تنفس برانگیخته با سوبسترا GB, AB, Alef and Nannipieri, 1995) در هر سه نوع بیوچار و SB و اندازه‌گیری شدند. برای برآورد کسر متابولیکی از تقسیم میزان تنفس پایه بر کربن زیست توده میکروبی استفاده گردید.

این آزمایش به صورت فاکتوریل در سه سطح در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ فاکتور ۱- تیمار نوع بیوچار (هرس سیب (AB) و کاه و کلش گندم (SB)) برای آزمایش معدنی شدن کربن و (ضایعات هرس سیب (AB)، ضایعات هرس انگور (GB) و کاه و کلش گندم (SB)) برای آزمایش اندازه‌گیری ویژگی‌های میکروبیولوژیکی ۲- دمای تولید بیوچار (۳۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس) ۳- نوع خاک (با ماده آلی بالا و ماده آلی پایین) با سه تکرار اجرا گردید. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم-افزارهای MSTATC و SPSS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. ترسیم نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در این آزمایش در جدول (۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد خاک‌های مورد استفاده دارای بافت لوم سیلتی و لوم بوده که خاک ۱ با ۲۳/۵ درصد کربنات کلسیم معادل به عنوان خاک آهکی، غیر شور و با pH قلیایی بود. همچنین میزان کربن آلی کمتر (۰/۶۴ درصد) این خاک بیانگر فقر ماده آلی بود. اما خاک ۲ دارای کربن آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی بیشتر و کربنات کلسیم معادل کمتری در مقایسه با خاک ۱ بود.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه

شماره	نام سری	زیرگروه	رده	بافت خاک	pH	فسفر اولسن % kg mg ⁻¹	N	OC	CCE	EC m dS ⁻¹	CEC kg cmol ⁻¹
۱	ساران	Halaquepts Fluventic	Inceptisols	لوم سیلتی	۷/۸۵	۱۴	۰/۰۷	۰/۶۴	۲۳/۵	۰/۲۶	۱۹/۵
۲	سردرد	Halaquepts Typic	Inceptisols	لوم	۷/۷۳	۲۱	۱	۱/۴۴	۹	۰/۸۹	۲۳/۵

مقدار pH و EC و درصد خاکستر در بیوچارهای تولید شده افزایش یافت بطوریکه بیشترین مقدار pH و EC در بیوچار کاه و کلش گندم تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس و کمترین مقدار آن در بیوچار هرس درختان سیب تولید شده در دمای ۳۵۰

(Singh et al., 2017)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات آمونیوم یک مولار اصلاح شده (pH=7) (Domingues et al., 2017)، کربن، نیتروژن و هیدروژن کل به روش سوزاندن خشک با دستگاه ECS 4010 CHNSO Analyzer اندازه‌گیری شدند (Domingues et al., 2017).

آزمایش انکوباسیون برای اندازه‌گیری ویژگی‌های میکروبیولوژیکی

برای اجرای آزمایش انکوباسیون و بررسی تأثیر نوع خاک، نوع بیوچار و دمای پیرولیز بیوچار بر ویژگی‌های میکروبیولوژیکی خاک، ابتدا به ۲۰۰ گرم از نمونه خاک هوا-خشک شده، از هر یک از بیوچارهای تولید شده (ضایعات هرس سیب (AB)، ضایعات هرس انگور (GB) و کاه و کلش گندم (SB)) در دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس مقدار ۲ درصد وزنی/وزنی اضافه گردیده و با هم مخلوط شدند. بعد رطوبت نمونه‌ها با افزودن آب مقطر به صورت اسپری در ۶۰ درصد رطوبت ظرفیت زراعی تنظیم شدند و سپس نمونه‌ها به مدت ۹۶ روز در دمای ۲۵±۲ درجه سلسیوس نگه‌داری گردیدند. اما برای بررسی تأثیر نوع خاک و بیوچار بر روی معدنی شدن کربن خاک دو نوع از بیوچارها (برای مقایسه بهتر یک نوع چوبی و یک نوع علفی) شامل AB و SB انتخاب گردید و سپس تنفس میکروبی طی ۹۶ روز (۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۳۰، ۳۶، ۴۲، ۴۸، ۵۵، ۶۶، ۷۳، ۸۰، ۸۹ و ۹۶ روز) در بیوچارهای هرس سیب (چوبی) و کاه و کلش گندم (علفی) به روش اندرسون اندازه‌گیری گردید (Anderson, 1982). سپس برای تعیین سرعت و پتانسیل معدنی شدن کربن از طریق CO₂ آزاد شده به توابع مختلف سینتیکی برازش داده شد. بهترین برازش توسط معادله سنتیکی مرتبه اول حاصل گردید (رابطه ۳):

$$C_{min} = C_0 (1 - e^{-kt}) \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن C_{min} کربن معدنی شده، C₀ پتانسیل معدنی شدن کربن، k ثابت سرعت معدنی شدن و t زمان می‌باشد (Zhou et al., 2012).

نتایج مربوط به ویژگی‌های بیوچارهای تولید شده نیز در جدول (۲) نشان داده شده است. بیوچارهای تولید شده از ضایعات هرس سیب، هرس انگور و کاه و کلش گندم بسته به دمای پیرولیز در محدوده بازی ضعیف تا قلیایی بودند. با افزایش دمای پیرولیز،

افزایش دمای پیرولیز، کاهش یافت. افزایش غلظت کربن با افزایش دمای پیرولیز به علت افزایش درجه کربونیزه شدن رخ می‌دهد که منجر به ساختار کربن متراکم‌تر در بیوچار می‌شود (Zhao *et al.*, 2018). کاهش در عملکرد بیوچار با افزایش دمای پیرولیز نیز می‌تواند به دلیل اتلاف بیشتر مواد فرار در دمای بالاتر باشد (Singh *et al.*, 2015). (Moradi *et al.*, 2017) با بررسی تاثیر تغییرات ویژگی‌های بیوچارهای مختلف تهیه شده در دماهای پیرولیز ۳۵۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس گزارش کردند بر اثر افزایش دما، عملکرد و درصد کربن آلی بیوچارها کاهش یافت، اما pH، EC، درصد خاکستر و پایداری کربن افزایش یافت.

درجه به دست آمد. این افزایش در مقادیر pH عمدتاً به دلیل جداسازی نمک‌های قلیایی از موادآلی با افزایش درجه حرارت پیرولیز است. Mandal *et al.* (2018) نیز افزایش pH و EC بیوچارهای تهیه شده از زیست‌توده‌های مختلف بقایای گیاهی در اثر افزایش دمای پیرولیز را گزارش کردند. CEC بیوچار با افزایش دمای پیرولیز کاهش یافت. بیشترین مقدار CEC در دمای ۳۵۰ درجه و کمترین مقدار آن در دمای ۵۰۰ درجه به دست آمد. نتایج مشابهی نیز توسط Domingues *et al.* (2017) به دست آمده است. نتایج جدول (۲) نشان داد که با افزایش دمای پیرولیز محتوای کربن بیوچار افزایش یافت، اما مقدار H و عملکرد با

