

Investigation of Physicochemical Characteristics of Biochars Derived from Corn Residue and Sugarcane Bagasse in Different Pyrolysis Temperatures

AKBAR KARIMI¹, ABDOLAMIR MOEZZI^{*2}, MOSTAFA CHOROM³, NAEIMEH ENAYATIZAMIR⁴

1. Ph.D Student, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz

2. Associate Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz

3. Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz

4. Associate Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz

(Received: June. 9, 2018- Revised: July. 14, 2018- Accepted: July. 17, 2018)

ABSTRACT

Pyrolysis of feedstocks and producing biochar is a suitable technique for agricultural wastes management, carbon sequestration and soil amelioration. The study of structural and physicochemical properties of biochars, which are strongly dependent on the type of feedstock and pyrolysis temperature, is very important to identify the suitable application of biochar in the soil. The objective of this research was to investigate the properties changes of biochars derived from corn residue and sugarcane bagasse under different pyrolysis temperatures. This study was carried out under laboratory conditions based on a randomized complete design with eight treatments of corn residue, sugarcane bagasse and their biochars and in three replications. Biochars were produced at 200, 350 and 500°C pyrolysis temperatures under slow pyrolysis conditions. Results indicated that increasing pyrolysis temperature from 200 to 500°C, in corn residue and sugarcane bagasse treatments, decreased the yield (29.24 and 23.6% respectively), volatile matter (29.8 and 32.5%), cation exchange capacity (32.5 and 29.8%) and the ratios of C/N, H/C and O/C while led to increase the ash content of corn residue and sugarcane bagasse biochars (20.3 and 42.3% respectively), fixed carbon (23.2 and 14.7%), pH, EC, aromatic compounds and nutrients concentration. Concentration of nitrogen, phosphorus, potassium were greater in the corn residue than in the sugarcane bagasse treatments, but the C/N ratio were greater in the sugarcane bagasse treatments. Based on the results of this study, it could be concluded that biochars produced at 500°C temperature can be more effective in carbon sequestration in the soil, whereas biochars produced at 200 and 350°C temperatures are more suitable for improving soil fertility.

Keywords: Agriculture wastes, Carbon sequestration, Feedstock, Soil fertility.

بررسی ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی زغال‌های زیستی تهیه شده از بقایای ذرت و باگاس نیشکر در دماهای مختلف گرماکافت

اکبر کریمی^۱، عبدالامیر معزی^{۲*}، مصطفی چرم^۳، نعیمه عنایتی ضمیر^۴

دانشجوی دکتری علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز
استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز
دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۱۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۴/۲۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۴/۲۶)

چکیده

گرماکافت زیست‌توده‌ها و تولید زغال زیستی روش مناسبی برای مدیریت پسماندهای کشاورزی، ترسیب کربن و بهبود ویژگی‌های خاک می‌باشد. مطالعه ویژگی‌های ساختاری و فیزیکی شیمیایی زغال زیستی، که به نوع زیست‌توده و دمای گرماکافت بستگی دارد، در شناسایی کاربرد مناسب زغال زیستی در خاک بسیار مهم است. هدف از این پژوهش بررسی تغییرات ویژگی‌های زغال زیستی تهیه شده از بقایای ذرت و باگاس نیشکر در دماهای مختلف گرماکافت بود. این پژوهش در شرایط آزمایشگاهی، در قالب طرح کاملاً تصادفی با هشت تیمار بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی آنها و در سه تکرار انجام شد. زغال‌های زیستی در شرایط گرماکافت آهسته و در دماهای ۲۰۰، ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس تهیه شدند. نتایج نشان داد افزایش دمای گرماکافت از ۲۰۰ به ۵۰۰ درجه سلسیوس در تیمارهای بقایای ذرت و باگاس نیشکر سبب کاهش عملکرد (به ترتیب ۲۹/۲ و ۲۳/۶ درصد)، مواد فرار (۴۳/۶ و ۵۷/۱ درصد)، ظرفیت تبادل کاتیونی (۲۹/۸ و ۳۲/۵ درصد) و نسبت‌های اتمی (C/N)، هیدروژن به کربن (H/C) و اکسیژن به کربن (O/C) شد، در حالی که سبب افزایش درصد خاکستر زغال‌های زیستی بقایای ذرت و باگاس نیشکر (به ترتیب ۲۰/۳ و ۴۲/۳ درصد)، کربن تثبیت شده (۲۳/۳ و ۱۴/۸ درصد)، EC، pH، ترکیبات آروماتیک و غلظت عناصر غذایی شد. غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم در تیمارهای بقایای ذرت بیشتر از باگاس نیشکر بود، اما نسبت C/N در تیمارهای باگاس نیشکر بیشتر بود. با توجه به این پژوهش می‌توان نتیجه‌گیری کرد که زغال‌های زیستی تهیه شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در ترسیب کربن در خاک مؤثرتر هستند، در حالی که زغال‌های زیستی تهیه شده در دماهای ۲۰۰ و ۳۵۰ درجه سلسیوس برای بهبود حاصلخیزی خاک مناسب‌تر هستند.

واژه‌های کلیدی: بقایای کشاورزی، زیست‌توده، حاصلخیزی خاک، ترسیب کربن

مقدمه

در دهه اخیر حجم ضایعات کشاورزی و بقایای محصولات زراعی در ایران به شدت افزایش یافته است. سالانه بیش از پنج میلیون تن بقایای گیاهی در کشور سوزانده می‌شود (Samavat, 2011). دفع و استفاده نادرست از ضایعات و بقایای کشاورزی پیامدهای نامطلوبی را برای محیط زیست به دنبال دارد. مدیریت صحیح ضایعات کشاورزی و بقایای گیاهی افزون بر حفظ محیط زیست، می‌تواند در توسعه کشاورزی پایدار مؤثر باشد (Lehmann and Joseph, 2009). یکی از راه‌کارهای مدیریت ضایعات کشاورزی و بقایای گیاهی که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است،

گرماکافت^۱ زیست‌توده‌ها^۲ و تولید زغال زیستی^۳ است (Qi et al., 2017; Weber and Quicker, 2018). زغال زیستی یک ماده متخلخل و غنی از کربن است که از تجزیه حرارتی زیست-توده‌ها در شرایط بدون اکسیژن یا اکسیژن محدود تهیه می‌شود (Lehmann and Joseph, 2009; Qi et al., 2017).

به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد زغال زیستی، کاربرد آن در محیط زیست و کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. ماندگاری زغال زیستی در خاک به عنوان یک ذخیره کربنی بیش از صدها سال برآورد شده است (Singla et al., 2014). نتایج مطالعات نشان داده است که افزودن زغال‌های زیستی به

1. Pyrolysis
2. Feedstocks
3. Biochar

(2017). Lehmann and Joseph (2015) با بررسی مطالعات متعدد گزارش کردند که میانگین pH زغال‌های زیستی تهیه‌شده در محدوده دمایی ۳۹۹-۳۰۰ درجه سلسیوس برابر ۵/۱۰ است، درحالی‌که این مقدار در محدوده دمایی ۶۹۹-۶۰۰ درجه سلسیوس به ۹ می‌رسد. همچنین نتایج مطالعات نشان داده است که آروماتیک یا آلیفاتیک بودن کربن زغال زیستی، ترکیب عنصری و درصد عناصر هیدروژن و اکسیژن، غلظت عناصر غذایی و کاتیون‌های بازی محلول و تبادل‌پذیری زغال زیستی در دماهای مختلف گرماکافت متفاوت می‌باشند (Lehmann and Joseph, 2015). نتایج پژوهش Domingues et al. (2017) نشان داد بر اثر افزایش دمای گرماکافت از ۳۵۰ به ۴۵۰ درجه سلسیوس عملکرد، مواد فرار، گروه‌های عاملی اسیدی، درصد هیدروژن و اکسیژن زغال زیستی باگاس نیشکر کاهش یافت، درحالی‌که درصد خاکستر، کربن تثبیت‌شده، کربن و نیتروژن آن افزایش یافت. Beheshti and Alikhani (2016) با بررسی تأثیر تغییرات ویژگی‌های زغال زیستی کاه و کلش گندم در دماهای گرماکافت ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس گزارش کردند بر اثر افزایش دما عملکرد و درصد کربن آلی زغال زیستی کاهش یافت، اما pH، EC، درصد خاکستر و پایداری کربن افزایش یافت.

نوع زیست‌توده از دیگر عوامل مؤثر بر ویژگی‌های زغال زیستی است. برای مثال گزارش شده است که کل کربن زغال-های زیستی تولیدشده بر پایه ترکیبات لیگنوسولولزی بیشتر از زغال زیستی کودهای دامی است، درحالی‌که معمولاً خاکستر، فسفر کل و کل کاتیون‌های بازی محلول و تبادل‌پذیری در زغال‌های زیستی تولیدشده از کودهای دامی بیشتر است (Lehmann and Joseph, 2015). همچنین معمولاً زغال‌های زیستی بقایای گیاهان زراعی نسبت به زیست‌توده‌های چوبی عناصر بیشتری دارند (Kloss et al., 2012). Dai et al. (2017) گزارش کردند زغال‌های زیستی تهیه‌شده از کودهای دامی pH بیشتری نسبت به زغال‌های زیستی تهیه‌شده از زیست‌توده‌های لیگنوسولولزی دارند. آن‌ها همچنین گزارش کردند که زغال‌های زیستی تهیه‌شده از کودهای دامی برای افزایش pH خاک مناسب‌تر هستند. نتایج پژوهش Domingues et al. (2017) نشان داد در دماهای گرماکافت ۳۵۰ و ۴۵۰ درجه سلسیوس عملکرد، مواد فرار، درصد اکسیژن و نسبت O/C زغال زیستی خاکاره اکالیپتوس بیشتر از باگاس نیشکر بود، درحالی‌که درصد خاکستر، کربن، نیتروژن، گوگرد و نسبت هیدروژن به کربن (H/C) در زغال زیستی باگاس نیشکر بیشتر از خاکاره اکالیپتوس بود.

