

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

Iman Hasanpour¹, Mohammad Ali Hajabbasi^{*2}, Mehran Shirvani³,
Mohammad Mahdi Majidi⁴

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	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	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.
Article history: Received: ----- Revised: ----- Accepted: -----	
Keywords: Acidic biochar, Agricultural wastes, Biochar, Soil conditioner, Soil physical quality	Materials and Methods: Based on a preliminary experiment, rice husk biochar ($\text{pH}=5.64$) and pine cone biochar ($\text{pH}=6.56$) produced at $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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: -----

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تأثیر زغال زیستی اسیدی و خشی بر ویژگی‌های رطوبتی خاک‌های آهکی

ایمان حسن‌پور^۱, محمدعلی حاج عباسی^{*}, ^{۲*}مهران شیروانی^۳, محمد مهدی مجیدی^۴

۱. دانشآموخته کارشناسی ارشد 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
۴. استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: majidi@iut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: هدف از کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی مانند زغال زیستی ثبت کریں، بهبود حاصلخیزی خاک، جذب آلینده‌ها، بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش تولید محصولات کشاورزی می‌باشد. بیوچار زغال زیستی حاصل از گرمکافت ترکیبات آلی است. زغال‌های زیستی عمدها در دمای زیاد تولید شده و دارای خاصیت قلایابی می‌شوند و مناسب خاک‌های اسیدی هستند. اما اگر مواد اولیه در دمای کم گرمکافت 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 شلتوك برنج و مخروط کاج به عنوان اصلاح‌کننده بر ویژگی‌های فیزیکی دو خاک آهکی در استان اصفهان انجام شد.
تاریخ دریافت:	-----
تاریخ ویرایش:	-----
تاریخ پذیرش:	-----
واژه‌های کلیدی:	اصلاح‌کننده خاک، بیوچار اسیدی، پسماندهای کشاورزی، زغال زیستی، کیفیت فیزیکی خاک
مواد و روش‌ها:	بر اساس آزمایش‌های اولیه، زغال زیستی شلتوك برنج ($pH=5/64$) و مخروط کاج ($pH=6/56$) تولید شده در دمای $300^{\circ}C$ 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 شلتوك برنج) در مقداری 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 $25^{\circ}C$ و رطوبت مزروعه درون انکوباتور نگهداری شدند. در پایان دوره انکوباسیون، درصد رطوبت خاک در شرایط ظرفیت مزروعه 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 قلیابی توانست برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک را بهبود ببخشد. تیمار زغال زیستی مخروط کاج و شلتونک برنج با خاک‌ها به مقدار ۰/۳٪ و ۰/۶٪ 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 ۰/۶٪ زغال زیستی در خاک لوم شنی و و مقادیر ۰/۳٪ و ۰/۶٪ 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 ۶ درصد زغال زیستی شلتونک برنج به خاک لوم رسی و زمان ۳۰ روز انکوباسیون، کیفیت خاک بهبود یافته است. بنابراین و با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان زغال زیستی تولید شده از مخروط کاج و شلتونک برنج را به عنوان یک ماده بهساز مناسب برای ارتقاء ویژگی‌های 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: -----



ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسنده‌گان

اسیئن رخ دهد، زغال زیستی تولید می‌شود (۵). زغال زیستی جاذب رطوبت بسیار خوبی است (۶). کاربرد زغال زیستی می‌تواند جرم مخصوص ظاهري 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، تهويه، ظرفیت نگهداری رطوبت را تغییر داده و از اين 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 تحت تأثیر 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، هیدروكسیل فنولیک، کربونیل، لاكتون، پیرن، گروه‌های اسیدرید اسید در زغال زیستی موجود هستند (۱۱) و اسیداسیون زغال زیستی می‌تواند pH خاک را در اطراف خود کاهش دهد و خاصیت اسیدی ایجاد کند (۱۲). در واقع افزایش دمای گرمکافت باعث افزایش گروه‌های عامل اسیدی و ایجاد خاصیت بازی می‌شود (۱۳).