جدول ۲. برخی ویژگی‌های بیوچارهای تولید شده از بقایای مختلف گیاهی

نوع بیوچار	دمای پیرولیز °C	pH	EC dS m ⁻¹	CEC cmol _c kg ⁻¹	نیترژن کل (%)	کربن کل (%)	هیدروژن کل (%)	خاکستر	عملکرد بیوچار
هرس درختان سیب (AB)	۳۵۰	۷/۱۱	۰/۰۵	۳۲/۵۳	۰/۲۲	۶۴/۰۲	۳/۸۹	۱۰/۲۰	۳۴/۹۴
	۵۰۰	۸/۶۷	۰/۰۹	۲۴/۹۴	۰/۷۵	۶۸/۸۸	۲/۷	۱۴/۶۸	۲۸/۱۴
هرس درختان انگور (GB)	۳۵۰	۷/۵۶	۰/۰۸	۳۶/۳۲	۰/۸۶	۷۱/۰۳	۴/۰۴	۵/۰۸	۳۶/۷۶
	۵۰۰	۹/۵۹	۰/۲	۳۴/۴۳	۰/۸۷	۷۱/۵۳	۲/۸۸	۱۱/۱۸	۳۰/۰۴
کاه و کلش گندم (SB)	۳۵۰	۸/۱۳	۰/۵۵	۱۰۸/۴۲	۰/۴۱	۵۹/۴۲	۴/۰۴	۱۷/۱۴	۴۲/۵۷
	۵۰۰	۹/۹۴	۰/۶۸	۵۹/۰۹	۰/۲۲	۶۴/۳۱	۳/۸۹	۲۲/۹۸	۳۲/۴

افزایش می‌یابد (Demisie *et al.*, 2014). افزایش نسبتاً کمتر در کربن معدنی‌شده تجمعی از تیمارهای بیوچار تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه در مقایسه با شاهد در هر دو خاک، نشان‌دهنده این مطلب است که تیمارهای بیوچار در برابر تجزیه بیولوژیکی مقاوم هستند (Awad *et al.*, 2013). گزارش شده است که میزان معدنی شدن بیوچارهای ساخته شده در دماهای بالا در مقایسه با بیوچارهای ساخته شده در دمای پایین کمتر آهسته و در نتیجه تصاعد CO₂ کمتر است (Khadem and Raiesi, 2017).

مقایسه میانگین داده‌ها نشان دادند، معدنی شدن کربن در تیمارهای AB-350 و SB-350 در مقایسه با AB-500 و SB-500 به طور معنی‌داری (P < ۰/۰۵) در هر دو خاک مورد مطالعه بیشتر بود (شکل ۲). همچنین افزودن بیوچارهای مختلف مورد مطالعه سبب افزایش کربن تجمعی کل در مقایسه با تیمارهای شاهد شد (خاک ۱ و ۲). به غیر از تیمارهای SB-500-1 و SB-500-2 که اختلاف معنی‌داری با تیمارهای شاهد نداشتند. این نتایج نشان می‌دهد که پایداری کربن بیوچار در خاک‌ها می‌تواند به محتوای کربن آروماتیک، ترکیبات آلی فرار (VOCs^۲) و جزء-های زیست فراهم کربن آنها نسبت داده شود که مستقیماً با افزایش دمای پیرولیز ارتباط دارد (Demisie *et al.*, 2014).

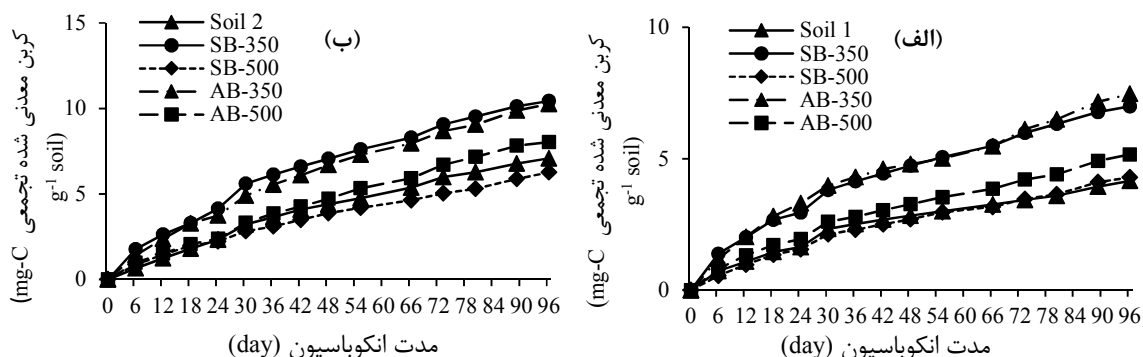
تأثیر بیوچارهای مختلف بر سرعت معدنی شدن کربن

معدنی شدن مواد آلی نقش کلیدی را در حاصلخیزی خاک از طریق رهاسازی مواد غذایی و متعاقباً تأثیر بر باروری اولیه خالص، بازی می‌کنند. اندازه‌گیری تصاعد CO₂ از خاک به طور گسترده برای تعیین تأثیر متغیرهای محیطی بر اکسیداسیون موادآلی خاک استفاده می‌شود. کربن معدنی‌شده تجمعی در خاک‌های تیمار شده و شاهد در طول ۹۶ روز انکوباسیون به طور جداگانه برای هر یک از خاک‌ها به منظور تسهیل مقایسه بهتر در شکل (۱-الف و ب) نشان داده شده است. مقدار CO₂ کربن معدنی‌شده تجمعی در طول دوره انکوباسیون در تیمارهای بیوچار تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه بیشتر از بیوچارهای تولیدی در دمای ۵۰۰ درجه بود. همچنین مقدار کربن معدنی‌شده تجمعی در تیمارهای SB-350 و AB-350 بیشتر از تیمار شاهد در هر دو خاک مورد مطالعه بود. اما در تیمارهای بیوچار تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه اختلاف چندانی با تیمار شاهد در هر دو خاک وجود نداشت. تأثیرات بیوچار بر افزایش کربن معدنی‌شده تجمعی از خاک ممکن است به دلیل جزء کربن لبایل بیوچار باشد که می‌تواند به راحتی توسط میکروارگانیسم‌های خاک مورد استفاده قرار گیرد، در نتیجه فعالیت میکروبی افزایش یافته و متعاقباً تصاعد CO₂

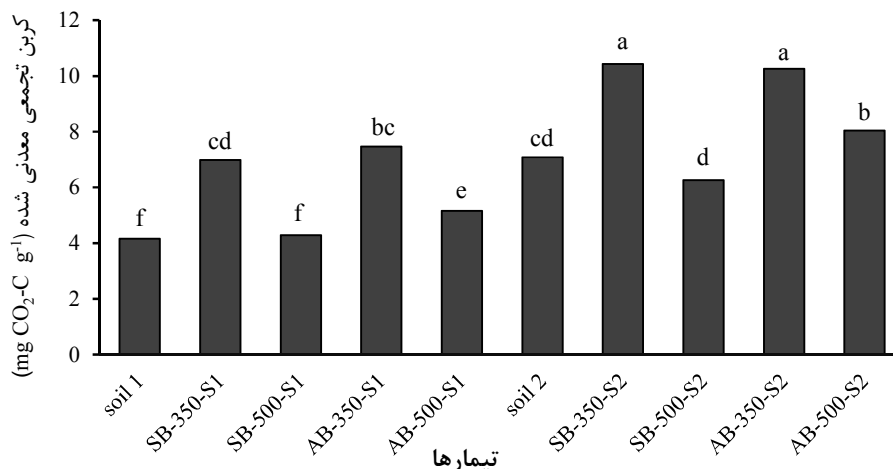
^۲ Volatile organic compounds

کربن لبایل بیوچار در دمای پایین پیرولیز (۳۵۰ درجه) یا افزایش معدنی شدن کربن آلی خاک، افزایش یافته بود (Ippolito *et al.*, 2016b). Luo *et al.* (2013) نشان دادند که تلفات کربن بیوچار بسیار پایین تر از پتانسیل ذخیره سازی کربن بیوچار است.

