

آثار کاربرد بیوچار بر سرعت نفوذ آب به خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای خاک لوم

شنی

حسن اصولی^{۱*}، احمد کریمی^۲، سید حسن طباطبائی^۳ و حسین شیرانی^۴

چکیده

مطالعات کمی در زمینه اثر بیوچار بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌های مناطق نیمه‌خشک در شرایط مزرعه انجام شده است. این پژوهش در مقیاس مزرعه‌ای با هدف بررسی اثر سه نوع بیوچار و مقدار آن و اندازه ذرات بیوچار بر متوسط سرعت نفوذ آب در خاک (i_{ave}) و هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{fs}) در یک خاک با بافت لوم شنی انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه فاکتور شامل فاکتور اول نوع بیوچار (کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو)، فاکتور دوم مقدار بیوچار (۰/۵، ۱/۵ و ۳ درصد وزنی) و فاکتور سوم اندازه ذرات بیوچار (۰/۵-۱، ۱-۲ و ۲-۳ میلی‌متر) هر کدام در سه سطح و در سه تکرار اجرا شد. در هر تکرار، یک کرت بدون بیوچار (شاهد) در نظر گرفته شد. نفوذ تجمعی و هدایت هیدرولیکی با روش تک‌استوانه اندازه‌گیری و متوسط سرعت نفوذ با کمک معادله کوستیاکوف-لوییس تعیین شد. اثر تیمارهای مورد مطالعه بر i_{ave} و K_{fs} معنی‌دار ($P < 0/05$) بود. نتایج نشان داد که i_{ave} در تیمارهای بیوچار با مقادیر متوسط و زیاد و با اندازه ذرات درشت نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری ($P < 0/05$) داشت. در بیوچارهای مورد مطالعه، بسته به نوع بیوچار، اثر مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار بر متوسط سرعت نفوذ یکسان نبود. در تیمارهای بیوچار کاه گندم و ورمی کمپوست، بیشترین i_{ave} در اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر این بیوچارها به ترتیب در مقادیر ۳ درصد و ۱/۵ درصد و در بیوچار چوب زردآلو، بیشترین i_{ave} در مقدار ۰/۵ درصد و اندازه ذرات ۱-۰/۵ به دست آمد. در بین تمام تیمارها، بیشترین i_{ave} در بیوچار ورمی کمپوست با مقدار ۱/۵ درصد و اندازه ذرات ۱-۲ میلی‌متر برابر با ۰/۲۶۱۵ متر در ساعت بود. بیشترین K_{fs} در بیوچارهای کاه گندم و ورمی کمپوست در مقدار ۰/۵ درصد و اندازه ذرات ۱-۰/۵ میلی‌متر و در بیوچار چوب زردآلو در مقدار ۰/۵ درصد و اندازه ذرات ۱-۰/۵ میلی‌متر مشاهده شد. در بین تمام تیمارها، بیشترین K_{fs} در تیمار بیوچار کاه گندم با مقدار ۰/۵ درصد و اندازه ذرات ۱-۰/۵ میلی‌متر (۰/۰۲۵۶ سانتی‌متر در ثانیه) مشاهده شد. از نتایج به دست آمده می‌توان چنین استنباط کرد که برای به دست آوردن نتیجه مطلوب، از افزودن بیوچار بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، باید در انتخاب بیوچار به نوع، مقدار و اندازه ذرات بیوچار توجه شود.

واژه‌های کلیدی: اصلاح خاک، اندازه ذرات بیوچار، مقدار بیوچار، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک.

ارجاع: اصولی ح. کریمی ا. طباطبائی س. ح. و شیرانی ح. ۱۴۰۱. آثار کاربرد بیوچار بر سرعت نفوذ آب به خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای خاک لوم شنی. مجله پژوهش آب ایران. ۴۴: ۱۰۳-۱۱۲. DOI: <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.10110.2365>

۱- دانشجوی سابق دکتری علوم خاک (گرایش فیزیک و حفاظت خاک) گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه شهرکرد.

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۴- استاد گروه علوم خاک دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان.

* نویسنده مسئول osoolih@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۲

مقدمه

کمبود شدید آب در کشور و وقوع خشکسالی‌های متوالی سبب شده‌است که ارتقای بهره‌وری و بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی، به یکی از مهم‌ترین چالش‌های امروز تبدیل شود. در هر بارندگی، تنها قسمتی از نزولات مورد استفاده قرار می‌گیرد که با عنوان بارندگی مؤثر شناخته می‌شود و بقیه آن از راه‌های مختلف، مانند تبخیر، رواناب و عبور از ناحیه ریشه از دسترس گیاه خارج می‌شود.

نفوذ آب در خاک یک فرایند مهم در چرخه آب بوده و ویژگی‌های سطح خاک و داخل خاک رخ از عواملی هستند که نفوذ آب در خاک، تولید روان‌آب و حرکت آب در خاک را تعیین می‌کنند. اصلاح ویژگی‌های ذکرشده موجب افزایش ورود آب آبیاری و بارش‌های جوی، ذخیره آب در خاک (افزایش بارش مؤثر) و به‌طور کلی مدیریت بهینه آب در بخش کشاورزی می‌شود. امروزه بیوچار به‌عنوان یک ماده اصلاح‌کننده مؤثر در بهبود دامنه وسیعی از ویژگی‌های فیزیکی خاک، از جمله ظرفیت نگهداشت آب خاک و نفوذپذیری خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (بايامونت و همکاران، ۲۰۱۹) و پتانسیل بالایی در کاهش اثرات خشک‌سالی و افزایش محصول از طریق افزایش ظرفیت نگهداشت آب در خاک دارد (منصور و همکاران، ۲۰۲۰).

بیوچار یک ماده متخلخل غنی از کربن است که از تغییر ترمودینامیکی زیست‌توده در شرایط بدون اکسیژن تولید می‌شود (حسین و همکاران، ۲۰۲۰). بررسی پژوهش‌های انجام‌یافته نشان می‌دهد که افزودن بیوچار به خاک، موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل خاک و نیز تغییر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از طریق تغییر در توزیع اندازه منافذ خاک می‌شود (دوکوهاکی و همکاران، ۲۰۱۷؛ نوروزی و همکاران، ۱۳۹۵). کاربرد بیوچار در خاک موجب تغییر سرعت نفوذ آب در خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع خاک شده و انتقال آلاینده‌ها در خاک را به تأخیر می‌اندازد (بعقوبی و همکاران، ۱۳۹۸).

