

اثر اندازه ذرات، مقدار و نوع بیوجار بر هدایت هیدرولیکی اشباع در دو خاک با بافت متفاوت

عباس یکزبان، سید علی اکبر موسوی¹، عبدالمجید ثامنی و مهروز رضایی

دانشجوی دکتری بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران؛ a.yekzaban@gmail.com

استاد بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران؛ aamousavi@gmail.com

دانشیار بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران؛ majid.baba@gmail.com

استادیار بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران؛ mahrooz.rezaei@gmail.com

ص 321 - 334

دریافت: 1401/4/18 و پذیرش: 1401/6/6

چکیده

کاربرد بیوجار در خاک‌های کشاورزی به‌عنوان راه حلی برای افزایش تولید محصول از طریق بهبود در ویژگی‌های خاک، پیشنهاد شده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر نوع، سطوح و اندازه ذرات بیوجار بر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat}) در دو خاک لوم رسی سیلتی و لوم شنی انجام شد. از بیوجار برگ نخل و پوست لیمو، گرماکافت شده در دمای 500 درجه سلسیوس در مدت 3 ساعت، استفاده شد. بیوجار به‌دست آمده به سه کلاس اندازه ذرات کوچکتر از 0/8 میلی‌متر، 0/8-2 میلی‌متر و 2-4 میلی‌متر تقسیم شد و با نسبت 0/5%، 1%، 2% و 4% وزنی با خاک‌های مورد نظر مخلوط و به مدت 15 ماه (1398 تا 1399) در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شیراز خوابانده شد. نتایج نشان داد که کاربرد سطوح 0/5%، 1%، 2% و 4% بیوجار سبب کاهش معنی‌دار متوسط K_{sat} به ترتیب به میزان 9%، 32%، 58% و 65% در خاک بافت لوم شنی و همچنین افزایش معنی‌دار آن (به‌جز سطح 0/5%) به ترتیب به میزان 51%، 104% و 231% در خاک لوم رسی سیلتی در مقایسه با شاهد شد. بیوجار برگ نخل در مقایسه با بیوجار پوست لیمو سبب افزایش معنی‌دار متوسط K_{sat} به میزان 42% در خاک لوم رسی سیلتی و همچنین کاهش معنی‌دار 12% در خاک لوم شنی شد. علاوه بر آن، بیش‌ترین تأثیر بیوجار بر K_{sat} در هر دو بافت خاک مربوط به ذرات بیوجار کوچک‌تر از 0/8 میلی‌متر به‌دست آمد. بیش‌ترین افزایش در K_{sat} خاک لوم رسی سیلتی و بیش‌ترین کاهش در K_{sat} خاک لوم شنی، در سطح 4% وزنی بیوجار برگ نخل با کلاس اندازه ذرات کوچک‌تر از 0/8 میلی‌متر مشاهده شد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش می‌تواند راهگشای انتخاب مقدار و اندازه بیوجارهای مورد استفاده از نظر اثر بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک باشد.

واژه‌های کلیدی: اصلاح‌کننده خاک، برگ نخل، پوست لیمو، لوم شنی، لوم رسی سیلتی

¹ نویسنده مسئول، آدرس: استان فارس، شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی، بخش علوم خاک

مقدمه

خاک دارد (گلب و همکاران، 2016؛ زانگ و همکاران، 2021) که باعث می‌شود هر بیوچار ویژگی‌های منحصر به فردی داشته باشد. به‌عنوان نمونه، افزایش دمای گرماکافت سبب افزایش سطح ویژه، تخلخل کل، منافذ ریز و آب-دوستی در بیوچار می‌شود (مرادی چقمرانی و همکاران، 2019). تحقیقات در زمینه استفاده از بیوچار به‌عنوان اصلاح‌کننده آلی خاک بسیار پراکنده و نتایج تحقیقات نیز بسیار متنوع است. به عبارتی در بیوچار با تغییر در مواد خام اولیه و شرایط تولید آن رفتارهای متفاوت بیوشیمیایی و فیزیکی روی می‌دهد و پس از مخلوط شدن با خاک به‌دلیل اثرات متقابل بیوچار و خاک نتایج بسیار پیچیده و متنوع‌تر می‌شود (لیچوک و همکاران، 2015). از سوی دیگر، بیشتر پژوهش‌های انجام شده معطوف به تأثیر بیوچار بر اصلاح ویژگی‌های بیوشیمیایی خاک و افزایش حاصلخیزی خاک بوده (وانگ و همکاران، 2015) و تحقیقات به نسبت کمتری در زمینه کمی کردن اثرات بیوچار به‌ویژه اشکال و انواع مختلف بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند ویژگی‌های هیدرولیکی خاک انجام شده است. گلب و همکاران (2016) سطوح 0/5، 1، 2 و 4 درصد وزنی از مخلوطی از انواع بیوچار و در اندازه‌های متفاوت از ذرات بیوچار در خاک شنی به کار بردند. نتایج آنها نشان داد که کاربرد بیوچار در مدت 3 ماه توانست ویژگی‌های فیزیکی خاک را بهبود بخشد.

هم‌چنین آنان گزارش کردند جرم مخصوص ظاهری و تخلخل کل خاک نه تنها وابسته به مقدار بیوچار مصرفی می‌باشد، بلکه تابعی از اندازه ذرات بیوچار نیز می‌باشد. زانگ و همکاران (2016) اثر بیوچارهای مختلف حاصل از گرماکافت متفاوت بر ویژگی‌های هیدرولیکی در یک خاک شنی را بررسی و مشاهده نمودند که هدایت هیدرولیکی اشباع به‌طور چشم‌گیری کاهش یافت، که در این بین بیوچار با حجم منافذ بزرگ و قطر منافذ متوسط، تأثیر بهتری در بهبود قابلیت نگه‌داشت آب در خاک داشته است. توزیع اندازه ذرات بیوچار اضافه شده بر

بر اساس گزارش‌ها، پیش‌بینی می‌شود تقاضای جهانی غذا تا سال 2050 میلادی به‌میزان 56 درصد افزایش یابد (واندیک و همکاران، 2021). از طرفی از مجموع زمین‌های موجود در دنیا بخش بزرگی را زمین‌های خشک تشکیل می‌دهد، که اکثر زمین‌های کشاورزی واقع در این مناطق با کمبود ذخیره منابع آب، مواد مغذی و ماده آلی مواجه هستند (لال، 2004). افزایش تقاضای جهانی برای مواد غذایی از یک سو و وجود محدودیت منابع به همراه تغییرات آب و هوایی از سوی دیگر، استفاده پویا و پایدار از زمین‌های کشاورزی را می‌طلبد. یکی از روش‌های کارآمد برای مقابله با این چالش جهانی، استفاده از بیوچار¹ به‌عنوان اصلاح‌کننده آلی و ارزشمند در مقایسه با دیگر مواد آلی می‌باشد زیرا افزون بر بهبود در کیفیت خاک و محصولات کشاورزی (گلب و همکاران، 2016؛ ورهچین و همکاران، 2019)، با برتری نسبت به دیگر مواد آلی، سبب کاهش هدرروی عناصر غذایی و افزایش بازدهی (کاپور و همکاران، 2022)، کاهش گازهای گلخانه‌ای (وانگ و همکاران، 2022) و ترسیب کربن (بورل و همکاران، 2016؛ زانگ و همکاران، 2021) می‌شود.

