نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال یازدهم، شماره یک، پاییز ۱۴۰۰

10.30495/WSRCJ.2021.18548

ISSN 2251-7480

اثر نوع، اندازه و مقدار بیوچار بر تخلخل، مقاومت فروروی و پایداری خاکدانه‌ها در یک خاک آهکی

حسن اصولی [۱*]، احمد کریمی [۲]، حسین شیرانی [۳] و سید حسن طباطبایی [۴]

۱*) دانشجوی دوره دکتری علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۲) استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۳) استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.

۴)دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: osoolih@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۹

چکیده:

اخیرا بیوچار به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک مورد توجه قرارگرفته است. در تحقیقات انجام‌یافته، به اثر نوع و مقدار بیوچار بر ویژگی‌های خاک تأکید شده است. این تحقیق مزرعه‌ای با هدف بررسی اثر توأم نوع، مقدار و اندازه ذرات بیوچار بر تخلخل کل (TP)، مقاومت فروروی (PR) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های با الک خشک (MWD) در خاکی با بافت لوم شنی انجام شد. آزمایش فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه فاکتور نوع، مقدار و اندازه ذرات بیوچار در سه تکرار اجرا شد. بیوچارهای کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو در مقادیر ۰/۵، ۱/۵ و ۳ درصد و اندازه ذرات ۰/۵–۰، ۱–۰/۵ و ۲–۱ میلی‌متر به خاک اضافه شدند. هر سه بیوچار در مقایسه با شاهد TP را به‌صورت معنی‌داری افزایش و PR را به‌صورت معنی‌داری کاهش دادند. نوع بیوچار بیشترین سهم را در تغییرات TP و PR داشت. بیشترین TP در تیمار بیوچار کاه گندم با مقدار ۳٪ و اندازه ذرات ۲–۱ میلی‌متر به دست آمد. بیشترین کاهش PR، در بیوچار کاه گندم با مقدار ۳٪ و با اندازه ذرات ۱–۰/۵ میلی‌متر مشاهده شد. اثر متقابل نوع، مقدار و اندازه ذرات بیوچار، بیشترین سهم را در تغییر MWD داشت. بیشترین MWD (۱/۲۲ mm) در خاک‌های تیمار شده با بیوچار کاه گندم با مقدار ۰/۵٪ و اندازه ذرات ۰/۵–۰ میلی‌متر مشاهده شد. نتایج نشان داد که مقدار و اندازه ذرات بیوچار بسته به نوع بیوچار اثرات متفاوتی بر ویژگی مورد مطالعه خاک داشتند.

کلید واژه‌ها: اندازه ذرات بیوچار؛ خصوصیات فیزیکی خاک؛ میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها؛ خاک آهکی

مقدمه

نامناسب بودن شرایط فیزیکی خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک از عوامل محدودکننده کشاورزی پایدار است. کم بودن کربن آلی خاک، از عواملی است که ظرفیت نگهداری رطوبت و حاصلخیزی خاک‌های آن مناطق را کاهش داده و آن‌ها را مستعد تخریب می‌نماید (Abdelfattah, 2013). برای اصلاح شرایط فیزیکی و نیز افزایش محتوی کربن آلی خاک‌های آن مناطق، مواد آلی به فرم‌های مختلف مانند بقایای گیاهی، کودهای حیوانی و بقایای آلی کمپوست شده اضافه می‌شود (Bhatt *et al.*, 2016). بیوچار شکلی از مواد آلی است که در سال‌های

[۱] این مقاله بر گرفته از رساله دکتری آقای حسن اصولی است

اخیر استفاده از آن به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک، افزایش چشمگیری داشته است. بیوچار غنی از کربن آلی بوده و دارای ساختاری غیریکنواختی است که از گرما کافت مواد آلی در دمای بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و در شرایط اکسیژن کم یا بدون اکسیژن تولید می‌شود. ترسیب کربن، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییر ویژگی‌های خاک، سه اثر عمده افزودن بیوچار به خاک‌های کشاورزی است (Lehmann and Joseph, 2015).

در خاک‌های تیمار شده با بیوچار تغییر در خصوصیات فیزیکی خاک و کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل کل (رزاقی و رضایی، ۱۳۹۶) و نیز تغییر در برخی از عملکردهای خاک مانند افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک و آب قابل‌استفاده گیاه (قربانی دشتکی و همکاران، ۱۳۹۹) گزارش شده است. قربانی و امیر احمدی (۱۳۹۷) گزارش کردند که کاربرد بیوچار با کاهش جرم مخصوص خاک، افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع، افزایش تخلخل کل و همچنین افزایش مقدار آب قابل دسترس خاک سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌شود.

امیر سلطانی و همکاران (۱۳۹۸) بعد از آزمایش اثر بیوچار اصلاح‌شده و زئولیت بر ویژگی‌های خاک در یک محیط کنترل‌شده، گزارش کردند که بیوچار اصلاح‌شده با مقدار ۲ و ۵ گرم در هر کیلوگرم خاک سبب افزایش تخلخل کل، رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی و کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک شد. نسیمی و همکاران (۱۳۹۹) اثر مقادیر مختلف بیوچار تهیه‌شده از برگ خرما را در مقادیر ۰، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی به خاک با بافت لوم رسی شنی اضافه کردند و در طول یک دوره نه‌ماهه به‌صورت گلخانه‌ای بررسی کردند و نتایج ایشان نشان داد که اضافه کردن بیوچار به خاک موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک، افزایش تخلخل کل، تخلخل مویین و میانگین وزنی قطر خاکدانه-ها تعیین‌شده با الک تر و خشک شد. در این تحقیق اثر زمان سپری‌شده بعد از اضافه کردن بیوچار بر تغییر ویژگی‌های ذکرشده معنی‌دار بود.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک که کمبود رطوبت در فصل رشد گیاهان یکی از عوامل محدودکننده کشاورزی است، بیشتر بودن تراکم و مقاومت کششی خاک از فاکتورهای تعیین‌کننده توسعه ریشه در پروفیل خاک و دسترسی گیاه به منابع آب بیشتر هست. محمدی و خادم الرسول (۱۳۹۹) با انجام تحقیقی آزمایشگاهی گزارش کردند که افزودن بیوچار به خاکی با آلودگی نفتی، مقاومت فروروی خاک نسبت به شاهد کاهش داد. بهنام و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی گلخانه‌ای، نه ماه بعد از افزودن کمپوست و بیوچار باگاس نیشکر به خاک لوم رسی شنی، نتیجه گرفتند که مقاومت برشی خاک در تمام تیمارها در مقایسه با شاهد کاهش معنی‌دار داشت و مقاومت برش خاک همبستگی منفی معنی‌داری (r=۰/۸۹) با مقدار بیوچار اضافه شده به خاک داشت. افزایش بیوچار به خاک با کاهش مقاومت فروروی خاک موجب افزایش زیست‌توده، سطح و حجم ریشه شد (Xiang *et al.*, 2017). مطالعه مزرعه‌ای liu و همکاران (2017) نشان داد که افزودن بیوچار به خاک موجب کاهش مقاومت فروروی خاک شده و تنش ناشی از تراکم خاک در گندم را کم کرد.

پایداری خاکدانه‌ها یکی از شاخص‌های مهم ارزیابی عملکرد خاک است که برای تعیین کیفیت فیزیکی خاک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از روش‌های کلاسیک برای ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها می‌توان به میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها اشاره نمود. اثر بیوچار بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها یکسان نبوده و به ویژگی‌های بیوچار، مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک، ویژگی‌های مواد اولیه برای تهیه بیوچار، ویژگی‌های ذاتی خاک و شرایط اقلیمی منطقه و زمان سپری‌شده بعد از افزودن بیوچار به خاک بستگی دارد. Ghorbani و همکاران (2019) گزارش کردند که اضافه کردن بیوچار تهیه‌شده از شلتوک برنج در

دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، که در مقادیر ۰، ۱ و ۳٪ به دو خاک با بافت‌های لوم شنی و رسی اضافه‌شده بود، موجب بهبود میانگین وزنی و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها، پایداری و بعد فرکتال خاکدانه‌ها در خاک با بافت رسی شد، ولی تأثیری بر ویژگی‌های مذکور در خاک با بافت لوم شنی نداشت. نسیمی و همکاران (۱۳۹۹) گزارش کردند که بیوچار بر افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر، در ماه اول و بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خشک در ماه نهم بعد از افزودن بیوچار به خاک لوم رسی شنی تأثیر داشت. ابریشم‌کش و همکاران (۱۳۹۹) در یک تحقیق گلخانه‌ای سوسپانسیون بیوچار تهیه‌شده از ضایعات هرس درخت زبان‌گنجشک و شلتوک برنج را به در مقادیر ۰، ۰/۷ و ۱,۴ درصد به خاک‌های با بافت لوم و لوم شنی حساس به فرسایش اضافه کردند. نتایج ایشان نشان داد که تأثیر بیوچارهای مورد مطالعه ایشان بر افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه-های تر در خاک لوم معنی‌دار بود. Esmaailnejad و همکاران (2016) در یک تحقیق انجام‌شده در محیط کنترل‌شده، بیوچارهای شلتوک برنج و چوب سیب تهیه‌شده در دمای ۳۵۰ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد را در اندازه ذرات ۲-۱ mm و ۱> mm و به مقدار ۲٪ به خاک لوم شنی اضافه کردند. نتایج ایشان نشان داد که اثر دما، نوع و اندازه ذرات بیوچار بر تشکیل خاکدانه‌ها و پایداری خاکدانه‌ها، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر معنی‌دار بود و موجب افزایش ویژگی‌های مذکور نسبت به شاهد شد.

بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که در غالب آن‌ها، بیوچارهای تهیه‌شده از مواد اولیه مختلف در مقادیر متفاوت به خاک اضافه‌شده و اثر آن روی ویژگی‌های خاک موردبررسی قرارگرفته است و اثر توأم نوع، مقدار و اندازه ذرات بیوچار در شرایط مزرعه‌ای کمتر بررسی‌شده است. در این پژوهش مزرعه‌ای، اثر مقدار و اندازه ذرات بیوچارهای تهیه‌شده از کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو بر ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند تخلخل کل، مقاومت فروروی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با الک خشک در یک خاک آهکی موردبررسی قرار گرفت. هدف اختصاصی این پژوهش، مطالعه اثر تغییر در اندازه ذرات در یک مقدار ثابت بیوچار بر ویژگی‌های مورد مطالعه بود.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل مطالعه

این تحقیق در مزرعه تحقیقاتی مرکز آموزش و تحقیقات کشاورزی تبریز با مختصات جغرافیایی ° ۳۷/۹۷۵۲ عرض شمالی ، ° ۴۶/۵۵۱۶ طول شرقی و ارتفاع ۱۸۴۳ متر از سطح دریا اجرا شد. میانگین بارش سالانه منطقه ۳۳۱ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن، ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد است. برای اطلاع از وضعیت خاک محل آزمایش، نمونه‌هایی از سطح خاک (عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر) تهیه و بعد از اختلاط آن‌ها، یک نمونه مرکب تهیه و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پایه‌ای خاک تعیین شد (جدول ۱). نمونه دست‌نخورده‌ای هم برای تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک تهیه شد. اسیدیته خاک در نسبت ۱:۱ خاک به آب مقطر، قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره گل اشباع، مقدار کربنات کلسیم با روش کلسی‌متری، کربن آلی خاک با روش اکسیداسیون تر اندازه‌گیری شدند (Jones, 1999).

تهیه بیوچار

بیوچارهای مورد استفاده در این تحقیق از کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلوی هوا خشک تهیه شدند. مواد اولیه به‌صورت جداگانه در یک کوره با ظرفیت ۲۰۰ لیتر از نوع دو بشکه در دمای ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد در مدت ۸ ساعت گرما کافت شدند. دمای محفظه گرما کافت با مشعل مخصوص کوره با سوخت گاز طبیعی به‌صورت آرام با نرخ تقریبی ۱/۳۸ درجه سانتی‌گراد در دقیقه، در مدت ۴ ساعت به دمای ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد رسانده شده و ۴ ساعت در این دما نگه‌داشته شد. دمای

محفظه گرما کافت به‌وسیله یک ترموکوپل نوع A و دماسنج دیجیتال نمایش و کنترل می‌شد. برای خروج دود و مواد قابل‌احتراق حاصل از سوختن ناقص مواد آلی مورداستفاده برای تهیه بیوچار، سوراخی به قطر ۱ cm در درب محفظه گرما کافت ایجادشده و گازهای حاصل از گرما کافت، برای سوختن دوباره به محفظه احتراق هدایت شد. بیوچارهای تهیه‌شده، با الک‌های با قطر منافذ ۲، ۱ و ۰/۵ میلی‌متری الک شده و در کیسه‌های پلی‌اتیلنی غیرقابل نفوذ در برابر هوا، بسته‌بندی شدند تا سطح بیوچارها اکسید نگردد.

ویژگی‌های بیوچارهای تهیه‌شده در ذرات به ابعاد ۱۵۰ تا ۸۵۰ میکرون تعیین گردیدند (Rajkovich et al., 2012). pH و هدایت الکتریکی بیوچار، در محلولی با نسبت ۱:۲۰ (وزن به حجم) بیوچار به آب مقطر (Definition, 2015)، چگالی ظاهری بیوچار با استفاده از یک قالب استوانه‌ای شکل فلزی به قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۷۰ میلی‌متر (Rajkovich et al., 2012) و چگالی حقیقی بیوچار با پیکنومتر و نفت سفید تعیین شد (Gupta etal., 2002). میزان رطوبت، خاکستر، کربن (C)، هیدروژن (H) و نیتروژن (N) بیوچارها با روش ارائه‌شده در منبع اندازه‌گیری شدند (Rajkovich et al., 2012) (جدول ۱).

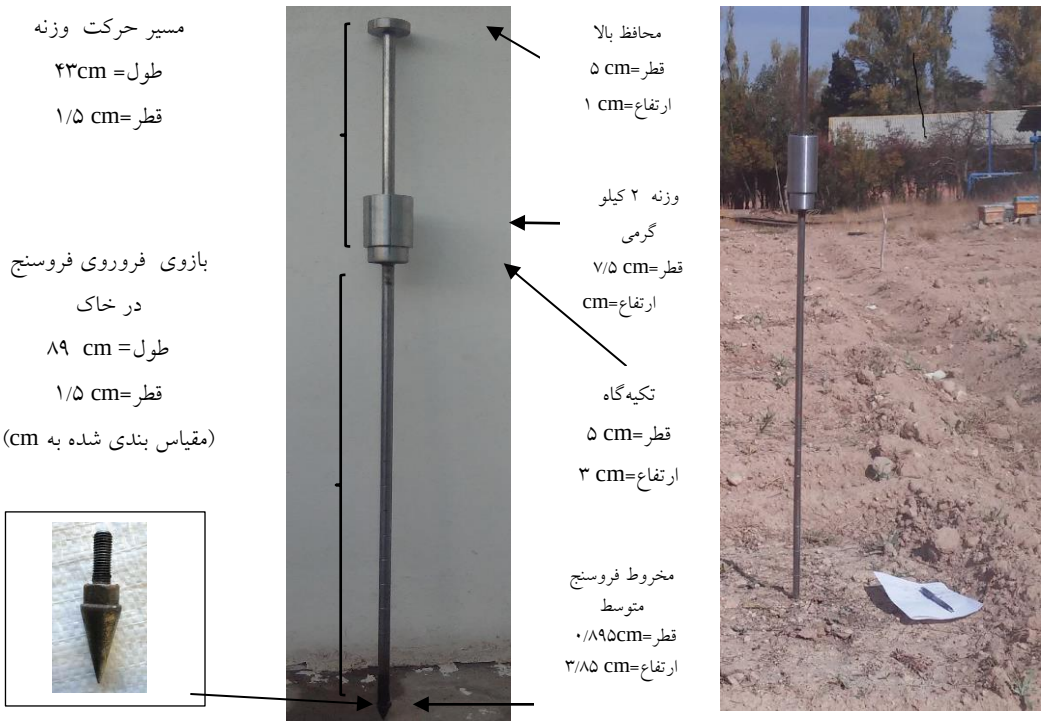
طرح آزمایش و اعمال تیمارها

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی و با سه فاکتور نوع، مقدار و اندازه بیوچار در سه تکرار اجرا شد. فاکتور نوع بیوچار(BT) دارای سه سطح بیوچار کاه گندم، بیوچار ورمی کمپوست و بیوچار چوب زردآلو و فاکتور مقدار بیوچار (BR) دارای سه سطح ۰/۵، ۱/۵ و ۳ درصد وزنی و فاکتور اندازه ذرات بیوچار (BS) دارای سه سطح ۰/۵–۰، ۱–۰/۵ و ۲–۱میلی‌متر بود. در هر بلوک یک کرت شاهد نیز در نظر گرفته شد.

بعد از شخم زمین موردنظر، کرت‌هایی به مساحت یک مترمربع (۱متر×۱ متر) احداث شد. بین دو کرت متوالی (در هر بلوک) نیم متر و بین بلوک‌ها (تکرارها) یک متر فاصله در نظر گرفته شد (۸۴ واحد آزمایشی). در ۲۰ ام مرداد ۱۳۹۷، تیمارها به سطح خاک اضافه‌شده و تا عمق ۱۵ سانتی‌متر با خاک مخلوط شدند. برای انجام عمل انکوباسیون، کرت‌های آزمایشی به مدت سه ماه (هر هفته)، آبیاری شدند. در هر آبیاری به هر کرت ۵۰ لیتر آب‌داده شد و مقدار آب آبیاری با کنتور حجمی کنترل شد. آبیاری یک هفته قبل از نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای قطع شد.

