Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

The effect of acidic and neutral biochar on moisture properties of calcareous soils

Iman Hasanpour[1], Mohammad Ali Hajabbasi[*2], Mehran Shirvani[3], Mohammad Mahdi Majidi[4]

1. M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: i.hasanpour@ag.iut.ac.ir
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: hajabbas@iut.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: shirvani@iut.ac.ir
4. Professor, Dept. of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: majidi@iut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 01.04.2022
Revised: 02.23.2022
Accepted: 04.21.2022

Keywords:
Acidic biochar,
Agricultural wastes,
Biochar,
Soil conditioner,
Soil physical quality

ABSTRACT

Background and Objectives: The purpose of incorporating organic modifiers such as biochar with soil is stabilizing carbon, improving fertility, absorbing pollutants, and consequently increasing crop production. Biochar is a biofuel and the resultant of organic matters thermocouples. Biochars are produced in high temperature ovens and are commonly alkaline and so suitable for the acidic soils. However, if the raw materials are heated at low temperatures, the resulting biochar can be acidic and useful for modifying calcareous soils. The aim of this study was to investigate the effect of two types of acidic biochars of rice husk and pine cone for modifying the physical properties of two calcareous soils of Isfahan province.

Materials and Methods: Based on a preliminary experiment, rice husk biochar (pH=5.64) and pine cone biochar (pH=6.56) produced at 300 °C were selected for this study. The experiment was performed in a completely randomized factorial design with three replications. Treatments included two types of biochar (pine cone and rice husk) mixed with soil at one, three and six percent (g/g), two types of soil (a sandy loam, Tiran and a clay loam, Lavark), and two incubation periods of one and six months, with 4 controls and a total of 28 pots. The treated soils were kept in an incubator at 25 °C and 60% of field (pot) capacity. At the end of the incubation periods, the soil moisture contents at field capacity and the permanent wilting point were measured respectively using sand-kaolin box and pressure plate devices and then soil available water contents was calculated.

Results: The results showed that the addition of biochars improved some physical properties of soils. The treatment of the soils with 3% and 6% of biochars caused significant increases in the available water (AW) in the sandy loam soils compared to the control. The physical quality index of Dexter (SDexter) fitted by van Genuchten–Mualem was significantly increased in the sandy loam soil amended with 6% of the biochars and in the clay loam soil amended with 3% and 6% of the biochars. The use of biochars also improved the physical quality of the soil, described by the Dexter index, from poor to very good.

Conclusion: The results of this study showed that addition of 6% rice husk biochar to the clay loam soil and at the 30 days incubation period, could improve soil properties. Therefore, according to these findings, the biochars produced from pine cones and rice husk can be suggested as a suitable conditioner for improving physical properties of the regional calcareous soils.

Cite this article: Hasanpour, Iman, Hajabbasi, Mohammad Ali, Shirvani, Mehran, Majidi, Mohammad Mahdi. 2022. The effect of acidic and neutral biochar on moisture properties of calcareous soils. *Journal of Water and Soil Conservation,* 29 (1), 95-113.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2022.19814.3524
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۶۹
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۹٤

تأثیر زغال زیستی اسیدی و خنثی بر ویژگی‌های رطوبتی خاک‌های آهکی

ایمان حسن‌پور[۱]، محمدعلی حاج‌عباسی*[۲]، مهران شیروانی[۳]، محمد مهدی مجیدی[٤]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: i.hasanpour@ag.iut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: hajabbas@iut.ac.ir

۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: shirvani@iut.ac.ir

٤. استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: majidi@iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۰/۱۰/۱٤
تاریخ ویرایش: ۰۰/۱۲/۰٤
تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۲/۰۱

واژه‌های کلیدی:
اصلاح‌کننده خاک،
بیوچار اسیدی،
پسماندهای کشاورزی،
زغال زیستی،
کیفیت فیزیکی خاک

چکیده

سابقه و هدف: هدف از کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی مانند زغال زیستی تثبیت کربن، بهبود حاصلخیزی خاک، جذب آلاینده‌ها، بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش تولید محصولات کشاورزی می‌باشد. بیوچار زغال زیستی حاصل از گرماکافت ترکیبات آلی است. زغال‌های زیستی عمدتاً در دمای زیاد تولید شده و دارای خاصیت قلیایی می‌شوند و مناسب خاک‌های اسیدی هستند. اما اگر مواد اولیه در دمای کم گرماکافت شوند زغال زیستی حاصل می‌تواند خاصیت اسیدی داشته و در خاک‌های آهکی مورد استفاده قرار گیرد. مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر دو نوع زغال زیستی شلتوک برنج و مخروط کاج به عنوان اصلاح‌کننده بر ویژگی‌های فیزیکی دو خاک آهکی در استان اصفهان انجام شد.

مواد و روش‌ها: بر اساس آزمایش‌های اولیه، زغال زیستی شلتوک برنج (pH=٥/٦٤) و مخروط کاج (pH=٦/٥٦) تولید شده در دمای ۳۰۰°C برای این پژوهش انتخاب شدند. برای تهیه زغال‌های زیستی از کوره مخصوص تولید زغال زیستی در فشار دو اتمسفر و بدون حضور اکسیژن استفاده گردید. این پژوهش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل دو نوع زغال زیستی (مخروط کاج و شلتوک برنج) در مقادیر یک، سه و شش درصد (گرم بر گرم)، دو نوع خاک (با بافت‌های لوم شنی، تیران و لوم رسی، لورک) و دو زمان انکوباسیون یک و شش ماه به همراه چهار شاهد و مجموعاً ۲۸ نمونه بودند. خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی در دمای ۲٥°C و رطوبت ٦۰٪ ظرفیت مزرعه درون انکوباتور نگهداری شدند. در پایان دوره انکوباسیون، درصد رطوبت خاک در شرایط ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم و همچنین آب قابل دسترس با استفاده از دستگاه‌های جعبه شن-کائولین و صفحات فشاری اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: کاربرد زغال زیستی در هر دو خاک قلیایی توانست برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک را بهبود ببخشد. تیمار زغال زیستی مخروط کاج و شلتوک برنج با خاک‌ها به مقدار ۳٪ و ٦٪، سبب افزایش معنی‌دار آب قابل دسترس (AW) در خاک لوم شنی نسبت به شاهد شد. هم‌چنین، کاربرد زغال زیستی باعث افزایش معنی‌دار شاخص کیفیت فیزیکی پیشنهادی دکستر (SDexter) برازش شده با مدل ونگنختن–معلم در مقدار ٦٪ زغال زیستی در خاک لوم شنی و و مقادیر ۳٪ و ٦٪ در خاک لوم رسی نسبت به شاهد شد. استفاده از زغال زیستی باعث شد کیفیت فیزیکی خاک بر اساس شاخص دکستر از وضعیت ضعیف به خیلی خوب تغییر کند.

نتیجه‌گیری: در این مطالعه با افزودن ٦ درصد زغال زیستی شلتوک برنج به خاک لوم رسی و زمان ۳۰ روز انکوباسیون، کیفیت خاک بهبود یافته است. بنابراین و با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان زغال زیستی تولید شده از مخروط کاج و شلتوک برنج را به عنوان یک ماده بهساز مناسب برای ارتقاء ویژگی های فیزیکی خاک‌های آهکی منطقه توصیه نمود.

استناد: حسن‌پور، ایمان، حاج‌عباسی، محمدعلی، شیروانی، مهران، مجیدی، محمد مهدی (۱۴۰۱). تأثیر زغال زیستی اسیدی و خنثی بر ویژگی‌های رطوبتی خاک‌های آهکی. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۹ (۱)، ۱۱۳-۹۵.
DOI: 10.22069/jwsc.2022.19814.3524

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
© نویسندگان.