بیوچار یک ترکیب جامد کربنی آلی و به نسبت پایدار است که از حرارت دادن زیست‌توده‌های آلی² (که عموماً بقایای مازاد در طبیعت است) در دمای بیش‌تر از 200 درجه سلسیوس تحت شرایط اکسیژن کم یا بدون اکسیژن تولید می‌شود (حسین و همکاران، 2021). قابلیت و گستردگی استفاده از بیوچار در کشاورزی به در دسترس بودن ترکیبات اولیه آن بر می‌گردد (گاروالهو و همکاران، 2016). از طرفی اثرگذاری بیوچار بستگی به ویژگی‌هایی هم‌چون دمای گرماکافت³ و مدت زمان گرماکافت، نوع ماده اولیه، مقدار و مدت زمان استفاده از آن در خاک و سرانجام ویژگی‌های بافت و کانی‌شناسی

¹ Biochar

² Biomass

³ Pyrolysis

اصلاح‌کننده آلی بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک- های مختلف و با هدف کمی‌سازی تأثیر مقدار، اندازه و منابع بیوچار (براساس بقایای گیاهی مازاد در دسترس استان فارس) بر هدایت هیدرولیکی اشباع دو خاک با بافت مختلف (از خاک‌های معمول آهکی و به نسبت فقیر از نظر ماده آلی که در استان فارس غالب می‌باشند)، انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال‌های 1398 تا 1399 در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در منطقه باجگاه با مختصات طول جغرافیایی $33^{\circ} 33'$ عرض جغرافیایی $52^{\circ} 36'$ و در ارتفاع 1810 متری از سطح دریا در دو خاک با بافت متفاوت و به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی انجام شد (برای هر بافت خاک آزمایش فاکتوریل جداگانه انجام شد).

نمونه‌برداری و آنالیز خاک

خاک‌های مورد مطالعه از دو بافت مختلف، شامل لوم رسی سیلتی (تهیه شده از سری دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز با مختصات طول جغرافیایی $33^{\circ} 33'$ و عرض جغرافیایی $52^{\circ} 36'$) و لوم شنی (تهیه شده از ایستگاه تحقیقات آبخوان‌داری کوثر واقع در منطقه گربایگان فسا با مختصات طول جغرافیایی $53^{\circ} 54'$ و عرض جغرافیایی $38^{\circ} 28'$) می‌باشد که از عمق 0 تا 25 سانتی‌متری خاک تهیه شده و پیش از نمونه‌برداری بافت آنها تعیین شده بود. برای نمونه‌های اولیه خاک برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی معمول با استفاده از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد (جدول 1). خاک‌های تهیه شده پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک شده و از الک 2 میلی‌متر عبور داده شدند.

تولید و آنالیز بیوچار

برای تولید بیوچار از بقایای برگ نخل و تفاله لیمو ترش استفاده شد. به این دلیل از بقایای حاصل از هرس برگ درختان نخل به‌عنوان تیمار اول و از پوست

ویژگی‌های خاک تأثیر معنی‌داری داشت، که بر این اساس تخریب ساختمانی منافذ بیوچار به‌وسیله پودر کردن آن، هم‌زمان سبب کاهش توانایی جذب آب و هدایت هیدرولیکی اشباع بیوچار شده بود.

اثرات افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های رس سیلتی، لوم سیلتی و شدیداً رسی (آجای و همکاران، 2016؛ وانگ و همکاران، 2018)، کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های شنی و آلی (تریفونیک و همکاران، 2018؛ یان و همکاران، 2021) و عدم تأثیر آن بر هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های رسی، لوم ریز و شنی (کستلینی و همکاران، 2015؛ وانگ و همکاران، 2021) در پاسخ به افزودن بیوچار به خاک گزارش شده است، که همگی دلالت بر رفتار منحصر به فرد هر بیوچار در هر خاک دارد. از طرفی از بیوچار در اصلاح خاک، به میزان اندکی در کشاورزی پیشرفته استفاده می‌شود (لیانگ و همکاران، 2016). از این رو طرح تشویق استفاده گسترده از بیوچار نیازمند کمی‌سازی اهمیت و سودمندی آن در خاک‌های با بافت‌های مختلف می‌باشد. افزون بر آن، استفاده از بیوچار به‌دلیل بهبود ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، در مناطق مستعد خشکسالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا در این مناطق بارندگی به‌عنوان منبع اصلی آب کشاورزی بسیار ناپایدار و غیر قابل اعتماد است (کاپور و همکاران، 2022) و بیوچار ضمن بهبود ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی به‌ویژه هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های با بافت مختلف، به‌دلیل داشتن سطوح ویژه زیاد، قابلیت استفاده از پساب را افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه بیوچار می‌تواند بر ویژگی‌های مختلف خاک از جمله هدایت هیدرولیکی اشباع مؤثر باشد و نوع و میزان تأثیر در خاک‌های با بافت‌های مختلف متفاوت می‌باشد.

از طرفی تاکنون اثر سطوح مختلف انواع بیوچار با اندازه‌های مختلف بر هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های مختلف بررسی نشده است. بنابراین این پژوهش با فرض تأثیر مثبت کاربرد بیوچار به‌عنوان ماده

طراحی آزمایش

هرکدام از بیوجارهای برگ نخل و تفاله لیمو به وسیله الک به سه کلاس اندازه ذرات کوچکتر از 0/8 میلی‌متر، 0/8 تا 2 میلی‌متر و 2 تا 4 میلی‌متر تفکیک شدند. هرکلاس اندازه ذرات بیوجار در پنج سطح کاربردی (نسبت وزنی ترکیبی بیوجار به خاک)، صفر (بدون افزودن بیوجار)، 0/5، 1، 2 و 4 درصد (0، 5، 10، 20، 40 گرم بر کیلوگرم) به هر کدام از خاک‌های بافت لوم رسی سیلتی و لوم شنی در سه تکرار اضافه شد (جدول 3). (به عبارت دیگر، تیمارها شامل دو نوع مختلف بیوجار، سه کلاس اندازه ذرات و پنج سطح کاربرد بیوجار است که به دو بافت خاک مختلف در سه تکرار اضافه شد، مجموع 180 گلدان). سپس به ازای هر گلدان، 4 کیلوگرم از خاک الک شده توزین شده و از هر کلاس اندازه ذرات با نسبت‌های وزنی مورد اشاره به خاک اضافه و به‌طور یکنواخت با خاک مخلوط و سرانجام به گلدان‌های پلاستیکی با وزن و ابعاد مشخص منتقل شدند. بیوجارهای اضافه شده به خاک به مدت 15 ماه از آذر 1398 لغایت اسفند 1399 در انکوباسیون گلخانه‌ای در دمای 22 الی 32 درجه سلسیوس (متغیر در فصول سال) و حدود 70 الی 80 درصد رطوبت وزنی ظرفیت مزرعه تحت آبیاری پیوسته قرار داشتند.

