

## تأثیر زغال زیستی بر ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی در خاک اسیدی و دینامیک کربن آلی خاک

خاطره سرمستی<sup>۱\*</sup>، فاطمه ارشدی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی khatereh.sarmasti@gmail.com

### چکیده

زغال زیستی یک ماده جامد و غنی از کربن است که در شرایط کمبود یا فقدان اکسیژن از تجزیه حرارتی طیف وسیعی از ضایعات آلی تهیه می‌شود و یک مکانیسم بلند مدت برای ترسیب کربن در خاک محسوب می‌شود. در واقع تجزیه حرارتی ضایعات آلی با دمای پایین ماده‌ای شبیه زغال چوب که دارای ظرفیت بالا برای جذب عناصر غذایی می‌باشد را تحت عنوان زغال زیستی ایجاد می‌کند. این ماده می‌تواند مانع از غنی شدن اتمسفر از دی‌اکسید کربن ناشی از کشاورزی و فعالیت‌های انسانی شود. به منظور بررسی تأثیر نوع و مقدار زغال زیستی مصرفی بر ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی یک خاک اسیدی آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی به اجرا درآمد. تیمارهای مورد بررسی شامل انواع زغال زیستی (زغال زیستی سبوس برنج، بقایای درخت راش و پوست پسته) و سطوح مختلف آن‌ها (سطح دو و چهار درصد) بودند که با سه تکرار در یک خاک اسیدی به اجرا درآمدند. نمونه‌ها به مدت سه ماه در شرایط رطوبت زراعی خوابانیده شدند و پس از گذشت سه ماه خصوصیات شیمیایی خاک اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که زغال زیستی تأثیر معنی‌داری بر مقدار کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل جذب، کلسیم، پتاسیم و منیزیم قابل عصاره‌گیری، ظرفیت تبادل کاتیونی و pH خاک اسیدی داشت. تأثیر زغال‌های زیستی مختلف بر غلظت عناصر متفاوت بود به طوری که بیشترین مقدار کربن، نیتروژن کل (۱۰۰ درصدی) و کلسیم قابل عصاره‌گیری (۴۵/۱ درصدی) از زغال زیستی سبوس برنج و بیشترین غلظت فسفر قابل جذب (۱۶۲/۲ درصدی)، پتاسیم (۴۶/۶ درصدی) و منیزیم قابل عصاره‌گیری (۵۲/۲ درصدی) و مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی (۵۱/۶ درصدی) از زغال زیستی پوست پسته حاصل شد و زغال زیستی حاصل از بقایای راش بیشترین تأثیر را بر اسیدیته خاک داشت (۱۴/۸ درصدی) (کاربرد ۴ درصدی بیوپار در مقایسه با تیمار شاهد). کاربرد زغال زیستی حاصل از بقایای راش در سطح ۴ درصد موجب افزایش pH در خاک‌های اسیدی و رشد بهتر گیاهان شده و کاربرد زغال زیستی حاصل از پوست پسته می‌تواند مانع از شستشوی عناصر غذایی از خاک شود.

واژگان کلیدی: زغال زیستی، خصوصیات شیمیایی، زیست‌توده، کربن.

## The effect of biochar on chemical and biological characteristics in acidic soil and soil organic carbon dynamics

K. Sarmasti<sup>1</sup>, F. Arshadi<sup>2</sup>

Received: September 11, 2022

Accepted: January 18, 2023

1. Ph.D. Student of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. MSc. Student of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

\* Corresponding Author, Email: khatereh.sarmasti@gmail.com

### Abstract

Biochar is a carbon-rich, solid material produced by the thermal decomposition of a wide variety of organic waste in an oxygen-free environment; it is considered a long-term mechanism for carbon sequestration in soil. In fact, the thermal decomposition of organic material with low temperatures converts these materials to like wood coal ones called biochar that involve a high capacity for absorbing nutrient elements. Biochar can prevent the enrichment of the atmosphere from carbon dioxide that resulted from agriculture and anthropogenic activities. To study the effects of biochar on the chemical properties of acidic soils, an experiment was conducted in a completely randomized block design. The treatment under investigation included different kinds of biochar rice bran, beech tree residues, and pistachio shell at three levels (2 and 4 percent) which were applied to the soil in three replications. The samples were laid under field capacity (FC) humidity conditions for three months; afterward, the soil's chemical properties were measured. The results showed that biochar significantly affected the amounts of organic carbon, total nitrogen, calcium, extractable magnesium, cation exchange capacity, and acidic soil pH. Depending on the kind of biochar used, the concentrations of the nutrients were different. Maximum amounts of carbon, total nitrogen (100%), and extractable calcium (45.1%) were obtained from rice bran biochar; the highest concentration for absorbable phosphorous (162.2%), potassium (46.6%), extractable magnesium (52.2%), and the amount of cation exchange capacity (51.6%) resulted from pistachio shells biochar. Also, the biochar produced from beech residues left its maximum effect on the soil acidity (14.8%) (Application of 4% biochar compared to the control treatment). The application of biochar obtained from beech residues at the level of 4% increases the pH in acidic soils and improves the growth of plants, and the application of biochar obtained from pistachio shells can prevent the leaching of nutrients from the soil.

**Key words:** Biochar, Chemical properties, Biomass, Carbon.

## مقدمه

آگاهی از خواص فیزیکی و شیمیایی زغال زیستی برای درک چگونگی ایفای نقش زغال زیستی در یک نوع خاص ضروری است. زغال زیستی به عنوان یک مخزن ماده آلی برای افزایش و حفظ بهره‌وری خاک می‌باشد. گروه عاملی کربوکسیلات موجود در زغال زیستی ظرفیت تبادل کاتیونی و نسبت اکسیژن به کربن زغال زیستی را افزایش می‌دهد و باعث افزایش توانایی نگه‌داری مواد غذایی آن می‌شود (Glaser et al., 2001). زغال زیستی به نگه‌داری و یا افزایش چرخه‌ی مواد غذایی کمک می‌کند و یک مخزن پایدار کربن آلی برای خاک است (Gaskin et al., 2008). زغال زیستی برای بهبود و حفظ بهره‌وری خاک بسیار مناسب است (Lehmann, 2007). افزودن زغال زیستی به خاک‌های به شدت آبخش‌یافته و خاک‌های غیربارور، خیلی سریع فراهمی کاتیون‌های بازی را افزایش می‌دهد (Liang et al., 2006) و به‌طور قابل توجهی عملکرد محصول را در زمان کمبود مواد غذایی بهبود می‌دهد. اثرات مثبت شیمیایی قابل توجهی در اثر کاربرد زغال زیستی در خاک زراعی گزارش شده است و شامل مواردی مانند افزایش pH خاک، کاهش نیاز به آهک‌دهی خاک اسیدی (Chan et al., 2007; Novak et al., 2009; Larid et al., 2010; Van, 2010; Peng et al., 2011) افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) (Chan et al., 2007; Larid et al., 2010; Van et al., 2010; Peng et al., 2011)؛ کاهش آبخش‌ی نیتروژن و متعاقب آن کاهش نیاز به کودهای حاوی نیتروژن (Chan et al., 2007; Van et al., 2010) می‌باشد. زغال زیستی با کاهش تحرک فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی خاک مانند حشره‌کش‌ها به عنوان یک ترمیم‌کننده‌ی زیستی عمل می‌کند (Hilber et al., 2009). زغال زیستی به دلیل داشتن pH قلیایی می‌تواند در خاک‌های اسیدی واکنش خاک را در جهت مطلوب برای اکثر محصولات زراعی تغییر دهد (Chan and Xu, 2009). در درجه اول خاکستر زغال زیستی واکنش خاک را تعدیل می‌کند. ظرفیت تبادل کاتیونی بالای زغال

زیستی ناشی از افزایش چگالی بار در واحد سطح ماده‌ی آلی است که باعث افزایش اکسیداسیون زیاد سطح می‌شود و همچنین در نتیجه افزایش سطح ویژه برای جذب کاتیون و یا ترکیبی از این دو عامل است (Atkinson et al., 2010). اشتاینر و همکاران (۲۰۰۸) تایید کردند که زغال زیستی مانند یک جاذب عمل کرده و بدین ترتیب آبخش‌ی نیتروژن را کاهش داده و بازده کارایی نیتروژن را افزایش می‌دهد. افزودن زغال زیستی به خاک باعث زیاد شدن پایداری مواد آلی و متعاقب آن باعث کاهش آزادسازی مواد غذایی از مواد آلی شده و بدین ترتیب فراهمی مواد غذایی را در خاک افزایش می‌دهد (Lehmann and Rondon, 2006). سوهمی و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند زغال زیستی به دلیل کنترل پخشیدگی آلودگی‌ها و مدیریت ضایعات آلی می‌تواند به‌خوبی کیفیت محیط زیست را کنترل کند. تبدیل کردن ضایعات کشاورزی به زغال زیستی موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های این ضایعات می‌شود (Van Zwieten et al., 2010). ضایعات کشاورزی به دلیل داشتن توانایی فراهم نمودن مواد غذایی مورد نیاز گیاهان مانند کربن، نیتروژن، پتاسیم، فسفر، کلسیم و منیزیم دارای مزایای کشاورزی زیادی هستند و اگر این ضایعات برای تولید زغال زیستی استفاده شوند می‌تواند از استفاده بی‌رویه کودهای شیمیایی جلوگیری کند (Larid, 2008) و از تخلیه شدن محتوی کربن آلی خاک جلوگیری کند (Gaskin et al., 2008). زغال زیستی برای سال‌های متمادی در برابر تجزیه ریز موجودات خاک مقاومت می‌کند (Zimmerman, 2010). یکی از معایب بزرگ مخلوط کردن زیست توده با خاک در مقابل کاربرد زغال زیستی در خاک این است که ریز موجودات خیلی سریع زیست توده‌ی آلی را تجزیه می‌کنند و زیست توده نمی‌تواند برای مدت زیادی در خاک باقی بماند (Xu et al., 2006) در مقابل زغال زیستی به‌کندی در خاک تجزیه می‌شود (Gaskin et al., 2008). بنابراین یک گزینه مناسب و طولانی برای سکوستراسیون کربن در خاک می‌باشد و به همین دلیل

