

## آثار بیوچار برگ خرما بر هدایت هیدرولیکی اشباع و ضرایب رطوبتی خاک لوم رسی شنی

پریا نسیمی<sup>۱</sup>، احمد کریمی<sup>۲\*</sup> و حمیدرضا متقیان<sup>۳</sup>

## چکیده

ماده آلی خاک، نقش مهمی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی ایفا می‌کند. بیوچار سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی نقش زمان بر آثار برگ خرما و بیوچار حاصل از آن بر هدایت هیدرولیکی و ضرایب رطوبتی خاک لوم رسی انجام گرفت. برگ خرما و بیوچار به طور یکنواخت و به صورت پودری با خاک عبور داده شده از الک ۴ میلی‌متری مخلوط شد و به صورت طرح فاکتوریل در قالب کاملاً تصادفی با دو فاکتور زمان در چهار سطح و فاکتور برگ خرما و بیوچار هر کدام در چهار سطح در ۳ تکرار انجام گرفت. هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ )، رطوبت ظرفیت زراعی ( $\theta_{FC}$ )، رطوبت نقطه پژمردگی دائم ( $\theta_{PWP}$ )، آب قابل استفاده گیاه (PAWC) و ظرفیت زراعی نسبی ( $R_{FC}$ ) تعیین شدند. نتایج نشان دادند تفاوت معنی‌داری ( $P < 0/01$ ) بین تیمارها وجود دارد. کاربرد ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی برگ خرما هدایت هیدرولیکی اشباع را به ترتیب ۲۴/۲، ۱۷/۷ و ۷۴/۳ درصد افزایش داد. کاربرد ۰/۵ درصد وزنی بیوچار ۳۹/۴ درصد کاهش و تیمار ۱ و ۲ درصد آن به ترتیب باعث افزایش ۲۹/۴ و ۴۱/۴ درصد در هدایت هیدرولیکی شد. آثار نوع ماده اصلاحی بر  $R_{FC}$ ،  $\theta_{PWP}$  و PAWC و اثر سطوح کاربرد بر همه ضرایب رطوبتی خاک افزایش معنی‌دار ( $P < 0/01$ ) بود. آثار متقابل زمان، نوع ماده اصلاحی و سطوح کاربرد بر PAWC و  $\theta_{PWP}$  در سطح آماری ( $P < 0/01$ ) و بر  $R_{FC}$  در سطح آماری ( $P < 0/05$ ) تفاوت معنی‌داری دارند و این آثار بر  $\theta_{FC}$  معنی‌دار نبود.

**واژه‌های کلیدی:** آب قابل استفاده گیاه، بیوچار، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم، هدایت هیدرولیکی اشباع.

**ارجاع:** 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: ۱۶۱-۱۷۱.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک و حفاظت خاک، گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

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

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

\* نویسنده مسئول: [karimiahmad1342@yahoo.com](mailto:karimiahmad1342@yahoo.com)

تاریخ دریافت: (۹۷/۱۱/۱۲) / تاریخ پذیرش: (۹۷/۱۲/۱۰)

## مقدمه

ماده آلی خاک، به‌ویژه در خاک‌های آهکی که از واکنش قلیایی برخوردار هستند، نقش مهمی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی ایفا می‌کند. 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 گرماکافت گفته می‌شود، به‌دست می‌آید و سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود (لهمان و همکاران، ۲۰۰۶؛ سوهی و همکاران، ۲۰۱۰). تولید بیوپچار برای تثبیت بلندمدت کربن در خاک به عنوان یکی از راه‌های جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای، اصلاح ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، بهبود رشد و عملکرد گیاه پیشنهاد شده است (لئو و همکاران، ۲۰۱۴؛ وولف و همکاران، ۲۰۱۰؛ وراهیچن و همکاران، ۲۰۱۰؛ لهمان و همکاران، ۲۰۰۶). در سال‌های اخیر، کاربرد بیوپچار در خاک به عنوان یک روش مطلوب برای بهبود شرایط فیزیکی و افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک مطرح بوده است (کیس و همکاران، ۲۰۱۲؛ سوهی و همکاران، ۲۰۱۰؛ اتکینسون و همکاران، ۲۰۱۰؛ باسو و همکاران، ۲۰۱۳). دستیابی به هر کدام از اهداف فوق به ساختار فیزیکی و شیمیایی بیوپچار و میزان کاربرد آن در خاک بستگی دارد (یوزوما و همکاران، ۲۰۰۱). تحقیقات نشان می‌دهد که بسیاری از مشکلات با کاربرد افزودنی‌های خاک مانند بیوپچار قابل برطرف‌شدن هستند (لقاری و همکاران، ۲۰۱۶). تحقیقات (گیدینجی، ۲۰۱۴؛ اوزوما و همکاران، ۲۰۱۱؛ براکهورف و همکاران، ۲۰۱۰) نشان داد که افزودن بیوپچار سبب کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع شده است. بیشتر مطالعات انجام‌شده بیانگر آن است که بیوپچار باعث افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) می‌شود (هراس و همکاران، ۲۰۱۳؛ و اوگونتنده و همکاران، ۲۰۰۸). کاهش هدایت هیدرولیکی بیشتر در خاک‌های درشت‌بافت مشاهده شده است. در خاک‌های سبک و شنی بیوپچار با فرارگرفتن بین منافذ درشت سبب کندترشدن حرکت آب می‌شود. افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع در اثر افزودن بیوپچار در خاک‌های ریزبافت به دلیل افزایش تخلخل و حجم منافذ درشت و کاهش چگالی ظاهری در این خاک‌هاست (هراس و همکاران، ۲۰۱۳). بیوپچار قادر است هدایت هیدرولیکی را در خاک‌های شنی کاهش (اتکینسون و همکاران،

