

بررسی اثر زمان در کاربرد بیوچار کاه و کلش برنج بر ضرایب رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک لوم رسی

فاطمه طادی بنی^{۱*}، احمد کریمی^۲ و حسن اصولی^۳

چکیده

بیوچار یک ترکیب آلی غنی از کربن است که در فرایند گرماکافت تولید شده و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را بهبود می‌بخشد. در زمینه اثر زمان در کاربرد بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک تحقیقات چندانی صورت نگرفته‌است. این پژوهش با هدف بررسی نقش زمان در کاربرد کاه و کلش برنج و بیوچار حاصل از آن بر ضرایب رطوبتی خاک (FC، PWP و PAWC) و هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) در خاک لوم رسی انجام گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل با فاکتورهای اصلاح‌کننده بیوچار در سطح صفر (شاهد C)، $0/5$ ، 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، 5 درصد (B_1)، 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، 5 درصد (B_2)، 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، 5 درصد (B_3) درصود وزنی و اصلاح‌کننده کاه و کلش برنج در سطح صفر (شاهد C)، $0/5$ ، 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، 5 درصد (D_1)، 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، 5 درصد (D_2)، 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، 5 درصد (D_3) درصود وزنی و فاکتور زمان در چهار سطح 2 (T_1)، 3 (T_2)، 6 (T_3) و 9 (T_4) ماه پس از افزودن اصلاح‌کننده‌ها به خاک در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار به صورت آزمایش گلخانه‌ای انجام شد. نتایج نشان داد که اثر اصلی و متقابل تیمارها اثر معنی‌داری بر ویژگی‌های مورد مطالعه دارد. با افزودن بیوچار ویژگی‌هایی از قبیل رطوبت ظرفیت مزرعه (۱۶ درصد)، آب قابل استفاده گیاه (۶۰ درصد) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (۶۸ درصد) در زمان اول، افزایش یافت. ویژگی‌هایی مثل نقطه پژمردگی دائم (۱۳ درصد) نسبت به شاهد در زمان اول، کاهش پیدا کرد. افزودن کاه و کلش برنج ویژگی‌هایی از قبیل رطوبت ظرفیت مزرعه (۱۲ درصد)، آب قابل استفاده گیاه (۳۹ درصد) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (۴۰ درصد) نسبت به شاهد در زمان اول، افزایش داد و ویژگی‌هایی مثل نقطه پژمردگی دائم (۶ درصد)، نسبت به شاهد در زمان اول، کاهش یافت. با بررسی مقایسه میانگین‌ها بیشترین FC، PAWC و K_s و کمترین PWP در تیمار B_3T_1 مشاهده شد. افزودن بیوچار به خاک می‌تواند یکی از روش‌های مدیریت و اصلاح خاک محسوب شود و برای افزایش پایداری ماده آلی خاک و بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آب قابل استفاده گیاه، رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت نقطه پژمردگی دائم، هدایت هیدرولیکی اشباع.

ارجاع: طادی بنی ف. کریمی ا. و اصولی ح. ۱۴۰۱. بررسی اثر زمان در کاربرد بیوچار کاه و کلش برنج بر ضرایب رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک لوم رسی. مجله پژوهش آب ایران. ۴۵: ۸۹-۸۱. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.13769.2381>

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

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

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

* نویسنده tadi.beni@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۹

مقدمه

(۲۰۲۱) نشان داد که بیوپچار تمایل به بهبود حفظ آب در خاک دارد و این باعث می‌شود آب موجود در گیاهچه با افزایش بیوپچار افزایش یافته و آب قابل‌استفاده گیاه در خاک لوم‌سیلتی افزایش پیدا کند. ذرات ریز بیوپچار، چون سطح ویژه بالایی دارند، منافذ درشت خاک را مسدود می‌کنند و بسته به نوع خاک هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را تغییر می‌دهد. نتایج تحقیق عیسوند رجبی و همکاران (۱۳۹۹) نشان داد که کاربرد ۲ درصد وزنی بیوپچار حاصل از کود گاوی و نیشکر بیشترین تأثیر را بر افزایش FC، PWP، PAWC و هدایت هیدرولیکی اشباع^۵ (K_s) داشت. در پژوهشی دیگر هدایت هیدرولیکی اشباع با افزودن بیوپچار به خاک تا ۲۵ درصد افزایش نشان داد که این اثرات در خاک‌های با بافت درشت بیشتر از خاک‌های با بافت ریز بوده است (بیامونته و همکاران، ۲۰۱۹). نتایج تحقیق نسیمی و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد که افزودن بیوپچار در درازمدت موجب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌شود. یکی از علل افزایش K_s با افزودن بیوپچار به خاک، این است که بیوپچار می‌تواند باعث افزایش منافذ درشت (بزرگ‌تر از ۳۰ میکرون) شود که این منافذ بیشترین نقش را در انتقال آب دارند و افزایش آن‌ها سبب افزایش K_s می‌شود. در مطالعات انجام‌شده اثر بیوپچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، بیشتر اثر نوع و مقدار بیوپچار بررسی شده، اما تحقیقات زیادی درباره اثر زمان در تأثیر بیوپچار روی ویژگی‌ها انجام نشده است. با توجه به اینکه در حدود ۱۸ استان برنج کشت می‌شود، پس مقادیر قابل‌توجهی کاه و کلش حاصل از کشت برنج قابل‌استحصال است که می‌توان از آن به عنوان ماده اولیه برای تولید بیوپچار استفاده کرد؛ بنابراین در این پژوهش اثر کاربرد کاه و کلش برنج و بیوپچار حاصل از آن بر ضرایب رطوبتی (FC، PWP و PAWC) و هدایت هیدرولیکی اشباع در یک خاک لوم رسی در طی دوره‌های زمانی مختلف به صورت آزمایش گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت.

