

تأثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی زغال زیستی

مینا عالی پور بآبادی^۱، عبدالامیر معزی^{۲*}، مجتبی نوروزی مصیر^۳، عطااله خادم الرسول^۴

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد شیمی و حاصلخیزی خاک، گروه خاکشناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- دانشیار گروه خاکشناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- استادیار گروه خاکشناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۴- استادیار گروه خاکشناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۸/۲۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۸/۳۰)

چکیده

فرآوری پسماندهای آلی و بازگشت آنها به خاک، کمک شایانی به کشاورزی پایدار می‌نماید. زغال زیستی (Biochar) حاصل از فرایند گرماکافت (Pyrolysis) پسماندهای آلی است. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی زغال زیستی به‌طور معنی‌داری متأثر از ویژگی‌های زیتوده اولیه و نیز دمای فرایند گرماکافت می‌باشد. لذا این پژوهش جهت ارزیابی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی زغال زیستی حاصل از باگاس نیشکر، کاه برنج، خاک اره و برگ درخت کنوکارپوس که در دمای گرماکافت ۴۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد فراوری شدند، اجرا شد. تیمارها در آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار اعمال شدند. نتایج نشان داد که در هر دو گروه، تیمارها به‌طور جداگانه و نیز اثر متقابل آنها بر میزان pH، هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی، سطح ویژه، نسبت C/N، غلظت کل عناصر غذایی، کاتیون‌های ریز-مغذی و نیز سرب در زغال‌های زیستی، تأثیر متفاوت و معنی‌داری داشتند. افزایش دمای گرماکافت از ۴۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد سبب کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی زغال زیستی حاصل از باگاس نیشکر، کاه برنج، خاک اره و برگ کنوکارپوس به ترتیب به میزان ۱۵۳/۳، ۲۴۱/۱، ۲۸۳/۹ و ۲۱/۲ سانتی‌مول بر کیلوگرم شد. ولی افزایش دمای گرماکافت از ۴۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش سطح ویژه زغال زیستی باگاس نیشکر، کاه برنج، خاک اره و برگ کنوکارپوس به ترتیب به میزان ۱۵۳/۳، ۲۴۱/۱، ۲۸۳/۹ و ۲۱/۲ مترمربع بر گرم شد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان کاربرد زغال‌های زیستی تولیدشده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد را به ترتیب اولویت زغال زیستی حاصل از برگ کنوکارپوس، کاه برنج، باگاس نیشکر و خاک اره برای افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و بهبود ذخیره عناصر غذایی قابل دسترس پیشنهاد کرد.

واژه‌های کلیدی: درجه حرارت گرماکافت، زغال زیستی، زیتوده، کشاورزی پایدار، ویژگی‌های شیمیایی

مقدمه

پسماندهای آلی، از عوامل مهم در دستیابی به اهداف کشاورزی پایدار می‌باشد (Yousefi *et al.*, 2007). بنابراین فرآوری این پسماندهای آلی و استفاده مجدد از آنها می‌تواند راهکار مناسبی جهت توسعه کشاورزی پایدار باشد. از جمله فرایندهایی که در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران واقع شده است، فرایند گرماکافت^۱ می‌باشد که به کمک آن می‌توان پسماندهای آلی را به زغال زیستی^۲ تبدیل نمود. زغال زیستی ماده جامد غنی از کربن است که طی فرایند گرماکافت زیتوده در شرایط عدم حضور و یا حضور جزئی اکسیژن تولید می‌شود (Lehmann, 2007). مطالعات نشان می‌دهد که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال زیستی به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر عواملی

ازدیاد روزافزون جمعیت و به تبع آن افزایش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی می‌تواند سبب تولید انبوه پسماندهای آلی در مزارع شود. افزایش این پسماندها می‌تواند پیامدهای زیان‌بار بسیاری برای سلامتی محیط‌زیست ایجاد کند (Hameed *et al.*, 2007). یکی از رویه‌های نامناسب، به ویژه در کشورهای توسعه نیافته و در حال توسعه، سوزاندن پسماندهای آلی و بقایای گیاهی در مزارع است که در دراز مدت سبب تخریب ساختمان خاک از طریق حذف مواد آلی و فعالیت ریزجانداران شده که نتیجه آن کاهش نفوذپذیری و افزایش پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک می‌باشد (Hooker *et al.*, 1982). مدیریت صحیح این

1 . Pyrolysis
2 . Biochar

* نویسنده مسئول: Moezzi251@Gmail.com

نازک آلومینیومی قابل تعویض و با ابعاد متناسب با محفظه‌ی کوره قرار داده شد. نمونه‌ها توسط وزنه‌ی ۱۰ کیلوگرمی جهت تخلیه‌ی هوا کاملاً فشرده شدند و بعد از پوشاندن کامل مواد درون جعبه توسط ورقه آلومینیومی، درب جعبه محکم بسته شده و درون کوره الکتریکی Muffle Furnac مدل SEF-101 ساخت شرکت FINE TECH قرار داده شد. فرایند گرماکافت نمونه‌ها در کوره در سه سطح دمایی ۴۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، با نرخ افزایش دمای ۷ درجه سانتی‌گراد در دقیقه و به مدت ۲ ساعت در دماهای مذکور حرارت دیدند و پس از سرد شدن کامل، جعبه از کوره خارج شد. این تحقیق به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام شد. pH و هدایت الکتریکی زغال زیستی با استفاده از عصاره ۱:۱۰ زغال زیستی به آب مقطر اندازه‌گیری شد (ASTM, 2009^۱). جهت اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی زغال زیستی، ابتدا نمونه با محلول اسنات آمونیوم ۱ مولار (pH=7) اشباع شده، سپس مجموع غلظت کاتیون‌های قابل تبادل که معرف ظرفیت تبادل کاتیونی زغال زیستی می‌باشد، با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Savantaa GBC اندازه‌گیری شد (Herbert et al., 2012). میزان کل کربن، نیتروژن، هیدروژن و گوگرد نمونه‌ها با استفاده از دستگاه آنالیز عنصری CHNSO مدل VarioELIII اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری غلظت کل عناصر کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، فسفر، عناصر ریزمغذی و نیز عناصر سنگین کادمیم و سرب زغال زیستی، به روش هضم با محلول اسید نیتریک ۵ نرمال انجام شد (USEPA, 1994^۲). میزان قابل دسترس عناصر ریزمغذی، کادمیم و سرب زغال زیستی نیز با محلول^۳ DTPA (pH=7/3) عصاره‌گیری شد. سپس غلظت کلسیم و منیزیم با روش تیتراسیون با ورسین (EDTA)، سدیم و پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر مدل 410 ساخت شرکت sherwood و فسفر کل به روش رنگ‌سنجی اندازه‌گیری شد (Singh et al., 2010). غلظت قابل دسترس و کل عناصر ریزمغذی، سرب و کادمیم زغال زیستی با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Savantaa GBC تعیین شد (Gaskin et al., 2008). جهت تعیین گروه‌های عاملی زغال زیستی به روش طیف‌سنجی مادون قرمز از دستگاه طیف‌سنج^۴ FTIR مدل Bomem 450 استفاده شد. همچنین اندازه‌گیری سطح ویژه زغال زیستی به روش