مطالعات قبلی گزارش کردند، انتشار CO₂ در خاک های اصلاح شده با بیوچارهای تولید شده در دماهای بین ۳۵۰ تا ۸۵۰ درجه بسیار متغیر است (Fabbri *et al.*, 2013; Khadem and Raiesi, 2017). هر چند سرعت کربن معدنی شده تجمعی به دلیل تجزیه



شکل ۱. تاثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر تنفس تجمعی خاک (mg-C g⁻¹ soil) در دو نوع خاک (الف) و (ب) در طول دوره انکوباسیون



شکل ۲. تاثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر مقدار کربن تجمعی معدنی شده (mg CO₂-C g⁻¹ soil) در طول دوره انکوباسیون

به ترتیب SB-500-S1 و SB-350-S1 به ترتیب بیوچارهای کاه و کلش تولید شده در دمای ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه و اضافه شده به خاک ۱ و SB-500-S2 و SB-350-S2 به ترتیب بیوچارهای کاه و کلش تولید شده در دمای ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه و اضافه شده به خاک ۲ است) * ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن معنی دار نمی باشند.

داده های مربوط به پارامترهای سنتیکی معدنی شدن کربن در جدول (۳) ارائه شده است. در مطالعه حاضر برای توصیف معدنی شدن کربن از تیمارهای مختلف بیوچار و شاهد در خاک های مختلف از معادله مرتبه اول استفاده شده است. درجه انطباق بین داده های تجربی (محاسبه شده) و مقادیر پیش بینی شده از معادله با ضریب تبیین (R²) بیان شده است (۰/۹۹۷ تا ۰/۹۷۴). که در کلیه تیمارها ضریب تبیین مدل درجه اول بسیار بالاست که نشان دهنده برازش خوب داده ها به مدل است. بیشترین پتانسیل معدنی شدن کربن (C₀) در تیمار AB-350 در خاک ۲

کمترین مقدار آن در خاک ۱ (۱۳/۱۲ mg CO₂-C g⁻¹ soil) و کمترین مقدار آن در خاک ۱ (۴/۵۴ mg CO₂-C g⁻¹ soil) بدست آمد. ثابت سرعت معدنی شدن (k) نیز در بیوچارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه بیشتر از بیوچارهای تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه بود. یکی از قابلیت های برازش داده ها به این معادله استفاده از شاخص سرعت معدنی شدن می باشد که از حاصل ضرب C₀×k بدست می آید. نتایج نشان دادند که شاخص سرعت معدنی شدن نیز در بیوچارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ بیشتر از دمای ۵۰۰ درجه است.

جدول ۳. مقادیر کل کربن معدنی شده تجمعی و پارامترهای برآورد شده از معادله مدل درجه اول

تیمارها	محاسبه شده		مدل		C soil ⁻¹ g C- ⁻² CO mg	k (⁻²) ⁻¹ Day	k×C soil ⁻¹ g C- ⁻² CO mg day	R ²
	soil ⁻¹ g C- ⁻² CO mg	soil ⁻¹ g C- ⁻² CO mg	soil ⁻¹ g C- ⁻² CO mg	soil ⁻¹ g C- ⁻² CO mg				
خاک ۱	۴/۱۶	۳/۹۴	۴/۵۴	۰/۰۲۱	۰/۰۹۵	۰/۹۹۷		
SB-350-1	۶/۹۹	۶/۷۲	۷/۷۶	۰/۰۲۱	۰/۱۶	۰/۹۸۴		
SB-500-1	۴/۲۹	۴/۱۱	۵/۴۴	۰/۰۱۵	۰/۰۸۲	۰/۹۸۹		
AB-350-1	۷/۴۶	۶/۹۹	۸/۱۹	۰/۰۲۰	۰/۱۶	۰/۹۷۴		
AB-500-1	۵/۱۶	۴/۹۱	۶/۳۱	۰/۰۱۶	۰/۰۹۹	۰/۹۸۵		
خاک ۲	۷/۰۸	۷/۰۴	۱۱	۰/۰۱۱	۰/۱۲	۰/۹۹۶		
SB-350-2	۱۰/۴۳	۱۰/۳۹	۱۲/۷۱	۰/۰۱۷	۰/۳۲	۰/۹۸۹		
SB-500-2	۶/۲۶	۶/۰۰	۸/۴۲	۰/۰۱۳	۰/۱۱	۰/۹۹۱		
AB-350-2	۱۰/۲۶	۱۰/۰۳	۱۳/۱۲	۰/۰۱۵	۰/۳۰	۰/۹۹۶		
AB-500-2	۸/۰۴	۸/۰۸	۱۰/۳۲	۰/۰۰۷۸	۰/۰۸۰	۰/۹۹۶		

میکروارگانسیم‌ها برای تامین انرژی سبب افزایش تنفس شوند. بیشترین مقدار افزایش BR در خاک ۲ در تیمار SB بود که در مقایسه با AB و GB به ترتیب ۱۵/۹۶ و ۷/۵۱ درصد بیشتر بود. در حالت کلی در تیمارهای بیوچار نیز مقدار BR در خاک ۲ بیشتر از خاک ۱ بود. مقایسه میانگین نوع و دمای تولید بیوچار نشان داد (جدول ۴) با افزودن بیوچارهای مختلف تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه، مقدار BR به طور معنی داری افزایش یافت. اما در بیوچارهای تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه این افزایش فقط در تیمار SB مشاهده شد و در تیمارهای AB و GB اختلاف معنی داری با تیمار شاهد (بدون بیوچار) وجود نداشت. بیشترین مقدار BR در تیمار SB تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه به دست آمد. مقدار BR در تیمارهای AB، GB و SB تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه در مقایسه با شاهد (بدون بیوچار) به ترتیب ۱/۸، ۱/۲ و ۲ برابر بیشتر بود. Nguyen and Lehmann (2009) دریافتند تلفات کربن در خاک تیمار شده با بیوچار درخت بلوط و بقایای ذرت تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه طی دوره انکوباسیون بین ۸/۰۸ و ۲۱/۲۱ درصد بود. تیمار SB تولید شده در دمای پیرولیز ۵۰۰ درجه در مقایسه با شاهد مقدار BR را ۲۴/۲۹ درصد افزایش داد.