مقدمه

بر اثر توسعه امکانات و فناوری‌های جدید، تولید انواع محصولات کشاورزی در دهه‌های اخیر به طور چشم‌گیری افزایش داشته است، ولی به علت عدم مدیریت بهینه بعد از برداشت و توزیع نامناسب مواد غذایی، سالیانه مقادیر متنابهی پسماند در بخش کشاورزی حاصل می‌شود که بخش قابل توجهی از آن به شکل غیراصولی و بدون توجه به حفظ محیط زیست رها، سوزانده و یا دفن می‌گردد. با به‌کار بردن روش‌های مناسب مدیریتی در جهت بازیافت پسماندهای کشاورزی، ضمن افزایش بهره‌وری، هدررفت بقایای کشاورزی کاهش یافته و گامی مؤثر در راستای رسیدن به اهداف توسعه پایدار برداشته می‌شود (۱). البته از زمان‌های گذشته بخشی از این پسماندهای آلی مانند کود دامی و بقایای محصولات کشاورزی معمولاً به عنوان اصلاح‌کننده و منبع عناصر غذایی به خاک‌های کشاورزی برگردانده می‌شده است. این کودهای آلی سبب ارتقای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نیز می‌شوند (۲). این بقایا را می‌توان به صورت خام و یا فراورده‌ای مانند زغال زیستی[1] نیز استفاده نمود. زغال زیستی به زغال تولید شده از زیست توده گفته می‌شود. در فرایند تولید زغال زیستی از محصولات زاید کشاورزی مانند پوسته شلتوک برنج استفاده می‌شود که در مقایسه با دفع این مواد به عنوان زباله به روش‌های معمولی مقرون به صرفه‌تر است (۳). مواد زائدی که برای تولید زغال زیستی استفاده می‌شوند، اغلب دارای ارزش اقتصادی کم و یا فاقد آن هستند. بنابراین تبدیل این مواد زائد به محصولات جانبی با هزینه کم و مفید دارای توجیه اقتصادی است (٤).

تجزیه زیست توده در اثر حرارت را گرماکافت[2] گویند و هنگامی که این فرایند در شرایط بدون اکسیژن رخ دهد، زغال زیستی تولید می‌شود (۵). زغال زیستی جاذب رطوبت بسیار خوبی است (٦). کاربرد زغال زیستی می‌تواند جرم مخصوص ظاهری خاک را کاهش دهد (۷). تفاوت در ساختار فیزیکی زغال زیستی و خاک‌ها منجر به تغییر و اصلاح قدرت انبساط خاک، هیدرودینامیک خاک و انتقال گازها می‌شود. اختلاط زغال زیستی با خاک می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی آن را مانند ساختمان، توزیع منافذ و تراکم، تهویه، ظرفیت نگه‌داشت رطوبت را تغییر داده و از این طریق رشد گیاه و کارایی آن را بهبود ببخشد (۸). بهبود ظرفیت نگه‌داری رطوبت خاک به‌طور غیرمستقیم در نتیجه خاکدانه‌سازی و بهبود ساختمان خاک بعد از اضافه کردن زغال زیستی در خاک گزارش شده است (۹). زغال زیستی می‌تواند در اثر فعل و انفعالات با مواد آلی خاک، کانی‌ها و میکروارگانیسم‌ها، خاکدانه‌سازی را تحت‌تأثیر قرار دهد. ویژگی‌های بار سطحی زغال زیستی اثر طولانی‌مدت در خاکدانه‌سازی دارد. تأثیر زغال زیستی بر افزایش رطوبت ممکن است به دلیل افزایش سطح ویژه خاک‌های درشت بافت باشد. بنابراین بهبود در نگه‌داشت آب در اثر اضافه کردن زغال زیستی، ممکن است تنها در خاک‌های درشت بافت یا خاک‌هایی که تعداد زیادی منافذ درشت دارند، دیده شود (۱۰). گروه‌های کربوکسیل مختلفی مانند کربوکسیل، هیدروکسیل فنولیک، کربونیل، لاکتون، پیرن، گروه‌های انیدرید اسید در زغال زیستی موجود هستند (۱۱) و اکسیداسیون زغال زیستی می‌تواند pH خاک را در اطراف خود کاهش دهد و خاصیت اسیدی ایجاد کند (۱۲). در واقع افزایش دمای گرماکافت باعث کاهش گروه‌های عامل اسیدی و ایجاد خاصیت بازی می‌شود (۱۳).

در پژوهشی که آنتونی راجر دکستر (a ۲۰۰٤) برای تقسیم‌بندی خاک‌ها انجام داد بیان نمود

1- Biochar
2- Pyrolysis

مشخصه‌های خاک‌های با کیفیت فیزیکی ضعیف این است که نفوذپذیری آبی کم، روان‌آب زیاد، سخت‌شوندگی، تهویه ضعیف و قابلیت ریشه‌زنی کم برای گیاه دارند. با توجه به تأثیری که توزیع اندازه و آرایش منافذ بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک دارند، شیب منحنی مشخصه رطوبتی در نقطه عطف (S) وابسته به ریزساختار خاک بوده و در نتیجه شاخص S به طور مستقیم در بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی مهم خاک اثرپذیر است. این شاخص بیانگر کیفیت فیزیکی شیب منحنی مشخصه رطوبتی در نقطه عطف است. یعنی زمانی است که منحنی مشخصه رطوبتی براساس مقدار رطوبت وزنی خاک ($\theta(kg\ kg^{-1})$) در برابر لگاریتم طبیعی مکش ماتریک بر پایه عدد e ($ln(h)$) رسم می‌شود (۱٤). با توجه به موارد ذکر شده و با فرض این‌که زغال‌های زیستی اسیدی می‌توانند خصوصیات فیزیکی خاک‌های آهکی را بهبود بخشند، مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر دو نوع زغال زیستی اسیدی و خنثی شلتوک برنج و مخروط کاج به‌عنوان اصلاح‌کننده و موثر بر ویژگی‌های فیزیکی دو نوع خاک آهکی در استان اصفهان انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از دو خاک لوم شنی[1] و لوم رسی[2] استفاده شد. نمونه خاک لوم شنی از منطقه همت‌آباد تیران در استان اصفهان با مختصات جغرافیایی "٤٦/٥ '١٣ °٥١ طول شرقی و "٢٠/٢ '٤٠ °٣٢ عرض شمالی و خاک لوم رسی از مزرعه لورک دانشگاه صنعتی اصفهان در شهرستان نجف‌آباد با مختصات جغرافیایی "٨/٩ '٢٣ °٥١ طول شرقی و "٢٢/٣ '٣٢ °٣٢ عرض شمالی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری در شهریورماه سال ۱۳۹۷ نمونه‌برداری شد. خاک‌ها هوا خشک شده و پس از عبور از الک دو میلی‌متری برای انجام آزمایش به محل آزمایشگاه منتقل شد.

از آنجائی‌که مطالعه بر روی خاک‌های آهکی انجام می‌گرفت و هدف بررسی تأثیر زغال‌های زیستی با اسیدیته کم‌تر از خنثی؛ روی این خاک‌ها بود و به‌منظور انتخاب بهترین نوع ماده آلی اولیه برای تولید زغال زیستی دارای pH مناسب، هفت نوع پسماند آلی مختلف شامل چیپس چوب، مخلوط برگ درختان، برگ‌های کاج و همچنین مخروط کاج از درختان جنگل دانشگاه صنعتی اصفهان، شلتوک برنج از منطقه فلاورجان، بقایای شاخساره سیب‌زمینی از منطقه سمیرم و کاه گندم از منطقه بوئین میاندشت به‌عنوان ماده اولیه تهیه شدند. مواد اولیه پس از آماده‌سازی، طی چند مرحله با آب معمولی و سپس با آب مقطر شسته شدند. سپس بقایای گیاهی به مدت ٤٨ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک و پس از آسیاب کردن از الک یک میلی‌متر عبور داده و برای تولید زغال زیستی استفاده شدند.