خاک به‌عنوان یک منبع کربن در اراضی کشاورزی می‌تواند در تثبیت کربن آلی خاک و ترسیب بلندمدت کربن خاک و در نتیجه کاهش تغییرات اقلیمی بسیار مؤثر باشد (Qi et al., 2017; Bird et al., 2017). همچنین زغال زیستی به دلیل ساختار متخلخل به‌عنوان جاذب آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین می‌تواند در پالایش خاک‌ها و آب‌های آلوده بسیار مؤثر باشد (Wang et al., 2018; Hamzenejad Taghliabad and Sepehr, 2018). افزون بر این، زغال زیستی به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک با تأثیر بر ویژگی‌ها و فرآیندهای گوناگون خاک می‌تواند در بهبود کیفیت و حاصلخیزی خاک و به دنبال آن افزایش رشد و عملکرد گیاهان مؤثر باشد. (Qi et al., 2017; Yang et al., 2017). اهمیت و اثرات مفید زغال زیستی در کیفیت و حاصلخیزی خاک، به دلیل تأثیر آن بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (Xu et al., 2016; Song et al., 2018) و همچنین توانایی آن در تغییر فعالیت میکروبی خاک است (Zhu et al., 2017; Sheng and Zhu, 2018).

فرآیند گرماکافت سبب خارج شدن هیدروژن و اکسیژن از ساختمان زیست‌توده می‌شود. با کاهش نسبت هیدروژن به کربن و اکسیژن به کربن در ساختمان زغال زیستی، درصد کربن آروماتیک^۱ در زغال زیستی افزایش می‌یابد. بنابراین، بخش زیادی از کربن آلی زغال زیستی ساختار آروماتیکی داشته و در برابر تجزیه‌های زیستی و غیرزیستی مقاومت بسیار زیادی دارد (Ippolito et al. 2016; Yang et al., 2017). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال زیستی به عوامل مختلفی از جمله نوع زیست‌توده و شرایط گرماکافت از جمله دما و مدت‌زمان گرماکافت بستگی دارد. بنابراین، ویژگی‌های زغال‌های زیستی تهیه‌شده در شرایط مختلف گرماکافت و در نتیجه تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌های خاک بسیار متفاوت خواهد بود (Zhao et al., 2018).

دمای گرماکافت از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر در تهیه زغال زیستی می‌باشد که تأثیر مهمی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن دارد. نتایج پژوهش‌های گوناگون نشان داده است که ویژگی‌های مختلف زغال زیستی شامل عملکرد، درصد خاکستر و مواد فرار، درصد کربن کل و کربن تثبیت‌شده، ترکیب عنصری و ویژگی‌های شیمیایی سطح، توزیع اندازه خلل و فرج، سطح ویژه، pH، CEC، جذب یون‌ها، ساختمان فیزیکی و پایداری در مقابل تجزیه به دمای گرماکافت بستگی دارند (Lehmann and Joseph, 2015; Dai et al., 2017; Qi et al.,)

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

درصد عملکرد زغال‌های زیستی (Y_B) تهیه‌شده در دماهای مختلف از نسبت وزن زغال زیستی (W_B) برحسب گرم به وزن آن خشک زیست‌توده اولیه (W_{RB}) برحسب 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 بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی آن‌ها، ۵ گرم از هر نمونه آن خشک‌شده، داخل بوته 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) برحسب گرم به وزن آن خشک زغال زیستی (W_B) برحسب گرم (رابطه ۲) برآورد شد (Singh *et al.*, 2017):

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

مواد فرار بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی آن‌ها به‌روش قرار دادن نمونه‌های آن خشک‌شده در بوته‌های چینی درپوش‌دار در دمای ۹۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از روابط ۳ و ۴ به ترتیب مواد فرار و کربن تثبیت‌شده یا غیرفعال (Fixed Carbon) هر یک از نمونه‌های زغال زیستی محاسبه شد (Singh *et al.*, 2017).

$$VM(\%) = \frac{W_{105^\circ C} - W_{950^\circ C}}{W_{105^\circ C}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در این رابطه VM ، W_{950} و W_{105} به ترتیب درصد مواد فرار، جرم باقیمانده نمونه در دمای ۹۵۰ درجه و جرم آن خشک زیست‌توده اولیه و زغال زیستی می‌باشند. (رابطه ۴)

$$C_{Fixed}(\%) = \frac{W_{105^\circ C} - W_{950^\circ C} - W_{750^\circ C}}{W_{105^\circ C}} \times 100$$

که در این رابطه C_{Fixed} ، W_{950} و W_{750} و W_{105} به ترتیب درصد کربن تثبیت‌شده، وزن باقیمانده نمونه در دمای ۹۵۰ درجه سلسیوس، جرم خاکستر (۷۵۰ درجه سلسیوس) و وزن آن خشک نمونه‌ها می‌باشند.

در این پژوهش pH و EC هر یک از نمونه‌ها با استفاده از نسبت ۱ به ۱۰ زیست‌توده اولیه یا زغال زیستی به آب دیونیزه اندازه‌گیری شد (Singh *et al.*, 2017). ظرفیت تبادل کاتیونی به‌روش اصلاح‌شده جانشین با استات آمونیوم اندازه‌گیری شد

باگاس نیشکر مواد پسمانده نیشکر بعد از استخراج عصاره آن است. سالانه بیش از ۴/۳ میلیون تن باگاس نیشکر در کشور و عمدتاً در استان خوزستان تولید می‌شود (Najafi *et al.*, 2009). بخش عمده باگاس نیشکر انبارشده و یا سوزانده می‌شود. باگاس انبارشده ارزش اقتصادی کمی دارد و به سبب خطر خودسوزی، تهدیدی برای سلامت محیط زیست می‌باشد (Fathi Gerdelidani *et al.*, 2015; Khanmohammadi *et al.*, 2016). همچنین سالانه بیش از نیم میلیون تن بقایای ذرت در کشور تولید می‌شود که اغلب سوزانده شده و سبب آلودگی محیط زیست و انتشار گاز دی‌اکسید کربن در اتمسفر می‌شود (Najafi *et al.*, 2009). با توجه به حجم بسیار زیاد باگاس نیشکر و بقایای ذرت و مزایای فراوان زغال زیستی در خاک، می‌توان با تبدیل این بقایای کشاورزی به زغال زیستی از آن‌ها به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک استفاده کرد. با توجه به اهداف کاربرد زغال زیستی، قبل از کاربرد آن در خاک، لازم است ویژگی‌های زغال‌های زیستی تهیه‌شده از زیست‌توده‌های مختلف در دماهای مختلف، بررسی و ارزیابی شود. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی و مقایسه ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی تهیه‌شده از این دو زیست‌توده در دماهای مختلف گرماکافت (۲۰۰، ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس) بود.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی زیست‌توده‌ها و تهیه زغال‌های زیستی

در این مطالعه از دو زیست‌توده بقایای گیاهی ذرت و باگاس نیشکر برای تهیه زغال‌های زیستی استفاده شد. زیست‌توده بقایای ذرت از مزارع تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز و زیست‌توده باگاس نیشکر از کشت و صنعت نیشکر دهخدا در شهرستان اهواز تهیه شد. بقایای گیاهی ابتدا هوا خشک‌شده و پس از آسیاب کردن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس در آن در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شدند (Cantrell *et al.*, 2012). برای تهیه زغال‌های زیستی بقایای ذرت و باگاس نیشکر در شرایط بدون اکسیژن از روش پیشنهادی Cantrell *et al.* (2012) استفاده شد. زغال‌های زیستی در کوره الکتریکی در شرایط گرماکافت آهسته، به مدت ۳ ساعت، در دماهای ۲۰۰، ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس و با نرخ افزایش دمای ۵ درجه سلسیوس در دقیقه تهیه شدند (Cantrell *et al.*, 2012; Khadem and Reisis, 2017).

بقایای ذرت (CR)، باگاس نیشکر (SB) و ۶ زغال زیستی تهیه‌شده از این دو زیست‌توده در دماهای ۲۰۰، ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس و در سه تکرار انجام شد. تجزیه آماری داده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال زیستی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر نوع تیمار بر عملکرد زغال زیستی معنی‌دار بود (جدول ۱). افزایش دمای گرماکافت سبب کاهش معنی‌دار ($p \leq 0.05$) عملکرد زغال‌های زیستی بقایای ذرت و باگاس نیشکر شد (جدول ۲). به طوری که با افزایش دمای گرماکافت از ۲۰۰ به ۳۵۰ درجه سلسیوس عملکرد زغال زیستی تهیه‌شده از هر دو زیست‌توده بیش از ۱۹ درصد کاهش یافت. بیشترین و کمترین عملکرد زغال زیستی به ترتیب در دماهای ۲۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس مشاهده شد. در دماهای گرماکافت ۲۰۰ و ۳۵۰ درجه سلسیوس اختلاف معنی‌دار میان عملکرد زغال زیستی بقایای ذرت و باگاس نیشکر وجود نداشت. اما در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس عملکرد زغال زیستی تهیه‌شده از باگاس نیشکر به طور معنی‌دار بیشتر از بقایای ذرت بود. بخش زیادی از بقایای گیاهی از ترکیبات همی سلولزی و سلولزی تشکیل شده و کاهش عملکرد در اثر افزایش دمای گرماکافت به دلیل تجزیه این ترکیبات می‌باشد. چراکه بخش عمده این ترکیبات در محدوده دمایی ۱۸۰ تا ۳۵۰ درجه سلسیوس تجزیه می‌شوند (Singh et al., 2015). همچنین دهیدراته شدن گروه‌های هیدروکسیل از دیگر دلایل کاهش عملکرد زغال زیستی در دماهای بالای گرماکافت می‌باشد (Rehrah et al., 2016).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر نوع تیمار بر درصد خاکستر، مواد فرار و مقدار کربن تثبیت‌شده معنی‌دار ($p \leq 0.01$) بود (جدول ۱). افزایش دمای گرماکافت سبب افزایش معنی‌دار درصد خاکستر و کاهش معنی‌دار درصد مواد فرار زغال‌های زیستی نسبت به زیست‌توده آن‌ها شد (جدول ۲). در هر دو نوع زیست‌توده، درصد خاکستر زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس بیش از ۱/۵ برابر بقایای گیاهی اولیه بود. همچنین در هر دو نوع زغال زیستی، درصد خاکستر در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس بیش از ۲ برابر دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس بود. اختلاف درصد خاکستر بقایای ذرت و باگاس نیشکر تنها در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس معنی‌دار بود. کاهش

(Domingues et al., 2017). سطح ویژه به روش BET اندازه-گیری شد (Cantrell et al., 2012). آنالیز مورفولوژی سطحی بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی آن‌ها زیستی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^۱) مدل Leo VP 1455 انجام شد.