۲۰۱۰) و در خاک‌های رسی افزایش دهد (لیم و همکاران، ۲۰۱۶؛ ماجور و همکاران، ۲۰۱۰). نوروزی و همکاران (۱۳۹۵) گزارش کردند که بیوپچار علاوه بر تأثیر مثبت بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش ظرفیت نگهداری، قادر است که منافذ ذخیره و انتقال خاک را با تشکیل منافذ ثانویه و نیز تغییر اندازه و تراکم خاکدانه‌های خاک افزایش دهد. تحقیقات حیدری و همکاران (۱۳۹۲) نشان داد که برگرداندن بقایای جو باعث افزایش مقدار ماده آلی، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، تخلخل کل، میانگین وزنی قطر خاکدانه، افزایش ظرفیت زراعی و همچنین کاهش چگالی ظاهری خاک می‌شود. تحقیقات نشان داده است که افزودن بیوپچار به خاک باعث بهبود شرایط رطوبتی خاک و افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت آن می‌شود (استروبل و همکاران، ۲۰۱۱؛ فلت، ۲۰۱۱). اثر بیوپچار بر افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک‌های شنی نسبت به خاک‌های لومی و رسی بیشتر است (گلاسر و همکاران، ۲۰۰۸). باسو و همکاران (۲۰۱۳) با کاربرد بیوپچار در یک خاک شنی، افزایش ۲۳ درصدی ظرفیت نگهداری رطوبت در مقایسه با تیمار شاهد را گزارش کردند. لو و همکاران (۲۰۱۴) بیوپچار حاصل از شلتوک برنج را در سطوح ۰، ۲ و ۶ درصد وزنی به یک خاک رسی افزودند؛ نتایج نشان داد ظرفیت نگهداری رطوبت به ترتیب ۱۲، ۲۰ و ۳۱ درصد افزایش پیدا می‌کند. تحقیقات کاروالهو و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که آب قابل دسترس گیاه در لایه سطحی خاک حدود ۰/۸ درصد به ازای هر تن مصرف بیوپچار افزایش پیدا می‌کند. طبق تحقیقات انجام‌شده آثار اصلاحی بیوپچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، به بافت خاک، نوع ماده آلی اولیه تولید بیوپچار، شرایط گرماکافت، میزان مصرف بیوپچار و زمان بستگی دارد (آندرلی و همکاران، ۲۰۱۶؛ باسو و همکاران، ۲۰۱۳). اویانگ و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که ویژگی‌های رطوبتی خاک لوم شنی نسبت به خاک لوم رسی تغییرات بیشتری تحت تأثیر بیوپچار دارد. تحقیقات رزاقی و همکاران (۱۳۹۶) نشان داد کاربرد ۷۵ تن در هکتار بیوپچار تولیدشده از کاه و کلش گندم سبب افزایش ۴۵، ۱۳، ۹۵ و ۵۲ درصدی آب قابل دسترس، تخلخل، هدایت هیدرولیکی و ظرفیت تبادل کاتیونی نسبت به عدم کاربرد بیوپچار شد. نوروزی و همکاران (۱۳۹۵) گزارش کردند که بیوپچار حاصل از برگ خرما

## مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت آزمایش گلخانه‌ای در سال ۱۳۹۷ در دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد انجام شد. برای انجام این پژوهش خاک از دشت شهرکرد از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه خاک پس از هوا خشک شدن از الک ۴ میلی‌متری برای پرکردن گلدان‌ها و بخشی از نمونه‌ها برای تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. برای تهیه بیوپار از برگ خرما پس از جدا کردن برگ‌ها از درخت کاملاً هوا خشک شدند و با استفاده از دستگاه خردکن به قطعات کوچک‌تر به ابعاد کمتر از ۴ سانتی‌متر خرد شدند. برای تولید بیوپار حاصل از برگ درخت خرما، برگ‌های خرد شده هوا خشک را در پاکت‌های آلومینیومی که یک سوراخ به قطر حدود ۱ میلی‌متر در آنها تعبیه شده بود، قرار داده و در یک کوره الکتریکی تهویه‌دار به مدت ۲ ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا فرایند گرماکافت انجام شود. بیوپار تولیدی از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و در تیمارهای آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور زمان و فاکتور بیوپار و برگ خرما در ۳ تکرار انجام شد. جدول ۱، مشخصات تیمارهای آزمایشی را نشان می‌دهد.

علاوه بر تأثیر مثبت بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش ظرفیت نگهداری قادر است که منافذ ذخیره و انتقال خاک را با تشکیل منافذ ثانویه و نیز تغییر اندازه و تراکم خاک دانه‌های خاک افزایش دهد. توسعه کشاورزی و کاهش آلودگی‌های جوی باعث شده است که نیاز به استفاده از بیوپار روز به روز در دنیا افزایش پیدا کند. با وجود حدود ۶ میلیون اصله نخل و هرس سالانه حدود ۵ تا ۷ برگ از هر درخت این فرض را قوت می‌بخشد که می‌توان از این منابع مقدار قابل توجهی بیوپار برگ خرما به دست آورد و از آن برای اصلاح خاک استفاده کرد. در این پژوهش، بقایای گیاهی نخل خرما که در جنوب ایران فراوان است، برای تولید بیوپار به کار برده شد و فرض بر این است که در شرایط محدودیت کمی و کیفی منابع آب و خاک در مناطقی که تولید بیوپار برگ خرما وجود دارد، بتوان از آن برای بهبود ویژگی‌های خاک به منظور افزایش تولید محصولات کشاورزی استفاده کرد. بر این اساس، این پژوهش با هدف بررسی نقش زمان بر آثار برگ خرما و بیوپار آن بر هدایت هیدرولیکی و ضرایب رطوبتی خاک لوم شنی در یک دوره ۹ ماهه انجام گرفت.