جدول۱. برخی از ویژگی‌های خاک و نیز بیوچارهای مورداستفاده در این آزمایش

ویژگی‌ها	واحد	خاک	بیوچار کاه گندم	بیوچار ورمی کمپوست	بیوچار چوب زردآلو
شن	%	۵۷	-	–	-
سیلت	%	۳۰	-	–	-
رس	%	۱۳	-	–	-
کربنات کلسیم معادل	%	۱۳/۵	-	–	-
جرم مخصوص ظاهری	$g\ cm^{-3}$	۱/۲۷	۰/۱۵	۰/۲۸	۰/۶۶
جرم مخصوص حقیقی	$g\ cm^{-3}$	۲/۵۶	۱/۰۹۹	۱/۲۱۴	۱/۱۱۵
pH	–	۷/۸۵	۹/۲۲	۹/۶۷	۸/۱۲
قابلیت هدایت الکتریکی	$dS\ m^{-1}$	۱/۶۵	۲/۱۵	۱/۹۳	۰/۱۸
خاکستر	%	–	۱۵/۶	۳۸/۹	۵/۲
رطوبت وزنی	%	–	۱/۱۶	۱/۲	۱/۵۷
کربن آلی (C)	%	۱/۱۷	۴۸/۹	۴۵/۳	۵۱/۶
نیتروژن کل(N)	%	۰/۰۱	۶/۳	۶	۷/۱
هیدروژن	%	–	۳۱/۹	۳۲/۶	۳۵/۴
C/N	-	۱۱/۷	۷۷/۶	۷۵/۵	۷۲/۷



شکل ۱: تصویر و مشخصات فرو سنج دینامیک خاک مورد استفاده در این تحقیق

نمونه‌برداری از خاک و اندازه‌گیری ویژگی‌های آن

۹۰ روز پس از اضافه کردن بیوچار به خاک، یک نمونه مرکب از سه نقطه هر کرت از عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری جهت تعیین ویژگی‌ها موردمطالعه و یک نمونه دست‌نخورده به کمک استوانه نمونه‌برداری برداشته شد. تخلخل کل خاک (TP) برابر با رطوبت اشباع خاک دست‌نخورده در نظر گرفته شد (Kikham, 2005). مقاومت فروروی[1] (PR) خاک در عمق ۱۵-۰ cm با استفاده از فرو سنج مخروطی دینامیک تعیین شد (Herrick and Jones, 2002). برای این منظور در سه نقطه از هر کرت تعداد ضربه‌های لازم برای فرورفتن فرو سنج تا عمق ۱۵ سانتی‌متر یادداشت (شکل ۱) و مقاومت فروروی خاک از رابطه زیر به دست آمد.

(۱)
$$PR = \frac{N \times M \times g \times SD}{A \times PD}$$

که در آن، PR مقاومت فروروی (MPa)، N تعداد ضربات لازم برای فرورفتن دستگاه تا عمق موردنظر، M وزن قسمت متحرک (چکش) نفوذسنج (kg)،g شتاب ثقل زمین ($9/81\ m\ sec^{-2}$) SD طول مسیر حرکت چکش (m)، A مساحت مخروط (cm^2) و PD عمق نفوذ دستگاه (m) است. برای تعیین رطوبت خاک یک نمونه از هر کرت تهیه شد.

برای تعیین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها[2] با الک خشک، ۱۰۰ گرم از خاک هوا خشک الک شده با الک ۸ میلی‌متری، بر روی سری الک‌های با قطر سوراخ‌های ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ میلی‌متر (به ترتیب از بالا به پایین) قرار داده‌شده و به مدت ۲ دقیقه با حرکت دورانی با تواتر ۱۵۰ دور در دقیقه الک شد (Liu *et al.*, 2012). میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها از رابطه زیر محاسبه شد.

(۲)
$$MWD = \sum_{i=1}^{n} d_i w_i$$

که در آن، MWD میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)، d_i میانگین قطر ذرات i (mm)، w_i نسبت وزن خاکدانه‌های با قطر d_i به وزن کل خاکدانه‌ها و n تعداد کلاس ذرات است.

[1] Penetration resistance (PR)

[2] Mean weight diameter of soil aggregate (MWD)

آنالیزهای آماری

نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کلموگروف-اسمیرنوف (P<0.05) و یکنواختی واریانس داده‌ها با آزمون لوون (P<0.05) آزمون گردید. برای مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده با شاهد، آنالیز واریانس یک‌طرفه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام و نتایج تیمارها با شاهد از طریق آزمون LSD در سطح احتمال ۱٪ (P<0.01) مقایسه شدند. برای ارزیابی اثر نوع، مقدار و اندازه بیوچارهای تهیه‌شده از سه ماده اولیه مختلف و اثرات متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های موردمطالعه، تجزیه واریانس سه عامله انجام شد (در این مرحله نتایج شاهد دخالت داده نشد. چون در طراحی آزمایش فاکتوریل برای کرت شاهد (بدون بیوچار) امکان اجرای تیمار بدون بیوچار با مقدار و اندازه ذرات در سطوح مورد مطالعه وجود نداشت. بنابراین در مرحله طراحی آزمایش فاکتوریل و ترکیب تیمارها، کرت شاهد در نظر گرفته نشد و در نهایت یک تیمار شاهد در هر بلوک در نظر گرفته شد و برای مقایسه میانگین تیمارها با شاهد ابتدا نتایج در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی تجزیه واریانس و میانگین تیمارها با شاهد مقایسه شد.). اندازه اثر[1] فاکتورهای موردمطالعه از تقسیم مجذور مربعات هر فاکتور به مجذور مربعات کل ضرب در ۱۰۰ محاسبه شد. در مواردی که اثر متقابل مرتبه سوم فاکتورها (BT×BR×BS) معنی‌دار بود، اثر متقابل اندازه بیوچار در مقدار بیوچار (BR×BS) با روش برش دهی اثر متقابل[2] در هر سطح از نوع بیوچار (BT) به‌صورت جداگانه بررسی شد. میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ (P<0.05) مقایسه شدند. برای تحلیل‌های آماری از نرم‌افزارهای SAS 9.1 و Statistix 9 و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel 2013 استفاده شد.

نتایج و بحث

تخلخل کل

بعد از افزودن بیوچار به خاک لوم شنی، میانگین تخلخل کل خاک (TP) در تیمار شاهد، ۰/۲۴ $cm^3\ cm^{-3}$ بود و اثر تیمارهای موردمطالعه بر تخلخل کل خاک معنی‌دار بود (جدول ۲). در تمام تیمارها تخلخل کل خاک نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری داشت. بیشترین تخلخل کل خاک با ۱۲۷/۳ ٪ افزایش نسبت به شاهد، در تیمار بیوچار کاه گندم با مقدار ۳٪ و اندازه ذرات ۲ mm –۱ (SBR3S3) مشاهده شد (شکل ۲).

تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی و اثرات متقابل فاکتورهای موردمطالعه بر تخلخل کل خاک معنی‌دار بودند (جدول ۳). بررسی اندازه اثرات ساده و اثرات متقابل مرتبه اول و دوم فاکتورهای موردمطالعه در تغییر تخلخل کل نشان داد که نوع بیوچار (BT)، مقدار بیوچار (BR) و نوع بیوچار در اندازه بیوچار (BT×BS) به ترتیب ۵۲/۵٪، ۱۴/۶٪ و ۱۳/۴٪ در تغییر تخلخل کل خاک سهم داشتند (جدول ۳). برش دهی اثر BR×BS در بیوچارهای کاه گندم، چوب زردآلو و ورمی کمپوست نشان داد که اثر BR×BS در تغییر تخلخل کل خاک در هر سه نوع بیوچار، در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۴). اثر تغییر در اندازه ذرات بیوچار بر تخلخل خاک بسته به نوع و نیز مقدار بیوچار متفاوت بود به‌طوری‌که در بیوچار کاه گندم در مقدار ۰/۵٪، تغییر در اندازه ذرات بیوچار تفاوت معنی‌داری در تخلخل کل خاک را سبب نشد و اثر این بیوچار در مقدار ۱/۵٪ با اندازه ذرات ۰/۵ mm> و ۱–۰/۵ mm بر تخلخل کل خاک با تیمارهای قبلی یکسان بود و همین حالت برای بیوچار گندم در مقدار ۱/۵٪ و اندازه ذرات ۲–۱ mm با تیمارهای بیوچار گندم در مقدار ۳٪ و اندازه ذرات ۰/۵ mm> و ۱–۰/۵ mm وجود داشت. اثر بیوچار کاه گندم در مقدار ۳٪ با اندازه ذرات ۱–۰/۵ mm و ۲–۱ mm یکسان بود. در بیوچار کاه گندم بیشترین تخلخل کل در مقدار