بیوپچار از ادغام دو واژه بیومس (biomass) به معنای زیست‌توده و چارکول (charcoal) به معنای زغال، تشکیل شده است. بیوپچار ترکیب آلی غنی از کربن است که از طریق تجزیه گرمایی هر نوع زیست‌توده تحت شرایط بدون اکسیژن یا حضور جزئی آن که در اصطلاح به آن گرماکافت^۱ گفته می‌شود، به دست می‌آید (لهمان و همکاران، ۲۰۰۹). با توجه به پایداری بیوپچار در مقابل تجزیه میکروبی و زمان ماندگاری طولانی آن در خاک، مصرف بیوپچار باعث افزایش میزان مواد آلی خاک به مدت طولانی و در نتیجه بهبود ویژگی‌های خاک، مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شود. اثرات اصلاحی بیوپچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، شرایط گرماکافت، نوع ماده آلی اولیه، نوع خاک و میزان مصرف بیوپچار بستگی دارد (آندرنلی و همکاران، ۲۰۱۶). بررسی تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک با گذشت زمان پس از کاربرد بیوپچار، برای تعیین چگونگی تغییر اثرات بیوپچار ضروری است (یلنکوکنکوی، ۲۰۱۷). در همین زمینه رزاقی و همکاران (۲۰۲۰) در یک خاک شنی تحقیقی انجام دادند که نتایج آن‌ها نشان داد مقادیر بالاتر کاربرد بیوپچار باعث افزایش بیشتری در ضرایب رطوبتی خاک می‌شود. رطوبت ظرفیت مزرعه^۲ (FC) و رطوبت نقطه پژمردگی دائم^۳ (PWP) پس از کاربرد بیوپچار بهبود یافته‌اند (لیو و همکاران، ۲۰۱۷؛ رزاقی و همکاران، ۲۰۲۰). در پژوهشی رابی و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که استفاده از بیوپچار در سطوح بالا مثلاً بالای ۵۰ تن در هکتار FC، PWP و رطوبت قابل‌استفاده گیاه^۴ (PAWC) را در مقایسه با سطوح پایین آن در انواع مختلف خاک در آزمایشات صحرائی و آزمایشگاهی افزایش می‌دهد. کاربرد بیوپچار برگ خرما در یک خاک لوم‌رسی شنی باعث افزایش رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی و آب قابل‌دسترس گیاه مورد استفاده شد (نسیمی و همکاران، ۱۳۹۸).

بیوپچار به دلیل داشتن منافذ ریز می‌تواند مقدار آب بیشتری را در خاک نگهداری کرده و رطوبت قابل‌استفاده گیاه را افزایش دهد. نتیجه تحقیقات (ژانگ و همکاران،

1- Pyrolysis

2- Field Capacity

3- Permanent Wilting Point

4- Plant Available Water Capacity

5- Saturation hydraulic conductivity

مواد و روش‌ها

محل اجرای آزمایش و تعیین ویژگی‌های خاک، کاه و

کلش برنج و بیوچار آن

این پژوهش در دانشگاه شهرکرد، واقع در مرکز استان چهارمحال و بختیاری با موقعیت جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و با ارتفاع ۲۰۷۴ متری از سطح دریا در سال ۱۳۹۸ انجام شد. در انجام این تحقیق از خاک سطحی مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد از عمق صفر تا ۳۰ سانتیمتری، استفاده شد. بخشی از خاک از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شده و برای انجام آزمایش در گلدان‌ها استفاده شد و بخش دیگری از خاک پس از هواخشک شدن، کوبیدن و عبور از الک دو میلی‌متری برای اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پایه‌ای خاک استفاده شد. با استفاده از استوانه‌های فلزی نمونه دست‌نخورده برای اندازه‌گیری چگالی ظاهری خاک (pb) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک تهیه شد. تخلخل کل خاک با استفاده از مقدار چگالی ظاهری و حقیقی خاک

(هزلتون و مرفی، ۲۰۰۷) و بافت خاک به روش هیدرومتری (جی و بادر، ۱۹۸۶) اندازه‌گیری شد. درصد وزنی رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه (θ_{FC}) و رطوبت نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) با استفاده از دستگاه صفحات فشار به ترتیب در مکش‌های ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۹). اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت انجام شد (کلات، ۱۹۸۶). کربن آلی (OC) به روش اکسیداسیون تر (نلسون و سامرز، ۱۹۹۶)، واکنش خاک (pH) با دستگاه مدل ph lab ۸۲۷ و هدایت الکتریکی (EC) با دستگاه PDR ۹۱۵ در سوسپانسیون آب و خاک (توماس، ۱۹۹۶)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش جاننشینی با استات سدیم (چاپمن، ۱۹۶۵)، نیتروژن کل (N) با استفاده از روش کج‌لدال (برمنر، ۱۹۶۵)، پتاسیم قابل‌دسترس (K) به روش عصاره‌گیری با استات آمونیم (ریچاردز، ۱۹۵۴) و فسفر قابل‌دسترس (P) به روش اولسن (اولسن و سامرز، ۱۹۸۲) انجام شد و نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پایه‌ای خاک مورد آزمایش