جدول ۱- تیمارهای زمان، بیوپار و برگ خرما به کار گرفته شده در آزمایش

نام تیمار	مشخصات تیمار
B <sub>3</sub> و B <sub>2</sub> , B <sub>1</sub> , B <sub>0</sub>	به ترتیب بدون مصرف بیوپار (شاهد)، مصرف بیوپار به اندازه ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی
D <sub>3</sub> و D <sub>2</sub> , D <sub>1</sub> , D <sub>0</sub>	به ترتیب بدون مصرف برگ خرما (شاهد)، مصرف برگ خرما به اندازه ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی
T <sub>4</sub> و T <sub>3</sub> , T <sub>2</sub> , T <sub>1</sub>	اندازه گیری ویژگی‌های فیزیکی خاک به ترتیب ۱، ۳، ۶ و ۹ ماه پس از افزودن بیوپار به خاک

(رینولدز و همکاران، ۲۰۰۹)، بافت خاک به روش هیدرومتری (بایکاس، ۱۹۶۲)، قابلیت هدایت الکتریکی و pH به روش (هالوسچاک، ۲۰۰۶)، درصد ماده آلی به روش والکلی و بلک (۱۹۳۴)، نیتروژن کل (برمنر، ۱۹۹۶)، فسفر قابل جذب گیاه به روش اولسن (۱۹۴۵)، پتاسیم به روش (استات آمونیوم نرمال) و ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور (سومر و میلر، ۱۹۹۶) اندازه‌گیری شد.

برخی از ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک در جدول ۲ و برخی از ویژگی‌های برگ خرما و بیوپار در جدول ۳ نشان داده شده است. جرم مخصوص ظاهری با استفاده از سیلندرهای استوانه‌ای، هدایت هیدرولیکی خاک به روش بار افتان (کلوت، ۱۹۸۶)، رطوبت نمونه‌های خاک در مکش ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال (Kpa) به ترتیب در نقطه FC و PWP با استفاده از دستگاه صفحه فشاری (دن و هاپمن، ۲۰۰۲)، ظرفیت نگهداری نسبی ( $\theta_{RFC}$ ) به روش

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی

K	P	N	O.C	CEC	EC	pH	Texture	Clay	Silt	Sand	$\theta_{PWP}$	$\theta_{FC}$	porosity	Ks	$\rho_b$	عمق
ppm	ppm	%	%	Cmol. kg <sup>-1</sup>	dS.m <sup>-1</sup>			%	%	%	درصد وزنی	%	Cm.hr <sup>-1</sup>	g.cm <sup>-3</sup>	Cm	
۸/۹	۶۲	۰/۴۵	۱/۸۶	۱۲/۵	۰/۴۶	۷/۸۲	S.C.L	۲۲	۲۶/۵	۵۱/۵	۱۰/۹	۲۰/۴	۴۸/۵	۲/۴	۱/۳۷	۰-۳۰

جدول ۳- برخی از ویژگی‌های برگ خرما و بیوپچار مورد استفاده در آزمایش

K	P	N	OC	CEC	pH	EC	$\rho_b$	نوع ماده
ppm	ppm	درصد	درصد	Cmol. kg <sup>-1</sup>		dS.m <sup>-1</sup>	g.cm <sup>-3</sup>	
۴۷۲	۵۰/۱۶	۲/۵۲	۳۷/۱۲	۱۳/۲	۷/۳	۷/۸	۰/۸۵	برگ خرما
۲۲۱۸	۵۸/۱۲	۱/۰۶	۴۲/۶۲	۴۴/۲	۶/۷	۸/۹	۰/۴۳	بیوپچار

استفاده از دستگاه صفحه فشاری اندازه‌گیری شد. درصد رطوبت قابل استفاده گیاه (PAWC) از اختلاف رطوبت ظرفیت زراعی و پژمردگی محاسبه شد. ظرفیت نگهداری نسبی ( $\theta_{RFC}$ ) نسبت رطوبت ظرفیت زراعی به رطوبت اشباع است که با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۹):

$$RFC = \frac{\theta_{FC}}{\theta_s} \quad (1)$$

که در آن  $\theta_{FC}$  رطوبت ظرفیت زراعی و  $\theta_s$  رطوبت اشباع خاک است که با تهیه گل اشباع اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار Statistica10 مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت؛ به این صورت که معنی‌داری تفاوت بین تیمارهای مختلف از طریق تجزیه واریانس داده‌ها (ANOVA) تعیین شد و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای ددانکن انجام شد.

### نتایج و بحث

ابتدا، نتایج آثار برگ خرما، بیوپچار و زمان بر هدایت هیدرولیکی اشباع و سپس، تأثیر آنها بر ضرایب رطوبتی خاک مورد بحث و تحلیل آماری قرار می‌گیرد.