[1] Effect size
[2] Slicing of interactions

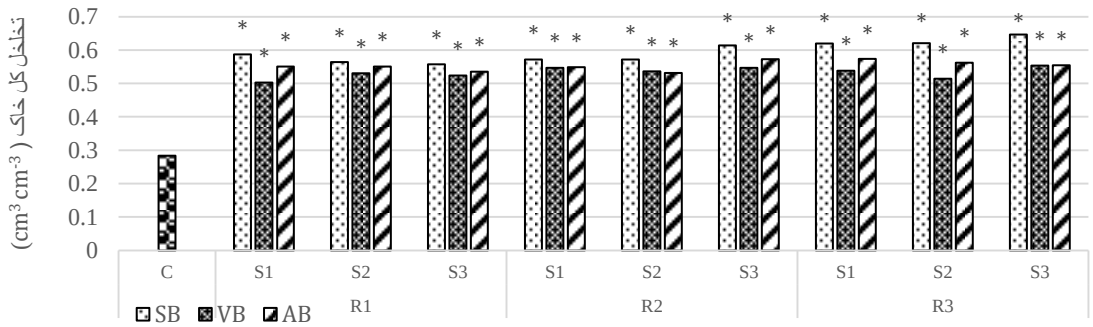
۳٪ با اندازه ذرات mm ۲-۱ مشاهده شد (جدول ۵). در بیوچار ورمی کمپوست در مقادیر ۰/۵٪، ۱/۵٪ و ۳٪ تغییر در اندازه ذرات بیوچار موجب تفاوت معنی‌دار در تخلخل کل خاک شد. در بیوچار ورمی کمپوست بیشترین تخلخل کل در مقدار ۰/۵٪ با اندازه ذرات mm ۲-۱ به دست آمد (جدول ۵). در بیوچار چوب زردآلو در مقدار ۰/۵٪، با افزایش اندازه ذرات از mm ۰/۵> به mm ۱-۰/۵، تخلخل کل تغییر معنی‌داری نکرد ولی با افزایش اندازه ذرات از mm ۱-۰/۵ به mm ۲-۱ تخلخل کل خاک کاهش معنی‌داری داشت. در بیوچار چوب زردآلو در مقدار ۰/۵٪ و ۱/۵٪ با افزایش اندازه ذرات از mm ۰/۵> به mm ۱-۰/۵ میزان تخلخل خاک تغییر معنی‌داری نکرد ولی با افزایش اندازه ذرات از mm ۱-۰/۵ به mm ۲-۱ تخلخل کل خاک کاهش معنی‌داری داشت. در مقدار ۳٪ این بیوچار با افزایش اندازه ذرات میزان تخلخل کل خاک کاهش یافت. در بیوچار چوب زردآلو بیشترین تخلخل کل در مقدار ۳٪ با اندازه ذرات mm ۰/۵> به دست آمد. مقایسه چندگانه میانگین تخلخل کل خاک در تمام تیمارهای موردمطالعه نشان داد که بیشترین تخلخل کل ($۰/۶۹۱۳ cm^3cm^{-3}$) در تیمار بیوچار کاه گندم با مقدار ۳ ٪ و اندازه ذرات mm ۲-۱ (SBR3S3) را در خاک به وجود آورد (شکل ۲ و جدول ۵).

در این تحقیق با افزودن بیوچار به خاک لوم شنی در تمام تیمارهای موردمطالعه در مقایسه با تیمار شاهد میزان تخلخل کل خاک افزایش یافت که دلیل آن را می‌توان به کم بودن چگالی ظاهری بیوچار نسبت داد (جدول ۱). چگالی ظاهری بیوچار از ویژگی‌های فیزیکی بیوچار است که در ترکیب بیوچار- خاک، بر میزان تخلخل خاک تأثیر دارد. هرچه چگالی بیوچار کمتر باشد در یک وزن مشخص، حجم بیوچار اضافه‌شده به خاک بیشتر خواهد بود که این موضوع توزیع اندازه منافذ و نیز تعداد کل منافذ خاک را تغییر می‌دهد (Gamage *et al.*, 2016). نتایج این تحقیق نشان داد که اثر بیوچار در افزایش میزان تخلخل خاک به نوع بیوچار، مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک و اندازه ذرات بیوچار بستگی دارد. در این تحقیق، چگالی بیوچار کاه گندم در مقایسه با بیوچار ورمی کمپوست و چوب زردآلو کمتر است (جدول ۱)، درنتیجه حجم بیوچار گندم اضافه‌شده به خاک نسبت به دو بیوچار دیگر بیشتر بود. به این دلیل هم بیشترین تخلخل خاک در بیوچار گندم با اندازه ذرات mm ۲-۱ با مقدار ۳٪ به دست آمد. از طرف دیگر نتایج این تحقیق نشان داد که اثر تغییر در اندازه ذرات بیوچار بر تخلخل کل خاک بسته به مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک و نیز نوع بیوچار متفاوت بود. در بیوچار کاه گندم با افزایش اندازه ذرات بیوچار در یک مقدار ثابت، تخلخل کل خاک افزایش یافت. دلیل این موضوع این بود که افزایش اندازه ذرات موجب کاهش یکنواختی توزیع اندازه منافذ خاک و در نتیجه، موجب افزایش تخلخل کل خاک شد (de Jesus Duarte et al., 2019). در بیوچار چوب زردآلو شرایط با

جدول ۲: آنالیز واریانس یک‌طرفه تیمارهای موردمطالعه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی

منابع تغییرات	درجه آزادی	تخلخل کل خاک (cm^3cm^{-3})	مقاومت فروروی خاک (MPa)	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)
بلوک	۲	۰/۰۰۰۲۷ ns	۰/۰۰۳۷۷ ns	۰/۰۴۵۶۱ ns
تیمار	۲۷	۰/۰۱۵۹۷	۰/۱۳۳۱۱ **	۰/۰۲۹۳۷ **
خطا	۵۴	۰/۰۰۰۱۵	۰/۰۰۴۷۶	۰/۰۰۵۶۷
ضریب تغییرات	-	۲/۲۰	۷/۲۰	۷/۳۱

**: معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ (P<0.01)، ns: غیر معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ (P<0.01).



شکل ۲: مقایسه میانگین تخلخل کل خاک در تیمارهای مورد مطالعه با شاهد.

***: تفاوت معنی‌دار با شاهد، ns: عدم تفاوت معنی‌دار با شاهد، SB: بیوچار کاه گندم، VB: بیوچار ورمی کمپوست، AB: بیوچار چوب زردآلو. C: شاهد، R1: ۰/۵ ٪، R2: ۱/۵ ٪، R3: ۳ ٪، S1: <۰/۵ mm، S2: ۱ – ۰/۵ mm، S3: ۲ – ۱ mm.**

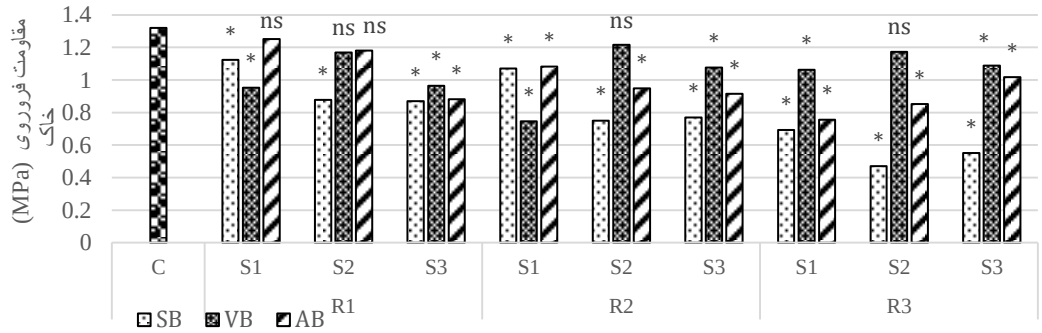
بیوچار کاه گندم متفاوت بود به‌این‌ترتیب که با افزایش اندازه ذرات در یک مقدار ثابت میزان تخلخل کل خاک کاهش می‌یافت. دلیل این امر ریشه در منافذ داخلی بیوچار چوب زردآلو دارد که با کاهش اندازه ذرات بیوچار چوب زردآلو و افزوده شدن منافذ داخلی بیوچار به منافذ خاک، میزان تخلخل کل خاک افزایش می‌یابد (جدول ۴). تحقیقات رزاقی و رضایی (۱۳۹۶) نشان داد که با افزایش مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک، تخلخل خاک بیشتر افزایش می‌یابد که ایشان گزارش کردند که افزودن ۷۵ تن در هکتار بیوچار تهیه‌شده از کاه و کلش گندم سبب افزایش ۱۳ درصدی تخلخل خاک در مقایسه با مقادیر ۲۵ و ۵۰ تن در هکتار همان بیوچار نسبت به تیمار شاهد شد. نتایج این تحقیق با نتیجه تحقیق ایشان هم‌خوانی دارد.

