

## The effect of earthworm and application of cow manure and its biochar on aggregate-associated carbon and some soil physical properties

S. Nahidan<sup>1\*</sup>, M. Faryadras<sup>2</sup> and V. Dorostkar<sup>3</sup>

1. Assistant Professor of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
2. MSc. graduate of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
3. Assistant Professor of Soil Science, Water and Soil Department, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 20 December 2019

Accepted: 17 August 2020

### Abstract

**Introduction:** Traditional organic manure can be potentially beneficial for soil physical, chemical and biological properties by improving organic matter of soils. Recently, biochar, a carbon-rich product of biomass produced by thermochemical conversion under oxygen-limited conditions, has been studied for its effects as a soil amendment. The use of a modified form of manures as biochar for soil improvement reduces some environmental, food safety and disposal problems of manures. However, biochar application has been shown to have both positive and negative effects on soil fauna such as earthworm depending on the type of feedstock for its production. Since earthworm function affects physical properties and amount of organic carbon of soils and because of the different effect of biochar and its feedstock on earthworm activity, this study hypothesizes that earthworm may differently alter soil physical properties and aggregate-associated carbon in the biochar and its feedstock amended soils. The purpose of this study was to investigate the effect of cow manure and its biochar in the presence and absence of earthworm on bulk density, total porosity, saturated hydraulic conductivity, aggregate stability and content of organic carbon in soil aggregates during 30 and 90 days of incubation.

**Materials and Methods:** A completely randomized design with 2×4×2 factorial treatment combination was used in triplicates. Treatments included the following: (i) 2 levels of amendment type (cow manure and its biochar), (ii) 4 levels of amendment rate (0, 1, 2 and 5% w/w), and (iii) 2 levels of earthworm (with and without earthworm). The biochar was produced from cow manure (passed through a 2-mm sieve) by slow pyrolysis at 450 °C. Also, the soils were passed through a 4-mm sieve. Then, amended soil and the control (with untreated soils) were moistened up to 70% water holding capacity. Then 5 adult *Eisenia fetida* with fully-developed clitellum and similar weight were added to half of each of them. Treatments were then incubated at laboratory temperature and constant moisture for 30 and 90 days. Based on evaporation loss, the soil moisture was kept constant by regular weighing of each pot. At the end of each time (30 and 90 days), samples were taken from different treatments to determine bulk density, total porosity, saturated hydraulic conductivity. Also, soil aggregates were separated by wet sieving; then, aggregate size distribution was determined and mean weight diameter (MWD) was calculated. Eventually, organic carbon content in each aggregate size fraction was determined.

**Results and Discussion:** The results showed that the application of both organic amendments was effective in decreasing soil bulk density, increasing total porosity, saturated hydraulic



conductivity and aggregate stability, but the effects of organic amendments on these physical properties were more pronounced in cow manure- than biochar-amended soils. Further reduction in bulk density following cow manure application is attributed to a dilution effect resulting from mixing of the lighter and more voluminous material of cow manure compared with denser mineral fractions of the soil. In addition, cow manure has more content of organic carbon than its biochar which can increase total porosity by promoting aggregation. The greater porosity and aggregation of soils as affected by the application of organic amendments are apparently responsible for the increased saturated hydraulic conductivity. The results showed that the effect of cow manure on the soil physical properties reduced with time more rapidly than its biochar. This might be attributed to lower stability of manure to decompose than biochar in soils because manure contains higher content of labile organic compounds compared to biochar. The results also showed that application of organic amendments increased organic carbon in soil aggregates, especially in 4-2 mm aggregates, indicating that the large macro-aggregates can be considered as a susceptible indicator to organic carbon managements in soil. Also, the organic carbon content of 4-2, 2-0.25 and 0.25-0.05 mm aggregates was 42.8, 27.8 and 20.8% (in 30 days incubation) and 27.2, 28.6% and 20.6% (in 90 days of incubation) higher in cow manure- than biochar-amended soils. The results also showed that earthworm reduced soil bulk density, increased total porosity, saturated hydraulic conductivity and aggregate stability regardless of soil amendment, but such effect on bulk density and total porosity was more pronounced in cow manure- than biochar-amended soils. It means that type of organic amendments can influence earthworm activity, thereby altering some soil physical properties. Also, earthworm increased carbon content in soil aggregates, especially in smaller aggregates.

**Conclusion:** The results showed that although application of cow manure improved soil physical properties more than cow manure biochar at both incubation times, it seems that cow manure biochar has a more stable effect on the soil physical properties over time. Also, application of organic amendments can increase soil organic carbon by further increasing C in larger aggregates. The improving effect of earthworm on soil physical properties (except for bulk density and total porosity) did not depend on the type of applied organic amendment in soil. The effect of earthworm on bulk density and total porosity was more pronounced in soils amended with cow manure than its biochar. Also, it is thought that earthworm increases organic carbon in soil by physical stabilization of organic carbon in soil aggregates, especially in smaller aggregates.

**Key words:** *Organic matter, soil structure, soil fauna, pyrolysis*

## تأثیر کرم خاکی و کاربرد کود گاوی و بیوجار آن بر کربن خاکدانه‌ای و برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک

صفورا ناهیدان<sup>۱\*</sup>، معصومه فریادرس<sup>۲</sup> و وجیهه درستکار<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳- استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده	تاریخچه مقاله
<p>پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر کرم خاکی، کاربرد کود گاوی و بیوجار آن و برهمکنش آن‌ها بر چگالی ظاهری، تخلخل، هدایت هیدرولیکی اشباع، پایداری خاکدانه و توزیع خاکدانه‌ای کربن انجام شد. بدین منظور، خاک با مقادیر ۰، ۱، ۲ و ۵ درصد کود گاوی و بیوجار آن در بودن و نبودن کرم خاکی در سه تکرار به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی ترکیب و به مدت ۳۰ و ۹۰ روز انکوباسیون شد. نتایج نشان داد که اگرچه تأثیر کود گاوی بر کاهش چگالی ظاهری، افزایش تخلخل، هدایت هیدرولیکی و پایداری خاکدانه‌ها بیشتر از بیوجار آن بود ولی با گذشت زمان از شدت اثر کود گاوی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک در برابر بیوجار آن کاسته شد. همچنین کربن خاکدانه‌های ۴-۲، ۲-۰/۲۵ و ۰/۲۵-۰/۰۵ میلی‌متری به مقدار ۴۲/۸، ۲۷/۸ و ۲۰/۱ درصد در زمان ۳۰ روز و به مقدار ۲۷/۲، ۲۸/۷ و ۲۰/۶ درصد در زمان ۹۰ روز انکوباسیون در تیمارهای کود گاوی بیشتر از بیوجار آن بودند. کرم خاکی باعث افزایش بیشتری در کربن خاکدانه‌های کوچک شد و ویژگی‌های فیزیکی خاک را بهبود بخشید ولی چنین تأثیری بر چگالی ظاهری و تخلخل خاک در تیمار کود گاوی بیشتر از بیوجار آن بود. در مجموع، اگرچه تأثیر کود گاوی بر بهبود کربن خاکدانه‌ها و ویژگی‌های فیزیکی خاک بیشتر از بیوجار آن بود ولی به نظر می‌رسد که بیوجار با گذشت زمان، تأثیر پایداری بر ویژگی‌های فیزیکی خاک دارد. همچنین کرم خاکی می‌تواند ذخیره کربن در خاک را افزایش و برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک را در حضور کود گاوی بهتر از بیوجار آن بهبود بخشد.</p>	<p>تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۷</p> <p><b>کلمات کلیدی:</b> ماده آلی، ساختمان خاک، جانوران خاک، پیرولیز</p>
	<p>* عهده دار مکاتبات Email: s.nahidan@basu.ac.ir</p>

## مقدمه

در کشاورزی پایدار، حفظ مقدار مطلوب ماده آلی خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ماده آلی نقش قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک داشته و از طرفی نیازهای غذایی مورد نیاز گیاهان را تامین می‌نماید (۳۳). یکی از مرسوم‌ترین منابع تامین ماده آلی خاک به ویژه در کشاورزی ارگانیک، کودهای دامی می‌باشند. کودهای دامی با تامین ماده آلی خاک که از عوامل اصلی موثر بر ساختمان خاک است، می‌توانند کیفیت فیزیکی خاک را بهبود بخشند (۲۴). با وجود این، سرعت تجزیه کودهای دامی در خاک نسبتاً زیاد بوده و در نتیجه از تاثیر آنها بر ویژگی‌های خاک با گذشت زمان کاسته می‌شود (۴۲). در سال‌های اخیر به دلیل توجه زیاد به مسئله تثبیت کربن در خاک و نقش آن در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تولید بهسازیهای کارآمد و پایدار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از بهسازیهای مورد استفاده در خاک بیوجار است. در واقع تجزیه گرمایی زیست‌توده‌های آلی مانند چوب، ضایعات کشاورزی و کارخانه‌ها، کود و زباله‌های شهری در شرایط بدون اکسیژن یا با اکسیژن کم، منجر به ایجاد یک بخش جامد غنی از کربن به نام بیوجار می‌شود (۲۰). با تبدیل کودهای دامی به بیوجار، از برخی مشکلات کودهای دامی مانند حجم و وزن زیاد و همچنین نفوذ شیرابه آنها به آب‌های زیرزمینی و رها شدن گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر کاسته می‌شود (۳۴). بررسی‌ها نشان داده است که کربن بیوجار دارای اشکال آروماتیک بوده که در مقایسه با کربن موجود در ماده اولیه آن تجزیه‌پذیری کمتری دارد. بنابراین افزودن بیوجار به خاک می‌تواند مخزن بالقوه‌ای از کربن در خاک را فراهم کند (۲۰). پژوهش‌های زیادی نشان داده است که افزودن بهسازی به خاک بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک تاثیرگذار است (۲، ۱۲، ۲۶ و ۲۷). تغییر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک می‌تواند بر رشد ریشه، هوادهی، تراکم خاک، جذب آب و املاح، فرسایش خاک، انتقال آب، گرما و گازها در خاک تاثیر بگذارد (۲۶). درک این که چگونه ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی

خاک تحت تاثیر کاربرد بهسازی‌هایی چون بیوجار قرار می‌گیرد ضروری و دارای اهمیت می‌باشد. در این باره اوموندی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۶) کاهش ۳-۳۱ درصدی چگالی ظاهری ۱۹ خاک از ۲۲ خاک را در اثر کاربرد بیوجار گزارش کردند. روگوسکا و همکاران<sup>۲</sup> (۳۰) نیز مشاهده کردند که چگالی ظاهری خاک در اثر کاربرد مقادیر ۰ تا ۹۶ تن در هکتار بیوجار چوب، کاهش یافت. پراتیوی و شینوگی<sup>۳</sup> (۲۹) نشان دادند که در یک آزمایش گلدانی مقدار ۵۰ تن در هکتار بیوجار سبوس برنج، تاثیری بر چگالی ظاهری خاک بعد از دوره رشد گیاه برنج نداشت؛ در حالی که ۱۰۰ تن در هکتار از آن، موجب کاهش معنی‌دار چگالی ظاهری خاک شد. همچنین قبل از دوره رشد گیاه برنج کاربرد هر دو مقدار از بیوجار باعث کاهش چگالی ظاهری خاک شده بود؛ این موضوع یعنی اینکه تاثیر بیوجار بر چگالی ظاهری خاک به مقدار کاربرد این ماده در خاک نیز بستگی دارد. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که بیوجار چگالی حقیقی خاک را نیز کاهش می‌دهد (۲۶ و ۳۷). در حقیقت، چگالی کم‌تر بیوجار نسبت به خاک می‌تواند منجر به کاهش جرم حجمی خاک (چگالی ظاهری و حقیقی) شود. هر چه تفاوت بین مقدار چگالی خاک و بیوجار بیشتر باشد تاثیر بیوجار بر آن خاک بیشتر خواهد بود. از طرفی بیوجار دارای تخلخل ۷۰-۹۰ درصد می‌باشد (۶) که افزودن این ماده متخلخل به خاک با کاهش چگالی ظاهری و حقیقی خاک، افزایش خاکدانه‌سازی و کاهش تراکم خاک، می‌تواند تخلخل خاک را نیز افزایش دهد (۲۶). با وجود این، تاثیر بیوجار بر تخلخل خاک می‌تواند بسته به دمای تولید بیوجار، نوع و مقدار کاربرد بیوجار، مدت زمان مطالعه و نوع خاک (۶ و ۲۶) متفاوت باشد. بیوجار همچنین بر هدایت هیدرولیکی خاک موثر بوده است. مطالعه بارنز و همکاران<sup>۴</sup> (۵) نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع در اثر کاربرد بیوجار در خاک رسی و شنی به ترتیب افزایش و کاهش

1- Omondi *et al.*2- Rogovska *et al.*

3- Pratiwi and Shinogi

4- Barnez *et al.*

یک خاک شن لومی در اثر کاربرد بیوجار گردو در مقادیر ۰ تا ۲۰ گرم در کیلوگرم ایجاد نشد. جانوران خاک، از جمله کرم‌های خاکی، نقش مهمی بر پایداری ساختمان خاک دارند. کرم‌های خاکی از طریق خرد کردن مواد آلی، مخلوط کردن آن‌ها با ذرات معدنی خاک و عبور دادن آن‌ها از دستگاہ گوارش خود و آغشته کردن آن‌ها با ترشحات درون بدن، باعث اتصال ذرات به یکدیگر و تشکیل خاکدانه می‌شوند (۱). همچنین برخی از گونه‌های کرم خاکی غدد تولید آهک داشته (۳۹) و با تولید کربنات کلسیم که عامل اتصال‌دهنده ذرات آلی و معدنی خاک به یکدیگر است، خاکدانه‌سازی خاک را بهبود می‌بخشد (۴). کرم‌های خاکی همچنین از طریق حفر کانال و توزیع مجدد ذرات معدنی خاک، می‌توانند بر انتقال آب و گازها و تراکم خاک تاثیر بگذارند (۴). گزارش شده است که کرم خاکی باعث افزایش منافذ درشت (۱۹)، سرعت نفوذ آب (۱۷) و هدایت هیدرولیکی خاک (۱۴) می‌شود. با وجود این، تاثیر کرم خاکی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک به نوع ماده آلی موجود در خاک نیز بستگی دارد. به عنوان مثال، آلمالیکی و شولین<sup>۵</sup> (۱) مشاهده کردند که کرم خاکی در حضور یونجه خشک، پایداری خاکدانه‌ها را افزایش داد در حالی که در حضور کاه گندم تاثیری بر پایداری خاکدانه‌ها نداشت. اصغری و نجفیان<sup>۶</sup> (۳) همچنین مشاهده کردند که تاثیر کرم خاکی بر کاهش چگالی ظاهری خاک، افزایش تخلخل و پایداری خاکدانه‌ها در تیمار کاه و کلش گندم بیشتر از کود گاوی پوسیده بود. پژوهش‌های سال‌های اخیر نیز نشان داده است که کاربرد بیوجار بسته به نوع ماده آلی بکاررفته در تهیه آن بر فعالیت کرم خاکی تاثیر مثبت و منفی داشته است (۳۶). پژوهش‌های ناهیدان و صفری سنجانی<sup>۷</sup> (۲۵) نیز نشان داد که کود گاوی و بیوجار آن به ترتیب باعث افزایش و کاهش تعداد کرم خاکی شدند و بدین ترتیب این مواد بر تاثیر کرم خاکی بر کیفیت زیستی خاک موثر بودند. با توجه

یافت. اُزوما و همکاران<sup>۱</sup> (۳۸) نیز کاهش خطی هدایت هیدرولیکی اشباع یک خاک شنی را در اثر کاربرد ۰ تا ۲۰ تن در هکتار بیوجار مشاهده کردند. در حقیقت به نظر می‌رسد بیوجار با پر کردن و بستن منافذ درشت خاک در خاک‌های درشت‌بافت، و در خاک‌های ریزبافت، با بهبود خاکدانه‌سازی و افزایش منافذ درشت خاک، می‌تواند به ترتیب سبب کاهش و افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع اینگونه خاک‌ها شود (۵ و ۲۶). از دیگر ویژگی‌های فیزیکی خاک که می‌تواند تحت تاثیر بهسازی بیوجار قرار گیرد پایداری خاکدانه‌ها در آب می‌باشد. اوموندی و همکاران (۲۶) در یک مطالعه دوره‌ای، گزارش کردند که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب (MWD<sup>۲</sup>) در اثر کاربرد بیوجار به مقدار ۴-۵۸ درصد افزایش داشت. بیوجار از طریق همآوری و کاهش پراکنش رس‌ها و افزایش آبگریزی، مقاومت خاکدانه‌ها را به فروپاشی در آب افزایش می‌دهد (۱۵). از طرف دیگر بیوجار با افزایش ماده آلی خاک و اتصال خاکدانه‌های ریز به یکدیگر، خاکدانه‌های پایدار در آب بیشتری را ایجاد می‌کند (۲۶). نسبت کربن به نیتروژن بالای بیوجار نیز می‌تواند با ایجاد محیط مناسب رشد قارچ‌ها، خاکدانه‌های پایدار را افزایش دهد (۱۵). با افزایش خاکدانه‌سازی در اثر کاربرد بیوجار در خاک و در نتیجه حفاظت کربن درون خاکدانه‌ها در برابر تجزیه میکروبی، کربن در خاک تثبیت و ذخیره می‌شود (۱۵) که این موضوع یکی از محاسن کاربرد بیوجار در خاک از دیدگاه محیط زیستی می‌باشد. با وجود این، در برخی مطالعات نیز بیوجار تاثیر معنی‌داری بر پایداری خاکدانه‌ها نداشته است. به عنوان نمونه، پنگ و همکاران<sup>۳</sup> (۲۸) در یک زمان کوتاه انکوباسیون ۱۱ روزه مشاهده کردند که بیوجار برنج تهیه شده در دماهای ۲۵۰ تا ۴۵۰ درجه سلسیوس تاثیر معنی‌داری بر پایداری خاکدانه‌ها در آب نداشت. همچنین بوسچر و همکاران<sup>۴</sup> (۸) مشاهده کردند که تغییر معنی‌داری در پایداری خاکدانه‌های

5- Al-Maliki and Scullion

6- Asghari and Najafian

7- Nahidan and Safari Sinejani

1- Uzoma *et al.*

2- Mean weight diameter

3- Peng *et al.*4- Busscher *et al.*

با اسید کلریدریک و تیتراسیون برگشتی با هیدروکسید سدیم، پی‌اچ در نسبت ۱:۵ آب به خاک، کود و بیوجار، هدایت الکتریکی در نسبت ۱:۵ آب به خاک، کود و بیوجار، کربن آلی خاک به روش سوزاندن تر، کربن آلی کود و بیوجار به روش سوزاندن خشک، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، کود و بیوجار به روش استات آمونیوم، چگالی ظاهری خاک به روش استوانه دست نخورده، و چگالی ظاهری کود و بیوجار طبق روش ASTM D-285 با کمی اصلاح (۳۵) اندازه‌گیری شدند. نتایج ویژگی‌های عمومی خاک، کود و بیوجار در جدول ۱ نشان داده شده است (برگرفته از پژوهش ناهیدان و صفری سنجانی<sup>۱</sup> (۲۵)).

### تیمارهای مورد مطالعه

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتور اول شامل بودن و نبودن کرم خاکی (دو سطح)، فاکتور دوم نوع بهساز شامل کود گاوی و بیوجار آن (دو سطح) و فاکتور سوم مقدار کاربرد بهساز که شامل مقادیر ۰، ۱، ۲ و ۵ درصد (چهار سطح) بود. این آزمایش در دو زمان (۳۰ و ۹۰ روز انکوباسیون) به صورت مجزا انجام شد. لذا برای هر زمان تعداد ۴۸ واحد آزمایشی در نظر گرفته شد.

برای آماده‌سازی واحدهای آزمایشی، خاک عبور داده شده از الک چهار میلی‌متر با مقادیر ۰، ۱، ۲ و ۵ درصد کود گاوی یا بیوجار آن تیمار و در گلدان‌های پلاستیکی ۲/۵ کیلوگرمی تا رسیدن به چگالی ظاهری  $1/6 \text{ g cm}^{-3}$  متراکم شد. خاک‌ها به رطوبت ۷۰ درصد گنجایش زراعی رسانده شدند. سپس به نیمی از واحدهای آزمایشی پنج عدد کرم خاکی بالغ از نوع *Eisenia fetida* با وزنی یکسان افزوده شد و به نیمی از آن‌ها کرم خاکی افزوده نشد. تیمارها در دمای آزمایشگاه برای ۳۰ و ۹۰ روز قرار داده شدند. در مدت انکوباسیون، هر دو روز یکبار واحدهای آزمایشی وزن شد و کاهش وزن حاصل از تبخیر آب با افزودن آب مقطر جبران گردید. در پایان دوره انکوباسیون، ویژگی‌های مورد نظر خاک اندازه‌گیری شدند.

به تاثیرپذیری متفاوت کرم خاکی از بیوجار و ماده خام اولیه آن و با عنایت به تاثیر کرم خاکی بر وضعیت ساختمانی خاک، فرضیه این پژوهش آن است که کرم خاکی در حضور ماده آلی و شکل بیوجار شده آن، ویژگی‌های فیزیکی خاک و ذخیره کربن در درون خاکدانه‌ها را به گونه‌ی متفاوتی تغییر می‌دهد. هدف از پژوهش حاضر، بررسی برهمکنش کرم خاکی با کود گاوی و بیوجار حاصل از آن در مقادیر مختلف بر چگالی ظاهری، تخلخل کل، هدایت هیدرولیکی اشباع، پایداری خاکدانه‌ها در آب و کربن درون خاکدانه‌ای در دو زمان ۳۰ و ۹۰ روز بود.