حاصل از آبیگری و فراوری لیمو ترش (تفاله لیمو ترش) به‌عنوان تیمار دوم استفاده شد که هر دو این بقایا به فراوانی در استان فارس به‌عنوان بقایای مازاد حاصل از فرآیندهای مرتبط با کشاورزی یافت می‌شوند و خاص این منطقه می‌باشد. در تهیه بیوجار، پس از شستن و هوا خشک نمودن بقایای اولیه به منظور همگن‌سازی، بقایا خرد و یکنواخت شدند (به منظور کاهش خطای گرماکافت). سپس درون ظروف درب‌دار فلزی ریخته شد و برای ایجاد شرایط کم یا بدون اکسیژن چندین شمع درون کوره الکتریکی و داخل ظروف فلزی روشن شد تا سطح اکسیژن درون کوره و ظروف به حداقل رسیده و شرایط برای انجام فرآیند گرماکافت آماده شود. بقایا در مجموع به مدت 3 ساعت با نرخ افزایش دمای 3 درجه سلسیوس در دقیقه تا دمای 500 درجه سلسیوس حرارت داده شد (لیانگ و همکاران، 2016). برخی ویژگی‌های بیوجار از جمله میزان کربن، نیتروژن و هیدروژن با دستگاه CHN Analyzer (مدل LEO 1455vp)، قابلیت هدایت الکتریکی و پ‌هاش اندازه‌گیری شدند (جدول 2).

جدول 1- برخی ویژگی‌های خاک‌های مطالعه شده

ظرفیت مزرعه (%)	کربن آلی (%)	جرم مخصوص ظاهری (g/cm ³)	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	ویژگی خاک	
						لوم شنی	لوم رسی سیلتی
28/68	0/27	1/47	8/50	33/78	57/72		
37/42	1/07	1/34	38/91	57/88	3/21		

جدول 2- برخی ویژگی‌های بیوجارهای مطالعه شده

قابلیت هدایت الکتریکی (dS/m)	پ‌هاش	بازدهی تولید (%)	هیدروژن (%)	نیتروژن (%)	کربن (%)	ویژگی بیوجار	
						بیوجار برگ نخل	بیوجار پوست لیمو
3/15	7/21	9/69	2/92	2/05	57/84		
6/80	9/59	22/76	2/98	2/94	65/34		

پ‌هاش و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره 1 به 10 بیوجار به آب اندازه‌گیری شده است.

جدول 3- مشخصات تیمارهای استفاده شده در این مطالعه

تیمار	حروف اختصاری	زیر کلاس	شرح حروف اختصاری
منابع بیوچار	NL	N	بیوچار برگ نخل
		L	بیوچار پوست لیمو
سطوح بیوچار	T	T1	سطح صفر درصد وزنی بیوچار (شاهد)
		T2	سطح 0/5 درصد وزنی بیوچار
		T3	سطح 1 درصد وزنی بیوچار
		T4	سطح 2 درصد وزنی بیوچار
		T5	سطح 4 درصد وزنی بیوچار
کلاس اندازه ذرات بیوچار	P	P1	کلاس اندازه ذرات بیوچار 4 - 2 میلی‌متر
		P2	کلاس اندازه ذرات بیوچار 2 - 0/8 میلی‌متر
		P3	کلاس اندازه ذرات بیوچار کوچک‌تر از 0/8 میلی‌متر

اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع

از خاک‌های تیمار شده با بیوچار به‌وسیله سیلندرهای استیل مخصوص با قطر 72 میلی‌متر و ارتفاع 50 میلی‌متر نمونه دست نخورده تهیه شد و از روش آزمایشگاهی بار ثابت برای خاک بافت لوم شنی و از روش بار افتان برای خاک بافت لوم رسی سیلتی (حسین و همکاران، 2021) استفاده شد. هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت از رابطه 1 بدست آمد:

$$K = \frac{V \times L}{A \times \Delta H \times \Delta T} \quad (1)$$

که در آن K هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر ساعت)، V حجم آب عبوری از ستون خاک (سانتی‌متر مکعب)، L طول ستون خاک (سانتی‌متر)، A سطح مقطع ستون خاک (سانتی‌متر مربع)، ΔH اختلاف گرادیان هیدرولیکی بین نقطه خروج آب و سطح آب ثابت شده روی خاک (سانتی‌متر) و ΔT بازه زمانی (ساعت) است.

همچنین هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار افتان از رابطه 2 بدست آمد:

$$K = \frac{2.3 \times a \times L}{A \times t} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

که در آن K هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر بر ساعت)، a سطح مقطع استوانه نگهدارنده

نمونه (سانتی‌متر مربع)، L طول نمونه خاک (سانتی‌متر)، A سطح مقطع نمونه (سانتی‌متر مربع)، t زمان لازم برای جریان آب به حجم مشخص (ساعت)، h_1 بار آبی در شروع آزمایش (سانتی‌متر) و h_2 بار آبی در خاتمه آزمایش (سانتی‌متر) است.

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری نتایج برای بررسی و میزان تأثیرگذاری تیمارهای مطالعه شده بر هدایت هیدرولیکی اشباع هر خاک با استفاده از نرم افزار آماری SAS انجام شد. مقایسه‌های میانگین مربوط به اثر هر یک از تیمارها در هر بافت خاک جداگانه انجام شد و هم-چنین برهم‌کنش اثرات تیمارهای بررسی شده با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان 95 درصد ($p < 0.05$) مقایسه شد.

نتایج و بحث

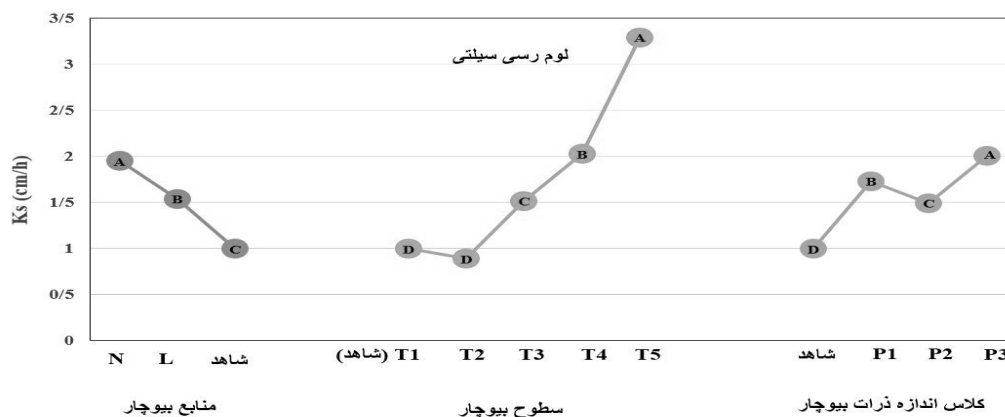
نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بیوچار بر هدایت هیدرولیکی اشباع در هر بافت خاک در جدول 4 آورده شده است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که در هر دو بافت لوم رسی سیلتی و لوم شنی اثر منابع بیوچار، سطوح وزنی و کلاس اندازه ذرات بیوچار در سطح آماری یک درصد معنی‌دار می‌باشد. هم‌چنین نتایج

برهم‌کنش در تیمارهای منابع بیوچار در سطوح آن هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک لوم رسی سیلتی مقایسه میانگین اثر تیمارها بر هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک لوم رسی سیلتی در شکل 1 آورده شده است. در هر دو بافت خاک در سطح آماری یک درصد معنی‌دار شد.