تنفس برانگیخته با سوبسترا یکی از روش‌های پایه‌ای برای برآورد کمی زیست توده میکروبی خاک به عنوان بخش بسیار فعال و ناپایدار کربن آلی خاک بررسی شده است (Lewandowski and Zumwinkle, 1999). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که مقدار SIR نیز مانند مقدار BR در خاک ۲ بیشتر از خاک ۱ بود (جدول ۵) به طوری که بیشترین مقدار SIR در خاک ۲ تیمار شده با SB و کمترین مقدار آن در خاک ۱ (شاهد) و خاک ۱ تیمار شده با GB بود که از لحاظ آماری اختلاف معنی داری با همدیگر نداشتند. مقدار SIR در هر دو خاک تیمار شده با بیوچارهای مورد مطالعه بیشتر

مطالعات نشان دادند که بیوچارهای تولید شده در دماهای پایین‌تر (۲۵۰ و ۴۰۰ درجه) منجر به تنفس بیشتر خاک شدند (Khadem and Raiesi, 2017; Demisie *et al.*, 2014). همچنین مطالعات نشان دادند، افزایش تصاعد CO₂ به دلیل بخش‌های لبایل کربن بود. از این رو، رابطه مثبت بین محتوای جزءهای پیرولیز نشده (مانند سلولز و همی سلولز) و معدنی شدن کربن بیوچار وجود دارد (Gul *et al.*, 2015). بنابراین بررسی پایداری کربن بیوچار و اثرات بعدی بر فعالیت میکروبی خاک نیازمند اندازه‌گیری جزءهای لبایل کربن بیوچار (ترکیبات آلیفاتیک و VOCs) و کنترل دمای تولید به عنوان یک پارامتر کلیدی است.

تأثیر بیوچار بر تنفس میکروبی خاک (BR) و تنفس میکروبی برانگیخته (SIR)

تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار و خاک بر برخی شاخص‌های میکروبی خاک را نشان داد (جدول آورده نشده است) اثر اصلی نوع خاک، نوع بیوچار و دمای پیرولیز بیوچار بر مقدار تنفس میکروبی خاک (BR)، تنفس میکروبی برانگیخته (SIR)، کربن زیست توده میکروبی (MBC)، فسفر زیست توده میکروبی (MBP) و ضریب متابولیسی (qCO₂) در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی دار بود. همچنین اثر متقابل دو گانه نوع خاک × نوع بیوچار، نوع خاک × دمای پیرولیز و نوع بیوچار × دمای پیرولیز و اثر متقابل نوع خاک × نوع بیوچار × دمای پیرولیز نیز در سطح ۰/۱ درصد معنی دار بودند.

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و نوع بیوچار بر BR نشان داد که خاک ۲ به دلیل داشتن ماده آلی بیشتر در مقایسه با خاک ۱، مقدار BR بالاتری دارد (جدول ۴). در خاک ۱ و ۲ با افزودن بیوچارهای مختلف مورد مطالعه میزان BR افزایش نشان داد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان بیان کرد، بیوچار در خاک عامل محدود کننده هست و سبب شده تا

افزایش تنفس ناشی از ۱۶ سوبسترای مختلف را با کاربرد بیوجار مشاهده کرد و پیشنهاد داد مواد فرار و ترکیبات جذب سطحی شده روی سطح بیوجار بعد از پیرولیز ممکن است به عنوان سوبسترای قابل دسترس عمل نموده و موجب افزایش رشد و فعالیت میکروبی در ماه‌های اول بعد از کاربرد بیوجار گردد.

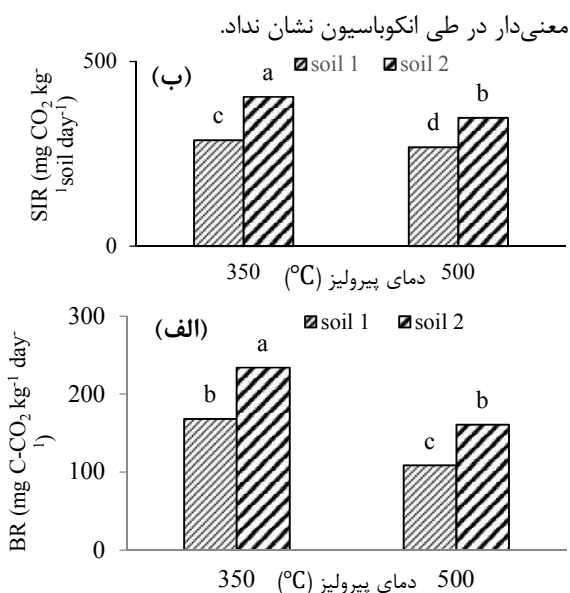
Manshadi *et al.* (2012) گزارش کردند که وقتی ماده آلی به طور جداگانه به خاک اضافه می‌شود، به علت C/N بالا آلی شدن اتفاق می‌افتد، این افزایش در معدنی شدن، زمان لازم برای ماده آلی موجود در کود آلی برای تجزیه شدن و فراهم شدن عناصر تغذیه‌ای را کاهش می‌دهد. بنابراین با افزایش فراهمی مواد آلی، افزایش رشد گیاهان و ریشه آن‌ها، میزان جمعیت میکروبی و فعالیت آن‌ها افزوده شده که به تبع آن میزان تنفس (میکروبی و برانگیخته باسوبسترا) افزایش می‌یابد (Manshadi *et al.*, 2012).

از تیمار شاهد (بدون بیوجار) بود. مقدار SIR در خاک ۲ تیمار شده با GB و SB در مقایسه با تیمار شاهد (خاک ۲) به ترتیب ۱۷/۱۷، ۹/۹۴ و ۲۵/۶۰ درصد افزایش یافت. مقایسه میانگین تأثیر نوع و دما پیرولیز بیوجار بر مقدار SIR نشان داد (جدول ۴)، مقدار SIR در دمای پیرولیز ۳۵۰ درجه نسبت به دمای ۵۰۰ درجه دارای میانگین بالاتری بود. بین تیمار بیوجارهای مختلف بیشترین مقدار SIR در تیمار AB و SB در دمای پیرولیز ۳۵۰ درجه و کمترین مقدار نیز مربوط به تیمار شاهد بود. اثرات متقابل مشاهده شده بین کربن بیوجار و کربن قابل استفاده (کربن گلوکز) بر معدنی شدن کربن گزارش شده است. Khadem and Raiesi (2017) بیان کردند که مقادیر SIR در خاک‌های تیمار شده با بیوجار ۳ برابر بیشتر از خاک‌های تیمار نشده (شاهد) بودند. مشاهده ما نیز همسو با مطالعات قبلی است (Rutigliano *et al.*, 2014). (Rutigliano *et al.*, 2014)

جدول ۴. نتایج مقایسه میانگین تأثیر نوع بیوجار، نوع خاک و دمای پیرولیز بر مقدار SIR و BR

SIR) mg C-CO ₂ ,kg ⁻¹ day ⁻¹				BR) mg C-CO ₂ ,kg ⁻¹ day ⁻¹				شماره خاک
SB	GB	AB	Control	SB	GB	AB	Control	
۳۰۶e	۲۵۹g	۲۹۴f	۲۵۰g	۱۸۸bc	۱۲۴e	۱۳۳e	۱۰۷f	۱
۴۱۷a	۳۶۵c	۳۸۹b	۳۳۲d	۲۱۳a	۱۹۷b	۱۷۹c	۱۴۲d	۲
۳۸۵a	۳۱۲c	۳۸۲a	۲۷۹d	۲۱۳a	۱۳۳c	۱۸۸b	۱۰۷d	۳۵۰
۳۰۹cd	۳۰۲c	۳۲۹b	۲۷۹d	۱۳۳c	۱۱۵d	۱۰۰d	۱۰۷d	۵۰۰

* اعدادی که دارای حروف مشترک هستند از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن معنی‌دار نمی‌باشند.