### آثار برگ خرما و بیوپچار آن بر هدایت هیدرولیکی اشباع

نتایج تجزیه واریانس اثر برگ خرما و بیوپچار آن بر هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی دائم، رطوبت قابل استفاده، ظرفیت نگهداری رطوبت و ظرفیت نگهداری نسبی در جدول ۴ نشان داده شده است.

در این پژوهش از ۸۴ گلدان پلاستیکی ۳ کیلوگرمی با ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر و قطر ۲۲ سانتی‌متر استفاده شد. در کف گلدان‌ها سوراخ‌هایی برای زهکشی ایجاد شد و فیلتر شنی (با دانه‌بندی ۲ تا ۴ میلی‌متر) به ضخامت ۲ سانتی‌متر در کف گلدان قرار داده شد. برگ خشک خرما و بیوپچار به نسبت وزنی تیمارهای آزمایش (شاهد، ۱/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی معادل صفر، ۵، ۱۰ و ۲۰ گرم بر کیلوگرم خاک) به صورت دستی و به طور یکنواخت با ۳ کیلوگرم خاک عبور داده شده از الک ۴ میلی‌متر مخلوط شد. خاک مورد استفاده از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک زراعی با بافت لوم رسی شنی تهیه شد که برخی از ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده‌اند. نمونه‌های مخلوط خاک و بیوپچار به مدت یک ماه در داخل کیسه‌های نایلونی، در دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با رطوبت ثابت خوابانده شدند و سپس به گلدان‌ها منتقل شدند. در طول دوره آزمایش آبیاری بر اساس کسر رطوبت خاک و تخلیه ۵۰ درصد رطوبت قابل استفاده، تا ظرفیت زراعی انجام شد. با توجه به فاکتور زمان پس از گذشت ۱، ۳، ۶ و ۹ ماه ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ )، رطوبت ظرفیت زراعی ( $\theta_{FC}$ )، رطوبت در نقطه پژمردگی دائم ( $\theta_{PWP}$ )، رطوبت قابل استفاده گیاه (PAWC) و ظرفیت نگهداری نسبی ( $\theta_{RFC}$ ) اندازه‌گیری شد. پس از نمونه‌گیری خاک توسط سیلندر مقادیر حجم آب خارج شده و افت سطح آب در دستگاه مانومتر در مدت زمان معین اندازه‌گیری و هدایت هیدرولیکی خاک به روش بار افتان محاسبه شد (کلوت، ۱۹۸۶). رطوبت نمونه‌های خاک در مکش ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال (Kpa) به ترتیب در نقطه FC و PWP با

جدول ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر برگ خرما و بیوچار آن بر هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی دائم، رطوبت قابل استفاده گیاه و رطوبت ظرفیت نگهداری نسبی

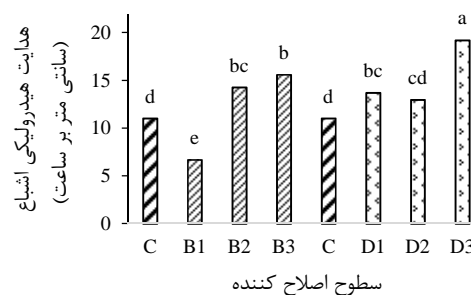
PWP	PAWC	FC	RFC	K <sub>s</sub>	درجه آزادی	منبع تغییر
میانگین مربعات						
۱/۷۵ <sup>ns</sup>	۰/۴۸ <sup>ns</sup>	۴/۰۷*	۰/۰۰۰۴ <sup>ns</sup>	۱۳۱/۵۲**	۱	اصلاح کننده
۸/۸۵**	۶/۷۸**	۲۹/۵۶**	۰/۰۱۷۶**	۲۵۲/۸۲**	۳	سطح
۱/۶۴ <sup>ns</sup>	۲/۹۳*	۰/۷۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰۸ <sup>ns</sup>	۸۴/۳۹**	۳	اصلاح کننده×سطح
۰/۶۱	۰/۶۰	۰/۸۱	۰/۰۰۱۰	۵/۱۶	۱۶	خطا
۲/۷۵**	۰/۷۱ <sup>ns</sup>	۲/۵۰*	۰/۰۴۰۹**	۲۶۷/۱۴**	۳	زمان
۱/۱۸*	۱/۷۷ <sup>ns</sup>	۱/۷۷ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۰۷ <sup>ns</sup>	۲۹۳/۰۵**	۳	زمان×اصلاح کننده
۱/۰۰*	۱/۱۶ <sup>ns</sup>	۱/۳۴ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۱۷*	۱۴۸/۴۹**	۹	زمان×سطح
۵/۹۸**	۳/۵۵**	۱/۰۰ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۱۵*	۱۱۳/۵۵**	۹	زمان×سطح×اصلاح کننده
۰/۴۱	۰/۸۴	۰/۷۳	۰/۰۰۰۷	۶/۱۲	۴۸	خطا

\*: بیانگر معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد، \* معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد و ns: غیرمعنی داری است.

خاک دارد. افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع به نحوی بود که کاربرد ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی برگ خرما (معادل ۱۸، ۳۶ و ۷۲ تن در هکتار) در مقایسه با شاهد (C) میزان هدایت هیدرولیکی اشباع را به ترتیب ۲۴/۲، ۱۷/۷ و ۷۴/۳ درصد افزایش داد و کاربرد بیوچار باعث افزایش ۲۹/۴ و ۴۱/۴ درصدی هدایت هیدرولیکی شد. نتایج این پژوهش با یافته‌های وانگ و همکاران (۲۰۱۴) و رزاقی و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد. نتایج نشان داد که آثار اصلی زمان و اثر متقابل آن با نوع ماده اصلاح کننده و سطوح کاربرد آن بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $P < 0.01$ ) تفاوت معنی داری دارند (جدول ۵).