جدول 4- نتایج تجزیه واریانس اثر منابع، سطوح و کلاس اندازه ذرات بیوچار بر هدایت هیدرولیکی اشباع، K_{sat} (cm/h) برای هر کلاس بافت خاک به‌طور مجزا

میانگین مربعات		درجه آزادی	منابع تغییرات	
کلاس بافت خاک				
لوم رسی سیلتی	لوم شنی			
3/8130**	2/0037**	1	NL	منابع بیوچار
17/2160**	8/9535**	4	T	سطوح بیوچار
2/0145**	3/1396**	2	P	کلاس اندازه ذرات بیوچار
1/5422**	0/6464**	4	NL*T	برهم‌کنش منابع و سطوح بیوچار
0/0870 ^{ns}	0/1265 ^{ns}	2	NL*P	برهم‌کنش منابع و کلاس اندازه ذرات بیوچار
0/5740**	0/6942**	8	T*P	برهم‌کنش سطوح و کلاس اندازه ذرات بیوچار
0/0406 ^{ns}	0/1026 ^{ns}	8	NL*T*P	برهم‌کنش منابع، سطوح و کلاس اندازه ذرات بیوچار
0/1444	0/0757	60		خطا

*، ** ns به ترتیب نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال 1 درصد و عدم اختلاف معنی‌دار آماری می‌باشد.



شکل 1- اثر تیمارهای مختلف بر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat}) در خاک لوم رسی سیلتی (نقاطی که حداقل در یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال 5 درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

54 درصدی در هدایت هیدرولیکی اشباع خاک لوم رسی سیلتی شد. تفاوت در منافذ بیوچار و شکل ساختمانی بیوچار مختلف بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک اثر دارد (اوزما و همکاران، 2011). از طرفی با افزایش سطوح بیوچار صرف‌نظر از نوع بیوچار و کلاس اندازه ذرات

براساس نتایج به دست آمده، استفاده از بیوچار، هدایت هیدرولیکی اشباع را در خاک لوم رسی سیلتی به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد (عدم کاربرد بیوچار) افزایش داد. در حالت کلی، بیوچار برگ نخل سبب افزایش 96 درصدی و بیوچار پوست لیمو سبب افزایش

رسی سبب تبدیل منافذ ریز و متوسط (0/1-0/01 میکرومتر) به منافذ درشت (4-0/1 میکرومتر) می‌شود (وانگ و همکاران، 2017). نتایج مقایسه میانگین براساس کلاس اندازه ذرات بیوچار در خاک بافت لوم رسی سیلتی نشان داد که به‌طور کلی کلاس اندازه ذرات کوچکتر از 0/8 میلی‌متر بیش‌ترین و کلاس اندازه ذرات 2-0/8 میلی‌متر کم‌ترین تأثیر را در افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک لوم رسی سیلتی دارد. اختلاف بین کم‌ترین و بیش‌ترین اثرگذاری مرتبط با کلاس اندازه ذرات بیوچار در این خاک برابر 34 درصد می‌باشد. از طرفی ذرات بیوچار با کلاس اندازه 2-0/8 میلی‌متر در مقایسه با سایر اندازه ذرات، کم‌ترین میزان افزایش در هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بافت لوم رسی سیلتی را داشتند. ذرات کوچک‌تر بیوچار به‌دلیل سطح ویژه بیشتر نقش بیش‌تری در فرآیند خاکدانه‌سازی و ایجاد منافذ درشت و به تبع آن افزایش هدایت هیدرولیکی دارند، از طرفی ذرات بزرگ‌تر بیوچار به‌ویژه ذرات بیوچار بزرگ‌تر از ذرات تشکیل دهنده خاک، با آرایش و چیدمان ناهمگون منافذ خاک سبب افزایش هدایت هیدرولیکی می‌شوند.

به بیان ساده‌تر، از تقابل ذرات درشت بیوچار با خاک مجموعه‌ای از منافذ درشت و کانال‌های جریان ترجیحی آب ایجاد می‌شود (حسین و همکاران، 2021). در پژوهشی گزارش شد که ذرات بزرگ‌تر از 0/5 میلی‌متر در افزایش میزان تخلخل درشت در ارتباط بودند، که این افزایش تخلخل در نتیجه توزیع و آرایش ذرات بیوچار است و ارتباطی با منافذ داخلی ذرات بیوچار ندارد (هرات و همکاران، 2013). اثرگذاری ذرات ریز بیوچار (کلاس اندازه ذرات بسیار کوچک) در فراهمی شرایط فعالیت ریزجانداران اثرگذار است (سرفراز و همکاران، 2020). مقایسه میانگین برهم‌کنش دوجانبه (اثرات متقابل) به تفکیک نوع بیوچار در خاک لوم رسی سیلتی در جدول (5) آمده است. کم‌ترین و بیش‌ترین میزان هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک لوم رسی سیلتی به‌ترتیب مربوط به تیمار NT2P1 و NT5P3 می‌باشد. به‌طور

بیوچار، هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک با بافت لوم رسی سیلتی افزایش یافت. البته در کاربرد سطح 0/5 درصد وزنی بیوچار در مقایسه با شاهد (عدم کاربرد بیوچار) اثر معنی‌داری بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک مشاهده نشد، در حالی که کاربرد سطوح 1، 2 و 4 درصد وزنی بیوچار در مقایسه با شاهد سبب افزایش معنی‌دار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک لوم رسی سیلتی به‌ترتیب به میزان 51، 104 و 231 درصد شد (شکل 1). در دیگر پژوهش‌ها نیز افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع در اثر کاربرد بیوچار (هرات و همکاران، 2013؛ لیم و همکاران، 2016؛ وانگ و همکاران، 2017؛ اده و همکاران، 2020) گزارش شده است. به‌عنوان نمونه، کاربرد مقادیر 4، 8 و 16 مگاگرم در هکتار بیوچار، به‌ترتیب سبب افزایش 31، 51 و 176 درصدی در هدایت هیدرولیکی یک خاک لوم رسی شد (آسای و همکاران، 2009). هم‌چنین افزایش 82 تا 121 درصد، در هدایت هیدرولیکی اشباع خاک رسی سیلتی به‌ترتیب در کاربرد 1/25 تا 5 درصد وزنی بیوچار کود گاوی گزارش شد (قویلی و همکاران، 2018).

در یک فراتحلیل در کلاس‌های متنوعی از بافت سنگین خاک مشاهده شد که هدایت هیدرولیکی اشباع با افزایش بیوچار در دامنه 25 تا 328 درصد افزایش یافت که مقدار میانگین این تغییرات 98 درصد به‌دست آمد (بلانکو کانگی، 2017). بیوچار سبب اتصال ذرات رس و خاکدانه‌های ریز و ایجاد خاکدانه‌های بزرگ‌تر و پایدارتر می‌شود، سطوح اکسیده شده بیوچار همچون گروه‌های کربوکسیل و هیدروکسیل وظیفه این پیوند را بر عهده دارند (جین و وانگ، 2013). افزودن بیوچار سبب فراهمی و در دسترس بودن مواد آلی، افزایش ظرفیت نگهداشت آب و جذب عناصر غذایی می‌شود که در نتیجه فعالیت میکروبی را افزایش داده و تشکیل خاکدانه‌های بزرگ‌تر و پایدار را در پی دارد. از آنجا که در خاک‌های با بافت سنگین، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در ارتباط با منافذ درشت خاک است (هرات و همکاران، 2013) تغییرات در منافذ خاک در اثر کاربرد بیوچار در خاک

مربوط به تیمار T5P3 به میزان 166 درصد بیشتر از سطح صفر همان بیوچار مشاهده شد. مقایسه میانگین سطوح بیوچار برگ نخل و پوست لیمو ترش (NP*T) در خاک لوم رسی سیلتی نشان داد که در همه سطوح به استثنای سطح 0/5 درصد وزنی بیوچار، بیوچار برگ نخل عملکرد بهتری در افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک داشته است. به عبارتی در سطوح 1، 2 و 4 درصد وزنی بیوچار، میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع در استفاده از بیوچار برگ نخل به ترتیب 9، 45 و 48 درصد بیشتر از میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک تیمار شده با بیوچار پوست لیمو ترش در سطوح مشابه است.