به منظور تولید زغال زیستی، بقایای گیاهی آسیاب شده داخل کوره مخصوص تولید زغال زیستی و در شرایط عدم وجود اکسیژن تحت فشار ۲ اتمسفر گاز نیتروژن قرار داده شدند. این کوره شامل محفظه‌ای با لوله‌های رابط ورودی گاز و خروجی شیرابه و ترموکوپل است. شرایط بدون اکسیژن به گونه‌ای بود که گاز نیتروژن از رابط ورودی به داخل محفظه کوره هدایت و تصاعدات گازی و محصولات جانبی آن از رابط خروجی جمع آوری شد. هر کدام از مواد خام اولیه در دماهای ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد داخل کوره گرماکافت شدند. برنامه دمایی با نرخ افزایش دمای ۲/۵ درجه بر دقیقه و زمان ماند ٤ ساعت اعمال شد (۱۳). سپس نمونه‌های زغال زیستی تولید شده به آزمایشگاه منتقل و pH و EC آن‌ها در

1- Sandy loam
2- Clay loam

مخلوط زغال زیستی و آب مقطر با نسبت ۱:۲۰ اندازه‌گیری شد. با توجه به این که در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد ماده آلی به طور کامل به زغال زیستی تبدیل نشد و هم‌چنین با توجه به نتایج درصد عملکرد تقریباً یکسان زغال‌های زیستی تولید شده در دمای ۳۰۰ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، در نهایت شلتوک برنج و مخروط کاج و دمای گرماکافت ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌دلیل مناسب بودن pH برای آزمایش‌های اصلی انتخاب شدند.

آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی انجام شد. تیمارها شامل دو خاک آهکی با بافت‌های متخلف (سبک و سنگین)، دو نوع زغال زیستی (مخروط کاج و شلتوک برنج)، سه مقدار زغال زیستی (۱٪، ۳٪، ٦٪ وزنی) و دو دوره زمانی انکوباسیون (۳۰ روزه و ۱۸۰ روزه) مجموعا ۲٤ تیمار به همراه ٤ شاهد (۲ خاک و ۲ انکوباسیون) و در کل ۲۸ تیمار در سه تکرار بودند (مجموعاً ۸٤ نمونه). تیمارها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ثابت ٦۰٪ ظرفیت زراعی درون انکوباتور نگهداری شدند.

مقادیر pH و EC نمونه‌های زغال زیستی در حالت تعلیق در آب به ترتیب توسط دستگاه pH متر (827-Swise) و دستگاه EC متر (507-CC) (۱۵) اندازه‌گیری شد. بافت خاک به روش پیپت و بر پایه قانون استوک اندازه‌گیری شد (۱٦). پس از تعیین درصد شن، سیلت و رس، کلاس بافتی خاک مشخص شد.

رطوبت خاک در شرایط ظرفیت (گلدان) مزرعه[1] (FC)، نقطه پژمردگی دائم[2] (PWP) و آب قابل‌دسترس[3] (AW) با استفاده از دستگاه‌های جعبه شن-کائولین و صفحات فشاری اندازه‌گیری شد. برای خاک رسی به دلیل تخلخل بیش‌تر از فشار bar ۰/۳ و برای خاک شنی به دلیل تخلخل کم‌تر از فشار bar ۰/۱ برای تعیین ظرفیت زراعی مزرعه (FC) طبق روش کار استفاده شد. برای تعیین نقطه پژمردگی دائم از فشار bar ۱۵ استفاده (۱۷) و آب قابل دسترس با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه شد.

$$PAW_{100} = \theta_{100} - \theta_{15000} \qquad (۱)$$

$$PAW_{330} = \theta_{330} - \theta_{15000} \qquad (۲)$$

که در آن‌ها، θ_{100} برابر با رطوبت خاک در مکش ماتریک ۱۰۰ هکتو پاسکال، θ_{330} برابر با مقدار رطوبت خاک در مکش ۳۳۰ هکتو پاسکال و θ_{15000} برابر با مقدار رطوبت در مکش ماتریک ۱۵۰۰۰ هکتو پاسکال (نقطه پژمردگی دائم) است (۱۸).

برای اندازه‌گیری درصد خاکستر[4] زغال زیستی از روش ASTM D-2866 و با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (۱۹).

$$\text{خاکستر (٪)} = \frac{\text{جرم خاکستر (گرم)}}{\text{جرم بیوچار (گرم)}} \times ۱۰۰ \qquad (۳)$$

هم‌چنین درصد عملکرد[5] از طریق مقدار زغال زیستی تولید شده به ازای واحد جرم ماده اولیه از طریق رابطه زیر محاسبه شد (۱۹).

$$\text{عملکرد (٪)} = \frac{\text{جرم بیوچار (گرم)}}{\text{جرم آون خشک ماده آلی(گرم)}} \times ۱۰۰ \qquad (٤)$$

شاخص کیفیت فیزیکی پیشنهادی دکستر توسط مدل ونگنختن-معلم[6] برازش داده و در تمامی مراحل

1- Field capacity (FC)
2- Permanent wilting point (PWP)
3- Available water (AW)
4- Ash content
5- Biochar yield
6- Van Genuchten Mualem model

برای برازش معادلات در داده‌های رطوبت خاک، از ابزار Excel Solver نسخه ۲۰۱۶ استفاده شد. آنالیزهای آماری (تجزیه واریانس) با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه 9.4 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح ۵٪ انجام شد. نمودارها با نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۶ رسم گردید.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به این‌که اغلب خاک‌های اصفهان به طور میانگین لومی هستند یک خاک لوم شنی و خاک دیگری لوم رسی انتخاب شد که تخلخل آن‌ها تقریباً با هم برابر است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها پیش از افزودن زغال زیستی.

Table 1. Physical properties of soil prior to treating with biochar.

خاک منطقه لورک Soil of Lavark area	خاک منطقه تیران Soil of Tiran area	صفت Attribute
28.8	18.9	رس (٪) Clay (%)
40.7	26.8	سیلت (٪) Silt (%)
30.5	54.3	شن (٪) Sand (%)
Clay loam	Sandy loam	بافت خاک Soil Texture
0.28	0.29	رطوبت ظرفیت زراعی مکش ۱۰۰ هکتوپاسکال ($g\ g^{-1}$) Field capacity in 100 hPa ($g\ g^{-1}$)
0.23	0.24	رطوبت ظرفیت زراعی مکش ۳۳۰ هکتوپاسکال ($g\ g^{-1}$) Field Capacity in 300 hPa ($g\ g^{-1}$)
0.14	0.14	رطوبت نقطه پژمردگی دائم ($g\ g^{-1}$) Permanent Wilting Point ($g\ g^{-1}$)
0.11	0.15	رطوبت قابل دسترس مکش ۱۰۰ هکتوپاسکال ($g\ g^{-1}$) Available water in 100 h Pa ($g\ g^{-1}$)
0.07	0.09	رطوبت قابل دسترس مکش ۳۳۰ هکتوپاسکال ($g\ g^{-1}$) Available water in 330 h Pa ($g\ g^{-1}$)
0.42	0.39	رطوبت اشباع ($g\ g^{-1}$) Saturated water ($g\ g^{-1}$)
0.15	0.07	رطوبت باقی‌مانده ($g\ g^{-1}$) Residual moisture ($g\ g^{-1}$)
0.039	0.033	شاخص S Dexter S Dexter index
1.35	1.37	جرم مخصوص ظاهری ($g\ cm^{-3}$) Bulk Density ($g\ cm^{-3}$)
0.49	0.48	تخلخل ($cm^{-3}\ cm^{-3}$) Porosity ($cm^{-3}\ cm^{-3}$)

هم‌چنین در جدول ۲ برخی ویژگی‌های شیمیایی نمونه‌های زغال زیستی تولید شده ذکر شده است.