بررسی نتایج پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که تغییر در ویژگی‌های ذکرشده، بسته به ویژگی‌های خاک، بیوچار و شرایط مطالعه می‌تواند متفاوت باشد. بلانکو (۲۰۱۷) با بررسی مطالعات انجام‌یافته گزارش کرد که در

غالب خاک‌های درشت‌بافت مورد مطالعه، بیوچار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را کاهش داده‌است و دامنه نوسان کاهش آن، ۷ تا ۲۲۷۰ درصد بود. ابریشم‌کش و همکاران (۱۳۹۹) سوسپانسیون بیوچار تهیه‌شده از ضایعات هرس درخت زبان‌گنجشک و شلتوک برنج را به خاک‌های با بافت لوم و لوم شنی حساس به فرسایش اضافه کردند. نتایج ایشان نشان داد که کاربرد هر دو نوع بیوچار در خاک لوم شنی با ضریب آبگذری بالا، موجب کاهش ضریب آبگذری آن خاک شد؛ درحالی‌که در خاک لومی موجب افزایش ضریب آبگذری شد. عیسوند و همکاران (۱۳۹۹) نیز افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک لوم شنی با افزایش بیوچارهای تهیه‌شده از کود گاوی و بقایای نیشکر در شرایط آزمایشگاهی را گزارش کردند. نوواک و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که افزودن مخلوط بیوچار تهیه‌شده از تراشه چوب کاج و کود مرغی با نسبت ۵۰:۵۰ و ۸۰:۲۰ به خاک متراکم، موجب افزایش معنی‌دار سرعت نفوذ آب به خاک نسبت به تیمار شاهد (بدون بیوچار) شد. این درحالی بود که افزودن بیوچار کود مرغی به‌تنهایی تغییر معنی‌داری در سرعت نفوذ آب نسبت به شاهد را سبب نشد. ویلاقرا-مندوز و هورن (۲۰۱۹) گزارش کردند که افزودن بیوچار تهیه‌شده از چوب مانگو^۱ در مقادیر ۰، ۲/۵ و ۵ درصد وزنی به خاک شنی و لوم شنی در اندازه ذرات کوچک‌تر از $0.63 \mu\text{m}$ موجب کاهش سرعت نفوذ آب در خاک به دلیل انسداد منافذ خاک شد. نتایج مطالعه سان و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که افزودن بیوچار دانه‌بندی‌نشده (الک‌نشده) تهیه‌شده از کاه ذرت^۲ به مقدار ۱۰ درصد، نفوذ آب در خاک شور ساحلی^۳ را در مقایسه با شاهد کاهش داد. هدایت هیدرولیکی خاک یکی از ویژگی‌های فیزیکی خاک است که حرکت آب در خاک و حرکت آب به سمت ریشه گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش یا کاهش هدایت هیدرولیکی خاک با افزودن بیوچار به خاک بسته به مقدار بیوچار، بافت خاک و دانه‌بندی بیوچار ممکن است متفاوت باشد. رزاقی و رضایی (۱۳۹۶) گزارش کردند که کاربرد مقادیر ۲۵، ۵۰ و ۷۵ تن در هکتار بیوچار تولیدشده از کاه و کلش گندم در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد خاک‌های با بافت‌های لوم شنی، لومی، لوم رسی و رسی سبب بهبود وضعیت فیزیکی

1- Mango wood

2- Corn straw

3- Coastal saline soil

ارائه شده‌است. اسیدیته خاک در سوسپانسیون ۱ به 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 (کارتر و گریگوریچ، ۲۰۰۷). چگالی حقیقی خاک با پیکنومتر آب (اسمیت و مولینز، ۲۰۰۰) و بافت خاک با هیدرومتر تعیین شدند (فی و بایودر، ۱۹۸۶).

نوع بیوپچار و ویژگی‌های آن

برای تهیه بیوپچار از کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو استفاده شد. مواد اولیه هوا خشک در یک کوره از نوع دو بشکه با ظرفیت ۲۰۰ لیتر در دمای ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد در زمان ۸ ساعت گرما کافت شدند. بیوپچارهای تهیه‌شده، با الک‌های با قطر منافذ ۲، ۱ و ۰/۵ میلی‌متری الک و تا زمان اضافه‌شدن به خاک در کیسه‌های پلی‌اتیلنی غیرقابل نفوذ در برابر هوا بسته‌بندی شدند. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوپچارها در ذراتی با اندازه ۱۵۰ تا ۸۵۰ میکرون تعیین شد (جدول ۱). pH و EC بیوپچار در محلولی با نسبت ۱:۲۰ (وزن به حجم) بیوپچار به آب مقطر، جرم مخصوص ظاهری بیوپچار با استفاده از یک قالب با قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۷۰ میلی‌متر (راجکویچ و همکاران، ۲۰۱۲). خاکستر، کربن (C)، هیدروژن (H) و نیتروژن (N) بیوپچارها با روش ارائه‌شده در منبع اندازه‌گیری شدند (راجکویچ و همکاران، ۲۰۱۲).

طرح آزمایش

این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه فاکتور نوع، مقدار و اندازه ذرات بیوپچار، هرکدام در سه سطح و سه تکرار انجام شد. فاکتور اول نوع بیوپچار شامل بیوپچارهای کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو، فاکتور دوم مقدار بیوپچار شامل ۰/۵ درصد، ۱/۵ درصد و ۳ درصد و فاکتور سوم اندازه ذرات ۰/۵-، ۱-، ۲- میلی‌متر بودند که به خاک لوم شنی اضافه شدند. در هر تکرار یک کرت شاهد در نظر گرفته شد (در مجموع ۸۴ کرت آزمایشی). پس از شخم زمین، کرت‌های آزمایشی در ابعاد ۱×۱ m احداث شدند. برای عدم‌نشست آب به کرت‌های مجاور و نیز سهولت تردد و نمونه‌برداری، در هر بلوک بین کرت‌ها نیم‌متر و بین بلوک‌ها یک متر فاصله در نظر گرفته شد. پیش از اختلاط بیوپچار با

آن‌ها شد، به‌نحوی که کاربرد ۷۵ تن در هکتار بیوپچار سبب افزایش ۹۵ درصدی هدایت هیدرولیکی در مقایسه با شاهد شد. قربانی و امیراحمدی (۱۳۹۷) گزارش کردند که کاربرد بیوپچار شلتوک برنج با کاهش جرم مخصوص خاک، افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع، افزایش تخلخل کل و همچنین افزایش مقدار آب قابل‌دسترس خاک سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک لومی شد.