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارهای برگ خرما با زمان بر K<sub>s</sub> نشان داد که بیشترین افزایش K<sub>s</sub> در کوتاه‌ترین زمان (۱ ماه) مربوط به تیمار D<sub>1</sub>T<sub>1</sub> و بیشترین افزایش در زمان‌های طولانی مربوط به تیمار D<sub>3</sub>T<sub>1</sub> است. این نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۲٪ وزنی برگ خرما طی یک ماه بیشترین تأثیر را بر افزایش K<sub>s</sub> دارد. اثر متقابل تیمارهای بیوچار با زمان بر K<sub>s</sub> نشان داد که بیشترین افزایش K<sub>s</sub> در کوتاه‌ترین زمان (۱ ماه) مربوط به تیمار B<sub>2</sub>T<sub>1</sub> و بیشترین افزایش در زمان‌های طولانی مربوط به تیمار B<sub>3</sub>T<sub>4</sub> است. این نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۱٪ وزنی بیوچار طی یک ماه بیشترین تأثیر را بر افزایش K<sub>s</sub> دارد و افزایش ۲٪ وزنی بیوچار طی مدت ۹ ماه بیشترین افزایش در K<sub>s</sub> را نشان داد. اثر افزودن بیوچار بر افزایش K<sub>s</sub> در درازمدت بیشتر از اثر افزودن برگ خرما

مقایسه میانگین اثر متقابل اصلاح کننده و سطوح کاربرد برگ خرما و بیوچار آن بر هدایت هیدرولیکی اشباع در شکل ۱ نشان شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سطوح برگ خرما، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک روند افزایشی دارد و بین سطوح مختلف برگ خرما اختلاف معنی دار وجود دارد.



تیمارهای با حروف لاتین مشترک، بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱٪ تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند. B: بیوچار و D: ماده خشک شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل نوع ماده اصلاحی (برگ خرما و بیوچار آن) و سطوح کاربرد بر هدایت هیدرولیکی اشباع

همچنین با افزایش مقدار بیوچار هدایت هیدرولیکی افزایش نشان داد و این افزایش به جز تیمار B<sub>1</sub> (بیوچار ۰/۵ درصد) نسبت به تیمار شاهد دارای روند افزایشی بود. مقایسه نتایج آثار برگ خرما و بیوچار آن نشان می‌دهد که افزودن ۲ درصد وزنی برگ خرما و بیوچار (تیمارهای D<sub>3</sub> و B<sub>3</sub>) بیشترین تأثیر را بر افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع

بیوچار 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 که این یافته‌ها با نتایج تحقیقات (لیم و همکاران، ۲۰۱۵؛ اویانگ و همکاران، ۲۰۱۳) مطابقت دارد.

بود؛ در حالی که در کوتاه‌مدت اثر برگ خشک خرما در افزایش  $K_s$  نسبت به بیوچار آن بیشتر است. تفاوت بین اثر کوتاه‌مدت و درازمدت کاربرد برگ خرما و بیوچار بر  $K_s$  اختلاف معنی‌داری ( $P < 0.01$ ) دارد. علت افزایش  $K_s$  با افزودن برگ خرما و بیوچار آن به خاک این است که

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل اصلاح‌کننده، سطح و زمان بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک\*

میانگین	زمان				سطح	اصلاح‌کننده
	T <sub>4</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>		
۱۱/۰۳ <sup>D</sup>	۱۸/۷۷ <sup>cd</sup>	۱۲/۵۴ <sup>fg</sup>	۱۰/۹۶ <sup>gh</sup>	۱/۸۵ <sup>l</sup>	B <sub>0</sub>	بیوچار
۶/۶۸ <sup>E</sup>	۵/۴۸ <sup>ijkl</sup>	۵/۱۷ <sup>ijkl</sup>	۱۲/۸۰ <sup>efg</sup>	۳/۲۶ <sup>kl</sup>	B <sub>1</sub>	
۱۴/۲۷ <sup>BC</sup>	۸/۳۲ <sup>ghij</sup>	۱۲/۲۰ <sup>fg</sup>	۱۸/۷۷ <sup>cd</sup>	۱۷/۷۷ <sup>cd</sup>	B <sub>2</sub>	
۱۵/۶۰ <sup>B</sup>	۲۷/۴۹ <sup>ab</sup>	۱۰/۷۰ <sup>gh</sup>	۲۱/۰۶ <sup>c</sup>	۳/۱۵ <sup>kl</sup>	B <sub>3</sub>	
۱۱/۰۳ <sup>D</sup>	۱۸/۷۷ <sup>cd</sup>	۱۲/۵۴ <sup>efg</sup>	۱۰/۹۶ <sup>gh</sup>	۱/۸۵ <sup>l</sup>	D <sub>0</sub>	برگ خرما
۱۳/۷۰ <sup>BC</sup>	۱۸/۰۹ <sup>cd</sup>	۷/۴۱ <sup>hijk</sup>	۱۰/۱۵ <sup>ghij</sup>	۱۹/۱۷ <sup>cd</sup>	D <sub>1</sub>	
۱۲/۹۸ <sup>CD</sup>	۱۷/۹۹ <sup>cd</sup>	۱۰/۸۴ <sup>gh</sup>	۶/۳۲ <sup>ijkl</sup>	۱۶/۸۸ <sup>ede</sup>	D <sub>2</sub>	
۱۹/۲۳ <sup>A</sup>	۲۵/۱۷ <sup>b</sup>	۵/۲۰ <sup>ijkl</sup>	۱۵/۴۵ <sup>def</sup>	۳۱/۰۶ <sup>a</sup>	D <sub>3</sub>	
	۱۷/۵۱ <sup>A</sup>	۹/۵۸ <sup>C</sup>	۱۳/۳۰ <sup>B</sup>	۱۱/۸۷ <sup>B</sup>	میانگین	