عمق	pb	تخلخل کل	θ_{FC}	θ_{PWP}	شن	سیلت	رس	بافت
ویژگی‌های فیزیکی	g cm ⁻³	%	درصد وزنی		%			
۰-۳۰	۱/۳۸	۴۸	۲۰/۷	۱۱	۲۰/۸۴	۴۷/۹۱	۳۱/۲۵	لوم رسی
عمق	K _s	pH	EC	CEC	OC	N	P	K
ویژگی‌های شیمیایی	cm hr ⁻¹	-	dS m ⁻¹	Cmol kg ⁻¹	%	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
۰-۳۰	۲/۸	۷/۵۶	۰/۳۴	۱۵/۳۲	۰/۸۲	۰/۰۷	۶/۶۹	۲۵/۱۳

ASTM d-285 با کمی اصلاح اندازه‌گیری شد؛ برای این منظور بیوچار و کاه و کلش را داخل سیلندر شیشه‌ای ۱۰۰ میلی‌لیتری با وزن مشخص ریخته و داخل سیلندر از آن‌ها پر شد و به مدت ۱ دقیقه روی ویبراتور قرار داده شد تا بیوچار یا کاه و کلش برنج داخل سیلندر را پر کند. چگالی ظاهری از وزن کردن مجدد سیلندر به دست آمد و در نهایت چگالی ظاهری بیوچار یا کاه و کلش برنج از تقسیم وزن آن‌ها به حجم بیوچار یا کاه و کلش داخل سیلندر محاسبه شد (سونگ، ۲۰۱۲). سایر ویژگی‌ها نیز اندازه‌گیری شده و مقادیر آن در جدول ۲ آمده است.

برای تهیه بیوچار از کاه و کلش برنج استفاده شد. کاه و کلش برنج، از برنج‌کاران منطقه لنجان اصفهان از رقم چمپا از دسته برنج‌های ایرانی تهیه شد. کاه و کلش برنج پس از هواخشک شدن، آسیاب کردن و عبور از الک ۴ میلی‌متری در جهت مخلوط کردن با خاک و پر کردن گلدان‌ها مورد استفاده قرار گرفت. برای اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های کاه و کلش برنج پس از آسیاب کردن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. کاه و کلش برای تهیه بیوچار به مدت ۲ ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد در کوره الکتریکی مدل (ATRA;PC-12) قرار داده شد تا فرایند گرم‌ماکافت انجام شود (وو، ۲۰۱۲). برخی از ویژگی‌های بیوچار و کاه و کلش برنج نیز اندازه‌گیری شد. چگالی ظاهری بیوچار و کاه و کلش برنج طبق روش

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پایه‌ای کاه و کلش برنج و بیوچار حاصل از آن

K	P	N	OC	pH	EC	ρ_b	نوع ماده
mg kg^{-1}		%	%	-	dS m^{-1}	g cm^{-3}	
۴۶۸	۴۹/۸۳	۱/۲۵	۴۰/۷۸	۴/۸	۳/۳	۰/۷۲	کاه و کلش برنج
۱۵۸۹	۵۸	۱/۵۲	۵۵/۰۶	۹/۳۰	۱۰/۷	۰/۵۱	بیوچار

انجام آزمایش

اصلاح‌کننده خاک شامل کاه و کلش برنج و بیوچار حاصل از آن در چهار سطح صفر، ۰/۵، ۱، ۲ درصد وزنی و فاکتور زمان در چهار سطح ۲، ۳، ۶ و ۹ ماه پس از افزودن بیوچار در سه تکرار به صورت آزمایش گلخانه‌ای به اجرا درآمد. تیمارهای آزمایش در جدول ۳ نشان داده شده است.

برای بررسی اثر بیوچار و کاه و کلش برنج بر ضرایب رطوبتی خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، این آزمایش در خاکی با بافت سطحی لومرسی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور ماده

جدول ۳- تیمارهای زمان، بیوچار و کاه و کلش برنج به کارگرفته شده در آزمایش

نام تیمار	مشخصات تیمار
B_3 و B_2 ، B_1 ، B_0	به ترتیب شاهد (بدون بیوچار)، بیوچار در مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی
D_3 و D_2 ، D_1 ، D_0	به ترتیب شاهد (بدون کاه و کلش برنج)، کاه و کلش در مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی
T_4 و T_3 ، T_2 ، T_1	اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی به ترتیب پس از ۲، ۳، ۶ و ۹ ماه پس از افزودن بیوچار به خاک

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی خاک

در این پژوهش ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل رطوبت ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم، درصد رطوبت قابل استفاده و هدایت هیدرولیکی اشباع، در طی گذشت هر بازه زمانی بعد از اعمال تیمارهای آزمایش و قرار گرفتن گلدان‌ها در گلخانه اندازه‌گیری شدند. مقدار FC و PWP با اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌های خاک در مکش ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال انجام شد. سپس با استفاده از معادله (۱) مقدار آب قابل استفاده محاسبه شد (دن و هاپمن، ۲۰۰۲).

$$PAWC = \theta_{FC} - \theta_{PWP} \quad (1)$$

که در آن، θ_{FC} درصد وزنی رطوبت ظرفیت مزرعه و θ_{PWP} درصد وزنی رطوبت نقطه پژمردگی دائم است.

در این پژوهش از نمونه خاک دست‌نخورده گلدان‌ها، هدایت هیدرولیکی اشباع نمونه‌های مخلوط خاک و بیوچار با استفاده از روش بار ثابت (کلوت، ۱۹۸۶) تعیین شد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک توسط معادله (۲) محاسبه شد.

$$Ks = V \cdot L / \Delta H \cdot A \cdot t \quad (2)$$

که در آن، L طول نمونه خاک (cm)، ΔH اختلاف پتانسیل دو طرف ستون خاک (cm cm^{-1})، V حجم آب خروجی از خاک (cm^3) و t زمان (hr) است.