نظیر درجه حرارت فرایند گرماکافت و نیز نوع زیتوده تغییر می‌کند (Demirbas., 2004; Gaskin et al., 2008; Downie et al., 2009; Hossain et al., 2011 and Bruun et al., 2012). افزایش درجه حرارت فرایند گرماکافت، ترکیبات فرار (هیدروژن و اکسیژن) موجود در زغال زیستی کاهش یافته (Chan and Xu., 2009)، سطح ویژه و محتوای خاکستر نمونه افزایش ولی میزان گروه‌های عاملی سطحی زغال زیستی که منجر به بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی آن می‌شوند، کاهش می‌یابند (Guo and Rockstraw, 2007). Claoston et al. (2014) گزارش دادند که تخلخل و سطح ویژه زغال زیستی حاصل از ضایعات مرکبات و کاه برنج با افزایش درجه حرارت فرایند گرماکافت، افزایش می‌یابد. زغال زیستی تولیدی در دماهای کم (۲۵۰-۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) حاوی گروه‌های عاملی C=O و C-H خطی بیشتری است که می‌توانند سطوح تبادل عناصر غذایی را فراهم کنند (Glaser et al., 2002). Liu et al. (2014) دریافته‌اند که افزایش دمای گرماکافت (۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) سبب کاهش غلظت کل نیتروژن، گوگرد و هیدروژن موجود در زغال زیستی حاصل از لجن فاضلاب شد ولی میزان کربن، فسفر و پتاسیم کل آن افزایش یافت. Sohi et al. (2010) گزارش دادند که تفاوت در نوع زیتوده سبب ایجاد اختلاف معنی‌داری در میزان سطح ویژه، منافذ و گروه‌های عاملی در زغال زیستی می‌شود که این عوامل، ویژگی‌های جذبی زغال زیستی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. Sun et al. (2011) گزارش دادند که زغال زیستی حاصل از کود مرغی، سطح ویژه و تخلخل بیشتری نسبت به زغال زیستی حاصل از کاه گندم داشت با وجود اینکه هر دو زغال زیستی تولیدی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بودند. بنابراین ویژگی‌های مختلف زغال زیستی به شدت تحت تأثیر ماهیت ماده اولیه و نیز درجه حرارت فرایند گرماکافت قرار دارد. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر نوع زیتوده و درجه حرارت‌های مختلف فرایند گرماکافت جهت انتخاب زغال زیستی با بالاترین قابلیت جذب و تبادل یونی انجام شد.

مواد و روشها

این تحقیق در زمستان سال ۱۳۹۴ در دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. به منظور تولید زغال زیستی از چهار نوع زیتوده از منابع آلی مختلف شامل: باگاس نیشکر، کاه برنج، خاک اره چوب و برگ درخت کنوکارپوس (*Conocarpus erectus*) استفاده شد. زیتوده‌ها در فضای آزاد هوا خشک شدند. پس از آن به منظور تولید زغال زیستی، نمونه‌ها درون جعبه‌ی فلزی از جنس آهن گالوانیزه با آستر ورقه

1. ASTM Standard Method, 2009

2. USEPA Standard Method, 1994

3. Diethylene Triamine Pentaacetic Acid

4. Fourier Transform Infrared (FTIR)

منافذ سطحی نسبت به زغال زیستی تهیه شده در دو دمای کمتر افزایش یافت (شکل ۲ الف-۳). ایجاد ساختار حفره‌ای در سطح زغال زیستی، می‌تواند حاصل از افزایش فرایند تبخیر (Se *et al.*, 2011) و خروج ترکیبات فرار از زغال زیستی و به جا ماندن فضای خالی آنها باشد که در نهایت سبب افزایش سطح ویژه زغال زیستی می‌شود (جدول ۲). با توجه به جدول (۲)، سطح ویژه زغال‌های زیستی حاصل از زیتوده‌های کاه برنج، خاک اره و برگ کنوکارپوس در اثر افزایش دمای گرماکافت و نیز به دلیل افزایش تخلخل درون زغال‌های زیستی (شکل ۲)، روند مشابهی مانند زغال زیستی حاصل از باگاس نیشکر داشتند. ولی تأثیر افزایش دما بر سطح ویژه (جدول ۲) و تخلخل (شکل ۲) زغال‌های زیستی حاصل از برگ کنوکارپوس بسیار کمتر از تأثیر افزایش دما بر سطح ویژه و تخلخل زغال زیستی حاصل از سایر زیتوده‌ها بود. افزایش دما منجر به افزایش محدود ناهمواری‌های سطحی در زغال زیستی حاصل از برگ کنوکارپوس شد که سطح ویژه کوچک این ماده را توجیه می‌نماید (جدول ۲).

تاثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر طیف مادون‌قرمز زغال‌های زیستی

طیف‌های تهیه‌شده به روش طیف‌سنجی مادون‌قرمز از نمونه‌ها نشان می‌دهد که زغال‌های زیستی تولیدی در دمای مختلف، شامل مجموعه‌ای از پیک‌هایی در محدوده (875 cm^{-1}) ، $(1440 - 1465 \text{ cm}^{-1})$ ، $(1030 - 1300 \text{ cm}^{-1})$ ، $(1475 - 1630 \text{ cm}^{-1})$ ، $(1720 - 1750 \text{ cm}^{-1})$ و $(2850 - 3500 \text{ cm}^{-1})$ می‌باشد که به ترتیب مربوط به حضور گروه‌های عاملی C-H خطی^۳ (آلکان)، C-O-C خطی (اسیدهای کربوکسیلیک)، C-O (الکل‌ها)، C-H₂ (متیلن)، C=C (آلکن)، C=O (کربونیل)، C-H حلقوی^۴ (آلکن) و O-H (فنول) می‌باشد (Cantrell *et al.*, 2012؛ Pavia *et al.*, 2013).

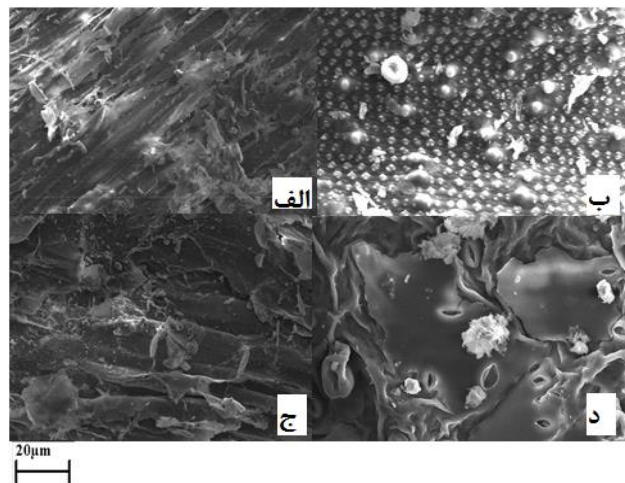
زغال زیستی حاصل از باگاس تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۳ الف-۳) در محدوده حضور گروه‌های عاملی C-H خطی، C-O-C خطی، C-O، C=C و C-H حلقوی پیک‌های نسبتاً قوی از خود نشان داد. همچنین با افزایش دمای گرماکافت از ۴۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، پیک‌های حاصل از گروه‌های عاملی C-H خطی، C-O-C خطی و C-O تضعیف شده و تنها پیک‌های حاصل از گروه‌های عاملی C-H₂ و C-H حلقوی در زغال زیستی حاصل از باگاس باقی ماند. با افزایش درجه

BET^۱ و با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سطح ویژه مدل Nano Sord انجام شد. به منظور بررسی مورفولوژی سطح زغال زیستی و نیز نحوه توزیع منافذ آن، تصاویر میکروسکوپی با استفاده از دستگاه SEM^۲ (میکروسکوپ الکترونی روبشی) مدل VP 1455 تهیه شد. تجزیه و تحلیل آماری نتایج به کمک نرم‌افزار SPSS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

تاثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) زغال‌های زیستی

شکل (۱) تصاویر تهیه شده از سطح زیتوده‌های اولیه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در سطح زیتوده‌های اولیه قبل از اعمال فرایند گرماکافت هیچگونه منفذ یا حفره‌ای وجود ندارد. سپس فرایند گرماکافت، با ایجاد منافذ بسیاری در سطح زغال زیستی، به طور قابل ملاحظه‌ای سبب تغییر شکل سطحی آن شد (شکل ۲).