داده شدند. قطعات خرد شده به مدت ۷۲ ساعت درون دستگاه آون در دمای ۵۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و خشک شدند. سپس بقایای گیاهی داخل کوره الکتریکی با حضور گاز آرگون گذاشته شد و در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس به مدت یک ساعت نگه‌داری و پس از سپری شدن زمان ماندگاری، کوره خاموش و زغال زیستی حاصل تا رسیدن به دمای اتاق درون کوره خنک گردید (Lee et al., 2013). پس از تهیه زغال‌های زیستی، آن‌ها را در هاون کوبیده و سپس از الک ۰/۵ میلی‌متر عبور داده شد و با نسبت‌های دو و چهار درصد با سه کیلوگرم خاک اسیدی مخلوط شده و خاک‌ها درون گلدان‌های در شرایط رطوبت زراعی و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت سه ماه خوابانیده شدند. پس از گذشت سه ماه از گلدان‌ها نمونه برداری انجام و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها در نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید. آزمایشات عمومی خاک از جمله بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee and Bider, 1989)، واکنش خاک (pH) (Carter and Gregorich, 2008)، هدایت الکتریکی (EC) (Carter and Gregorich, 2008)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون (Goh et al., 1993)، ماده‌آلی به روش واکلی و بلاک (Nelson and Summer, 1982)، نیتروژن کل در خاک به روش کج‌دال (Bremner and Mulvaney, 1982)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) (Khaledian et al., 2017)، فسفر قابل جذب خاک اسیدی با استفاده از روش بری (Irving et al., 1990)، عناصر کم مصرف قابل جذب خاک به وسیله دستگاه جذب اتمی (Page et al., 1992)، کاتیون‌های تبدلی خاک تیمار شده با زغال زیستی (Bower, 1966) و کربن‌آلی و نیتروژن کل خاک تیمار شده با زغال زیستی با استفاده از دستگاه CHNSO آنالیزر مدل Costech تعیین و به صورت درصد کربن‌آلی و نیتروژن موجود در خاک گزارش گردید.

زغال زیستی برای اصلاح خاک موثرتر از زیست‌توده خام است (Glaser, 2001). سکوستراسیون کربن از طریق بهبود ساختمان خاک، افزایش فراهمی و کارایی عناصر غذایی و کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌تواند اثر مستقیم بر روی خاک داشته باشد (Lal, 2007). بنابراین سکوستراسیون کربن در خاک‌های کشاورزی یک دست-آورد مهم برای بازیابی خاک‌های آلی تخریب شده محسوب می‌شود. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر بیوچار حاصل از سبوس برنج، پوست پسته و بقایای راش زیست‌فراهمی عناصر غذایی در خاک اسیدی و همچنین تأثیر آن بر pH و ظرفیت تبادل کاتیونی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر زغال زیستی بر ویژگی‌های خاک اسیدی، سه نوع زغال زیستی تولیدی هر کدام در دو سطح دو و چهار درصد مصرف شدند و تیمار بدون مصرف زغال زیستی به عنوان شاهد در نظر گرفته شد. بنابراین در این آزمایش شش تیمار حاوی انواع و سطوح مختلف زغال زیستی و یک تیمار شاهد و در مجموع هفت تیمار وجود داشت که در قالب طرح کاملاً تصادفی اعمال گردیدند. زغال زیستی با استفاده از سبوس برنج<sup>۱</sup> (RSB)، بقایای درخت راش<sup>۲</sup> (BTB) و پوست پسته<sup>۳</sup> (PCB) تولید شدند. سبوس برنج و بقایای درخت راش از مناطق شمالی کشور (شهرستان لاهیجان) با طول جغرافیایی " ۵۸/۴۸ ' ۰۰ ° ۵۰ و عرض جغرافیایی " ۱۹/۹۲ ' ۱۳ ° ۳۷ و پوست پسته از مناطق جنوبی کشور (هفت تپه شهرستان اهواز) با طول جغرافیایی " ۱۲/۱۳ ' ۲۳ ° ۴۸ و عرض جغرافیایی " ۴۵/۹۱ ' ۰۳ ° ۳۲ تهیه شدند. خاک اسیدی مورد مطالعه از شمال کشور تهیه شد (شهرستان لاهیجان و با مختصات ذکر شده). برای تهیه بیوچار ابتدا بقایای گیاهی با استفاده از دستگاه خردکن به قطعات کوچک تبدیل شده و از الک یک میلی‌متری عبور

<sup>3</sup> PCB (Pistachio Crust derived Biochar)

<sup>1</sup> RSB (Rise Straw derived Biochar)

<sup>2</sup> BTB (Beech Tree residues derived Biochar)

کننده از کل دی‌اکسیدکربن متصاعد شده کسر شود و میزان دی‌اکسیدکربن واقعی اندازه‌گیری گردد. محاسبه اختلاف حجم اسید مصرفی برای نمونه شاهد و نمونه خاک در تیتراسیون و قرار دادن این مقدار در رابطه زیر مقدار دی‌اکسیدکربن تولید شده در خاک محاسبه گردید.

$$C_t = \frac{(B - S) \cdot N \cdot E \cdot 1000}{W}$$

در این معادله  $C_t$  مقدار کربن متصاعد شده ناشی از تنفس میکروبی بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم،  $B$  حجم اسید مصرفی برای شاهد (میلی‌لیتر)،  $S$  حجم اسید مصرفی نمونه (میلی‌لیتر)،  $N$  نرمالیت اسید مصرفی،  $E$  وزن اکی‌والان برای کربن،  $W$  وزن خاک آون خشک (گرم) و ۱۰۰۰ ضریب تبدیل خاک به کیلوگرم است.

اندازه‌گیری خصوصیات شیمیایی بقایای گیاهی و زغال زیستی حاصل شده از آن‌ها از جمله کربن، نیتروژن کل توسط دستگاه CHNSO آنالایزر تعیین شد و به‌صورت درصد گزارش گردید و همچنین فسفر موجود در بقایای گیاهی و زغال زیستی حاصل شده از آن‌ها با روش کومر (Kous, 1999) تعیین و به‌صورت درصد گزارش گردید.

آنالیز آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS و مقایسه میانگین‌ها با روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ انجام گرفت.

## نتایج و بحث

خصوصیات شیمیایی خاک مورد آزمایش در

جدول (۱) ارائه شده است.

تنفس خاک به‌صورت جذب اکسیژن توسط ریز جانداران خاک تعریف می‌شود و شامل تبادل گاز در متابولیسم هوازی است (Page, 1992). در این مطالعه تنفس میکروبی (معدنی شدن کربن) در خاک به مدت ۶ ماه و در هفته اول روزانه و سپس در فواصل زمانی هر یک هفته یک بار اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری سرعت تنفس خاک، در ابتدا یک پیش انکوباسیون به مدت ۳ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت معادل ۷۰ درصد وزنی ظرفیت مزرعه صورت گرفت. مقدار ۱۰۰ گرم نمونه خاک در قوطی‌هایی که داخل جارهای شیشه‌ای تعبیه شده بود ریخته شد. در این روش اندازه‌گیری میزان دی‌اکسیدکربن حاصل از تنفس میکروبی از طریق تیتراسیون برگشتی سود باقی‌مانده انجام شد. مقدار ۱۰ میلی‌لیتر سود ۰/۵ نرمال در قوطی‌های پلاستیکی ریخته و کنار قوطی حاوی خاک در جار گذاشته شد و درب جار محکم بسته شد. جارها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و انکوباسیون شدند. در فواصل زمانی ذکر شده ظروف حاوی سود خارج و ظروف جدید جایگزین شد و سود باقی‌مانده در ظروف با اسیدکلریدریک تیترا شد. قبل از تیتراسیون سود به ارلن‌های شیشه‌ای منتقل و به هر ارلن مقدار ۱۰ میلی‌لیتر کلریدباریم ۱۰ درصد اضافه شد تا کربنات سدیم به‌صورت کربنات باریم رسوب کند و دی‌اکسیدکربن که با سود واکنش داده بود قادر به برگشت نباشد. سود باقی‌مانده با اسیدکلریدریک ۰/۰۱ مولار تیترا گردید. در طی آزمایش نمونه بدون خاک نیز به‌عنوان شاهد با شرایط مشابه لحاظ گردید تا دی‌اکسیدکربن جذب شده از آزمایشگاه یا تنفس آزمایش

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی خاک مورد مطالعه

مقدار	واحد	پارامتر مورد اندازه‌گیری
لوم رسی	-	بافت خاک
۰/۵	%	OC
۰/۰۳۸	%	کل N
۴/۲	mg/kg	P <sub>avail</sub> .
۴/۱	cmol <sup>+</sup> /kg	Ca تبادل
۲	cmol <sup>+</sup> /kg	Mg تبادل
۰/۲۸	cmol <sup>+</sup> /kg	K تبادل
۰/۰۷۲	cmol <sup>+</sup> /kg	Na تبادل
۶/۴	cmol <sup>+</sup> /kg	CEC
۳۷۳	mg/kg	Ca قابل دسترس
۷۶	mg/kg	K قابل دسترس
۱۰۸	mg/kg	Mg قابل دسترس
۶/۳۸	-	pH
۱	dS/m	EC