استان آذربایجان شرقی با داشتن بیش از ۴۵۹ هزار هکتار اراضی زیر کشت گندم و ۱۰ هزار باغ زردآلو (احمدی و همکاران، ۱۳۹۹ a, b). پتانسیل بالایی برای تولید بیوپچارهای تهیه‌شده از کاه گندم و چوب درخت زردآلو به‌منظور استفاده به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک دارد. اثر بیوپچار بر ویژگی‌های خاک، بسته به نوع مواد اولیه مورد استفاده برای تهیه بیوپچار، مقدار بیوپچار اضافه‌شده به خاک، خصوصیات خاک و شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه ممکن است متفاوت باشد. در غالب پژوهش‌های انجام‌شده، بیشتر به نوع مواد اولیه برای تهیه بیوپچار تأکید شده‌است و اثر توأم مقدار و اندازه ذرات بیوپچار بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک کمتر بررسی شده‌است. این پژوهش، با هدف بررسی آثار بیوپچارهای تهیه‌شده از کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب درخت زردآلو در مقادیر و اندازه ذرات مختلف بر متوسط سرعت نفوذ آب در خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای در یک خاک لوم شنی آهکی در شرایط مزرعه‌ای انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل مورد مطالعه

این پژوهش در مزرعه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی تبریز (۳۰ کیلومتری جنوب‌شرقی تبریز) با مختصات UTM، زون ۳۸، ۲۴/۰۲۴۶۲۸۲۲x و ۴۲۰۴۲۰۷/۷۰۵y و ارتفاع ۱۸۴۳ متر از سطح دریا اجرا شد. متوسط بارش سالانه منطقه ۳۳۱ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد و اقلیم منطقه براساس روش تقسیم‌بندی اقلیمی آمبرژه، نیمه‌خشک سرد است. برخی از خصوصیات خاک محل انجام آزمایش پیش از افزودن بیوپچار، با تهیه یک نمونه خاک مرکب اندازه‌گیری شد. همچنین با استفاده از استوانه فلزی نمونه‌برداری، جرم مخصوص ظاهری خاک تعیین شد که نتایج آن در جدول ۱

پاییزه کشت شد و در مجموع با احتساب بارندگی در کل دروه رشد، ۳۷۰ میلی‌متر آب به خاک اضافه شد. پس از گذشت یک سال از شروع آزمایش (۲۰ مرداد ۱۳۹۸) ویژگی‌های فیزیکی مورد بررسی در خاک، به شرح ذیل اندازه‌گیری شدند.

خاک، کرت‌ها آبیاری شده و اجازه داده شد تا رطوبت خاک به ظرفیت زراعی برسد. در ۲۰ مرداد ۱۳۹۷، تیمارهای بیوچار مورد استفاده در آزمایش به سطح خاک کرت‌ها به صورت دستی و یکنواخت اضافه و با بیل تا عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری با خاک مخلوط شدند. در این آزمایش مزرعه‌ای در خاک مورد مطالعه گندم

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های خاک و بیوچارهای مورد استفاده در 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	۱/۳	۰/۱۵	۰/۲۸	۰/۶۶
pH	-	۷/۸۵	۹/۲۲	۹/۶۷	۸/۱۲
هدایت الکتریکی	dS m ⁻¹	۱/۶۵	۲/۱۵	۱/۹۳	۰/۱۸
خاکستر	%	-	۱۵/۶	۳۸/۹	۵/۲
کربن آلی	%	۰/۵۱۷	۴۸/۹	۴۵/۳	۵۱/۶
نیترژن کل	%	۰/۰۱۱	۰/۶	۰/۵۹	۰/۷۱
هیدروژن	%	-	۳/۱۹	۳/۲۶	۳/۵۴

زیر خواهد بود: متوسط سرعت نفوذ آب در خاک (i) را می‌توان از معادله زیر به دست آورد.

$$i = akt^{a-1} + f_0 \quad (2)$$

$$i_{ave} = kt^{a-1} + f_0 \quad (3)$$

که در آن i_{ave} متوسط سرعت نفوذ از آغاز اندازه‌گیری تا هر لحظه مشخص بر حسب سانتی‌متر بر ساعت است. هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای با روش تک‌استوانه (در شرایط شبه‌ماندگار با ارتفاع آب دوگانه $H_1 = 5 \text{ cm}$ و $H_2 = 15 \text{ cm}$) و با استفاده از معادلات زیر محاسبه شد (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۲).

$$k_{fs} = \frac{q_s T (q_1 - q_2)}{(H_2 - H_1) (q_1 - q_2)} \quad (4)$$

$$a^* = \frac{(q_1 - q_2)}{(q_1(H_2 + T) - q_2(H_1 + T))}$$

$$T = C_1 d + C_2 a$$

$$q_s = \frac{Q_s}{\pi a^2}$$

که در آن Q_s (L³ T⁻¹) سرعت جریان شبه‌ماندگار متناظر، a (L) شعاع داخلی استوانه، $C_1 = 0/31$ و $C_2 = 0/18$ که ضرایب تجربی هستند و برای $d \geq 3$ (L) و $H \geq 5$ به کار می‌روند و q_1 (L T⁻¹) همان q_s در H_1 ، q_2 (L T⁻¹) همان q_s در H_2 و $q_1 < q_2$ و $H_1 < H_2$ است.

اندازه‌گیری متوسط سرعت نفوذ آب و هدایت

هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای

برای تعیین متوسط سرعت نفوذ آب در خاک، از روش تک‌استوانه با قطر داخلی و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۲؛ گرین و همکاران، ۲۰۰۹). از نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای نفوذ آب در خاک، ضرایب معادله نفوذ تجمعی آب (معادله کوستیاکوف-لوییس) در خاک برای هر تیمار با استفاده از معادله (۱) تعیین شد. با مشتق‌گیری از معادله نفوذ سرعت نسبت به زمان، معادله سرعت نفوذ لحظه‌ای آب در خاک به دست آمد (معادله (۲)) و در نهایت با استفاده از معادله (۳) متوسط سرعت نفوذ آب در خاک محاسبه شد (فوک، ۱۹۸۶).