در پژوهشی که آنتونی راجر دکستر (a ۲۰۰۴) برای تقسیم‌بندی خاک‌ها انجام داد بیان نمود

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 به کار بردن روش‌های مناسب مدیریتی در جهت بازیافت پسماندهای کشاورزی، ضمن افزایش بهره‌وری، هدرفت 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^۱ 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 شلتوك برنج استفاده می‌شود که در مقایسه با دفع این مواد به عنوان زباله به روش‌های معمولی مقرن 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 (۴).

تجزیه زیست توده در اثر حرارت را گرمکافت^۲ گویند و هنگامی که این فرایند در شرایط بدون

1- Biochar
2- Pyrolysis

خشک شده و پس از عبور از الک دو میلی‌متری برای انجام آزمایش به محل آزمایشگاه منتقل شد. از آنجائی که مطالعه بر روی خاک‌های آهکی انجام می‌گرفت و هدف بررسی تأثیر زغال‌های زیستی با اسیدیته کمتر از خشتم؛ روی این خاک‌ها بود و به منظور 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، شلتوك برنج از منطقه فلاورجان، بقایای شاخصاره سیب‌زمینی از منطقه سمیرم و کاه گندم از منطقه بوئین میاندشت به عنوان 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 ۴۸ 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 ترموموپل 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 گرم‌آکافت شدند. برنامه دمایی با نرخ افزایش دمای ۲/۵ درجه بر دقیقه و زمان ماند ۴ ساعت اعمال شد (۱۳). سپس نمونه‌های زغال زیستی تولید شده به آزمایشگاه منتقل و pH و EC آن‌ها در

مشخصه‌های خاک‌های با کیفیت فیزیکی ضعیف این است که نفوذپذیری آبی کم، روان‌آب زیاد، سخت‌شوندگی، تهويه ضعیف و قابلیت رسیله‌زنی کم برای گیاه دارند. با توجه به تأثیری که توزیع اندازه و آرایش منافذ بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک دارند، شبیه 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 خاک اثرپذیر است. این شاخص بیانگر کیفیت فیزیکی خاک اثربخش است. یعنی زمانی است که منحنی مشخصه رطوبتی براساس مقدار رطوبت وزنی خاک ($\theta(\text{kg kg}^{-1})$) در برابر $(\ln(h))$ رسم می‌شود (۱۴). با توجه به موارد ذکر شده و با فرض این‌که زغال‌های زیستی اسیدی می‌توانند خصوصیات فیزیکی خاک‌های آهکی را بهبود بخشنند، مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر دو نوع زغال زیستی اسیدی شلتوك برنج و مخروط کاج به عنوان 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^۱ و لوم رسی^۲ استفاده شد. نمونه خاک لوم شنی از منطقه همت‌آباد تیران در استان اصفهان با مختصات جغرافیایی $46^{\circ} ۱۳' ۵۱''$ طول شرقی و $۳۲^{\circ} ۴۰' ۲۰''$ عرض شمالی و خاک لوم رسی از مزرعه لورک دانشگاه صنعتی اصفهان در شهرستان نجف‌آباد با مختصات جغرافیایی $۸/۹ ۲۳' ۵۱''$ طول شرقی و $۳۲^{\circ} ۲۲' ۲۲/۳''$ عرض شمالی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری در شهریورماه سال ۱۳۹۷ نمونه‌برداری شد. خاک‌ها هوا

- 1- Sandy Loam
2- Clay Loam

شن-کائولین و صفحات فشاری اندازه‌گیری شد. برای خاک رسی به دلیل تخلخل بیشتر از فشار bar $0/3$ برای خاک شنی به دلیل تخلخل کمتر از فشار bar $0/1$ برای تعیین ظرفیت زراعی مزرعه (FC) طبق روش کار استفاده شد. برای تعیین نقطه پژمردگی دائم از فشار bar 15 استفاده (۱۷) و آب قابل دسترس با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه شد.