مقاومت فروروی خاک

مقاومت فروروی خاک (PR) یک شاخص دینامیک از میزان فشردگی خاک است که مقاومت خاک در برابر نفوذ ریشه گیاه را شبیه‌سازی می‌کند. در این تحقیق، میزان مقاومت فروروی خاک در تیمار شاهد، ۱/۳۲ MPa بود. اثر تیمارهای موردمطالعه بر تغییر مقاومت فروروی خاک معنی‌دار بود (جدول ۲). به‌طوری‌که غالب تیمارها، کاهش معنی‌دار مقاومت فروروی نسبت به شاهد را سبب شدند. بیشترین کاهش مقاومت فروروی در مقایسه با شاهد (۶۴٪) در بیوچار کاه گندم با اندازه ذرات ۱–۰/۵ میلی‌متر با مقدار ۳٪ (SBR3S2) و کمترین کاهش مقاومت فروروی (۴/۳٪) در مقایسه با شاهد در بیوچار چوب زردآلو با اندازه ذرات mm ۰/۵–۰ با مقدار ۰/۵٪ (ABR1S1) مشاهده شد (شکل ۳).

نتایج متفاوتی از مطالعات تأثیر بیوچار روی مقاومت فروروی خاک گزارش‌شده است. Ahmed و همکاران (2017) گزارش نموده‌اند که با اضافه نمودن بیوچار به خاک، مقاومت فروروی و تنش برشی خاک متراکم شده، کاهش یافت. در برخی از مطالعات انجام‌شده، افزودن بیوچار به خاک تأثیری بر مقاومت فروروی خاک نداشته است (Blanco-Canqui, 2017). نتایج تحقیق حاضر نشان داد که با افزودن بیوچارهای موردمطالعه به خاک، مقاومت فروروی خاک در مقایسه با شاهد کاهش یافت.

در این تحقیق اثرات اصلی و اثرات متقابل فاکتورهای موردمطالعه بر مقاومت فروروی خاک معنی‌دار بود (جدول ۳). بررسی اندازه اثرات ساده و اثرات متقابل مرتبه اول و دوم فاکتورهای موردمطالعه در تغییر تخلخل کل نشان داد که نوع بیوچار (BT)، مقدار بیوچار (BR) و نوع بیوچار در اندازه بیوچار (BT×BS) به ترتیب ۲۷/۱۳٪، ۱۲/۵۴٪ و ۱۶/۷٪ در تغییر تخلخل کل خاک



شکل ۳: مقایسه میانگین مقاومت فروروی خاک در تیمارهای موردمطالعه با شاهد.

*: تفاوت معنی‌دار با شاهد، ns: عدم تفاوت معنی‌دار با شاهد، SB: بیوچار کاه گندم، VB: بیوچار ورمی کمپوست، AB: بیوچار چوب زردآلو. C: شاهد، R1: ۰/۵ ٪، R2: ۱/۵ ٪، R3: ۳ ٪، S1: <۰/۵ mm، S2: ۱ mm – ۰/۵، S3: ۲ mm – ۱.

جدول ۳: تجزیه واریانس نتایج ویژگی‌های موردمطالعه بعد از افزودن بیوچار به خاک

منابع تغییرات	درجه آزادی	تخلخل کل خاک ($cm^3\ cm^{-3}$)		مقاومت فروروی خاک (MPa)		میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)	
		میانگین مربعات	اندازه اثر	میانگین مربعات	اندازه اثر	میانگین مربعات	اندازه اثر
بلوک	۲	۰/۰۰۰۱۴^{ns}	۰/۲۰	۰ /۰۰۳۹۱ ^{ns}	۰/۲۳	۰ /۰۴۷۲۹^{ns}	۸/۵۱
نوع بیوچار (BT)	۲	۰/۰۳۶۱**	۵۲/۵۵	۰ /۴۶۸۳۳ **	۲۷/۱۳	۰ /۰۰۱۹۴^{ns}	۰/۳۵
مقدار بیوچار (BR)	۲	۰/۰۱۰۰۳**	۱۴/۶۰	۰ /۲۱۶۴۳ **	۱۲/۵۴	۰ /۰۲۳۳۱*	۴/۲۰
اندازه ذرات بیوچار (BS)	۲	۰/۰۰۲۲**	۳/۲۱	۰ /۰۳۴۹۹ **	۲/۰۳	۰ /۰۰۵۰۵^{ns}	۰/۹۱
(BR) × (BT)	۴	۰/۰۰۱۵۶**	۴/۵۳	۰ /۰۴۳۹۵ **	۵/۰۹	۰ /۰۱۲۵۴^{ns}	۴/۵۲
(BS) × (BT)	۴	۰/۰۰۴۲۶**	۱۲/۴۰	۰ /۱۴۴۵۳ **	۱۶/۷۵	۰ /۰۲۴۶۳**	۸/۸۷
(BS) × (BR)	۴	۰/۰۰۰۶**	۱/۷۵	۰ /۱۶۴۸۸ **	۱۹/۱۱	۰ /۰۴۱۴۱**	۱۴/۹۱
(BS) ×(BR) × (BT)	۸	۰/۰۰۰۸۵**	۴/۹۶	۰ /۰۴۱۸۱ **	۹/۶۹	۰ /۰۴۲۳۲**	۳۰/۴۷
خطا	۵۲	۰/۰۰۰۱۴^{ns}	-	۰ /۰۰۳۹۱	-	۰ /۰۰۵۸۳	-

**: معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ ($p<0.01$)، ns: غیر معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ ($p<0.01$)، اندازه اثر: نسبت مجذور مربعات فاکتور موردمطالعه به مجذور مربعات کل ضرب‌در ۱۰۰.

سهم داشتند (جدول ۳). برش دهی اثر متقابل BR×BS بر اساس نوع بیوچار نشان داد که اثر تغییر در اندازه بیوچار در یک مقدار ثابت بر مقاومت فروروی خاک در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۳).

تغییر در مقاومت فروروی خاک با افزایش اندازه ذرات خاک در یک مقدار ثابت در بیوچارهای مختلف از الگوی مشخصی تبعیت نکرد (شکل ۳ و جدول ۴). یافته‌ها نشان داد که مقاومت فروروی خاک در مقادیر مختلف یک نوع بیوچار، تحت تأثیر اندازه ذرات بیوچار و مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک قرار گرفت. کمترین مقاومت فروروی خاک در بیوچار کاه گندم در مقدار ۳٪ با اندازه ذرات ۱–۰/۵ mm، در بیوچار ورمی کمپوست در مقدار ۱/۵٪ با اندازه ذرات <۰/۵ mm و در بیوچار چوب زردآلو در مقدار ۳٪ با اندازه ذرات <۰/۵ mm، خاک مشاهده شد. این یافته ما با نتیجه مطالعه Obia و همکاران (۲۰۱۷) مبنی بر مستقل بودن کاهش مقاومت فروروی خاک لوم شنی از اندازه ذرات بیوچار چوب ذرت، یکسان نیست.

در این تحقیق، تیمارهای بیوچار ورمی کمپوست در مقادیر و اندازه‌های یکسان، در مقایسه با تیمارهای بیوچار کاه گندم و چوب زردآلو، اثر کمتری در کاهش مقدار مقاومت فروروی خاک داشتند در بین تمام تیمارهای موردمطالعه کمترین مقدار مقاومت فروروی خاک در بیوچار کاه گندم با مقدار ۳٪ و اندازه ذرات ۲–۱ mm بود که با سایر تیمارهای موردمطالعه تفاوت معنی‌داری داشتند (جدول ۵).

جدول ٤: برش دهی واریانس اثر مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار (BR×BS)
در هر سطح از نوع بیوچار (BT) برای ویژگی‌های موردمطالعه خاک

نوع بیوچار	درجه آزادی	تخلخل کل (cm^3cm^{-3})	مقاومت فروروی خاک (MPa)	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)
		میانگین مربعات		
کاه گندم	۸	۰/۰۳۳۲۸ **	۰/۱۴۰۱۷۰ **	۰/۰۳۴۷۵۰ **
ورمی کمپوست	۸	۰/۰۰۱۲۰ ns	۰/۰۶۳۱۶۲ **	۰/۰۲۰۸۳۷ **
چوب زردآلو	۸	۰/۰۲۲۴۲**	۰/۰۷۸۰۱۵ **	۰/۰۳۳۱۰۸ **

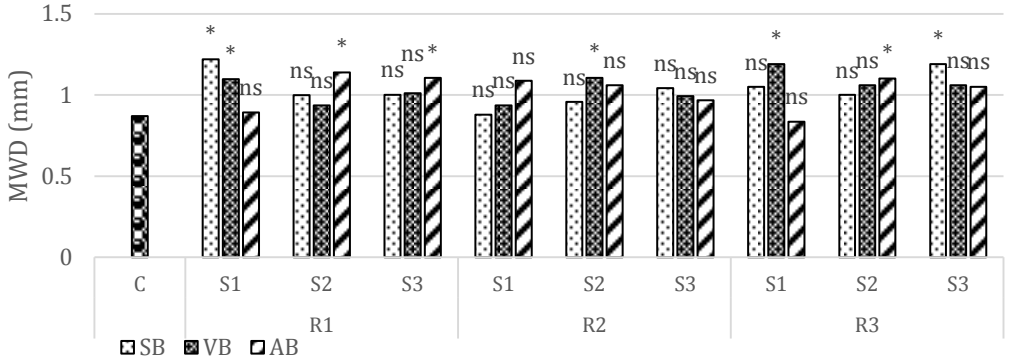
**: معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ ($p<0.01$)، ns: غیر معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ ($p<0.01$)،

اثر بیوچار بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

۹۰ روز پس از افزودن بیوچار به خاک لوم شنی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) در تیمار شاهد، ۰/۸۷ میلی‌متر بود. اثر تیمارها در تغییر MWD معنی‌دار بود (جدول ۲). بررسی نتایج نشان داد که در تعداد معدودی از تیمارهای موردمطالعه، MWD نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافت (شکل ۴). بیشترین افزایش MWD نسبت به شاهد در بیوچار کاه گندم با مقدار ۰/۵٪ و با اندازه mm ۰/۵> (SBR1S1) به میزان ۴۰٪ مشاهده شد (شکل ۴).

