

## ارزیابی تأثیر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و

### فیزیکی زغال زیستی

ندا سیدی<sup>۱</sup>

مهدی احمدیوسفی<sup>۲\*</sup>

[m.ahmadyousefi@gmail.com](mailto:m.ahmadyousefi@gmail.com)

مهدیه امیری نژاد<sup>۳</sup>

محبوبه زاهدی فر<sup>۴</sup>

فاطمه علیزاده<sup>۵</sup>

محبوبه زاهد<sup>۶</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۱۳

#### چکیده

زمینه و هدف: فرآوری پسماندهای آلی و بازگشت آن‌ها به خاک، کمک شایانی به کشاورزی پایدار می‌نماید. زغال زیستی حاصل از فرآیند گرماکافت پسماندهای آلی است. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی زغال زیستی به طور معنی‌داری متأثر از ویژگی‌های زیتوده و نیز دمای فرآیند گرماکافت می‌باشد. اطلاع از ویژگی‌های زغال زیستی تولید شده برای استفاده به عنوان یک ماده اصلاحی در خاک ضروری می‌باشد. هدف از این پژوهش تعیین بهترین دما و زیتوده برای تولید زغال زیستی می‌باشد.

روش بررسی: به منظور بررسی تأثیر نوع زیتوده و درجه حرارت‌های مختلف فرآیند گرماکافت جهت انتخاب زغال زیستی با بالاترین قابلیت جذب و تبادل یونی، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در آزمایشگاه پژوهشی دانشکده کشاورزی و دانشکده علوم دانشگاه جیرفت در بهار سال ۱۴۰۰ انجام شد. تیمارها شامل پنج نوع زغال زیستی تهیه شده از بقایای گندم، بقایای یونجه، بقایای سیب زمینی، خاک اره و لیف درخت خرما در دماهای ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بودند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال زیستی‌ها

۱- استادیار گروه شیمی دانشکده علوم پایه، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران.

۲- پژوهشیار دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران. \* (مسئول مکاتبات)

۳- استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران.

۴- استادیار گروه شیمی دانشکده علوم پایه، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران.

۵- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد شیمی دارویی از دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، کرمان، ایران.

۶- دانش‌آموخته دکتری فیزبولوژی گیاهان زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

شامل اسیدیتته (pH)، شوری (EC)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، کربن پایدار، نیتروژن کل، تخلخل، سطح ویژه، عملکرد زغال زیستی و مقدار خاکستر با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (9.1) مورد بررسی قرار گرفت.

**یافته‌ها:** نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش درجه حرارت از ۳۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد مقدار عملکرد زغال زیستی، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و چگالی ظاهری آن کاهش یافت و در مقابل اسیدیتته (pH)، شوری (EC)، چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، کربن پایدار، نیتروژن کل، تخلخل، سطح ویژه، عملکرد و مقدار خاکستر در زغال زیستی‌های تولید شده افزایش نشان داد. همچنین ویژگی‌های مختلف زغال‌های زیستی به شدت تحت تاثیر ماهیت مواد اولیه نیز قرار دارد. با توجه به نتایج زغال زیستی حاصل از بقایای یونجه در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان بهترین زغال زیستی قابل دسترس توصیه می‌شود.

**بحث و نتیجه‌گیری:** در فرآیند تولید زغال زیستی ماهیت مواد اولیه و نیز درجه حرارت فرآیند گرماکافت نفس بسزایی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال زیستی دارند. با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی برای تولید انبوه و اقتصادی این ماده، می‌توان به ترتیب اولویت زغال‌های زیستی تولید شده حاصل از بقایای یونجه، خاک اره، لیف خرما، بقایای سیب زمینی و بقایای گندم در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد را جهت بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و در نهایت افزایش راندمان جذب عناصر غذایی از خاک، پیشنهاد کرد.

**واژه‌های کلیدی:** گرماکافت، کربن پایدار، زغال زیستی و بقایای کشاورزی.

## **The assessment of biomasses effect and pyrolysis temperatures on some chemical and physical properties of biochar**

**Neda Sayedi**<sup>1</sup>

**Mehdi Ahmadyousefi**<sup>2\*</sup>

[m.ahmadyousefi1@gmail.com](mailto:m.ahmadyousefi1@gmail.com)

**Mahdiyeh Amirinejad**<sup>3</sup>

**Mahboobeh Zahedifar**<sup>4</sup>

**Fatemeh Alizadeh**<sup>5</sup>

**Mahboobeh Zahed**<sup>6</sup>

Admission Date: January 19, 2022

Date Received: December 4, 2021

### **Abstract**

**Background and Objective:** The processing of organic waste and its return to the soil contributes significantly to sustainable agriculture. Biochar is the result of the pyrolysis temperatures of organic waste. The chemical and physical properties of biochar are expressively affected by the properties of the biomass as well as the temperature of the thermocouple process. Knowledge of the properties of prepared biochar is essential for its usage as a soil remediator.

**Material and Methodology:** In order to select biochar with the highest ion absorption and exchange capacity, a wide range of different pyrolysis temperature were applied to produce biochar from different biomass tissues. A factorial experiment in a completely randomized design with three replications in the research laboratory of the Faculty of Agriculture and the Faculty of Science, University of Jiroft, Jiroft, Iran, was done in spring 1400. Treatments included five types of prepared biochar from wheat residues, alfalfa residues, potato residues, sawdust and date palm leaf at temperatures of 300, 400 and 500 ° C. Physical and chemical properties of biochar including acidity (pH), salinity (EC), cation exchange capacity (CEC), bulk density, true density, stable carbon, total nitrogen, porosity, specific surface area, biomass yield and ash content were studied.

**Finding:** The results showed that with increasing the temperature from 300 to 500 ° C, the amount of biochar yield, cation exchange capacity (CEC) and its apparent density decreased but (pH), salinity (EC), apparent density showed true density, stable carbon, total nitrogen, porosity, specific surface area, yield and ash content in the prepared biochar increased. Also, different properties of biochar are strongly

---

1- Assistant Professor of Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Jiroft, Jiroft, Iran.

2- Researcher, University of Jiroft, Jiroft, Iran. \*(Corresponding Author)

3- Assistant Professor of Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran.

4- Associate Professor of Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Jiroft, Jiroft, Iran.

5- M.S Graduated in pharmaceutical chemistry from Kerman University of Advanced Industrial and Technological Education, Kerman, Iran.

6- Ph. D Graduate in Crop Physiology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

influenced by the nature of raw materials. According to the data, the prepared biochar from alfalfa residues at 500 ° C is recommended as the best available biochar.

**Discussion & Conclusion:** In the biochar production process, the nature of the raw materials as well as the temperature of the heat-burning process have a great impact on the physical and chemical properties of biochar. Considering the physical and chemical properties for mass and economic production of this material, the prepared biochar from alfalfa residues, sawdust, date leaf, potato residues and wheat residues at 500 ° C can improve the physical and chemical properties of the soil and the efficiency of nutrient uptake from the soil, respectively

**Keywords:** pyrolysis, Sustainable carbon, Biochar and agricultural residues.

## مقدمه

و مدیریت پسماندهای آلی می باشد و عاملی است که با صرفه اقتصادی که دارد، می تواند موجب بهبود شرایط خاک شود. ساختار مولکولی گسترده کربن های آروماتیک در زغال زیستی می تواند سبب پایداری زیاد آن در خاک و نیز افزایش ظرفیت نگهداشت آب خاک تغییر و بهبود بسیاری از شرایط خاک شود (۷). از دیگر اثرات سودمند کاربرد زغال زیستی در خاک های کشاورزی، می توان به افزایش ماده آلی، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و تعامل با چرخه مواد غذایی خاک از طریق تعدیل pH خاک و کاهش شستشوی عناصر غذایی اشاره کرد (۸). زغال زیستی ماده ای متخلخل با سطح ویژه بالا است که می تواند اثرات معنی داری بر رطوبت خاک و پویایی عناصر غذایی در خاک داشته باشد (۹). مطالعات نشان می دهد که ویژگی های فیزیکی و شیمیایی زغال زیستی به طور قابل توجهی تحت تأثیر عواملی نظیر درجه حرارت فرآیند گرماکافت و نیز نوع زیتوده تغییر می کند (۱۰).