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از زیتوده‌های اولیه (الف) باگاس نیشکر، (ب) کاه برنج، (ج) خاک اره و (د) برگ کنوکارپوس (بزرگنمایی تصاویر ۲۰ میکرومتر می‌باشد)

همان‌گونه که در شکل (۲ الف-۱) مشاهده می‌شود زغال زیستی حاصل از باگاس نیشکر دارای ساختار شبکه مانند بوده و سطح ناهمواری دارد. با افزایش دمای گرماکافت به ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، تشکیل منافذ مختلفی در سطح آن قابل رویت شد (شکل ۲ الف-۲). به همین ترتیب در زغال زیستی حاصل از باگاس نیشکر در دمای گرماکافت ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز

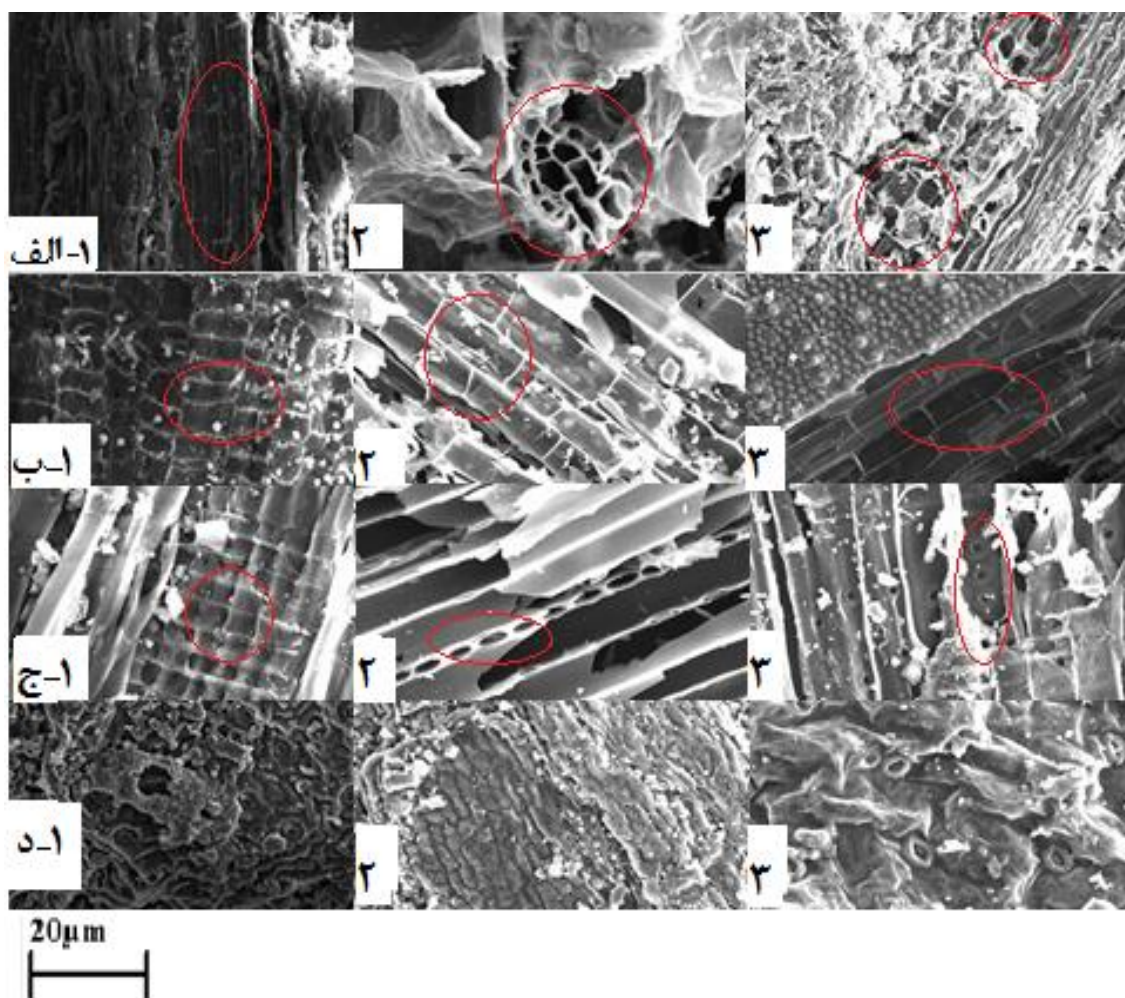
3 . Aliphatic
4 . Aromatic

1. Brunauer-Emmett-Teller
2. Scanning Electron Microscopy

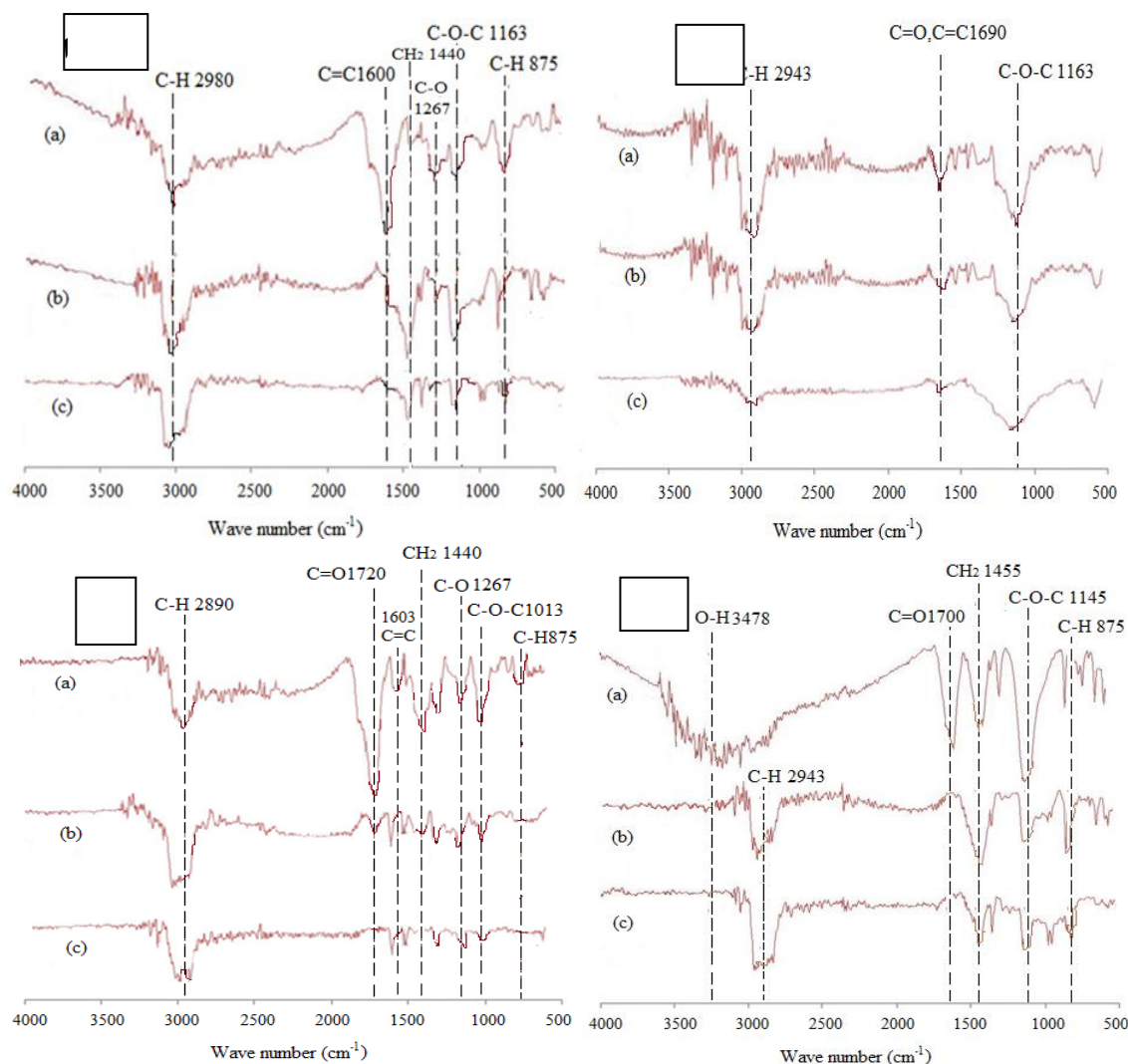
لیگنینی زیتوده اولیه در اثر حرارت می‌تواند منجر به کاهش گروه‌های عاملی قطبی مانند C-H₂، C-O و C=O و نیز افزایش ساختارهای حلقوی کربن در زغال زیستی شود. در زغال زیستی کنوکارپوس تهیه شده در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۳-د-ا) یک پیک نسبتاً قوی در ناحیه (۳۵۰۰-۳۲۰۰ cm⁻¹) مربوط به گروه عاملی O-H فنولی دیده می‌شود که با افزایش دمای گرماکافت به ۷۰۰ درجه (شکل ۳-د-ب) کاملاً از بین رفته و تنها گروه‌های عاملی C-H حلقوی، C-H₂ و C-O-C در سطح نمونه باقی ماند. این نتایج با یافته‌های Yuan *et al.* (2010) مطابقت دارد. آنان دریافتند که گروه‌های عاملی C-H خطی، C-O-C خطی (اسیدهای کربوکسیلیک) و C=O (کربونیل) موجود در سطح زغال زیستی حاصل از ساقه‌ی برنج در دمای پایین (۳۰۰ درجه سانتی‌گراد)، با افزایش دما به ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد کاملاً از بین رفته ولی ترکیبات حلقوی کربن در نمونه باقی می‌ماند.