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی نمونه‌های زغال زیستی تولید شده در دمای ۳۰۰°C.

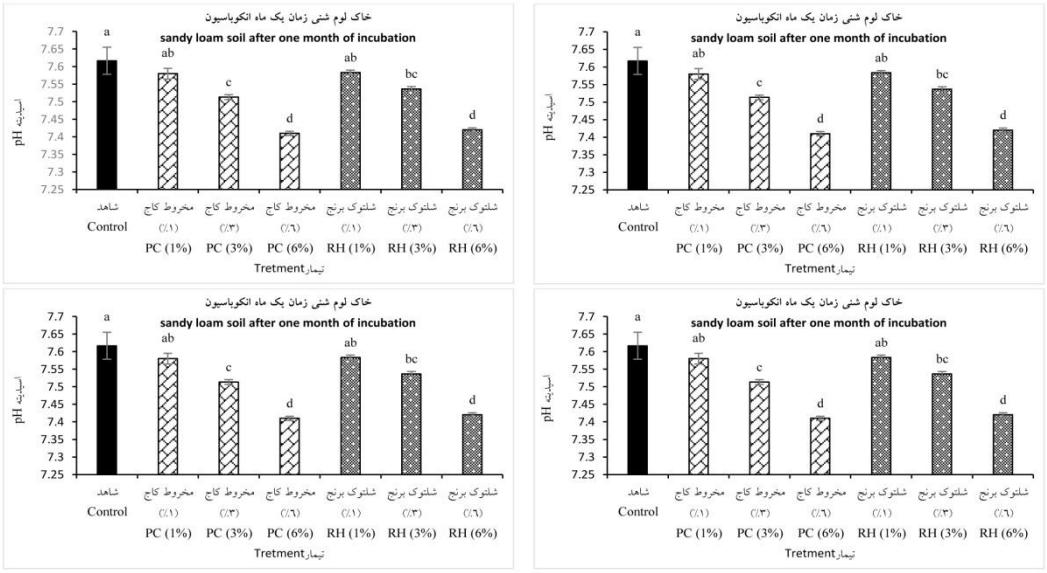
Table 2. Chemical properties of biochar samples produced at 300 °C.

زغال زیستی مخروط کاج Pine cone biochar	زغال زیستی شلتوک برنج Rice husk biochar	صفت Attribute
6.6 ± 0.09	5.6 ± 0.19	pH (1:20)
0.72 ± 0.03	0.31 ± 0.01	EC ($dS\ m^{-1}$)
10.33 ± 0.57	31.3 ± 2.1	خاکستر (٪) Ash (%)
48.7 ± 4.1	52.9 ± 2.6	عملکرد (٪) Performance (%)

ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در خاک‌ها شامل موارد زیر است که تأثیر هر کدام به صورت جداگانه بیان شده است.

pH: بر اساس شکل ۱ هنگامی که خاک‌ها با زغال‌های زیستی اسیدی و خنثی تیمار شدند با گذشت زمان خاک نه تنها خاصیت قلیایی پیدا نکرد؛ بلکه دارای خاصیت اسیدی شد به طوری‌که خاک لوم شنی پیش از تیمار با زغال زیستی دارای اسیدیته ۷/۷ و خاک لوم رسی ۸/۱ (با نسبت ۱:۵) بود، اما پس از تیمار با زغال زیستی نسبت به شاهد pH آن کاهش یافت. در چهار حالتی که برای این خاک‌ها متصور می‌شد، در همه موارد تیمار ٦٪ زغال زیستی، بیش‌ترین کاهش pH را در هر دو نوع خاک ایجاد کرد که این تأثیر معنی‌دار بود. طبق برآوردی که انجام شد بیش‌ترین تأثیر زغال زیستی بر کاهش اسیدیته در خاک لوم رسی پس از گذشت شش ماه انکوباسیون در تیمار ٦٪ زغال زیستی شلتوک برنج مشاهده گردید که سبب کاهش معنی‌دار ۰/۳۵ واحدی نسبت به نمونه شاهد شد.

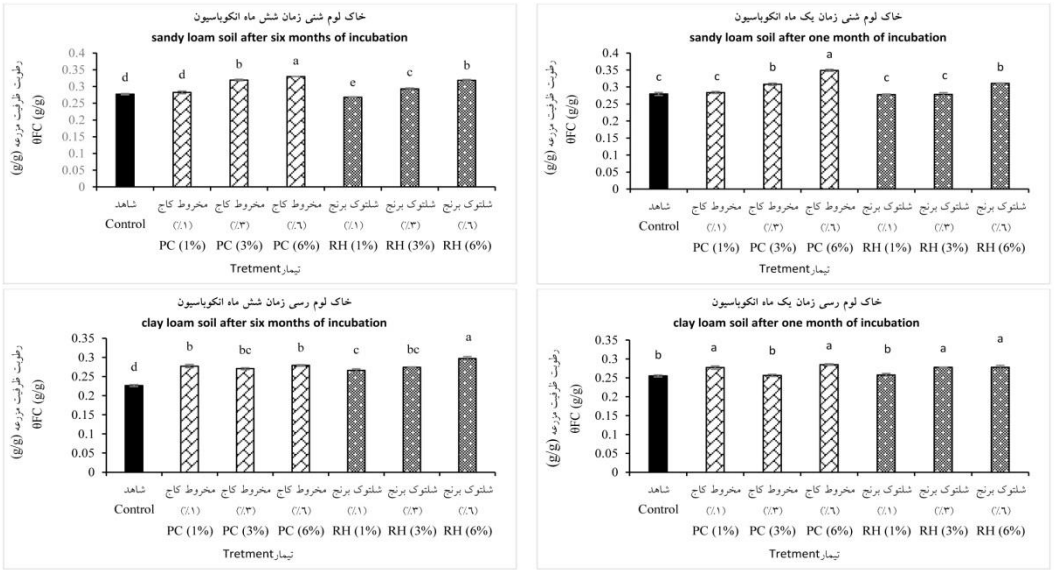
در پژوهشی که اپولیتو و همکاران (۲۰۱۲) انجام دادند به این نتیجه رسیدند که با افزایش ۲٪ زغال زیستی به خاک، کاهش قابل‌توجهی در pH خاک ایجاد شد. زغال زیستی با pH کم می‌تواند کیفیت شیمیایی و هم‌چنین فیزیکی خاک را با کاهش تلفات عناصر غذایی در خاک‌های آهکی بهبود بخشد (۲۰).



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر نوع (مخروط کاج و شلتوک برنج) و مقدار زغال زیستی (یک، سه و شش درصد وزنی) بر pH خاک.

Figure 1. Comparison (overall average) of the effect of type (pine cone and rice husk) and biochar level (one, three and six percent by weight) on soil pH.