### مواد و روش‌ها

#### بیوجار

به منظور تولید بیوجار، ابتدا کود گاوی هواخشک و از الک دو میلی‌متر عبور داده شد. سپس مقدار مشخصی کود گاوی در شرایط اکسیژن محدود در کوره الکتریکی در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس پیرولیز شد. برای محاسبه عملکرد تولید بیوجار، وزن بیوجار بر وزن کود گاوی تقسیم شد که برابر با ۲۷/۲ درصد بدست آمد. برای تعیین مقدار خاکستر کود و بیوجار، مقدار مشخصی از آن‌ها به مدت هشت ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس قرار داده شد (۳۵). وزن خاکستر بر وزن اولیه کود و بیوجار تقسیم و درصد خاکستر کود و بیوجار آن به ترتیب ۴۱ و ۶۰ درصد محاسبه شد.

خاک نمونه برداری خاک به صورت مرکب از عمق ۰-۱۵ سانتی‌متری یک خاک زراعی در روستای حیدره در استان همدان با مختصات جغرافیایی  $34^{\circ}48'09''$  شرقی و  $48^{\circ}27'27''$  انجام شد. پس از هوا خشک شدن، مقداری از خاک به منظور انجام آزمایشات عمومی از الک دو میلی‌متر عبور داده شد. همچنین به منظور اعمال تیمارها از خاک عبور داده شده از الک چهار میلی‌متر استفاده شد.

#### ویژگی‌های خاک، کود و بیوجار کود گاوی

ویژگی‌های عمومی خاک، کود و بیوجار با روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدند (۷). بافت خاک به روش هیدرومتر، کربنات کلسیم خاک به روش ختنی‌سازی

ماندگار بر روی ستون‌های خاک برقرار و حجم آب خروجی از نمونه‌های خاک در زمان‌های یکسان اندازه‌گیری و سپس با استفاده از معادله داری هدايت هیدرولیکی اشباع محاسبه شد:

$$Ks = \frac{V \times dz}{At \times dHt} \quad (2)$$

Ks هدايت هیدرولیکی اشباع ( $cm \ h^{-1}$ )، V حجم آب خروجی ( $cm^3$ )، A سطح مقطع ستون ( $cm^2$ )، t زمان (h)، dHt اختلاف پتانسیل هیدرولیکی بین دو طرف ستون (cm)، dz طول ستون (cm) می‌باشد.

### آنالیز آماری

ابتدا نرمال و همگن بودن داده‌ها بررسی و سپس تجزیه واریانس اثر فاکتورها بر ویژگی‌های خاک برای هر زمان به صورت جداگانه توسط نرم‌افزار SAS (V.9.2) انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

### نتایج و بحث

#### الف) چگالی ظاهری و تخلخل کل خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که در هر دو زمان انکوباسیون، اثرات اصلی کرم خاکی، نوع بهساز و مقدار آن بر چگالی ظاهری و تخلخل کل خاک معنی‌دار شدند (جدول ۲). اثر متقابل نوع و مقدار بهساز در هر دو زمان انکوباسیون ۳۰ و ۹۰ روز نیز معنی‌دار شد. نتایج همچنین نشان داد که در ۹۰ روز انکوباسیون، اثر متقابل کرم خاکی و نوع بهساز، اثر متقابل کرم خاکی و مقدار بهساز و اثر متقابل سه گانه کرم خاکی، نوع و مقدار بهساز نیز بر چگالی ظاهری و تخلخل کل خاک معنی‌دار شدند (جدول ۲).

مقایسه میانگین اثر اصلی کرم خاکی نشان داد که در بودن کرم خاکی چگالی ظاهری خاک در هر دو زمان انکوباسیون کاهش یافت که این موضوع افزایش معنی‌داری تخلخل کل خاک را در پی داشت؛ اگرچه مقدار این تغییرات چندان چشمگیر نبود (جدول ۳).

#### ویژگی‌های خاک‌های تیمار شده

چگالی ظاهری خاک به روش استوانه (دست نخورده) با در نظر گرفتن وزن و حجم خاک، چگالی حقیقی به روش پیکنومتر و تخلخل کل با در نظر گرفتن چگالی ظاهری و حقیقی محاسبه شد (۷).

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به روش الکک تر اندازه‌گیری شد (۱۶). بر طبق این روش ابتدا نمونه‌های خاک پس از هواخشک شدن از الکک چهار میلی‌متری عبور داده شدند. سپس ۵۰ گرم خاک بر روی سری الکک‌ها به ترتیب از بالا به پایین با اندازه ۲، ۰/۲۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر ریخته شد و با سرعت ۵۰ نوسان در دقیقه به مدت ۲ دقیقه به صورت عمودی در آب تکان داده شد. سپس الکک‌ها به آرامی از آب خارج و خاکدانه‌های روی الکک‌ها در دمای ۵۰ درجه سلسیوس خشک و سپس توزین شدند. به منظور تصحیح مقدار ذرات اولیه در اندازه خاکدانه (شن و سنگ‌ریزه)، خاکدانه‌های خشک‌شده دومرتبه بر روی الکک نظیر ریخته و شن و سنگ‌ریزه از آن‌ها جدا، سپس خشک و توزین گردیدند. در نهایت مقدار خاکدانه‌های واقعی (ذرات عبوری از هر الکک پس از خردشدن) محاسبه شدند. مقدار کربن آلی درون هر گروه اندازه خاکدانه به روش اکسیداسیون تر اندازه‌گیری و با در نظر گرفتن نسبت وزنی هر اندازه خاکدانه، مقدار کربن خاکدانه‌ای بر حسب گرم در ۱۰۰ گرم خاک گزارش شد. برای محاسبه شاخص پایداری خاکدانه از فرمول زیر استفاده شد:

$$MWD = \sum_{i=1}^n w_i \times X_i \quad (1)$$

که در این رابطه MWD میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، n تعداد دامنه اندازه خاکدانه‌ها،  $X_i$  میانگین قطر خاکدانه‌ها در دامنه  $i$ ام و  $w_i$  نسبت وزن خشک خاکدانه‌ها در دامنه  $i$ ام به وزن خشک کل خاکدانه‌ها است.

هدایت هیدرولیکی اشباع نیز به روش بار ثابت اندازه‌گیری شد (۱۸). بدین صورت که ابتدا نمونه‌های خاک به مدت ۲۴ ساعت اشباع شدند. سپس جریان آب

جدول (۱) ویژگی‌های عمومی خاک، کود گاوی و بیوجار آن (۲۵)  
Table (1) General parameters of soil, cow manure and its biochar (25)

ویژگی parameter	واحد Unit	خاک Soil	کود گاوی Cow manure	بیوجار کود گاوی Cow manure biochar
بافت Texture	-	لوم سیلتی Silt loam	-	-
کربن آلی Organic C	%	0.68	34.5	23.3
pH	-	7.46	7.80	9.38
هدایت الکتریکی Electrical conductivity	dS m <sup>-1</sup>	0.1	3.96	4.06
ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity	cmol+ kg <sup>-1</sup>	11.7	24.7	20.7
کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate	%	11.3	-	-
چگالی ظاهری Bulk density	g cm <sup>-3</sup>	1.6	0.2	0.3

بیشتری بر چگالی ظاهری و تخلخل کل خاک داشته باشد. همچنین مشاهده شد که بیشترین تاثیر کرم خاکی بر چگالی ظاهری و تخلخل خاک نیز در مقدار ۲ درصد کود گاوی بوده است. چنین به نظر می‌رسد که تعداد و وزن کرم خاکی و تولید مواد دفعی و ترشحات آن در تغییر منافذ خاک در تیمار ۲ درصد کود گاوی مناسب‌تر بوده است. لارنیک و همکاران<sup>۱</sup> (۲۲) بیان کردند که فضولات کرم خاکی به علت داشتن چگالی ظاهری کمتر، باعث کاهش تراکم و چگالی ظاهری خاک می‌شوند. صفادوست و همکاران<sup>۲</sup> (۳۲) نیز نشان دادند که اعمال همزمان تیمارهای فیزیکی (دوره‌های تر و خشک شدن و انجماد و ذوب) و فعالیت کرم خاکی، چگالی ظاهری خاک را کاهش و منافذ ریز، متوسط و درشت خاک را افزایش داد. اصغری و نجفیان<sup>۳</sup> (۳) مشاهده کردند که تاثیر کرم خاکی بر کاهش چگالی ظاهری خاک، افزایش تخلخل و پایداری خاکدانه‌ها در تیمار کاه و کلش گندم بیشتر از کود گاوی پوسیده بود. لانگ و راسل<sup>۳</sup> (۲۱) بیان کردند که تاثیر کرم خاکی بر چگالی ظاهری خاک به نوع کرم خاکی، بافت خاک و تعداد کرم خاکی بستگی دارد؛ با این حال، دانسته‌ها در این زمینه اندک و نیازمند به پژوهش‌های بیشتری است.

نتایج اثر متقابل سه گانه نشان داد که در ۹۰ روز انکوباسیون، کرم خاکی، چگالی ظاهری خاک را به مقدار ۰/۶۷ درصد در تیمار شاهد و به مقدار ۰/۶۸-۱/۱۲ و ۱/۴۵-۰/۷ درصد به ترتیب در تیمارهای بیوجار و کود گاوی کاهش داد. همچنین کرم خاکی، تخلخل خاک را در تیمارهای دارای کود گاوی (۱/۳-۲/۶ درصد) و بیوجار (۱-۲ درصد) بیشتر از تیمار شاهد (۰/۶۷ درصد) تغییر داد (شکل ۱).

کرم خاکی به منظور تغذیه خود از مواد آلی استفاده می‌کند. نوع و مقدار ماده آلی می‌تواند بر تعداد، وزن، فعالیت، مواد دفعی و ترشحات آن‌ها تاثیرگذار باشد. حرکت و کارکرد کرم خاکی می‌تواند منافذ خاک را تغییر داده و بر چگالی ظاهری و تخلخل خاک تاثیر بگذارد (۳). همچنین آمیخته شدن ماده آلی با خاک و مواد ترشح شده از کرم خاکی نیز باعث ساختمان‌سازی شده و از این طریق چگالی ظاهری و تخلخل خاک نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرد (۳۲). به طور مشابه، در پژوهش حاضر نیز مشاهده شد که تاثیر بهسازها بر کرم خاکی متفاوت بوده و تعداد کرم در تیمارهای دارای کود گاوی و بیوجار آن به ترتیب افزایش و کاهش یافته است (نتایج این بخش از پژوهش قبلا انتشار یافته است (۲۵)). همچنین، این امکان وجود دارد که تولید مواد دفعی و ترشحات کرم خاکی در حضور بهسازهای کود گاوی و بیوجار آن متفاوت بوده باشد. بنابراین کرم خاکی در بستر کود گاوی توانسته اثر

1- Larnick *et al.*2- Safadoust *et al.*

3- Lang and Russell



جدول (۲) تجزیه واریانس اثر کرم خاکی، نوع و مقدار بهسازها بر چگالی ظاهری، تخلخل کل و هدایت هیدرولیکی خاک

میانگین مربعات Mean square							
زمان ۹۰ روز انکوباسیون 90-days incubation time			زمان ۳۰ روز انکوباسیون 30-days incubation time			درجه آزادی df	منابع تغییرات Variable sources
هدایت هیدرولیکی Hydraulic conductivity	تخلخل کل Total porosity	چگالی ظاهری Bulk density	هدایت هیدرولیکی Hydraulic conductivity	تخلخل کل Total porosity	چگالی ظاهری Bulk density		
0.005*	3.56**	0.003**	0.016*	3.91**	0.003**	1	کرم خاکی (E) Earthworm
0.028**	3.99**	0.003**	0.382**	21.03**	0.015**	1	نوع بهساز (M) Type of Amendment
0.024**	4.06**	0.003**	0.160**	11.40**	0.008**	3	مقدار بهساز (R) Amount of amendment
0.002ns	0.110*	0.00004*	0.006ns	0.160ns	0.0001ns	1	E*M
0.0002ns	0.119**	0.00003*	0.0007ns	0.124ns	0.00008ns	3	E*R
0.004*	0.468**	0.0003**	0.111**	5.21**	0.004**	3	M*R
0.0005ns	0.119**	0.00006**	0.003ns	0.241ns	0.0002ns	3	E*M*R
0.001	0.018	0.00001	0.002	0.215	0.00014	32	خطا Error
5.30	0.35	0.22	6.74	1.18	0.80		ضریب تغییرات CV

Table (2) Analysis of variance of earthworm, type and amount of amendments on bulk density, total porosity and hydraulic conductivity

\*\* و \* به ترتیب در سطح آماری ۱ و ۵ درصد معنی دار می باشد. ns، معنی دار نمی باشد.