حرارت فرایند گرماکافت ساختارهای خطی کربن و نیز اکثر گروه‌های عاملی قطبی (C=O و C=C) در اثر دهیدراته شدن از بین رفته و تنها ساختارهای تغییر شکل یافته C-H و یا کربن باقی ماند. احتمالاً طی فرایند گرماکافت با تأثیر افزایش دما، پیوندهای هیدروژنی موجود در گروه‌های عاملی هیدروکسیلی و هیدروکربن‌ها (Chen *et al.*, 2008) تجزیه و تخریب شده که سبب پیشرفت فرایند کربنی شدن زغال زیستی شدند.

در نمونه زغال زیستی کاه برنج (شکل ۳-ب) و خاک اره (شکل ۳-ج) نیز با افزایش دمای گرماکافت از ۴۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب گروه‌های عاملی C-H خطی، C-O-C خطی، C=O، C=C و کربن حلقوی کاهش یافته و تنها گروه عاملی C-H حلقوی در زغال زیستی حاصل از هر دو زیتوده و گروه عاملی C-O-C در زغال زیستی کاه برنج، پیک نسبتاً قوی از خود نشان دادند. تخریب ساختارهای سلولزی و



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از زغال‌های زیستی الف) باگاس نیشکر، ب) کاه برنج، ج) خاک اره چوب و د) برگ کنوکارپوس در دمای گرماکافت ۱) ۴۰۰، ۲) ۷۰۰ و ۳) ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد (بزرگنمایی تصاویر ۲۰ میکرومتر می‌باشد)



شکل ۳. طیف‌های تهیه شده به روش (FTIR) مربوط به زغال‌های زیستی الف) باگاس نیشکر، ب) کاه برنج، ج) خاک اره چوب و د) برگ کنوکارپوس در دمای گرماکافت (a- ۴۰۰، b- ۷۰۰ و c) ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد

داری (در سطح ۵ درصد) بر pH، هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی، سطح ویژه و نیز نسبت کربن کل به نیتروژن کل (C/N) زغال‌های زیستی مختلف داشت (جدول ۱).

تأثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر برخی ویژگی‌های زغال‌های زیستی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر تیمارها نشان داد که دمای فرایند گرماکافت، نوع زیتوده و اثرات متقابل آنها تأثیر معنی-

جدول ۱. تجزیه واریانس تأثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر برخی ویژگی‌های زغال‌های زیستی

میانگین مربعات		درجه آزادی		منابع تغییرات	
C/N	سطح ویژه	ظرفیت تبادل کاتیونی	قابلیت هدایت الکتریکی	pH	
۵۷۶۲/۳*	۵۱۸۵۸/۰*	۶۰۱۶/۳*	۲۰/۴۵۳*	۱/۲*	۳ نوع زیتوده (A)
۴۰۱۰/۱*	۱۰۰۰۶۵/۹*	۴۳۰۲/۶*	۰/۱۸۵*	۱۰/۷*	۲ دمای گرماکافت (B)
۳۶۳/۴*	۱۵۰۳۳/۶*	۶۷۶/۳*	۰/۰۳۲*	۰/۸*	۱۱ اثر متقابل A*B
۲/۹	۲۸/۴	۱۹/۵	۰/۰۰۸	۰/۱	۲۴ خطای آزمایشی
					۳۶ کل

* وجود تفاوت معنی‌دار

نسبی عناصر گرماکافت نشده^۱ در زیتوده اولیه و نیز تشکیل اکسیدهای بازی در سطح زغال زیستی تحت فرایند گرماکافت در دمای بالا بستگی دارد. قابلیت هدایت الکتریکی زغال‌های زیستی حاصل از زیتوده‌های مختلف، با افزایش دمای گرماکافت از ۴۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به صورت معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۲). افزایش هدایت الکتریکی می‌تواند در نتیجه کاهش مواد فرار طی افزایش دمای فرایند گرماکافت اتفاق افتد که بستگی به غلظت نسبی نمک‌های محلول موجود در بخش خاکستر زغال زیستی دارد. به عبارتی هرچه غلظت کل عناصر موجود زغال زیستی بیشتر باشد، میزان هدایت الکتریکی بیشتر می‌شود (Gaskin et al., 2008). این امر با نتایج حاصل از اندازه‌گیری عناصر غذایی مختلف زغال‌های زیستی (جدول ۳) مطابقت دارد.

نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که میزان pH زغال‌های زیستی با افزایش درجه حرارت فرایند گرماکافت به صورت معنی‌داری افزایش یافت. با افزایش درجه حرارت فرایند گرماکافت از ۴۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، pH زغال‌های زیستی باگاس نیشکر، کاه برنج، خاک اره و کنوکارپوس به ترتیب به میزان ۱۸، ۱۳/۳، ۲۲/۴ و ۲۸ درصد افزایش یافت. بیشترین میزان pH (۱۱/۴۲) در زغال زیستی حاصل از کنوکارپوس تهیه شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد (جدول ۲). افزایش pH زغال زیستی می‌تواند در نتیجه افزایش مجموع غلظت عناصر بازی (کلسیم، پتاسیم، سدیم و منیزیم) موجود در زغال زیستی (جدول ۳) در دمای گرماکافت بالا رخ دهد. میزان pH زغال زیستی تا حد زیادی وابسته به نوع زیتوده اولیه و نیز دمای فرایند گرماکافت می‌باشد. این نتایج با یافته‌های (Novak et al. 2014) مطابقت دارد. (2009)al اظهار نمودند که افزایش pH زغال زیستی به غلظت

1 . Non-pyrolyzed

جدول ۲. میانگین تأثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر برخی ویژگی‌های زغال‌های زیستی

نوع زغال زیستی	دمای گرماکافت (درجه سانتی‌گراد)	pH	قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بر کیلوگرم)	سطح ویژه (مترمربع بر گرم)	C/N
باگاس نیشکر	۴۰۰	۹/۴۳ ^d	۰/۵۱ ^f	۸۷/۳۷ ^c	۲/۶۸ ^h	۶۹/۲۵ ^e
	۷۰۰	۱۰/۵۰ ^{bc}	۰/۵۶ ^f	۷۰/۴۰ ^d	۷۵/۴۷ ^e	۸۲/۱۳ ^d
	۹۰۰	۱۱/۱۰ ^{ab}	۰/۵۹ ^f	۵۱/۳۰ ^e	۱۵۶/۰۱ ^d	۱۰۳/۱۹ ^b
کاه برنج	۴۰۰	۹/۰۰ ^d	۲/۲۸ ^e	۱۱۳/۴۳ ^b	۲/۵۷ ^h	۳۸/۷۸ ⁱ
	۷۰۰	۱۰/۲ ^c	۲/۵۲ ^d	۹۲/۶۴ ^c	۲۲۵/۱۸ ^c	۵۱/۲۷ ^g
	۹۰۰	۱۰/۵ ^{bc}	۲/۸۰ ^c	۳۹/۵۰ ^f	۲۴۳/۷۰ ^b	۶۵/۶۹ ^f
خاک اره چوب	۴۰۰	۸/۹۳ ^d	۰/۳۲ ^h	۶۰/۴۱ ^e	۰/۸۱ ^h	۴۲/۵۶ ^h
	۷۰۰	۹/۰۹ ^d	۰/۳۵ ^{gh}	۵۳/۵۰ ^e	۲۵۲/۴۲ ^b	۸۷/۲۹ ^c
	۹۰۰	۱۰/۹۰ ^{ab}	۰/۵۰ ^{fg}	۳۸/۵۷ ^f	۲۸۴/۷۲ ^a	۱۰۹/۵۷ ^a
کنوکارپوس	۴۰۰	۸/۹۰ ^d	۳/۳۰ ^b	۱۳۱/۱۴ ^a	۳/۲۴ ^h	۱۹/۶۹ ^k
	۷۰۰	۱۱/۰۸ ^{ab}	۳/۳۸ ^b	۱۱۵/۰۰ ^b	۱۵/۱۹ ^g	۳۴/۴۶ ^j
	۹۰۰	۱۱/۴۲ ^a	۳/۶۰ ^a	۹۳/۴۷ ^c	۲۴/۴۸ ^f	۳۸/۵۲ ⁱ