با توجه به تیمارهای آزمایشی، اصلاح‌کننده‌های کاه و کلش برنج و بیوچار آن (با نسبت وزنی ۰، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ گرم در ۳ کیلوگرم خاک) به خاک اضافه شد و سپس در کیسه‌های پلاستیکی به مدت یک ماه در شرایط انکوباسیون (در متوسط دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس و در رطوبت نسبی ۵۰ درصد آزمایشگاه) قرار گرفت تا خاک درون کیسه‌ها کاملاً مخلوط شده و سپس به داخل گلدان‌های سه کیلوگرمی پلاستیکی منتقل شد (عباس و همکاران، ۲۰۱۸). در این آزمایش از ۸۴ گلدان با اندازه متوسط استفاده شد. در کف گلدان‌ها سوراخ برای زهکشی و فیلتر شنی به ضخامت ۲ سانتی‌متر در کف گلدان قرار داده شد. گلدان‌ها در گلخانه دانشگاه شهرکرد در دمای حاصل از میانگین درجه حرارت‌های روزانه نگهداری شد. برای تعیین رطوبت خاک از روش وزنی استفاده شد. بدین‌منظور با مشخص‌بودن ظرفیت مزرعه و وزن خاک هر گلدان با توزین گلدان‌ها، میزان کسر رطوبت به دست آمد. در هر بازه زمانی (۲، ۳، ۶، ۹ ماه) ویژگی‌های فیزیکی مورد نظر خاک شامل ضرایب رطوبتی خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در تیمارهای آزمایش اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

میانگین اثر متقابل اصلاح‌کننده و زمان نشان داد که بیشترین تغییرات نسبت به شاهد را B_3T_1 دارد با ۱۴ درصد افزایش و کمترین تغییرات را D_3T_4 با ۱۱ درصد کاهش نسبت به شاهد داشت. در تیمار T_1 ، سطوح اصلاح‌کننده D_3 و B_3 نسبت به شاهد، ۱۲ و ۱۶/۶ درصد افزایش معنی‌دار داشت. در تیمار T_2 ، اصلاح‌کننده D_1 نسبت به شاهد، ۷ درصد افزایش معنی‌دار در θ_{FC} نشان داد و در تیمار T_3 ، اصلاح‌کننده B_2 نسبت به شاهد، ۷ درصد کاهش معنی‌دار در θ_{FC} نشان داد. در تیمار T_4 ، اصلاح‌کننده‌های B_2 و B_3 نسبت به شاهد کاهش در θ_{FC} داشت. طبق نتایج مشخص شد بیوچار و کاه و کلش در زمان کوتاه موجب افزایش θ_{FC} شده و با گذشت زمان، تأثیر افزایشی بر روی θ_{FC} نداشت. در نتایجی مشابه، خیرفام و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که بیوچار در کوتاه‌مدت باعث افزایش θ_{FC} می‌شود. بیوچار با ایجاد ساختار شبکه‌ای ماند، موجب افزایش فضای بین ذرات خاک شده و با تأثیر روی ظرفیت نگهداشت رطوبت در خاک، موجب بهبود آب خاک شده و باعث می‌شود که θ_{FC} افزایش یابد.

نرمال‌بودن نتایج به‌دست‌آمده با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و یکنواختی واریانس آن‌ها با آزمون لوون تست شد. برای پی‌بردن به اثر تیمارها، از جدول تجزیه واریانس ANOVA، برای مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن از نرم‌افزار STATISTICA10 و برای سایر محاسبات آماری، رسم شکل‌ها و جداول از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

اثر کاه و کلش برنج و بیوچار حاصل از آن بر رطوبت ظرفیت مزرعه

نتایج تجزیه واریانس اثر کاه و کلش برنج و بیوچار حاصل از آن بر رطوبت ظرفیت مزرعه در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد اثر اصلی زمان بر θ_{FC} در سطح احتمال ۱ درصد ($p < 0.01$) معنی‌دار است. اثر اصلی اصلاح‌کننده بر θ_{FC} معنی‌دار نیست و اثر متقابل اصلاح‌کننده و زمان بر θ_{FC} در سطح احتمال ۱ درصد ($p < 0.01$) معنی‌دار است. طبق جدول ۵، نتایج مقایسه

جدول ۴ - نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر اصلاح‌کننده (بیوچار و کاه و کلش برنج) بر ویژگی‌های مورد مطالعه

میانگین مربعات				درجه آزادی	عوامل تغییر
K_S	PAWC	PWP	FC		
۷۸/۷۹**	۳/۴**	۱/۵۱**	۱/۵۴ ^{ns}	۶	اصلاح‌کننده
۳/۱۱	۰/۶	۰/۲۲	۰/۶۳	۱۴	خطا
۱۵/۵۴**	۳۳/۴۸**	۱**	۲۵/۷۹**	۳	زمان
۱۱/۷۲**	۳/۳۷**	۰/۲۹*	۳/۲۴**	۱۸	اصلاح‌کننده × زمان
۲/۸۶	۰/۶۳	۰/۱۳	۰/۵۸	۴۲	خطا

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ^{ns} غیر معنی‌دار

جدول ۵ - نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل اصلاح‌کننده و زمان بر درصد وزنی رطوبت ظرفیت مزرعه (FC)