$$I = kt^a + f_0 t \quad (1)$$

که در آن I نفوذ تجمعی آب در خاک بر حسب سانتی‌متر، a ، K مقادیری که بر حسب نوع خاک متفاوت است. K دارای بُعد LT^{-a} است، t زمان تجمعی یا زمان سپری شده بر حسب ساعت، f_0 سرعت نفوذ نهایی یا پایه، پس از یک دوره نفوذ طولانی مدت بر حسب سانتی‌متر بر ساعت است. سرعت نفوذ لحظه‌ای با مشتق‌گیری از معادله بالا به صورت

تجزیه و تحلیل آماری

برای انجام تحلیل‌های آماری، نرمال بودن نتایج با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و یکنواختی واریانس‌ها با آزمون لوون تست شد. برای مقایسه نتایج تیمارها با شاهد، آنالیز واریانس یک‌طرفه در قالب بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد و نتایج تیمارها با شاهد از طریق آزمون^۱ LSD در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شد. برای مشخص کردن اثرات اصلی فاکتورها و نیز اثرات متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های مورد مطالعه، تجزیه واریانس سه‌عامله صورت گرفت (در این مرحله نتایج کرت‌های شاهد دخالت داده نشد). برای تعیین اثر مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار بر ویژگی‌های مورد مطالعه، برش‌دهی واریانس در هر نوع بیوچار انجام شد. میانگین ویژگی‌های مورد مطالعه در تیمارها با آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند. برای انجام تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار Statistix 9 و SAS 9.1 استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس یک‌طرفه متوسط نفوذ و هدایت هیدرولیکی اشباع در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که اثر تیمارهای مورد مطالعه بر متوسط سرعت نفوذ آب در خاک (i_{ave}) معنی‌دار بود. بیوچارهای کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو بسته به مقدار بیوچار اضافه شده به خاک و اندازه ذرات بیوچار، اثر متفاوتی بر i_{ave} در مقایسه با شاهد داشتند. نتایج نشان داد که ذرات متوسط و درشت بیوچارهای اضافه شده به خاک صرفاً با ایجاد منافذ درشت بین ذرات بیوچار و ذرات خاک، موجب افزایش i_{ave} شدند و ذرات ریز نه تنها اثر افزایشی معنی‌داری بر i_{ave} نداشتند؛ بلکه در بیوچار چوب زردآلو، موجب کاهش معنی‌دار آن نیز شدند (شکل ۱).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که در تغییر i_{ave} اثرات نوع، مقدار و اندازه ذرات بیوچار و نیز اثرات متقابل آن‌ها بر i_{ave} معنی‌دار بودند (جدول ۳). اثر متقابل نوع بیوچار در اندازه ذرات بیوچار، اثر متقابل نوع بیوچار در اندازه ذرات بیوچار در اندازه ذرات بیوچار و نیز اثر متقابل نوع بیوچار در مقدار بیوچار در تغییر i_{ave} به ترتیب ۲۴/۷۵ درصد، ۱۶/۷۳ درصد و ۱۵/۹۶ درصد سهم داشتند. نتایج نشان داد که اثر مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار در مقادیر مختلف

هر سه بیوچار، تأثیر معنی‌داری بر میزان i_{ave} در خاک لوم شنی داشت (جدول ۴).

در بیوچارهای مورد مطالعه بسته به نوع بیوچار، اثر مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار بر i_{ave} معنی‌دار بود (جدول ۴). در بین تیمارهای بیوچارهای کاه گندم در مقدار ۳ درصد و اندازه ذرات ۱-۲ mm بیشترین i_{ave} مشاهده شد که با تیمار بیوچار کاه گندم در مقدار ۳ درصد و اندازه ذرات ۱-۰/۵ mm تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۱ الف). در تیمارهای ورمی کمپوست در مقدار ۱/۵ درصد و اندازه ذرات ۱-۲ mm، بیشترین i_{ave} مشاهده شد که با بقیه مقادیر و اندازه ذرات مورد مطالعه در آن بیوچار تفاوت معنی‌داری داشت (شکل ۱ ب). در بین تمام تیمارها، بیشترین i_{ave} در بیوچار ورمی کمپوست با مقدار ۱/۵ درصد و اندازه ذرات ۱-۲ mm بود (شکل ۱ الف و ب)؛ اما در بیوچار چوب زردآلو، بیشترین سرعت نفوذ آب در مقدار ۰/۵ درصد و اندازه ذرات ۱-۰/۵ mm مشاهده شد که با متوسط سرعت نفوذ آب در مقدار ۱/۵ درصد و اندازه ذرات ۱-۰/۵ mm این نوع بیوچار تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۱ ج). نتایج مطالعه سان و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که افزودن بیوچار دانه‌بندی نشده (الک‌نشده) کاه ذرت^۲ به مقدار ۱۰ درصد در مقایسه با شاهد، نفوذ آب در خاک شور ساحلی^۳ را کاهش داد. این در حالی بود که بیوچار با ذرات کمتر از ۰/۲۵ میلی‌متر، در تمام مقادیر اضافه شده به خاک، نفوذ آب در خاک مورد مطالعه ایشان را افزایش داد و بیوچار با اندازه ذرات ۱-۲ mm اثر ناچیزی در بهبود منافذ خاک داشت و در مقدار ۱۰ درصد آن موجب کاهش ظرفیت نفوذ آب در خاک شد. در پژوهش حاضر نتایج به دست آمده از بیوچار چوب زردآلو این با نتایج ایشان درباره کاهش متوسط سرعت نفوذ آب در خاک یکسان بود.

مقایسه چندگانه میانگین i_{ave} در بین تمام تیمارها نشان داد که بیشترین i_{ave} در بیوچار ورمی کمپوست با مقدار ۱/۵ درصد و اندازه ذرات ۱-۲ mm مشاهده شد که با بقیه تیمارها تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۵). به نظر می‌رسد پایداری ساختمان این بیوچار و نیز تأثیر بیشتر آن در بهبود ساختمان موجب این نتیجه شد. بیوچارهای با ساختمان ناپایدار به سرعت تخریب شده و موجب

2- Com straw

3- Coastal saline soil

1- Fisher's Least Significant Difference (LSD)