با افزایش درجه حرارت فرآیند گرماکافت، ترکیبات فرار (هیدروژن و اکسیژن) موجود در زغال زیستی کاهش یافته (۱۱) سطح ویژه و محتوای خاکستر نمونه افزایش ولی میزان گروه های عاملی سطحی زغال زیستی که منجر به بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی آن می شوند، کاهش می یابند (۱۲). از طرفی چگالی ظاهری زغال زیستی بسیار کمتر از خاک های معدنی است، بنابراین کاربرد زغال زیستی مانند دیگر مواد آلی به دلیل سبک تر بودن نسبت به مواد تشکیل دهنده خاک می تواند بر چگالی ظاهری خاک تأثیر بگذارد و آن را نیز کاهش

ازد یاد روزافزون جمعیت و به تبع آن افزایش فعالیت های کشاورزی و صنعتی می تواند سبب تولید انبوه پسماندهای آلی در مزارع شود. افزایش این پسماندها می تواند پیامدهای زیان بار بسیاری برای سلامتی محیط زیست ایجاد کند (۱). یکی از رویه های نامناسب، به ویژه در کشورهای توسعه نیافته و در حال توسعه، سوزاندن پسماندهای آلی و بقایای گیاهی در مزارع است که در درازمدت سبب تخریب ساختمان خاک از طریق حذف مواد آلی و فعالیت ریز جانداران شده که نتیجه آن کاهش نفوذپذیری و افزایش پتانسیل فرسایش پذیری خاک می باشد (۲). مدیریت صحیح این پسماندهای آلی، از عوامل مهم در دستیابی به اهداف کشاورزی پایدار می باشد (۳). بنابراین فرآوری این پسماندهای آلی و استفاده مجدد از آنها می تواند راهکار مناسبی جهت توسعه کشاورزی پایدار باشد. از جمله فرآیندهایی که در سال های اخیر مورد توجه پژوهشگران واقع شده است، فرآیند گرماکافت می باشد که به کمک آن می توان پسماندهای آلی را به زغال زیستی تبدیل کرد (۴).

زغال زیستی ماده ای جامد، سیاه رنگ و غنی از کربن پایدار می باشد که در نتیجه سوزاندن انواع مواد آلی در شرایط بدون اکسیژن و یا با اکسیژن کم، در دماهای ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سلیسیوس تولید می شود (۵). در سال های اخیر کاربرد مواد آلی به صورت زغال زیستی در خاک مورد توجه بسیاری از مجامع علمی قرار گرفته است، زیرا این ماده در بسیاری از منابع به عنوان یک اصلاح کننده مناسب برای خاک شناخته شده است (۶). کاربرد زغال زیستی، راهکاری مناسب برای بازیافت مواد آلی

دهد (۱۰). زغال زیستی همچنین نگهداری مواد مغذی خاک و دسترسی به عناصر غذایی را افزایش می‌دهد (۱). تخلخل و سطح ویژه زغال زیستی حاصل از ضایعات مرکبات و کاه برنج با افزایش درجه حرارت فرآیند گرماکافت، افزایش می‌یابد (۱۳). زغال زیستی تولیدی در دماهای کم (۲۵۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) حاوی گروه‌های عاملی  $C=O$  و  $C-H$  آلیفاتیک بیشتری است که می‌توانند سطوح تبادل عناصر غذایی را فراهم کنند (۱۴). ماده آلی بیوجار یا همان زغال زیستی با درصد جذب ۹۹ درصدی می‌تواند تمام آلاینده‌های پساب‌های صنایع، فاضلاب‌ها و آب‌های آلوده را جذب نماید (۱۵، ۱۶)، و اگر خود به عنوان یک آلاینده باقی بماند تأثیری بر محیط نخواهد داشت (۱۷، ۱۸). تولید انواع زغال زیستی در نبود اکسیژن، دی‌اکسید کربن تولید نمی‌کنند، به همین خاطر از افزایش گرمای زمین جلوگیری کرده خود به عنوان ماده دوستدار محیط زیست و بدون خطر آلاینده‌گی مطرح است (۳). تفاوت در نوع ماده اولیه 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 (۱۹). زغال زیستی حاصل از کود مرغی، سطح ویژه و تخلخل بیشتری نسبت به زغال زیستی حاصل از کاه گندم داشت با وجود این که هر دو زغال زیستی تولیدی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بودند (۵). اما اطلاع از ویژگی زغال زیستی تولیدشده برای استفاده به عنوان یک ماده اصلاحی در خاک ضروری می‌باشد (۱۷). بنابراین ویژگی‌های مختلف زغال زیستی به شدت تحت تأثیر ماهیت ماده اولیه و نیز درجه حرارت فرآیند گرماکافت قرار دارد (۱۴). در همین راستا پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر نوع زیتوده و درجه حرارت‌های مختلف فرآیند گرماکافت جهت انتخاب زغال زیستی با بالاترین قابلیت جذب و تبادل یونی انجام شد.

#### مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر نوع زیتوده و درجه حرارت‌های مختلف فرآیند گرماکافت جهت انتخاب زغال زیستی با بالاترین قابلیت جذب و تبادل یونی، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب

#### اندازه‌گیری قابلیت هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته

##### (pH) زیتوده اولیه و زغال زیستی

زغال زیستی (با اندازه‌ی کوچکتر از دو میلی‌متر) با آب مقطر با نسبت (۱:۵ آب : زغال زیستی) برای ۲۴ ساعت هم‌زده شد. سپس مقدار pH و EC در عصاره بدست آمده توسط دستگاه pH متر و شوری‌سنج اندازه‌گیری شد و نتایج هدایت الکتریکی بر حسب دسی‌زیمنس بر متر ( $dS m^{-1}$ ) در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شد (۲۰).

## اندازه‌گیری عملکرد زغال زیستی

محاسبه عملکرد به عنوان جرم زغال‌زیستی تولیدشده در واحد جرم ماده خشک اولیه و با استفاده از معادله ۱ تعیین شد (۲۱).  
(۱)

$$۱۰۰ * \frac{\text{وزن زیستی زغال (g)}}{\text{وزن آون خشک زیتوده (g)}} = \text{عملکرد زغال زیستی (\%)}$$

وزن ماده خشک با توجه به ظرف مورد استفاده در تولید زغال زیستی، بسته به تکرارهای مختلف متفاوت بود اما به گونه‌ای انتخاب شد که ضمن پر شدن ظرف، مواد خام با استفاده از ضرباتی فشرده شد تا شرایط با اکسیژن کم، بیشتر محیا باشد (به طور متوسط مقدار مواد اولیه در ظروف ۱۰۰ گرم بود).

## اندازه‌گیری چگالی ظاهری، چگالی حقیقی و تخلخل زغال زیستی

چگالی ظاهری یک ماده، برابر جرم واحد حجم توده‌ی آن ماده می‌باشد، دانستن این ویژگی به عنوان یک ویژگی مهم در طراحی محفظه‌های تولید زغال زیستی و تهیه زیتوده برای پر کردن کامل ظرف‌ها در تولیدهای انبوه ضروری می‌باشد. چگالی ظاهری نمونه‌های زغال زیستی طبق روش ASTM D - 285 با کمی اصلاح اندازه‌گیری شد. برای این منظور مقداری از زغال زیستی داخل استوانه‌های شیشه‌ای ۱۰۰ میلی‌لیتری وزن شده‌ای ریخته و به مدت یک دقیقه روی دستگاه لرزاننده قرار داده شد تا زغال زیستی داخل سیلندر در حجم مشخصی ثابت شود و بعد از وزن کردن مجدد استوانه حاوی زغال زیستی، چگالی ظاهری زغال زیستی بر حسب گرم در سانتی مترمکعب ( $\text{gcm}^{-3}$ ) استفاده از معادله ۲ محاسبه شد (۲۱).

$$(۲) \quad \text{چگالی ظاهری} = \frac{\text{وزن زیستی زغال (g)}}{\text{زیستی زغال حجم داخل سیلندر (cm3)}}$$

چگالی حقیقی یک ماده هم عبارت از جرم واحد حجم مجموعه ذرات جامد آن ماده است و از نسبت جرم کل ذرات به حجم آن‌ها، صرف نظر از حجم منافذ بین ذرات بدست می‌آید (۲۲). چگالی حقیقی در تجزیه‌های مربوط به رسوب‌گذاری، محاسبه جرم و حجم ماده، محاسبه تخلخل و غیره به کار می‌رود. چگالی حقیقی نمونه‌ها با استفاده از پیکنومتر اندازه‌گیری شد و تخلخل وابسته به چگالی زغال زیستی نیز هست و با داشتن مقادیر

چگالی ظاهری و چگالی حقیقی می‌توان از طریق معادله ۳، درصد تخلخل را محاسبه کرد (۲۳).

$$(۳) \quad ۱۰۰ * \left( \frac{\text{چگالی ظاهری}}{\text{چگالی حقیقی}} - 1 \right) = \text{تخلخل (\%)}$$

## اندازه‌گیری مقدار خاکستر زغال زیستی

مقدار خاکستر زغال زیستی‌ها طبق روش استاندارد ASTM D-2866 اندازه‌گیری شد. برای این منظور، پنج گرم نمونه آون خشک از زغال زیست‌ها داخل ظرف بوتله چینی بدون درب ریخته و به مدت هشت ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. بعد از این زمان ظرف را داخل دسیکاتور در دمای اتاق قرار داده تا سرد شود و مجدد توزین انجام شد و درصد مقدار خاکستر برای هر دما با استفاده از معادله ۴ محاسبه شد (۲۱).

$$(۴) \quad ۱۰۰ * \frac{\text{وزن خاکستر (g)}}{\text{وزن خشک زیستی زغال (g)}} = \text{مقدار خاکستر (\%)}$$

## اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی

جهت اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی زغال زیستی، ابتدا نمونه با محلول استات آمونیوم یک مولار ( $\text{pH}=7$ ) 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 (۲۴).