میانگین ($\theta_m\%$)	زمان				سطوح تیمار (درصد)	تیمار
	T4	T3	T2	T1		
۲۰/۳۴ ^{ab}	۲۰/۴۳ ^{d-h}	۲۰/۳۹ ^{d-h}	۲۰/۱۳ ^{e-j}	۲۰/۴۳ ^{d-h}	C	
۲۰/۲۰ ^b	۲۰/۰۷ ^{e-j}	۲۰/۳۰ ^{d-i}	۱۸/۷۶ ^{kl}	۲۱/۶۶ ^{bcd}	B1	
۱۹/۸۵ ^b	۱۸/۴۵ ^{kl}	۱۸/۸۰ ^{i-l}	۱۹/۹۹ ^{e-j}	۲۲/۱۴ ^{bc}	B2	
۲۱ ^a	۱۸/۸۷ ^{i-l}	۱۹/۸۱ ^{g-k}	۲۱/۴۹ ^{e-f}	۲۳/۸۳ ^a	B3	اصلاح‌کننده
۲۰/۲۷ ^{ab}	۱۹/۷۳ ^{g-k}	۱۹/۶۰ ^{g-l}	۲۱/۷۰ ^{abcd}	۲۰/۰۴ ^{e-j}	D1	
۲۰/۰۷ ^b	۱۸/۹۵ ^{b-l}	۱۹/۳۵ ^{g-l}	۲۰/۵۱ ^{d-g}	۲۱/۴۹ ^{b-f}	D2	
۲۰/۳۷ ^{ab}	۱۸/۱۵ ^l	۱۹/۸۷ ^{g-k}	۲۰/۵۷ ^{d-g}	۲۲/۹۱ ^{ab}	D3	
	۱۹/۲۴ ^d	۱۹/۷۳ ^c	۲۰/۴۵ ^b	۲۱/۷۸ ^a		میانگین

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

اثر کاه و کلش برنج و بیوچار حاصل از آن بر رطوبت

نقطه پژمردگی دائم

نتایج تجزیه واریانس اثر کاه و کلش برنج و بیوچار حاصل از آن بر رطوبت نقطه پژمردگی دائم طبق جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد اثر اصلی اصلاح کننده و زمان بر θ_{PWP} در سطح احتمال ۱ درصد ($p < 0.01$) معنی دار است و اثر متقابل اصلاح کننده و زمان بر θ_{PWP} در سطح احتمال ۵ درصد ($p < 0.05$) معنی دار است. براساس جدول ۶، نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل اصلاح کننده و زمان نشان داد که بیشترین تغییرات نسبت به شاهد را D_1T_4 با ۱/۴ درصد افزایش و کمترین تغییرات را B_3T_1 با ۱۳ درصد کاهش نسبت به شاهد داشتند. در تیمار T_1 ، سطوح اصلاح کننده بیوچار و کاه و کلش برنج به جز D_2 نسبت به شاهد، کاهش یافت. θ_{PWP} در تیمار T_2 ، با

اصلاح کننده های B_2 ، B_3 و D_2 نسبت به شاهد، کاهش نشان داد. در تیمار T_3 ، سطوح اصلاح کننده بیوچار و کاه و کلش برنج به جز D_3 نسبت به شاهد، کاهش در θ_{PWP} نشان داد. در تیمار T_4 ، سطوح اصلاح کننده اثر معنی داری در مقدار θ_{PWP} نداشت. همانطور که در نتایج مشاهده شد در طی زمان ۹ ماهه بیوچار بر θ_{PWP} اثر گذار بود و در سطوح پایین، افزودن بیوچار تأثیر چندانی در θ_{PWP} نداشت؛ چون رفتار رطوبتی خاک در مکش های ماتریک بالا تحت کنترل بافت خاک و منافذ ریز آن قرار دارد، اما در مکش های پایین، تحت کنترل ساختمان خاک و تخلخل درشت آن است. در این تحقیق مطابق با تحقیق هاردی و همکاران (۲۰۱۴) θ_{PWP} با افزودن بیوچار در همه سطوح و زمان ها افزایش پیدا نمی کند.

جدول ۶- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل اصلاح کننده و زمان بر درصد وزنی رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP)

میانگین (0m%)	زمان				سطوح تیمار (درصد)	تیمار
	T4	T3	T2	T1		
۱۲/۰۴ ^a	۱۲/۰۱ ^{a-d}	۱۲/۱۱ ^{ab}	۱۱/۹۴ ^{a-e}	۱۲/۰۸ ^{abc}	C	
۱۱/۴۷ ^b	۱۲/۲۳ ^a	۱۱/۳۳ ^{d-h}	۱۱/۲۰ ^{e-h}	۱۱/۱۵ ^{f-i}	B1	
۱۰/۹۹ ^c	۱۱/۳۳ ^{c-h}	۱۰/۶۴ ^{hi}	۱۰/۹۹ ^{ghi}	۱۱ ^{ghi}	B2	
۱۰/۹۹ ^c	۱۱/۴۶ ^{b-g}	۱۱/۱۵ ^{fgh}	۱۰/۹۰ ^{ghi}	۱۰/۴۳ ⁱ	B3	اصلاح کننده
۱۱/۴۷ ^b	۱۲/۲۵ ^a	۱۱/۱۲ ^{f-i}	۱۱/۳۵ ^{e-h}	۱۱/۱۵ ^{f-i}	D1	
۱۱/۳۸ ^{bc}	۱۱/۳۸ ^{b-h}	۱۱/۲۵ ^{d-h}	۱۱/۰۸ ^{ghi}	۱۱/۸۰ ^{a-f}	D2	
۱۱/۳۴ ^{bc}	۱۱/۲۹ ^{d-h}	۱۱/۴۲ ^{b-h}	۱۱/۳۶ ^{e-h}	۱۱/۲۸ ^{d-h}	D3	
	۱۱/۷۱ ^a	۱۱/۲۹ ^b	۱۱/۲۶ ^b	۱۱/۲۷ ^b		میانگین

میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون چنددامنه ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی داری ندارند.