شنی

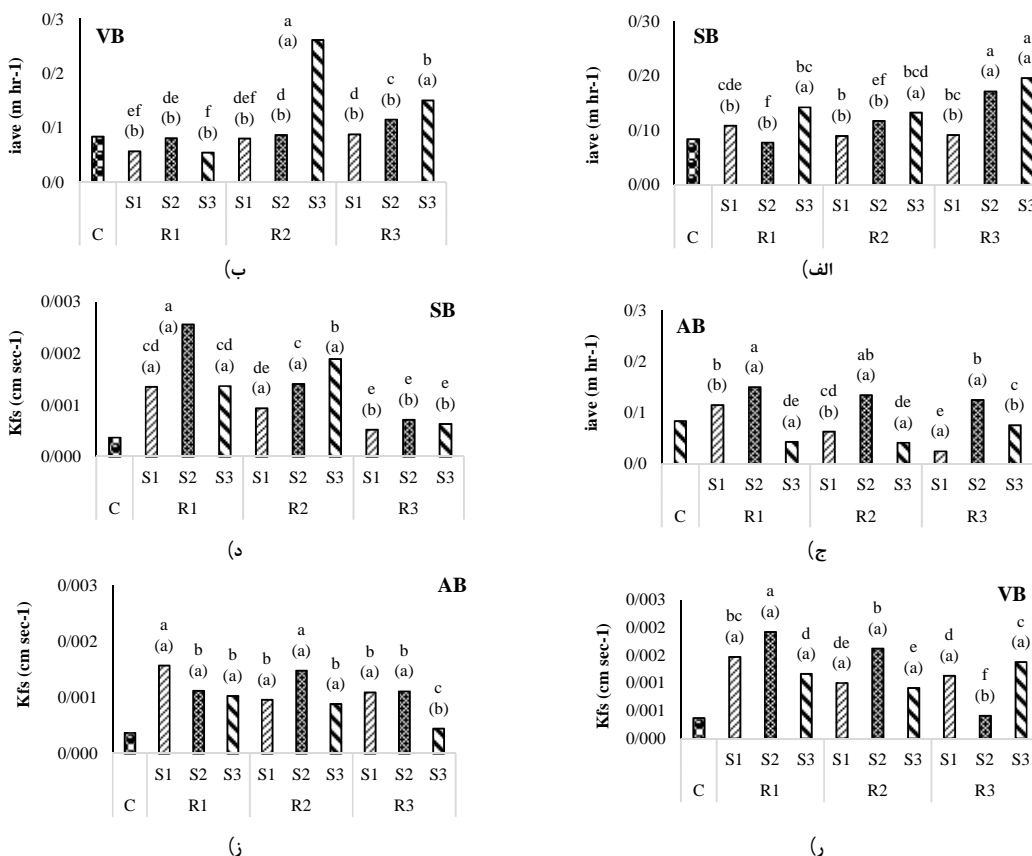
میزان سرعت نفوذ در هر دو خاک افزایش یافت. دلیل افزایش سرعت نفوذ آب در خاک غیرآهکی افزوده شدن یون کلسیم و کاهش میزان سدیم در فاز تبدیلی عنوان شده درحالی‌که در خاک آهکی، حضور بیوچار در سطح خاک و ایجاد ناهم‌واری‌های ریز در سطح خاک موجب افزایش نفوذ آب و کاهش رواناب در خاک آهکی بیان شده است.

مسدود شدن منافذ خاک و کاهش سرعت نفوذ و سرعت حرکت آب در خاک می‌شوند (بلانکو، ۲۰۱۷). آبرول و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که خاک آهکی نسبت به خاک غیرآهکی، بدون افزایش بیوچار تهیه شده از تراشه چوب‌های مختلف، بسیار مستعد تشکیل سله سطحی است و سرعت نهایی نفوذ آب در خاک‌های آهکی و غیرآهکی تیمار نشده با بیوچار به ترتیب ۶/۶ و ۱۱/۴ میلی‌متر در ساعت بود. با افزودن ۲ درصد بیوچار تهیه شده از چوب،

جدول ۲- تجزیه واریانس یک‌طرفه متوسط نفوذ و هدایت هیدرولیکی اشباع

منابع تغییرات	درجه آزادی	متوسط سرعت نفوذ	هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای
بلوک	۲	۰/۰۰۰۱۱	۱/۸۹×۱۰ ^{-۸}
تیمار	۲۷	۰/۰۰۷۷۹**	۷/۴۸×۱۰ ^{-۷**}
خطا	۵۴	۰/۰۰۰۲۲	۳/۲۸۱×۱۰ ^{-۸}
ضریب تغییرات	-	۱۳/۹۱	۱۵/۶

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد (P<0.01).



شکل ۱- مقایسه میانگین متوسط سرعت نفوذ آب در خاک (الف، ب، ج) و هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای (د، ر، ز) در تیمارهای

مورد مطالعه با شاهد و نیز بین تیمارها در سطح نوع بیوچار

i: متوسط سرعت نفوذ آب، Kfs: هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای، SB: بیوچار کاه گندم، VB: بیوچار رومی کمیوست و AB: بیوچار چوب زردآلو. (a): تفاوت معنی‌دار با شاهد، (b): عدم تفاوت معنی‌دار با شاهد. - تیمارهای با حروف یکسان، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات و اندازه اثر) برای متوسط سرعت نفوذ آب و هدایت هیدرولیکی مزرعه‌ای

هدایت هیدرولیکی مزرعه‌ای (cm sec ⁻¹)		متوسط سرعت نفوذ آب (m hr ⁻¹)		درجه آزادی	منابع تغییرات
۸	میانگین مربعات	۸	میانگین مربعات		
۰/۱۹	۱/۹ × ۱۰ ^{-۷} *	۰/۱۳	۰/۰۰۱۵*	۲	بلوک
۲/۶۲	۲/۶۳ × ۱۰ ^{-۷} *	۹/۴۰	۰/۰۱۰۳۶*	۲	نوع بیوچار
۳۱/۶۰	۳/۱۷ × ۱۰ ^{-۷} *	۳/۸۶	۰/۰۰۴۲۶*	۲	مقدار بیوچار
۶/۸۴	۶/۸۷ × ۱۰ ^{-۷} *	۱۳/۱۸	۰/۰۱۴۵۴*	۲	اندازه ذرات بیوچار
۸/۷۳	۴/۳۸ × ۱۰ ^{-۷} *	۱۵/۹۶	۰/۰۰۸۸*	۴	نوع بیوچار × مقدار بیوچار
۸/۴۷	۴/۲۵ × ۱۰ ^{-۷} *	۲۴/۷۵	۰/۰۱۳۶۵*	۴	نوع بیوچار × اندازه ذرات بیوچار
۱۰/۷۸	۵/۴۱ × ۱۰ ^{-۷} *	۱۰/۸۶	۰/۰۰۵۹۹*	۴	مقدار بیوچار × اندازه ذرات بیوچار
۲۱/۹۳	۵/۵۰ × ۱۰ ^{-۷} *	۱۶/۷۳	۰/۰۰۴۶۱*	۸	نوع بیوچار × مقدار بیوچار × اندازه ذرات بیوچار
-	۳/۴ × ۱۰ ^{-۸}	-	۰/۰۰۰۲۲		خطا

۸: اندازه اثر هر عامل (نسبت مجذور مربعات هر عامل به مجذور مربعات کل ضرب در ۱۰۰)، * : معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد (P<0.05).