آنالیز عنصری و گروه‌های عاملی

در این پژوهش تجزیه عنصری بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی آن‌ها به روش سوزاندن خشک و با استفاده از دستگاه CHNS analyzers Vario EL III ساخت کشور آلمان انجام شد. سپس نسبت‌های اتمی برای هر یک از نمونه‌های زیست‌توده اولیه و زغال‌های زیستی برآورد شد. همچنین مقدار اکسیژن نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۵ تعیین شد (Domingues et al., 2017):

$$\text{O (\%)} = 100 - (\text{C} + \text{H} + \text{N} + \text{S} + \text{Ash}) \quad (\text{رابطه ۵})$$

همچنین آنالیز گروه‌های عاملی بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی آن‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی مادون‌قرمز (FT-IR) مدل Spectrum Perkin GX Elmer ساخت کشور آمریکا انجام شد.

اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی

برای اندازه‌گیری غلظت کل عناصر از روش سوزاندن خشک استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۸ ساعت خاکستر شدند. سپس هضم نمونه‌ها برای اندازه-گیری غلظت کل عناصر در نمونه‌های خاکستر با استفاده از اسید نیتریک غلیظ و آب اکسیژنه انجام شد. غلظت فراهم فسفر با استفاده از نیترات آمونیوم یک مولار و عصاره‌گیری غلظت فراهم پتاسیم با استفاده از کلرید هیدروژن یک مولار انجام شد (Singh et al., 2017). سپس غلظت سدیم و پتاسیم در عصاره‌ها با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر مدل Corning 410 ساخت کشور انگلستان اندازه‌گیری شد. غلظت فسفر در عصاره‌ها نیز به روش رنگ‌سنجی و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Apel (PD-303 UV) ساخت کشور ژاپن اندازه‌گیری شد. همچنین غلظت کل آهن، منگنز، روی و مس با دستگاه جذب اتمی اسپکترومتری مدل Shimadzu 6300 AA ساخت کشور ژاپن اندازه‌گیری شد.

تحلیل آماری داده‌ها

این پژوهش، در قالب طرح کاملاً تصادفی با هشت تیمار شامل

تشکیل شده در اثر افزایش شدت واکنش‌های کربونیزاسیون باشد (Lehmann and Joseph, 2015). افزایش غلظت عناصر زغال زیستی بر اثر افزایش دمای گرماکافت در این پژوهش نیز تأییدکننده این نتایج است (جدول ۷).

مواد فرار بر اثر افزایش دمای گرماکافت نشان‌دهنده افزایش روند خارج شدن ترکیبات فرار، محصولات گازی و هیدروکربن‌های با وزن مولکولی کم می‌باشد (Lehmann and Joseph, 2015). افزایش درصد خاکستر در اثر افزایش دمای گرماکافت، می‌تواند به دلیل افزایش غلظت مواد معدنی

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر عملکرد، درصد خاکستر، مواد فرار و کربن تثبیت‌شده

میانگین مربعات					
منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد	درصد خاکستر	مواد فرار	کربن تثبیت‌شده
تیمار	۷	۲۰۰/۱۴**	۷۸۹/۴**	۲۰۴۸/۹**	۴۲۳/۷**
خطای آزمایشی	۱۶	۲/۳۷۸	۰/۲۲۳	۰/۲۲۲	۰/۴۲۲
ضریب تغییرات (/)		۲/۲۷	۲/۴۳	۱/۰۷	۵/۱۸

جدول ۲: مقایسه میانگین‌های عملکرد، درصد خاکستر، مواد فرار و کربن تثبیت‌شده بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی آن‌ها در تیمارهای مختلف

ویژگی	واحد	زغال زیستی بقایای ذرت			زغال زیستی باگاس نیشکر		
		۲۰۰°C	۳۵۰°C	۵۰۰°C	۲۰۰°C	۳۵۰°C	۵۰۰°C
عملکرد	%	۶۵/۴۷ ^b	۴۵/۶۵ ^{cd}	۳۶/۲۳ ^e	۱۰۰ ^a	۶۷/۱۱ ^b	۴۳/۵۵ ^d
درصد خاکستر	%	۱۲/۷۳ ^e	۲۸/۱۳ ^d	۳۳/۰ ^b	۷/۷۸ ^f	۱۲/۴۰ ^e	۵۴/۷۳ ^a
مواد فرار	%	۷۸/۸۸ ^b	۴۹/۵۵ ^c	۳۵/۳۳ ^e	۸۷/۷۸ ^a	۷۹/۱۱ ^b	۲۲/۰ ^f
کربن تثبیت‌شده	%	۸/۳۹ ^c	۲۲/۳۱ ^b	۳۱/۶۷ ^a	۴/۴۴ ^d	۸/۴۹ ^c	۲۳/۲۷ ^b

در هر ردیف میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری ($p \leq 0.05$) ندارند.

سلسیوس انجام می‌شود (Singh et al., 2015).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر نوع تیمار بر pH و EC معنی‌دار ($p \leq 0.01$) بود (جدول ۳). گرماکافت زیست-توده‌ها و افزایش دمای گرماکافت سبب افزایش pH و EC هر دو نوع زغال زیستی شد (جدول ۴). بدین ترتیب که در هر دو نوع زیست‌توده بیشترین و کمترین مقادیر pH و EC به ترتیب مربوط به زغال زیستی تولیدشده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس و زیست‌توده اولیه بود. با افزایش دمای گرماکافت از ۲۰۰ درجه به ۳۵۰ درجه سلسیوس، pH زغال زیستی بقایای ذرت و باگاس نیشکر به ترتیب ۱/۳۹ و ۱/۶۴ واحد افزایش یافت. همچنین pH زغال‌های زیستی تهیه‌شده ذرت و باگاس نیشکر در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در مقایسه با ۳۵۰ درجه سلسیوس، به ترتیب ۱/۰۲ و ۱/۱۷ واحد بیشتر بود. این نتایج نشان داد که pH زغال زیستی به شدت تحت تأثیر دمای گرماکافت است. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش دمای گرماکافت سبب افزایش درصد خاکستر (جدول ۲) و افزایش غلظت کاتیون‌های قلیایی سدیم و پتاسیم شد (جدول ۶). بنابراین افزایش pH به این دلیل بود که فرآیند گرماکافت و افزایش دما با افزایش درصد خاکستر و تجمع کاتیون‌های قلیایی سبب شد که pH زغال زیستی از اسیدی به سمت قلیایی پیش برود. همچنین یکی دیگر از دلایل افزایش pH و قلیایی شدن زغال‌های زیستی در اثر افزایش دمای

تبدیل زیست‌توده به زغال زیستی و همچنین افزایش دمای گرماکافت سبب تغییر معنی‌دار درصد کربن تثبیت‌شده زغال زیستی شد (جدول ۴). با افزایش دمای گرماکافت از ۲۵۰ به ۳۵۰ درجه سلسیوس، کربن تثبیت‌شده هر دو نوع زغال زیستی افزایش یافت. درحالی‌که با افزایش دمای گرماکافت از ۳۵۰ به ۵۰۰ درجه سلسیوس، کربن تثبیت‌شده در زغال زیستی بقایای ذرت افزایش یافت، اما در باگاس نیشکر این شاخص به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. این کاهش را می‌توان کاهش مواد فرار زغال زیستی باگاس نیشکر در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس نسبت داد. بیش‌تر بودن کربن تثبیت‌شده در دماهای بالای گرماکافت به دلیل افزایش آزادسازی مواد فرار می‌باشد. کاهش مقدار مواد فرار در دماهای ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس نیز تأییدکننده این نتایج است (جدول ۲). به‌طورکلی نتایج نشان داد که با افزایش دما از ۲۰۰ درجه سلسیوس به ۳۵۰ درجه سلسیوس، تغییرات عملکرد، درصد خاکستر، مواد فرار و کربن تثبیت‌شده، بسیار شدید بود اما تغییرات هرکدام از آن‌ها با افزایش دمای گرماکافت از ۳۵۰ به ۵۰۰ درجه سلسیوس در مقایسه با افزایش دما از ۲۰۰ به ۳۵۰ درجه سلسیوس کمتر بود. این نتایج به این دلیل بود که در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس مقدار تجزیه حرارتی زیست‌توده کم بوده و بخش عمده تجزیه حرارتی در دماهای بالاتر از ۲۰۰ درجه

نیشکر بود. این نتیجه احتمالاً به دلیل درصد خاکستر کمتر و درصد هیدروژن بیشتر در زغال زیستی بقایای ذرت بود (جدول ۲ و ۳).