معنی‌دار در طی آنکوباسیون نشان نداد.

شکل ۳. مقایسه میانگین تأثیر دمای پیرولیز بیوجار و دو خاک آهکی با میزان ماده آلی کم (خاک ۱) و بالا (خاک ۲) بر تنفس میکروبی پایه (BR) (الف) و تنفس میکروبی برانگیخته (SIR) (ب) * اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن معنی‌دار نمی‌باشند.

شکل (۳- الف و ب) به ترتیب نشان داد مقدار SIR و BR در بیوجارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه به طور معنی‌داری بیشتر از دمای ۵۰۰ درجه بود که مقدار آنها در هر دو دمای پیرولیز در خاک ۲ بیشتر از خاک ۱ بود. میانگین مقدار BR در خاک ۱ و ۲ تیمار شده با بیوجارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه در مقایسه با بیوجارهای تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه به ترتیب ۴۵/۶۵ و ۵۴/۹۳ درصد بیشتر بود. مقدار SIR در خاک ۱ و ۲ تیمار شده با بیوجارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه در مقایسه با بیوجارهای تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه به ترتیب ۷/۰۶ و ۱۶/۳۸ درصد بیشتر بود.

محققین دیگر گزارش کردند که بیوجار تولید شده در ماه‌های بالا در مقایسه با بیوجارهای تولید شده در دمای پایین یا متوسط، انتشار CO₂ خاک را به دلیل حضور ترکیبات سمی از جمله بنزن و تولوئن کاهش داده است (Fabbri *et al.*, 2013). Zhang *et al.* (2014) بیان کردند بیوجار تولید شده از چوب در دمای پیرولیز ۲۵۰ درجه، مقدار انتشار CO₂ خاک را افزایش داد، در حالیکه بیوجار تولید شده در دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه تأثیر

Domene *et al.*, 2014). افزایش زیست توده میکروبی در اثر افزودن بیوجار به دلیل حضور بخش‌های لبایل کربن مشاهده شده است (Luo *et al.*, 2013). Bruun *et al.* (2012) همچنین دریافتند که بعد از ۶۴ روز انکوباسیون، MBC خاک با افزودن کاه و کلش گندم یا بیوجار کاه و کلش تولید شده در دمای ۵۲۵ درجه به صورت پیرولیز سریع افزایش یافت اما در اثر افزودن بیوجار کاه و کلش تولید شده در دمای ۵۲۵ درجه به صورت پیرولیز آهسته تغییری مشاهده نشد.

بیشترین مقدار MBP در خاک ۲ تیمار شده با SB (۱۸/۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد خاک ۱ (۵/۷۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود (جدول ۵). مقدار MBP در همه تیمارهای خاک ۲ بیشتر از خاک ۱ بود، به طوری که مقدار آن در تیمارهای شاهد، AB، GB و SB خاک ۲ در مقایسه با خاک ۱ به ترتیب ۴۵/۵۳، ۳۳/۵۰، ۲۰/۵۸ و ۶۹/۷۶ درصد بالاتر بود. نتایج مقایسه میانگین نوع و دمای پیرولیز بیوجار (جدول ۵) حاکی از آن بود که میزان MBP در بیوجارهای مختلف و در هر دو دمای پیرولیز ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه نسبت به تیمار شاهد به طور معنی‌داری بیشتر بود. بیشترین مقدار MBP در هر دو دمای پیرولیز در بیوجار کاه و کلش گندم مشاهده گردید. این افزایش در فسفر زیست توده میکروبی را می‌توان بطور مستقیم به کربن بالا و قابل دسترس بودن عناصر غذایی بیوجار یا بطور غیر مستقیم به افزایش فعالیت ریشه گیاه توسط بیوجار نسبت داد (Biederman and Harpole, 2012). همچنین بیوجار ممکن است فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک را از طریق استفاده کربن به-خصوص ترکیبات کربن آلیفاتیک افزایش دهد (Lehmann and Joseph, 2015). افزایش در فعالیت میکروبی نیز ممکن است سبب افزایش فسفر زیست توده میکروبی و در نتیجه سبب افزایش فسفر قابل استفاده گیاه گردد.

تأثیر بیوجار بر کربن زیست توده میکروبی (MBC) و فسفر زیست توده میکروبی (MBP)

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که میزان MBC و MBP در تیمارهای مختلف بیوجار در هر دو دمای پیرولیز و در هر دو نوع خاک مورد مطالعه نسبت به تیمار شاهد دارای میانگین بالاتری بود (جدول ۵). با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و نوع بیوجار، بیشترین مقدار MBC در خاک ۱ و ۲ تیمار شده با SB و کمترین مقدار آن در خاک ۱ (شاهد) بود. همچنین مقدار MBC در خاک ۲ شاهد بیشتر از خاک ۱ شاهد بود. مقدار MBC در خاک ۱ و ۲ تیمار شده با SB در مقایسه با شاهد این خاک‌ها (بدون بیوجار) به ترتیب ۷۵/۸۱ و ۳۲/۲۴ درصد افزایش یافت. مقدار MBC در بیوجارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه نسبت به دمای ۵۰۰ درجه بیشتر بود. بیشترین و کمترین مقدار MBC به ترتیب در تیمار SB در دمای پیرولیز ۳۵۰ درجه (۹۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و تیمار شاهد (۵۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد. مقدار MBC در بیوجارهای تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه از نظر آماری اختلاف معنی‌داری نداشتند که بیان‌کننده این مطلب است که نوع بیوجار تأثیری بر MBC نداشته است. مقدار MBC در تیمارهای AB، GB و SB تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه در مقایسه با شاهد در این دما به ترتیب ۴۲/۳۷، ۴۶/۷۳ و ۸۷/۷۲ درصد بیشتر بود. تغییر در MBC نشان دهنده روند رشد یا مرگ میکروبی و تخریب موادمالی است. نتایج نشان داد که مقدار MBC با اضافه کردن بیوجار در مقایسه با شاهد افزایش یافت که نشان می‌دهد رشد میکروبی را می‌توان با افزودن بیوجار تسریع کرد.

Zhao *et al.* (2015) نیز بیان کردند که خاک تیمار شده با بیوجار محتوای MBC خاک را بهبود می‌دهد. محققان دیگری مشابه با نتایج به‌دست آمده از تحقیق ما، اثر مثبت بیوجار را بر مقدار MBC خاک مشاهده کردند (Khadem and Raiesi, 2017).

جدول ۵. نتایج مقایسه میانگین تأثیر نوع بیوجار، نوع خاک و دمای پیرولیز بر مقدار MBP و MBC

MBP) mg kg ⁻¹				MBC) mg kg ⁻¹					
SB	GB	AB	Control	SB	GB	AB	Control		
۱۰/۶۵c	۸/۵۵d	۹/۷۰c	۵/۷۱e	۷۶۳a	۷۱۹b	۵۷۷c	۴۳۴d	۱	شماره خاک
۱۸/۰۸a	۱۰/۳۱c	۱۲/۹۵b	۸/۳۱d	۷۶۳a	۷۱۹b	۷۱۹b	۵۷۷c	۲	
۱۵/۰۱a	۱۰/۷۵d	۱۱/۹c	۷/۰۱f	۹۴۸a	۷۴۱b	۷۱۹bc	۵۰۵d	۳۵۰	دمای پیرولیز
۱۳/۷۷b	۸/۱e	۱۱/۷c	۷/۰۱f	۷۱۹bc	۵۷۷c	۵۷۷c	۵۰۵d	۵۰۰	(□)

* اعدادی که دارای حروف مشترک هستند از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن معنی‌دار نمی‌باشند.