## اندازه‌گیری کربن کل، نیتروژن و سطح ویژه

میزان کل کربن و نیتروژن، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه آنالیز عنصری CHNSO مدل VarioELIII اندازه‌گیری شد و همچنین اندازه‌گیری سطح ویژه زغال زیستی به روش BET1 و با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سطح ویژه مدل Nano Sord انجام شد (۱۹).

## آنالیز داده‌ها

بعد از انجام آزمایش‌ها و مشخص شدن مقادیر ویژگی‌ها، داده‌های آزمایشگاهی با سه تکرار با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (9.1) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به صورت نمودار در نرم‌افزار Excel ترسیم شد و میانگین‌ها توسط آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد با هم مقایسه شدند ( $P < 0.05$ ).

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی زیتوده‌های استفاده شده

Table 1. Results of physical and chemical analysis of the biomass

زیتوده	اسیدیته (pH)	قابلیت هدایت الکتریکی (ds.m <sup>-1</sup> )	ظرفیت تبادل کاتیونی (Cmol.ckg <sup>-1</sup> )	کربن آلی (%)	نیتروژن کل (%)	تخلخل (%)	سطح ویژه (dsm <sup>-1</sup> )	چگالی حقیقی (gcm <sup>-3</sup> )	چگالی ظاهری (gcm <sup>-3</sup> )
بقایای گندم	۶/۷	۱/۶	۸۸/۴	۳۳/۲	۲/۷۶	۶۹	۲۷/۶۰	۰/۷۷	۰/۲۴۵
بقایای یونجه	۸/۶	۱۰/۴	۸۱/۵	۳۵/۹	۸/۳۴	۳۰	۳۲/۱۲	۰/۶۹	۰/۴۸۴
بقایای سیب‌زمینی	۷/۵	۵/۷	۶۴/۷	۳۲/۷	۴/۸۵	۳۰	۲۷/۴۲	۰/۵۷	۰/۴۰۰
خاک اره	۶/۵	۰/۸۷	۶۷/۳	۴۰/۲	۲/۹۴	۷۰	۳۱/۲۵	۰/۹۲	۰/۲۷۳
لیف درخت خرما	۶/۱	۲	۷۷/۲	۴۱/۱	۳/۴۳	۵۲	۳۵/۲۱	۰/۸۶	۰/۴۹۱

## نتایج و بحث

همچنین ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، نیتروژن کل، کربن آلی، تخلخل، چگالی ظاهری و عملکرد خاکستر به طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر ساده نوع زیتوده، دمای فرآیند گرماکافت و اثرات متقابل آن‌ها قرار گرفته‌اند.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد (جدول ۲)، اثر ساده نوع زیتوده و دمای فرآیند گرماکافت بر اسیدیته (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، سطح ویژه، چگالی حقیقی و عملکرد زغال زیستی در سطح احتمال یک درصد ( $P>0/01$ ) معنی‌دار بود.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر برخی ویژگی‌های زغال‌های زیستی

Table 2. Analysis of variance the effect of biomass type and pyrolysis temperature on some properties of biochar

منبع تغییرات	نوع زغال زیستی	دمای گرماکافت	زغال زیستی * دمای گرماکافت	خطا	ضریب تغییرات
درجه آزادی (df)	۴	۲	۸	۳۰	-
اسیدیته (pH)	۱/۷**	۳/۲**	۰/۰۴ <sup>ns</sup>	۰/۰۴	۲/۹
قابلیت هدایت الکتریکی	۱۶/۵**	۳/۳**	۰/۲۱ <sup>ns</sup>	۰/۰۸۷	۹/۶
ظرفیت تبادل کاتیونی	۴۶۹/۷۵**	۱۹۵۱/۱۹**	۴۳/۸۶**	۷/۴۱	۴/۶
کربن آلی (%)	۲۵۸/۲۴**	۱۴۰۵/۲**	۴۲/۱۱**	۲/۸۶	۳/۲
نیتروژن کل (%)	۸۹/۶۵**	۹۲/۹۱**	۱*	۲/۸۶	۸/۲
تخلخل (%)	۱۶۶/۲**	۱۱۹۸/۴**	۵۰/۰۸**	۵/۶۶	۳/۴
سطح ویژه	۳۵۰/۲۶**	۱۳۹۱/۲**	۱۵/۵۵ <sup>ns</sup>	۲۵/۹	۵/۹
چگالی حقیقی	۰/۱۵**	۰/۲۲**	۰/۰۷۸ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۷۸	۸/۲
چگالی ظاهری	۰/۱۱**	۰/۰۴**	۰/۰۰۵**	۰/۰۰۰۵	۷
عملکرد زغال زیستی (%)	۴۹۴***	۵۸۰**	۴/۶۳ <sup>ns</sup>	۰/۰۷	۴/۵
عملکرد خاکستر (%)	۲۱۴۷**	۸۸/۶۷**	۹/۳۵**	۱/۲۹	۴/۷

میانگین مربعات (MS)

ns، \* و \*\* به ترتیب غیرمعنی‌داری و معنی‌داری در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد.

(۷) گزارش کردند مهمترین دلیل افزایش شوری زغال زیستی در طی فرآیند گرماکافت آزادسازی املاح می‌باشد. کاهش عملکرد زغال زیستی با افزایش دما در زیست‌توده چوب در طی فرآیند پیرولیز سریع توسط کیلوویت و همکاران (۱۶) گزارش شده است. افزایش مقدار هدایت الکتریکی با افزایش دما ممکن است مربوط به افزایش مقدار خاکستر باشد و افزایش میزان اسیدیته (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، سطح ویژه و کاهش میزان چگالی حقیقی می‌تواند به دلیل افزایش ترکیبات فرار حاوی هیدروژن و اکسیژن موجود در زغال‌زیستی باشد و این تغییرات زغال‌های زیستی تولیدی تحت تأثیر ماده اولیه آن‌ها است (۱۳ و ۱۴). برسلین و همکاران (۹) تأثیر دمای پیرولیز و نوع مواد اولیه بر ویژگی‌های بیوچار را مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند با افزایش دمای پیرولیز عملکرد بیوچار در محدوده دمایی ۳۵۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. این شاخص یکی از مهمترین ویژگی‌ها در بررسی صرفه اقتصادی تولید ای ماده به عنوان یک محصول کاربردی مدنظر می‌باشد، یعنی هرچه مقدار آن بیشتر باشد، صرفه اقتصادی در تولید بیوچار از ضایعات آلی بیشتر است. البته در ای باره باید کیفیت بیوچار که اصل دیگر ویژگی‌های آن می‌باشد نیز مدنظر قرار گرفته شود. هرچند دماهای کم یعنی ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس تغییر چندانی بر مقدار چگالی حقیقی نسبت به مواد خام اولیه نداشت اما دمای بالا یعنی دمای ۷۵۰ به مقدار زیادی چگالی حقیقی را افزایش داده بود و مقدار آن در بیوچار تولید شده در دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس تقریباً دو برابر آن در تیمار ۳۰۰ درجه سلسیوس بود. دلیل افزایش مقدار چگالی حقیقی مواد در اثر تبدیل آن به بیوچار می‌تواند ناشی از تغییرات ایجاد شده در ماهیت مواد در طی فرآیند گرماکافت باشد (۹).