جدول ۴- اثر مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار در هر یک از نوع بیوچار بر متوسط سرعت نفوذ و هدایت هیدرولیکی اشباع

هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای		متوسط سرعت نفوذ آب		درجه آزادی	نوع بیوچار
میانگین مربعات		میانگین مربعات			
۰/۰۰۰۰۰۱۳۰۷**		۰/۰۰۴۶۳۸**		۸	بیوچار کاه گندم
۰/۰۰۰۰۰۵۸۳**		۰/۰۱۲۴۹۶**		۸	بیوچار ورمی کمپوست
۰/۰۰۰۰۰۳۲۸**		۰/۰۰۶۳۹۶**		۸	بیوچار چوب زردآلو

** : معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد (P<0.01).

نداشت. در این نوع بیوچار کمترین K_{fs} در مقدار ۳ درصد و اندازه ذرات ۰-۰/۵ mm مشاهده شد. (شکل ز). اسماعیل‌نژاد و همکاران (۲۰۱۷) انسداد منافذ خاک توسط بیوچار با اندازه ذرات کوچک و نیز افزایش اعوجاج در منافذ خاک توسط ذرات درشت بیوچار را دلیل کاهش هدایت اشباع مزرعه‌ای بیان کردند. بررسی نتایج پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که مقدار بهینه برای افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بسته به نوع بیوچار و بافت خاک متفاوت است. عیسوند و همکاران (۱۳۹۹) مقدار ۱/۵ درصد بیوچارهای تهیه‌شده از کود گاوی و بقایای نیشکر را مقدار اقتصادی برای افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک لوم شنی گزارش کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که علاوه بر مقدار بیوچار، اندازه ذرات بیوچار نیز از عوامل تأثیرگذار بر هدایت هیدرولیکی اشباع بود. این در حالی بود که نتایج مطالعه گلخانه‌ای نسیمی و همکاران (۱۳۹۸)، مقدار ۲ درصد بیوچار برگ خرما را مقدار مناسب برای افزایش هدایت هیدرولیک اشباع خاک لوم شنی رسی نشان داد. یافته ما با نتایج ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت داشت. ایشان گزارش کرده‌اند که در مقادیر مساوی، ذرات پودری (آسیاب‌شده) بیوچار (تهیه‌شده از تراشه‌ها چوب‌های مختلف) در مقایسه با ذرات درشت (۵-۸ mm) هدایت

هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای

نتایج تجزیه واریانس یک‌طرفه اثر تیمارها بر هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای (K_{fs}) معنی‌دار بود (جدول ۲). با اضافه کردن بیوچارهای کاه گندم، ورمی کمپوست و چوب زردآلو در مقادیر و اندازه‌های مورد مطالعه، در غالب تیمارها، K_{fs} در مقایسه با شاهد افزایش معنی‌داری داشت (شکل ۱ د، ر، ز). مقدار بیوچار، نوع بیوچار در مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار و نیز مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار به ترتیب ۳۱/۹۳ درصد، ۲۱/۹۳ درصد و ۱۰/۷۸ درصد در تغییر K_{fs} سهم داشتند. اثرات اصلی و اثرات متقابل فاکتورهای مورد مطالعه بر متوسط هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای معنی‌دار بودند (جدول ۴). مقایسه میانگین K_{fs} در هر بیوچار نشان داد که در بیوچار کاه گندم بیشترین K_{fs} در مقدار ۰/۵ درصد و اندازه ذرات ۰/۵-۱ mm است. در مقادیر ۱/۵ درصد و ۳ درصد بیوچار کاه گندم، با افزایش اندازه ذرات بیوچار هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای خاک کاهش یافت (شکل ۱ د). در بیوچار ورمی کمپوست، بیشترین K_{fs} در مقدار ۰/۵ درصد و اندازه ذرات ۰/۵-۱ mm مشاهده شد (شکل ۱ ر). در بیوچار چوب زردآلو، بیشترین K_{fs} در مقدار ۰/۵ درصد و اندازه ذرات ۰-۰/۵ mm بود که با K_{fs} در مقدار ۱/۵ درصد و اندازه ذرات ۰/۵-۱ mm تفاوت معنی‌داری

اوبیا و همکاران (۲۰۱۷) یکسان است. ایشان نتیجه‌گیری کردند در دو خاک با بافت‌های لوم شنی ریز و لومی، با افزایش مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک، در تمام اندازه ذرات بیوچار مورد مطالعه ایشان، هدایت هیدرولیکی اشباع کاهش پیدا کرد.

هیدرولیکی را بیشتر کاهش دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد بیوچار بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مقدار بیوچار اضافه شده به خاک و اندازه ذرات بیوچار بستگی دارد. در خاک لوم شنی مورد مطالعه با افزایش در مقدار بیوچارهای مورد مطالعه، کاهش معنی‌دار K_{fs} نسبت به شاهد اتفاق افتاد که یافته با نتیجه گزارش‌شده

جدول ۵- مقایسه چندگانه میانگین سرعت نفوذ آب و هدایت هیدرولیکی مزرعه‌ای در تیمارهای مورد مطالعه

هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای (K_{fs}) (cm sec^{-1})	میانگین سرعت نفوذ (i_{ave}) (m hr^{-1})	معادله سرعت نفوذ $i=60bt^{a-1}+60f_0$ (m hr^{-1})	اندازه ذرات بیوچار (mm)	مقدار بیوچار (%)	نوع بیوچار
۰/۰۰۱۳۵۰ cde	۰/۱۰۸۲ ghi	$i = 0.1393t^{-0.0868} + 0.00127$	۰-۰/۵		
۰/۰۰۲۵۶۰ a	۰/۰۷۷۴ jklm	$i = 0.1254t^{-0.1658} + 0.00115$	۰/۵-۱	۰/۵	
۰/۰۰۱۳۷۰ cde	۰/۱۴۱۹ de	$i = 0.1782t^{-0.0773} + 0.0009$	۱-۲		
۰/۰۰۰۹۳۷۰ fg	۰/۰۸۹۶ ij	$i = 0.1255t^{-0.1154} + 0.0013$	۰-۰/۵		
۰/۰۰۱۴۱۰ cd	۰/۱۱۷۲ fg	$i = 0.146t^{-0.0749} + 0.0011$	۰/۵-۱	۱/۵	بیوچار گندم
۰/۰۰۱۸۹۰ b	۰/۱۳۲۲ defg	$i = 0.1634t^{-0.0719} + 0.00106$	۱-۲		
۰/۰۰۰۵۲۰ ij	۰/۰۹۱۳ hij	$i = 0.1161t^{-0.0773} + 0.00095$	۰-۰/۵		
۰/۰۰۰۷۱۵۰ ghi	۰/۱۷۱ c	$i = 0.2411t^{-0.1162} + 0.001464$	۰/۵-۱	۳	
۰/۰۰۰۶۳۲۰ hij	۰/۱۹۵۲ b	$i = 0.2580t^{-0.0941} + 0.00146$	۱-۲		
۰/۰۰۱۴۷۰ c	۰/۰۵۶۴ lmn	$i = 0.0939t^{-0.0097} + 0.00079$	۰-۰/۵		
۰/۰۰۱۹۲۰ b	۰/۰۸۰۸ jk	$i = 0.1374t^{-0.3123} + 0.000819$	۰/۵-۱	۰/۵	
۰/۰۰۱۱۶۰ def	۰/۰۵۴۲ mn	$i = 0.0968t^{-0.0620} + 0.000798$	۱-۲		بیوچار
۰/۰۰۱۰۰۰ fg	۰/۰۸۰۴ ijk	$i = 0.0792t^{-0.1294} + 0.00043$	۰-۰/۵		ورمی
۰/۰۰۱۶۲۰ bc	۰/۰۸۶۹ ijk	$i = 0.0880t^{-0.0331} + 0.00112$	۰/۵-۱	۱/۵	کمپوست
۰/۰۰۰۹۱۵۰ fgh	۰/۲۶۱۵ a	$i = 0.0897t^{-0.0773} + 0.00113$	۱-۲		
۰/۰۰۱۱۳۰ def	۰/۰۸۷۶ ij	$i = 0.2164t^{-0.0585} + 0.00137$	۰-۰/۵	۳	
۰/۰۰۰۴۱۱۰ j	۰/۱۱۵۲ fgh	$i = 0.1020t^{-0.0773} + 0.00121$	۰/۵-۱		
۰/۰۰۱۳۸۰ cde	۰/۱۵۰۳ cd	$i = 0.2240t^{-0.2287} + 0.00124$	۱-۲		
۰/۰۰۱۵۷۰ c	۰/۱۱۵۲ fgh	$i = 0.1307t^{-0.0420} + 0.00112$	۰-۰/۵		
۰/۰۰۱۱۲۰ def	۰/۱۵ cd	$i = 0.1257t^{-0.3851} + 0.00085$	۰/۵-۱	۰/۵	
۰/۰۰۱۰۳۰ f	۰/۰۴۳ no	$i = 0.1480t^{-0.2979} + 0.00083$	۱-۲		
۰/۰۰۰۹۶۰ fg	۰/۰۶۳ klmn	$i = 0.1580t^{-0.0554} + 0.00127$	۰-۰/۵		بیوچار
۰/۰۰۱۴۸۰ c	۰/۱۳۴۵ def	$i = 0.1252t^{-0.3992} + 0.00099$	۰/۵-۱	۱/۵	چوب
۰/۰۰۰۸۸۲۰ fgh	۰/۰۴۱۵ no	$i = 0.08189t^{-0.4467} + 0.00074$	۱-۲		زردآلو
۰/۰۰۱۱۰۰ ef	۰/۰۲۴۵ o	$i = 0.1487t^{-0.0569} + 0.00127$	۰-۰/۵		
۰/۰۰۱۱۱۰ def	۰/۱۲۵ efg	$i = 0.01487t^{-0.0797} + 0.0011$	۰/۵-۱	۳	
۰/۰۰۰۴۴۳۰ ij	۰/۰۷۵۶ jklm	$i = 0.0984t^{-0.01324} + 0.00089$	۱-۲		

- میانگین‌های داری حداقل یک حرف مشترک تفاوت معنی‌داری ندارند.

معنی‌داری بر متوسط سرعت نفوذ و هدایت هیدرولیکی اشباع مزرعه‌ای (K_{fs} و i_{ave}) داشت. اثر متقابل نوع بیوچار در اندازه ذرات بیوچار، اثر متقابل نوع بیوچار در مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار و نیز اثر متقابل نوع بیوچار در مقدار بیوچار در تغییر i_{ave} به ترتیب ۲۵/۷۵ درصد،

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که اثر تیمارهای بیوچار مورد استفاده در خاک لوم شنی بر متوسط سرعت نفوذ آب در خاک (i_{ave}) و هدایت هیدرولیک اشباع مزرعه‌ای خاک (K_{fs}) معنی‌دار بود. تغییر در نوع، مقدار و اندازه ذرات بیوچار اثر

۵. عیسوند رجیبی ف. کریمی ا. متقیان ح. ر. و محمدی ج. ۱۳۹۹. مقایسه آثار بیوچار (Biochar) حاصل از کود گاوی و بقایای نیشکر بر ضرایب رطوبتی خاک لوم شنی. مجله پژوهش آب ایران. ۳۸: ۱۷۱-۱۷۸.
۶. قربانی م. و امیراحمدی ا. ۱۳۹۷. اثر بیوچار پوسته برنج بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک و رشد ذرت در یک خاک لومی. پژوهش‌های خاک، ۳۲(۳): ۳۰۵-۳۱۸.
۷. نسیمی پ. کریمی ا. و متقیان ح. ۱۳۹۸. آثار بیوچار برگ خرما بر هدایت هیدرولیکی اشباع و ضرایب رطوبتی خاک لوم رسی شنی. مجله پژوهش آب ایران. ۳۴: ۱۷۱-۱۶۱.
۸. نوروزی م. طباطبائی س. ح. نوری م. و متقیان ح. ۱۳۹۵. اثرات کوتاه‌مدت بایوچار حاصل از برگ خرما بر حفظ رطوبت در خاک لوم شنی. نشریه حفاظت منابع آب و خاک (علمی-پژوهشی). ۲: ۱۳۷-۱۵۰.
۹. یعقوبی م. طباطبائی س. ح. رئیسی ط. و شادانیا ر. ۱۳۹۸. بررسی اثر قرارگیری لایه بایوچار در محیط متخلخل بر منحنی رخنه و پروفیل توزیع نیترات. مجله پژوهش آب ایران. ۳۵: ۱۵۷-۱۶۷.