مقدار MBC در بیوجارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس به طور معنی‌دار بیشتر از ۵۰۰ درجه بود. مقدار MBC

مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و دمای پیرولیز بیوجار بر مقدار MBC نشان داد (شکل ۴) در هر دو خاک مورد مطالعه،

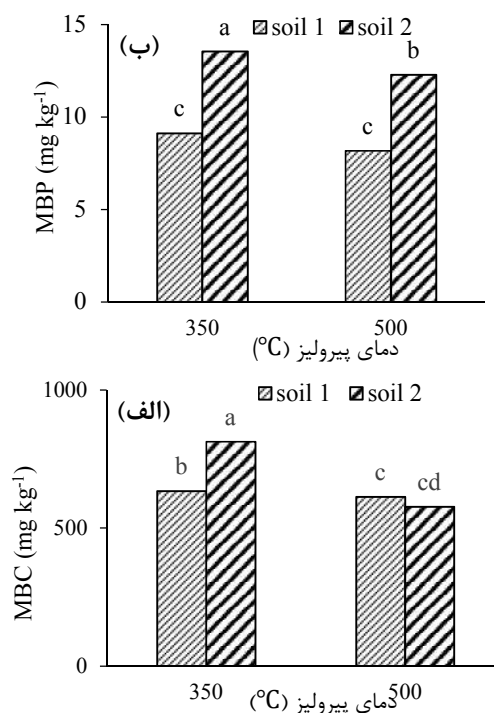
شکل (۴) مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و دمای پیرولیز بیوجار را بر مقدار MBP نشان داده است. با توجه به شکل مقدار MBP در خاک ۲ تیمار شده با بیوجارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه به طور معنی داری بیشتر از دمای ۵۰۰ درجه بود که مقدار MBP در هر دو دمای پیرولیز در خاک ۲ بیشتر از خاک ۱ بود اما اختلاف معنی دار در مقدار MBP خاک ۱ تیمار شده با بیوجارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه وجود نداشت. مقدار MBP در خاک ۲ تیمار شده با بیوجارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه در مقایسه با بیوجارهای تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه ۱۰/۱۷ درصد بیشتر بود. سطح ویژه بالای بیوجار می تواند شرایط مطلوبی را برای رشد میکروبها فراهم کند و متعاقباً افزایش جمعیت میکروبی و در نهایت MBP بالاتر را به دنبال داشته باشد.

Demisie *et al.* (2014) مشاهده کردند که تنفس پایه و زیست توده میکروبی (MBP, MBC) به صورت خطی و به طور قابل توجهی با افزایش غلظت بیوجار چوب افزایش یافته است که همسو با نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر است. بیوجارهای تولید شده در دماهای بالا عمدتاً از حلقه کربن آروماتیک تک و فشرده تشکیل شده اند که نسبت به تجزیه میکروبی نسبتاً مقاوم هستند. به عبارت دیگر، بیوجارهای تولید شده در دمای پایین احتمالاً حاوی مقدار بیشتری سلولز بدون آب، پلی ساکاریدها، الکلها، ترکیبات آلیفاتیک و ساختارهای کربن حاوی هیدروکسیل هستند که به راحتی تجزیه پذیرند (Lehmann and Joseph, 2015).

تأثیر بیوجار بر کسر متابولیکی (qCO_2)

مقایسه میانگین تأثیر اثر متقابل نوع خاک و نوع بیوجار بر مقدار qCO_2 نشان داد (جدول ۶)، مقدار qCO_2 در هر دو خاک مورد مطالعه در تیمار شاهد بیشتر از تیمارهای مختلف بیوجار بود. ضریب متابولیک میکروبی به عنوان یک شاخص کارایی کربن مورد استفاده توسط میکروارگانیسمهای خاک استفاده شده است. همچنین مقایسه میانگین اثر متقابل نوع بیوجار و دمای پیرولیز نیز نشان داد که بیشترین مقدار qCO_2 در تیمار شاهد بود. این شاخص در شرایط ناپایدار و حضور تنشهای محیطی مختلف افزایش می یابد (Bunemann *et al.*, 2006). با افزایش qCO_2 ، قسمت اعظم سوبسترا معدنی و از طریق فعالیت و تنفس میکروارگانیسمها خارج می شود. هرچه qCO_2 بزرگتر باشد بدین معناست که سهم اختصاص یافته منبع انرژی به آنابولیسم (ساخت) میکروارگانیسمها از کاتابولیسم (سوخ) کمتر می باشد، به عبارتی هرچه qCO_2 بزرگتر باشد، احتمال تجزیه میکروفلور

در دمای پیرولیز ۳۵۰ درجه در خاک ۲ به طور معنی دار بیشتر از خاک ۱ بود اما در دمای پیرولیز ۵۰۰ درجه بین دو نوع خاک از لحاظ آماری اختلاف معنی داری وجود نداشت. به طور کلی مقدار MBC در خاک ۱ و ۲ تیمار شده با بیوجارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه در مقایسه با دمای ۵۰۰ درجه به ترتیب ۳/۵۱ و ۴۰/۹۱ درصد بیشتر بود. Van Zwieten *et al.* (2010) بیان کردند که مقدار MBC در بیوجار تولید شده از بستر مرعی در دمای ۴۵۰ درجه بیشتر از ۵۵۰ درجه بود. کربن زیست توده میکروبی خاک (MBC) و فعالیت میکروبی به طور معنی داری تحت تأثیر ماده آلی خاک قرار گرفته است. بیوجار به خاطر دارا بودن سطح منافذ زیاد، مکان مطلوبی برای فعالیت میکروبی در خاک می باشد. تجمع مواد آلی (بیوجار) در خاک یک بستر مناسب برای میکروارگانیسمها فراهم می کند که منجر به افزایش مقدار MBC می شود (Demisie *et al.*, 2014). توجه برای تغییر زیست توده میکروبی خاک در پاسخ به افزودن بیوجار شامل افزایش مواد غذایی قابل استفاده خاک (مواد آلی محلول، فسفر، کلسیم و پتاسیم)، جذب ترکیبات سمی و بهبود وضعیت آب خاک است. همه اینها می توانند بر فعالیت میکروارگانیسمهای خاک تأثیر بگذارند (Lehmann and Joseph, 2015).



شکل ۴. مقایسه میانگین تأثیر نوع و دمای پیرولیز بیوجار بر کربن زیست توده میکروبی (MBC) (الف) و فسفر زیست توده میکروبی (MBP) (ب) در دو خاک آهکی با میزان ماده آلی کم (خاک ۱) و بالا (خاک ۲) * اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن معنی دار نمی باشند.

افزودن بیوپچار نشان دهنده امکان افزایش کارایی استفاده کربن میکروبی و کاهش در برگشت کربن در پاسخ به افزودن بیوپچار است (Masto *et al.*, 2013).