رطوبت ظرفیت مزرعه: نتایج مقایسه میانگین اثر نوع و مقدار زغال زیستی بر ظرفیت زراعی مزرعه نشان داد هر دو زغال زیستی به مقدار شش درصد در خاک‌های لوم شنی و لوم رسی سبب افزایش معنی‌دار رطوبت خاک در شرایط ظرفیت زراعی نسبت به شاهد شد که دلیل آن تخلخل زیاد زغال زیستی در اثر افزودن به خاک است (شکل ۲). در خاک لوم رسی کاربرد ۶٪ زغال زیستی شلتوک برنج با بیش از $0/07\ g\ g^{-1}$، بیش‌ترین تأثیر معنی‌دار را نسبت به نمونه شاهد پس از گذشت ۱۸۰ روز بر رطوبت ظرفیت زراعی خاک داشت.

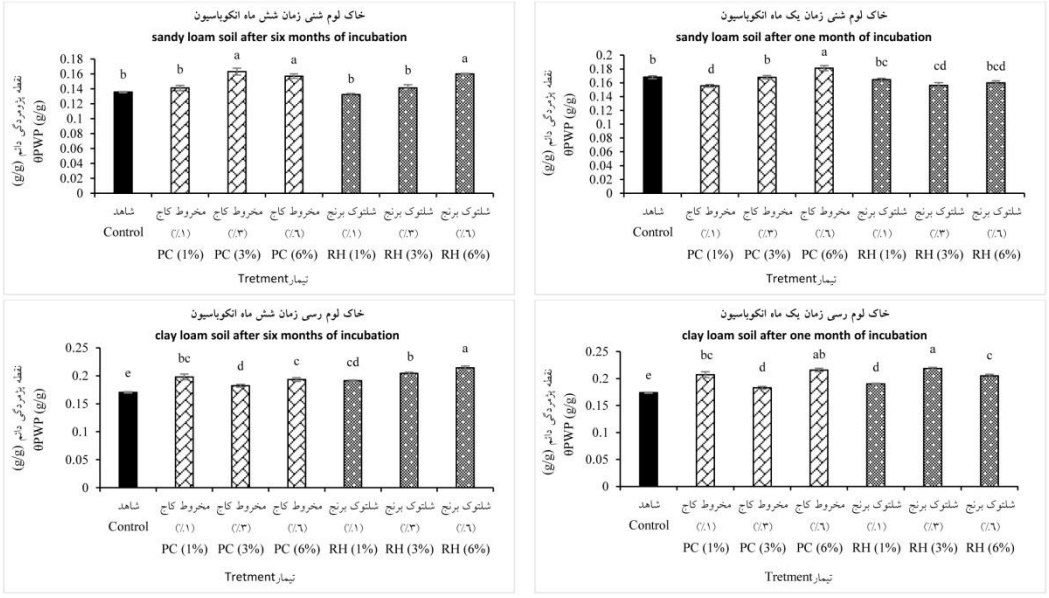


شکل ۲- مقایسه میانگین اثر نوع (مخروط کاج و شلتوک برنج) و مقدار زغال زیستی (یک، سه و شش درصد وزنی) بر ظرفیت زراعی خاک.

Figure 2. Comparison (overall average) of the effect of type (pine cone and rice husk) and biochar level (one, three and six percent by weight) on soil water content at field capacity.

رطوبت نقطه پژمردگی دائم: نمودار مقایسه میانگین تیمارها نشان می‌دهد در خاک لوم شنی و زمان یک ماه انکوباسیون، زغال زیستی مخروط کاج فقط در سطح ٦٪ باعث افزایش رطوبت نقطه پژمردگی دائم خاک گردید، درصورتی که زغال زیستی شلتوک برنج تفاوت زیادی نسبت به شاهد نداشت. در خاک لوم شنی و زمان شش ماه انکوباسیون زغال زیستی مخروط کاج در مقادیر ۳ و ٦ درصد و زغال زیستی شلتوک برنج فقط در سطح ٦ درصد سبب افزایش معنی‌دار رطوبت نقطه پژمردگی دائم خاک نسبت به شاهد شد. خاک لوم رسی و زمان یک ماه انکوباسیون و خاک لوم رسی و زمان شش ماه انکوباسیون، هر دو نوع زغال زیستی در همه مقادیر، افزایش میزان رطوبت نقطه پژمردگی دائم را نسبت به شاهد در پی داشتند (شکل ۳).

در خاک لوم رسی کاربرد زغال زیستی شلتوک برنج در مقدار ٦٪ با بیش از $0.04\ g\ g^{-1}$، بیش‌ترین تأثیر معنی‌دار را نسبت به نمونه شاهد پس از گذشت ۱۸۰ روز بر رطوبت نقطه پژمردگی دائم خاک داشت (شکل ۳). سلیمان و همکاران (۲۰۱۷) گزارش دادند که کاربرد زغال‌های زیستی چوب کاج و صنوبر تولید شده در دماهای ۳۵۰ و ٦۰۰ درجه سانتی‌گراد با نسبت وزنی ۲۰ گرم بر کیلوگرم، سبب افزایش رطوبت حجمی خاک در نقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم و آب قابل دسترس در یک خاک شنی شد. در این پژوهش رطوبت اشباع همه خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی کم‌تر از شاهد بود (۲۱).

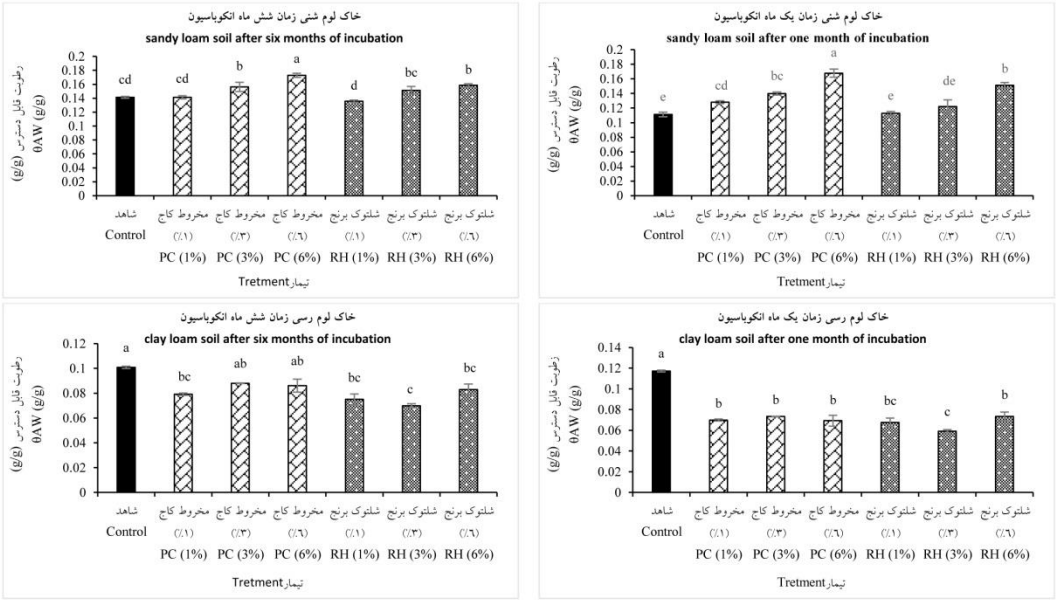


شکل ۳- مقایسه میانگین اثر نوع (مخروط کاج و شلتوک برنج) و مقدار زغال زیستی (یک، سه و شش درصد وزنی) بر نقطه پژمردگی دائم خاک.

Figure 3. Comparison (overall average) of the effect of type (pine cone and rice husk) and biochar level (one, three and six percent by weight) on soil permanent wilting point.