میانگین کاربرد سطوح 1، 2 و 4 درصد وزنی بیوچار در خاک لوم رسی سیلتی سبب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع به ترتیب به میزان 58، 140 و 295 درصد در خاک تیمار شده با بیوچار برگ نخل و 45، 66 و 166 درصد در خاک تیمار شده با بیوچار پوست لیمو در مقایسه با سطح صفر (شاهد) شد. از طرفی اختلاف معنی دار آماری بین هدایت هیدرولیکی اشباع در تیمارهای سطوح صفر و 0/5 درصد وزنی در هر دو منبع بیوچار مشاهده نشد. بیشترین افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع در کاربرد بیوچار برگ نخل مربوط به تیمار T5P3 به میزان 399 درصد بیشتر از سطح صفر همان بیوچار و در بیوچار پوست لیمو

جدول 5- اثر سطوح و کلاس اندازه ذرات بیوچارهای مورد استفاده بر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat} (cm/h)) در خاک لوم رسی سیلتی

میانگین	سطوح (درصد وزنی)					کلاس اندازه ذرات بیوچار (میلی متر)	
	T5 (4)	T4 (2)	T3 (1)	T2 (0/5)	T1 (0)		
بیوچار برگ نخل (N)							
1/915 ^{BA}	3/686 ^b	2/508 ^{cde}	1/662 ^{fghe}	0/725 ⁱ	0/995 ^{*ghi}	P1	(2-4)
1/654 ^B	3/147 ^{cb}	2/085 ^{fde}	1/278 ^{fghe}	0/765 ^{hi}	0/995 ^{ghi}	P2	(0/8-2)
2/275 ^A	4/962 ^a	2/602 ^{cd}	1/783 ^{fgde}	1/031 ^{ghi}	0/995 ^{ghi}	P3 (کوچکتر از 0/8)	
	3/932 ^A	2/398 ^B	1/574 ^C	0/840 ^D	0/995 ^D	میانگین	
بیوچار پوست لیمو (L)							
1/539 ^B	2/657 ^b	1/610 ^{dce}	1/566 ^{de}	0/868 ^f	0/995 ^f	P1	(2-4)
1/327 ^C	2/008 ^c	1/525 ^{de}	1/263 ^{fe}	0/846 ^f	0/995 ^f	P2	(0/8-2)
1/742 ^A	3/290 ^a	1/824 ^{dc}	1/517 ^{de}	1/084 ^f	0/995 ^f	P3 (کوچکتر از 0/8)	
	2/652 ^A	1/653 ^B	1/449 ^B	0/932 ^C	0/995 ^C	میانگین	

* در مورد هر بیوچار، میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون حداقل در یک حرف آماری بزرگ و اعدادی که در بدنه جدول حداقل در یک حرف آماری کوچک مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال 5 درصد اختلاف معنی دار ندارند.

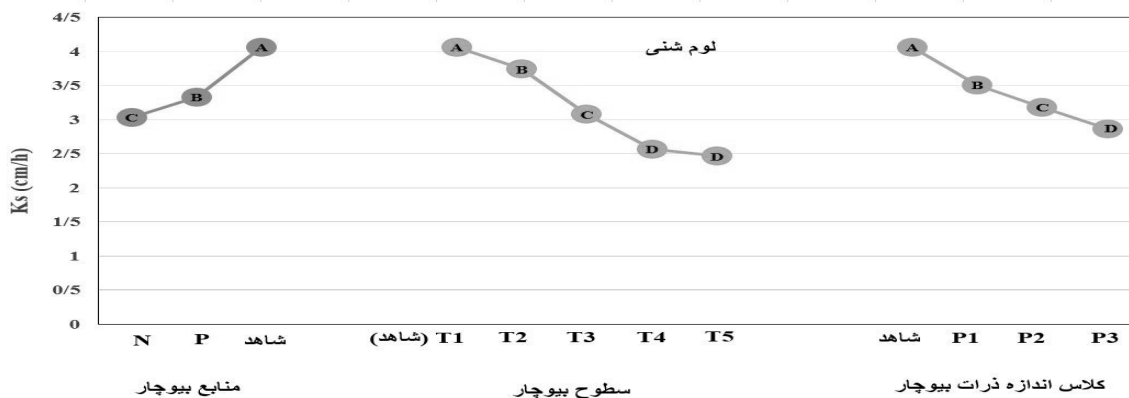
هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک لوم شنی

شکل 2، اثر تیمارها بر هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک لوم شنی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که استفاده از بیوچار، هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک لوم شنی را کاهش داده، که میزان کاهش هدایت هیدرولیکی در کاربرد بیوچار برگ نخل و پوست لیمو ترش در مقایسه با عدم کاربرد بیوچار به ترتیب 34 و 22 درصد است. ذرات بیوچار که به شکل صفحه‌ای هستند به نسبت ذرات کروی و درشت، بیشتر و راحت‌تر در درون منافذ و

اختلاف در میزان هدایت هیدرولیکی اشباع ناشی از منابع مختلف بیوچار، اهمیت انتخاب منبع بیوچار کارا تر به منظور کاهش هزینه و افزایش بازدهی و کارایی را پررنگ‌تر می‌کند. از سوی دیگر انتخاب توزیع متناسب کلاس اندازه ذرات بیوچار در سطوح قابل قبول بیوچار در مدیریت هزینه و افزایش راندمان و بهره‌وری بسیار اثرگذار است. یکی از چالش‌های پیش روی کشاورزی مدرن و کارا در بحث اصلاح ساختار فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، انتخاب نوع، سطوح و اندازه ذرات مناسب بیوچار است.