\*\*, \* is significant at  $P < 0.01$  and  $P < 0.05$ , respectively. ns, is not significant.

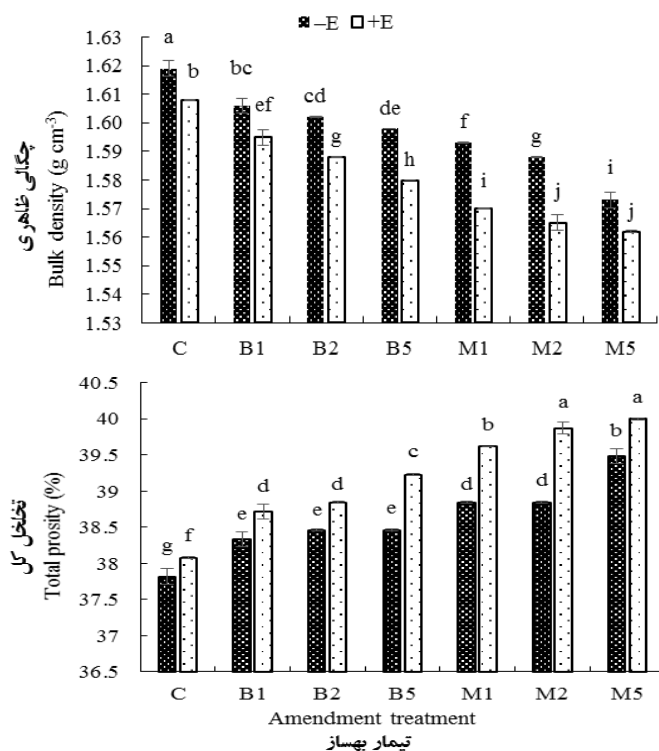
جدول (۳) مقایسه میانگین اثر کرم خاکی بر چگالی ظاهری، تخلخل کل و هدایت هیدرولیکی خاک

Table (3) Mean comparison of earthworm effect on bulk density, total porosity and hydraulic conductivity

زمان ۳۰ روز انکوباسیون 30-days incubation time			
هدایت هیدرولیکی Hydraulic conductivity ( $\text{cm h}^{-1}$ )	تخلخل کل Total porosity (%)	چگالی ظاهری Bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	فاکتور کرم خاکی Earthworm factor
0.730±0.03b	39.03±0.272b	1.58±0.007a	-E
0.740±0.037a	39.22±0.252a	1.56±0.006b	+E
زمان ۹۰ روز انکوباسیون 90-days incubation time			
هدایت هیدرولیکی Hydraulic conductivity ( $\text{cm h}^{-1}$ )	تخلخل کل Total porosity (%)	چگالی ظاهری Bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	فاکتور کرم خاکی Earthworm factor
0.655±0.011b	38.32±0.109b	1.60±0.003a	-E
0.676±0.012a	38.76±0.145a	1.58±0.004b	+E

-E، بدون کرم خاکی، +E، با کرم خاکی. اعداد (میانگینها ± خطای استاندارد) با حروف متفاوت در هر ستون دارای تفاوت معنی دار ( $P < 0.05$ ) می باشند. -E، without earthworm, +E, with earthworm. Numbers (Means ± standard error) followed with different letters at each column are significantly different ( $P < 0.05$ )

ناهیدان و همکاران: تاثیر کرم خاکی و کاربرد کود گاوی...



شکل (۱) اثر کرم خاکی، نوع و مقدار بهسازها بر چگالی ظاهری و تخلخل کل خاک در زمان ۹۰ روز انکوباسیون (-E، بدون کرم خاکی، +E، با کرم خاکی، C، شاهد؛ B1، بیوجار ۱ درصد؛ B2، بیوجار ۲ درصد؛ B5، بیوجار ۵ درصد؛ M1، کود گاوی ۱ درصد؛ M2، کود گاوی ۲ درصد؛ M5، کود گاوی ۵ درصد). حروف یکسان نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد می باشد.

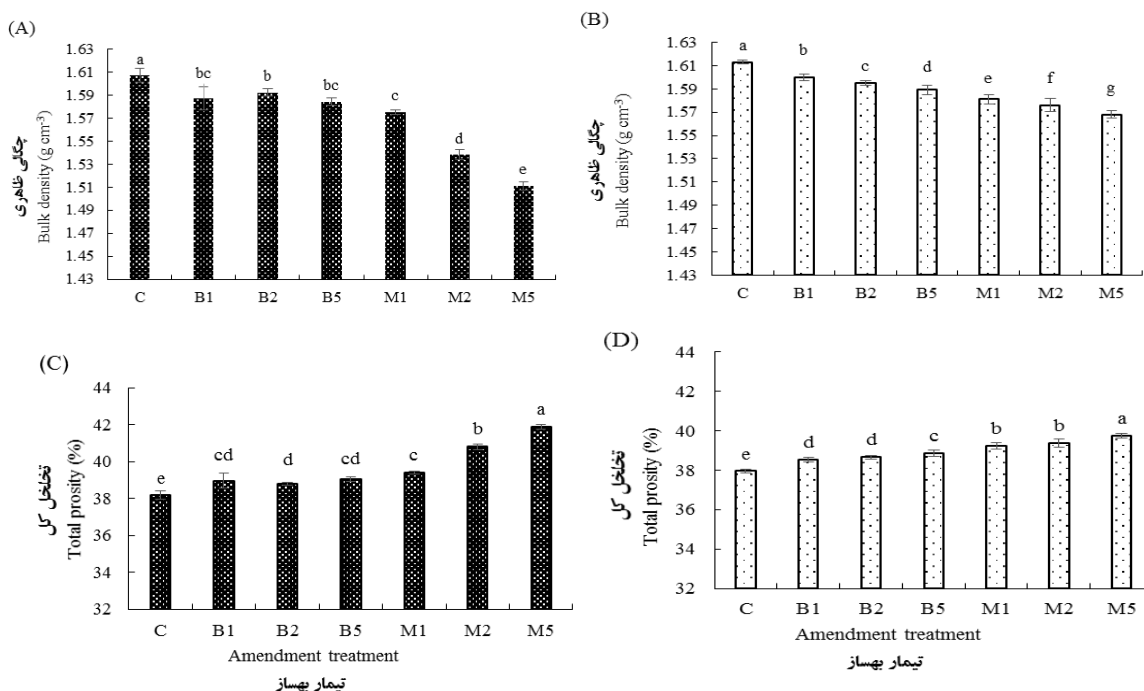
Figure (1) Effect of earthworm, type and amount of amendments on bulk density and total porosity at 90 days incubation (-E, without earthworm, +E, with earthworm, B1, 1% biochar; B2, 2% biochar; B5, 5% biochar; M1, 1% cow manure; M2, 2% cow manure; M5, 5% cow manure). Same letters show no significant difference at  $P < 0.05$ .

کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل خاک در اثر افزودن کود گاوی در هر دو زمان بیشتر از بیوجار آن است (شکل ۲). از آنجایی که چگالی ظاهری کود گاوی کمتر از بیوجار آن می باشد (جدول ۱) این مسئله می تواند قابل انتظار باشد. در این حالت، نظر به اینکه کاربرد بهسازها در خاک به صورت وزنی بوده است، بنابراین تغییرات ناشی از بهسازها بر چگالی ظاهری خاک می تواند ناشی از حجم متفاوت آنها نیز باشد. از دلایل دیگر تفاوت چگالی ظاهری و تخلخل خاک در تیمار بهسازها می توان به کربن متفاوت موجود در بهسازها اشاره کرد. از آنجایی که کربن آلی کود نسبت به بیوجار آن بیشتر است (جدول ۱)، چنین می توان استنباط کرد که با افزایش خاکدانه سازی و

نتایج همچنین نشان داد که در زمان ۳۰ روز انکوباسیون، افزودن بیوجار باعث کاهش چگالی ظاهری خاک به مقدار ۱/۴۳-۰/۹۳ درصد و افزایش تخلخل خاک به مقدار ۱/۶۶-۲/۳ درصد نسبت به شاهد شد، ولی تفاوت معنی داری بین سطوح ۱، ۲ و ۵ درصد بیوجار از نظر چگالی ظاهری و تخلخل خاک مشاهده نشد. در تیمار کود گاوی با افزایش مقدار کاربرد آن، چگالی ظاهری خاک به مقدار ۱/۹۹-۵/۹۷ درصد کاهش و تخلخل کل به مقدار ۳/۲۶-۹/۶۹ درصد افزایش یافت (شکل ۲). در ۹۰ روز انکوباسیون، کاربرد بیوجار و کود گاوی، چگالی ظاهری خاک را به ترتیب به مقدار ۱/۴۹-۰/۸ و ۲/۷۹-۱/۹۸ درصد کاهش و تخلخل خاک را به ترتیب به مقدار ۲/۳۶-۱/۵۲ و ۳/۳۸-۴/۷۳ درصد افزایش داد. نتایج حاکی از آن است که شدت

به تجزیه افزایش می‌یابد (۲۳). نتایج به طور کلی حاکی از آن است که هر دو بهساز می‌توانند به منظور بهبود چگالی ظاهری و تخلخل خاک مورد استفاده قرار گیرند و تاثیر کود گاوی در مقایسه با بیوجار آن در هر دو زمان، بیشتر می‌باشد. با این حال، چنین به نظر می‌رسد که با گذشت زمان و تجزیه شدن کود، از شدت اثر کود در مقایسه با بیوجار آن بر چگالی ظاهری و تخلخل خاک کاسته می‌شود. بررسی عمیق‌تر این مسئله نیازمند مطالعه بیشتر در زمان‌های طولانی‌تر و در مقیاس مزرعه‌ای می‌باشد.