رطوبت قابل‌دسترس: نمودارهای مقایسه میانگین شکل ٤ نشان می‌دهد رطوبت قابل‌دسترس خاک‌های لوم شنی با اضافه کردن مقادیر ۳ و ٦ زغال زیستی افزایش یافته، در صورتی که مقدار این رطوبت در خاک لوم رسی روند کاهشی نسبت به شاهد داشته است که دلیل آن می‌تواند ناشی از خصوصیت خاک‌های رسی باشد و یا این‌که افزودن زغال زیستی به خاک سبب آبگریزی شده و رطوبت کم‌تری در خاک حفظ شده است. در خاک لوم شنی با افزایش مقدار زغال زیستی افزوده شده به خاک، θ_{AW} افزایش یافته که این افزایش به‌ویژه در ماه اول انکوباسیون مشهودتر است. در خاک لوم شنی کاربرد زغال زیستی مخروط کاج در مقدار ٦٪ با بیش از $^{-1}$g g ۰/۰۵، بیش‌ترین تأثیر معنی‌دار را نسبت به نمونه شاهد پس از گذشت ۳۰ روز بر رطوبت قابل‌دسترس خاک داشت.

بریگز و همکاران (۲۰۱۲) گزارش دادند با به‌کار بردن مقادیر ۵، ۱۰ و ۵۰ گرم بر کیلوگرم زغال زیستی بقایای درخت کاج تولید شده در دمای ٤٥٠°C در یک خاک لوم شنی سبب افزایش ظرفیت نگه‌داشت رطوبت ظرفیت زراعی می‌شود (۲۲). پژوهش کوید و همکاران (۲۰۱۵) زغال زیستی یک نوع چمن که در دمای ۳۷۵°C تولید شده بود را به صورت یک درصد وزنی به چند نوع خاک لومی اضافه و مشاهده کردند آب قابل‌دسترس افزایش معنی‌داری پیدا کرد. هم‌چنین منحنی مشخصه رطوبتی بیش‌ترین میزان رطوبت قابل‌دسترس را در خاک لوم شنی تیمار شده با ۱٪ زغال زیستی نمایش داد (۲۳).



شکل ٤- مقایسه میانگین اثر نوع (مخروط کاج و شلتوک برنج) و مقدار زغال زیستی (یک، سه و شش درصد وزنی) بر آب قابل‌دسترس خاک.

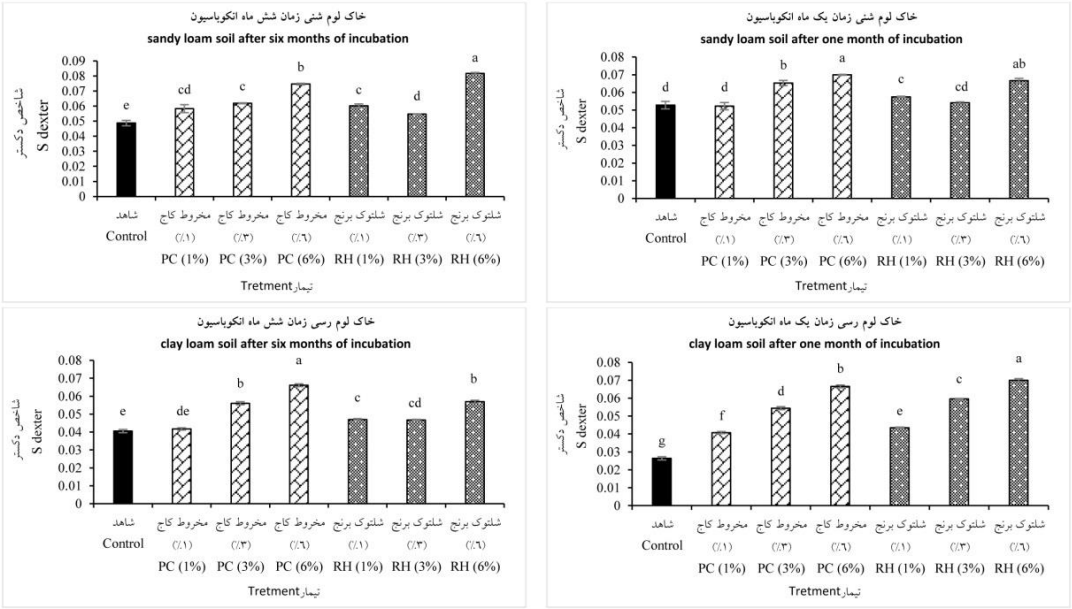
Figure 4. Comparison (overall average) of the effect of type (pine cone and rice husk) and biochar level (one, three and six percent by weight) on soil available water.

شاخص پیشنهادی دکستر: نمودار مقایسه میانگین شکل ۵ نشان می‌دهد مقدار شاخص دکستر در نمونه شاهد خاک لوم شنی بیش‌تر از نمونه شاهد خاک لوم رسی در هر دو زمان بود که این به دلیل خاصیت خاک‌هایی است که مقدار رس بیش‌تری دارند. در زمان یک ماه پس از افزودن زغال زیستی به خاک لوم شنی، زغال زیستی مخروط کاج در مقادیر ۳ و ٦ درصد و زغال زیستی شلتوک برنج در مقادیر ۱ و ٦ درصد سبب افزایش شاخص دکستر شده‌اند. کاربرد هر دو نوع زغال زیستی در تمام مقادیر موجب افزایش شاخص دکستر در خاک لوم شنی پس از گذشت ٦ ماه انکوباسیون شد. در خاک لوم رسی و پس از گذشت یک ماه و شش ماه انکوباسیون، کاربرد هر دو نوع زغال زیستی در تمامی مقادیر به جز خاک تیمار شده با ۱٪ زغال زیستی مخروط کاج پس از شش ماه انکوباسیون، سبب افزایش این شاخص گردید. بیش‌ترین مقدار افزایش شاخص در مقابل شاهد در خاک لوم شنی و زمان ۳۰ روز انکوباسیون با بیوچار مخروط کاج ٦٪ برابر ۰/۰۱۷، در خاک لوم شنی و زمان ۱۸۰ روز انکوباسیون با بیوچار شلتوک برنج ٦٪ برابر ۰/۰۳۲، در خاک لوم رسی و زمان ۳۰ روز انکوباسیون با بیوچار شلتوک برنج ٦٪ برابر ۰/۰٤۳ و در خاک لوم رسی و زمان ۱۸۰ روز انکوباسیون با بیوچار مخروط کاج ٦٪ برابر ۰/۰۲۵ است.

در خاک لوم رسی کاربرد زغال زیستی شلتوک برنج در مقدار ٦٪ با بیش از ۰/۰٤ واحد، بیش‌ترین تأثیر معنی‌دار را نسبت به نمونه شاهد پس از گذشت یک ماه بر شاخص کیفیت فیزیکی دکستر داشت. با توجه به تأثیری که توزیع اندازه و آرایش منافذ بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک دارند، شیب منحنی مشخصه رطوبتی در نقطه عطف (S) وابسته به ریز ساختار خاک بوده و در نتیجه شاخص S به طور مستقیم از بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی مهم خاک اثرپذیر است. کیفیت فیزیکی خاک بر فرایندهای شیمیایی و بیولوژیکی خاک اثرگذار است و دکستر یک رابطه خطی بین ماده آلی و شاخص S در خاک لوم شنی و لوم سیلتی پیدا کرد (۱٤).

با توجه به مثلثی که آنتونی راجر دکستر در سال ۲۰۰٤ ارائه نمود (۱٤)، خاک پیش از تیمار با زغال زیستی منطقه لورک در محدوده C و خاک منطقه تیران در محدوده B قرار می‌گیرد. با توجه به آن و مقایسه با نمودار مقایسه میانگین شکل ۵، می‌توان نتیجه گرفت کاربرد زغال زیستی در تمامی مقادیر و در هر دو زمان انکوباسیون، کیفیت فیزیکی خاک را از محدوده ضعیف به محدوده خوب و خیلی خوب تبدیل کرده است.