نتایج مقایسه میانگین (جدول ۳) نشان داد که دمای فرآیند گرماکافت بر اسیدیته (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، سطح ویژه، چگالی حقیقی و عملکرد زغال‌های زیستی باعث اختلاف معنی‌دار آماری ( $P>0/05$ ) شد. افزایش دمای فرآیند گرماکافت سبب افزایش اسیدیته (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، سطح ویژه و چگالی حقیقی شد و افزایش فرآیند گرماکافت عملکرد زغال‌های زیستی را کاهش داد همچنین نتایج (جدول ۳) نشانگر این است که نوع زیتوده اولیه اثر معنی‌دار آماری بر اسیدیته (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، سطح ویژه، چگالی حقیقی و عملکرد زغال‌های زیستی دارد. سونگ و همکاران (۲۱) افزایش اسیدیته (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) و سطح ویژه زغال زیستی در کود مرغی با افزایش دمای فرآیند پیرولیز از ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد را گزارش کردند، آنان عنوان کردند که این افزایش به علت افزایش مقدار  $K^+$ ،  $Ca^{2+}$ ،  $Mg^{2+}$  و  $Na^+$  در زغال زیستی کود مرغی می‌باشد. گاسکین و همکاران (۱۸) گزارش کردند که زغال زیستی‌های کود مرغی، پوست بادام‌زمینی و چوب درخت کاج تولیدشده در دمای پیرولیز ۴۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب دارای pH ۱/۰/۱، ۵/۱۰ و ۷/۶ می‌باشد. کاهش عملکرد در زغال زیستی چوب درخت کاج توسط وانگ و همکاران (۲۵) گزارش شده است. سینک و همکاران (۲۶) هم، افزایش pH بیوچار برگ خرما با افزایش دمای فرآیند پیرولیز از دمای ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس را گزارش کردند. به طور کلی تخریب حرارتی زیست‌توده در دماهای بالای پیرولیز رخ می‌دهد. با وجود این، با افزایش دمای پیرولیز مواد فرار پیرولیتیکی به مولکول‌های آلی با وزن کم و گاز تبدیل می‌شوند (۱۷). علت افزایش مقدار EC زغال زیستی، تخریب ساختارهای مواد اولیه و آزاد شدن برخی از عناصر ساختمانی و خروج مواد فرار می‌باشد (۸). سان و همکاران



جدول ۳- مقایسه میانگین اثر ساده نوع زیتوده و دمای گرماکافت بر برخی ویژگی‌های زغال‌های زیستی

Table 3. Mean comparison of sample effect biomass type and pyrolysis temperature on some properties of biochar

تیمار	اسیدیته (pH)	قابلیت هدایت الکتریکی (EC)	سطح ویژه	چگالی حقیقی	عملکرد زغال زیستی (%)	
زیتوده	بقایای گندم	۶/۷۸ <sup>d</sup>	۲/۲۲ <sup>d</sup>	۳۷/۷۳ <sup>c</sup>	۱/۰۱ <sup>b</sup>	۴۰/۴۴ <sup>b</sup>
	بقایای یونجه	۷/۹۶ <sup>a</sup>	۳/۷۴ <sup>b</sup>	۵۰/۸۲ <sup>a</sup>	۰/۹۵ <sup>b</sup>	۵۱/۵۰ <sup>a</sup>
	بقایای سیب‌زمینی	۷/۳۸ <sup>b</sup>	۴/۸۳ <sup>a</sup>	۴۳/۸۰ <sup>b</sup>	۰/۹۶ <sup>b</sup>	۳۶/۹۱ <sup>bc</sup>
	خاک اره	۷/۰۷ <sup>c</sup>	۱/۳۳ <sup>e</sup>	۵۲/۸۰ <sup>a</sup>	۷/۹۰ <sup>a</sup>	۳۰/۹۱ <sup>d</sup>
	برگ درخت خرما	۷/۳۷ <sup>b</sup>	۳/۳۰ <sup>c</sup>	۵۱/۰۵ <sup>a</sup>	۱/۲۵ <sup>b</sup>	۳۳/۴۰ <sup>cd</sup>
دمای گرماکافت	۳۰۰ C <sup>o</sup>	۶/۸۴ <sup>c</sup>	۲/۵۸ <sup>c</sup>	۳۷/۲۶ <sup>c</sup>	۰/۹۴ <sup>b</sup>	۴۵/۵۳ <sup>a</sup>
	۴۰۰ C <sup>o</sup>	۷/۳۴ <sup>b</sup>	۳/۱۶ <sup>b</sup>	۴۶/۲۷ <sup>b</sup>	۱/۰۷ <sup>b</sup>	۳۹/۰۸ <sup>b</sup>
	۵۰۰ C <sup>o</sup>	۷/۷۷ <sup>a</sup>	۳/۵۱ <sup>a</sup>	۵۸/۱۸ <sup>a</sup>	۵/۲۳ <sup>a</sup>	۳۱/۲۹ <sup>c</sup>

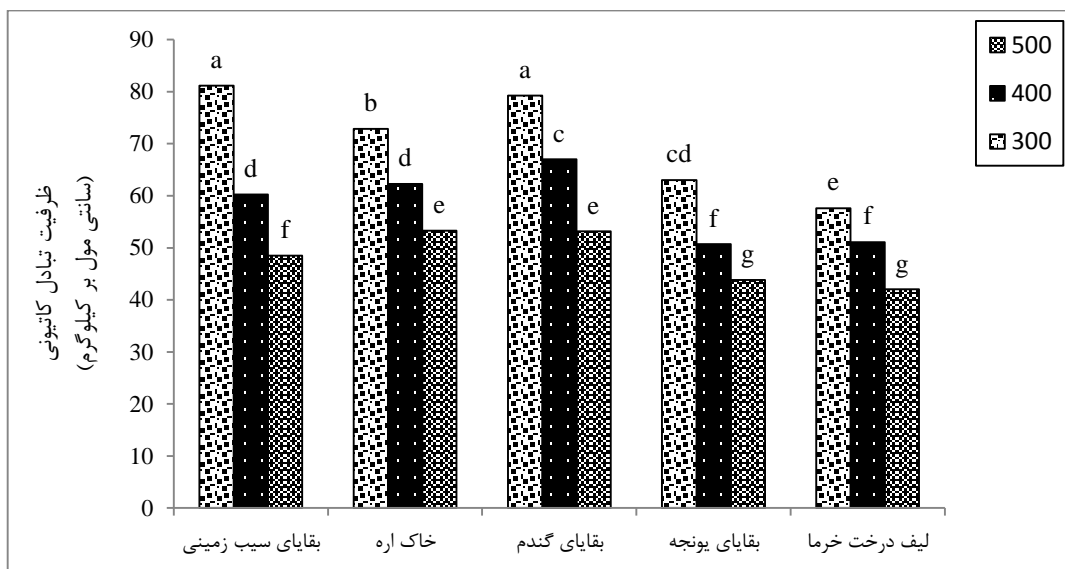
در هر ستون، حروف مشابه نمایانگر عدم اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

#### ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)

هیدروکسیل، کربوکسیلیک و کربونیل باشد. با توجه به نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز زغال‌های زیستی، حضور گروه‌های اکسیژن‌دار می‌تواند عامل افزایش بار منفی سطحی و در نهایت افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی زغال‌زیستی شود و کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی طی افزایش دمای فرآیند گرماکافت می‌تواند در نتیجه اکسیداسیون ترکیبات در زغال‌های زیستی باشد (۱۵، ۲۷، ۲۸). با افزایش درجه حرارت فرآیند 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، ۴۵/۱، ۳۶/۱ و ۲۸/۷ درصد کاهش یافت (۲۹).

نتایج (شکل ۱) نشان می‌دهد که ظرفیت تبادل کاتیونی با افزایش درجه حرارت فرآیند گرماکافت به صورت معنی‌داری ( $P > 0/01$ ) کاهش یافت. با افزایش درجه حرارت فرآیند گرماکافت از ۳۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، ظرفیت تبادل کاتیونی زغال‌های-زیستی لیف درخت خرما، بقایای یونجه، بقایای گندم، خاک اره و بقایای سیب‌زمینی به ترتیب به میزان ۲۷، ۳۱، ۳۳، ۲۷ و ۴۱ درصد کاهش یافتند. بیشترین (۸۱/۸۱) سانتی‌مول بر کیلوگرم) میزان ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) در زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده بقایای سیب‌زمینی در دمای ۳۰۰ درجه سانتی و کمترین (۴۲/۰۶) سانتی‌مول بر کیلوگرم) میزان ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) در زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده لیف درخت خرما در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد (شکل ۱).

افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) این نوع زغال‌زیستی می‌تواند حضور گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار ترکیباتی نظیر فنول،



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل دمای گرماکافت و نوع زیتوده بر ظرفیت تبادل کاتیونی زغال‌های زیستی

در هر ستون، حروف مشابه نمایانگر عدم اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

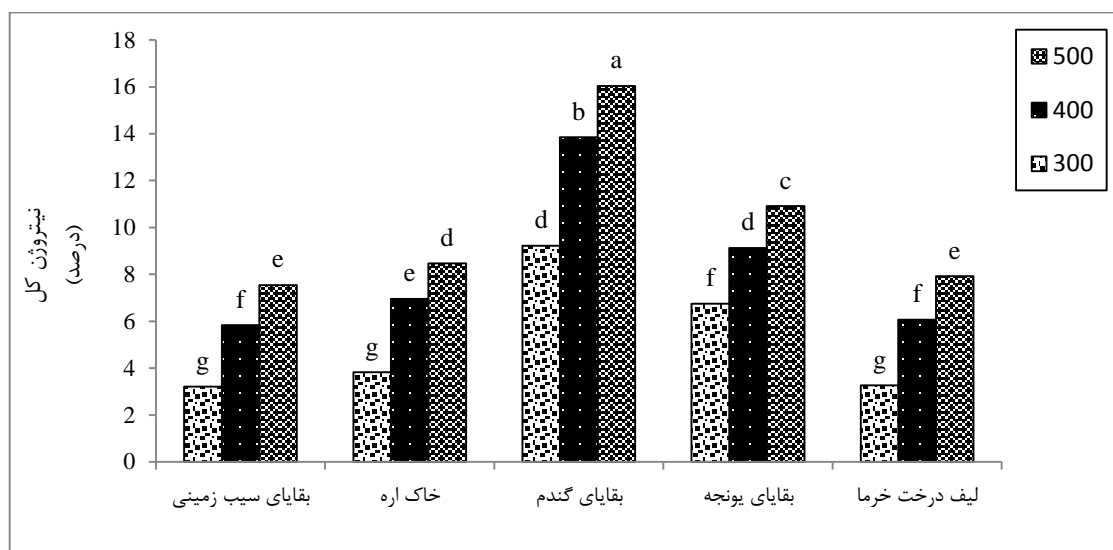
Figure 1. Mean comparisons of interaction effect of different Pyrolysis and type of biomass on the cation exchange capacity (CEC) of biochar in each column, numbers followed by the same letter are not significantly different ( $P < 0.05$ )

افزایش ترکیبات فرار حاوی هیدروژن و اکسیژن موجود در زغال‌زیستی باشد. تغییرات نیتروژن کل زغال‌های زیستی تحت تأثیر ماده اولیه آن‌ها است هر چقدر در ماده اولیه همی سلولز و لیگنین بیشتر باشد، دارای نیتروژن کل پایینی می‌باشند. این یافته‌ها با نتایج وانگ و همکاران (۳۰)، سان و همکاران (۷) و سان و همکاران (۳۱) که گزارش کردند، زغال‌های زیستی تولید شده از زیتوده‌های چوبی به دلیل وجود مقادیر بالای همی سلولز و لیگنین دارای نیتروژن کل پایینی هستند و تغییرات نیتروژن تحت تأثیر زیتوده اولیه می‌باشد، مطابقت دارد. با افزایش دمای پیرولیز مقدار N در بیوچار هرس سیب و بیوچار هرس انگور، افزایش یافت (۱۲) اما در بیوچار کاه و کلش گندم مقدار N با افزایش دما کاهش نشان داد. هرچند بسیاری از محققان گزارش کردند که افزایش دما پیرولیز منجر به کاهش محتوای N می‌شود (۹ و ۳۲).

#### بررسی تغییرات دمای فرآیند گرماکافت بر نیتروژن کل

##### زغال‌های زیستی

نتایج مقایسه میانگین (شکل ۲) نشان داد که تغییرات دمای فرآیند گرماکافت بر نیتروژن کل زغال‌های زیستی حاصل از زیتوده‌های مختلف اثر معنی‌داری داشت ( $P > 0/05$ )، همچنین نتایج مقایسه میانگین نشان می‌دهد که بین میانگین درصد نیتروژن کل زغال‌های زیستی تولید شده از زیتوده‌های مختلف در دماهای ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد اختلاف معنی‌دار آماری وجود دارد ( $P > 0/05$ ). بیشترین میزان نیتروژن کل (۱۶/۰۳ درصد) در زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده بقایای یونجه در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین میزان نیتروژن کل (۳/۲۱ درصد) در زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده بقایای سیب زمینی در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد (شکل ۲). افزایش میزان نیتروژن کل زغال‌های زیستی می‌تواند به دلیل



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل دمای گرماکافت و نوع زیتوده بر نیتروژن کل زغال‌های زیستی

در هر ستون، حروف مشابه نمایانگر عدم اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

Figure 2. Mean comparisons of interaction effect of different Pyrolysis and type of biomass on the total nitrogen of biochar in each column, numbers followed by the same letter are not significantly different ( $P < 0.05$ )

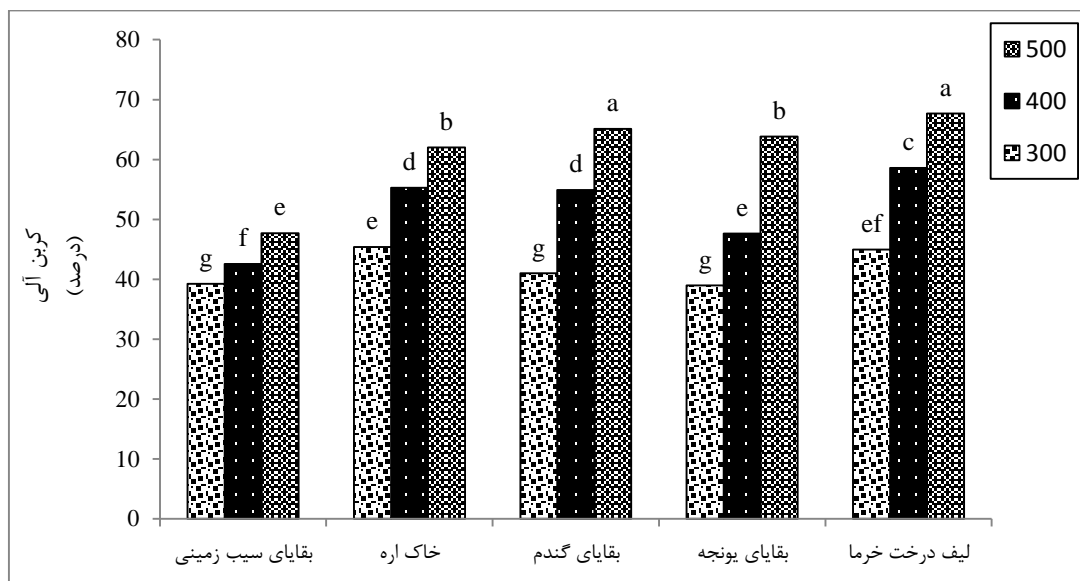
اسیدهای کربوکسیلیک و  $C=O$  (کربونیل) موجود در سطح زغال زیستی حاصل از ساقه‌ی برنج در دمای پایین (۳۰۰ درجه سانتی‌گراد)، با افزایش دما به ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد کاملاً از بین رفته ولی ترکیبات حلقوی کربن در نمونه باقی می‌ماند. تغییرات درصد کربن آلی زغال‌های زیستی بستگی نوع ماده اولیه زیتوده دارد و افزایش درصد کربن آلی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد را می‌توان به خروج مواد فرار و ترکیبات تجزیه‌ناپذیر نسبت داد که طی آن مقدار هیدروژن و اکسیژن زغال‌زیستی کاهش و میزان کربن آلی افزایش می‌یابد که با نتایج ترابیان و همکاران (۳۳)، فرهادی و همکاران (۲۸) و اوچیمییا و اوهنو (۲۹) همسو می‌باشد. تخریب ساختارهای سلولزی و لیگنینی زیتوده اولیه در اثر حرارت می‌تواند منجر به کاهش گروه‌های عاملی قطبی مانند  $C-H_2$ ،  $C-O$  و  $C=O$  و نیز افزایش ساختارهای حلقوی کربن در زغال زیستی شود (۹).