گرماکافت، خارج شدن گروه‌های عاملی اسیدی از زغال زیستی بود (شکل ۳). نتایج نشان داد pH بقایای ذرت به‌ویژه در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به‌طور معنی‌دار ($p \leq 0.05$) کمتر از باگاس

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر pH، EC، CEC و سطح ویژه بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی آن‌ها

میانگین مربعات					
منابع تغییرات	درجه آزادی	pH	هدایت الکتریکی	ظرفیت تبادل کاتیونی	سطح ویژه
تیمار	۷	۷/۹۹**	۱۲/۵۱**	۸۶/۷۲**	۱۳۷۵/۷**
خطای آزمایشی	۱۶	۰/۰۰۹	۰/۰۱۶	۱/۵۱	۶/۹۲
ضریب تغییرات (%)		۱/۲۷	۳/۰۸	۴/۲۶	۱۰/۶۱

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های ویژگی‌های pH، EC، CEC و سطح ویژه بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی آن‌ها در تیمارهای مختلف

ویژگی	واحد	زغال زیستی بقایای ذرت			زغال زیستی باگاس نیشکر		
		۲۰۰°C	۳۵۰°C	۵۰۰°C	۲۰۰°C	۳۵۰°C	۵۰۰°C
pH	-	۶/۷۸ ^{ef}	۸/۱۷ ^d	۹/۱۹ ^b	۵/۸۷ ^{fg}	۸/۵۹ ^c	۹/۷۲ ^a
هدایت الکتریکی (EC)	dS m ⁻¹	۲/۳۷ ^d	۴/۳۶ ^b	۶/۳۳ ^a	۰/۷۸۱ ^g	۰/۹۵۳ ^{ef}	۱/۰۵۶ ^e
ظرفیت تبادل کاتیونی	cmol _c kg ⁻¹	۲۵/۷۱ ^d	۳۱/۹۵ ^{bc}	۲۴/۸۷ ^{de}	۲۱/۳۱ ^f	۳۳/۸۵ ^{ab}	۲۲/۸۵ ^{ef}
سطح ویژه	m ² g ⁻¹	۵/۹۲ ^e	۳۲/۱۰ ^c	۶۱/۸۳ ^a	۵/۴۹ ^e	۱۰/۱۵ ^d	۴۹/۶۳ ^b

در هر ردیف میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری ($p \leq 0.05$) ندارند.

مقدار CEC نمونه‌های بقایای ذرت بیشتر از نمونه‌های باگاس نیشکر بود. اما اختلاف آن‌ها در دماهای مختلف از نظر آماری معنی‌دار نبود. افزایش CEC بر اثر گرماکافت زیست‌توده به این دلیل است که گرماکافت سبب افزایش سطح ویژه و تشکیل گروه‌های عاملی از جمله فنولیک، کربوکسیلیک بر روی سطوح زغال زیستی می‌شود. بنابراین زغال زیستی نسبت به زیست‌توده اولیه تهیه‌شده از آن CEC بیشتری دارد (Lehmann et al., 2011; Singh et al., 2015). کاهش CEC زغال‌های زیستی بر اثر افزایش دمای گرماکافت را می‌توان به افزایش سطح ویژه و در نتیجه کاهش تراکم بار سطحی و همچنین کاهش گروه‌های عاملی اسیدی نسبت داد (جدول ۴ و شکل ۳). نتایج مطالعات نشان داده است که در دماهای گرماکافت بالاتر از ۴۰۰ درجه سلسیوس به دلیل کاهش گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار، CEC زغال زیستی به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد (Lehmann et al., 2011; Singh et al., 2015). نتایج پژوهش Nguyen and Lehmann (2009) نیز نشان داد CEC زغال‌های زیستی تهیه‌شده از چوب بلوط و بقایای ذرت تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به‌طور معنی‌دار کمتر از زغال‌های زیستی گرماکافت شده در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس بود.

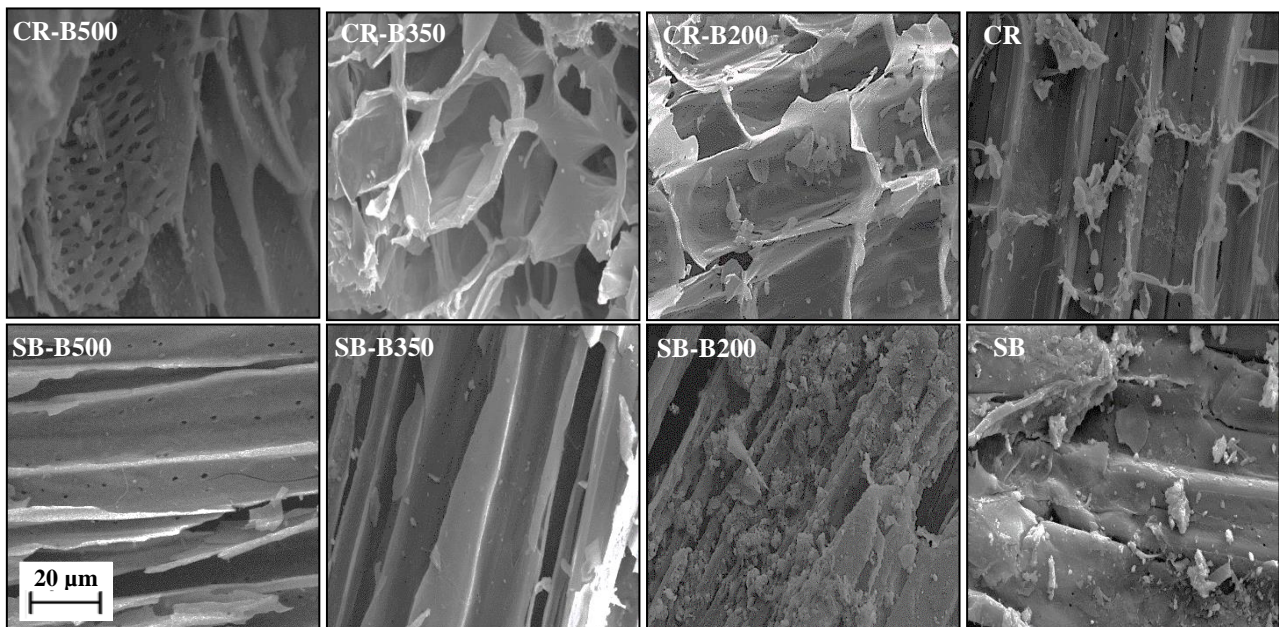
سطح ویژه زغال زیستی در اثر گرماکافت و با افزایش دما به‌طور معنی‌دار ($p \leq 0.05$) افزایش یافت (جدول ۴). به‌طوری‌که سطح ویژه زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس بیش از ۴ برابر زغال زیستی تهیه‌شده در دمای گرماکافت ۲۰۰ درجه سلسیوس بود. نتایج مربوط به تصاویر

روند تغییرات EC با افزایش دمای گرماکافت با روند تغییرات pH مشابه بود. بدین ترتیب که بر اثر گرماکافت زیست‌توده‌ها و افزایش دما، EC زغال‌های زیستی به‌طور معنی‌دار ($p \leq 0.05$) افزایش یافت. دلیل افزایش EC بر اثر گرماکافت و افزایش دما افزایش درصد خاکستر و از دست رفتن مواد فرار (جدول ۲) و در نتیجه افزایش اندوزش نمک‌های قلیایی در بخش خاکستر زغال زیستی بود (جدول ۷). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد EC زیست‌توده اولیه و زغال‌های زیستی تهیه‌شده از بقایای ذرت به‌طور معنی‌دار بیشتر از باگاس نیشکر بود (جدول ۵). در زیست‌توده اولیه و هر سه دمای گرماکافت مطالعه شده، EC نمونه‌های بقایای ذرت بیش از سه برابر باگاس نیشکر بود. این نتیجه را می‌توان به بیشتر بودن غلظت پتاسیم در زغال زیستی باگاس نیشکر نسبت داد (جدول ۷). چراکه نتایج مطالعات نشان داده است که غلظت بالای K⁺ به دلیل تحرک زیاد آن سبب افزایش هدایت الکتریکی در زغال زیستی می‌شود (Lehmann and Joseph, 2009). Mandal et al. (2018) نیز افزایش pH و EC زغال‌های زیستی تهیه‌شده از زیست‌توده‌های مختلف بقایای گیاهی در اثر افزایش دمای گرماکافت را گزارش کردند.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد نوع تیمار، تغییرات CEC و سطح ویژه نمونه‌ها را به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر قرار داد (جدول ۳). CEC زغال زیستی با افزایش دمای گرماکافت به‌طور معنی‌دار ($p \leq 0.05$) کاهش یافت (جدول ۴). اگرچه مقایسه CEC زغال‌های زیستی دو نوع زیست‌توده نشان داد

آن‌ها وجود نداشت، اما در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس سطح ویژه زغال زیستی باگاس نیشکر به‌طور معنی‌داری کمتر از بقایای ذرت بود (جدول ۵). این نتیجه را می‌توان به درصد خاکستر بیشتر زغال زیستی باگاس نیشکر نسبت داد (جدول ۱). به‌دلیل این که بیشتر بودن درصد خاکستر و ترکیبات غیرآلی می‌تواند تا حدی سبب مسدود شدن منافذ ریز زغال زیستی و به‌دنبال آن کاهش سطح ویژه زغال زیستی شود (Rafiq *et al.*, 2016). این نتایج با نتایج پژوهش‌های (Rehrah *et al.*, 2016) و Rafiq *et al.* (2016) مشابه بود.

میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز نشان‌دهنده به‌وجود آمدن ساختار حفره‌ای در سطح زغال‌های زیستی و افزایش حجم منافذ زغال‌های زیستی بر اثر افزایش دمای گرماکافت بود (شکل ۱). فرآیند گرماکافت زیست‌توده‌ها و افزایش دما به‌دلیل تجزیه ترکیبات آلی سلولز، همی‌سلولز و لیگنین در زغال زیستی و خارج شدن مواد فرار سبب ایجاد حفرات و افزایش حجم منافذ ریز و در نتیجه افزایش سطح ویژه زغال زیستی می‌شود (Yang *et al.*, 2017). مقایسه میانگین دوزیست توده نشان داد که در زیست‌توده اولیه و در زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای ۲۰۰ و ۳۵۰ درجه سلسیوس اختلاف معنی‌داری بین سطح ویژه



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی زیست‌توده اولیه ذرت (CR) و باگاس نیشکر (SB) و زغال‌های زیستی بقایای ذرت (CR-B) و باگاس نیشکر (SB-B) در دماهای ۲۰۰ (B200)، ۳۵۰ (B350) و ۵۰۰ (B500) درجه سلسیوس (بزرگنمایی تصاویر ۲۰ میکرومتر می‌باشد)

سلسیوس احتمالاً به این دلیل است که کربن آن از فاز جامد زغال زیستی خارج شده است (Zhao *et al.*, 2018). همچنین درصد نیتروژن در هر دو نوع زیست‌توده ابتدا بر اثر گرماکافت و افزایش دما از ۲۰۰ به ۳۵۰ درجه سلسیوس افزایش یافت درحالی‌که در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس مقدار آن کاهش معنی‌دار ($p \leq 0.05$) پیدا کرد. این نتیجه به این دلیل بود که ابتدا به‌دلیل غنی شدن از نیتروژن در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس مقدار آن افزایش یافت، سپس در دمای ۵۰۰ درجه احتمالاً به دلیل انتشار آمونیاک و سایر ترکیبات فرار نیتروژن‌دار مقدار آن کاهش یافت (Ippolito *et al.*, 2016). همچنین بیشتر بودن درصد نیتروژن زغال‌های زیستی در دماهای ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس نسبت به زیست‌توده اولیه و زغال زیستی

ترکیب عنصری و نسبت‌های اتمی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر نوع تیمار بر درصد کربن، هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن و گوگرد معنی‌دار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین ترکیب عنصری و نسبت‌های اتمی زیست‌توده اولیه و زغال‌های زیستی در جدول ۶ آمده است. درصد کربن زغال زیستی بقایای ذرت بر اثر فرآیند گرماکافت و افزایش دما به‌طور معنی‌داری ($p \leq 0.05$) افزایش یافت (جدول ۶). درحالی‌که در زغال زیستی باگاس نیشکر ابتدا با افزایش دمای گرماکافت از ۲۰۰ به ۳۵۰ درجه سلسیوس، درصد کربن افزایش یافت، سپس با افزایش دما از ۳۵۰ به ۵۰۰ درجه سلسیوس درصد این عنصر کاهش معنی‌دار ($p \leq 0.05$) پیدا کرد. کاهش کربن در زغال زیستی باگاس نیشکر در دمای ۵۰۰ درجه

آب‌زدایی شکسته می‌شوند و ترکیبات با وزن مولکولی کم حاوی هیدروژن و اکسیژن آزاد می‌شوند (Zhao et al., 2018). نتایج مشابهی نیز توسط سایر پژوهش‌گران گزارش شده است (Novak et al., 2009; Ippolito et al., 2016; Zhao et al., 2018). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در مقایسه با سایر عناصر در دماهای گوناگون گرماکافت درصد گوگرد کمتر تحت تأثیر دمای گرماکافت قرار گرفت (جدول ۶).

گرماکافت شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد که نیتروژن زیست‌توده‌ها در دماهای پایین پایدار بوده و آزاد نمی‌شود. در هر دو نوع زیست‌توده کاهش چشم‌گیر درصد هیدروژن و اکسیژن زغال زیستی در اثر تبدیل زیست‌توده به زغال زیستی و افزایش دمای گرماکافت مشاهده شد. کاهش درصد هیدروژن و اکسیژن زغال زیستی در دماهای بالای گرماکافت به این دلیل می‌باشد که پیوندهای اکسیژن‌دار در فرآیندهای اکسیژن‌زدایی و

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر ترکیب عنصری و نسبت‌های اتمی بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی آن‌ها

میانگین مربعات											
منابع تغییرات	درجه آزادی	کربن (C)	هیدروژن (H)	نیتروژن (N)	اکسیژن (O)	گوگرد (S)	C/N	O/C	H/C	H/O	(O+N)/C
تیمار	۷	۲۰۱/۴**	۹/۵۳**	۰/۷۳۷**	۹۹۵/۹**	۰/۰۱۶**	۴۸۰/۷**	۰/۶۰۶**	۰/۰۰۶**	۰/۱۱۸**	۰/۵۹۴**
خطای آزمایشی	۱۶	۲/۲۹	۰/۰۲۴	۰/۰۰۱	۰/۲۹۶	۰/۰۰۱	۱۰/۹۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات (%)		۳/۰۶	۲/۳۹	۲/۳۰	۲/۴۲	۶/۸۷	۲/۹۱	۳/۹۵	۴/۲۴	۳/۹۰	۳/۷۱

جدول ۶- مقایسه میانگین‌های ترکیب عنصری و نسبت‌های اتمی بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی آن‌ها در تیمارهای مختلف

ویژگی	واحد	زغال زیستی بقایای ذرت			زغال زیستی باگاس نیشکر		
		۲۰۰°C	۳۵۰°C	۵۰۰°C	۲۰۰°C	۳۵۰°C	۵۰۰°C
کربن (C)	%	۴۱/۳۱ ^{de}	۵۷/۰۱ ^{ab}	۵۹/۹۳ ^a	۴۰/۱۷ ^e	۴۵/۱۵ ^{cd}	۵۶/۱۱ ^b
هیدروژن (H)	%	۳/۸۵ ^{۴a}	۱/۸۱ ^{۷b}	۱/۰۴۹ ^d	۳/۹۱ ^{۸a}	۲/۶۰ ^{۴a}	۱/۵۹ ^{۸c}
نیتروژن (N)	%	۰/۸۲ ^{۶d}	۱/۰۴۲ ^c	۱/۵۵ ^{۷b}	۰/۲۸ ^{۱g}	۰/۵۷ ^{۵f}	۰/۸۰ ^{۵d}
اکسیژن (O)	%	۴۵/۳۸ ^a	۱۱/۰۵ ^d	۴/۱۶ ^e	۴۷/۳۵ ^a	۳۸/۹۸ ^b	۱۱/۵۹ ^d
گوگرد (S)	%	۰/۴۰ ^{۹b}	۰/۳۷ ^{۸bc}	۰/۳۴ ^{۸c}	۰/۵۰ ^{۵a}	۰/۲۸ ^{۷d}	۰/۴۳ ^{۵ab}
C/N	-	۵۸/۳۵ ^e	۴۰/۵۱ ^h	۴۴/۹۱ ^g	۱۶۶/۷۱ ^a	۹۱/۶۱ ^b	۸۱/۳۳ ^c
O/C	-	۰/۸۲ ^{۴b}	۰/۱۴ ^{۵e}	۰/۰۵ ^{۲g}	۰/۸۸ ^{۳a}	۰/۶۴ ^{۸c}	۰/۱۵ ^{۵e}
H/C	-	۱/۱۲ ^{۰a}	۰/۳۸ ^{۲d}	۰/۲۱ ^{۰e}	۱/۱۷ ^{۰a}	۰/۶۹ ^{۲b}	۰/۳۴ ^{۴d}
(O+N)/C	-	۰/۹۸ ^{۱a}	۰/۱۹ ^{۸d}	۰/۰۸ ^{۷f}	۰/۸۹ ^{۰b}	۰/۶۵ ^{۸c}	۰/۱۶ ^{۷e}

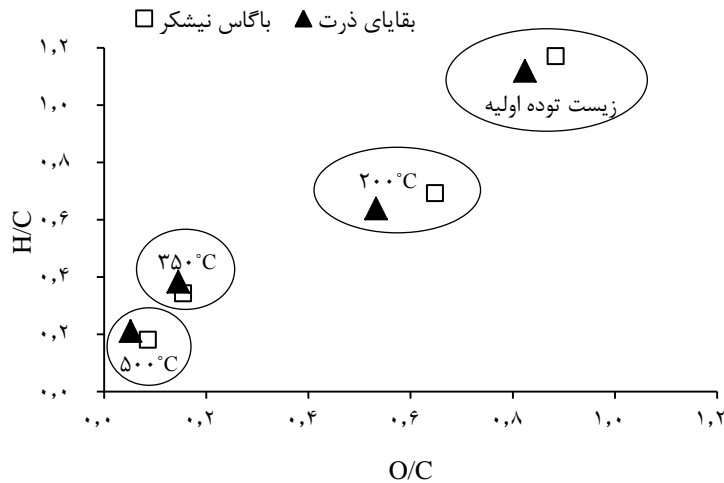
در هر ردیف میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری ($p \leq 0.05$) ندارند.

نسبت C/N زغال زیستی باگاس نیشکر به‌طور معنی‌داری ($p \leq 0.05$) بیشتر از بقایای ذرت بود. بیشتر بودن نیتروژن در زغال زیستی بقایای ذرت نسبت به باگاس نیشکر به‌دلیل بیشتر بودن نیتروژن زیست‌توده آن بود (جدول ۶). افزایش دمای گرماکافت از ۲۰۰ به ۳۵۰ درجه سبب کاهش معنی‌دار در نسبت‌های اتمی (C/N, O/C, H/C) زغال زیستی شد. نسبت O/C در مقایسه با نسبت H/C، بیشتر کاهش یافت. نسبت O/C کمتر در دمای ۵۰۰ درجه نشان‌دهنده کاهش سطح آبدوستی زغال زیستی در دماهای بالای گرماکافت می‌باشد (Gai et al., 2014). در طی فرآیند گرماکافت، با شروع فرآیند آب‌زدایی در دماهای بالاتر از ۲۰۰ درجه سلسیوس، سلولز، لیگنین و پکتین که از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده زیست‌توده‌های آلی می‌باشند