$$PAW_{100} = \theta_{100} - \theta_{15000} \quad (1)$$

$$PAW_{330} = \theta_{330} - \theta_{15000} \quad (2)$$

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

برای اندازه‌گیری درصد خاکستر^۴ زغال زیستی از روش ASTM D-2866 و با استفاده از رابطه زیر استفاده شد (۱۹).

$$\frac{\text{جرم خاکستر (گرم)}}{\text{جرم بیوچار (گرم)}} \times 100 = \text{خاکستر (\%)} \quad (3)$$

همچنین درصد عملکرد^۵ از طریق مقدار زغال زیستی تولید شده به ازای واحد جرم ماده اولیه از طریق رابطه زیر محاسبه شد (۱۹).

$$\frac{\text{جرم بیوچار (گرم)}}{\text{جرم آون خشک ماده آلتی (گرم)}} \times 100 = \text{عملکرد (\%)} \quad (4)$$

شاخص کیفیت فیزیکی پیشنهادی دکستر توسط مدل ونگنختن-معلم^۶ برآش داده و در تمامی مراحل

مخلوط زغال زیستی و آب مقطر با نسبت $1:20$ اندازه‌گیری شد. با توجه به این که در دمای 250 درجه سانتی‌گراد ماده آلتی به طور کامل به زغال زیستی تبدیل نشد و همچنین با توجه به نتایج درصد عملکرد تقریباً یکسان زغال‌های زیستی تولید شده در دمای 300 و 350 درجه سانتی‌گراد، در نهایت شلتوك برنج و مخروط کاج و دمای گرمکافت 300 درجه سانتی‌گراد به دلیل 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 مختلف (سبک و سنگین)، دو نوع زغال زیستی (مخروط کاج و شلتوك برنج)، سه مقدار زغال زیستی ($1/3$ ، $1/6$ و $1/9$ وزنی) و دو دوره زمانی انکوباسیون (30 روزه و 180 روزه) مجموعاً 24 تیمار به همراه 4 شاهد (۲ خاک و 2 انکوباسیون) و در کل 28 تیمار در سه تکرار بودند (مجموعاً 84 نمونه). تیمارها در دمای 25 درجه سانتی‌گراد و رطوبت ثابت 60% ظرفیت زراعی درون انکوباتور نگهداری شدند.

مقادیر pH و EC نمونه‌های زغال زیستی در حالت تعليق در آب به ترتیب توسط دستگاه pH متر (827-Swise) و دستگاه EC متر (507-CC) اندازه‌گیری شد. بافت خاک به روش پیپت و بر پایه قانون استوک اندازه‌گیری شد (۱۶). پس از تعیین درصد شن، سیلت و رس، کلاس بافتی خاک مشخص شد.

رطوبت خاک در شرایط ظرفیت (گلدان) مزرعه^۱ (FC)، نقطه پژمردگی دائم^۲ (PWP) و آب قابل دسترس^۳ (AW) با استفاده از دستگاه‌های جعبه

4- Ash content

5- Biochar yield

6- Van genuchten mualem n



1- Field capacity (FC)

2- Permanent wilting point (PWP)

3- Available water (AW)

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به این که 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.

برای برآورد معادلات در داده‌های رطوبت خاک، از ابزار Excel Solver نسخه ۲۰۱۶ استفاده شد. آنالیزهای آماری (تجزیه واریانس) با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹.۴ و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح ۵٪ انجام شد. نمودارها با نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۶ رسم گردید.

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 Adjective 
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 hPa (g g^{-1})
0.07	0.09	رطوبت قابل دسترس مکش ۳۳۰ هکتوپاسکال (g g^{-1}) Available water in 330 hPa (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	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 ($\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$) Porosity ($\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$)

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

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی نمونه‌های زغال زیستی تولید شده در دمای 300°C .