بررسی تغییرات دمای فرآیند گرماکافت بر درصد کربن

#### آلی زغال‌های زیستی

نتایج مقایسه میانگین (شکل ۳) نشانگر اختلاف معنی‌داری ( $P > 0.01$ ) در میانگین درصد کربن آلی به طوری که با افزایش دمای فرآیند گرماکافت از ۳۰۰ درجه تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد درصد کربن آلی زغال‌های زیستی تولیدشده از زیتوده‌های مختلف به صورت خطی افزایش می‌یابد. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که میانگین درصد کربن آلی زغال‌های زیستی تولید شده از زیتوده‌های مختلف در هر سه دمای ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای اختلاف معنی‌دار آماری ( $P > 0.01$ ) می‌باشند و بیشترین (۶۷/۷۰ درصد) و کمترین (۳۸/۹۶ درصد) کربن آلی به ترتیب مربوط به زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده لیف درخت خرما در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده بقایای یونجه در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بود (شکل ۳).

این نتایج با یافته‌های سان و همکاران (۲۱) مطابقت دارد، آنان دریافتند که گروه‌های عاملی  $C-H$  خطی،  $C-O$  خطی



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل دمای گرماکافت و نوع زیتوده بر کربن آلی زغال‌های زیستی در هر ستون، حروف مشابه نمایانگر عدم اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

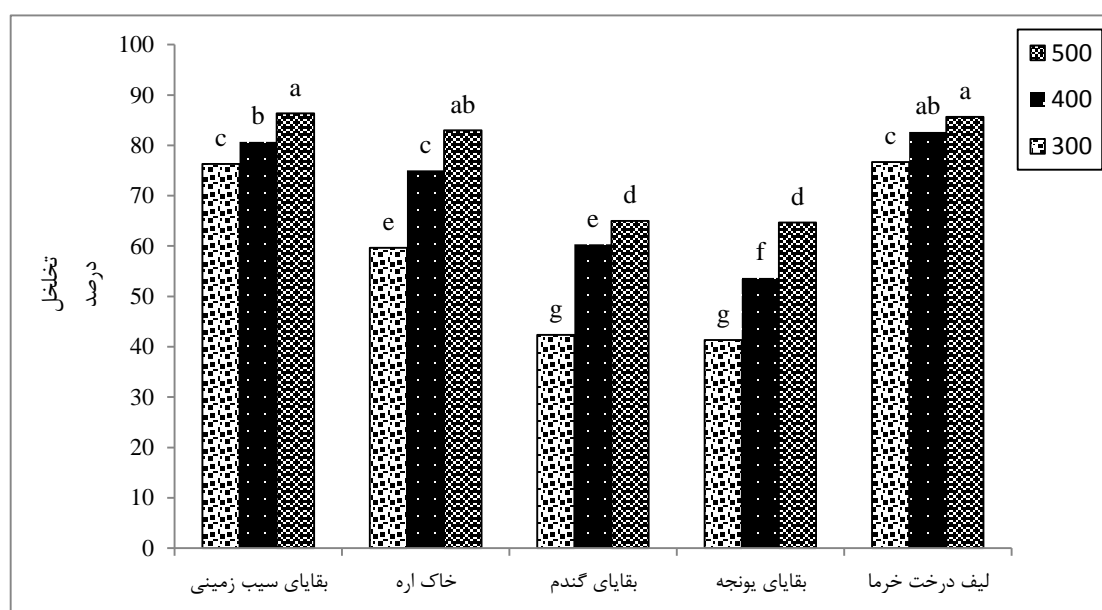
Figure 3. Mean comparisons of interaction effect of different Pyrolysis and type of biomass on the Organic carbon of biochar in each column, numbers followed by the same letter are not significantly different ( $P < 0.05$ )

۵۰۰ درجه سانتی‌گراد که منجر به تغییرات شدید در شرایط منافذ زغال زیستی و تشکیل منافذ بیشتر و در نتیجه سبب افزایش تخلخل می‌شود.

دلیل افزایش مقدار تخلخل زیتوده اولیه در طی افزایش دمای گرماکافت و تبدیل آن‌ها به زغال زیستی می‌تواند ناشی از تغییرات ایجادشده در ماهیت مواد در طی فرآیند گرماکافت باشد. خان‌محمدی و همکاران (۶) گزارش دادند که فرآیند آهسته گرماکافت ضمن اینکه تا حدی موجب جداسازی و تبخیر مواد سبک‌تر از زیتوده اولیه می‌شود نیز موجب تبدیل و تغییر در نظم کربن در ساختار زغال‌زیستی می‌شود و تغییرات ایجاد شده طی فرآیند گرماکافت بستگی به ماهیت مواد اولیه دارد. کان و پیگناتلو (۳۴) و وانگ و همکاران (۸) بیان کردند درصد تخلخل زغال زیستی در اثر افزایش تدریجی دمای فرآیند گرماکافت روند افزایشی دارد.

#### بررسی تغییرات دمای فرآیند گرماکافت بر درصد تخلخل زغال‌های زیستی

نتایج مقایسه میانگین (شکل ۴) نشان داد که با افزایش تدریجی دمای فرآیند گرماکافت از ۳۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد میانگین درصد تخلخل زغال‌های زیستی تولیدشده از زیتوده‌های مختلف به طور معنی‌داری ( $P > 0/01$ ) افزایش یافت و زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده بقایای سیب زمینی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد با ۸۶/۳۳ درصد دارای بیشترین و زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده بقایای یونجه در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با ۴۱/۳۳ درصد دارای کمترین درصد تخلخل می‌باشند، همچنین نتایج مقایسه میانگین (شکل ۴) نشان می‌دهد که افزایش دمای فرآیند گرماکافت از ۴۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد اختلاف معنی‌دار ( $P > 0/01$ ) آماری در درصد تخلخل زغال‌زیستی تولید شده زیتوده لیف درخت خرما نشده است. احتمالاً زغال زیستی تولید شده از بقایای سیب زمینی به دلیل ماهیت و ساختار منفذ گونه مواد اولیه و تسریع فرآیند تبخیر ترکیبات آلی در دمای



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل دمای گرماکافت و نوع زیتوده بر تخلخل زغال‌های زیستی

در هر ستون، حروف مشابه نمایانگر عدم اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

Figure 4. Mean comparisons of interaction effect of different Pyrolysis and type of biomass on Porosity of biochar in each column, numbers followed by the same letter are not significantly different ( $P < 0.05$ )

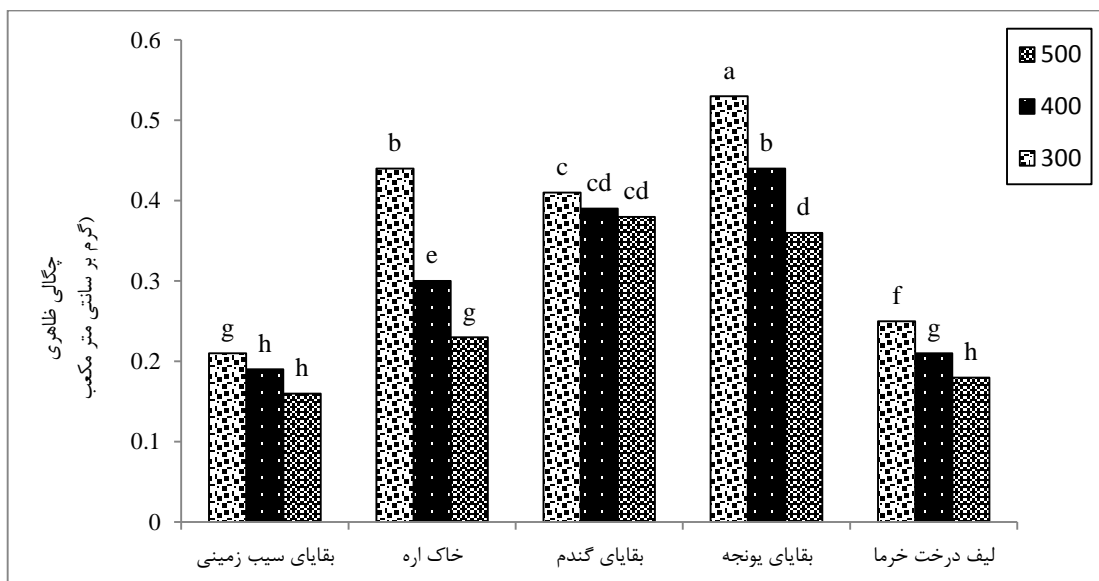
احتمالا دمای بالا سبب سست شدن و شکسته شدن پیوندها در زیتوده شده و تراکم بافت کاهش می‌دهد.