گزارش شده است. در یک مطالعه فراتحلیل از خاک‌های درشت بافت، گزارش شد که کاربرد بیوچار در خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع را به میزان 7 تا 2270 درصد کاهش داد، که میانگین این تغییرات 392 درصد گزارش شده است (بلانکو کانگو، 2017). هم‌چنین از نتایج شکل 2 چنین استنتاج می‌شود که در شرایط یکسان با کاهش کلاس اندازه ذرات بیوچار، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک لوم شنی کاهش می‌یابد، به طوری که اختلاف این کاهش مابین بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین کلاس اندازه ذرات بیوچار برابر 23 درصد است. در پژوهشی گزارش شده استفاده از بیوچار با اندازه ذرات ریز (کوچکتر از 0/251 میلی‌متر) و درشت (2 - 0/825 میلی‌متر) به ترتیب سبب کاهش 72 و 15 درصدی هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک شنی شده است (لیو و همکاران، 2016)

کانال جریان ترجیحی خاک قرار می‌گیرند (گیتینجی، 2014؛ نواک و همکاران، 2016). هم‌چنین با افزایش سطوح بیوچار صرف‌نظر از نوع بیوچار و کلاس اندازه ذرات بیوچار، هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک لوم شنی کاهش پیدا کرد. به‌طور کلی کاربرد سطوح 0/5، 1، 2 و 4 درصد وزنی بیوچار در مقایسه با شاهد سبب کاهش معنی‌دار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک لوم شنی به ترتیب به میزان 9، 32، 58 و 65 درصد شد. از طرفی، میزان کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع بین کاربرد سطوح 2 و 4 درصد وزنی بیوچار از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل 2). کاهش در هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های بافت درشت در اثر کاربرد بیوچار در تحقیقات سایر محققان (لیم و همکاران، 2016؛ زانگ و همکاران، 2016؛ ابراهیم و همکاران، 2017؛ ویلاگرا مندوزا و همکاران، 2018؛ بایمونده و همکاران، 2019؛ گلوبا و همکاران، 2021) نیز



شکل 2- اثر تیمارهای مختلف بر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat}) در خاک لوم شنی (نقاطی که حداقل در یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال 5 درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع کاهش می‌یابد که این میزان کاهش در مقایسه با سطح صفر (شاهد) برای سطوح 0/5، 1، 2 و 4 درصد وزنی از بیوچار برگ نخل به ترتیب برابر 19، 34، 49 و 103 درصد می‌باشد. از طرفی میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع در سطوح بیوچار پوست لیموترش رفتاری متفاوت با بیوچار برگ نخل از خود نشان داد، به طوری که در کاربرد بیوچار پوست لیمو ترش

با توجه به نتایج جدول 6 که مقایسه میانگین برهم‌کنش تیمارها به تفکیک نوع بیوچار در خاک لوم شنی را نشان می‌دهد، مشاهده شد که بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع مربوط به سطوح صفر (شاهد) و 5 درصد وزنی از کلاس اندازه 2-4 میلی‌متر بیوچار پوست لیمو است (LT5P2). مقایسه میانگین در بیوچار نخل نشان داد که با افزایش سطوح بیوچار،

2 و 4 درصد از کاربرد بیوچار برگ نخل و پوست لیمو ترش، میزان کاهش میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع در تیمارهای بیوچار برگ نخل به ترتیب 12، 4 و 3 و 64 درصد بیش تر از بیوچار پوست لیمو ترش بود. از آنجا که هدایت هیدرولیکی اشباع بستگی به اندازه، شکل، توزیع و پیوستگی منافذ دارد (اده و همکاران، 2020)، ذرات ریز بیوچار می‌توانند درون منافذ بزرگ خاک (منافذ عبور جریان آب) قرار گیرند و سبب کوچک تر شدن منافذ درشت خاک و ایجاد منافذ ریز (منافذ ذخیره آب) شوند که سرانجام افزایش توان نگهداشت آب در خاک را به دنبال دارد (تریفونویک و همکاران، 2018؛ گلوبا و همکاران، 2021). ذرات آلی بیوچار ممکن است پیوند بین ذرات بزرگ تر را بهبود ببخشند و تخلخل درشت و کانال‌های جریان آب را کاهش می‌دهد (بورل و همکاران، 2016؛ حسین و همکاران، 2021).

با افزایش سطح تا میزان 2 درصد وزنی، هدایت هیدرولیکی رفتار کاهش نشان داد و با افزایش سطح از 2 درصد به 4 درصد وزنی، نه تنها هدایت هیدرولیکی در خاک لوم شنی کاهش پیدا نکرد بلکه مقداری افزایش یافت، که اختلاف معنی داری با سطح 2 درصد وزنی نداشت. در نتایج مشابه حسین و همکاران (2021) گزارش کردند که استفاده از 15 درصد بیوچار با اندازه ذرات 4-2/75 میلی‌متر سبب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک شنی شد، در صورتی که در سطح مشابه با کلاس اندازه ذرات بیوچار 0/075-0/150 میلی‌متر، کاهش در هدایت هیدرولیکی گزارش شده بود. میزان کاهش در میانگین هدایت هیدرولیکی در کاربرد بیوچار پوست لیمو ترش در سطوح 0/5، 1، 2 و 4 درصد وزنی به نسبت سطح صفر (شاهد) به ترتیب برابر 7، 30، 46 و 39 درصد به دست آمد. به بیان دیگر، در سطوح 0/5، 1،

جدول 6- اثر سطوح و کلاس اندازه ذرات بیوچارهای مورد استفاده بر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat} (cm/h) در خاک لوم شنی

میانگین	سطوح (درصد وزنی)					کلاس اندازه ذرات بیوچار (میلی‌متر)	
	T5 (4)	T4 (2)	T3 (1)	T2 (0/5)	T1 (0)		
بیوچار برگ نخل (N)							
3/319 ^A	2/738 ^c	2/619 ^c	3/386 ^b	3/766 ^{ba}	4/063 ^{*a}	P1	(2 - 4)
2/998 ^B	1/864 ^{fe}	2/395 ^{dc}	2/916 ^c	3/754 ^{ba}	4/063 ^a	P2	(0/8 - 2)
2/787 ^B	1/413 ^f	2/102 ^{de}	2/784 ^c	3/576 ^{ba}	4/063 ^a	P3	(کوچکتر از 0/8)
	2/005 ^E	2/732 ^D	3/036 ^C	3/699 ^B	4/063 ^A		میانگین
بیوچار پوست لیمو (L)							
3/699 ^A	3/839 ^{ba}	3/407 ^{bc}	3/409 ^{bc}	3/775 ^{ba}	4/063 ^a	P1	(2 - 4)
3/365 ^B	3/111 ^{dc}	2/745 ^d	3/111 ^{dc}	3/797 ^{ba}	4/063 ^a	P2	(0/8 - 2)
2/936 ^C	1/889 ^e	2/145 ^e	2/859 ^d	3/784 ^{ba}	4/063 ^a	P3	(کوچکتر از 0/8)
	2/926 ^{DC}	2/766 ^D	3/126 ^C	3/785 ^B	4/063 ^A		میانگین

* در مورد هر بیوچار، میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون حداقل در یک حرف آماری بزرگ و اعدادی که در بدنه جدول حداقل در یک حرف آماری کوچک مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال 5 درصد اختلاف معنی دار ندارند.

هدایت هیدرولیکی اشباع بین این دو کلاس اندازه ذرات، در بیوچار برگ نخل و پوست لیمو ترش به ترتیب برابر 19 و 26 درصد است. در سایر پژوهش‌ها اثرپذیری ریزترین کلاس اندازه ذرات در مقایسه با سایر سطوح در کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع گزارش شده است (حسین و همکاران، 2021؛ گلوبا و همکاران، 2021).