(Lehmann and Joseph, 2009). در طی تبدیل بقایای گیاهی به زغال زیستی غلظت نیتروژن آن‌ها کاهش یافت به طوری که در طی تبدیل سبوس برنج، بقایای راش و پوست پسته غلظت نیتروژن به ترتیب ۱۶/۲، ۲۲/۱۴ و ۲۰ درصد کاهش یافت. در تمام بقایای گیاهی اولیه در طی فرآیند تجزیه‌ی حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد حدود نیمی از نیتروژن خود را از دست دادند که علت این امر متصاعد شدن نیتروژن به صورت گاز می‌باشد (Lehmann and Joseph, 2009). بریدل و پریچارد (۲۰۰۴) گزارش دادند که در طی تبدیل بقایای گیاهی به زغال زیستی ۴۵ درصد نیتروژن آن‌ها به صورت گاز از ترکیب زغال زیستی خارج شد. در طی تبدیل بقایای اولیه به زغال زیستی غلظت فسفر در سبوس برنج، بقایای راش و پوست پسته به ترتیب ۹۸/۷، ۱۴۱/۷ و ۹۸/۳ درصد افزایش یافت. اطلاعات کمی درباره تغییرات فسفر در طی فرآیند تجزیه‌ی حرارتی در دسترس است، اما در یک تحقیق گزارش گردید که غلظت فسفر با افزایش فرآیند گرما کافت از ۲۵۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. همچنین صد در صد فسفر در زغال زیستی حاصل از

نتایج مقایسه میانگین‌ها به روش t-test نشان داد که بین غلظت کربن، غلظت نیتروژن، غلظت فسفر و ظرفیت تبادل کاتیونی بقایای گیاهی اولیه و زغال زیستی حاصل از آن‌ها تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد وجود داشت (جدول ۲). در طی تبدیل شدن بقایای گیاهی سبوس برنج، بقایای راش و پوست پسته به زغال زیستی، غلظت کربن به ترتیب ۲۴/۵، ۶۴/۲ و ۵۵/۷ درصد افزایش یافت. درجه حرارت بالا باعث تشکیل زغال زیستی با محتوی کربن بالا که دارای ساختار آروماتیک است می‌شود که این زغال زیستی در مقابل تجزیه میکروبی و فیزیکی مقاوم است (Rutherford et al., 2008). زغال زیستی به طور عمده از ترکیبات آمورف تشکیل شده است (Amonette and Joseph, 2009). ساختار آمورف کربن در اثر افزایش درجه حرارت فرآیند گرما کافت به ساختار چند حلقه‌ای و آروماتیک تبدیل می‌شود (Paris, 2005; Amonette and Joseph, 2009). دانشمندان معتقدند افزودن زغال زیستی با پایداری بالا به خاک، سکوستراسیون کربن در خاک را افزایش داده و باعث ایجاد یک منبع غنی از کربن‌آلی در خاک می‌شود

گیاهی و زغال زیستی حاصل از آن‌ها اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد وجود داشت (جدول ۳). به طوری‌که در طی تبدیل سبوس برنج، بقایای راش و پوست پسته به زغال زیستی غلظت عناصر کلسیم، منیزیم و پتاسیم افزایش یافت. میزان افزایش غلظت کلسیم، منیزیم و پتاسیم سبوس برنج در طی تبدیل شدن به زغال زیستی به ترتیب ۵۹/۵، ۸۵ و ۴۱/۵ درصد بود. غلظت کلسیم، منیزیم و پتاسیم بقایای درخت راش در اثر تبدیل شدن به زغال زیستی به ترتیب ۸۸/۳، ۵۸/۳ و ۴۸/۹ درصد افزایش یافت. همچنین در اثر تبدیل شدن پوسته پسته به زغال زیستی غلظت کلسیم، منیزیم و پتاسیم آن به ترتیب ۸۵/۵، ۲۷/۷ و ۳۳/۲ درصد افزایش یافت. عناصر غذایی کلسیم، منیزیم و پتاسیم که در بقایای گیاهی وجود دارد در اثر سوختن در بخش خاکستر زغال زیستی تجمع می‌یابد. سوختن بقایای گیاهی در درجه‌ی حرارت ۴۰۰-۴۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد باعث زیاد شدن محتوای خاکستر زغال زیستی حاصل از آن‌ها می‌شود. گیاهان برای رشد بهینه به مقدار زیادی عناصر غذایی مانند کلسیم، منیزیم، پتاسیم و فسفر نیاز دارند. همچنین برای حاصلخیز بودن خاک و داشتن خاکدانه‌های پایدار وجود ماده‌ی آلی ضروری می‌باشد (Novak et al., 2009).

لجن فاضلاب در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد بازیافت شد (Bridle and Pritchard, 2004). در طی تبدیل سبوس برنج، بقایای راش و پوست پسته به زغال زیستی ظرفیت تبادل کاتیونی به ترتیب ۲۵۳/۶، ۱۸۵/۸ و ۱۲۳ درصد افزایش یافت. با افزایش دمای گرماکافت به ۳۰۰ سانتی‌گراد میزان CEC بیوپچارها به علت افزایش گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار مثل هیدروکسیل، کربوکسیل، فنولیک و لاکتیک افزایش یافت (Suliman et al., 2016). سوختن بقایای گیاهی در درجه حرارت بالا موجب می‌شود که میزان ظرفیت تبادل کاتیونی زغال زیستی حاصل شده از آن‌ها افزایش یابد (Gaskin et al., 2008). یافته‌های وو و همکاران (۲۰۱۲) نیز حاکی از موثر بودن دمای ۴۰۰ درجه برای تولید زغال زیستی غنی از عناصر غذایی و با کیفیت مطلوب شیمیایی بود که نتایج پژوهش حاضر را تایید می‌کند. زغال زیستی تولید شده در درجه حرارت پایین (۴۰۰-۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) از لحاظ عناصر غذایی بسیار غنی و با تحت تاثیر قرار دادن ویژگی‌های خاک از قبیل ظرفیت نگه‌داری آب و عناصر غذایی می‌تواند برای اصلاح ویژگی‌های شیمیایی خاک بسیار سودمند باشد (Larid et al., 2010).

نتایج مقایسه‌ی میانگین‌ها به روش t-test نشان داد که بین غلظت عناصر کلسیم، منیزیم و پتاسیم بقایای

جدول ۲- مقایسه میانگین غلظت عناصر کربن، نیتروژن و فسفر و ظرفیت تبادل کاتیونی بقایای اولیه و زغال زیستی

نوع بقایا	سطوح ماده	کربن	نیتروژن	فسفر	ظرفیت تبادل کاتیون
			درصد		سانتی‌مول باربرکیلوگرم
بقایای سبوس برنج	بقایای اولیه	۳۷/۷۶	۱/۳۵	۰/۷۷	۹/۷۹
	زغال زیستی	۴۷/۰۷	۱/۰۴	۱/۵۳	۳۴/۶۲
<b>t-value</b>		<b>۱۰/۵۳**</b>	<b>۹/۸۱**</b>	<b>۱۰/۷۵**</b>	<b>۴۶/۴۵**</b>
بقایای درخت راش	بقایای اولیه	۴۱/۸۹	۱/۶۱	۰/۸۴	۱۴/۷۸
	زغال زیستی	۶۸/۲۲	۱/۱۶	۲/۰۳	۴۲/۵۱
<b>t-value</b>		<b>۷۳/۷۸**</b>	<b>۱۲/۱۶**</b>	<b>۶/۳۵**</b>	<b>۲۳/۹۹**</b>
بقایای پوست پسته	بقایای اولیه	۴۲/۳۲	۱/۵۲	۰/۷۴	۱۲/۶
	زغال زیستی	۶۶/۲۳	۱/۱۲	۱/۴۶	۲۸/۱
<b>t-value</b>		<b>۸۱/۳۱**</b>	<b>۱۲/۷۸**</b>	<b>۱۳/۷۶**</b>	<b>۱۵/۴۸**</b>

\*\*، معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

جدول ۳- مقایسه میانگین غلظت عناصر کلسیم، منیزیم و پتاسیم بقایای گیاهی و زغال زیستی حاصل شده از آن‌ها

نوع بقایا	سطح ماده	کلسیم	پتاسیم	منیزیم
			درصد	
بقایای سبوس برنج	بقایای اولیه	۰/۱	۲/۵۳	۰/۰۴۲
	زغال زیستی	۰/۱۸۵	۳/۵۸	۰/۰۶۷
<b>t-value</b>				
بقایای درخت راش	بقایای اولیه	۰/۱۲	۲/۵۸	۰/۰۶
	زغال زیستی	۰/۲۲۶	۳/۷۹	۰/۰۹۵
<b>t-value</b>				
بقایای پوست پسته	بقایای اولیه	۰/۱۱	۲/۱۱	۰/۰۴۷
	زغال زیستی	۰/۲۰۴	۲/۸۱	۰/۰۶
<b>t-value</b>				
		۲۶/۱۷**	۱۰/۵۸**	۳/۶**

\*\*، معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

سکوستراسیون کربن در خاک پیشنهاد کردند: (۱) تغییر شیوه‌های مدیریت زمین برای رسیدن به سطوح کربن قابل دسترس، (۲) افزایش سکوستراسیون کربن در خاک برای رسیدن به سطح کربن بالقوه. سکوستراسیون کربن در خاک با استفاده از ترکیبات غنی از کربن مانند زغال زیستی گام مهم به سوی پایدارسازی و حفاظت ماده‌آلی خاک است (Kamman, 2011; Glaser, 2002). زغال زیستی با ذخیره کردن کربن‌آلی در خاک باعث تجمع طولانی مدت کربن در خاک می‌شود (Glaser, 2007).