تجزیه واریانس نتایج میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) نشان داد که اثر اصلی نوع بیوچار و اثرات متقابل نوع بیوچار در اندازه ذرات بیوچار، اندازه ذرات بیوچار در مقدار بیوچار و نوع بیوچار در مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار بر MWD معنی‌دار بودند (جدول ۳). بررسی سهم اثرات اصلی و اثرات متقابل فاکتورهای موردمطالعه در تغییر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خشک نشان داد که اثرات مشترک نوع بیوچار در مقدار بیوچار در اندازه بیوچار (BT×BR×BS)، مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار (BR×BS) و نیز نوع بیوچار در اندازه ذرات بیوچار (BT×BR) در تغییرات میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به ترتیب ۳۰/۴۷٪، ۱۴/۹۱٪ و ۸/۸۷٪ سهم داشتند (جدول ۳). برش دهی اثر متقابل نوع بیوچار در مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار در سطح نوع بیوچار نشان داد که اثر مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار در هرکدام از سطوح نوع بیوچارهای موردمطالعه در این تحقیق معنی‌دار بودند (جدول ۴).

مقایسه میانگین MWD در سطح نوع بیوچار نشان داد که در بیوچار کاه گندم، در مقدار ۰/۵٪ با افزایش اندازه ذرات بیوچار میزان MWD کاهش معنی‌داری داشت ولی با افزایش اندازه ذرات آن بیوچار از mm ۱–۰/۵ به mm ۲–۱، میزان MWD تغییر معنی‌داری نکرد. در مقدار ۱/۵٪ بیوچار کاه گندم با افزایش اندازه ذرات میزان MWD افزایش معنی‌داری داشت. در مقدار ۳٪ بیوچار کاه گندم، با افزایش اندازه ذرات از mm ۰/۵> به mm ۱–۰/۵، میزان MWD تغییر معنی‌داری نداشت ولی با افزایش اندازه ذرات این بیوچار از mm ۱–۰/۵ به mm ۲–۱ میزان MWD افزایش معنی‌داری داشت. در بیوچار کاه گندم بزرگ‌ترین MWD در مقدار ۰/۵٪ با اندازه ذرات mm ۰/۵> مشاهده شد که با MWD در مقدار ۳٪ با اندازه ذرات mm ۱–۰/۵ یکسان بود. در بیوچار ورمی کمپوست در مقدار ۰/۵٪ با افزایش اندازه ذرات از mm ۰/۵> به mm ۱–۰/۵ میزان MWD کاهش معنی‌داری داشت ولی با افزایش اندازه ذرات از mm ۱–۰/۵ به mm ۲–۱ میزان MWD تغییر معنی‌داری نکرد. در مقدار ۱/۵٪ بیوچار ورمی کمپوست، با افزایش اندازه ذرات از mm ۰/۵> به mm ۱–۰/۵ میزان MWD افزایش معنی‌داری داشت ولی با افزایش اندازه ذرات از mm ۱–۰/۵ به mm ۲–۱ در آن مقدار بیوچار میزان MWD کاهش معنی‌داری داشت. در بیوچار ورمی کمپوست بزرگ‌ترین MWD



شکل ٤: مقایسه میانگین MWD (میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها) در تیمارهای موردمطالعه با شاهد.

*: تفاوت معنی‌دار با شاهد، ns: عدم تفاوت معنی‌دار با شاهد، SB: بیوچار کاه گندم، VB: بیوچار ورمی کمپوست، AB: بیوچار چوب زردآلو.
C: شاهد، R1: ۰/۵ ٪، R2: ۱/۵ ٪، R3: ۳ ٪، S1: <۰/۵ mm، S2: ۱ – ۰/۵ mm، S3: ۲ – ۱ mm.

در مقدار ۳٪ با اندازه ذرات <۰/۵ mm این نوع بیوچار مشاهده شد. در بیوچار چوب زردآلو در مقادیر ۰/۵٪ و ۳٪ با افزایش اندازه ذرات از <۰/۵ mm به ۱–۰/۵ mm میزان MWD افزایش معنی‌داری داشت ولی با افزایش اندازه ذرات از ۱–۰/۵ mm به ۲–۱ mm میزان MWD کاهش معنی‌داری داشت. در مقدار ۳٪ با افزایش اندازه ذرات این بیوچار مقدار MWD افزایش معنی‌داری پیدا کرد و بزرگ‌ترین MWD در مقدار ۰/۵٪ و اندازه ذرات ۱–۰/۵ mm مشاهده شد (جدول ۵).

مقایسه میانگین چندگانه اثر نوع بیوچار در مقدار بیوچار در اندازه بیوچار بر میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) نشان داد که در بین تمام تیمارهای موردمطالعه بزرگ‌ترین میانگین وزنی خاکدانه‌ها در تیمارهای بیوچار گندم با مقدار ۳٪ و اندازه ذرات ۲–۱ mm و بیوچار گندم با مقدار ۰/۵٪ با اندازه ذرات <۰/۵ mm مشاهده شد (جدول ۵).

پایداری خشک خاکدانه‌ها، یکی از شاخص‌های مهم توسعه ساختمان خاک بوده و ویژگی‌هایی مانند فرسایش‌پذیری خاک در برابر باد و ایجاد سله در سطح خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که افزودن بیوچار به خاک اثر متفاوتی بر پایداری خاکدانه‌های خشک داشته است. به‌طوری‌که اضافه کردن بیوچار به خاک‌های با بافت شنی در مقایسه با بافت‌های لوم شنی و لوم سیلتی، اثر کمتری در پایداری خاکدانه‌های خشک داشته است. نسیمی و همکاران (۱۳۹۸) گزارش کردند که افزودن بیوچار تهیه‌شده از برگ خرما موجب افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها تعیین‌شده با روش الک خشک و تر به ترتیب پس از سپری شدن یک و نه ماه از افزودن بیوچار به خاک شد. Liu و همکاران (2012) گزارش نموده است که با افزودن بیوچار به خاک، پایداری خاکدانه‌های خشک در خاکی که میزان شن آن بیشتر از ۱۷/۳٪ بود، افزایش نیافت ولی در خاکی با میزان شن ۷/۹٪، پایداری خاکدانه‌های خشک افزایش یافت. مطالعات نشان داده است که نوع و مقدار بیوچار اضافه شده به خاک نیز بر پایداری خاکدانه‌ها تأثیر دارد. ابریشم‌کش و همکاران (۱۳۹۹) گزارش کردند که افزودن بیوچار تهیه‌شده از چوب‌های حاصل از هرس درخت زبان‌گنجشک و شلتوک برنج در مقدار ۰/۷ و ۱/۴ درصد به خاک لومی موجب شد که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با بیشتر شدن مقدار بیوچار افزایش یابد و تأثیر بیوچار چوب زبان‌گنجشک بیشتر از بیوچار شلتوک برنج بود و بیشترین افزایش پایداری خاکدانه‌ها در مقدار ۱/۷ درصد مشاهده شد. این در حالی بود که همان مقدار بیوچار تأثیر معنی-

داری بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در خاک لوم شنی نداشت. ایشان وجود رس زیاد در خاک را تکمیل‌کننده اثر بیوچار بر افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها معرفی کرده و کم بودن میزان رس در بافت لوم شنی را دلیل عدم تأثیر بیوچار بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها دانسته‌اند. Blanco-Canqui (2017) با مرور کارهای انجام‌شده قبلی، گزارش نموده است که در غالب مطالعات آن‌ها، بیوچار موجب افزایش پایداری خاکدانه‌ها شده است، اما در برخی از آن‌ها، افزودن بیوچار اثر معنی‌داری بر پایداری خاکدانه‌ها نداشته است.

جدول ۵: مقایسه میانگین تخلخل کل، مقاومت فروروی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها.