نسبت به شاهد مشاهده شد و این روند افزایشی را در ماه سوم (T_2) می توان در تیمارهای اصلاحی بیوچار B_2 و B_3 و همه تیمارهای D مشاهده کرد. در ماه ششم (T_3) نیز این روند افزایشی در تیمارهای اصلاحی B_1 ، B_3 و D_1 و D_3 در PAWC دیده شد. در تیمار T_1 ، سطوح اصلاح کننده بیوچار B_1 ، B_2 و B_3 نسبت به شاهد، به ترتیب ۲۵ و ۳۳ و ۶۰ درصد افزایش در PAWC یافت. در همین زمان، PAWC سطح اصلاح کننده D_3 نیز نسبت به شاهد افزایش داشت. در تیمار T_2 ، نیز افزایش در PAWC با سطوح اصلاح کننده B_3 و D_1 نسبت به شاهد مشاهده شد. در زمان کوتاه افزودن بیوچار آب قابل استفاده گیاه را افزایش داد. یافته های این تحقیق با نتایج هاردی و همکاران (۲۰۱۴)، لو و همکاران (۲۰۱۴) مبنی بر افزایش PAWC با افزودن

اثر کاه و کلش برنج و بیوچار حاصل از آن بر رطوبت

قابل استفاده گیاه

نتایج تجزیه واریانس اثر کاه و کلش برنج و بیوچار حاصل از آن بر رطوبت قابل استفاده در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که اثر اصلی اصلاح کننده و زمان و نیز اثر متقابل اصلاح کننده و زمان بر PAWC در سطح احتمال ۱ درصد ($p < 0.01$) معنی دار است. در جدول ۷ نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل اصلاح کننده و زمان نشان داد که بیشترین تغییرات نسبت به شاهد را B_3T_1 با ۱۷ درصد کاهش نسبت به شاهد داشت. طبق محاسبات میانگین ها مشخص شد که در کوتاه مدت (دوماهه) در ماده اصلاحی بیوچار و کاه و کلش برنج افزایش در PAWC

بیوچار، به دلیل بهبود رطوبت خاک و افزایش θ_{FC} ، مطابقت دارد. شاید دو مکانیسم، افزایش میزان مشارکت فضاهای داخلی بیوچار در نگهداشت آب و نیز مسدود شدن بخشی از منافذ درشت بین ذرات خاک توسط ذرات ریز

بیوچار، به دلیل بهبود رطوبت خاک و افزایش θ_{FC} ، مطابقت دارد. شاید دو مکانیسم، افزایش میزان مشارکت فضاهای داخلی بیوچار در نگهداشت آب و نیز مسدود شدن بخشی از منافذ درشت بین ذرات خاک توسط ذرات ریز

جدول ۷- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل اصلاح‌کننده و زمان بر رطوبت قابل‌استفاده گیاه (PAWC)

میانگین ($\theta_m\%$)	زمان				سطوح تیمار (درصد)	تیمار
	T4	T3	T2	T1		
۸/۳ ^b	۸/۴۱ ^{e-k}	۸/۲۸ ^{e-k}	۸/۱۸ ^{e-k}	۸/۳۵ ^{e-k}	C	
۸/۷۲ ^b	۷/۸۳ ^{g-k}	۸/۹۸ ^{d-i}	۷/۵۶ ^{h-k}	۱۰/۵۱ ^{bc}	B1	
۸/۸۶ ^b	۷/۱۱ ^{jk}	۸/۱۷ ^{e-k}	۹ ^{d-h}	۱۱/۱۴ ^b	B2	
۱۰/۰۱ ^a	۷/۴۱ ^{ijk}	۸/۶۶ ^{e-j}	۱۰/۵۹ ^{bc}	۱۳/۴ ^a	B3	اصلاح‌کننده
۸/۸۰ ^b	۷/۴۸ ^{h-k}	۸/۴۷ ^{e-j}	۱۰/۳۵ ^{bcd}	۸/۸۹ ^{d-i}	D1	
۸/۶۹ ^b	۷/۵۶ ^{h-k}	۸/۰۹ ^{f-k}	۹/۴۳ ^{e-f}	۹/۶۹ ^{ed}	D2	
۹/۰۳ ^b	۶/۸۷ ^k	۸/۴۳ ^{e-j}	۹/۲۰ ^{c-g}	۱۱/۶۲ ^b	D3	
	۷/۵۳ ^d	۸/۴۴ ^c	۹/۱۹ ^b	۱۰/۵۱ ^a		میانگین

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

در طی زمان افزایش K_s در سطوح‌های بیوچار و کاه و کلش دیده شد؛ البته در سطح ۲ درصد وزنی کاه و کلش مقدار هدایت هیدرولیکی کاهش پیدا کرد. مطابق با این پژوهش، در تحقیق بیامونته و همکاران (۲۰۱۹) با افزودن بیوچار K_s افزایش داشت به این‌علت که با مصرف بیوچار حجم منافذ درشت خاک افزایش یافته و جرم مخصوص ظاهری خاک کاهش یافت. تأثیر این عوامل بر خاک موجب شد تا K_s افزایش یابد. 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 هیدرولیکی اشباع خاک بیان کردند.