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

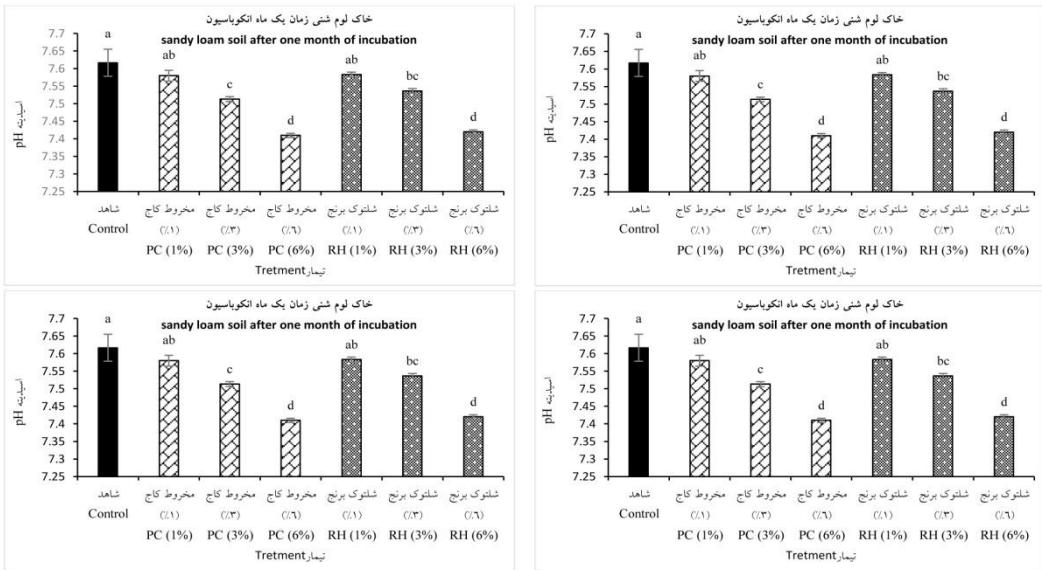
زغال زیستی مخروط کاج Pine cone biochar	زغال زیستی شلتوك برنج Rice husk biochar	صفت Adjective 
6.6 ± 0.09	5.6 ± 0.19	pH (1:20)
0.72 ± 0.03	0.31 ± 0.01	EC (dS m^{-1})
10.33 ± 0.57	31.3 ± 2.1	خاکستر (%) Ash (%)
48.7 ± 4.1	52.9 ± 2.6	عملکرد (%) Performance (%)

کرد که این تأثیر معنی دار بود. طبق برآوردهی که انجام شد بیشترین تأثیر زغال زیستی بر کاهش اسیدیته در خاک لوم رسی پس از گذشت شش ماه انکوباسیون در تیمار ۶٪ زغال زیستی شلتوك برنج مشاهده گردید که سبب کاهش معنی دار $0/35$ واحدی نسبت به نمونه شاهد شد.

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

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 طوری که 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 می شد، در همه موارد تیمار ۶٪ زغال زیستی، بیشترین کاهش pH را در هر دو نوع خاک ایجاد