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثر نوع تیمار بر نسبت‌های اتمی کربن به نیتروژن (C/N)، اکسیژن به کربن (O/C) و مجموع اکسیژن و نیتروژن به کربن (O+N)/C معنی‌دار بود (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین نسبت‌های اتمی عناصر نمونه‌ها نشان داد که بر اثر گرماکافت زیست‌توده‌ها و همچنین افزایش دمای گرماکافت، نسبت‌های C/N, O/C, (O+N)/C و H/C به‌طور معنی‌داری ($p \leq 0.05$) کاهش پیدا کردند (جدول ۶). اگرچه میان درصد کربن زیست‌توده و زغال‌های زیستی بقایای ذرت و باگاس نیشکر به‌جز زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس اختلاف معنی‌دار وجود نداشت، اما درصد نیتروژن در بقایای ذرت در هر سه دمای گرماکافت بیش از ۱/۸ برابر باگاس نیشکر بود. به‌همین دلیل

اکسیژن به کربن (O/C) در ساختمان زغال‌های زیستی بقایای ذرت و باگاس نیشکر، درصد آروماتیک بودن کربن افزایش یافت. نتایج این بخش با نتایج نمودار تغییرات H/C نسبت به O/C که نشان‌دهنده رابطه مثبت بین نسبت‌های هیدروژن به کربن (H/C) و اکسیژن به کربن (O/C) می‌باشد، هم‌خوانی دارد (شکل ۲). نتایج طیف مادون‌قرمز نمونه‌ها نیز که نشان‌دهنده از بین رفتن گروه‌های عاملی اکسیژن و هیدروژن‌دار مانند هیدروکسیل و کربوکسیل در دماهای بالای گرماکافت بود (شکل ۳)، با نتایج این بخش (کاهش H/C و O/C در ساختمان زغال زیستی) مطابقت داشت (جدول ۵ و شکل ۲). نسبت مولی O/C کمتر نشان‌دهنده بیشتر بودن بخش پایدار کربن می‌باشد. نسبت مولی H/C کمتر از ۰/۶ و نسبت مولی O/C کمتر از ۰/۴ در زغال زیستی برای ترسیب بلندمدت کربن پیشنهاد شده است (Zhao *et al.*, 2018). بنابراین بر اساس نتایج نسبت‌های اتمی و نمودار تغییرات H/C نسبت به O/C زغال‌های زیستی تهیه‌شده از هر دو نوع زیست‌توده در دماهای ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه به دلیل پایداری بالای کربن آن‌ها برای ترسیب بلندمدت کربن مناسب هستند.

به فنول، فوران و آلکیل تبدیل‌شده و مقادیری از اکسیژن و هیدروژن از زیست‌توده خارج می‌شود (Zhao *et al.*, 2018). کاهش نسبت‌های O/C و H/C و (O+N)/C، به این دلیل است که در دماهای بالای گرماکافت در اثر واکنش‌های دهیدراته شدن و دکربوکسیله شدن گروه‌های عامل سطحی خارج‌شده و ساختارهای آروماتیک کربن تشکیل می‌شود (Domingues *et al.*, 2017). نمودار تغییرات H/C نسبت به O/C نیز تأییدکننده این نتایج است (شکل ۲). این نمودار به‌وضوح نشان داد که زیست‌توده اولیه و زغال‌های زیستی تولیدشده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس با داشتن نسبت H/C بیشتر آروماتیسیته بسیار کمی دارند. همچنین زغال‌های زیستی تهیه‌شده از هر دو زیست‌توده در دماهای ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس به دلیل داشتن نسبت O/C کمتر، قطبیت و بار منفی کمتری را دارند (شکل ۲). نتایج مربوط به طیف مادون‌قرمز زغال‌های زیستی نیز تأییدکننده این نتایج است (شکل ۳). به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش دمای گرماکافت سبب خروج هیدروژن و اکسیژن از ساختمان زیست‌توده‌ها شده و با کاهش نسبت هیدروژن به کربن (H/C) و

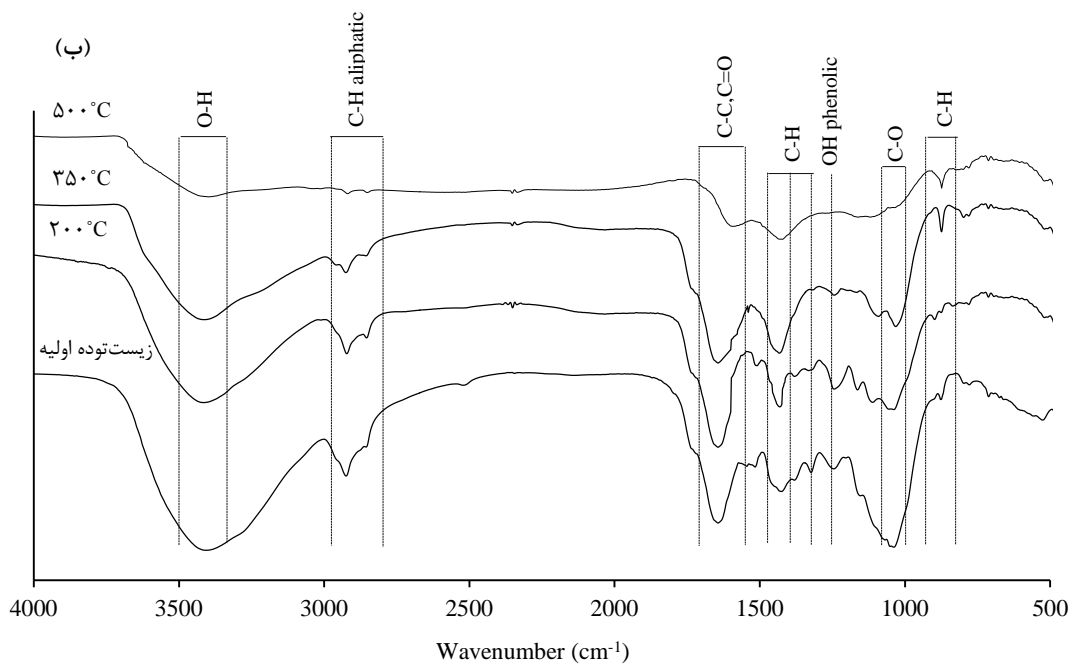
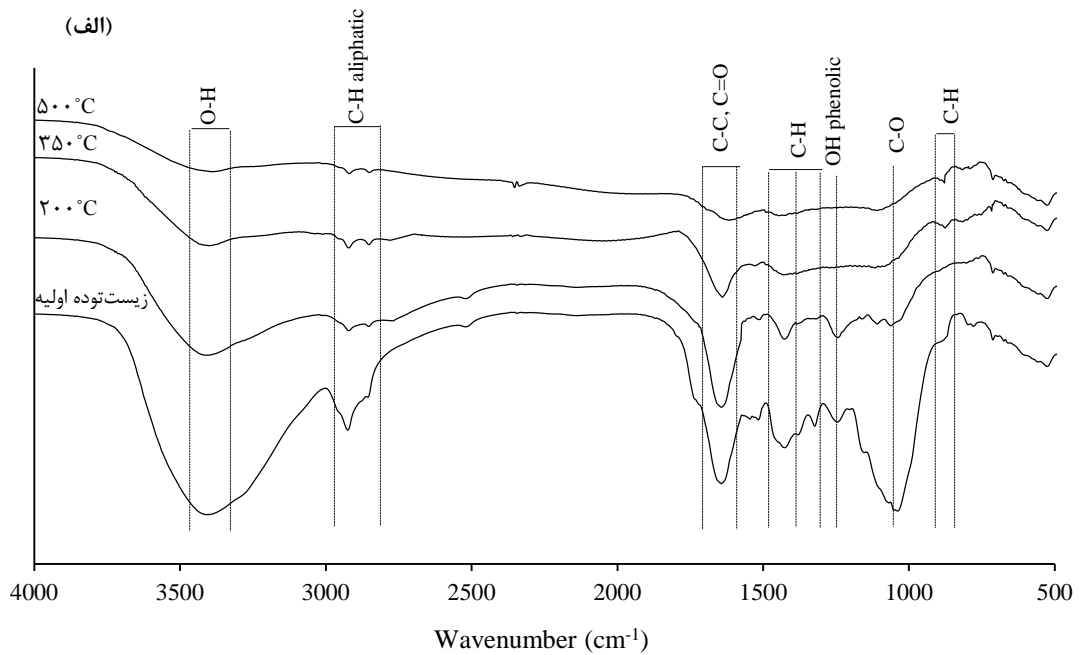


شکل ۲. تغییرات H/C نسبت به O/C در بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی آن‌ها در تیمارهای مختلف

تیمارها دو پیک در محدوده بین 2860 cm^{-1} و 2920 cm^{-1} مربوط به گروه‌های عاملی C-H آلیفاتیک مشاهده شدند. شدت این دو پیک بر اثر گرماکافت و افزایش دما کاهش یافت. همچنین شدت این پیک در طیف مربوط به تیمارهای ۵۰۰ درجه سلسیوس به‌ویژه در باگاس نیشکر کاهش نسبتاً زیادی نشان داد. وجود پیک مربوط به گروه‌های عاملی آلیفاتیک نشان‌دهنده این است که بخشی از سلولز یا همی‌سلولز تجزیه نشده است (Zhao *et al.*, 2018).