\* میانگین‌های هر ستون و ردیف که حداقل دارای یک حرف لاتین مشترک هستند، بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن و در سطح احتمال ۱ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

نسبت به تیمار شاهد افزایش کمتری را نسبت به کاربرد برگ خرما در خاک نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که کاربرد ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی برگ خرما در مقایسه با شاهد ( $D_0$ ) مقدار رطوبت ظرفیت زراعی را به ترتیب ۱۲، ۱۱/۳ و ۱۲/۴ درصد و کاربرد بیوچار نسبت به تیمار شاهد ( $B_0$ ) باعث افزایش ۱۰/۳، ۹/۲ و ۸/۴ درصد در رطوبت ظرفیت زراعی می‌شود. بنابراین، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، با توجه به اهداف کاربرد بیوچار و برگ خرما می‌توان مدیریت کرد که چه مقدار از این مواد به خاک اضافه شود. دلیل افزایش  $\theta_{FC}$  را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که افزودن بیوچار به خاک، سبب متخلخل‌تر شدن خاک می‌شود و این امر با افزایش منافذ ریز خاک باعث نگهداری بیشتر رطوبت خاک می‌شود. نتایج این پژوهش با یافته‌های تحقیقات بریگس و همکاران (۲۰۱۱) و رزاقی و همکاران ۱۳۹۶ از نظر روند تغییرات همخوانی دارد.

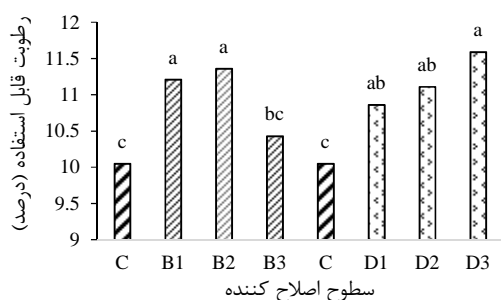
**آثار برگ خرما و بیوچار آن بر ضرایب رطوبتی خاک**  
نتایج نشان داد که آثار اصلی نوع ماده بر PWP، RFC و PAWC دارای اختلاف معنی‌داری نیست و اثر سطح کاربرد بر همه ضرایب رطوبتی خاک معنی‌دار ( $P < 0.01$ ) بود. اثر متقابل نوع ماده و سطح کاربرد بر PAWC معنی‌دار ( $P < 0.01$ ) و بر سایر ضرایب رطوبتی تفاوت معنی‌دار وجود ندارد (جدول ۴). مقایسه میانگین آثار اصلی نوع اصلاح‌کننده و سطوح کاربرد آنها بر رطوبت ظرفیت زراعی (FC) در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که برگ خشک خرما تأثیر بیشتری نسبت به بیوچار آن در افزایش رطوبت ظرفیت زراعی دارد. سطوح کاربرد ماده اصلاح‌کننده نسبت به شاهد تفاوت معنی‌داری دارد؛ اما تفاوت بین سطوح معنی‌دار نیست. نتایج نشان داد که آثار برگ خرما و بیوچار آن نسبت به شاهد افزایش دارد. افزایش بیوچار به خاک

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر اصلاح‌کننده و سطوح کاربرد آن بر رطوبت ظرفیت زراعی

نوع ماده اصلاح‌کننده		سطح کاربرد ماده اصلاح‌کننده			میانگین
بیوچار	برگ خرما	صفر (شاهد)	۰/۵٪	۱٪	
۲۲/۴۳ <sup>b</sup>	۲۲/۸۳ <sup>a</sup>	۲۰/۹۷ <sup>b</sup>	۲۳/۳۰ <sup>a</sup>	۲۳/۱۱ <sup>a</sup>	۲۳/۱۴ <sup>a</sup>

میانگین‌های سطح بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱ درصد، و میانگین‌های نوع ماده اصلاحی در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

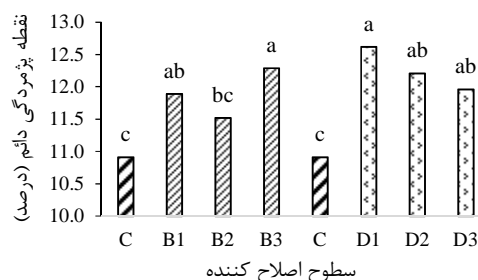
اصلاح شرایط ساختمانی خاک و تخلخل درشت آن می‌شود؛ ولی در بافت و منافذ ریز آن تغییری ایجاد نمی‌کند. به همین دلیل، رطوبت در ضرایب FC، WHC و PAWC تغییر معنی‌داری پیدا می‌کند؛ ولی در وضعیت  $\theta_{PWP}$  که تحت کنترل منافذ ریز خاک قرار دارد، تغییرات معنی‌داری نداشته است. اثر متقابل نوع ماده اصلاح‌کننده و سطح کاربرد بر PAWC اختلاف معنی‌دار ( $P < 0.01$ ) دارد (جدول ۴). نتایج نشان داد که در تیمار بیوجار B<sub>1</sub> و B<sub>2</sub> بیشترین افزایش نسبت به تیمارهای دیگر، و نسبت به شاهد PAWC افزایش چشمگیری داشته‌اند (شکل ۳).