در هر ستون تیمارهایی که دارای حروف یکسان اند اختلاف معنی‌دار ندارند

درصد کاهش یافت. با توجه به داده‌های جدول (۲) بیشترین میزان ظرفیت تبادل کاتیونی (۱۳۱/۱۴ سانتی‌مول بر کیلوگرم) مربوط به نمونه زغال زیستی کنوکارپوس تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بود. دلیل این امر می‌تواند حضور گروه عاملی فنول (-OH) در این نمونه باشد (شکل ۳-۵). با توجه به نتایج طیف‌سنجی مادون‌قرمز زغال‌های زیستی، حضور گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار نظیر فنول، هیدروکسیل، کربوکسیلیک و کربونیل می‌تواند عامل افزایش بار منفی سطحی و در نهایت افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی زغال زیستی شود. کاهش

ظرفیت تبادل کاتیونی (Xue et al. 2012) دریافتند که افزایش درجه حرارت گرماکافت (از ۳۰۰ به ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد)، سبب افزایش معنی‌دار pH و هدایت الکتریکی زغال زیستی حاصل از کود حیوانی شد. با توجه به جدول (۲)، با افزایش درجه حرارت فرایند گرماکافت، ظرفیت تبادل کاتیونی تمامی زغال‌های زیستی به صورت معنی‌داری کاهش یافت. به طور کلی با افزایش دما از ۴۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، ظرفیت تبادل کاتیونی زغال‌های زیستی باگاس نیشکر، کاه برنج، خاک اره و کنوکارپوس به ترتیب به میزان ۴۱/۲، ۶۵/۱، ۳۶/۱ و ۲۸/۷

داشت. افزایش درجه حرارت فرایند گرماکافت و نوع زیتوده تأثیر معنی‌داری بر افزایش غلظت کل کربن داشت (شکل ۴). بیشترین مقدار کربن، در زغال زیستی حاصل از خاک اره تهیه شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. این میزان کربن موجود در زغال زیستی حاصل از خاک اره می‌تواند به دلیل وجود ترکیبات لیگنینی، سلولزی و همی‌سلولزی فراوان با درصد کربن بالا در زیتوده خاک اره باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از زغال زیستی حاصل از خاک اره (شکل ۲) نیز حاکی از این بود که این نمونه دارای ساختارهای حفره‌ای و منافذ سطحی بسیاری بوده که احتمالاً حاصل دهیدراته شدن ترکیبات سلولزی موجود در آن بوده است. همچنین با توجه به نتایج جدول (۲)، بیشترین میزان سطح ویژه (۲۸۴/۷۲) مترمربع بر گرم) در زغال زیستی خاک اره تولید شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شد که نتایج فوق را تأیید می‌نماید. با توجه به نتایج بدست آمده، محتوای کربن که بیشترین ترکیب تشکیل دهنده زغال زیستی است، با افزایش درجه حرارت فرایند گرماکافت افزایش یافت. با توجه به طیف مادون قرمز تهیه شده از زغال‌های زیستی، این فرایند می‌تواند به دنبال افزایش درجه کربنی شدن در دمای بالا (۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) و افزایش ساختارهای حلقوی کربن رخ دهد (شکل ۳). افزایش درجه حرارت فرایند گرماکافت، به‌طور معنی‌داری سبب کاهش میزان نیتروژن (شکل ۵)، هیدروژن و گوگرد کل (جدول ۴) زغال‌های زیستی حاصل از زیتوده‌های مختلف شد. بیشترین میزان نیتروژن، هیدروژن و گوگرد به ترتیب در زغال زیستی حاصل از کنوکارپوس، باگاس نیشکر و کنوکارپوس تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. کمترین میزان نیتروژن، در زغال زیستی حاصل از باگاس نیشکر تهیه شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین میزان هیدروژن و گوگرد نیز در زغال زیستی حاصل از خاک اره تهیه شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد.

ظرفیت تبادل کاتیونی طی افزایش دمای فرایند گرماکافت می‌تواند در نتیجه اکسیداسیون ترکیبات کربنی و نیز کاهش گروه‌های عاملی کربوکسیلیک در زغال‌های زیستی باشد (Liang et al., 2006). در مطالعه مشابهی (Asif Naem et al., 2014) دریافتند که با افزایش دمای گرماکافت از ۳۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد میزان pH و هدایت الکتریکی زغال زیستی حاصل از کاه برنج و گندم افزایش و ظرفیت تبادل کاتیونی آنها کاهش یافت. با توجه به جدول (۲)، سطح ویژه زغال‌های زیستی حاصل از زیتوده‌های مختلف در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نشان ندادند. ولی در دمای گرماکافت ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، سطح ویژه زغال‌های زیستی حاصل از هر چهار نوع زیتوده با یکدیگر تفاوت معنی‌داری داشتند. افزایش دمای گرماکافت از ۷۰۰ به ۴۰۰ و از ۷۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، موجب افزایش معنی‌دار سطح ویژه زغال زیستی حاصل از هر یک از زیتوده‌های اولیه شد. در واقع میزان سطح ویژه زغال زیستی متأثر از نوع زیتوده و همچنین دمای گرماکافت بود. با افزایش دمای گرماکافت از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، سطح ویژه زغال زیستی باگاس نیشکر، کاه برنج، خاک اره و کنوکارپوس به ترتیب به میزان ۱/۱۵۳/۳، ۱/۲۴۱/۱، ۲۸۳/۹ و ۲۱/۲ مترمربع بر گرم افزایش داشت. احتمالاً دلیل این امر می‌تواند تسریع فرایند تبخیر ترکیبات آلی در دمای بیش از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد که منجر به تغییرات شدید در شرایط منافذ زغال زیستی و تشکیل منافذ بیشتر در سطح (شکل ۲) و در نتیجه سبب افزایش سطح ویژه می‌شود. نتایج حاصل از مطالعه‌ی (Claoston et al., 2014) و (Jindo et al., 2014) با نتایج فوق مطابقت داشت.

تاثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر غلظت برخی عناصر در زغال‌های زیستی

با توجه به جدول (۳)، دمای گرماکافت، نوع زیتوده و اثرات متقابل آنها تاثیر معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) بر غلظت کل عناصر غذایی و نیز سرب موجود در زغال‌های زیستی تولید شده

جدول ۳. تجزیه واریانس تأثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر غلظت کل عناصر در زغال‌های زیستی