هوانگ (۳۵) گزارش داد چگالی ظاهری خاک مزرعه حدود ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد که زغال‌زیستی کاه و کلش می‌تواند با کاهش چگالی ظاهری باعث اصلاح آن شود نیز چگالی ظاهری زغال‌زیستی به ماهیت ماده اولیه و فرآیند پیرولیز بستگی دارد همچنین چگالی ظاهری یکی از ویژگی‌های فیزیکی مهم زغال‌زیستی می‌باشد. هوم و همکاران (۳۶) بیان کردند که چگالی ظاهری زغال‌زیستی تولید شده از چوب در کوره‌های سنتی دامنه‌ای بین ۰/۴۳ - ۰/۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب دارد که نسبت به ماده خام کاهش داشته ولی هیچ روند مشخصی را با افزایش دما نشان نداد. سان و همکاران (۷) گزارش کردند که چگالی ظاهری بیوچارهای تولید شده در دماهای ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۰/۳۱، ۰/۳۲، ۰/۳۲، ۰/۳۲ و ۰/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب گزارش شده بود که روند افزایشی چگالی ظاهری با افزایش دمای پیرولیز با نتایج تحقیق حاضر همخوانی داشت.

#### بررسی تغییرات دمای فرآیند گرماکافت بر چگالی ظاهری

##### زغال‌های زیستی

با توجه به نتایج مقایسه میانگین (شکل ۵) چگالی ظاهری زغال‌های زیستی تولید شده از زیتوده‌های مختلف با افزایش دما فرآیند گرماکافت به طور معنی‌داری ( $P > 0/01$ ) کاهش یافت، همچنین افزایش دمای فرآیند گرماکافت بر زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده بقایای گندم اثر معنی‌دار آماری نداشت و افزایش دمای فرآیند گرماکافت از ۴۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد سبب کاهش معنی‌داری در چگالی ظاهری زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده بقایای سیب زمینی نشد ( $P > 0/01$ ). بیشترین مقدار چگالی ظاهری (۰/۵۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) مربوط به زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده بقایای یونجه در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و کمترین مقدار چگالی ظاهری (۰/۱۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب) مربوط به زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده بقایای سیب زمینی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. تفاوت مشاهده شده در چگالی ظاهری زغال‌های زیستی تولید شده به ماهیت زیتوده اولیه و فرآیند گرماکافت بر می‌گردد و



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل دمای گرماکافت در نوع زیتوده بر چگالی ظاهری زغال‌های زیستی در هر ستون، حروف مشابه نمایانگر عدم اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

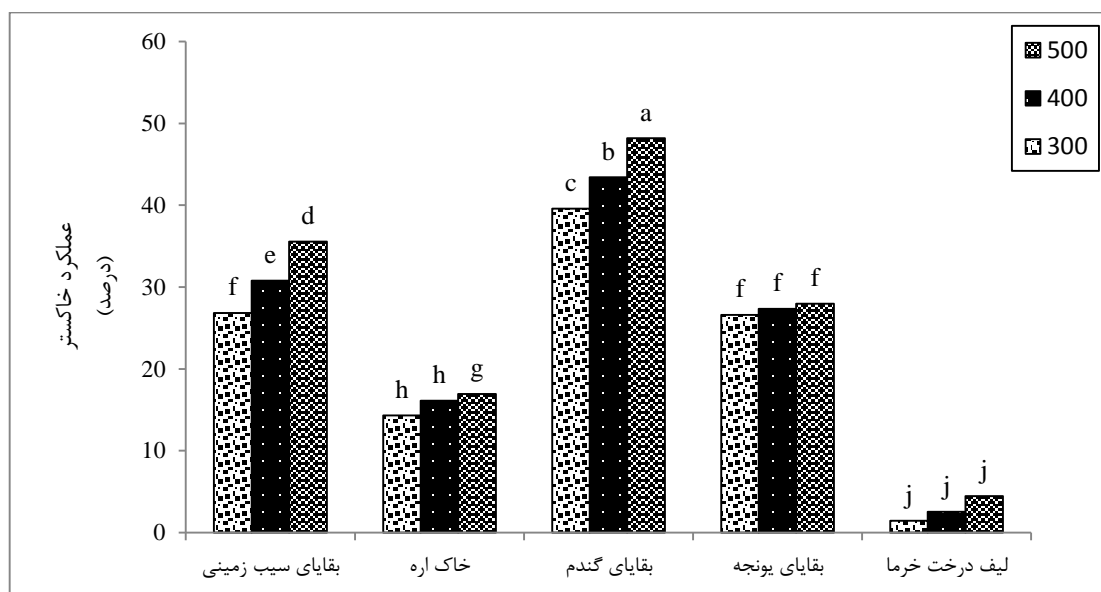
Figure 5. Mean comparisons of interaction effect of different Pyrolysis and type of biomass on the bulk density of biochar in each column, numbers followed by the same letter are not significantly different ( $P < 0.05$ )

ساختارهای لیگنین و سلولز می‌باشد. لیانگ و همکاران (۱۵) بیان کردند در دماهای بالاتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، مواد آلی تحت تجزیه حرارتی قرار گرفته و پیوندهای شیمیایی رطوبت خود را از دست می‌دهند. افزایش درصد خاکستر در زغال‌زیستی چوب درخت کاج در دمای بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس توسط وانگ و همکاران (۲۵) گزارش شده است. همچنین افزایش مقدار خاکستر با افزایش دما در شلتوک برنج و کود مرغی گزارش شده است (۳۷، ۳۸). افزایش مقدار خاکستر زغال‌زیستی با افزایش درجه حرارت به دلیل افزایش تدریجی غلظت مواد معدنی و تخریب حرارتی مواد لیگنوسولولزی می‌باشد (۳۹، ۴۰). به‌طور کلی مقدار درصد خاکستر در بیوجارها، بستگی به نوع ترکیبات تشکیل دهنده آن دارد و هرچه ترکیباتی که قابلیت سوخت و معدنی شدن ندارند در مواد استفاده شده برای تولید بیوجار بیشتر باشد (مانند ترکیبات سیلیکاتی (۴۰)، درصد بیشتری از آن ماده به صورت خاکستر باقی می‌ماند (۷، ۴۲).

#### بررسی تغییرات دمای فرآیند گرماکافت بر عملکرد خاکستر زغال‌های زیستی

نتایج مقایسه میانگین (شکل ۶) نشانگر آن است که مقدار خاکستر زغال‌های زیستی تولیدشده از زیتوده‌های بقایای گندم، خاک اره و بقایای سیب زمینی با افزایش دما فرآیند گرماکافت به طور معنی‌داری ( $P > 0/01$ ) افزایش یافتند همچنین نتایج مقایسه میانگین نشان داد که افزایش دمای گرماکافت بر زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده لیف درخت خرما و بقایای یونجه اثر معنی‌دار آماری نداشت و افزایش دما از ۴۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بر زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده خاک اره باعث تفاوت معنی‌دار آماری شد ( $P > 0/01$ ). کمترین مقدار عملکرد خاکستر (۱/۴۳ درصد) در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و بیشترین مقدار عملکرد خاکستر (۴۸/۱۳ درصد) در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب مربوط به زغال‌زیستی تولید شده از زیتوده لیف درخت خرما و بقایای گندم بود.

افزایش مقادیر خاکستر زغال‌های زیستی در دماهای بالا می‌تواند به علت دهیدراسیون گروه‌های هیدروکسیل و تجزیه حرارتی



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل دمای گرماکافت در نوع زیتوده بر عملکرد خاکستر زغال‌های زیستی در هر ستون، حروف مشابه نمایانگر عدم اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

Figure 6. Mean comparisons of interaction effect of different Pyrolysis and type of biomass on the ash yield of biochar in each column, numbers followed by the same letter are not significantly different ( $P < 0.05$ )

### نتیجه‌گیری کلی

دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان بهترین زغال زیستی قابل دسترس توصیه می‌شود ولی تعیین کاربرد زغال‌های زیستی حاصل از زیتوده‌های مورد مطالعه در دمای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، نیاز به بررسی بیشتر دارد.