ایجاد منافذ بیشتر در خاک تیمار شده با کود گاوی، چگالی ظاهری خاک کاهش و تخلخل افزایش بیشتری یافته است. نتایج همچنین نشان داد که تاثیر مقادیر ۲ و ۵ درصد کود گاوی بر کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل در زمان ۹۰ روز انکوباسیون نسبت به ۳۰ روز انکوباسیون کاهش یافته است در حالی که تاثیر مقادیر مختلف بیوجار بر چگالی ظاهری و تخلخل خاک با گذشت زمان تغییر اندکی کرده است (شکل ۲). این یافته می‌تواند به تجزیه پذیری بیشتر کود در مقایسه با بیوجار آن نسبت داده شود. گزارش شده که با تبدیل کود به بیوجار از بخش ناپایدار کربن کاسته شده و اشکال آروماتیک کربن و مقاوم



شکل (۲) اثر نوع و مقدار بهسازها بر چگالی ظاهری و تخلخل کل خاک در زمان ۳۰ روز (A و C) و ۹۰ روز (B و D) انکوباسیون (C، شاهد؛ B1، بیوجار ۱ درصد؛ B2، بیوجار ۲ درصد؛ B5، بیوجار ۵ درصد؛ M1، کود گاوی ۱ درصد؛ M2، کود گاوی ۲ درصد؛ M5، کود گاوی ۵ درصد). حروف یکسان نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

Figure (2) Effect of type and amount of amendments on bulk density and total porosity at 30 (A and C) and 90 (B and D) days incubation. (C, control; B1, 1% biochar; B2, 2% biochar; B5, 5% biochar; M1, 1% cow manure; M2, 2% cow manure; M5, 5% cow manure). Same letters show no significant difference at P < 0.05.

### ج) هدایت هیدرولیکی اشباع

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کرم خاکی، نوع بهساز و مقدار آن بر هدایت هیدرولیکی در هر دو زمان انکوباسیون معنی دار شدند. همچنین اثر متقابل نوع و مقدار بهساز در هر دو زمان انکوباسیون بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک معنی دار شد (جدول ۲).

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع در حضور کرم خاکی افزایش یافت (جدول ۳). در واقع کرم خاکی با افزایش کربن آلی خاک در اثر دفع فضولات و همچنین ترشحات خود (۱۰) به خاکدانه‌سازی و توزیع مجدد منافذ خاک کمک می‌کند، از طرفی با ایجاد کرم‌راه‌ها موجب افزایش توان خاک به عبور آب و در نتیجه افزایش هدایت هیدرولیکی در شرایط اشباع می‌شود. اصغری و نجفیان (۳) بیان کردند که کرم خاکی موجب افزایش کربن، کلسیم و منیزیم خاک که از عوامل اتصال‌دهنده ذرات به یکدیگر هستند می‌شود. جانسن - ماینارد و همکاران<sup>۱</sup> (۱۴) نیز اظهار کردند که کرم خاکی با بهبود وضعیت ساختمانی و افزایش منافذ خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را افزایش می‌دهد.

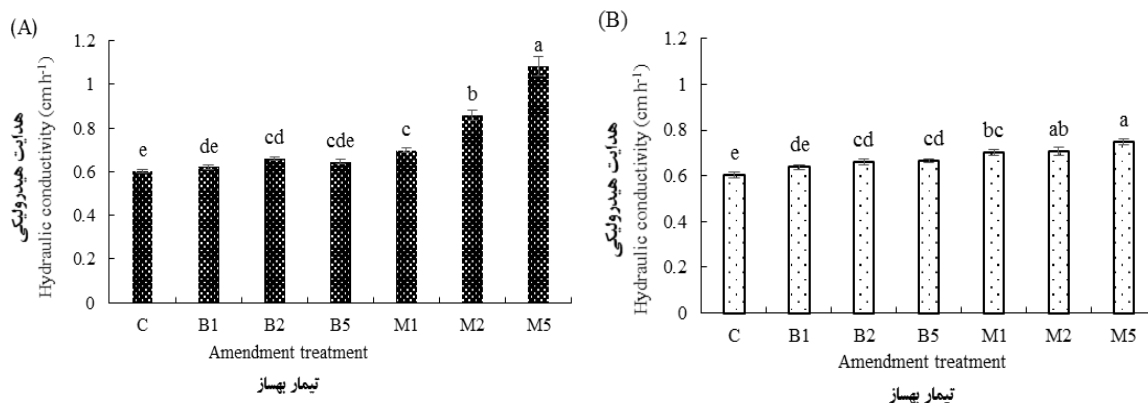
نتایج پژوهش حاضر همچنین نشان داد که به طور میانگین، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های تیمار شده به کود گاوی در زمان ۳۰ و ۹۰ روز انکوباسیون به ترتیب به میزان ۲۸ و ۷/۵ درصد بیشتر از هدایت هیدرولیکی خاک‌های تیمار شده به بیوجار بود (شکل ۳). با افزایش در سطح هر دو بهساز، هدایت هیدرولیکی اشباع نسبت به شاهد افزایش یافت که شدت افزایش هدایت هیدرولیکی در اثر افزودن کود گاوی (۱۶-۸۰/۲) درصد در زمان ۳۰ روز و ۱۶/۴-۲۳/۹ درصد در زمان ۹۰ روز انکوباسیون) بیشتر از شدت افزایش این ویژگی در اثر افزودن بیوجار (۳/۱-۹/۹) درصد در زمان ۳۰ روز و ۵/۱-۱۰/۴ درصد در زمان ۹۰ روز انکوباسیون) بود (شکل ۳). این مسئله می‌تواند به چگالی ظاهری کمتر و

تخلخل بیشتر خاک‌های تیمار شده با کود گاوی در مقایسه با بیوجار آن نسبت داده شود. در مطالعات پیشین، افزایش هدایت هیدرولیکی در اثر کاربرد بهسازهایی چون کودهای آلی (۳۱) و بیوجار (۴۰) گزارش شده است. یافته‌های این پژوهش همچنین حاکی از آن است که اگرچه هدایت هیدرولیکی در تیمارهای کود گاوی در هر دو زمان بیشتر از بیوجار آن بود ولی با گذشت زمان از ۳۰ به ۹۰ روز از شدت تاثیر کود گاوی بر هدایت هیدرولیکی در برابر بیوجار آن کاسته شده است. همان‌طور که در بخش چگالی ظاهری و تخلخل کل نیز بیان شد این مسئله می‌تواند به تجزیه‌پذیری بیشتر کود در مقایسه با بیوجار آن نسبت داده شود.

### د) توزیع اندازه خاکدانه و پایداری ساختمان خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کرم خاکی بر درصد خاکدانه‌های محدوده‌ی ۲-۰/۲۵، ۰/۲۵-۰/۰۵، ذرات < ۰/۰۵ میلی‌متری و MWD در زمان ۳۰ روز انکوباسیون و خاکدانه‌های محدوده‌ی ۴-۲ میلی‌متری و MWD در زمان ۹۰ روز انکوباسیون معنی دار بود. اثر نوع و مقدار بهساز و اثر متقابل آن‌ها نیز بر درصد خاکدانه‌های محدوده‌ی ۴-۲، ۲-۰/۲۵، ذرات < ۰/۰۵ میلی‌متری و MWD هر دو زمان انکوباسیون معنی دار بودند. همچنین اثر مقدار بهساز بر درصد خاکدانه‌های ۰/۲۵-۰/۰۵ میلی‌متری معنی دار بود (جدول ۴).

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کرم خاکی منجر به افزایش معنی دار خاکدانه‌ها در محدوده‌ی ۲-۰/۲۵ و ۰/۲۵-۰/۰۵ میلی‌متری به ترتیب به مقدار ۱۰/۸ و ۱۵/۱ درصد و کاهش ذرات < ۰/۰۵ میلی‌متری به مقدار ۱۱/۶ درصد در زمان ۳۰ روز انکوباسیون شد. در زمان ۹۰ روز انکوباسیون، کرم خاکی، خاکدانه‌های ۴-۲ میلی‌متری را به مقدار ۱۶/۴ درصد افزایش معنی داری داد. کرم خاکی همچنین خاکدانه‌های ۲-۰/۲۵ و ۰/۲۵-۰/۰۵ را افزایش و ذرات < ۰/۰۵ میلی‌متری را کاهش داد اگرچه چنین تغییراتی معنی دار نبود (جدول ۵).



شکل (۳) اثر نوع و مقدار بهسازها بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در زمان ۳۰ روز (A) و ۹۰ روز (B) انکوباسیون (C، شاهد؛ B1، بیوجار ۱ درصد؛ B2، بیوجار ۲ درصد؛ B5، بیوجار ۵ درصد؛ M1، کود گاوی ۱ درصد؛ M2، کود گاوی ۲ درصد؛ M5، کود گاوی ۵ درصد). حروف یکسان نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

**Figure (3) Effect of type and amount of amendments on saturated hydraulic conductivity at 30 (A) and 90 (B) days incubation (C, control; B1, 1% biochar; B2, 2% biochar; B5, 5% biochar; M1, 1% cow manure; M2, 2% cow manure; M5, 5% cow manure). Same letters show no significant difference at  $P < 0.05$ .**

فضولات کمتری تولید کرده و این مسئله باعث شده که نقش کمتری در تولید خاکدانه‌های درشت در حضور بقایای سورگوم داشته باشد. برخلاف نتایج این پژوهشگران، در پژوهش حاضر تاثیر کرم خاکی بر خاکدانه‌سازی به نوع بهسازهای مورد استفاده (کود گاوی و بیوجار آن) بستگی نداشت؛ اگرچه بنا به نتایج بخشی از این پژوهش که قبلاً انتشار یافته است (۲۵) تعداد کرم خاکی در حضور بیوجار کود گاوی کمتر از کود گاوی بود.

نتایج همچنین نشان داد که خاکدانه‌های ۲-۴ و ۲-۲ میلی‌متری به طور میانگین، به مقدار ۴۱ و ۲۳/۱ درصد در زمان ۳۰ روز و به مقدار ۲۵ و ۱۳/۶ درصد در زمان ۹۰ روز انکوباسیون در خاک‌های تیمار شده به کود گاوی بیشتر از بیوجار آن بودند (شکل ۴). برخلاف آن، ذرات  $< 0.05$  میلی‌متری در هر دو زمان انکوباسیون در خاک‌های تیمار شده به کود گاوی کمتر از بیوجار آن بود (شکل ۴).