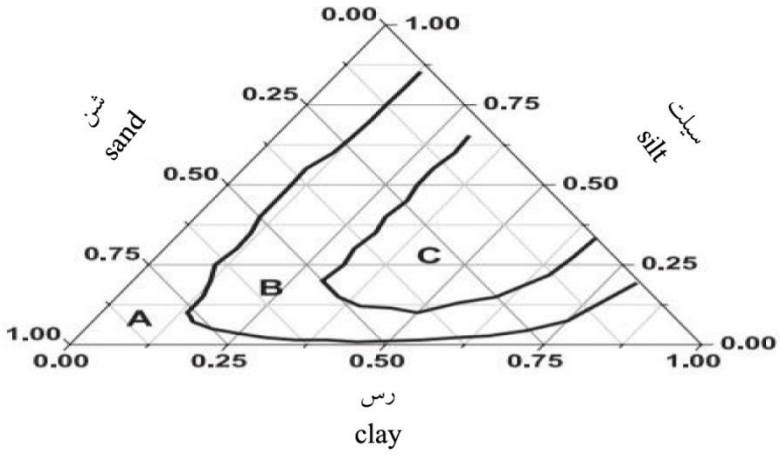
با وجود دامنه گسترده رس در پژوهش‌های آنتونی راجر دکستر (b ۲۰۰٤)، برخی از خاک‌های شنی ممکن است در آن طبقه‌بندی جای نگیرند، زیرا در این خاک‌ها توزیع اندازه منافذ ناشی از توزیع اندازه ذره‌های محدود (و نه فراوانی منافذ ساختمانی) سبب بزرگ‌تر شدن S می‌شود، در صورتی که بافت این خاک‌ها ذاتاً کیفیت فیزیکی خوبی ندارد. هم‌چنین با استفاده از آن، می‌توان تغییرات کیفیت فیزیکی خاک‌ها را با گذشت زمان تفسیر نمود. در اکثر پژوهش‌ها مقدار این شاخص بزرگ می‌شود که نشان‌دهنده ساختار بهتر خاک است که این پارامتر بر اکثر ویژگی‌ها و رفتارهای فیزیکی خاک مؤثر است و برای عملکرد مناسب خاک در کشاورزی و محیط زیست لازم است (۲٤).



شکل ۵- نمودار مقایسه میانگین اثر نوع (مخروط کاج و شلتوک برنج) و مقدار زغال زیستی (یک، سه و شش درصد وزنی) بر شاخص پیشنهادی دکستر.

Figure 5. Comparison diagram of the mean effect of type (pine cone and rice husk) and biochar level (one, three and six percent by weight) on the proposed Dexter index.

ارتباط مثلث بافت خاک با شاخص کیفیت فیزیکی دکستر با توجه به شکل زیر مشخص می‌شود. مقدار شاخص در خاک لوم رسی و زمان ۳۰ روز انکوباسیون با کاربرد زغال زیستی شلتوک برنج در مقدار ٦٪ با بیش از ۰/۰٤ در محدوده منطقه A قرار می‌گیرد.



شکل ٦- ارتباط مثلث بافت خاک با شاخص کیفیت فیزیکی دکستر

(منطقه A، S > ۰/۰٤)، (منطقه B، ۰/۰٤ > S > ۰/۰۳) و (منطقه C، S < ۰/۰۳) (١٤).

Figure 6. Relationship between soil texture triangle and Dexter quality index (Zone A, 0.04 < S), (Zone B, 0.03 < S < 0.04) and (Zone C, 0.03 > S).

آنتونی راجر دکستر (b ۲۰۰٤) بر اساس خاک‌های موجود در هفت کشور با مقادیر رس بین ٤ تا ۷۳ درصد بنابر شاخصی که خود تعریف کرد، خاک‌ها را به کلاس‌های مختلف تقسیم‌بندی کرد (جدول ۳).

بر این اساس با افزودن بیوچار به خاک، شاخص دکستر افزایش یافته و در محدوده خوب و خیلی‌خوب قرار گرفت (۲٤).

جدول۳- شاخص کیفیت فیزیکی دکستر.

Table 3. Dexter physical quality index.

کیفیت خاک Soil quality	دامنه شاخص پیشنهادی دکستر Dexter proposed index range
خیلی ضعیف Very poor	$S < 0.020$
ضعیف Poor	$0.020 < S < 0.035$
خوب High	$0.035 < S < 0.050$
خیلی خوب Best	$0.050 < S$

جدول تجزیه واریانس کلی شامل نوع زغال زیستی، مقدار زغال زیستی، نوع خاک و زمان و آثار متقابل دوگانه، سه‌گانه و چهارگانه که در هر پارامتر به طور جداگانه به اثر آن پرداخته شد در جدول ٤ ارائه گردیده است.

جدول ٤- تجزیه واریانس کلی.

Table 4. General analysis of variance table.

منبع تغییرات Source of Changes	درجه آزادی Degrees of freedom	میانگین مربعات Mean squares				
		اسیدیته pH	رطوبت ظرفیت مزرعه (g g^{-1}) θFC (g g^{-1})	رطوبت پژمردگی دائم (g g^{-1}) θPWP (g g^{-1})	رطوبت قابل‌دسترس (g g^{-1}) θAW (g g^{-1})	شاخص دکستر S Dexter
نوع زغال زیستی Biochar type	1	0.0042*	0.0018**	0.000007^{ns}	0.0016**	0.00001^{ns}
مقدار زغال زیستی Biochar level	2	0.1486**	0.0064**	0.0010**	0.0022**	0.0022**
نوع خاک Soil type	1	2.27**	0.0129**	0.0341**	0.0890**	0.0014**
زمان Time	1	1.39**	0.0001*	0.0020**	0.0033**	0.000005^{ns}
مقدار زغال زیستی × نوع زغال زیستی Biochar level × Biochar type	2	0.0006^{ns}	0.00004^{ns}	0.0002**	0.00009^{ns}	0.0001**
مقدار زغال زیستی × نوع خاک Biochar level × Soil type	2	0.0025^{ns}	0.0017**	0.0001*	0.0012**	0.0001**
مقدار زغال زیستی × زمان Biochar level × Time	2	0.0038*	0.0002**	0.00005^{ns}	0.0001^{ns}	0.00007**
نوع زغال زیستی × نوع خاک Biochar type × Soil type	1	0.0039*	0.0022**	0.0011**	0.0002^{ns}	0.000004^{ns}
نوع زغال زیستی × زمان Biochar type × Time	1	0.0062**	0.0002*	0.00008^{ns}	0.00002^{ns}	0.00002*
نوع خاک × زمان Soil type × Time	2	0.1343**	0.0001^{ns}	0.0003**	0.00008^{ns}	0.0003**
مقدار زغال زیستی × نوع زغال زیستی × نوع خاک Biochar level × Biochar type × Soil type	2	0.0027*	0.0008**	0.0012**	0.0002^{ns}	0.00005**
مقدار زغال زیستی × نوع زغال زیستی × زمان Biochar level × Biochar type × Time	2	0.0068**	0.0004**	0.0007**	0.00002^{ns}	0.00001^{ns}
مقدار زغال زیستی × نوع خاک × زمان Biochar level × Soil type × Time	2	0.0168**	0.0002**	0.0001*	0.0001^{ns}	0.00010**
نوع زغال زیستی × نوع خاک × زمان Biochar type × Soil type × Time	1	0.0238**	0.000005^{ns}	0.0001*	0.0002^{ns}	0.0001**
مقدار زغال زیستی× نوع زغال زیستی × نوع خاک × زمان Biochar level × Biochar type × Soil type × Time	2	0.0177**	0.0001*	0.00009*	0.000005^{ns}	0.00009**
خطا Error	48	0.0008	0.00003	0.00003	0.00006	0.00004
ضریب تغییرات CV	-	1.373	1.88	3.10	6.86	3.29
ضریب تبیین R^2	-	0.99	0.96	0.97	0.97	0.98

^{ns}، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد

^{ns}, * and ** Non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی این پژوهش نشان داد که تیمارها و سطوح مختلف زغال زیستی سبب بهبود ویژگی‌ها و کیفیت فیزیکی خاک می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست آمده تولید زغال زیستی در دمای کم سبب ایجاد خاصیت اسیدی و خنثی در خاک می‌شود. اختلاط زغال زیستی با خاک لوم شنی باعث افزایش آب قابل‌دسترس (AW) شد.