بزرگتر و به دنبال آن متوسط سن میکروفلور کوچکتر خواهد بود. میزان ضریب متابولیکی کمتر نشان دهنده سطح پایین تر استرس در جامعه میکروبی در خاک است. کاهش در مقدار qCO_2 با

جدول ۶. نتایج مقایسه میانگین تأثیر نوع بیوپچار، نوع خاک و دمای پیرولیز بر مقدار qCO_2

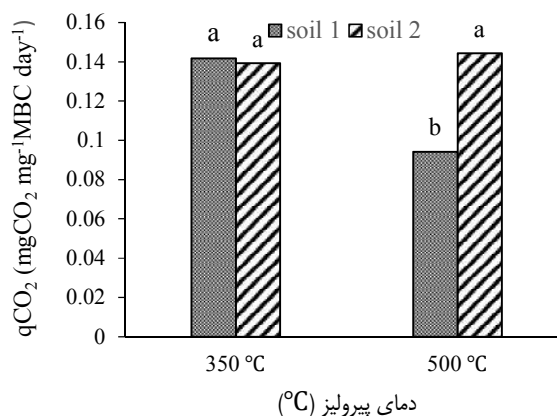
qCO_2		Control		شماره خاک
SB	GB	AB		
۰/۱۳۳bc	۰/۰۸۰e	۰/۱۱۵d	۰/۱۴۳b	۱
۰/۱۱۵d	۰/۱۱۸cd	۰/۱۲۳cd	۰/۲۱a	۲
۰/۱۵b	۰/۰۸۳d	۰/۱۵b	۰/۱۷a	۳۵۰
۰/۰۸۸d	۰/۱۲c	۰/۰۹۲d	۰/۱۷a	۵۰۰

* اعدادی که دارای حروف مشترک هستند از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن معنی دار نمی باشند.

نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان داد مصرف بیوپچارهای حاصل از بقایای هرس سیب، انگور و کاه و کلش گندم اثرات مثبت معنی دار بر خصوصیات میکروبیولوژیکی خاکهای مورد مطالعه دارند. معدنی شدن کربن در بیوپچارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه در هر دو خاک مورد مطالعه بالاتر از دمای ۵۰۰ درجه بود. با افزایش دمای پیرولیز، معدنی شدن کربن کاهش یافت که این امر نشان دهنده پایداری بیشتر کربن بیوپچار با افزایش دمای پیرولیز در خاکها است. بنابراین برای ترسیب کربن، بیوپچارهای تولید شده در ۵۰۰ درجه سلسیوس به علت مقاومت زیاد کربن در برابر تجزیه توصیه می شود. کاربرد بیوپچارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه تأثیر متفاوتی بر خصوصیات بیولوژیکی مورد مطالعه در دو خاک داشت. مقدار SIR، BR، MBC و MBP در دمای ۳۵۰ درجه نسبت به دمای ۵۰۰ درجه بیشتر بود. همچنین مقدار SIR، BR، MBC و MBP در هر دو دمای پیرولیز در خاک با ماده آلی بالا بیشتر از خاک با ماده آلی کمتر بود. بیشترین مقدار BR و MBC در تیمار SB تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه به دست آمد. همچنین مقدار BR در تیمارهای AB، GB و SB تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه در مقایسه با شاهد (بدون بیوپچار) به ترتیب ۱/۸، ۱/۲ و ۲ برابر بیشتر بود. مقدار SIR در خاک ۱ و ۲ تیمار شده با بیوپچارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه در مقایسه با بیوپچارهای تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه به ترتیب ۷/۰۶ و ۱۶/۳۸ درصد بیشتر بود. بنابراین می توان نتیجه گیری کرد که در دماهای پایین پیرولیز مقادیر SIR، BR، MBC و MBP نسبت به بیوپچارهای تولید شده در دمای پیرولیز بالا بیشتر افزایش می یابند. به طور کلی، دمای فرآیند پیرولیز، نوع خاک و نوع مواد اولیه مورد استفاده در تولید بیوپچار، فاکتورهای مهم و تاثیرگذار بر شاخصهای میکروبی هستند. بنابراین با توجه به

شکل (۵) مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و دمای پیرولیز بیوپچار را بر مقدار qCO_2 نشان داده است. با توجه به داده های به دست آمده مقدار qCO_2 در خاک ۱ تیمار شده با بیوپچارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه به طور معنی داری بیشتر از دمای ۵۰۰ درجه بود اما اختلاف معنی داری در مقدار qCO_2 خاک ۲ تیمار شده با بیوپچارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه وجود نداشت. مقدار qCO_2 در خاک ۱ تیمار شده با بیوپچارهای تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه در مقایسه با بیوپچارهای تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه ۵۰/۴۷ درصد بیشتر بود. این نتیجه نشان دهنده این است که اضافه کردن بیوپچارهای مورد مطالعه تولید شده در دمای ۳۵۰ درجه در خاک ۱ آهکی با میزان مواد آلی کم می تواند منجر به استرس در جمعیت میکروبی یا کاهش در کارایی مصرف کربن گردد (Khadem and Raiesi, 2017).



شکل ۵. مقایسه میانگین تأثیر نوع و دمای پیرولیز بیوپچار بر ضریب متابولیک (qCO_2) در دو خاک آهکی با میزان ماده آلی کم (خاک ۱) و بالا (خاک ۲)
* اعدادی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن معنی دار نمی باشند.

می‌شوند) سبب بهبود فعالیت میکروبی خاک شدند، توصیه می‌گردد که از بیوجارهای تولید شده علاوه بر بهبود وضعیت مواد آلی خاک، به عنوان کود آلی برای اصلاح و بهبود وضعیت میکروبیولوژیکی خاک و کیفیت آن استفاده گردد.

اینکه بیوجارهای مورد مطالعه بخصوص بیوجار کاه و کلش گندم (البته بیوجارهای تهیه شده از بقایای هرس سیب و انگور نیز سبب افزایش مقادیر خصوصیات میکروبیولوژیکی نسبت به شاهد