نوع بیوچار	مقدار بیوچار (٪)	اندازه ذرات بیوچار (mm)	تخلخل کل خاک (cm^3cm^{-3})	مقاومت فروروی خاک (MPa)	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)
بیوچار کاه گندم	۰/۵	<۰/۵	۰ /۵۸۷ d(D)	۱ /۱۲۳۷ a(BCDE)	۱ /۲۲ a(A)
		۰/۵–۱	۰ /۵۷۰۳ de(DEFG)	۰ /۸۷۷ b(IJ)	۰ /۹۹۹۳ b(DEFGHI)
		۱–۲	۰ /۵۵۸۳ e(EFGHI)	۰ /۸۷ bc(IJK)	۱ /۰۰۱۳ b(DEFGHI)
	۱/۵	<۰/۵	۰ /۵۷۲ de(DEF)	۱ /۰۷۱ a(CDEF)	۰ /۸۷۸۷ c(IJ)
		۰/۵–۱	۰ /۵۷۲ de(DEF)	۰ /۷۴۹۷ cd(LM)	۰ /۹۵۶۷ bc(FGHIJ)
		۱–۲	۰ /۶۱۴۳ c(C)	۰ /۷۶۹۳ bcd(JKLM)	۱ /۰۴۳ b(CDEFG)
	۳	<۰/۵	۰ /۶۴۴۷ b(B)	۰ /۶۹۳۳ d(M)	۱ /۰۴۹۳ b(CDEFG)
		۰/۵–۱	۰ /۶۲۱ c(C)	۰ /۴۷۰۷ e(N)	۱ b(DEFGHI)
		۱–۲	۰ /۶۹۱۳ a(A)	۰ /۵۵۲ e(N)	۱ /۱۹ a(AB)
بیوچار ورمی کمپوست	۰/۵	<۰/۵	۰ /۵۰۳ d(O)	۰ /۹۵۳ d(GHI)	۱ /۰۹۶۷ ab(ABCD)
		۰/۵–۱	۰ /۵۳۰۳ abc(LMN)	۱ /۱۶۹۳ ab(ABCD)	۰ /۹۳۵۷ c(GHIJ)
		۱–۲	۰ /۵۲۴۳ bcd(MN)	۰ /۹۶۵۳ cd(FGHI)	۱ /۰۱ bc(DEFGH)
	۱/۵	<۰/۵	۰ /۵۴۰۷ ab(IJKLM)	۰ /۷۴۶۳ e(LM)	۰ /۹۳۵۳ c(GHIJ)
		۰/۵–۱	۰ /۵۳۷ abc(JKLM)	۱ /۲۱۷ a(AB)	۱ /۱۰۵۷ ab(ABCD)
		۱–۲	۰ /۵۴۷۷ ab(HIJKL)	۱ /۰۷۶ bc(CDEF)	۰ /۹۹۳۷ bc(DEFGHI)
	۳	<۰/۵	۰ /۵۳۸۳ abc(IJKLM)	۱ /۰۶۳۷ bcd(DEFG)	۱ /۱۸۹۷ a(AB)
		۰/۵–۱	۰ /۵۱۴ cd(NO)	۱ /۱۷۳ ab(ABCD)	۱ /۰۶۱ abc(CDEF)
		۱–۲	۰ /۵۵۳۷ a(FGHIJ)	۱ /۰۸۹ b(CDE)	۱ /۰۶ abc(CDEFG)
بیوچار چوب زردآلو	۰/۵	<۰/۵	۰ /۵۵۱ bc(GHIJK)	۱ /۲۵۲۳ a(A)	۰ /۸۹۲۷ cd(HIJ)
		۰/۵–۱	۰ /۵۵۱۳ bc(GHIJK)	۱ /۱۸۱۷ ab(ABC)	۱ /۱۳۹۷ a(ABC)
		۱–۲	۰ /۵۳۶ cd(JKLM)	۰ /۸۸۲۳ ef(IJ)	۱ /۱۰۵۳ a(ABCD)
	۱/۵	<۰/۵	۰ /۵۴۹ bcd(HIJKL)	۱ /۰۸۳۳ bc(CDE)	۱ /۰۸۶۷ a(BCDE)
		۰/۵–۱	۰ /۵۳۲۳ d(KLMN)	۰ /۹۴۹ de(GHI)	۱ /۰۶ ab(CDEFG)
		۱–۲	۰ /۵۷۳ a(DEF)	۰ /۹۱۴۳ de(HI)	۰ /۹۶۶۷ bc(EFGHI)
	۳	<۰/۵	۰ /۵۷۴ a(DE)	۰ /۷۵۵۳ f(KLM)	۰ /۸۳۴۷ d(J)
		۰/۵–۱	۰ /۵۶۳ ab(EFGH)	۰ /۸۵۲۳ ef(IJKL)	۱ /۱۰۱۷ a(ABCD)
		۱–۲	۰ /۵۵۴۷ b(EFGHIJ)	۱ /۰۱۸۳ cd(EFGH)	۱ /۰۵۰۷ ab(CDEFG)

-حروف کوچک: مقایسه میانگین ویژگی‌های موردمطالعه در سطح نوع بیوچار، -حروف بزرگ داخل پرانتز: مقایسه میانگین چندگانه ویژگی‌های موردمطالعه، -میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری ندارند.

Gamage و همکاران (2016) گزارش کردند که در خاک‌های لوم شنی در تیمارهای با مقادیر کمتر از ۱٪ بیوچار با مقدار افزایش بیوچار، پایداری خاکدانه‌های خشک به‌صورت خطی افزایش یافت و در خاک‌های شنی افزایش در پایداری خاکدانه‌های خشک، صرفاً در مقدار ۱٪ مشاهده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش پایداری خاکدانه‌های خشک در تیمارهای بیوچار گندم بیشتر از دو بیوچار دیگر بود که این یافته در این تحقیق با نتایج گزارش‌شده Burrell و همکاران (2016) یکسان بود. نیز انتظار می‌رود که بیوچار اضافه‌شده به خاک به‌عنوان هسته یک خاکدانه (همانند ذرات مواد آلی یا میکروارگانیسم‌ها) عمل نموده و خاکدانه سازی در خاک را افزایش دهد. افزایش ماده آلی اضافه‌شده به خاک از طریق ریشه و موسیلاژ میکروبی، از دیگر نتایج افزودن بیوچار به خاک است که موجب افزایش خاکدانه سازی در خاک می‌گردد (Gorovtsov et al., 2019).

افزایش پایداری خاکدانه‌های خشک علاوه بر مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک، به اندازه ذرات بیوچار هم‌بستگی دارد. به‌طوری‌که بررسی میانگین وزنی خاکدانه‌های خشک نشان داد که اثر بیوچار گندم با اندازه ذرات mm ۰/۵> در مقدار ۰/۵٪ بر تشکیل خاکدانه‌ها درشت بیشتر بود. به نظر می‌رسد که ذرات ریز بیوچار از طریق پیوند یا برهم‌کنش با ذرات خاک، در مقادیر کمتر بر پایداری خاکدانه‌های خشک مؤثر هستند ولی ذرات درشت همان نوع بیوچار در مقادیر بیشتر بیوچار اثر مثبتی بر پایداری خاکدانه‌های خشک (در بازه زمانی ۹۰ روزه) ندارند.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن بیوچارهای تهیه‌شده از کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو موجب کاهش مقاومت فروروی خاک و نیز افزایش تخلخل کل خاک و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) شد. در یک بیوچار مشخص، اثر تغییر در اندازه ذرات بیوچار بر ویژگی‌های موردمطالعه، به مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک و نوع ویژگی مورد نظر خاک بستگی داشت. بیشترین تخلخل کل خاک در بیوچار کاه گندم در مقدار ۳٪ با اندازه ذرات ۲-۱ میلی‌متر، در بیوچار ورمی کمپوست در مقدار ۰/۵٪ با اندازه ذرات ۲-۱ میلی‌متر و در بیوچار چوب زردآلو در مقدار ۳٪ با اندازه ذرات mm ۰/۵> به دست آمد. کمترین مقاومت فروروی خاک در بیوچار کاه گندم در مقدار ۳٪ با اندازه ذرات ۱/۵٪، در بیوچار ورمی کمپوست در مقدار ۱/۵٪ با اندازه ذرات mm ۰/۵> و در بیوچار چوب زردآلو در مقدار ۳٪ با اندازه ذرات mm ۰/۵>، خاک مشاهده شد. بزرگ‌ترین MWD در بیوچار کاه گندم در مقدار ۰/۵٪ با اندازه ذرات ۰/۵٪ مشاهده شد که با MWD در مقدار ۳٪ با اندازه ذرات mm ۱-۰/۵ آن بیوچار یکسان بود. در بیوچار ورمی کمپوست بزرگ‌ترین MWD در مقدار ۳٪ با اندازه ذرات mm ۰/۵> این نوع بیوچار و در بیوچار چوب زردآلو، بزرگ‌ترین MWD در مقدار ۱/۵٪ و اندازه ذرات mm ۱-۰/۵ مشاهده شد. در بین تمام تیمارهای مورد مطالعه، بیشترین تخلخل کل، کمترین مقاومت فروروی خاک و در تیمار بیوچار کاه گندم به ترتیب در مقدار ۳ ٪ با اندازه mm ۲-۱ و مقدار ۳٪ با اندازه ذرات mm ۱-۰/۵ و بزرگ‌ترین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خشک در تیمار بیوچار کاه گندم در مقدار ۰/۵ ٪ با اندازه ذرات mm ۰/۵> مشاهده شد. با توجه به نتایج این تحقیق، برای افزایش اثربخشی کاربرد بیوچار در اصلاح خاک‌های آهکی مناطق نیمه‌خشک، باید بیوچار با ویژگی‌های مناسب انتخاب شود.