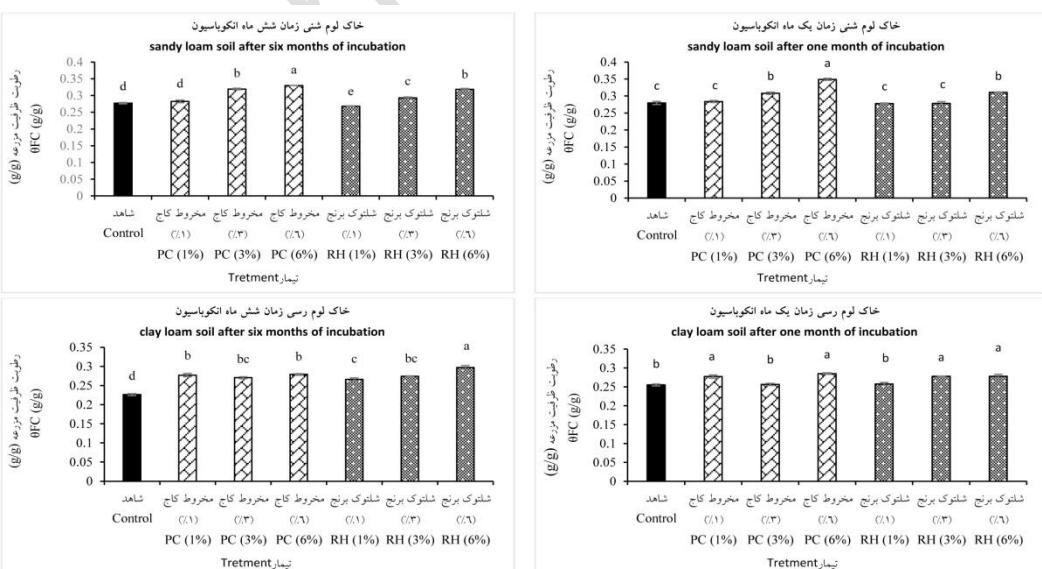


شکل ۱- مقایسه میانگین اثر نوع (مخروط کاج و شلتوك برنج) و مقدار زغال زیستی (یک، سه و شش درصد وزنی) بر pH خاک.

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.

افزودن به خاک است (شکل ۲). در خاک لوم رسی کاربرد ۶٪ زغال زیستی شلتوك برنج با بیش از ۰/۰۷ g g^{-۱} بیشترین تأثیر معنی دار را نسبت به نمونه شاهد پس از گذشت ۱۸۰ روز بر رطوبت ظرفیت زراعی خاک داشت.

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 معنی دار رطوبت خاک در شرایط ظرفیت زراعی نسبت به شاهد شد که دلیل آن تخلخل زیاد زغال زیستی در اثر

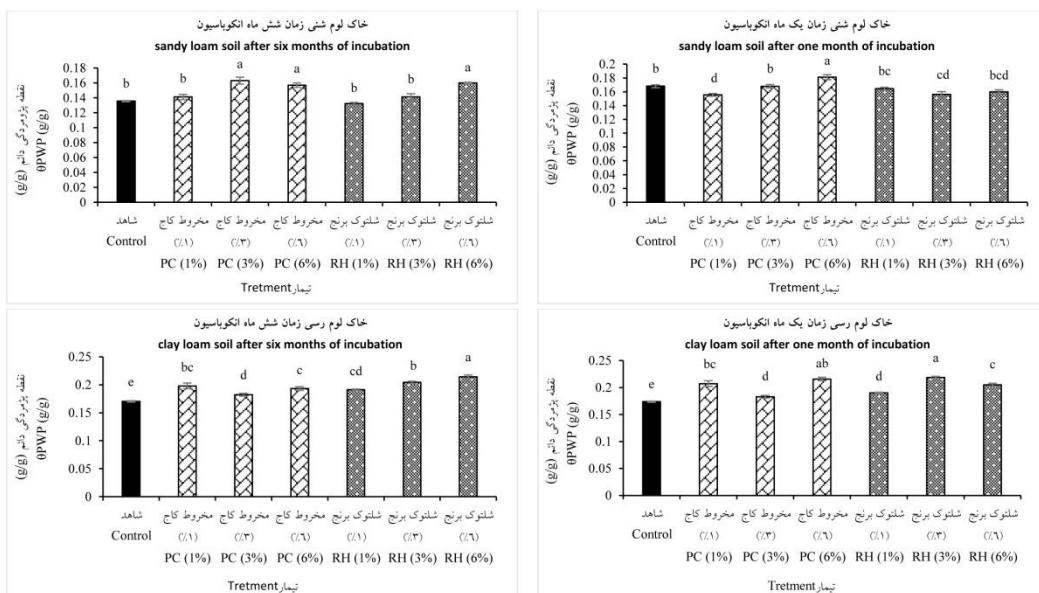


شکل ۲- مقایسه میانگین اثر نوع (مخروط کاج و شلتوك برنج) و مقدار زغال زیستی (یک، سه و شش درصد وزنی) بر ظرفیت زراعی خاک.