REFERENCES

- Alef, K. and Nannipieri, P. (1995). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, London.
- Anderson, J. P. E. (1982). Soil Respiration. In A. L. Page, *et al.* (Eds.). *Methods of Soil Analysis: 2nd ed. Part 2. American Society of Agronomy*. (pp. 831-872). U.S.A.
- Awad, Y. M., Blagodatskaya, E., Ok, Y.S. and Kuzyakov, Y. (2013). Effects of polyacrylamide, biopolymer and biochar on the decomposition of ¹⁴C-labelled maize residues and on their stabilization in soil aggregates. *European Journal of Soil Science*, 64, 488-499.
- Moradi, N., Rasouli-Sadaghiani, M.H. and Sepehr, E. (2017). Effect of biochar types and rates on some soil properties and nutrients availability in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil*, 31(4), 1232-1246. (In Farsi)
- Biederman, L. A. and Harpole, W. S. (2012). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 5, 202-214.
- Bruun, E. W., Ambus, P., Egsgaard, H. and Hauggaard-Nielsen, H. (2012). Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 46, 73-79.
- Bunemann, E. K., Schwenke, G. D. and Van Zwieten, L. (2006). Impact of agricultural inputs on soil organisms. A paper review. 44, 379-406.
- Cakmak O., Ozturk L., Karanlik S., Ozkan H., Kaya Z., and Cakmak I. (2001). Tolerance of 65 Durum wheat genotypes to zinc deficiency in calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition*, 24, 1381-1847.
- 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. *Bioresourcetechnology*, 107, 419-428
- Demisie, W., Liu, Z., and Zhang, M. (2014). Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil. *Catena*, 121, 214-221.
- Dempster, D. N., Gleeson, D. B., Solaiman, Z. M., Jones, D. L. and Murphy, D. V. (2012). Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. *Plant Soil*, 354, 311-324.
- Domene X., Mattana S., Hanley, K., Enders, A. and Lehmann, J. (2014). Medium-term effects of corn biochar addition on soil biota activities and functions in a temperate soil cropped to corn. *Soil Biology and Biochemistry*, 72, 152-162.
- Domingues, R. R., Trugilho, P. F., Silva, C. A., de Melo, I. C. N., Melo, L. C., Magriotis, Z. M. and Sánchez-Monedero, M. A. (2017). Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PLoS one*, 12(5), 0176884.
- Elzobair, K.A., Stromberger, M.E., Ippolito, J.A. and Lentz, R.D., (2016). Contrasting effects of biochar versus manure on soil microbial communities and enzyme activities in an Aridisol. *Chemosphere*, 142, 145-152.
- Fabbri, D., Rombolà, A.G., Torri, C. and Spokas, K.A. (2013). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar and biochar amended soil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 103, 60-67.
- Fang Y. Singh B. Singh B.P. and Krull E. (2014). Biochar carbon stability in four contrasting soils. *European Journal of Soil Science*, 65, 60-71.
- Gil-Sotres F., Trasar-Cepeda C., Leiros M.C., and Seoane S. (2005). Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biology and Biochemistry*, 37, 877-887.
- 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. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 206, 46-59.
- Herrick J.E. 2000. Soil quality: an indicator of sustainable land management. *Applied Soil Ecology*, 15, 75-83.
- Ippolito, J.A., Stromberger, M.E., Lentz, R.D. and Dungan, R.S. (2016b). Hardwood biochar and manure co-application to a calcareous soil. *Chemosphere*, 142, 84-91
- Khademi, A. and Raiesi, F. (2017). Responses of microbial performance and community to corn biochar in calcareous sandy and clayey soils. *Applied Soil Ecology*, 114, 16-27.
- Khanmohammadi, Z., Afyuni, M. and Mosaddeghi, M. (2016). Effect of Pyrolysis Temperature on Chemical Properties of Sugarcane Bagasse and Pistachio residues Biochar. *Applied Soil Research*. 3(1), 1-13. (In Farsi)
- Lehmann, J. and Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: an introduction. In J. Lehmann and S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. (pp 1-13). Taylor and Francis, London.
- Lewandowski, A. and Zumwinkle, M. (1999). Assessing the soil system a review of soil quality

- literature, *Minnesota Department of Agriculture, Energy and Sustainable Agriculture Program*.
- Luo, Y., Durenkamp, M., De Nobili, M., Lin, Q., Devonshire, B.J. and Brookes, P.C. (2013). Microbial biomass growth, following incorporation of biochars produced at 350°C or 700°C, in a silty-clay loam soil of high and low pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 513-523.
- Mandal, S., Donner, E., Vasileiadis, S., Skinner, W., Smith, E. and Lombi, E. (2018). The effect of biochar feedstock, pyrolysis temperature, and application rate on the reduction of ammonia volatilisation from biochar-amended soil. *Science of the Total Environment*, 627, 942-950.
- Manshadi, H., et al. (2012). Effect of applying sewage sludge and chemical fertilizer enriched sewage sludge on the amount of organic carbon, enzymatic respiration and activity of soil under basil plant culturing. *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries)*, 26 (3), 554-562.
- Marzooqi, F. and Yousef, L. F. (2017). Biological response of a sandy soil treated with biochar derived from a halophyte (*Salicornia bigelovii*). *Applied Soil Ecology*, 114, 9-15.
- 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.
- Nguyen, B. and Lehmann, J. (2009). Black carbon decomposition under varying water regimes. *Organic Geochemistry*, 40, 846-853.
- Purakayastha, T. J., Das, K. C., Gaskin, J., Harris, K., Smith, J. L., Kumari, S. (2016). Effect of pyrolysis temperatures on stability and priming effects of C3 and C4 biochars applied to two different soils. *Soil and Tillage Research*, 155, 107-115. [CrossRef]
- Qi, F., Dong, Z., Lamb, D., Naidu, R., Bolan, N. S., Ok, Y. S., Liu, C., Khan, N., Johir, M. A. H. and Semple, K.T. (2017). Effects of acidic and neutral biochars on properties and cadmium retention of soils. *Chemosphere*, 180, 564-573.
- 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.
- Singh, B., Camps-Arbestain, M. and Lehmann, J. (2017). *Biochar: a guide to analytical methods*. CSIRO Publishing.
- Singh, R., Babu, J. N., Kumar, R., Srivastava, P., Singh, P. and Raghubanshi, A. S. (2015). Multifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: an ecological perspective. *Ecological Engineering*, 77, 324-347.
- Subedi, R., Taupe, N., Ikoyi, I., Bertora, C., Zavattaro, L., Schmalenberger, A., Leahy, J.J. and Grignani, C. (2016). Chemically and biologically-mediated fertilizing value of manure-derived biochar. *Science of the Total Environment*, 550, 924-933.
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K. Y., Downie, A., Rust, G., Joseph, S. and Cowie, A. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil*, 327, 235-246.
- Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A. C., Van Der Velde, M. and Diafas, I. (2010). Biochar application to soils: a critical scientific review of effects on soil properties processes and functions. Joint Research Centre Scientific and Technical Reports.
- Xu, N. Tan, G., Wang, H. and Gai, X. (2016). Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*, 74, 1-8.
- Yang, X., Wang, H., Strong, P., Xu, S., Liu, S., Lu, K., Sheng, K., Guo, J., Che, L. and He, L. (2017). Thermal properties of biochars derived from waste biomass generated by agricultural and forestry sectors. *Energies*, 10(4), 469.
- Zhang, X., He, L., Sarmah, A., Lin, K., Liu, Y., Li, J. and Wang, H. (2014). Retention and release of diethyl phthalate in biochar-amended vegetable garden soils. *Journal of Soils and Sediments*, 14, 1790-1799.
- Zhao, B., O'Connor, D., Zhang, J., Peng, T., Shen, Z., Tsang, D. C. and Hou, D. (2018). Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. *Journal of Cleaner Production*, 174, 977-987.
- Zhao, R., Coles, N. and Wu, J. (2015). Carbon mineralization following additions of fresh and aged biochar to an infertile soil. *Catena*, 125, 183-189.
- Zhou, J., Chen, H., Huang, W., Arocena, J.M. and Ge, S. (2016). Sorption of Atrazine, 17 α -Estradiol, and Phenanthrene on Wheat Straw and Peanut Shell Biochars. *Water Air and Soil Pollution*, 227, 7.
- Zhou, J., Xue, K., Xie, J., Dend, Y., Wu, L., Cheng, X., Fei, S., Deng, S., He, Z., Van Nostrand, J. D. and Luo, Y. (2012). Microbial mediation of carbon-cycle feedbacks to climate warming. *Nature Climate Change*, 2: 106-110.