نتایج همچنین نشان داد که کرم خاکی، MWD را نیز به مقدار ۳/۵ و ۱۰/۱ درصد به ترتیب در زمان ۳۰ و ۹۰ روز انکوباسیون افزایش داد (جدول ۵). این نتایج گویای آن است که در اثر فعالیت کرم خاکی، ابتدا خاکدانه‌های کوچک و متوسط و سپس با گذشت زمان خاکدانه‌های درشت پایدار در آب تشکیل شده است. اصغری و نجفیان (۳) افزایش پایداری خاکدانه‌ها را در اثر فعالیت کرم خاکی گزارش کردند. آن‌ها دلیل این مسئله را افزایش کلسیم و منیزیم در تیمارهای دارای کرم خاکی دانستند. بوسیت و همکاران<sup>۱</sup> (۹) اظهار داشتند که افزایش خاکدانه‌های درشت در حضور کرم خاکی، ناشی از تولید فضولات توسط این موجودات می‌باشد. فضولات، مواد لزج و پلی‌ساکاریدها تولید شده توسط کرم‌ها، نقش عوامل پیونددهنده ذرات خاک را بازی می‌کنند (۹). کوک و همکاران<sup>۲</sup> (۱۱) بیان کردند که تاثیر کرم خاکی بر خاکدانه‌سازی به نوع ماده آلی اضافه‌شده به خاک بستگی دارد. آن‌ها اظهار داشتند که کرم خاکی با بلع کمتر بقایای سورگوم در برابر برنج،

1- Bossuyt *et al.*

2- Coq *et al.*

ناهیدان و همکاران: تاثیر کرم خاکی و کاربرد کود گاوی...

جدول (۴) تجزیه واریانس اثر کرم خاکی، نوع و مقدار بهسازها بر توزیع اندازه و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در خاک

Table (4) Analysis of variance of earthworm, type and amount of amendments on aggregate size distribution and mean weight diameter (MWD) of soil

میانگین مربعات Mean square											
زمان ۹۰ روز انکوباسیون 90-days incubation time					زمان ۳۰ روز انکوباسیون 30-days incubation time					درجه آزادی df	منابع تغییرات Variable source
میانگین وزنی قطر خاکدانه	توزیع اندازه خاکدانه Aggregate size distribution				میانگین وزنی قطر خاکدانه	توزیع اندازه خاکدانه Aggregate size distribution					
MWD mm	<0.05 mm	0.25-0.05 mm	2-0.25 mm	4-2 mm	MWD mm	<0.05 mm	0.25-0.05 mm	2-0.25 mm	4-2 mm		
0.056*	81.1ns	8.96ns	5.782ns	30.5**	0.003*	319**	13.7*	235 **	1.35ns	1	کرم خاکی (E) Earthworm
0.231**	922**	13.6ns	434**	60.1**	0.297**	1850**	12.6ns	947**	75.4**	1	نوع بهساز (M) Type of amendment
0.279**	1947**	12.9*	982**	107**	0.331**	889**	7.73ns	285**	128**	3	مقدار بهساز (R) Amount of amendment
0.023ns	28.5ns	0.880ns	30.6ns	7.06ns	0.00003ns	32.5ns	0.629ns	29.4 ns	0.268ns	1	E*M
0.004ns	55.5ns	5.96ns	27.9ns	4.23ns	0.0003ns	9.94ns	2.6ns	31.4ns	2.44ns	3	E*R
0.027*	146*	1.73ns	101*	6.78*	0.056**	269**	7.71ns	135**	10.3**	3	M*R
0.005ns	33.1ns	0.705ns	22.6ns	3.84ns	0.0002ns	7.09ns	1.24ns	7.19ns	1.73ns	3	E*M*R
0.008	35.2	3.57ns	25.4	2.69	0.0007	30.4	3.22	29.6	1.49	32	خطا (Error)
11.5	17.3	23.7	10.5	16.3	8.33	13.1	23.6	12.7	16.5		ضریب تغییرات (CV)

\*\* و \* به ترتیب در سطح آماری ۱ و ۵ درصد معنی دار می‌باشد. ns، معنی دار نمی‌باشد.

\*\* , \* is significant at  $P < 0.001$ ,  $P < 0.01$  and  $P < 0.05$ , respectively. ns, is not significant.

(۴۱) مشاهده کردند که افزودن ۸ تن در هکتار شلتوک برنج و بیوچار آن بر خاکدانه‌سازی موثر نبود ولی مقدار ۱۶ تن در هکتار آن‌ها منجر به افزایش خاکدانه‌سازی شد. هانسن و همکاران<sup>۲</sup> (۱۳) مشاهده کردند که افزودن ۱۰۰ تن در هکتار بقایای گیاهی منجر به افزایش خاکدانه‌سازی شد، ولی افزودن ۱۰۰ تن در هکتار بیوچار بقایای گیاهی و چوب تاثیر معنی‌داری بر خاکدانه‌سازی نداشت. این پژوهشگران بیان کردند، از آنجایی که کربن بیوچار قابلیت تجزیه کمی توسط میکروب‌ها دارد، بنابراین مواد پیونددهنده‌ی کمتری برای تشکیل خاکدانه ایجاد می‌کند. این موضوع می‌تواند دلیلی برای تفاوت بین دو بهساز از لحاظ خاکدانه‌سازی باشد.

### کربن خاکدانه‌ای

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کرم خاکی بر کربن خاکدانه‌های ۲-۲۵ و ۰/۲۵-۰/۰۵ میلی‌متری در زمان ۳۰ روز انکوباسیون و کربن خاکدانه‌های ۴-۲ و ۰/۲۵-۰/۰۵ میلی‌متری زمان ۹۰ روز انکوباسیون معنی‌دار بود. نوع و مقدار بهساز نیز بر کربن هر سه اندازه خاکدانه موثر بود. اثر متقابل نوع و مقدار بهساز نیز بر کربن خاکدانه‌های ۴-۲ و ۰/۲۵-۲ میلی‌متر معنی‌دار بودند (جدول ۶).

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کرم خاکی، کربن خاکدانه‌های ۲-۲۵ و ۰/۲۵-۰/۰۵ میلی‌متری را در زمان ۳۰ روز انکوباسیون به ترتیب به مقدار ۱۲/۹ و ۱۸/۳ درصد و کربن خاکدانه‌های ۴-۲ و ۰/۲۵-۰/۰۵ میلی‌متری را در زمان ۹۰ روز انکوباسیون به ترتیب به مقدار ۱۵/۱ و ۲۳/۵ درصد افزایش داد (جدول ۷). در پژوهش‌های پیشین نیز از تاثیر کرم خاکی بر افزایش کربن آلی خاک گفته شده است (۱۰). همچنین گزارش شده است که کرم خاکی با افزایش کربن در خاکدانه‌های کوچک‌تر و نگهداری از آن‌ها، باعث افزایش ذخیره کربن در خاک می‌شود (۴) و (۹).

نتایج شاخص پایداری خاکدانه هم حاکی از آن بود که در هر دو زمان ۳۰ و ۹۰ روز انکوباسیون، MWD در خاک‌های تیمار شده به کود گاوی به طور میانگین، به ترتیب به مقدار ۳۲ و ۲۱/۵ درصد بیشتر از بیوچار آن بود (شکل ۵). این مسئله می‌تواند به کربن بیشتر موجود در کود گاوی در مقایسه با بیوچار آن نسبت داده شود (جدول ۱)؛ زیرا کربن از عوامل موثر در تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها در آب است (۱۶). همچنین کربن موجود در کود گاوی در مقایسه با کربن بیوچار حاصل از آن دارای قابلیت دسترسی بیشتری برای ریزجانداران می‌باشد؛ بنابراین کود گاوی می‌تواند با تولید بیشتر عوامل پیونددهنده‌ی ذرات توسط ریزجانداران در مقایسه با بیوچار آن، موجب افزایش خاکدانه‌سازی شده باشد. با این حال، نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که از شدت اثر کود گاوی بر خاکدانه‌سازی در مقایسه با بیوچار آن با گذشت زمان کاسته شده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد این مسئله می‌تواند به دلیل تجزیه‌پذیری متفاوت کود و بیوچار آن باشد؛ بدین صورت که با تجزیه شدن سریع‌تر کود گاوی در مقایسه با بیوچار حاصل از آن، مواد آلی تازه و قابل دسترس برای ریزجانداران کاهش یافته و در نتیجه این مسئله سبب شده که از شدت تاثیر کود گاوی بر خاکدانه‌سازی کاسته شود.

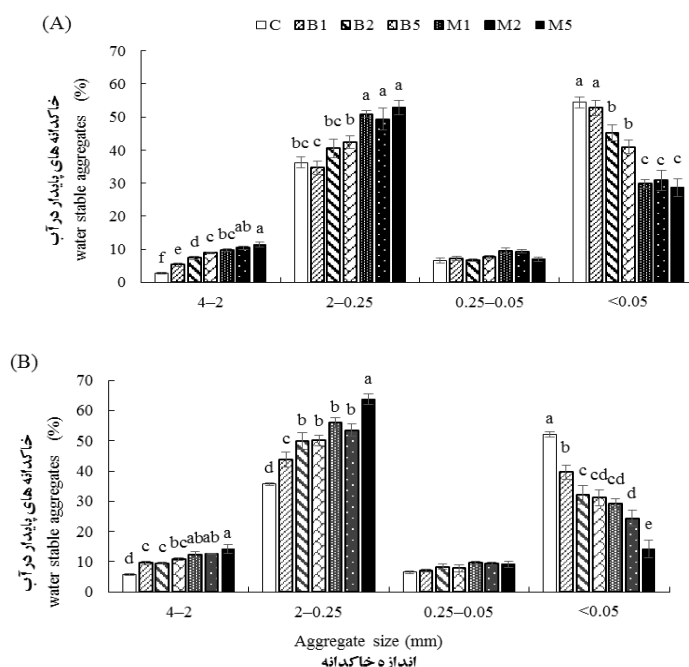
نتایج همچنین نشان داد که با افزایش مقدار کاربرد بهسازها به‌ویژه کود گاوی در مقایسه با بیوچار آن در خاک، ذرات  $< 0.05$  میلی‌متری کاهش و خاکدانه‌های ۴-۰/۰۵ میلی‌متری نسبت به شاهد افزایش یافتند (شکل ۵). همچنین با افزایش مقدار هر دو بهساز در زمان ۳۰ روز انکوباسیون، MWD افزایش یافت. در زمان ۹۰ روز انکوباسیون نیز با افزودن بیوچار MWD افزایش یافت ولی تفاوت معنی‌داری بین سطوح ۱، ۲ و ۵ درصد بیوچار از نظر میانگین وزنی قطر خاکدانه مشاهده نشد. همچنین بیشترین مقدار خاکدانه‌سازی در تیمار ۵ درصد کود گاوی مشاهده شد (شکل ۵). ژانگ و همکاران<sup>۱</sup>

ناهیدان و همکاران: تاثیر کرم خاکی و کاربرد کود گاوی...