تیمارهای با حروف لاتین مشترک، بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱٪ تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. B: بیوجار و D: ماده خشک  
شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل ماده (برگ خرما و بیوجار) و سطوح کاربرد بر آب قابل استفاده گیاه

افزودن ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی برگ خرما به خاک به ترتیب باعث افزایش ۷/۵، ۱۰ و ۱۴ درصد وزنی افزودن بیوجار سبب افزایش ۱۰/۶، ۹/۷ و ۳/۵ درصد وزنی PAWC نسبت به تیمار شاهد شد. روند افزایش معنی‌دار آب قابل دسترس گیاه در این پژوهش با نتایج آندرنلی و همکاران (۲۰۱۶) و رزاقی و همکاران (۱۳۹۶) همخوانی دارد. نتایج نشان داد که آثار اصلی نوع ماده اصلاحی و اثر متقابل آن با سطح کاربرد ماده بر رطوبت ظرفیت زراعی نسبی RFC اختلاف معنی‌داری ندارد؛ اما آثار اصلی سطوح کاربرد ماده اصلاحی بر RFC اختلاف معنی‌داری ( $P < 0.01$ ) دارد (جدول ۴). مقایسه میانگین آثار سطوح کاربرد برگ خرما و بیوجار بر رطوبت ظرفیت زراعی نسبی (RFC) در شکل ۴ نشان داده شده است.

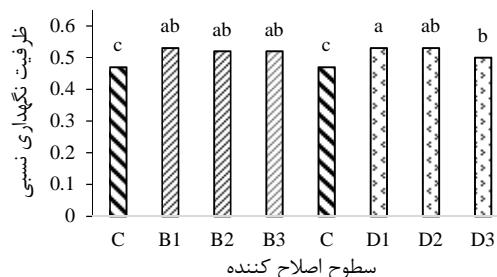
نتایج نشان داد که با افزایش سطوح برگ خرما، رطوبت نقطه پژمردگی دائم  $\theta_{PWP}$  کاهش یافته است؛ اما کاربرد آن در خاک باعث افزایش معنی‌دار  $\theta_{PWP}$  نسبت به تیمار شاهد می‌شود (جدول ۳). با افزایش سطوح بیوجار در تیمار B<sub>1</sub> و B<sub>3</sub> رطوبت نقطه پژمردگی دائم افزایش و در تیمار B<sub>2</sub> نقطه پژمردگی دائم کاهش یافته است که سه سطح بیوجار تفاوت معنی‌دار با نمونه شاهد دارند و نسبت به تیمار شاهد،  $\theta_{PWP}$  افزایش پیدا کرده است (شکل ۲).



تیمارهای با حروف لاتین مشترک، بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱٪ تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. B: بیوجار و D: ماده خشک  
شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل نوع ماده (برگ خرما و بیوجار آن) و سطوح کاربرد بر رطوبت نقطه پژمردگی دائم

نتایج نشان داد که افزودن برگ خرما سبب افزایش معنی‌دار  $\theta_{PWP}$  شد و تیمار ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی آن (معادل ۱۸، ۳۶ و ۷۲ تن در هکتار) در مقایسه با شاهد (D<sub>0</sub>) به ترتیب باعث افزایش ۱۵/۷، ۱۲ و ۱۰ درصد وزنی  $\theta_{PWP}$  خاک شدند. افزودن بیوجار در مقایسه با شاهد (B<sub>0</sub>) به ترتیب باعث افزایش ۹، ۵/۶ و ۱۲/۶ درصد وزنی  $\theta_{PWP}$  خاک شد. رفتار رطوبتی خاک در مکش‌های ماتریک بالا تحت کنترل بافت خاک و منافذ ریز آن قرار دارد؛ ولی در مکش‌های پایین تحت کنترل ساختمان خاک و تخلخل درشت آن است (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۵). نتایج این پژوهش با نتایج نوروزی و همکاران (۱۳۹۵) در مورد افزایش ضرایب رطوبتی خاک به جز در مورد  $\theta_{PWP}$  مطابقت دارد. نتایج این پژوهش با یافته‌های سلیمان و همکاران (۲۰۱۷) و رزاقی و همکاران (۱۳۹۶) در افزایش  $\theta_{PWP}$  مطابقت دارد؛ اما با نتایج هاردی و همکاران (۲۰۱۴) و نوروزی و همکاران (۱۳۹۵) همخوانی ندارد. آندرنلی و همکاران (۲۰۱۶) نتیجه گرفتند که کاربرد بیوجار باعث