مقایسه میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع بر اساس کلاس اندازه ذرات نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان کاهش هدایت هیدرولیکی هم در بیوچار برگ نخل و هم در بیوچار پوست لیمو ترش به ترتیب مربوط به کلاس اندازه ذرات کوچکتر از 0/8 میلی‌متر و کلاس اندازه 2-4 میلی‌متر است، که نسبت اختلاف میانگین

نتیجه‌گیری

نتایج کلی پژوهش نشان داد که استفاده از بیوچار به‌عنوان منبع پایدار کربن سبب بهبود هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک شد، بدین‌صورت که استفاده از بیوچار برگ نخل و تفاله لیمو ترش در خاک لوم رسی سیلتی به‌ترتیب سبب افزایش میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع به میزان 96 و 54 درصد و همچنین در خاک بافت لوم شنی سبب کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع به میزان 34 و 22 درصد نسبت به عدم کاربرد بیوچار شد. نتایج، گویای عملکرد بهتر بیوچار برگ نخل در مقایسه با بیوچار پوست لیمو ترش در هر دو بافت خاک از نظر اثر بر هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشد. اهمیت اصلاح هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با کاربرد بیوچار از آن-جایی پرنگ‌تر می‌شود که عموماً خاک‌های بافت سنگین مشکل زهکشی و فرسایش خاک دارند و نیاز به افزایش سرعت جریان آب درون خاک می‌باشد و در خاک‌های بافت سبک که عموماً مناطق خشک و نیمه خشک را شامل می‌شود، دسترسی به منابع آبی پایدار محدود بوده و کاهش تخلخل درشت خاک و افزایش ظرفیت نگهداشت آب، یا به عبارت کلی‌تر، کاهش شدت جریان آب در خاک، در اولویت اصلاح ساختار خاک می‌باشد. لذا، تشکیل خاکدانه‌های بزرگ در خاک‌های اصلاح شده با بیوچار عاملی اساسی در بهبود ویژگی‌های هیدرولیکی در خاک بافت سنگین و کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک بافت سبک در نتیجه تبدیل منافذ درشت به منافذ ریز از طریق پر شدن منافذ است. پیشنهاد می‌شود علاوه بر اثرات مورد مطالعه، اثرات زمانی و اثرات پارامترهای مبتنی بر فرآیند تولید همچون دما و مدت زمان گرماکافت به‌طور هم‌زمان و همچنین بقایای گیاهی بومی هر منطقه، بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک بررسی شود تا اطلاعات جامع‌تری از مقادیر بهینه بیوچار و رفتار بیوچار به منظور اصلاح خاک حاصل شود.

همچنین زانگ و همکاران (2016) گزارش کردند استفاده از ذرات پودری بیوچار به میزان بیش‌تری از ذرات با قطر 5-8 میلی‌متر، هدایت هیدرولیکی اشباع را کاهش می‌دهد. لبرون و همکاران (2018) نیز گزارش کردند که افزایش اندازه ذرات بیوچار، کاهش ظرفیت نگهداشت آب در خاک را در بردارد که اثرگذاری در کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع را تقلیل می‌دهد. از طرفی در پژوهشی دیگر، لیم و همکاران (2016) بیان کردند که به‌طور کلی بیوچار با اندازه بزرگ (60 درصد ذرات بیوچار با قطر بیش‌تر از یک میلی‌متر) نسبت به اندازه ذرات کوچک (60 درصد ذرات بیوچار با قطر کمتر از یک میلی‌متر) به میزان بیشتری به کاهش هدایت هیدرولیکی در خاک شنی منجر می‌شود.

نتایج جدول 6 نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع متأثر از بیوچار برگ نخل در تیمار T3P3 از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با تیمارهای T4P2 و T5P1 ندارد. مشابه همین رفتار در بیوچار پوست لیمو ترش مشاهده شد، به گونه‌ای که تیمارهای T3P3 و T4P2 اختلاف معنی‌دار آماری در کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع نداشته‌اند. همچنین در تیمار T5P1 از بیوچار پوست لیمو ترش علی‌رغم افزایش سطح بیوچار به میزان 4 برابر (400 درصد) نسبت به سطح T3P3، نه تنها هدایت هیدرولیکی اشباع کاهش پیدا نکرد، بلکه افزایش نیز یافت.

نتایج حاصل از پژوهش اهمیت انتخاب بهینه در پارامترهای بیوچار از منظر نوع بیوچار، سطوح و کلاس اندازه ذرات بیوچار به منظور کاهش هزینه‌های مدیریت خاک و افزایش بهره‌وری و بازدهی را نمایان می‌نماید. فاضلی و همکاران (2020) نشان دادند که اندازه ذرات بیوچار از طریق فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی می‌تواند بر تعامل بیوچار با محیط تحت تأثیر در ارتباط باشد. آنان نتیجه گرفتند که اقدامات بعد از گرماکافت از جمله کلاس‌بندی ذرات بیوچار می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد آن برای یک کاربرد ویژه منجر شود.

فهرست منابع:

1. Ajayi, A. E., Holthusen, D. and Horn, R. (2016). Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils. *Soil and Tillage Research*, 155: 166–175.
2. Asai, H., Samson, B. K., Stephan, H. M., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., ... and Horie, T. (2009). Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research*, 111(1-2): 81-84.
3. 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.
4. Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4): 687-711.
5. 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.
6. Carvalho, M. T. M., Madari, B. E., Bastiaas, L., Van Oort, P. A. J., Leal, W. G. O., Heinemann, A. B., Da Silva, M. A. S., Maia, A. H. N., Parsons, D. and Meinke, H. (2016). Properties of a clay soil from 1.5 to 3.5 years after biochar application and the impact on rice yield. *Geoderma*, 276: 7-18.
7. Castellini, M., Giglio, L., Niedda, M., Palumbo, A. D. and Ventrella, D. (2015). Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. *Soil and Tillage Research*, 154: 1-13.
8. Edeh, I. G., Mašek, O. and Buss, W. (2020). A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties—New insights and future research challenges. *Science of the Total Environment*, 714: 136857.
9. Gavili, E., Moosavi, A. A. and Moradi, F. (2018). Assessing cattle manure biochar potential for ameliorating physical soil features and spinach responses under drought stress conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(12): 1714-27.
10. Githinji, L. (2014). Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(4), 457-470.
11. Głąb, T., Palmowska, J., Zaleski, T. and Gondek, K. (2016). Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. *Geoderma*, 281: 11–20.
12. Gluba, Ł., Rafalska-Przysucha, A., Szewczak, K., Łukowski, M., Szlązak, R., Vitková, J., ... and Usowicz, B. (2021). Effect of Fine Size-Fractionated Sunflower Husk Biochar on Water Retention Properties of Arable Sandy Soil. *Materials*, 14(6): 1335.
13. Herath, H. M. S. K., Camps-Arbestain, M., and Hedley, M. (2013). Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol. *Geoderma*, 209: 188-197.
14. Hussain, R., Ghosh, K. K. and Ravi, K. (2021). Influence of biochar particle size on the hydraulic conductivity of two different compacted engineered soils. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-11.
15. Ibrahim, A., Usman, A. R. A., Al-Wabel, M. I., Nadeem, M., Ok, Y. S. & Al-Omran, A. (2017). Effects of conocarpus biochar on hydraulic properties of calcareous sandy soil: influence of particle size and application depth. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(2): 185-197.
16. Jien, S. H. and Wang, C. S. (2013). Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*, 110: 225–233.
17. Kapoor, A., Sharma, R., Kumar, A. and Sepehya, S. (2022). Biochar as a means to improve soil fertility and crop productivity: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 1-9.
18. Lal, R. (2004). Carbon sequestration in dry land ecosystems. *Environmental Management*, 33: 528–544.