جدول (۵) مقایسه میانگین اثر کرم خاکی بر توزیع اندازه و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در خاک  
Table (5) Mean comparison of earthworm effect on aggregate size distribution and mean weight diameter (MWD) of soil

زمان ۳۰ روز انکوباسیون 30-days incubation time					
میانگین وزنی قطر خاکدانه	توزیع اندازه خاکدانه Aggregate size distribution				فاکتور کرم خاکی Earthworm factor
MWD mm	<0.05 mm	0.25-0.05 mm	2-0.25 mm	4-2 mm	
0.57±0.010b	44.7±2.33a	7.06±0.405b	40.7±1.69b	7.54±0.71a	-E
0.59±0.028a	39.5±2.38b	8.13±0.372a	45.1±1.69a	7.20±0.672a	+E
زمان ۹۰ روز انکوباسیون 90-days incubation time					
میانگین وزنی قطر خاکدانه	توزیع اندازه خاکدانه Aggregate size distribution				فاکتور کرم خاکی Earthworm factor
MWD mm	<0.05 mm	0.25-0.05 mm	2-0.25 mm	4-2 mm	
0.69±0.036b	35.7±2.41a	7.53±0.40a	47.5±1.83a	9.28±0.51b	-E
0.76±0.042a	33.1±3.03a	8.40±0.41a	48.2±2.18a	10.8±0.81a	+E

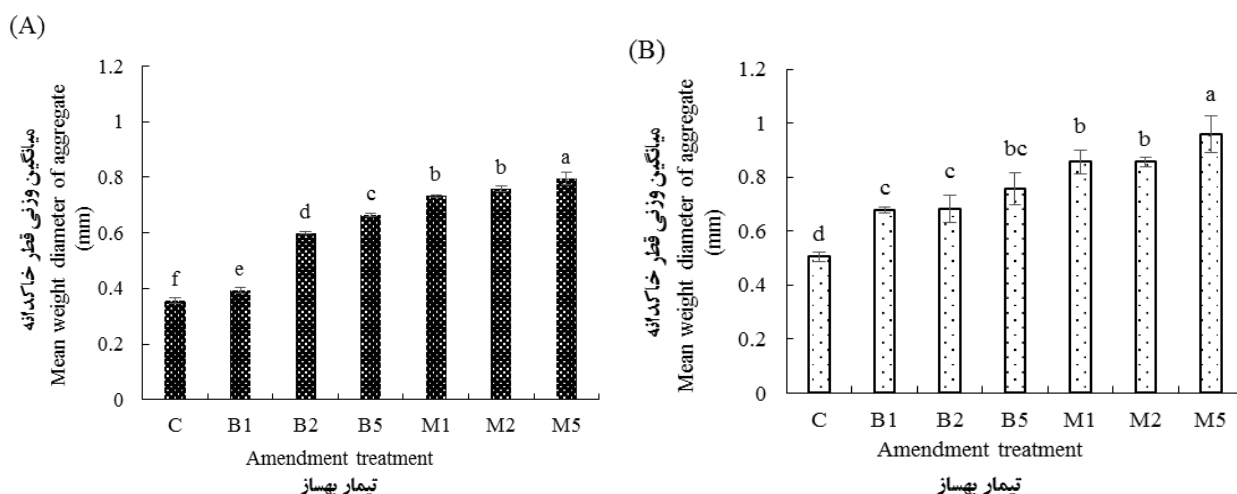
-E، بدون کرم خاکی، +E، با کرم خاکی. اعداد (میانگین‌ها±خطای استاندارد) با حروف متفاوت در هر ستون برای تفاوت معنی‌دار ( $P<0.05$ ) می‌باشند.  
-E, without earthworm, +E, with earthworm. Numbers (Means ± standard error) followed with different letters at each column are significantly different ( $P < 0.05$ ).



شکل (۴) اثر نوع و مقدار بهسازها بر توزیع اندازه خاکدانه‌ها در زمان ۳۰ روز (A) و ۹۰ روز (B) انکوباسیون (C، شاهد؛ B1، بیوجار ۱ درصد؛ B2، بیوجار ۲ درصد؛ B5، بیوجار ۵ درصد؛ M1، کود گاوی ۱؛ M2، کود گاوی ۲ درصد؛ M5، کود گاوی ۵ درصد). حروف یکسان نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

Figure (4) Effect of type and amount of amendments on aggregate size distribution at 30 (A) and 90 (B) days incubation (C, control; B1, 1% biochar; B2, 2% biochar; B5, 5% biochar; M1, 1% cow manure; M2, 2% cow manure; M5, 5% cow manure). Same letters show no significant difference at  $P < 0.05$ .





شکل (۵) اثر نوع و مقدار بهسازها بر میانگین وزنی قطر خاکدانه در زمان ۳۰ روز (A) و ۹۰ (B) روز انکوباسیون (C، شاهد؛ B1، بیوچار ۱ درصد؛ B2، بیوچار ۲ درصد؛ B5، بیوچار ۵ درصد؛ M1، کود گاوی ۱ درصد؛ M2، کود گاوی ۲ درصد؛ M5، کود گاوی ۵ درصد). حروف یکسان نشان دهنده عدم وجود تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد می باشند.

Figure (5) Effect of type and amount of amendments on mean weight diameter of aggregate at 30 (A) and 90 (B) days incubation (C, control; B1, 1% biochar; B2, 2% biochar; B5, 5% biochar; M1, 1% cow manure; M2, 2% cow manure; M5, 5% cow manure). Same letters show no significant difference at  $P < 0.05$ .

مدیریت ماده آلی خاک حساس تر می باشد. همچنین افزودن هر دو بهساز به ویژه کود گاوی به خاک با بهبود خاکدانه سازی و افزایش حفاظت فیزیکی کربن در خاکدانه های درشت تر می تواند کربن آلی خاک را افزایش دهد. این نتایج با نتایج سایر پژوهش ها مبنی بر ذخیره کربن در خاکدانه های درشت در اثر کاربرد بهساز (۱۵) مطابقت داشت.

نتایج همچنین نشان داد که کربن خاکدانه های ۲-۴، ۲-۲۵ و ۰/۲۵-۰/۰۵ میلی متری به ترتیب به مقدار ۴۲/۸، ۲۷/۸ و ۲۰/۱ درصد در زمان ۳۰ روز و به ترتیب به مقدار ۲۷/۲، ۲۸/۷ و ۲۰/۶ درصد در زمان ۹۰ روز انکوباسیون در خاک های تیمار شده با کود گاوی بیشتر از بیوچار آن بودند. با افزایش سطح کاربرد بهسازها در خاک، کربن خاکدانه ها به ویژه خاکدانه های ۲-۴ میلی متری افزایش یافت که شدت این افزایش در خاک های تیمار شده به کود گاوی بیشتر از بیوچار آن بود (شکل ۶). این نتایج گویای آن است که خاکدانه های ۲-۴ میلی متری نسبت به

ناهیدان و همکاران: تاثیر کرم خاکی و کاربرد کود گاوی...

جدول (۶) تجزیه واریانس اثر کرم خاکی، نوع و مقدار بهسازها بر کربن خاکدانه‌ای در خاک  
Table (6) Analysis of variance of earthworm, type and amount of amendments on aggregate-associated C of soil

میانگین مربعات Mean square						درجه آزادی df	منابع تغییرات Variable source
کربن خاکدانه‌ای Aggregate-associated C							
زمان ۹۰ روز انکوباسیون 90-days incubation time			زمان ۳۰ روز انکوباسیون 30-days incubation time				
0.25-0.05 mm	2-0.25 mm	4-2 mm	0.25-0.05 mm	2-0.25 mm	4-2 mm		
0.016**	0.026ns	0.005*	0.014*	0.177* *	0.0002ns	1	کرم خاکی (E) Earthworm
0.013*	0.591**	0.014**	0.017**	0.704* *	0.026**	1	نوع بهساز (M) Type of amendment
0.039**	1.88**	0.071* *	0.039**	1.94**	0.113**	3	مقدار بهساز (R) Amount of amendment
0.00001ns	0.016ns	0.0001n s	0.0004ns	0.009n s	0.001ns	1	E*M
0.003ns	0.004ns	0.002ns	0.001ns	0.027n s	0.001ns	3	E*R
0.003ns	0.166**	0.009**	0.003ns	0.324* *	0.006**	3	M*R
0.00008ns	0.008ns	0.0005n s	0.001ns	0.002n s	0.001ns	3	E*M*R
0.002	0.010	0.0009	0.002	0.012	0.0006	32	خطا (Error)
24.50	11.28	20.61	22.67	10.96	16.92		ضریب تغییرات (CV)

\*\* و \* به ترتیب معنی‌داری در سطح آماری ۱ و ۵ درصد می‌باشد. ns، معنی‌دار نمی‌باشد.

\*\* , \* is significant at  $P < 0.001$ ,  $P < 0.01$  and  $P < 0.05$ , respectively. ns, is not significant.

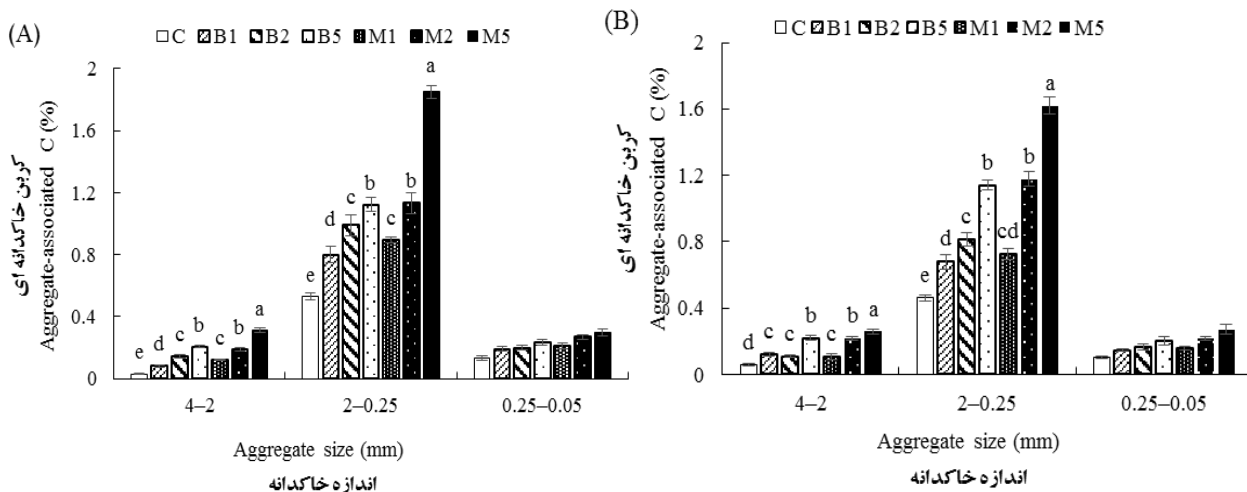
جدول (۷) مقایسه میانگین اثر کرم خاکی بر کربن خاکدانه‌ای در خاک

Table (7) Mean comparison of earthworm effect on aggregate-associated C of soil

زمان ۳۰ روز انکوباسیون 30-days incubation time			
کربن خاکدانه‌ای Aggregate-associated C			
0.25-0.05 mm	2-0.25 mm	4-2 mm	فاکتور کرم خاکی Earthworm factor
0.191±0.015b	0.921±0.08b	0.141±0.018a	-E
0.226±0.012a	1.04±0.09a	0.137±0.019a	+E
زمان ۹۰ روز انکوباسیون 90-days incubation time			
کربن خاکدانه‌ای Aggregate-associated C			
0.25-0.05 mm	2-0.25 mm	4-2 mm	فاکتور کرم خاکی Earthworm factor
0.153±0.012b	0.861±0.079a	0.132±0.017b	-E
0.189±0.015a	0.908±0.078a	0.152±0.014a	+E

-E، بدون کرم خاکی، +E، با کرم خاکی. اعداد (میانگین‌ها ± خطای استاندارد) با حروف متفاوت در هر ستون برای تفاوت معنی‌دار (P<0.05) می‌باشند.