طیف مادون‌قرمز

در شکل ۳ طیف مادون‌قرمز تیمارهای مختلف نشان داده شده است. در همه تیمارها یک پیک پهن در محدوده 3400 cm^{-1} نشان‌دهنده ارتعاشات کششی قوی گروه‌های O-H مربوط به مولکول‌های آب و یا گروه‌های فنولی می‌باشد. شدت این پیک بر اثر گرماکافت زیست‌توده‌ها و افزایش دما به‌ویژه در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به‌طور چشم‌گیری کاهش یافت. در طیف مربوط به همه



شکل ۳- طیف‌های مادون‌قرمز زیست‌توده اولیه و زغال‌های زیستی بقایای ذرت (الف) و باگاس نیشکر (ب) در تیمارهای مختلف

زیستی تهیه‌شده در دماهای ۲۰۰ و ۳۵۰ درجه سلسیوس مربوط به گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار سلولز و همی سلولز شامل OH-الکی و C-O-C آلیفاتیک و اسیدهای کربوکسیلیک می‌باشد (Cantrell et al, 2012) که در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس شدت آن بسیار کم بود. پیک مربوط به گروه‌های عاملی OH- فنولی در محدوده عدد موجی 1290 cm^{-1} در زیست‌توده اولیه و زغال‌های زیستی ذرت و باگاس تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس مشاهده شد. در هر دو نوع زیست-

پیک مربوط به گروه‌های عاملی C=C و C=O کربونیل در محدوده عدد موجی $1630-1600\text{ cm}^{-1}$ در هر دو نوع زغال زیستی مشاهده شد. این پیک در زغال زیستی باگاس نیشکر در دماهای ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه شدت کمتری داشت و در زغال زیستی دمای ۲۰۰ درجه شدت بیشتری داشت. وجود پیک در ناحیه 1030 cm^{-1} در بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های

ترتیب ۲۹/۰ و ۳۲/۱ درصد بود. درحالی که این مقدار در دمای گرماکافت ۵۰۰ درجه سلسیوس در زغال‌های زیستی بقایای ذرت و باگاس نیشکر به ترتیب ۲۵/۸ و ۲۹/۷ درصد بود. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دمای گرماکافت درصد غلظت فراهم فسفر زغال زیستی ممکن است تا حدی کاهش یابد. این نتیجه احتمالاً به این دلیل است که در دماهای بالای گرماکافت فسفر به شکل‌های با فراهمی کم‌تر فسفر مانند شکل‌های کریستالی فسفر درآید (Zheng *et al.*, 2013). همچنین افزایش pH زغال زیستی نیز می‌تواند سبب کاهش فراهمی فسفر فراهم زغال زیستی می‌شود (Zheng *et al.*, 2013; Lehmann and Joseph, 2015). اختلاف غلظت تمام عناصر در زغال‌های زیستی تهیه‌شده از دو زیست‌توده معنی‌دار بود. به طوری که غلظت تمامی عناصر به جز سدیم و مس در زغال زیستی بقایای ذرت به‌طور معنی‌دار بیشتر از زغال زیستی باگاس نیشکر بود. روند یکسانی میان اختلاف غلظت سدیم زغال زیستی دو زیست‌توده در دماهای مختلف مشاهده نشد. بدین ترتیب اگرچه در دمای گرماکافت ۲۰۰ درجه سلسیوس غلظت سدیم در زغال زیستی بقایای ذرت بیشتر بود. اما در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس اختلاف معنی‌دار میان آن‌ها مشاهده نشد. درحالی که در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس غلظت سدیم در زغال زیستی باگاس نیشکر بیشتر بود. همچنین در دماهای مختلف گرماکافت غلظت مس در نمونه‌های باگاس نیشکر بیشتر از بقایای ذرت بود. این نتیجه به دلیل بیشتر بودن غلظت مس در باگاس نیشکر نسبت به بقایای ذرت بود. همچنین بیشتر بودن غلظت عناصر غذایی فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز و روی در زغال‌های زیستی بقایای ذرت نسبت به باگاس نیشکر به دلیل بیشتر بودن غلظت این عناصر در بقایای ذرت بود (جدول ۸). دلیل اصلی افزایش غلظت عناصر غذایی در زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای بالای گرماکافت، کاهش عملکرد و افزایش تغلیظ عناصر در نمونه‌های زغال زیستی می‌باشد. Cantrell *et al.* (2012) نیز با مطالعه تأثیر دمای گرماکافت بر غلظت کل و فراهم عناصر غذایی در زغال زیستی تهیه‌شده از زیست‌توده‌های گوناگون گزارش کردند که افزایش دمای گرماکافت سبب افزایش معنی‌دار غلظت فسفر، پتاسیم و سدیم، آهن، منگنز و روی در زغال‌های زیستی تهیه‌شده از زیست‌توده‌های مختلف شد. نتایج پژوهش Afrasiabi *et al.* (2017) نیز نشان داد بر اثر افزایش دمای گرماکافت غلظت فسفر، پتاسیم، روی، آهن، منگنز و روی زغال زیستی تقاله پسته افزایش یافت.

توده بیشترین شدت این پیک در تیمارهای ۲۰۰ درجه سلسیوس مشاهده شد. همچنین شدت این پیک در زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس بسیار کم بود و در تیمارهای ۵۰۰ درجه سلسیوس این پیک مشاهده نشد. کاهش شدت پیک مربوط به گروه‌های عاملی فنولی به دلیل تجزیه و فرآیند آب‌زدایی ترکیبات سلولزی و لیگنوسولوزی می‌باشد (Domingues *et al.*, 2017). پیک مشاهده‌شده در عدد موجی 885 cm^{-1} مربوط به ارتعاش خمشی خارج از صفحه C-H آروماتیک بوده که در زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای ۳۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس مشاهده شد، اما در نمونه‌های گرماکافت شده در دمای ۲۰۰ درجه مشاهده نشد. این پیک احتمالاً به دلیل تشکیل کربنات‌ها در دماهای بالای گرماکافت ایجاد شده است (Zhao *et al.*, 2018). این پیک در زغال زیستی باگاس نیشکر با شدت نسبتاً بیشتری پدیدار شد. در هر سه دمای گرماکافت میان طیف‌های زغال زیستی بقایای ذرت و باگاس اختلاف زیادی وجود نداشت. نتایج آنالیز مادون‌قرمز با نتایج مربوط به نسبت‌های اتمی که نشان داد گروه‌های عاملی قطبی با افزایش دمای گرماکافت کاهش یافته و آروماتیسیته افزایش می‌یابد، هم‌خوانی داشت (جدول ۵). برخی از پژوهش‌گران نیز نتایج مشابهی را برای زغال‌های زیستی تهیه‌شده از سایر زیست‌توده‌ها گزارش کردند (Domingues *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2018). که گروه‌های عاملی C-H خطی، C-O-C خطی (اسیدهای کربوکسیلیک) و C=O (کربونیل) موجود در سطح زغال‌های زیستی تهیه‌شده از پوسته قهوه، خاکاره اکالیپتوس و پوست کاج در دماهای بالای گرماکافت از بین رفتند، اما ترکیبات حلقوی کربن در زغال‌های زیستی حفظ شدند. در پژوهش Beheshti *et al.* (2016) نیز گروه‌های عاملی اسیدی زغال زیستی بر اثر افزایش دمای گرماکافت کاهش پیدا کردند.

غلظت عناصر زغال زیستی

نوع تیمار غلظت کل عناصر غذایی اندازه‌گیری شده و غلظت فراهم فسفر و پتاسیم را به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر قرارداد (جدول ۷). به‌طور کلی غلظت کل و فراهم عناصر اندازه‌گیری شده در زغال‌های زیستی تهیه‌شده از هر دو زیست‌توده بر اثر افزایش دمای گرماکافت، به‌طور معنی‌داری ($p \leq 0.05$) افزایش یافت (جدول ۸). درصد فراهمی فسفر (نسبت غلظت فراهم فسفر به غلظت کل آن) در زغال‌های زیستی بقایای ذرت و باگاس نیشکر در دمای گرماکافت ۲۰۰ درجه سلسیوس به-

جدول ۷- تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر غلظت عناصر بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی آن‌ها

میانگین مربعات										
منابع تغییرات	درجه آزادی	فسفر کل	پتاسیم کل	سدیم کل	فسفر فراهم	پتاسیم فراهم	آهن کل	منگنز کل	روی کل	مس کل
تیمار	۷	۰/۵۱۸**	۱۱۹۵**	۲۳/۶۳**	۰/۵۰۸**	۲۰۳/۸**	۱۷۰/۶۴۳**	۱۱۶۰/۵**	۲۰۱۲**	۸۶/۳۵**
خطای آزمایشی	۱۶	۰/۰۰۰۱	۱/۱	۰/۰۲۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۳۳	۱۸۳/۵	۱۴/۸۲	۷/۷۸	۰/۰۷
ضریب تغییرات (%)		۲/۲۳	۴/۹۰	۲/۸۹	۲/۹۹	۵/۵۲	۶/۳۸	۷/۵۹	۵/۱۲	۵/۵۷

جدول ۸. مقایسه میانگین‌های غلظت عناصر بقایای ذرت و باگاس نیشکر و زغال‌های زیستی آن‌ها در تیمارهای مختلف

ویژگی	واحد	زغال زیستی بقایای ذرت			زغال زیستی باگاس نیشکر		
		۲۰۰ °C	۳۵۰ °C	۵۰۰ °C	۲۰۰ °C	۳۵۰ °C	۵۰۰ °C
فسفر کل	g kg ⁻¹	۰/۶۳۹ ^d	۰/۷۸۵ ^c	۱/۲۶ ^a	۰/۱۰۹ ^h	۰/۱۵۶ ^g	۰/۳۴۷ ^e
پتاسیم کل	g kg ⁻¹	۱۳/۳۲ ^d	۲۳/۴۳ ^c	۵۵/۲۰ ^a	۰/۳۹۱ ^h	۰/۸۱۶ ^g	۶/۵۵ ^e
سدیم کل	g kg ⁻¹	۲/۹۳ ^e	۵/۱۳ ^c	۹/۱۱ ^a	۲/۲۱ ^f	۳/۸۶ ^d	۹/۹۶ ^a
فسفر فراهم	g kg ⁻¹	۰/۱۸۵ ^d	۰/۲۲۹ ^c	۰/۳۲۵ ^a	۰/۰۳۳ ^h	۰/۰۵۰ ^g	۰/۱۰۳ ^e
پتاسیم فراهم	g kg ⁻¹	۵/۲۸۵ ^d	۱۰/۲۷۸ ^c	۲۲/۲۳۷ ^a	۰/۱۰۲ ^h	۰/۱۹۱ ^g	۱۵۰/۸ ^e
آهن کل	mg kg ⁻¹	۱۸۲/۷۵ ^f	۲۹۳/۹۶ ^d	۸۳۱/۹۶ ^a	۸۷/۹۱ ^d	۱۲۹/۲۰ ^g	۴۶۰/۸۲ ^b
منگنز کل	mg kg ⁻¹	۲۷/۸۲ ^e	۵۸/۵۰ ^d	۱۸۸/۵۰ ^a	۱۳/۴۹ ^f	۲۵/۳۳ ^e	۱۴۶/۱۷ ^b
روی کل	mg kg ⁻¹	۸/۷۸ ^g	۳۵/۸۸ ^e	۵۰/۷۱ ^c	۵/۴۹ ^h	۲۳/۴۵ ^f	۶۲/۵۰ ^b
مس کل	mg kg ⁻¹	۳/۰۹ ^g	۴/۷۵ ^{ef}	۷/۳۸ ^d	۸/۳۹ ^f	۵/۰۸ ^e	۱۹/۵۵ ^a

در هر ردیف میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری (p ≤ ۰/۰۵) ندارند.