19. Lebrun, M., Miard, F., Nandillon, R., Hattab-Hambli, N., Scippa, G. S., Bourgerie, S. and Morabito, D. (2018). Eco-restoration of a mine technosol according to biochar particle size and dose application: study of soil physico-chemical properties and phytostabilization capacities of *Salix viminalis*. *Journal of Soils and Sediments*, 18(6): 2188-2202.
20. Liang, C., Gasco, G., Fu, S., Mendez, A., and Paz-Ferreiro, J. (2016). Biochar from pruning residues as a soil amendment: Effects of pyrolysis temperature and particle size. *Soil and Tillage Research*, 164: 3-10.
21. Lim, T. J., Spokas, K. A., Feyereisen, G. and Novak, J. M. (2016). Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere*, 142: 136-144.
22. Liu, Z., Dugan, B., Masiello, C. A., Barnes, R. T., Gallagher, M. E. and Gonnermann, H. (2016). Impacts of biochar concentration and particle size on hydraulic conductivity and DOC leaching of biochar-sand mixtures. *Journal of Hydrology*, 533: 461-472.
23. Lychuk, T. E., Izaurrealde, R. C., Hill, R. L., McGill, W. B. and Williams, J. R. (2015). Biochar as a global change adaptation: predicting biochar impacts on crop productivity and soil quality for a tropical soil with the Environmental Policy Integrated Climate (EPIC) model. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20(8): 1437-1458.
24. Moradi-Choghamarani, F., Moosavi, A. A., Sepaskhah, A. R. and Baghernejad, M. (2019). Physico-hydraulic properties of sugarcane bagasse-derived biochar: the role of pyrolysis temperature. *Cellulose*, 26(12): 7125-7143.
25. Novak, J., Sigua, G., Watts, D., Cantrell, K., Shumaker, P., Szogi, A., ... and Spokas, K. (2016). Biochars impact on water infiltration and water quality through a compacted subsoil layer. *Chemosphere*, 142: 160-167.
26. Sangani, M. F., Abrishamkesh, S. and Owens, G. (2020). Physicochemical characteristics of biochars can be beneficially manipulated using post-pyrolyzed particle size modification. *Bioresource Technology*, 306: 123-157.
27. Sarfraz, R., Yang, W., Wang, S., Zhou, B. and Xing, S. (2020). Short term effects of biochar with different particle sizes on phosphorous availability and microbial communities. *Chemosphere*, 256: 126862.
28. Trifunovic, B., Gonzales, H. B., Ravi, S., Sharratt, B. S. and Mohanty, S. K. (2018). Dynamic effects of biochar concentration and particle size on hydraulic properties of sand. *Land Degradation & Development*, 29(4): 884-893.
29. Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A. and Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management*, 27(2): 205-212.
30. Van Dijk, M., Morley, T., Rau, M. L. and Saghai, Y. (2021). A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nature Food*, 2(7): 494-501.
31. Verheijen, F. G., Zhuravel, A., Silva, F. C., Amaro, A., Ben-Hur, M., and Keizer, J. J. (2019). The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment. *Geoderma*, 347: 194-202.
32. Villagra-Mendoza, K. and Horn, R. (2018). Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils. *Geoderma*, 326: 88-95.
33. Wang, K., Zhang, X., Sun, C., Yang, K., Zheng, J. and Zhou, J. (2021). Biochar application alters soil structure but not soil hydraulic conductivity of an expansive clayey soil under field conditions. *Journal of Soils and Sediments*, 21(1): 73-82.
34. Wang, M., Moore, T. R., Talbot, J. and Riley, J. L. (2015). The stoichiometry of carbon and nutrients in peat formation. *Global Biogeochemical Cycles*: 29, 1–9.

35. Wong, J. T. F., Chen, Z., Chen, X., Ng, C. W. W. and Wong, M. H. (2017). Soil-water retention behavior of compacted biochar-amended clay: a novel landfill final cover material. *Journal of Soils and Sediments*, 17(3): 590-598.
36. Wong, J. T. F., Chen, Z., Wong, A. Y. Y., Ng, C. W. W. and Wong, M. H. (2018). Effects of biochar on hydraulic conductivity of compacted kaolin clay. *Environmental Pollution*, 234: 468-472.
37. Wong, J. T. F., Chow, K. L., Chen, X. W., Ng, C. W. W. and Wong, M. H. (2022). Effects of biochar on soil water retention curves of compacted clay during wetting and drying. *Biochar*, 4(1): 1-14.
38. Yan, Y., Nakhli, S. A. A., Jin, J., Mills, G., Willson, C. S., Legates, D. R., ... and Imhoff, P. T. (2021). Predicting the impact of biochar on the saturated hydraulic conductivity of natural and engineered media. *Journal of Environmental Management*, 295: 113143.
39. 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.
40. Zhang, Y., Wang, J. and Feng, Y. (2021). The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: A review. *Catena*, 202: 105284.

Effect of Particle Size, Amounts, and Sources of Biochar on Saturated Hydraulic Conductivity in Two Texturally Different Soils

A. Yekzaban, A. A. Moosavi¹, A. M. Sameni, and M. Rezaei

Ph.D. Student, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran; E-mail: a.yekzaban@gmail.com

Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
E-mail: aamousavi@gmail.com

Associate Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran; E-mail: majid.baba@gmail.com

Assistant Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran; E-mail: mahrooz.rezaei@gmail.com

Received: July, 2022, and Accepted: August, 2022

Abstract

Biochar application to agricultural soils has been proposed as a way to increase crop production by improving soil properties. The present study aimed to investigate the effects of sources, amounts, and particle sizes of biochar on saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) in two silty clay loam and sandy loam soils. In this study, palm leaf and lemon peel biochars were pyrolyzed at 500 °C for 3h. The obtained biochar was sorted into three particle sizes of ≤ 0.8 , 0.8-2, and 2-4 mm, mixed into the soils at rate of 0.5%, 1%, 2%, and 4%wt, and incubated in a research glasshouse of Shiraz University for 15 months (2019 to 2020). Results showed that the application of 0.5%, 1%, 2%, and 4% of biochar caused a significant decrease in the mean value of K_{sat} in sandy loam by about 9%, 32%, 58%, and 65%, respectively, and also caused significant increase in the silty clay loam soil (except for 0.5%) by about 51%, 104%, and 231%, respectively, as compared to the control. Compared to lemon peel biochar, palm leaf biochar caused a significant increase in K_{sat} by 42% in the silty clay loam soil, but a significant decrease by 12% in the sandy loam soil. Furthermore, greater effects of the K_{sat} in both soils were observed after application of the fine size fraction of biochar (< 0.8 mm). The highest increase of K_{sat} in the silty clay loam soil and the highest decrease of K_{sat} in the sandy loam soil was observed in the soils treated by 4% of palm leaf biochar with particle size of smaller than 0.8 mm. In general, the results of this study can be used as a guide for selecting the amount and size of the applied biochar in terms of their effects on soil saturated hydraulic conductivity.

Keyword: Soil amendment, Palm leaf, Lemon peel, Sandy loam, Silty clay loam

¹ Corresponding Author: Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.