زغال زیستی سبوس برنج بیشترین تاثیر و زغال زیستی بقایای راش کمترین تاثیر را بر روی نیتروژن کل خاک داشت. مقایسه میانگین‌ها نشان داد با کاربرد زغال‌های زیستی سبوس برنج، بقایای راش و پوست پسته تفاوت معنی‌داری بین غلظت نیتروژن کل تیمار شاهد و تیمارهای حاوی زغال زیستی در سطح احتمال یک درصد وجود داشت (شکل ۱-ب). مصرف زغال زیستی سبوس برنج با نسبت دو درصد ۵۴/۷ درصد و میزان چهار درصد ۱۰۰ درصد نیتروژن کل خاک، زغال زیستی بقایای راش به‌میزان دو درصد ۴۸/۶ و با نسبت چهار درصد ۸۵/۷ درصد نیتروژن کل خاک و زغال زیستی پوست پسته به‌میزان دو درصد باعث افزایش ۵۱/۸ درصد و با نسبت چهار درصد ۹۲/۴ درصد

### بررسی تاثیر مصرف زغال زیستی بر خصوصیات شیمیایی خاک اسیدی

با توجه به جدول تجزیه واریانس داده‌ها کاربرد زغال زیستی اثر معنی‌داری بر افزایش غلظت کربن‌آلی، میزان نیتروژن کل و غلظت فسفر قابل جذب خاک اسیدی در سطح احتمال یک درصد داشت (جدول ۴)، به‌طوری‌که زغال زیستی حاصل از بقایای درخت راش بیشترین تاثیر و زغال زیستی حاصل از سبوس برنج کمترین تاثیر را بر میزان افزایش کربن‌آلی خاک داشت. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد زغال زیستی‌های حاصل از سبوس برنج، بقایای درخت راش و پوست پسته در خاک اسیدی باعث ایجاد تفاوت معنی‌داری بین میزان کربن‌آلی خاک شاهد و میزان کربن‌آلی خاک حاوی زغال زیستی در سطح احتمال یک درصد شد (شکل ۱-ا). زغال زیستی سبوس برنج با نسبت دو و چهار درصد به‌ترتیب باعث افزایش ۲۲۴/۰ و ۴۵۸/۷ درصد کربن‌آلی خاک اسیدی، زغال زیستی بقایای درخت راش با نسبت دو و چهار درصد به‌ترتیب باعث افزایش ۳۲۴/۷ و ۶۹۴/۵ درصد کربن‌آلی خاک اسیدی شد و زغال زیستی پوست پسته با نسبت دو و چهار درصد به‌ترتیب کربن‌آلی خاک اسیدی را ۳۱۵/۲ و ۶۳۰/۵ درصد افزایش داد. بروس و همکاران (۲۰۱۰) دو راهکار برای بهبود بخشیدن به



نیترژن خاک را نسبت به شاهد افزایش داد. باگرو و همکاران (۲۰۰۱) دلیل کاهش نیترژن کل در تبدیل ضایعات آلی نسبت به بیوچار را تبدیل ترکیبات نیترژن دار به نیترژن- آمونیومی و نیترژن- نیتراتی در دماهای کم گرماکافت و به گازهای نیترژن دار در دمای بالای گرماکافت بیان کردند. همچنین گاسکین و همکاران (۲۰۰۸) و حسین و همکاران (۲۰۱۱) علت تغییرات میزان نیترژن کل بیوچارهای تولیدی را در خروج مواد فرار با افزایش دما طی فرآیند گرماکافت گزارش کردند. اشتاینر و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند تفاوت قابل توجهی بین نیترژن خاک شاهد و خاک اصلاح شده با زغال زیستی وجود داشت. همچنین زغال زیستی باعث تغییر پویایی نیترژن خاک شد (Lehmann, 2007).

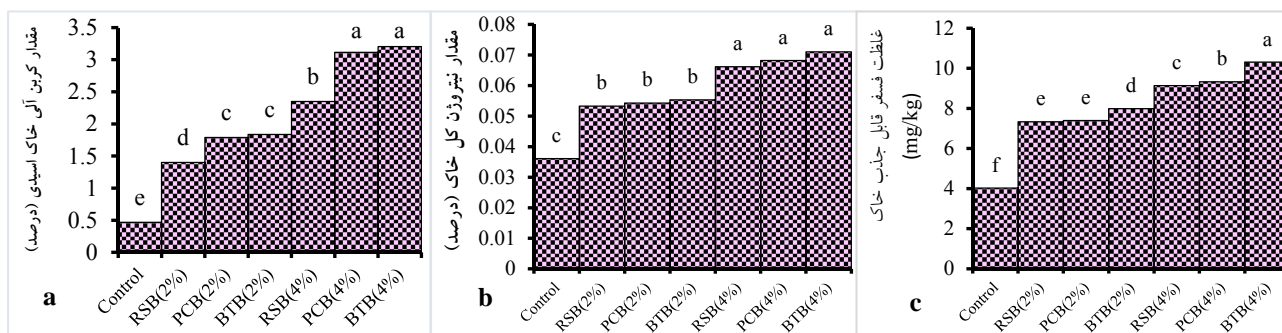
مصرف زغال زیستی پوست پسته بیشترین تاثیر و مصرف زغال زیستی بقایای راش کمترین تاثیر را بر افزایش فسفر قابل جذب خاک داشت. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در اثر کاربرد زغال‌های زیستی سبوس برنج، بقایای راش و پوست پسته تفاوت معنی- داری بین فسفر قابل جذب خاک شاهد با خاک اصلاح شده با زغال زیستی ایجاد شد (شکل ۱-۵). زغال زیستی سبوس برنج با میزان دو درصد باعث افزایش ۸۶/۴ درصد فسفر قابل جذب خاک و با نسبت چهار درصد ۱۲۲/۶ درصد فسفر خاک نسبت به تیمار شاهد افزایش

داد. زغال زیستی بقایای راش با میزان دو درصد فسفر قابل جذب خاک را ۸۵/۳ درصد و با میزان چهار درصد فسفر قابل جذب خاک را ۱۰۲/۴ درصد افزایش داد و مصرف زغال زیستی پوست پسته به میزان دو درصد ۱۳۷/۳ درصد فسفر قابل جذب خاک و با میزان چهار درصد باعث افزایش ۱۶۲/۲ درصد فسفر قابل جذب خاک نسبت به تیمار شاهد شد. افزودن زغال زیستی به خاک با بافت شنی باعث کاهش آبهوایی فسفر از خاک می‌شود، بدین ترتیب انتظار می‌رود با افزایش میزان سطوح به‌کار برده شده زغال زیستی فسفر خاک افزایش یابد (Novak et al., 2006). زغال زیستی باعث افزایش فسفر خاک شد که علت این امر وجود غلظت بالایی از فسفر در ترکیب زغال زیستی بود (Chan et al., 2007). افزایش زغال زیستی حاصل از پوست پسته (۲ و ۴ درصد) موجب افزایش معنی‌دار در فسفر قابل جذب خاک اسیدی می‌شود که دلیل آن را می‌توان به غلظت بالای کاتیون‌های قلیایی مثل کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم در زغال زیستی حاصل از پوست پسته نسبت داد که موجب افزایش pH و در نتیجه موجب آزاد شدن فسفر باند شده و لذا افزایش فسفر قابل دسترس می‌شود. خادمی جلگه نژاد و همکاران (۲۰۱۹) طی تحقیقی روی انواع ضایعات آلی باغات پسته عنوان کردند که بیوچار حاصل از تفاله‌های نرم پسته نسبت به بخش‌های لیگنینی این محصول pH بالاتری دارند (۱۱/۳) داشت.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تاثیر نوع و سطوح مختلف زغال زیستی بر مقدار عناصر نیترژن، کربن و غلظت فسفر قابل جذب خاک اسیدی

منابع تغییرات		میانگین مربعات	
	نیترژن	کربن	فسفر
سطوح زغال زیستی	۰/۰۰۱۰۶۶۲۴**	۵/۱۸۷۹۰۶۷۵**	۱۲/۴۵۱۲**
خطا	۰/۰۰۰۱۴۴۰۶	۰/۱۵۸۴۹۸۸۱	۰/۰۰۰۷۹۵۲۴
C.V (درصد)	۲۲/۳۱۵۲۷	۲۱/۰۶۱۸۵	۰/۳۶۳۴۹۱

NS و \*، \*\*: به ترتیب معنی داری در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم معنی داری



شکل ۱- اثر نوع و سطوح مختلف زغال زیستی بر مقدار کربن آلی (a)، نیتروژن کل (b) و فسفر قابل جذب (c) خاک اسیدی

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بین مقدار منیزیم تبدالی خاک شاهد و مقدار منیزیم تبدالی خاک اصلاح شده با زغال زیستی تفاوت معنی داری وجود داشت (شکل ۲- b). زغال زیستی سبوس برنج به میزان دو و چهار درصد منیزیم تبدالی خاک را به ترتیب ۱۱/۵ و ۲۰/۸ درصد نسبت به خاک شاهد افزایش داد. زغال زیستی بقایای راش با نسبت دو و چهار درصد منیزیم تبدالی خاک را به ترتیب ۱۹/۳ و ۵۰/۵ درصد نسبت به خاک شاهد افزایش داد و زغال زیستی پوست پسته با نسبت دو و چهار درصد باعث افزایش به ترتیب ۲۰/۳ و ۵۲/۱ درصد منیزیم تبدالی خاک نسبت به خاک شاهد شد.