در فرآیند تولید زغال زیستی، نوع زیتوده و دمای فرآیند گرماکافت تأثیر به‌سزایی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زغال زیستی داشتند. با افزایش دمای فرآیند گرماکافت از ۳۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد مقدار عملکرد زغال زیستی، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و چگالی ظاهری کاهش یافت ولی اسیدیته (pH)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، کربن پایدار، نیتروژن کل، تخلخل، سطح ویژه، عملکرد و مقدار خاکستر در زغال زیستی‌های تولید شده افزایش نشان داد. زغال زیستی‌های تولید شده در دماهای بالا، مقدار بیشتری از کربن و مقدار کمتری عملکرد را داشتند. براساس نتایج و با در نظر گرفتن جنبه‌های مثبت تثبیت کربن و افزایش ماده آلی خاک و نیز عملکرد زغال زیستی در تولید انبوه و اقتصادی این ماده، می‌توان به ترتیب اولویت زغال‌های زیستی حاصل از بقایای یونجه، خاک اره، لیف خرما، بقایای سیب زمینی و بقایای گندم را جهت بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و در نهایت افزایش راندمان جذب عناصر غذایی از خاک، پیشنهاد کرد همچنین زغال زیستی حاصل از بقایای یونجه در

### References

- Ahmad Yousefi, M., Kamkar, B., Amiri Nezhad, M. and Gharekhloo, J. 2019. Assessment of the effect of different chemical fertilizers, biochar and Trichoderma fungi treatments at mother plant on germination and other hybrid corn KSC 704 seed germination components in maternal growth under accelerated aging test. Iranian Journal of Seed Science and Research, 6(1): 133-144. (Journal of Seed Science and Resarch). (In Persian)
- Hooker, M., Herron, G., and Pena, P. (1982) Effects of residue burring removal, and incorporation on irrigated

- C.A.(ed.). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, The American Society of Agronomy. pp: 595-624.
11. 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.
  12. 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.
  13. 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.
  14. 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.
  15. Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J.O., Thies, J., Luizão F.J., Petersen, J., and Neves, E.G. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5): 1719–1730.
  16. Keiluweit M P, Nico S, Johnson MG. 2010. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environmental Science and Technology*, 44(4): 1247-1253.
  17. Inal, A., Gunes, A., Sahin, O., Taskin, M.B., and Kaya, E.C. 2015. Impacts of biochar and processed poultry manure, applied to a calcareous soil, on the cereal crop yields and chemical properties. *Soil Sci.* 46: 122-126.
  3. Yousefi, M., Shariatmadari, H., and Hajabasi, M.A. 2007. Measurement 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 Persian)
  4. Lehmann, J. 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5: 381–387.
  5. Schultz, H. and Bruno, G. 2012. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175: 410–422.
  6. Khanmohammadi, Z., Afyuni, M., and Mosaddeghi, M.R. 2015. Effect of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of sewage sludge biochar. *Waste Management and Research*, 33(3):275-283.
  7. Sun, J., Norouzi, O. and Mašek, O., 2021. A state-of-the-art review on algae pyrolysis for bioenergy and biochar production. *Bioresource technology*, p.126258.
  8. Wang, Y., Ma, X., Saleem, M., Yang, Y., & Zhang, Q. (2021). Effects of corn stalk biochar and pyrolysis temperature on wheat seedlings growth and soil properties stressed by herbicide sulfentrazone. *Environmental Technology & Innovation*, 102208.
  9. Berslin, D., Reshmi, A., Sivaprakash, B., Rajamohan, N. and Kumar, P.S., 2021. Remediation of emerging metal pollutants using environment friendly biochar-Review on applications and mechanism. *Chemosphere*, p.133384.
  10. Bremner, J.M., and Mulvaney, C.S., 1982. Nitrogen—total. In: Black,



25. Wang, T, Camps-Arbestain M, Hedley M, Bishop P. 2012. Predicting phosphorus bioavailability from highash biochars. *Plant and Soil*, 357, 173-187.
26. 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.
27. Asif Naeem, M., Khalid, M., Arshad, M., and Ahmad, R. (2014). Yield and nutrient composition of bichar produced from different feedstocks at varying pyrolytic temperatures. *Pak. J. Agri. Soil sci.* Vol. 51(1): 75-82.
28. Farhadi, E., Reyhanitabar, A., and Oustan, Sh. 2018. Impact of pyrolysis temperature and feedstock sources on physiochemical characteristics of biochar. Testis Master of Science Degree in Soil Science Soil Chrmistry and Fertility. Department of Soil Science, university of Tabriz.
29. Uchimiya, T., and Ohno, Z.He. 2013. Pyrolysis temperature dependent release of dissolved organic carbon from plant, manure, and biorefinery wastes. *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 104: 1. 84-94.
30. Wang, Y., Hu, Y., Zhao, X., Wang, S., and Xing, G. 2013. Comparisons of biochar properties from wood material and crop residues at different temperatures and residence time. *Energy and Fuels*, 27: 10. 5890-5899.
31. Sun, E.W., Bruun, E., Arthur, L.W., Jonge, P., Moldrup, H., Nielsen, H., and Elsgaard, L. 2014. Effect of biochar on aerobic processes, enzyme activity, and crop yields in two sandy loam soils. *Biology and Fertility of Soils.* 50: 7. 1087-1097.
- growth of bean and maize. *Soil Use Management*, 31: 106–113.
18. Gaskin JC, Steiner. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Trans. Asabe*, 51(6): 2061-2069.
19. Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E., and Bol, R. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105: 47-82.
20. Singh, B., Mei Dolk, M., Shen, Q., and Camps-Arbestain, M. 2017. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. In: *Biochar: A Guide to Analytical Methods*, Chapter 3, Singh, B., Camps-Arbestain, M., and Lehmann J., (Eds.). Publisher CSIRO, PP. 23-38.
21. Song, W. and Guo, M. 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94: 138-145.
22. Flint, A.L., and Flint, L.E. 2002. Particle density. In: Dane, J.H. and Topp, G.C. (Eds.), *Methods of soil Analysis- Part 4. Physical Methods- ASA and SSSA Book Series No. 5. Soil Sci, Madison*, PP. 299-240.
23. Blake, G.R., and Hartge, K.H. 1986. Particle density. In: Klute, A. (ed). *Methods of soil Analysis- Part 1. Physical and Mineralogical Methods.* 2nd Ed. Agron. Monogr, 9. ASA and SSSA, Madison, WI. PP. 377-382.
24. 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.

- properties of bio-oil produced at various temperatures from pine wood using an auger reactor. *Bioresource Technology*, 101(21): 8389-8395.
39. Demirbaş A. 2001. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11): 1357-1378.
40. Joseph S, Downie A, Munroe P, Crosky A. 2007. Biochar for carbon sequestration, reduction of greenhouse gas emissions and enhancement of soil fertility; A review of the materials science. *Proceeding of the Australian Combustion Symposium* pp. 130-133.
41. Kwon, S. and Pignatello, J.J. 2005. Effect of natural organic substances on the surface and adsorptive properties of environmental black carbon (char): pseudo pore blockage by model lipid components and its implications for N<sub>2</sub>-probed surface properties of natural sorbents. *Environmental Science and Technology*. 39(20):7932-7939.
42. Sun, K., Ro, K., Guo, M.X., Novak, J., Mashayekhi, H. (2011) Sorption of bisphenol A, 17 $\alpha$ -ethinylestradiol and phenanthrene on thermally and hydrothermally produced biochars. *Bioresour Technol.* 102:5757-5763.
32. Tsai W.T., Liu S.C., Chen H.R., et al. 2012. Textural and chemical properties of swine-manure-derived biochar pertinent to its potential use as a soil amendment. *Chemosphere*, 89: 198-203.
33. Torabian, Sh., Farhangi-Abriz, S., and Rathjen, J. 2018. Biochar and lignite affect H<sup>+</sup>-ATPase and H<sup>+</sup>-PPase activities in root tonoplast and nutrient contents of mung bean under salt stress *Plant Physiology and Biochemistry*, 129:1.141-149.
34. Laird, D.A., Fleming, P., Davis, D.D., Horton, R., Wang, B., and Karlen, D.L. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3): 443-449.
35. Hwang I, Ouchi Y, Matsuto T. 2007. Characteristics of leachate from pyrolysis residue of sewage sludge. *Chemosphere*, 68 (10): 1913-1919.
36. Horne PA, and Williams PT.1996. Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass. *Fuel*, 75(9): 1051-1059.
37. 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.
38. Thangalazhy-Gopakumar S S, Adhikari, 2010. *Physiochemical*