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.

در خاک لوم رسی کاربرد زغال زیستی شلتوك برنج در مقدار ۰.۶٪ با بیش از ۰/۰۴ g g⁻¹، بیشترین تأثیر معنی دار 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 دماههای ۳۵۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد 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 اشاعر همه خاکهای تیمار شده با زغال زیستی کمتر از شاهد بود (۲۱).

رطوبت نقطه پژمردگی دائم: نمودار مقایسه میانگین تیمارها نشان می دهد در خاک لوم شنی و زمان یک ماه انکوباسیون، زغال زیستی مخروط کاج فقط در سطح ۰.۶٪ باعث افزایش رطوبت نقطه پژمردگی دائم خاک گردید، درصورتی که زغال زیستی شلتوك برنج تفاوت زیادی نسبت به شاهد نداشت. در خاک لوم شنی و زمان شش ماه انکوباسیون زغال زیستی مخروط کاج در مقادیر ۳ و ۶ درصد و زغال زیستی شلتوك برنج فقط در سطح ۶ درصد سبب افزایش معنی دار 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).

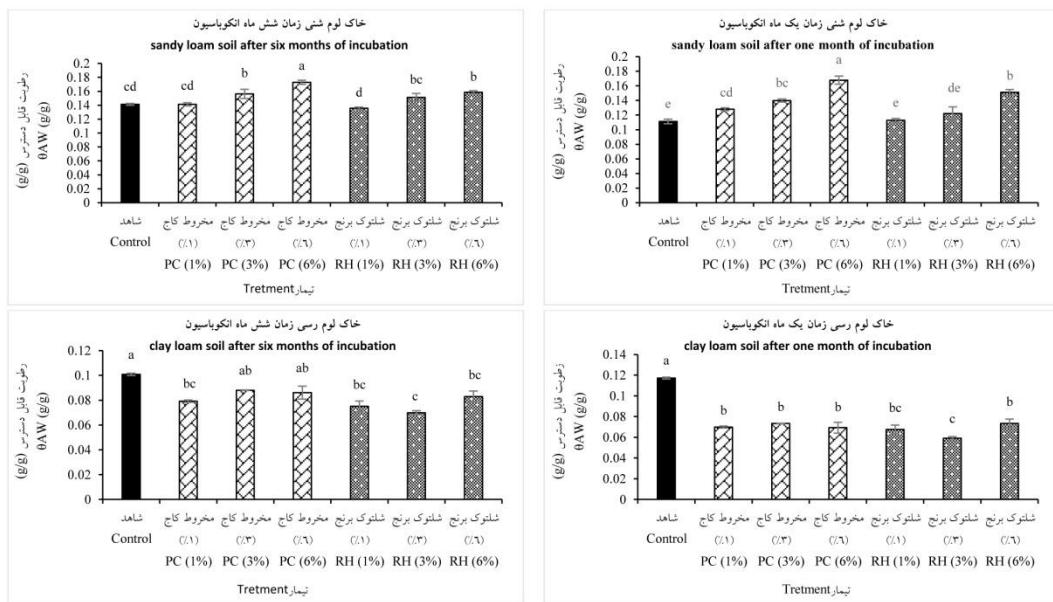


شکل ۳- مقایسه میانگین اثر نوع (مخروط کاج و شلتوك برنج) و مقدار زغال زیستی (یک، سه و شش درصد وزنی) بر نقطه پژمردگی دائم خاک.

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.

بریگز و همکاران (۲۰۱۲) گزارش دادند با به کار بردن مقادیر ۵، ۱۰ و ۵۰ گرم بر کیلوگرم زغال زیستی بقایای درخت کاج تولید شده در دمای 45°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 375°C تولید شده بود را به صورت یک درصد وزنی به چند نوع خاک لومی اضافه و مشاهده کردند آب قابل دسترس افزایش معنی‌داری پیدا کرد. همچنین منحنی مشخصه رطوبتی بیشترین میزان رطوبت قابل دسترس را در خاک لوم شنی تیمار شده با ۱٪ زغال زیستی نمایش داد (۲۳).