نتیجه‌گیری

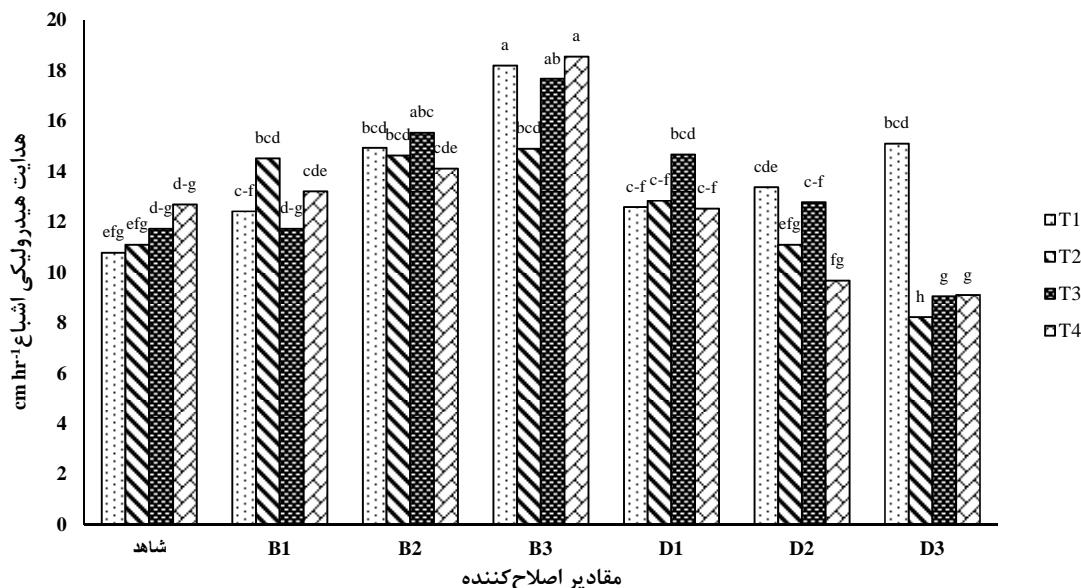
نتایج این تحقیق نشان داد که FC و PAWC در برخی سطوح بیوچار روند افزایشی و در برخی سطوح روند کاهشی داشتند. افزودن بیوچار (در سطوح مختلف) باعث کاهش در PWP و افزایش در K_s شد. افزودن کاه و کلش برنج باعث افزایش در FC، PWP، PAWC و K_s شد. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق در مورد اثر زمان با افزودن بیوچار، نشان داد که افزودن بیوچار FC و PAWC را در طی گذشت زمان‌های کوتاه دو یا سه‌ماهه افزایش داد؛ اما در طی مدت شش یا نه‌ماه کاهش داشت. PWP در طی زمان، با افزودن بیوچار کاهش یافت و افزودن بیوچار در

اثر کاه و کلش برنج و بیوچار حاصل از آن بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

نتایج تجزیه واریانس اثر کاه و کلش برنج و بیوچار حاصل از آن بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک طبق جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که اثر اصلی اصلاح‌کننده و زمان و نیز اثر متقابل اصلاح‌کننده و زمان بر K_s در سطح احتمال ۱ درصد ($p < 0.01$) معنی‌دار است. طبق شکل ۱، در تیمار T1، سطح اصلاح‌کننده بیوچار B2، B3 و D3 نسبت به شاهد، به ترتیب ۳۸، ۶۸ و ۴۰ درصد افزایش معنی‌دار در K_s یافته‌است. در تیمار T2، سطح اصلاح‌کننده B1، B2 و B3 نسبت به شاهد، K_s افزایش یافت و در سطح اصلاح‌کننده D3، نسبت به شاهد ۶۰ درصد کاهش داشت. در تیمار T3، افزایش در K_s در سطوح بیوچار B2 و B3 نسبت به شاهد مشاهده شد. در تیمار T4 در سطح بیوچار B3 نسبت به شاهد، K_s افزایش یافت، اما در همین تیمار در سطح بیوچار B2 نسبت به شاهد افزایشی در K_s مشاهده نشد. همچنین روند کاهشی در ماده اصلاحی D3 نسبت به شاهد دیده شد. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل زمان و سطح اصلاح‌کننده بر K_s بیانگر این است که بیشترین تغییرات نسبت به شاهد را B3T1 با ۶۸ درصد افزایش و کمترین تغییرات را D3T2 با ۶۰ درصد کاهش نسبت به شاهد دارند. طبق مقایسات انجام‌شده بین میانگین‌ها، روند افزایشی K_s در افزودن ماده اصلاحی در زمان کوتاه یک‌ماهه بیشتر از زمان‌های دیگر وجود داشت.

است و می‌توان از بیوجار به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک استفاده کرد. قابل‌ذکر است اثر کاه و کلش برنج نیز در برخی ویژگی‌ها شبیه بیوجار بوده و موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی شد. بهبود ضرایب رطوبتی خاک در شرایط تنش آبی به رشد گیاه نیز کمک خواهد کرد و از بیوجار به این منظور می‌توان استفاده کرد.

بلندمدت باعث افزایش در K_s شد. در مورد اثر زمان بر افزایش کاه و کلش برنج، نتایج نشان داد که پس از سپری‌شدن ۲ و ۳ ماه از افزودن کاه و کلش برنج به خاک، میزان FC، PWP و KS افزایش یافت، درحالی‌که میزان PAWC در بلندمدت افزایش پیدا کرد. به‌طورکلی با نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که استفاده از بیوجار با گذشت زمان موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی مورد بررسی شده



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل اصلاح‌کننده کاه و کلش برنج و بیوجار حاصل از آن بر K_s در زمان‌های مورد مطالعه B1, B2, B3, D1, D2, D3 به ترتیب مقدار ۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و T1, T2, T3 به ترتیب ۲، ۳، ۶ و ۹ ماه است. میانگین‌های دارای حروف مشترک بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Ecotoxicology and environmental safety, 148: 825-833.