مقایسه میانگین‌ها نشان داد بین مقدار پتاسیم تبدالی خاک شاهد و مقدار پتاسیم تبدالی خاک اصلاح شده با زغال زیستی تفاوت معنی داری وجود داشت (شکل ۲- c). زغال زیستی سبوس برنج به میزان دو و چهار درصد باعث افزایش به ترتیب ۲۷/۴ و ۶۳/۹ درصد پتاسیم تبدالی خاک اسیدی نسبت به خاک شاهد شد. مصرف زغال زیستی بقایای درخت راش به میزان دو و چهار درصد باعث افزایش به ترتیب ۲۵/۹ و ۶۱/۶ درصد پتاسیم خاک اسیدی نسبت به شاهد شد و مصرف زغال زیستی پوست پسته به میزان دو و چهار درصد پتاسیم تبدالی خاک را ۳۶/۹ و ۶۴/۶ درصد نسبت به خاک شاهد افزایش داد.

### تاثیر مصرف زغال زیستی بر مقدار کاتیون‌های تبدالی خاک اسیدی

نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد زغال زیستی اثر معنی داری بر افزایش مقدار کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم تبدالی و همچنین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک اسیدی در سطح احتمال یک درصد داشت (جدول ۵). زغال زیستی پوست پسته بیشترین تاثیر را بر مقدار کاتیون‌های تبدالی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک اسیدی داشت. زغال زیستی بقایای راش کمترین تاثیر را بر افزایش مقدار کلسیم و پتاسیم تبدالی و زغال زیستی سبوس برنج کمترین تاثیر را بر افزایش غلظت منیزیم و سدیم تبدالی و همچنین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک اسیدی داشت.

با توجه به مقایسه‌ی میانگین داده‌ها تفاوت معنی داری در مقدار کلسیم تبدالی خاک شاهد با مقدار کلسیم تبدالی خاک اصلاح شده با زغال زیستی مشاهده شد (شکل ۲- a). مصرف زغال زیستی سبوس برنج به میزان دو و چهار درصد مقدار کلسیم تبدالی خاک را به ترتیب ۲۱/۱ و ۴۵/۱ درصد افزایش داد. مصرف زغال زیستی بقایای راش به میزان دو و چهار درصد غلظت کلسیم تبدالی خاک را به ترتیب ۲۰/۱ و ۳۴/۴ درصد افزایش داد و زغال زیستی پوست پسته با نسبت دو و چهار درصد باعث افزایش به ترتیب ۲۲/۱ و ۵۱/۶ درصد غلظت کلسیم تبدالی خاک نسبت به خاک شاهد شد.

با مقایسه‌ی میانگین‌ها می‌توان مشاهده کرد که تفاوت معنی‌داری بین مقدار سدیم تبادلی خاک شاهد با مقدار سدیم تبادلی خاک اصلاح شده با زغال زیستی وجود دارد (شکل ۲-d). مصرف زغال زیستی سبوس برنج به میزان دو و چهار درصد باعث افزایش به ترتیب ۳۳/۳ و ۱۰۰ درصد سدیم تبادلی خاک شد. به‌طور مشابه مصرف زغال زیستی بقایای راش به میزان دو و چهار درصد باعث افزایش به ترتیب ۶۶/۷ و ۱۳۸/۱ درصد سدیم تبادلی خاک شد و مصرف زغال زیستی پوست پسته به میزان دو و چهار درصد باعث افزایش به ترتیب ۷۶/۲ و ۱۳۸/۱ درصد سدیم تبادلی خاک شد.

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد تفاوت معنی‌داری بین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شاهد با مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک اصلاح شده با زغال زیستی وجود داشت (شکل ۲-e). مصرف زغال زیستی حاصل از سبوس برنج به میزان دو و چهار درصد به ترتیب باعث افزایش ۱۸/۰ و ۳۸/۳ درصد میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شد. مصرف زغال زیستی حاصل از بقایای درخت راش به میزان دو و چهار درصد به ترتیب باعث افزایش ۲۰/۱ و ۴۱/۳ درصد میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شد و مصرف زغال زیستی حاصل از پوست پسته به میزان دو و چهار درصد به ترتیب ۲۲/۴ و ۵۲/۶ درصد میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش داد. چگینی ماله میر و همکاران (۱۳۹۹) طی تحقیقی بیشترین و کمترین مقدار CEC به ترتیب از بیوچار کاه و کلش گندم (در دمای گرمکافت ۳۰۰ سانتیگراد) و ضایعات آلی پوست بادام به میزان ۶۶ و

$24/76 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$  به دست آوردند. به‌طور کلی با افزایش دمای گرمکافت به ۳۰۰ سانتیگراد میزان CEC بیوچارها به علت افزایش گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار مثل هیدروکسیل، کربوکسیل، فنولیک و لاکتیک افزایش یافت (Suliman *et al.*, 2016). ولی با افزایش دمای گرمکافت به ۵۰۰ سانتیگراد میزان CEC به علت خروج گروه‌های عاملی و تشکیل کربن آروماتیک کاهش یافت. زیست‌توده‌های با میزان خاکستر بالا به علت وجود فلزات قلیایی و قلیایی خاکی موجب گسترش تشکیل گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار می‌شوند و بیوچارهایی با CEC بالا تولید می‌کنند (Tag *et al.*, 2016). ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) ظرفیت نگهداری کاتیون‌ها توسط خاک است که این ویژگی خاک در نتیجه بارهای منفی تولید شده از رس، ماده‌آلی و سزکویی اکسیدها ایجاد می‌شود. به دلیل این‌که عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان بیشتر به صورت کاتیونی هستند بنابراین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک یک ویژگی مهم برای اندازه‌گیری حاصلخیزی خاک است (Klute *et al.*, 1984). مطالعات نشان داده است که زغال زیستی باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌شود (Chan *et al.*, 2007). با گذشت زمان و هوادیدگی زغال زیستی ممکن است ظرفیت تبادل کاتیونی خاک افزایش بسیار زیادی داشته باشد (Liang *et al.*, 2006). همچنین مشاهده شده است که محتوی بالای عناصر غذایی در مواد خام استفاده شده برای تولید زغال زیستی باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی زغال زیستی حاصل شده می‌شود (Gaskin *et al.*, 2008).

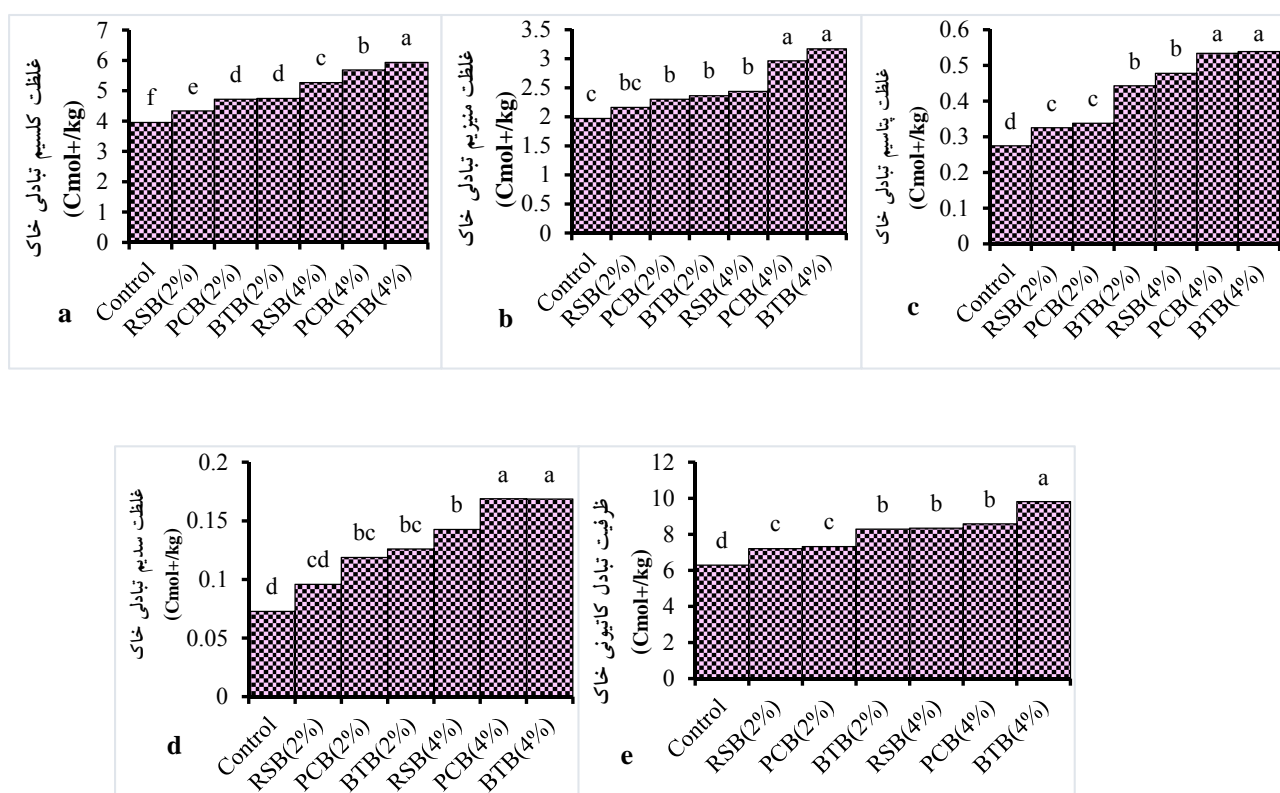
با مقایسه‌ی میانگین‌ها می‌توان مشاهده کرد که تفاوت معنی‌داری بین مقدار سدیم تبادلی خاک شاهد با مقدار سدیم تبادلی خاک اصلاح شده با زغال زیستی وجود دارد (شکل ۲-d). مصرف زغال زیستی سبوس برنج به میزان دو و چهار درصد باعث افزایش به ترتیب ۳۳/۳ و ۱۰۰ درصد سدیم تبادلی خاک شد. به‌طور مشابه مصرف زغال زیستی بقایای راش به میزان دو و چهار درصد باعث افزایش به ترتیب ۶۶/۷ و ۱۳۸/۱ درصد سدیم تبادلی خاک شد و مصرف زغال زیستی پوست پسته به میزان دو و چهار درصد باعث افزایش به ترتیب ۷۶/۲ و ۱۳۸/۱ درصد سدیم تبادلی خاک شد.

نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد تفاوت معنی‌داری بین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شاهد با مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک اصلاح شده با زغال زیستی وجود داشت (شکل ۲-e). مصرف زغال زیستی حاصل از سبوس برنج به میزان دو و چهار درصد به ترتیب باعث افزایش ۱۸/۰ و ۳۸/۳ درصد میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شد. مصرف زغال زیستی حاصل از بقایای درخت راش به میزان دو و چهار درصد به ترتیب باعث افزایش ۲۰/۱ و ۴۱/۳ درصد میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شد و مصرف زغال زیستی حاصل از پوست پسته به میزان دو و چهار درصد به ترتیب ۲۲/۴ و ۵۲/۶ درصد میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش داد. چگینی ماله میر و همکاران (۱۳۹۹) طی تحقیقی بیشترین و کمترین مقدار CEC به ترتیب از بیوچار کاه و کلش گندم (در دمای گرمکافت ۳۰۰ سانتیگراد) و ضایعات آلی پوست بادام به میزان ۶۶ و

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس تاثیر نوع و سطوح مختلف زغال زیستی بر مقدار عناصر کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم تبادلی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک اسیدی

میانگین مربعات						منابع تغییرات	درجه آزادی
ظرفیت تبادل کاتیونی	سدیم	پتاسیم	منیزیم	کلسیم	کلسیم		
سطوح زغال زیستی	۲/۹۳۸۷۱۵۸۷**	۰/۰۰۳۸۹۸۴۱**	۰/۰۳۳۹۰۴۷۶**	۰/۵۶۸۹۵۳۹۷**	۱/۵۱۲۵۷۴۶۰**	۶	۶
خطا	۰/۰۱۸۴	۰/۰۰۰۱۹۵۲۴	۰/۰۰۰۲۵۷۱۴	۰/۰۱۸۳۱۴۲۹	۰/۰۰۱۰۶۱۹۰	۶	۶
C.V	۱/۷۳۵۴۵۷	۱۱/۱۵۶۹۶	۳/۹۳۸۵۸۷	۵/۵۵۰۶۵۶	۰/۶۷۲۴۸۹	-	-

ns و \* و \*\* : به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم معنی‌داری



شکل ۲- اثر نوع و سطوح مختلف زغال زیستی بر غلظت کلسیم (a)، منیزیم (b)، پتاسیم (c) و سدیم تبادلی (d) و ظرفیت تبادل کاتیونی (e) خاک اسیدی

نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین غلظت کلسیم قابل عصاره‌گیری با تیمار شاهد با تیمارهای حاوی زغال زیستی وجود داشت (شکل ۳-a). به طوری که مصرف زغال زیستی حاصل از سبوس برنج بیشترین تاثیر و مصرف زغال زیستی حاصل از بقایای درخت راش

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۵ نشان داد که مصرف زغال زیستی اثر معنی‌داری بر غلظت کلسیم قابل عصاره‌گیری، پتاسیم قابل عصاره‌گیری، منیزیم قابل عصاره‌گیری و pH خاک اسیدی در سطح احتمال یک درصد داشت. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها

سبوس برنج با نسبت دو و چهار درصد به ترتیب باعث افزایش ۱۵/۵ و ۳۳/۱ درصد غلظت منیزیم خاک شد. زغال زیستی حاصل از بقایای درخت راش با نسبت دو و چهار درصد به ترتیب باعث افزایش ۱۶/۰ و ۳۵/۱ درصد غلظت منیزیم خاک شد و مصرف زغال زیستی حاصل از پوست پسته به میزان دو و چهار درصد به ترتیب ۱۷/۶ و ۴۱/۱ درصد غلظت منیزیم قابل عصاره گیری خاک را افزایش داد. ماژور و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی که بر روی رشد تربچه در خاک اصلاح شده با زغال زیستی انجام دادند، دریافتند که زغال زیستی باعث افزایش غلظت منیزیم قابل عصاره گیری خاک شد. گیاهان معمولاً مواد غذایی را به فرم کاتیون از خاک جذب می کنند و افزودن زغال زیستی به خاک باعث افزایش عناصر غذایی کاتیونی خاک مانند کلسیم، منیزیم و پتاسیم خاک می شود، بدین ترتیب فراهمی این کاتیون ها در خاک افزایش یافته و گیاهان به راحتی این عناصر غذایی را از خاک جذب می کنند و عملکرد آن ها افزایش می یابد (Van Zweieten et al., 2010).

نتایج مقایسه ای میانگین داده ها نشان داد که تفاوت معنی داری بین مقدار pH تیمار شاهد و pH تیمارهای حاوی زغال زیستی وجود داشت (شکل ۳-d). به طوری که زغال زیستی حاصل از بقایای راش بیشترین تاثیر و مصرف زغال زیستی حاصل از پوست پسته کمترین تاثیر را بر افزایش pH خاک اسیدی داشت. مصرف زغال زیستی حاصل از سبوس برنج به میزان دو و چهار درصد به ترتیب باعث افزایش ۵/۹ و ۱۴/۲ درصد pH خاک شد. مصرف زغال زیستی حاصل از بقایای راش به میزان دو و چهار درصد به ترتیب باعث افزایش ۹/۵ و ۱۷/۴ درصد pH خاک شد و مصرف زغال زیستی پوست پسته به میزان دو و چهار درصد به ترتیب ۱/۹ و ۱۳/۶ درصد pH خاک را افزایش داد. نتایج مطالعه سوهی و همکاران (۲۰۱۰) این نتایج را تاکید می کند و نشان می دهد که کاربرد زغال زیستی باعث افزایش pH خاک می شود.

کمترین تاثیر را بر غلظت کلسیم قابل عصاره گیری با عصاره گیر کلرور سدیم یک نرمال خاک اسیدی داشت. زغال زیستی حاصل از سبوس برنج به میزان دو و چهار درصد به ترتیب باعث افزایش ۵/۰۴ و ۲۲/۹ درصدی غلظت کلسیم خاک شد. زغال زیستی حاصل از بقایای درخت راش به میزان دو و چهار درصد به ترتیب باعث افزایش ۴/۵ و ۱۷/۹ درصد در غلظت کلسیم خاک شد و زغال زیستی حاصل از پوست پسته به میزان دو و چهار درصد غلظت کلسیم خاک را به ترتیب ۵ و ۲۰/۲ درصد افزایش داد. ماژور و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی که بر روی رشد تربچه در خاک اصلاح شده با زغال زیستی انجام دادند، بیان کردند که زغال زیستی باعث افزایش غلظت کلسیم قابل عصاره گیری با عصاره گیر پتاسیم کلرید یک نرمال خاک شد.

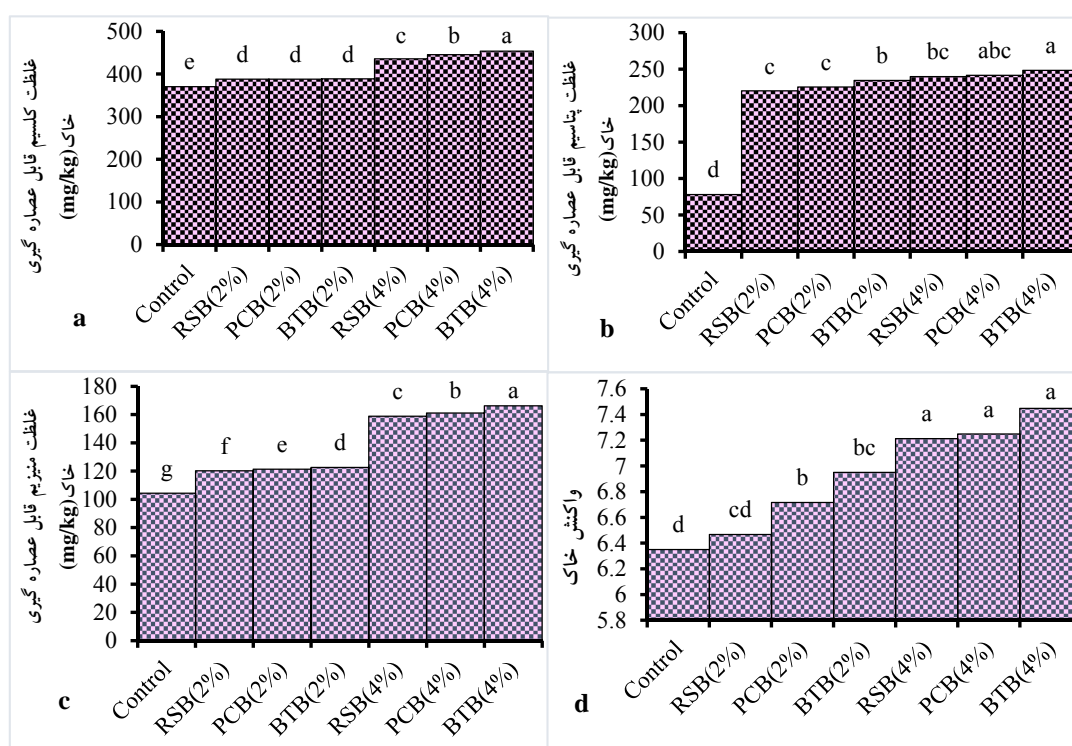
نتایج مقایسه میانگین داده ها نشان داد که مصرف زغال زیستی حاصل از پوست پسته بیشترین تاثیر و مصرف زغال زیستی حاصل از سبوس برنج کمترین تاثیر را بر غلظت پتاسیم قابل عصاره گیری خاک اسیدی داشت (شکل ۳-b). مصرف زغال زیستی حاصل از سبوس برنج به میزان دو و چهار درصدی به ترتیب باعث افزایش غلظت پتاسیم به میزان ۱۹۱ و ۲۱۷ درصد شد. مصرف زغال زیستی حاصل از بقایای راش به میزان دو و چهار درصد غلظت پتاسیم خاک را به ترتیب به میزان ۱۹۷/۸ و ۲۱۹/۶ درصد افزایش داد و مصرف زغال زیستی حاصل شده از پوست پسته با نسبت دو و چهار درصد غلظت پتاسیم خاک را به ترتیب به میزان ۲۱۰/۰ و ۲۲۹/۴ درصد افزایش داد. افزودن زغال زیستی به خاک های شنی باعث افزایش پتاسیم خاک شد که این امر ناشی از غلظت زیاد پتاسیم در زغال زیستی بود (Chan et al., 2007).