رطوبت قابل دسترس: نمودارهای مقایسه میانگین شکل ۴ نشان می‌دهد رطوبت قابل دسترس خاک‌های لوم شنی با اضافه کردن مقادیر ۳ و ۶٪ 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 ۶٪ با بیش از 0.05 g g^{-1} بیش‌ترین تأثیر معنی‌دار را نسبت به نمونه شاهد پس از گذشت ۳۰ روز بر رطوبت قابل دسترس خاک داشت.



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر نوع (مخروط کاج و شلتونک برنج) و مقدار زغال زیستی (یک، سه و شش درصد وزنی) بر آب قابل دسترس 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.

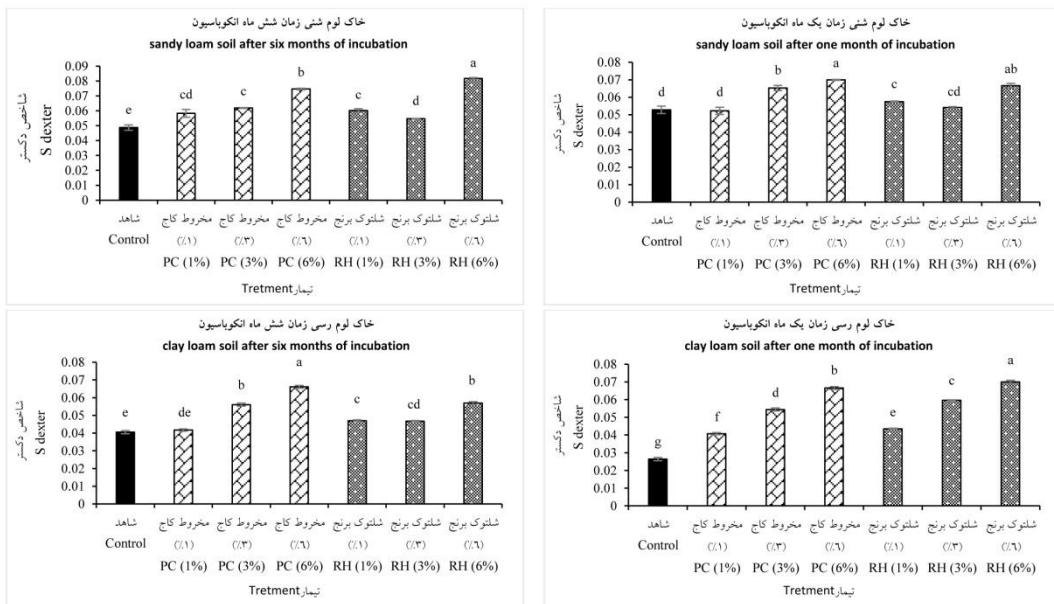
مشخصه رطوبتی در نقطه عطف (S) وابسته به ریز ساختار خاک بوده و در نتیجه شاخص S به طور مستقیم از بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی مهم خاک اثرپذیر است. کیفیت فیزیکی خاک بر فرایندهای شیمیایی و بیولوژیکی خاک اثرگذار است و دکستر یک رابطه خطی بین ماده آلی و شاخص S در خاک لوم شنی و لوم سیلیتی پیدا کرد (۱۴).

با توجه به مثالی که آنتونی راجر دکستر در سال ۲۰۰۴ ارائه نمود (۱۴)، 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) (۲۰۰۴)، 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 (۲۴).

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 ۶ درصد و زغال زیستی شلتوك برنج در مقادیر ۱ و ۶ 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 ۶ 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 ۶٪ برابر ۱۷٪، در خاک لوم شنی و زمان ۱۸۰ روز انکوباسیون با بیوچار شلتوك برنج ۶٪ برابر ۳۲٪، در خاک لوم رسی و زمان ۳۰ روز انکوباسیون با بیوچار شلتوك برنج ۶٪ برابر ۴۳٪ و در خاک لوم رسی و زمان ۱۸۰ روز انکوباسیون با بیوچار مخروط کاج ۶٪ برابر ۲۵٪ است.