- Andrenelli M. C. Maienzab A. Genesio L. Miglietta F. Pellegrini S. Vaccari F. P. and Vignozzi N. 2016. Field application of pelletized biochar: Short-term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil. *Journal of Agricultural Water Management*. 163: 190-196.
- Baiamonte G. Crescimanno G. Parrino F. and Pasquale C. D. 2019. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil. *Catena*. 175: 294-303.
- Blanco-Canqui H. 2017. Biochar and soil physical properties. *Review and Analysis-Soil Physics and Hydrology*. Soil Science Society of America Journal. 81: 687-711
- Bremner J. M. 1965. Total nitrogen. In C. A. Black (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Monograph. No. 9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI. pp. 1148-1158.

منابع

- عیسوند رجبی ف. کریمی ا. متقیان ح. ر. و محمدی ج. ۱۳۹۹. مقایسه آثار بیوجار حاصل از کود گاوی و بقایای نیشکر بر ضرایب رطوبتی خاک لوم شنی، *مجله پژوهش آب ایران*. ۱۵(۳): ۱۷۸-۱۷۱.
- نسیمی پ. کریمی ا. و متقیان ح. ر. ۱۳۹۸. آثار بیوجار برگ خرما بر هدایت هیدرولیکی اشباع و ضرایب رطوبتی خاک لوم رسی شنی. *مجله پژوهش آب ایران*. ۱۳(۳): ۱۶۱-۱۷۱.
- Abbas T. Rizwan M. Ali S. Adrees M. Mahmood A. Zia-ur-Rehman M. Ibrahim M rshad M. and Qayyum M. F. 2018. Biochar application increased the growth and yield and reduced cadmium in drought stressed wheat grown in an aged contaminated soil.

20. Nelson D. W. and Sommers L. E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis part 3 chemical methods, (methodsofsoilan3)*. 961-1010.
21. Olsen S. R. and Sommers L. E. 1982. Phosphorus. In A.L. Page et al. *Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI*. pp. 403-427.
22. Rabbi S. M. Minasny B. Salami S. T. McBratney A. B. and Young I. M. 2021. Greater, but not necessarily better: The influence of biochar on soil hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*.
23. Razzaghi F. Obour P. B. Arthur E. 2020. Does biochar improve soil water retention A systematic review and meta-analysis. *Geoderma* 361: 114055.
24. Richards L. A. 1954. *Diagnosis and Importance of Salin and Alkali Soil. U.S.D.A. Handbook, No. 60, Washington, D.C.*
25. Reynolds W.D. Drury C.F. Tan C.S. Fox C.A. and Yang X.M. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3-4), 252-263. Richards, L.A. 1954. *Diagnosis and Importance of Salin and Alkali Soil. U.S.D.A. Handbook, No. 60, Washington, D.C.*
26. Song W. and Guo M. 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 94: 138-145.
27. Thomas G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. *Methods of soil analysis part 3 chemical methods, (methodsofsoilan3)*. 475-490.
28. Wu W. Yang M. Feng Q. McGrouther K. Wang H. Lu H. and Chen Y. 2012. Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment. *Biomass and bioenergy*. 47: 268-276.
29. Zhang J. Amonette J. E. and Flury M. 2021. Effect of biochar and biochar particle size on plant-available water of sand, silt loam, and clay soil. *Soil and Tillage Research*, 104992.
8. Chen J. Li S. Liang C. Xu Q. Li Y. Qin H. and Fuhrmann J. J. 2017. Response of microbial community structure and function to short-term biochar amendment in an intensively managed bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil: effect of particle size and addition rate. *Science of the Total Environment*. 574: 24-33
9. Chapman H. D. 1965. Cation-exchange capacity. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI*
10. Dane J. H. and Hopmans J. W. 2002. Water retention and storage. In: Dane J.H. Topp G.C. (eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods. Madison Soil Science Society of America*. pp: 1685-1692.
11. Esmaelnejad L. Shorafa M. Gorji M. and Hosseini S. M. 2017. Impacts of woody biochar particle size on porosity and hydraulic conductivity of biochar-soil mixtures: an incubation study. *Communications in soil science and plant analysis*. 48(14): 1710-1718.
12. Gee G. W. and Bauder J. W. 1986. Particle-size analysis 1. *Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods, (methodsofsoilan1)*. pp: 383-411
13. Hardie M. Clothier B. Bound S. Oliver G. and Close D. 2014. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant and Soil*, 376(1-2), 347-361.
14. Hazelton P. and Murphy B. 2007. *Interpreting soil test results: what do all the numbers mean? CSIRO publishing, Australia.*
15. Kheirfam H. Sadeghi S. H. R. Homae M. and Zarei Darki B. 2017. Quality improvement of an erosion-prone soil through microbial enrichment. *Soil and Tillage Research*. 165: 230-238.
16. Klute A. 1986. Water retention: laboratory methods. *Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods, (methodsofsoilan1)*. 635-662.
17. Lehmann J. Czimczik C. Laird D. and Sohi S. 2009. Stability of biochar in soil. *Biochar for environmental management: science and technology*. 183-206.
18. Liu Z. Dugan B. Masiello C.A. Gonnermann H.M. 2017. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *PLoS One*. 12 (6): e0179079.
19. Lu S. G. Sun F. F. and Zong Y. T. 2014. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena*. 114: 37-44.