-E, without earthworm, +E, with earthworm. Numbers (Means ± standard error) followed with different letters at each column are significantly different (P <0.05).



شکل (۶) اثر نوع و مقدار بهسازها بر کربن خاکدانه‌ای در زمان ۳۰ روز (A) و ۹۰ (B) روز انکوباسیون (C، شاهد؛ B1، بیوجار ۱ درصد؛ B2، بیوجار ۲ درصد؛ B5، بیوجار ۵ درصد؛ M1، کود گاوی ۱ درصد؛ M2، کود گاوی ۲ درصد؛ M5، کود گاوی ۵ درصد). حروف یکسان نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

Figure (6) Effect of type and amount of amendments on aggregate-associated C at 30 (A) and 90 (B) days incubation (C, control; B1, 1% biochar; B2, 2% biochar; B5, 5% biochar; M1, 1% cow manure; M2, 2% cow manure; M5, 5% cow manure). Same letters show no significant difference at P <0.05.

### نتیجه گیری

بهساز کود گاوی به صورت خام و بیوچار شده در خاک وابستگی ندارد. با این حال، تاثیر کرم خاکی بر چگالی ظاهری و تخلخل کل در ۹۰ روز انکوباسیون در تیمار کود گاوی بیشتر از بیوچار آن بود. همچنین کرم خاکی صرفه نظر از نوع بهساز بکاررفته در خاک می تواند با افزایش بیشتر کربن آلی در خاکدانه های کوچک تر، ذخیره کربن آلی خاک را افزایش دهد. با وجود نتایج بدست آمده در این تحقیق، به منظور ارائه توصیه های کاربردی در درازمدت، پیشنهاد می شود این پژوهش در دوره زمانی طولانی تر انجام شود.

نتایج نشان داد که در کوتاه مدت، کود گاوی در مقایسه با بیوچار آن نقش بیشتری در بهبود وضعیت ساختمانی خاک و حفاظت فیزیکی کربن آلی خاک ایفا می کند. با این حال، چنین به نظر می رسد که با گذشت زمان از اثر کود گاوی بر ویژگی های فیزیکی خاک کاسته شده و این امکان وجود دارد که بیوچار در درازمدت تاثیر بیشتری بر بهبود کیفیت فیزیکی خاک داشته باشد.

نتایج دیگر این پژوهش نشان داد که تاثیر کرم خاکی بر بهبود ویژگی های فیزیکی اندازه گیری شده خاک (به جز بر چگالی ظاهری و تخلخل کل) به کاربرد

### References

1. Al-Maliki, S., and Scullion, J. 2013. Interactions between earthworms and residues of differing quality affecting aggregate stability and microbial dynamics. *Applied Soil Ecology*, 64: 56-62.
2. Are, K.S., Adelana, A.O., Fademi, I. O., and Aina, O.A. 2017. Improving physical properties of degraded soil: Potential of poultry manure and biochar. *Agriculture and Natural Resources*, 51(6): 454-462.
3. Asghari, Sh., and Najafian, M. 2015. Interactive effects of organic matters and earthworm on some physical and chemical properties of two soils under different compaction conditions. *Applied Soil Research*, 3: 89-102. (In Persian with English abstract).
4. Bhadauria, T., and Saxena, K.G. 2010. Role of earthworms in soil fertility maintenance through the production of biogenic structures. *Applied and Environmental Soil Science*. 2010, 1-8.
5. Barnes, R.T., Gallaghe, M.E., Masiello, C.A., Liu, Z., and Dugan, B. 2014. Biochar-induced changes in soil hydraulic conductivity and dissolved nutrient fluxes constrained by laboratory experiments. *PLoS One*, 9: 1-9.
6. Blanco-Canqui, H. 2017. Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4): 687-711.

7. Burt, R. 2004. Soil survey laboratory methods manual: Soil survey investigations. Version 4.0. Natural Resources Conservation Service, Nebraska, United States.
8. Busscher, W.J., Novak, J.M., Evans, D.E., Watts, D.W., Niandou, M., and Ahmedna, M. 2010. Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand. *Soil Science*, 175:10-14.
9. Bossuyt, H., Six, J., and Hendrix, P.F. 2005. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(2): 251-258.
10. Chaudhuri, P.S. 2012. Effects of five earthworm species on some physico-chemical properties of soil. *Journal of Environmental Biology*, 33: 713-716.
11. Coq, S., Barthès, B.G., Oliver, R., Rabary, B., and Blanchart, E. 2007. Earthworm activity affects soil aggregation and organic matter dynamics according to the quality and localization of crop residues- an experimental study (Madagascar). *Soil Biology and Biochemistry*, 39(8): 2119-2128.
12. Gelik, I., Ortas, I., and Kilik, S. 2004. Effect of compost, Mycorrhiza, Manure and fertilizer on some physical properties of Chromoxerert soil. *Soil and Tillage Research*, 78: 59-67.
13. Hansen, V., Müller-Stöver, D., Munkholm, L.J., Peltre, C., Hauggaard-Nielsen, H., and Jensen, L.S. 2016. The effect of straw and wood gasification biochar on carbon sequestration, selected soil fertility indicators and functional groups in soil: An incubation study. *Geoderma*, 269: 99-107.
14. Johnson-Maynard, J.L., Graham, R.C., Wu, L., and Shouse, P.J. 2002. Modification of soil structural and hydraulic properties after 50 years of imposed chaparral and pine vegetation. *Geoderma*, 110: 227-240.
15. Joseph, U.E., Toluwase, A.O., Kehinde, E.O., Omasan, E.E., Tolulope, A.Y., George, O.O., Zhao, C., and Hongyan, W. 2020. Effect of biochar on soil structure and storage of soil organic carbon and nitrogen in the aggregate fractions of an Albic soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2: 66(1):1-2.
16. Kemper, W.D., and Rosenau, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In Klute, A (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp: 425-442.
17. Klodivko, E.J., Mackay, A.D., and Bradford, J.M. 1986. Earthworms as a factor in the reduction of soil crusting. *Soil Science Society American Journal*, 50: 191-196.
18. Klute, A., and Dirksen, C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In Klute, A. (ed). *Methods of Soil Analysis. Part1, Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed. Agron. Monog.9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp: 687-734
19. Knight, D., Elliott, P.W., Anderson, J.M., and Scholefield, D. 1992. The role of earthworms in managed, permanent pastures in Devon. *Engl. Soil Biology and Biochemistry*, 24: 1511-1517.
20. Laird, D.A. 2008. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal*, 100: 178-181.
21. Lang, B., and Russell, D. J. 2019. Effects of earthworms on bulk density—a meta-analysis. *European Journal of Soil Science*, 1-4.
22. Larink, O., Werner, D., Langmaack, M., and Schrader, S. 2001. Regeneration of compacted soil aggregates by earthworm activity. *Biology and Fertility of Soils*, 33: 395-401.
23. Lehmann J., and Joseph, S. 2009. Biochar for environmental management- an introduction. In J. Lehmann and Joseph, S (eds.), *Biochar for environmental management: Science and Technology*. London. pp: 1-11.

24. Liu, M., Hu, F., Chen, X., Huang, Q., Jiao, J., Zhang, B., and Li, H. 2009. Organic amendments with reduced chemical fertilizer promote soil microbial development and nutrient availability in a subtropical paddy field: the influence of quantity, type and application time of organic amendments. *Applid Soil Ecology*, 42: 166-175.
25. Nahidan, N., and Safari Sinejani, A.A. 2019. The Effect of Earthworm, Cow Manure and its Biochar on Some Soil Biological Properties. 50, 1095-1109. (In Persian with English abstract)
26. Omondi, M.O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X., Korai, P.K., and Pan, G. 2016. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. *Geoderma*, 274: 28-34.
27. Pagliai, M., Guidi, G., Lamarca, M., Giachetti, M., and Lucamante, P. 1981. Effects of sewage sludges and composts on soil porosity and aggregation. *Journal of Environmental Quality*, 10: 556-561.
28. Peng, X., Ye, L., Wang, C., Zhou, H., and Sun, B. 2011. Temperature-and duration-dependent rice straw-derived biochar: characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil Tillage and Research*. 112: 159-166.
29. Pratiwi, E.P., and Shinogi, Y. 2016. Rice husk biochar application to paddy soil and its effects on soil physical properties, plant growth, and methane emission. *Paddy Water Environment*, 14: 521-532.
30. Rogovska, N., Laird, D.A., Rathke, S.J., and Karlen, D.L. 2014. Biochar impact on midwestern mollisols and maize nutrient availability. *Geoderma*, 230-231: 340-347.
31. Safadoust, A., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nouroozi, A., and Asadian, Gh. 2007. Short-Term Tillage and Manure Influences on Soil Structural Properties. *Journal of Water and Soil Science*, 11 (41): 91-101. (In Persian with English abstract)
32. Safadoust, A., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., and Yousefi, G. 2012. Effects of wetting/drying, freezing/thawing and earthworm activities on soil hydraulic properties. *Journal of Water and Soil*, 26: 340-34. (In Persian with English abstract)
33. Safari Sinegani, A.A. 2015. Soil organic matter. Bu-Ali Sina University Pubilcation Center, Hamadan, Iran, 364p. (In persian)
34. Schouten, S., Van Groenigen, J.W., Oenema, O., and Cayuela, M.L. 2012. Bioenergy from cattle manure Implications of anaerobic digestion and subsequent pyrolysis for carbon and nitrogen dynamics in soil. *GCB Bioenergy*, 4: 751-760.
35. 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.
36. Tammeorg, P., Parviainen, T., Nuutinen, V., Simojoki, A., Vaara, E., and Helenius, J. 2014. Effects of biochar on earthworms in arable soil: avoidance test and field trial in boreal loamy sand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 191: 150-157.
37. Usowicz, B., Lipiec, J., Lukowski, M., Marczewski, W., and Usowicz, J. 2016. The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow. *Soil Tillage and Research*, 164: 45-51.
38. Uzoma, K.C., Inoue, M., Andry, H., Zahoor, A., and Nishihara, E. 2011. Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 9: 1137-1143.
39. Wen, B., Hu, X.Y., Liu, Y., Wang, W.S., Feng, M.H., and Shan, X.Q. 2004. The role of earthworms (*Eisenia fetida*) in influencing bioavailability of heavy metals in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 40(3), 181-187.

40. Wong, J.T.F., Chen, Z., Wong, A.Y.Y., Wang Ng, C.W., and Wong, M.H. 2018. Effects of biochar on hydraulic conductivity of compacted kaolin clay. *Environmental Pollution*, 234: 468-472.
41. Zhang, K., Chen, L., Li, Y., Brookes, P. C., Xu, J., and Luo, Y. 2017. The effects of combinations of biochar, lime, and organic fertilizer on nitrification and nitrifiers. *Biology and Fertility of Soils*, 53(1): 77-87.
42. Zolfi Bavariani, M., Ronaghi, A., Karimian, N., Ghasemi, R., and Yasrebi, J. 2016. Effect of poultry manure derived biochars at different temperatures on chemical properties of a calcareous soil. *Journal of Water and Soil*. 20 (75):73-86. (In Persian with English abstract)