۱۶/۷۳ درصد و ۱۵/۹۶ درصد سهم داشتند. مقدار بیوچار، نوع بیوچار در مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار و نیز مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار به ترتیب ۳۱/۹۳ درصد، ۲۱/۹۳ درصد و ۱۰/۷۸ درصد در تغییرات K_{fs} سهم داشتند. در تیمارهای بیوچارها بسته به نوع بیوچار، اثر مقدار بیوچار در اندازه ذرات بیوچار بر متوسط سرعت نفوذ یکسان نبود. در بین تمام تیمارها، بیشترین I_{ave} در بیوچار ورمی کمپوست با مقدار ۱/۵ درصد و اندازه ذرات ۱-۲ mm $(0.2615 m hr^{-1})$ بود. بیشترین K_{fs} در بیوچارهای کاه گندم و ورمی کمپوست به ترتیب در مقدار ۰/۵ درصد و اندازه ذرات ۱ mm-۰/۵ و در چوب زردآلو در مقدار ۰/۵ درصد و اندازه ذرات ۱ mm-۰/۵ مشاهده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که نتیجه کاربرد بیوچار بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به نوع، مقدار و اندازه ذرات بیوچار بستگی دارد؛ بنابراین برای به دست آوردن نتیجه مطلوب، باید بیوچاری با مقدار و اندازه ذرات مناسب طراحی شود. پیشنهاد می‌شود اثر تغییر اندازه ذرات بیوچار در مقادیر مختلف بیوچار بر توزیع اندازه منافذ خاک و اثر آن بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک بررسی شود.

منابع

۱. ابریشم‌کش س. فاضلی سنگانی م. رمضانپور ح. نوروزی م. و شعبانی ع. ۱۳۹۹. اثر کاربرد سوسپانسیون بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی دو خاک حساس به فرسایش. پژوهش‌های فرسایش محیطی. ۱۰(۱): ۵۸-۷۸.
۲. احمدی ک. عبادزاده ح. حاتمی ف. حسین‌پور ر. و عبدشاه ه. ۱۳۹۹. آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۸. جلد سوم: محصولات باغی. وزارت جهاد کشاورزی. ۱۶۳ ص.
۳. احمدی ک. عبادزاده ح. حاتمی ف. عبدشاه ه. و کاظمیان آ. ۱۳۹۹. آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۸. جلد اول: محصولات زراعی. وزارت جهاد کشاورزی، ۹۷ ص.
۴. رزاقی ف. و رضایی ن. ۱۳۹۶. اثر سطوح مختلف بیوچار بر خواص فیزیکی خاک با بافت‌های مختلف. حفاظت منابع آب و خاک. ۷(۱): ۷۵-۸۷.
10. Abrol V. Ben-Hur M. Verheijen F.G. Keizer J.J. Martins M. A. Tenaw H. Tchekansky L. and Graber E. R. 2016. Biochar effects on soil water infiltration and erosion under seal formation conditions: rainfall simulation experiment. *Journal of Soils and Sediments*. 16(12): 2709-2719.
11. Baiamonte G. Crescimanno G. Parrino F. and De Pasquale C. 2019. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil. *Catena*. 175: 294-303.
12. Blanco-Canqui H. 2017. Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*. 81(4): 687-711.
13. Carter M. R. and Gregorich E. G. 2007. *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press. 1240 p.
14. Dokoochaki H. Miguez F. E. Laird D. Horton R. and Basso A.S. 2017. Assessing the biochar effects on selected physical properties of a sandy soil: an analytical approach. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 48(12): 1387-1398.
15. Esmaelnejad L. Shorafa M. Gorji M. and Hosseini S. M. 2017. Impacts of woody biochar particle size on porosity and

27. Villagra-Mendoza K. and Horn R. 2019. Changes in water infiltration after simulated wetting and drying periods in two biochar amendments. *Soil Systems*. 3(4): 63.
28. Zhang J. Qun C. H. E. N. and Changfu Y. O. U. 2016. Biochar effect on water evaporation and hydraulic conductivity in sandy soil. *Pedosphere*. 26(2): 265-272.
- hydraulic conductivity of biochar-soil mixtures: an incubation study. *Communications in soil science and plant analysis*. 48(14): 1710-1718.
16. Fok Y. S. 1986. Derivation of Lewis-Kostiakov intake equation. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 112(2): 164-171.
17. Gee G. W. and Bauder J. W. 1986. Particle-size Analysis 1. *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods, (Methodsofsoilan1)*.
18. Green T. R. Dunn G. H. Erskine R. H. Salas J.D. and Ahuja L.R. 2009. Fractal analyses of steady infiltration and terrain on an undulating agricultural field. *Vadose Zone Journal*. 8(2): 310-320.
19. Hussain R. Bordoloi S. Garg A. Ravi K. Sreedeeep S. and Sahoo L. 2020. Effect of biochar type on infiltration, water retention and desiccation crack potential of a silty sand. *Biochar*. 2(4): 465-478.
20. Mansoor S. Kour N. Manhas S. Zahid S. Wani O. A. Sharma V. Wijaya L. Alyemeni N. M. Alshhi A. A. El-Serehy H. A. Paray B. A and Ahmad P. 2020. Biochar as a tool for effective management of drought and heavy metal toxicity. *Chemosphere*, 129458.
21. Novak J. Sigua G. Watts D. Cantrell K. Shumaker P. Szogi A. Johnson M.G. and Spokas K. 2016. Biochars impact on water infiltration and water quality through a compacted subsoil layer. *Chemosphere*. 142: 160-167.
22. 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.
23. 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.
24. Reynolds W. D. Elrick D. E. and Youngs E. G. 2002. Ring or cylinder infiltrometers (vadose zone). In Dane J.H. and Topp G.C. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*. SSSA Book Ser. 5. SSSA Madison WI. pp. 818-843.
25. Smith K. A. 2000. *Soil and environmental analysis: physical methods, revised, and expanded*. CRC Press. 651p.
26. Sun J. Yang R. Li W. Pan Y. Zheng M. and Zhang Z. 2018. Effect of biochar amendment on water infiltration in a coastal saline soil. *Journal of Soils and Sediments*. 18(11): 3271-3279.