مصرف زغال زیستی حاصل از پوست پسته بیشترین تاثیر و مصرف زغال زیستی حاصل از سبوس برنج کمترین تاثیر را بر غلظت منیزیم قابل عصاره گیری خاک اسیدی داشت (شکل ۳-c). زغال زیستی حاصل از

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس تاثیر نوع و سطوح مختلف زغال زیستی بر غلظت عناصر کلسیم، منیزیم، پتاسیم قابل عصاره‌گیری و واکنش خاک اسیدی

میانگین مربعات					
منابع تغییرات	درجه آزادی	کلسیم	منیزیم	پتاسیم	اسیدیته
سطوح زغال زیستی	۶	۶۹۰۲/۲۴۲**	۳۸۳۷/۲۲۲**	۱۴۷۵۱/۱۱۱**	۰/۵۲۶۶۲۰۶۳**
خطا	۶	۲/۲۱۴۳۸**	۲/۷۱۵**	۵۱۶/۰۰**	۰/۰۱۱۴۰۹۵۲**
C.V	-	۰/۱۳۰۵	۰/۴۴	۱۰/۲۶۱	۱/۵۵۰۶۱۷

ns و \*، \*\*: به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم معنی‌داری



شکل ۳- اثر نوع و سطوح مختلف زغال زیستی بر غلظت کلسیم (a)، پتاسیم (b) و منیزیم (c) قابل عصاره‌گیری و واکنش خاک (d) خاک اسیدی

بیانگر تنفس میکروبی و یا به عبارتی نشان دهنده مقدار معدنی شدن کربن آلی خاک است، با گذشت زمان افزایش می‌یابد.

کولینس و همکاران (۱۹۹۰) دریافتند که تجزیه مواد آلی اضافه شده در هر عمقی از خاک در اوایل دوره با سرعت بیشتری انجام می‌شود، که احتمالاً به دلیل وجود مواد سهل‌التجزیه در مواد آلی می‌باشد، ولی به مرور زمان به دلیل کاهش مواد سهل‌التجزیه سرعت

### تاثیر مصرف زغال زیستی بر تنفس میکروبی

#### در خاک اسیدی

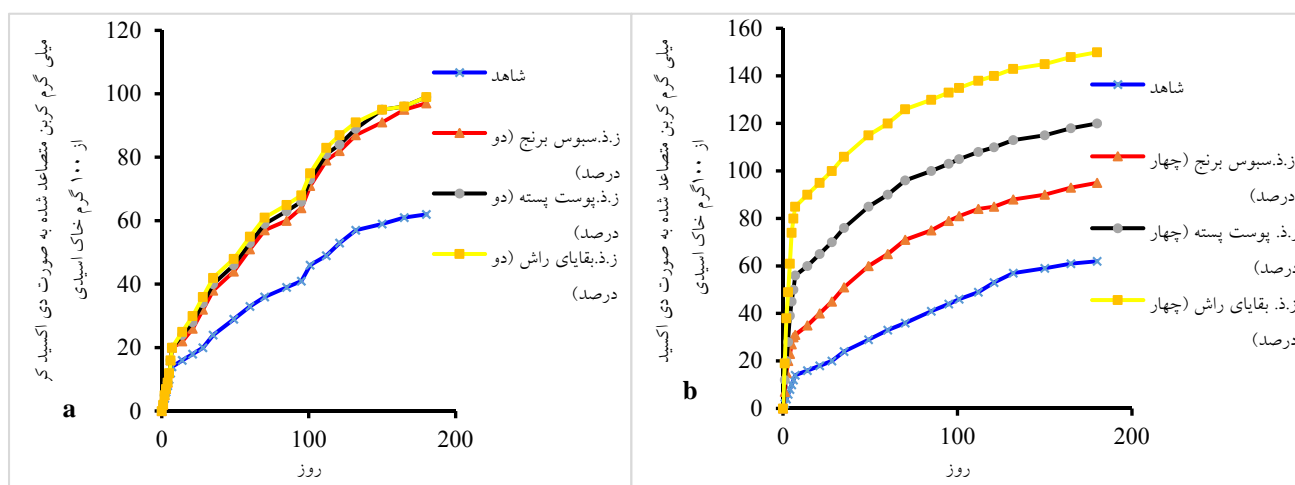
شکل ۴ مقدار کربن متصاعد شده به صورت دی-

اکسیدکربن در اثر افزودن زغال‌های زیستی مختلف در سطوح دو و چهار درصد را در خاک اسیدی در طی مدت ۱۸۳ روز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار کربن متصاعد شده به صورت دی‌اکسیدکربن که

Mieljanen and Dugas, 2004)، تابش خورشید، بارندگی (Frank et al., 2002)، نوع خاک، نوع گیاهان در حال رشد (Maljanen et al., 2004)، تنفس ریشه، ترشحات ریشه، جنگل‌کاری، ریز موجودات خاک، موقعیت در زمین‌نما (Lal, 2007; Baldock and Skjemstad, 1999) و سوزاندن زیست‌توده (Lettens et al., 2005) هستند که به‌طور یقین مدیریت خاک و به‌دنبال آن اقلیم مهم‌ترین عوامل موثر بر مقدار کربن‌آلی خاک هستند (Baldock and Skjemstad, 1999).

زغال زیستی دارای توانایی زیادی برای سکوستراسیون کربن در خاک است. اما برخی مطالعات نشان داد که افزودن زغال زیستی به خاک باعث افزایش ماده‌آلی خاک می‌شود و در پی افزایش ماده‌آلی خاک انتشار دی‌اکسیدکربن از خاک نیز افزایش پیدا می‌کند (Mmajor et al., 2010). اسپوکاس و همکاران (۲۰۰۹) بیان کرد افزودن زغال زیستی به خاک لومی سیلتی که دارای رطوبت مناسبی است باعث افزایش انتشار دی‌اکسیدکربن از خاک می‌شود. دلیل این امر می‌تواند واکنش بین آب خاک و اکسیژن موجود در ترکیب زغال زیستی باشد (Spokas et al., 2009).

تجزیه کاهش می‌یابد. وجود موادغذایی کافی یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر افزایش ریز جانداران خاک به حساب می‌آید و زمانی که موادغذایی خاک پاسخگوی جامعه میکروبی نباشد ریز جانداران حساس از بین خواهند رفت (Chander et al., 2006). علت کاهش یافتن دی‌اکسیدکربن را می‌توان به مقاوم شدن بقایای گیاهی حاوی کربن به تجزیه و نامطلوب شدن عوامل محیطی دانست. تنفس یکی از راه‌های اصلی هدر رفت کربن و ایجاد تغییرات در ذخیره این عنصر در خاک است که تحت تاثیر عواملی چون سطح آب زیرزمینی، درجه‌ی حرارت خاک و هوا، رطوبت خاک، بارندگی، فاکتورهای اقلیمی، زیست توده‌ی میکروبی، خصوصیات فیزیکی، تابش خورشید، نوع خاک، نوع گیاه، تنفس و ترشحات ریشه، نوع استفاده زمین، شرایط زهکشی و نوع عملیات مدیریتی است (Post, 2000). فرآیند تنفس و هدر رفت کربن خاک تحت تاثیر عواملی از قبیل: سطح آب زیرزمینی (Sanchez, 2003)، درجه حرارت خاک (Von Amold et al., 2005)، جنگل تراشی (Pangle, 2000)، رطوبت خاک، میزان کربن‌آلی محلول، زیست‌توده میکروبی (Rochette et al., 2000)، خصوصیات فیزیکی خاک، شخم زدن، تغییر نوع عملیات و مدیریت خاک (Lal, 2004).