میانگین مربعات													درجه آزادی	منابع تغییرات	
سرب	مس	روی	منگنز	آهن	فسفر	پتاسیم	سدیم	منیزیم	کلسیم	گوگرد	هیدروژن	نیتروژن	کربن		
۱۹۸/۰۶*	۱۴۹/۸*	۲۸۷۰۲/۵*	۲۷۸۰۴/۶*	۳۴۴۰۴/۰*	۱۱۷/۹۱۹*	۴۵/۱۷۰۰*	۵/۰۱۰*	۸/۷*	۴۳/۷۲۶۱*	۱۶/۸۴۴۰*	۳/۸۱۲*	۱/۷۴۹۱*	۱۹۲۳/۱۲*	۳	نوع زیتوده (A)
۴۳/۳*	۶۰/۶*	۷۲۹۹۸/۸*	۶۰۰۵/۶*	۷۷۶۰/۳*	۴۵/۶۱۰*	۲/۴۸۸۹*	۲/۴۰۰*	۳/۵*	۷/۶۳۱۱*	۰/۵۲۵۱*	۴۵/۷۱۰*	۰/۵۵۶۴*	۲۶۳/۰۰۲*	۲	دمای گرماکافت (B)
۱۴/۳*	۲/۴*	۸۲۸۳/۷*	۱۲۴۷/۴*	۸۶۳/۴*	۳/۷۰۰*	۰/۲۳۳۱*	۰/۰۶۰۰*	۰/۵۵۲۲*	۰/۰۹۹۹*	۰/۰۳۲۰*	۰/۵۴۴*	۰/۱۲۳۰*	۷۱/۳۳۵*	۱۱	اثر متقابل A*B
۰/۴	۰/۳	۱۴۶/۸	۱۸/۵	۷/۷	۰/۰۳۵	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱	۲۴	خطای آزمایشی
														۳۶	کل

* وجود تفاوت معنی‌دار

جدول ۴. میانگین تأثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر غلظت کل عناصر در زغال‌های زیستی

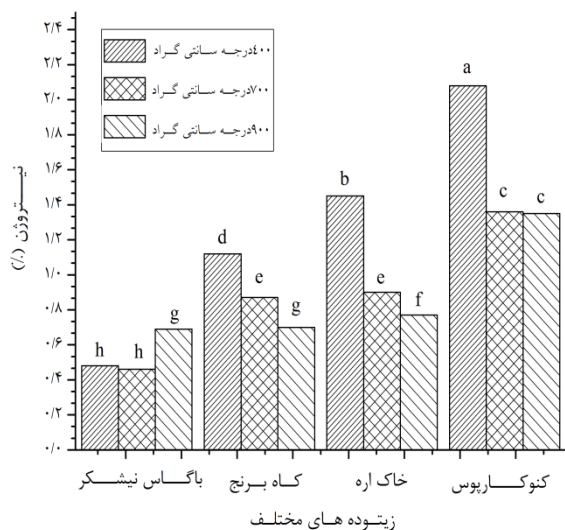
عنصر	باگاس نیشکر			کاه برنج			خاک اره چوب			کنوکارپوس		
	۴۰۰	۷۰۰	۹۰۰	۴۰۰	۷۰۰	۹۰۰	۴۰۰	۷۰۰	۹۰۰	۴۰۰	۷۰۰	۹۰۰
	هیدروژن (%)	۵/۴۰ ^a	۲/۲۸ ^c	۰/۸۰ ^b	۴/۶۳ ^b	۱/۹۳ ^f	۰/۵۱ ^j	۳/۶۳ ^c	۱/۶۱ ^e	۰/۱۵ ^l	۳/۱۹ ^d	۰/۶۱ ⁱ
گوگرد (%)	۱/۶۶ ^d	۱/۱۹ ⁱ	۱/۰۵ ^k	۱/۵۷ ^c	۱/۳۷ ^e	۱/۲۹ ^h	۱/۴۳ ^f	۱/۱۰ ^j	۱/۰۲ ^k	۴/۱۹ ^a	۴/۱۳ ^b	۳/۷۶ ^c
کلسیم (%)	۵/۰۴ ⁱ	۵/۶۸ ^e	۶/۷۵ ^d	۵/۴۸ ^b	۶/۲۵ ^f	۷/۳۶ ^c	۱/۵۳ ^l	۲/۳۱ ^k	۲/۸۴ ^f	۶/۴۳ ^c	۷/۳۹ ^b	۷/۹۲ ^a
منیزیم (%)	۱/۲۶ ⁱ	۲/۷۹ ^d	۳/۵۴ ^a	۱/۵۹ ^h	۱/۹۳ ^e	۲/۲۸ ^f	۰/۴۳ ^l	۰/۷۱ ^k	۰/۹۵ ^l	۲/۵۶ ^c	۲/۹۱ ^c	۳/۴۳ ^b
سدیم (%)	۱/۵۱ ^h	۱/۸۶ ^f	۲/۰۹ ^e	۲/۰۸ ^c	۲/۷۹ ^c	۳/۱۶ ^a	۰/۵۸ ^k	۱/۰۴ ^j	۱/۲۹ ⁱ	۱/۷۲ ^b	۲/۴۷ ^d	۲/۹۳ ^b
پتاسیم (%)	۵/۱۴ ^h	۵/۸۶ ^f	۶/۳۵ ^c	۶/۲۸ ^d	۶/۷۲ ^b	۶/۹۴ ^a	۱/۴۱ ⁱ	۱/۶۳ ^k	۱/۶۹ ^j	۴/۵۷ ⁱ	۵/۳۶ ^e	۶/۰۱ ^c
فسفر (%)	۵/۹۳ ^f	۹/۵۴ ^b	۱۱/۳۷ ^a	۴/۴۰ ^b	۷/۳۳ ^c	۹/۲۰ ^c	۰/۱۲ ^l	۰/۴۷ ^k	۰/۸۴ ^f	۳/۶۰ ⁱ	۵/۵۲ ^e	۸/۲۰ ^d
آهن (میلی گرم بر کیلوگرم)	۱۲۴۱/۱۰ ^c	۱۴۱۷/۵۰ ^b	۱۷۹۲/۹۸ ^a	۱۲۷۵/۲۱ ^c	۱۷۴۵/۱ ^a	۱۷۸۹/۳ ^a	۱۵۳/۷۳ ^h	۲۰۱/۶۳ ^e	۲۸۷/۲۸ ^f	۹۶۸/۴۴ ^c	۱۰۳۹/۵۲ ^d	۱۲۰۳/۳۵ ^c
منگنز (میلی گرم بر کیلوگرم)	۲۴۵/۴۹ ^c	۳۷۶/۳۲ ^d	۵۲۷/۷۳ ^b	۳۷۱/۹۱ ^d	۴۵۷/۱۷ ^c	۵۹۸/۴۷ ^a	۱۳۸/۱۸ ^h	۱۵۴/۳۵ ^e	۱۷۷/۸۷ ^f	۹۲/۶۱ ⁱ	۱۰۸/۷۸ ^j	۱۲۲/۰۱ ^h
روی (میلی گرم بر کیلوگرم)	۸۵/۴۷ ^c	۱۴۸/۶۱ ^d	۱۸۰/۹۵ ^c	۷۲/۳۸ ^c	۲۰۷/۹ ^b	۳۸۱/۱۵ ^a	۴۲/۲۰ ^f	۷۷/۳۱ ^e	۱۳۹/۵۹ ^d	۸۲/۱۶ ^c	۱۵۰/۳۰ ^d	۲۱۴/۳۷ ^b
مس (میلی گرم بر کیلوگرم)	۱۰/۲۹ ^c	۱۳/۰۳ ^b	۱۶/۱۰ ^a	۴/۱۳ ^e	۵/۴۶ ^f	۷/۱۱ ^c	۲/۷۵ ^h	۶/۷۳ ^c	۸/۹۰ ^d	۲/۲۴ ^b	۴/۱۳ ^e	۵/۳۷ ^f
سرب (میلی گرم بر کیلوگرم)	۱/۸۹ ^g	۲/۳۸ ^f	۳/۸۵ ^e	۲/۴۵ ^f	۳/۷۲ ^c	۵/۵۳ ^d	۲۶/۵۳ ^c	۳۳/۹۷ ^b	۳۶/۱۰ ^a	۱/۰۵ ^g	۱/۲۰ ^g	۱/۴۸ ^g
کادمیم (میلی گرم بر کیلوگرم)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

در هر ردیف، تیمارهایی که دارای حروف یکسان اند اختلاف معنی دار ندارند، ND: کمتر از حد قابل اندازه‌گیری بوسیله دستگاه جذب اتمی