منابع مورد استفاده

ابریشم‌کش، س.، فاضلی سنگانی، م.، رمضان پور، ح.، نوروزی، م.، شعبانی ع. ۱۳۹۹. اثر کاربرد سوسپانسیون بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی دو خاک حساس به فرسایش. پژوهش‌های فرسایش محیطی. ۱۰ (۱) :۵۸-۷۸.

بهنام، ه.، فرخیان فیروزی، ا.، معزی، ع. ۱۳۹۵. تأثیر بیوچار و کمپوست باگاس نیشکر بر برخی ویژگی‌های مکانیکی خاک. مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک. ۲۳(۴):۲۵۰-۲۳۰.

رزاقی، ف. و رضایی، ن. ۱۳۹۶. اثر سطوح مختلف بیوچار بر خواص فیزیکی خاک با بافت‌های مختلف. حفاظت منابع آب‌وخاک، ۷ (۱): ۷۵-۸۷.

سلطانی محمدی، ا.، خدا رحمی، ی.، برومنئ نصب، س. و ناصری، ع. ۱۳۹۸. ارزیابی تأثیر بیوچار اصلاح‌شده و زئولیت بر برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک لوم. حفاظت منابع آب‌وخاک، ۸ (۴): ۱۰۲-۸۷.

قربانی دشتکی، ش.، توژی، م.، متقیان، ح.، و قاسمی، ا. (۱۳۹۹). تأثیر زغال‌های زیستی چوب گردو و پوست سبز میوه گردو بر وضعیت نگهداشت آب در یک خاک شنی. تحقیقات کاربردی خاک. ۸ (۴): ۵۶-۴۴.

قربانی، م.، و امیر احمدی، ا .۱۳۹۷. اثر بیوچار پوسته برنج بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک و رشد ذرت در یک خاک لومی. پژوهش‌های خاک،۳(۳): ۳۱۸-۳۰۵.

محمدی، ن.، و خادم الرسول، ع. ۱۳۹۹. بررسی اثر زغال زیستی و زئوپلانت بر ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های آلوده به مواد نفتی در میدان نفتی اهواز. پژوهش‌های خاک. ۳۴ (۳)، ۴۱۸-۴۰۷.

نسیمی، پ.، کریمی، ا.، و متقیان، ح. ۱۳۹۸. اثرات بیوچار برگ خرما بر هدایت هیدرولیکی اشباع و ضرایب رطوبتی خاک لوم رسی شنی. مجله پژوهش آب ایران، ۱۳ (۳): ۱۶۱-۱۷۱.

Abdelfattah, M. A. 2013. Pedogenesis, land management and soil classification in hyper-arid environments: results and implications from a case study in the United Arab Emirates. Soil Use and Management, 29(2): 279-294.

Ahmed, A., Gariepy, Y., and Raghavan, V. 2017. Influence of wood-derived biochar on the compactibility and strength of silt loam soil. International Agrophysics. 31(2): 149-155.

Bhatt, B., Chandra, R., Ram, S., and Pareek, N. 2016. Long-term effects of fertilization and manuring on productivity and soil biological properties under rice (*Oryza sativa*)–wheat (*Triticum aestivum*) sequence in Mollisols. Archives of Agronomy and Soil Science. 62(8): 1109-1122.

Blanco-Canqui, H. 2017. Biochar and soil physical properties. Soil Science Society of America Journal, 81(4): 687-711.

Burrell, L. D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B., and Soja, G. 2016. Long-term effects of biochar on soil physical properties. Geoderma. 282: 96-102.

De Jesus Duarte, S., Glaser, B., and Pellegrino Cerri, C. E. 2019. Effect of biochar particle size on physical, hydrological and chemical properties of loamy and sandy tropical soils. Agronomy. 9(4): 165.

Definition I. S. P. 2015. Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil (aka IBI Biochar Standards), Version 2.1.

Gamage, D. V., Mapa, R. B., Dharmakeerthi, R. S., and Biswas, A. 2016. Effect of rice-husk biochar on selected soil properties in tropical Alfisols. Soil Research. 54(3): 302-310.

Ghorbani, M., Asadi, H., and Abrishamkesh, S. 2019. Effects of rice husk biochar on selected soil properties and nitrate leaching in loamy sand and clay soil. International soil and water conservation research. 7(3): 258-265.

Gorovtsov, A. V., Minkina, T. M., Mandzhieva, S. S., Perelomov, L. V., Soja, G., Zamulina, I. V., Rajputa D.V, Sushkova N.S.,Mohan D. and Yao, J. 2019. The mechanisms of biochar interactions with microorganisms in soil. Environmental geochemistry and health. 1-24.

Gupta, M., Yang, J., and Roy, C. 2002. Density of softwood bark and softwood char: procedural calibration and measurement by water soaking and kerosene immersion method. Fuel, 81(10): 1379-1384.

Herrick, J. E., and Jones, T. L. 2002. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. Soil Science Society of America Journal,.66(4): 1320-1324.

Jones Jr, J. B. (Ed.). 1999. Soil analysis handbook of reference methods. CRC Press, 382pp.

Kirkham M.B. 2005. Principles of soil and plant water relations. Elsevier Academic Press, 500pp.

Lehmann, J., and Joseph, S., 2015. Biochar for environmental management. Science, technology and implementation. Routledge.

Liu, Q., Liu, B., Zhang, Y., Lin, Z., Zhu, T., Sun, R., Wang, X., Ma, J., Bei, Q., Liu, G., Lin, X., and Xie, Z. 2017. Can biochar alleviate soil compaction stress on wheat growth and mitigate soil N2O emissions? Soil Biology and Biochemistry. 104: 8-17.

Liu, X. H., Han, F. P., and Zhang, X. C. 2012. Effect of biochar on soil aggregates in the loess plateau: results from incubation experiments. International Journal Agricultural Biology. 14: 975–979.

Obia, A., Børresen, T., Martinsen, V., Cornelissen, G., and Mulder, J. 2017. Effect of biochar on crust formation, penetration resistance and hydraulic properties of two coarse-textured tropical soils. Soil and Tillage Research. 170: 114-121.

Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A. R., and Lehmann, J. 2012. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. Biology and Fertility of Soils. 48(3): 271-284.

Xiao Q., Zhu L. X., Zhang H. P., Li, X. Y., Shen Y. F., and Li S. Q. 2016. Soil amendment with biochar increases maize yields in a semi-arid region by improving soil quality and root growth. Crop and Pasture Science. 67(5): 495-507.

ISSN 2251-7480

Effect of Type, Amount and Biochar Particles Size on Porosity, Penetration Resistance and Stability of Aggregates in a Calcareous Soil

Hassan Osooli [1*], Ahmad Karimi[2], Hossein Shirani[3] and Sayyed Hassan Tabatabaei[4]

1) PhD candidate, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
2) Assistant Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
3) Professor, department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.
4) Associate Professor, Department of irrigation engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
*Corresponding author email: osoolih@gmail.com

Received: 02-06-2021 Accepted: 20-09-2021

Abstract

Recently, biochar has been considered as a soil conditioner. In research, the effect of the type and amount of biochar on soil properties has been emphasized. This field study was conducted to investigate the combined effect of type, amount and size of biochar particles on total porosity (TP), penetration resistance (PR), mean weight diameter of aggregates (MWD) in a sandy loam texture. A Factorial experiment was performed as a randomized complete block design with three factors of type, amount and biochar particles size in three replications. Wheat straw, vermicompost and apricot firewood biochar were added to the soil in 0.5, 1.5 and 3% and particle sizes of 0.5, 0.5-1 and 1-2 mm. All three biochar increased TP significantly and decreased PR significantly compared to control. Biochar type had the largest contribution in TP and PR changes. The highest TP was obtained in wheat straw biochar treatment with 3% and particle size of 1-2 mm. The greatest decrease in PR was observed in wheat straw biochar with a value of 3% and a particle size of 0.5-1 mm. Interaction of type, amount and size of biochar particles had the largest contribution in MWD change. The largest MWD (1.22 mm) was observed in wheat straw biochar with biochar amount of 0.5% and particle size of 0.5 mm. The results showed that the amount and size of biochar particles had different effects on soil properties depending on the type of biochar.

Keywords: Biochar particle size, Calcareous soil, Mean weight diameter of aggregates, Soil physical properties

Vol. 11, No. 1, Autumn 2021

10.30495/WSRCJ.2021.18548