شکل ۴- اثر نوع و سطح دو درصد (a) و سطح چهار درصد (b) زغال زیستی بر میزان کربن متصاعد شده به صورت دی‌اکسید کربن از خاک اسیدی

### نتیجه‌گیری

بررسی تاثیر مصرف زغال زیستی بر ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی خاک نشان داد که کاربرد زغال زیستی باعث افزایش معنی‌دار مقدار کربن‌آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل جذب، کاتیون‌های تبادلی و ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک اسیدی شد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد میزان ظرفیت تبادل کاتیونی، مقدار کربن‌آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل جذب و مقدار کاتیون‌های تبادلی در خاک تیمار شده با زغال‌های زیستی مختلف اختلاف قابل توجهی با مقادیر این پارامترها در خاک شاهد داشت. در خاک اسیدی زغال زیستی پوست پسته باعث افزایش قابل توجهی در مقدار فسفر قابل جذب و پتاسیم و منیزیم قابل

عصاره‌گیری، کلسیم و منیزیم و سدیم تبادلی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شد. زغال زیستی سبوس برنج باعث افزایش نیتروژن کل و کلسیم قابل عصاره‌گیری خاک شد اما زغال زیستی بقایای راش مقدار کربن‌آلی و pH خاک را افزایش داد. نتایج نشان داد بیشترین میزان هدر رفت کربن به‌صورت دی‌اکسیدکربن در خاک اسیدی از خاک تیمار شده با چهار درصد زغال زیستی راش مشاهده شد و کمترین میزان هدر رفت کربن در خاک تیمار شده با دو درصد زغال زیستی سبوس برنج مشاهده شد.

### منابع مورد استفاده

- Amonette, J.E. and Joseph, S. Characteristics of biochar: Microchemical properties in biochar for environmental management: Science and Technology Eds. J. Lohmann and S. Joseph. Etruscan, London; Sterling, 2009. VA, pp, 33\_52.
- Atkinson, C.J., Fitzgerald, J.D. and Higgs, N.A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil*. 2010. 337: 1\_18.
- Bagreev, A., Bandosz, T. J. and Locke, D. C. (2001). Pore structure and surface chemistry of adsorbents obtained by pyrolysis of sewage sludge-derived fertilizer. *Carbon*. 2001. 39(13): 1971-1979.
- Brenner, J.M, and Mulvaney, C.S. Nitrogen total. pp. 595\_624. In: A.L. Page., R. H. Miller., and D. R. Keeney (eds). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical analysis*. American Society of Autonomy and Soil Science. Madison, WI. 1982.
- Bridle, T.R. and Pritchard, D. Energy and nutrient recovery from sewage sludge via pyrolysis. *Water Science and Technology*. 2004. 50: 169\_175.
- Busscher, W.J., Novak, J.M., Evans, D.E., Watts, D.W., Niandou, M.A.S. and Ahmedna, M. Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk low my sand. *Soil Science*. 2010. 175: 10\_14.
- Carter, M.R. and Gregorich, E.G. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Second Edition. Canadian Society of Soil Science Publisher. 2008. 823.
- Chan, K. Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A. and Joseph, S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*. 2007. 45: 629\_634.
- Chapman S J, Campbell C D and Puri, G. Native woodland expansion: Soil chemical and microbiological indicators of change. *Soil Biology and Biochemistry*. 2003. 35:753-764.



- Gaskin, J. W., Steiner, C., Harris, K., Das, K. C. and Bibens, B. (2008). Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE*. 2008. 51(6): 2061-2069.
- Gaskin, J. W., Steiner, C., Harris, K., Das, K.C. and Bibens, B. Effect of low temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transaction of the ASABE*. 2008. 51: 2061\_2069.
- Get, G. W. and Bauder, J. W. Particle size analysis. In: *Methods of soil analysis*. Part1. 2nd ed. Klutz, A. (ed). *Agron. Monoger. 9. AsA. Madison*. 1986. 383\_411.
- Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G. and Zech, W. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*. 2001. 88: 37\_41.
- Glaser, B., Lohmann, J. and Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal \_A review. *Biological Fertility Soils*. 2002. 35:219\_230.
- Gov, T.B., Armand, R.J. and Mermut, A.R. Aggregate stability to water. In: Carter, M.R. (ed.). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton. 1993. 177\_180.
- Hilber, I., Wyss, G.S., Mäder, P., Bucheli, T.D., Meier, I., Vogt, I. and Schulin, R. Influence of activated charcoal amendment to contaminated soil on dieldrin and nutrient uptake by cucumbers. *Environment Pollution*. 2009. 157: 2224\_2230.
- Hossain, M. K., Strezov, V., Chan, K. Y., Ziolkowski, A. and Nelson, P. F. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management*. 2011. 92(1): 223-228.
- Irving, G. C. J., and McLaughlin, M. J. A rapid and simple field test for phosphorus in Olsen and Bray No. 1 extracts of soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 1990. 21(19-20), 2245-2255.
- Kammann, C.I., S. Linsel, J.W. Groesling, F. and Koyro, H. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* and on soil \_plant relations. *Plant Soil*. 2011. 345: 195\_210.
- Khademi Jolgenejad, A., fekri, M., and mahmoodabadi, M. The effect of different pistachio wastes biochar application on some fertility properties of a loam soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 2019. 50(1): 231-246.
- Khaledian, Y., Brevik, E. C., Pereira, P., Cerdà, A., Fattah, M. A., and Tazikeh, H. Modeling soil cation exchange capacity in multiple countries. *Catena*. 2017. 158, 194-200.
- Klute, A. Water retention: Laboratory methods. In: klute, A. (ed). *Methods of soil analysis*. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2ed ed. *Agron. Monog. 9. ASA/SSSA, Madison*. 1984. 635\_662.
- Kuos. Phosphorus. In *Methods of soil Analysis*. Part 3. Chemical Methods. Ed. DL Sparks. ASA\_SSSA, Madison. WI 53711.1999. Pp 869\_919.
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R. and Karien, D. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*. 2010. 185:436-442.

- Laird, D.A. The charcoal vision: A win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and date quality. *Agron. Journal*. 2008. 100: 178\_181.
- Lal, R. Carbon management in agricultural soils. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2007. 12: 303\_22.
- Laird, D.A., Fleming, P., Davis, D.S., Horton, R., Wang, B. and Karlen, D. Impact of biochar amendments on the quality of typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*. 2010. 158: 443\_449.
- Lee, Y., Park, J., Ryu, C., Gang, K.S., Yang, W., Park, Y-K., Jung, J., and Hyun, S. Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C. 2013. *Bioresource Technology*, 148:196-201.
- Lehmann, J. A handful of carbon. *Nature*. 2007. 447: 143-144.
- Lehmann, J. and Joseph, S. Brochure for environmental management. *Science and Technology*. 2009. Pp, 77-79.
- Lehmann, J. and Rondon, M. Bio-char soil management in highly weathered soils in the humid tropics. In *Biological approaches to sustainable soil systems*. 2006. Eds. N Uphoff, A S Ball, E.
- Lehmann, J. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology & the Environment*. 2007. 5: 381-387.
- Lemenih, M. Effects of land use changes on soil quality and native flora degradation and restoration in the highlands of Ethiopia: implications for sustainable land management. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala. 2004.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyargi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skemjstad, J., Thiessen, J., Luizao, F., Peterson, J. and Noves, E. Black carbon increases cation exchange capacity in soil. *Soil Science Society of America Journal*. 2006. 70:1719\_1730.
- Major, J., Lehmann, J., Rondon, M. and Goodale, C. Fate of Soil-applied black carbon: Downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology*. 2010. 16:1366-1379.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. and Lehmann, J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*. 2010. 343: 219-229.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, SJ and Lehmann, J. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*. 2010. 333(1): 117-128.
- MalehMir Chegini, M., Golchin, A., Khadem Moghadam Igdellou, N., and Moraveij, K. The effect of Pyrolysis Temperature and Type of Organic Residues on Physicochemical Properties of Produced Biochar. 2020. 51(3): 575-593.
- Novak, J.M., Busscher, W.J., Laird, D.L., Ahmedna, M., Watts, D.W. and Niandou, M.A.S. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plan soil. *Soil Science*. 2009. 174: 105-112.
- Paris, O., Zollfrank, C. and Zickler, G.A. Decomposition and carbonisation of wood biopolymers-a microstructural study of softwood pyrolysis. *Carbon*. 2005. 43(1): 53-66.

- Peng, X., Ye, L.L., Wang, C.H., Zhou, H. and Sun, B. Temperature and duration dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil and Tillage Research*. 2011. 112: 159-166.
- Rutherford, D.W., Worsham, R.L. and Reeves, J.B. Development of acid functional groups and lactose during the thermal degradation of wood and wood components: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report. 2008. 5013, 43p. (Also available at <http://pubs.usgs.gov/sir/2007/5013>).
- Suliman, W., Harsh, J. B., Abu-Lail, N. I., Fortuna, A. M., Dallmeyer, I. and Garcia-Perez, M. Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties. *Biomass and Bioenergy*. 2016. 84, 37-48.
- Tag, A. T., Duman, G., Ucar, S. and Yanik, J. Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potential applications of biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2016. 120: 200-206.
- Van Zwieten, L., Kimberly, S., Morris, S., K.Y., Donnie, A., Rust, J., Joseph, S. and Cowie, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*. 2010. 327: 235-246.
- Wu, W., Yang, M., Feng, Q., Mc Grouther, K., Wang, H., Lu, H. and Chen, Y. Chemical Characterization of rice Straw-derived biochar for soil amendments. 2012. 268-276.
- Xu, J.M., Tang, C. and Chen, Z.L. Chemical composition control residue decomposition in soils differing in initial pH. *Soil Biochemistry*. 2006. 38: 544-552.
- Zimmerman, A.R. Abiotic and Microbial Oxidation of Laboratory-Produced Black Carbon (Biochar). *Environmental Science and Technology*. 2010. 44: 1295-1301.