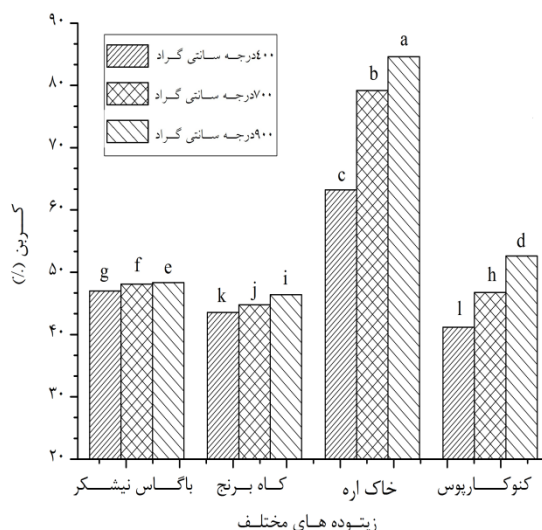
نیتروژن موجود در زغال زیستی می‌تواند به دلیل تغییر شکل ترکیبات نیتروژن‌دار به ساختاری مانند پیریدین^۱ باشد. با کاهش میزان نیتروژن کل و افزایش کربن کل زغال‌های زیستی، نسبت C/N آنها به طور معنی‌داری افزایش یافت. بیشترین میزان C/N در زغال زیستی حاصل از خاک اره تهیه شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد (جدول ۲). Yuan et al. (2011) گزارش دادند که طی افزایش دمای گرماکافت، با خروج نیتروژن، نسبت C/N زغال زیستی حاصل از بقایای گیاهی افزایش یافت.

کاهش میزان نیتروژن و هیدروژن زغال‌های زیستی می‌تواند به دلیل کاهش ترکیبات فرار حاوی هیدروژن و اکسیژن مانند گروه‌های عاملی هیدروکسیل، پیوندهای اکسیژنی و نیز پیوندهای خطی کربن موجود در زغال زیستی باشد (شکل ۳). همچنین کاهش نیتروژن احتمالاً به دلیل تبخیر ترکیبات نیتروژن‌دار مانند آمونیوم (NH₄-N) و نیترات (NO₃-N) موجود در زغال زیستی در درجه حرارت بیش از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. همچنین کاهش میزان گوگرد زغال زیستی می‌تواند به دلیل خروج گوگرد به صورت گاز هیدروژن سولفید (H₂S) در طول فرایند گرماکافت باشد (Cheah et al., 2014). Bagreev et al. (2001) گزارش دادند که کاهش

1. Pyridine



شکل ۵. اثر متقابل تیمارها بر میزان نیتروژن کل زغال زیستی



شکل ۴. اثر متقابل تیمارها بر میزان کربن کل زغال زیستی

با توجه به جدول (۵)، نوع زیتوده، دمای گرماکافت و اثرات متقابل آنها تأثیر معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) بر غلظت قابل دسترس عناصر ریزمغذی و سرب قابل دسترس در زغال‌های زیستی داشت.

افزایش درجه حرارت فرایند گرماکافت، سبب کاهش غلظت عناصر ریزمغذی و سرب قابل دسترس در زغال‌های زیستی حاصل از زیتوده‌های مختلف شد (جدول ۶). افزایش میزان pH زغال‌های زیستی در اثر افزایش دمای گرماکافت (جدول ۲)، احتمالاً منجر به کاهش حل‌پذیری عناصر ریزمغذی و سرب شد. همچنین افزایش دمای گرماکافت سبب کاهش گروه‌های عاملی جاذب سطحی به ویژه کربوکسیلیک اسیدها و C-H خطی (شکل ۳) که سطوح تبادل‌ی عناصر را فراهم می‌کنند، شده که در نتیجه غلظت عناصر قابل تبادل کاهش می‌یابد. از سوی دیگر فرایند گرماکافت می‌تواند سبب تغییر فرم عناصر موجود در ترکیبات زغال زیستی از فرم قابل تبادل به فرم کم‌حل‌تر اکسیدی یا سولفیدی شود (Liu et al., 2014).

نتایج حاصل از آنالیز عنصری زغال‌های زیستی مختلف (جدول ۴) نشان داد که افزایش درجه حرارت فرایند گرماکافت و نوع زیتوده تأثیر معنی‌داری بر افزایش غلظت کل عناصر غذایی زغال‌های زیستی داشت. میزان کادمیم کل و قابل دسترس کمتر از حد قابل اندازه‌گیری با دستگاه جذب اتمی بود (جدول ۴ و ۶). در اثر افزایش درجه حرارت فرایند گرماکافت، عناصر نیتروژن (شکل ۵)، هیدروژن و گوگرد کل (جدول ۴) در زغال زیستی در اثر تبخیر کاهش یافته که منجر به افزایش درصد سهم سایر عناصر از کل زغال زیستی تولیدی و نیز احتمالاً افزایش غلظت آنها نسبت به زیتوده اولیه شد. همچنین تفاوت در میزان غلظت عناصر در زغال زیستی حاصل از زیتوده‌های مختلف احتمالاً می‌تواند به دلیل تفاوت غلظت این عناصر در زیتوده‌های آنها باشد. Khanmohammadi et al. (2015) دریافتند که با افزایش دمای گرماکافت از ۳۰۰ به ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، میزان غلظت کل عناصر غذایی موجود در زغال زیستی حاصل از لجن فاضلاب به صورت معنی‌داری افزایش یافت.

جدول ۵. تجزیه واریانس تأثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر غلظت قابل دسترس عناصر در زغال‌های زیستی

میانگین مربعات					درجه آزادی	منابع تغییرات
سرب	مس	روی	منگنز	آهن		
۱/۶۹۹ *	۳۴/۷ *	۲۰۱۰۵/۸ *	۸۹۳۴۶/۵ *	۱۴۵۹۸۲/۸ *	۳	نوع زیتوده (A)
۲/۳۱۱ *	۲۱/۳ *	۳۲۰۸۹/۳ *	۳۶۹۴۰/۴ *	۳۸۴۳۶/۰ *	۲	دمای گرماکافت (B)
۰/۱۰۸ ^{ns}	۰/۶ *	۱۹۹۰/۶ *	۲۹۹۰/۳ *	۳۵۷۳/۵ *	۱۱	اثر متقابل A*B
۰/۰۴۳	۰/۱	۵۱/۰	۴۳/۴	۶۷/۸	۲۴	خطای آزمایشی
					۳۶	کل

* و NS به ترتیب، وجود و عدم وجود تفاوت معنی‌دار

جدول ۶. میانگین تأثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر غلظت قابل دسترس عناصر در زغال‌های زیستی

نوع زغال زیستی و دمای گرماکافت (درجه سانتی‌گراد)

عنصر (میلی‌گرم برکیلوگرم)	باگاس نیشکر			کاه برنج			خاک‌اره چوب			کنوکارپوس		
	۴۰۰	۷۰۰	۹۰۰	۴۰۰	۷۰۰	۹۰۰	۴۰۰	۷۰۰	۹۰۰	۴۰۰	۷۰۰	۹۰۰
آهن	۱۱۴۷/۵۱ ^a	۹۱۵/۰۱ ^d	۷۰۵/۱۲ ^g	۱۰۰۵/۰۷ ^b	۹۷۰/۲۰ ^c	۶۶۷/۵۹ ^g	۱۱۷/۸۰ ⁱ	۵۶/۷۰ ^j	۳۹/۷۰ ^j	۸۰۶/۴۱ ^e	۷۹۵/۲۱ ^f	۵۹۲/۵۶ ^h
منگنز	۹۹/۷۵ ^g	۱۴۱/۶۶ ^e	۲۲۷/۵۲ ^c	۱۹۹/۵ ^d	۳۱۶/۷۵ ^b	۳۶۷/۵۴ ^a	۵۷/۷۵ ^h	۱۲۰/۷۷ ^f	۱۴۷/۰۳ ^e	۳۶/۴۴ ⁱ	۶۳/۰۰ ^h	۹۴/۵۵ ^g
روی	۱۳۶/۴۷ ^d	۱۰۰/۸۳ ^e	۵۴/۶۳ ^e	۱۵۳/۸۳ ^c	۸۶/۵۳ ^{ef}	۵۶/۸۴ ^f	۹۷/۴۴ ^e	۵۴/۱۸ ^g	۳۳/۲۸ ^h	۲۵/۶۳ ^a	۱۸۹/۴۸ ^b	۸۰/۹۴ ^f
مس	۸/۳۳ ^a	۶/۲۵ ^b	۵/۱۷ ^c	۴/۴۲ ^d	۳/۵۸ ^c	۲/۶۷ ^g	۴/۵۸ ^{cd}	۲/۱۵ ^g	۱/۱۴ ^h	۳/۳۰ ^{ef}	۲/۴۱ ^g	۱/۰۵ ^h
سرب	۱/۴۸ ^b	۰/۷۳ ^d	۰/۴۴ ^f	۲/۲۸ ^a	۱/۶۷ ^b	۱/۱۱ ^c	۱/۰۸ ^c	۱/۰۶ ^c	۱/۰۶ ^c	۰/۹۹ ^c	۰/۷۱ ^{de}	۰/۴۸ ^{ef}
کادمیم	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