در خاک لوم رسی کاربرد زغال زیستی شلتوك برنج در مقدار ۶٪ با بیش از ۰٪ 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، شب منحنی

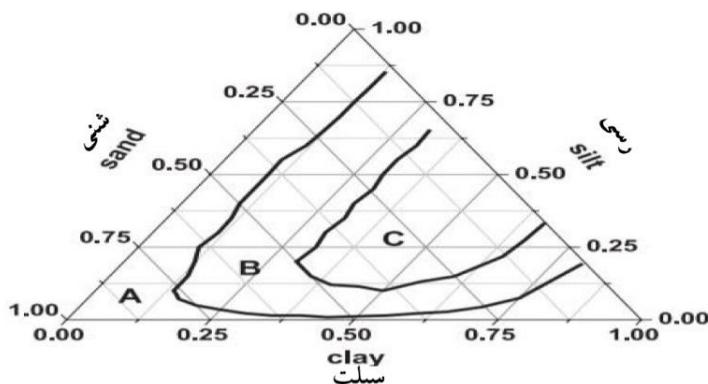


شکل ۵- نمودار مقایسه میانگین اثر نوع (مخروط کاج و شلتونک برنج) و مقدار زغال زیستی (یک، سه و شش درصد وزنی) بر شاخص پیشنهادی دکستر.

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

انکوباسیون با کاربرد زغال زیستی شلتونک برنج در مقدار ۶٪ با بیش از ۰/۰۴ در محدوده منطقه A قرار می‌گیرد.

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



شکل ۶- ارتباط مثلث بافت خاک با شاخص کیفیت فیزیکی دکستر (منطقه A, $0.03 < S < 0.04$), (منطقه B, $0.03 > S$) و (منطقه C, $0.03 > S$).

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

بر این اساس با افزودن بیوچار به خاک، شاخص دکستر افزایش یافته و در محدوده خوب و خیلی خوب قرار گرفت (۲۴).

آنتونی راجر دکستر (۲۰۰۴ b) بر اساس خاکهای موجود در هفت کشور با مقادیر رس بین ۴ تا ۷۳ درصد بنابر شاخصی که خود تعریف کرد، خاکها را به کلاس‌های مختلف تقسیم‌بندی کرد (جدول ۳).

جدول ۳- شاخص کیفیت فیزیکی دکستر.

Table 3. Dexter physical quality index.

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

به طور جداگانه به اثر آن پرداخته شد در جدول ۴ ارائه گردیده است.

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

جدول ۴- تجزیه واریانس کلی.

Table 4. General analysis of variance table.

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

* و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد ns

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

خاکشناسی و آزمایشگاه‌های کمک پژوهشی دانشکده مهندسی کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان طی سال‌های ۹۶ تا ۹۹ به اجرا در آمده است.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافع وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندها است.

مشارکت نویسندها

مشارکت نویسندها 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 راهنمای و پیشنهاددهنده پارامترهای فیزیکی جهت بررسی و اندازه‌گیری، نویسنده سوم: استاد راهنمای و پیشنهاد دهنده طرح اصلی، نویسنده چهارم: استاد مشاور، بازبینی مقاله و بازبینی طرح آماری پژوهش

اصول اخلاقی

نویسندها 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 بخوردار نبوده است ولی از آزمایشگاه و امکانات دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده گردیده است.

نتیجه‌گیری کلی

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

کاربرد زغال زیستی شلتوك برنج ۶٪ 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 ۰/۰۴) برسرد (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. به عبارت دیگر پایداری زغال زیستی در برابر تجزیه از مزایای استفاده آن در خاک است، ضمن آن‌که تهیه آن از منابع ارزان قیمت 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

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-CO₂ 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 Loepert, 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.

Uncorrected Proof