نتیجه‌گیری کلی

درصد کربن، نسبت‌های اتمی و آنالیز مادون‌قرمز زغال زیستی می‌تواند در پیش‌بینی ماندگاری کربن زغال زیستی در خاک‌ها مؤثر باشد. نتایج این پژوهش نشان داد زغال‌های زیستی ذرت و باگاس نیشکر تهیه‌شده در دمای ۵۰۰ و ۳۵۰ درجه سلسیوس (به‌ویژه زغال زیستی باگاس نیشکر) با درصد بالای کربن کل و کربن تثبیت شده و مقدار کم نسبت H/C و O/C و دارا بودن ترکیبات آروماتیک بیشتر، می‌توانند در ترسیب و انباشت طولانی مدت کربن در خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار مؤثر باشند. بر اساس نتایج این پژوهش زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس از هر دو زیست‌توده به‌ویژه بقایای ذرت به‌دلیل سطح ویژه بالا و حجم منافذ بیشتر احتمالاً می‌توانند در تثبیت آلاینده‌های آلی مؤثر باشند. درحالی‌که زغال‌های زیستی تهیه‌شده از هر دو زیست‌توده در دماهای ۲۰۰ و ۳۵۰ درجه سلسیوس، به‌دلیل CEC بالاتر و دارا بودن گروه‌های عامل سطحی اکسیژن‌دار و سطح ویژه کمتر به دلیل افزایش برهمکنش‌های یونی احتمالاً در تثبیت آلاینده‌های غیرآلی و همچنین جذب نیتروژن آمونیومی و جلوگیری از هدررفت آن در خاک مؤثرتر باشند. از میان زغال‌های زیستی بررسی شده، زغال زیستی بقایای ذرت تهیه‌شده در دمای ۲۰۰

درجه سلسیوس با pH اسیدی، دارا بودن گروه‌های عاملی اسیدی، CEC زیاد و EC نسبتاً پایین و دارا بودن غلظت نسبتاً بالایی از عناصر غذایی به‌ویژه فسفر و پتاسیم احتمالاً می‌تواند در بهبود ویژگی‌های شیمیایی و همچنین افزایش فراهمی عناصر غذایی در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک ایران سودمند باشد. از میان نمونه‌های باگاس نیشکر، زغال زیستی تهیه‌شده از باگاس نیشکر در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس از نظر ویژگی‌های شیمیایی جهت کاربرد در خاک-های آهکی و قلیایی مناسب‌ترین بود. اگرچه باید این را در نظر گرفت که نسبت بالای C/N آن ممکن است در کوتاه مدت قابلیت دسترسی به نیتروژن را محدود کند و احتمالاً استفاده از کودهای نیتروژنی به‌همراه آن جهت جلوگیری از آلی شدن نیتروژن توسط ریزجانداران خاک، لازم باشد. در صورت استفاده از زغال‌های زیستی بقایای ذرت و باگاس نیشکر تهیه‌شده در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس برای بهبود حاصلخیزی در خاک‌های قلیایی و آهکی باید pH نسبتاً بالای آن‌ها را در نظر گرفت و مدیریت نمود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که زغال‌های زیستی بقایای ذرت و باگاس نیشکر تهیه‌شده در دماهای ۲۰۰ و ۳۵۰ درجه سلسیوس می‌توانند در بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک و حاصلخیزی خاک سودمند باشند.

REFERENCES

- Afrasiabi B., Adhami E., and Owliaei H.R. (2017). Effect of biochar produced at different temperatures on cadmium availability in a calcareous soil under different moisture regims over time. *Journal of Water and Soil*. 31(3): 811-821. (In Farsi)
- Beheshti, M., Alikhani, H., Motesharezadeh, B. and Mohammadi, L. (2016). Quality variations of cow manure biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(2), 259-267. (In Farsi)
- Beheshti, M., Alikhani, H. (2016). Quality variations of biochar generated from wheat straw during slow pyrolysis process at different temperatures. *Water and Soil Science*. 26(2), 189-201. (In Farsi)
- Bird, M. I., McBeath, A. V., Ascough, P. L., Levchenko, V. A., Wurster, C. M., Munksgaard, N. C., Smernik, R. J. and Williams, A. (2017). Loss and gain of carbon during char degradation. *Soil Biology and Biochemistry*. 106, 80-89.
- 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.
- Dai, Zh., Xiaojie Zhang, X., Tang C., Muhammad N., Wu, J., Brookes, P. C. and Xu, J. (2017). Potential role of biochars in decreasing soil acidification - A critical review. *Science of the Total Environment*. 581, 601-611.
- 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.
- Fathi Gerdelidani, A., Mirseyed Hosseini, M. and Farahbakhsh, M. (2015). Some effects of spent mushroom compost and bagasse biochar on alkaline phosphatase activity and phosphorus availability in some calcareous soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 46(4), 801-812. (In Farsi)
- Gai, X., Wang, H., Liu, J., Zhai, L., Liu, S., Ren, T., and Liu, H. (2014). Effects of feedstock and pyrolysis temperature on biochar adsorption of ammonium and nitrate. *PloS one*. 9(12), 113888.
- Hamzenejad Taghliabad, R., and Sepehr, E. (2018). Heavy metals immobilization in contaminated soil by grape-pruning-residue biochar. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 46(8), 1041-1052.
- Ippolito, J. A., Ducey, T. F., Cantrell, K. B., Novak, J. M. and Lentz, R. D. (2016). Designer, acidic biochar influences calcareous soil characteristics. *Chemosphere*. 142, 184-191.
- Kloss, S., Zehetner, F., Dellantonio, A., Hamid, R., Ottner, F., Liedtke, V., Schwanninger, M., Gerzabek, M.H. and Soja, G. (2012). Characterization of slow pyrolysis biochars: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties. *Journal of Environmental Quality*. 41(4), 990-1000.
- 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. (2009). Introduction. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management, Science and Technology*. Earth scan, London.
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C. and Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota—a review. *Soil Biology and Biochemistry*. 43(9), 1812-1836.
- Lehmann, J. and Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. Routledge.
- Mandal, S., Donner, E., Vasileiadis, S., Skinner, W., Smith, E., 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.
- Najafi, G., Ghobadian, B., Tavakoli, T. and Yusaf, T. (2009). Potential of bioethanol production from agricultural wastes in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13(6-7), 1418-1427.
- Novak, J. M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J. W., Steiner, C., Das, K. C., Ahmedna, M., Rehrah, D., Watts, D. W., Busscher, W.J. and Schomberg, H. (2009). Characterization of design biochar produced at different temperatures and their effects on loamy sand. *Environmental Science*. 3, 195-206.
- Nguyen, B. and Lehmann, J. (2009). Black carbon decomposition under varying water regimes. *Organic Geochemistry* 40, 846- 853.
- 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.
- Rafiq, M. K., Bachmann, R. T., Rafiq, M. T., Shang, Z., Joseph, S. and Long, R. (2016). Influence of pyrolysis temperature on physico-chemical properties of corn stover (*Zea mays* L.) biochar and feasibility for carbon capture and energy balance. *PloS one*, 11(6), 0156894.
- Rehrah, D., Bansode, R. R., Hassan, O. and Ahmedna, M. (2016). Physico-chemical characterization of biochars from solid municipal waste for use in soil amendment. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 118, 42-53.
- Samavat. (2011). Role of oil organic matter in soil fertility. In: *The 1st Iranian Fertilizer Challenges Congress*, 1-3 March, Tehran, Iran. pp. 1-11. (In Farsi)
- Sheng, Y., Zhu, L., 2018. Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential

- across different soil pH. *Science of the Total Environment*. 622–623, 1391–1399.
- 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.
- Singh, B., Camps-Arbestain, M. and Lehmann, J. (Eds.). (2017). *Biochar: a guide to analytical methods*. Csiro Publishing.
- Singla, A., Dubey, S. K., Singh, A. and Inubushi, K. (2014). Effect of biogas digested slurry-based biochar on methane flux and methanogenic archaeal diversity in paddy soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 197, 278-287.
- 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.
- Wang, M., Zhu, Y., Cheng, L., Anderson, B., Zhao, X., Wang, D. and Ding, A. (2018). Review on utilization of biochar for metal-contaminated soil and sediment remediation. *Journal of Environmental Sciences*. 63, 156 – 173.
- Weber, K. and Quicker, P. 2018. Properties of biochar. *Fuel*. 217, 240-261.
- Yang, D. I. N. G., Yunguo, L. I. U., Shaobo, L. I. U., Huang, X., Zhongwu, L. I., Xiaofei, T. A. N., Guangming Z. E. N. G. and Lu, Z. H. O. U. (2017). Potential Benefits of Biochar in Agricultural Soils: A Review. *Pedosphere*. 27(4), 645-661.
- 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.
- Zheng, H., Wang, Z., Deng, X., & Xing, B. (2013). Impact of pyrolysis temperature on nutrient properties of biochar. In *Functions of Natural Organic Matter in Changing Environment* (pp. 975-978). Springer, Dordrecht.
- Zhu, X., Chen, B., Zhu, L. and Xing, B. (2017). Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review. *Environmental Pollution*. 227: 98-115.