در هر ردیف، تیمارهایی که دارای حروف یکسان‌اند اختلاف معنی‌دار ندارند ND: کمتر از حد قابل اندازه‌گیری بوسیله دستگاه جذب اتمی

زغال زیستی داشتند. با افزایش دمای فرایند گرماکافت، pH، هدایت الکتریکی، سطح ویژه و نیز نسبت C/N زغال‌های زیستی تهیه شده از زیتوده‌های مختلف، به تدریج و به صورت

نتیجه‌گیری

در فرایند تولید زغال زیستی، نوع زیتوده و نیز دمای فرایند گرماکافت تأثیر بسزایی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی مختلف

ترتیب اولویت زغال‌های زیستی حاصل از برگ کنوکاریوس، کاه برنج، باگاس نیشکر و خاک اره را جهت افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و بهبود ذخیره عناصر غذایی قابل دسترس پیشنهاد کرد. ولی تعیین کاربرد زغال‌های زیستی حاصل از زیتوده‌های مورد مطالعه در دمای بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، نیاز به بررسی بیشتر دارد.

معنی‌داری افزایش یافت. ولی با افزایش درجه حرارت فرایند گرماکافت، گروه‌های عاملی کاهش یافته و به دنبال آن ظرفیت تبادل کاتیونی زغال‌های زیستی به تدریج به صورت معنی‌داری کاهش یافت. با توجه به اینکه زغال‌های زیستی حاصل از زیتوده‌های مختلف تولید شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای pH کمتر و ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر و نیز میزان گروه‌های عاملی جاذب سطحی بیشتری بودند، می‌توان به

REFERENCES

- Asif Naeem, M., Khalid, M., Arshad, M., and Ahmad, R. (2014). Yield and nutrient composition of biochar produced from different feedstocks at varying pyrolytic temperatures. *Pak. J. Agri. Soil sci.* Vol. 51(1): 75-82.
- Bagreev, A., Bandoz, T.J., and Locke, D.C. (2001). Pore structure and surface chemistry of adsorbents obtained by pyrolysis of sewage derived fertilizer. *Carbon*. 39: 1971-1979.
- 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 Biol. Biochem.* 46: 73-79.
- Cantrell, K., Hunt, P., Uchimiya, M., Novak, J. and Ro, K. (2012). Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology*, 107: 419-428
- Chan, K., and Xu, Z. (2009) Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement, in: J. Lehmann, S. Joseph: *Biochar for Environmental Management*. Science and Technology. Earthscan, London, UK. pp: 67-84.
- Cheah, S., Malone, S., C., and Feik, C.J. (2014). Speciation of sulfur in biochar produced from pyrolysis and gasification of oak and corn stover. *Environmental Science and Technology*. 48(15): 8474-8480.
- Chen, B., Zhou, D. and Zhu, L. (2008). Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures. *Environ Sci Technol.* 42: 5137-5143.
- Claoston, A.W., Samsuri, M.H., Ahmad Husni, M.S. and Mohd, A. (2014). Effects of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of empty fruit bunch and rice husk biochars. *Waste Management & Research*. Vol. 32(4): 331-339.
- Demirbas, A. (2004). Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 72: 243-248.
- Downie, A., Crosky, A., and Munroe, P. (2009). Physical properties of biochar: Biochar for environment management science and technology. *Earthscan*. London UK. 37: 13-21.
- Gaskin, J.W., C. Steiner, K. Harris, K.C., and Bibens, B. (2008). Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Trans ASABE*. 51: 2061-2069.
- Glaser, B., Lehmann, J. and Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review. *Biol Fertil Soils*. 35: 219-230.
- Guo, Y., and Rockstraw, A. D. (2007). Physicochemical properties of carbons prepared from pecan shell by phosphoric acid activation. *Bioresource Tech.* 98(8): 1513-1521.
- Hameed, B.H., Ahamd, A.L., and Latiff, K.N.A. (2007). Adsorption of basic dye (methyl blue) onto activated carbon prepared from rattan sawdust. *Dyes and Pigments*, 75: 143-150
- Herbert, L., Hosek, I., and Kripalani, R. (2012). The characterization and comparison of Biochar produced from a decentralized reactor using forced air and natural draft Pyrolysis. California Polytechnic State University, San Luis Obispo. Materials Engineering Department. 24-26.
- Hooker, M., Herron, G., and Pena, P. (1982) Effects of residue burring removal, and incorporation on irrigated cereal crop yields and chemical properties. *Soil Sci*. 46: 122-126.
- Hossain, M.K., Strezov, V. Yin., Chan, K. (2011). Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management*. 92: 223-228.
- Jindo, K., Mizumoto, H., Sawada, Y., Sanchez-Monedero, M. and Sonoki, T. (2014). Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. *Biogeosciences*. 11: 6613-6621.
- Khanmohammadi, Z., Afyuni, M., and Mosaddeghi, M. (2015). Effect of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of sewage sludge biochar. *Waste Management & Research*. 33(3): 1-9.
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black, *Frontiers Ecol. Environ.* 5(7): 381-387.
- Liu T, Liu B and Zhung W (2014) Nutrients and heavy metals in biochar produced by sewage sludge pyrolysis: Its application in soil amendment. *Polish Journal of Environmental Studies* 23: 271-275.
- Novak, J.M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J.W., Steiner, C., Das, K.C., Ahmedna, M., Rehrh, D., Watts,

- D.W., Bussher, 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.
- Pavia, D. L., Lampman, G., and Kriz, G., (2013). Introduction to Spectroscopy: a guide for student of organic chemistry (2th ed.). pp: 29-35.
- Rehrah, D., Reddye, M.R., Novakd J.M., Bansodeb R.R., Schimmelf, K.A., Yuc, J., Wattsd, D.W., and Ahmedna, M. (2014). Production and characterization of biochars from agricultural by-products for use in soil quality enhancement. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 108: 301–309.
- Singh, B., Singh B. P., and Cowie, A. L. (2010). Characterisation and evaluation of biochars for their applications a soil amendment, Aust. *Soil Res*. 39: 1224-1235.
- Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E. and Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Adv Agron*. 105: 47–82.
- Sun, K., Ro, K., Guo, M.X., Novak, J., Mashayekhi, H. (2011) Sorption of bisphenol A, 17 α -ethinyl estradiol and phenanthrene on thermally and hydrothermally produced biochars. *Bioresour Technol* . 102: 5757–5763
- USEPA. 1994. Methods for the determination of metals in environmental samples. Supplement EPA-600/R-94/111/May.(1994). Cincinnati, Ohio: U.S. EPA, Environmental Monitoring Systems Laboratory.
- Xue, Y., Gao, B., Yao, Y., Inyang, M., Zhang, M., Zimmerman, A.R., Ro, K.S. (2012). Hydrogen peroxide modification enhances the ability of Biochar (hydrochar) produced from hydrothermal carbonization of peanut hull to remove aqueous heavy metals: Batch and column tests. *Chemical Engineering Journal*. 200: 673-680.
- Yousefi, M., Shariatmadari, H., and Hajabasi, M.A. (2007). Measurment of some of available organic carbon stocks as an indicator of soil quality. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*. 42(11): 429-439. (In farsi)
- Yuan JH, Xu RK and Zhang H (2011) The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*. 102: 3488–3497.
- Yuan, J. H., Xu, R. K., and Zhang, H. (2010). The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technol*. 102: 3488–3497.