کاربرد زغال زیستی شلتوک برنج ٦٪ در خاک لوم رسی و زمان ۳۰ روز انکوباسیون سبب شد کیفیت فیزیکی خاک از محدوده ضعیف (مقدار شاخص ۰/۰۲) به محدوده خوب (مقدار شاخص ۰/۰٤) برسد (جدول ۳). استفاده از زغال زیستی به عنوان یک ماده زیستی ارزان، در دسترس و پایدار در خاک، می‌تواند سبب بهبود بلندمدت خواص و ویژگی‌های فیزیکی خاک و در نتیجه افزایش بهره‌وری محصول شود. به‌عبارت دیگر پایداری زغال زیستی در برابر تجزیه از مزایای استفاده آن در خاک است، ضمن آن‌که تهیه آن از منابع ارزان‌قیمت و با صرفه اقتصادی صورت می‌پذیرد.

تقدیر و تشکر

از مسئولین آزمایشگاه‌های شیمی، فیزیک و پیدایش و رده‌بندی دانشکده مهندسی کشاورزی دانشگاه صنعتی به جهت همکاری در به سرانجام رسیدن پروژه سپاسگزاری می‌شود.

داده‌ها و اطلاعات

پژوهش حاضر حاصل بخش‌هایی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد می‌باشد که در آزمایشگاه‌های گروه خاکشناسی و آزمایشگاه‌های کمک پژوهشی دانشکده مهندسی کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان طی سال‌های ۹٦ تا ۹۹ به اجرا در آمده است.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است:

نویسنده اول: تهیه پیش‌نویس مقاله، اندازه‌گیری پارامترها، آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، آنالیز داده‌ها، نوشتن مقاله، نویسنده دوم: استاد راهنما و پیشنهاددهنده پارامترهای فیزیکی جهت بررسی و اندازه‌گیری، نویسنده سوم: استاد راهنما و پیشنهاد دهنده طرح اصلی، نویسنده چهارم: استاد مشاور، بازبینی مقاله و بازبینی طرح آماری پژوهش

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

حمایت مالی

این پژوهش از حمایت مستقیم مالی برخوردار نبوده است ولی از آزمایشگاه و امکانات دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده گردیده است.

منابع

1. Giusquiani, P.L., Pagliai, M., Gigliotti, G., Businelli, D., and Benetti, A. 1995. Urban waste compost: effects on physical, chemical, and biochemical soil properties. Journal of Environmental Quality. 24: 175-182.
2. Saviozzi, A., Biasci, A., Riffaldi, R., and Levi-Minzi, R. 1999. Long-term effects of farmyard manure and sewage sludge on some soil biochemical characteristics. Biology and Fertility of Soils. 30: 100-106.
3. Demirbas, A., Pehlivan, E., and Altun, T. 2006. Potential evolution of Turkish agricultural residues as bio-gas, bio-char and bio-oil sources. International Journal of Hydrogen Energy. 31: 613-620.
4. Tsai, W.T., Liu, S.C., Chen, H.R., Chang, Y.M., and Tsai, Y.L. 2012. Textural and chemical properties of swine-manure-derived biochar pertinent to its potential use as a soil amendment. Chemosphere. 89: 198-203.
5. Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J., and Joseph, S. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. Nature Communications. 1: 1-9.
6. Mukherjee, A., and Lal, R. 2013. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. Agronomy. 3: 313-339.
7. Major, J., Lehmann, J., Rondon, M., and Goodale, C. 2010. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. Global Change Biology. 16: 1366-1379.
8. Feichtinger, F., Erhart, E., and Hartl, W. 2004. Net N-mineralisation related to soil organic matter pools. Plant Soil and Environment. 50: 273-276.
9. Brodowski, S., John, B., Flessa, H., and Amelung, W. 2006. Aggregate-occluded black carbon in soil. European Journal of Soil Science. 57: 539-546.
10. Glaser, B., Lehmann, J., and Zech, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal–a review. Biology and Fertility of Soils. 35: 219-230.
11. Cha, J.S., Park, S.H., Jung, S.C., Ryu, C., Jeon, J.K., Shin, M.C., and Park, Y.K. 2016. Production and utilization of biochar: A review. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 40: 1-15.
12. Van Zwieten, L., Singh, B., Joseph, S., Kimber, S., Cowie, A., and Chan, K.Y. 2009. Biochar and emissions of non-CO_2 greenhouse gases from soil. In: Biochar for Environmental Management. Johannes, L. and Stephen, J. (Eds.). Earthscan. London Sterling, VA, pp. 227-250.
13. Ippolito, J.A., Ducey, T.F., Cantrell, K.B., Novak, J.M., and Lentz, R.D. 2016. Designer, acidic biochar influences calcareous soil characteristics. Chemosphere. 142: 184-191.
14. Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Geoderma. 120: 201-214.
15. Singh, B., Camps-Arbestain, M., and Lehmann, J. 2017. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential In: Biochar: A Guide to Analytical Methods. Singh, B., Mei Dolk, M., Shen, Q. and Camps-Arbestain, M. (Eds.). Csiro Publishing. London, New York, pp. 23-38.
16. Gee, G.W., and Or, D. 2002. Particle-size analysis. In: Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods. Campbell, G., Horton, R., Jury, W., Nielsen, D., Van Es, H., Wierenga, P., Dane, J. and Topp, G. (Eds.). Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA, pp. 255-293.
17. Romano, N., and Santini, A. 2002. Field. In: Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods. Campbell, G., Horton, R., Jury, W., Nielsen, D., Van Es, H., Wierenga, P., Dane, J. and Topp, G. (Eds.). Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA, pp. 721-738.
18. Kirkham, M. 2005. Field capacity, wilting point, available water, and the non-limiting water range. In: Principles of Soil Plant Water Relations. Sonnack,

K. (Eds.). Dana Dreibelbisplace. Kansas State University, pp. 101-115.
19. 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.
20. Ippolito, J., Novak, J., Busscher, W., Ahmedna, M., Rehrah, D., and Watts, D. 2012. Switchgrass biochar effects two aridisols. Journal of Environmental Quality. 41: 1123-1130.
21. Suliman, W., Harsh, J.B., Abu-Lail, N.I., Fortuna, A.M., Dallmeyer, I., and Garcia-Pérez, M. 2017. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. Science of The Total Environment. 574: 139-147.
22. Briggs, C., Breiner, J.M., and Graham, R.C. 2012. Physical and chemical properties of pinus ponderosa charcoal: Implications for soil modification. Soil Science. 177: 263-268.
23. Kuo, S. 1996. Phosphorus. In: Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods. Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A. and Loeppert, R.H. (Eds.). Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. pp. 869-919.
24. Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. Geoderma. 120: 215-225.