معنی‌دار نیست. اثر متقابل زمان و نوع ماده اصلاحی بر  $\theta_{PWP}$  تفاوت معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) دارد و این اثر بر سایر ضرایب رطوبتی خاک معنی‌دار نیست. اثر متقابل زمان و سطوح کاربرد ماده اصلاحی بر  $R_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  تفاوت معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) دارد و این اثر بر  $\theta_{FC}$  و PAWC تفاوت معنی‌داری ندارد. آثار متقابل زمان، نوع ماده و سطوح کاربرد بر PAWC و  $\theta_{PWP}$  در سطح آماری ( $P < 0.01$ ) و  $R_{FC}$  در سطح آماری ( $P < 0.05$ ) تفاوت معنی‌داری دارند و این آثار بر  $\theta_{FC}$  معنی‌دار نیست. نتایج مقایسه میانگین اثر زمان بر  $\theta_{FC}$  بیانگر این است که زمان به عنوان یک فاکتور مؤثر بر آثار کاربرد بیوچار است (جدول ۷). بیشترین تأثیر کاربرد بیوچار و برگ خرما بعد از گذشت ۹ ماه بود. با توجه به تغییرات ناچیز در افزایش رطوبت ظرفیت زراعی طی فاصله زمانی ۶ ماه، و افزایش قابل توجه آن پس از گذشت ۹ ماه، می‌توان استنباط کرد که بررسی این آثار نیازمند فاصله‌های زمانی بیشتر در درازمدت خواهد بود. علت افزایش رطوبت ظرفیت زراعی در اثر افزودن برگ خرما و بیوچار طی گذشت زمان را می‌توان به سطح ویژه بیوچار و افزایش منافذ ریز خاک نسبت داد که می‌تواند نگهداری آب را افزایش دهد. نتایج این پژوهش با یافته‌های آبل و همکاران (۲۰۱۳) همخوانی دارد.



تیمارهای با حروف لاتین مشترک، بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱٪ تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. B: بیوچار و D: ماده خشک

شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل ماده (برگ خرما و بیوچار) و سطوح کاربرد بر رطوبت ظرفیت زراعی نسبی

نتایج نشان داد که با افزایش سطوح برگ خرما و بیوچار، RFC روند افزایشی نسبت به تیمار شاهد دارد و بین سطوح مختلف برگ خرما و بیوچار آن اختلاف معنی‌دار ( $P < 0.01$ ) وجود دارد. نتایج نشان داد که افزودن برگ خرما در تیمار ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی به ترتیب باعث افزایش ۱۲/۸، ۱۲/۸ و ۶/۴ و افزودن بیوچار به ترتیب باعث افزایش ۱۲/۸، ۱۰/۶ و ۱۰/۶ درصد وزنی RFC خاک در مقایسه با شاهد شد.

نتایج تجزیه واریانس آثار زمان، ماده اصلاحی و سطح در جدول ۳ نشان می‌دهد که آثار اصلی زمان بر  $R_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  در سطح آماری ( $P < 0.01$ ) و  $\theta_{FC}$  در سطح آماری ( $P < 0.05$ ) تفاوت معنی‌داری دارد و آثار زمان بر PAWC

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر زمان بر رطوبت ظرفیت زراعی

تیمار زمان	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
میانگین	۲۲/۵۸ <sup>ab</sup>	۲۲/۲۹ <sup>b</sup>	۲۲/۵۷ <sup>ab</sup>	۲۳/۰۷ <sup>a</sup>

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

متقابل تیمارهای بیوچار با زمان بر  $\theta_{PWP}$  روند افزایشی نشان داد و بیشترین افزایش مربوط به تیمار B<sub>3</sub>T<sub>3</sub> است. افزودن ۰/۵٪ وزنی برگ خرما و افزودن ۲٪ وزنی بیوچار پس از گذشت ۶ ماه بیشترین اثر را بر  $\theta_{PWP}$  دارد. این نتایج نشان می‌دهد که بیشترین افزایش در  $\theta_{PWP}$  از نظر زمانی برای دو نوع ماده اصلاحی یکسان بود؛ اما از نظر مقدار ماده اصلاحی مورد نیاز برای افزایش  $\theta_{PWP}$  در طی زمان تفاوت وجود دارد.

جدول ۹، مقایسه میانگین نتایج نشان داد که تیمار B<sub>2</sub>T<sub>4</sub> و D<sub>3</sub>T<sub>3</sub> دارای بیشترین افزایش در PAWC است و

مقایسه میانگین اثر متقابل زمان، نوع ماده اصلاح‌کننده و سطوح کاربرد آن بر  $\theta_{PWP}$  تفاوت معنی‌داری ( $P < 0.01$ ) دارند (جدول ۸). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارهای برگ خرما با زمان بر  $\theta_{PWP}$  روند افزایشی نشان داد و بیشترین افزایش مربوط به تیمار D<sub>1</sub>T<sub>3</sub> است. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع ماده اصلاح‌کننده، سطوح کاربرد برگ خرما و بیوچار و زمان بر  $\theta_{PWP}$  نشان داد که تیمار B<sub>3</sub>T<sub>1</sub> کمترین اثر را بر افزایش  $\theta_{PWP}$  دارد.

با افزایش سطوح برگ خرما،  $\theta_{PWP}$  کاهش یافته است؛ اما نسبت به نمونه شاهد تفاوت معنی‌دار وجود دارد. اثر



نسبت به شاهد اثر افزایشی چشمگیری دارد که این علت را می‌توان به سطح ویژه بیوجار و افزایش منافذ ریز خاک نسبت داد که نگهداری آب را افزایش داد. نتایج این پژوهش با یافته‌های آبل و همکاران (۲۰۱۳) و هاردی و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی دارد.

تیمارهای  $D_1T_3$  و  $B_3T_3$  کمترین اثر را بر افزایش PAWC نشان داد. نتایج نشان داد که افزودن ۱٪ وزنی بیوجار با گذشت ۹ ماه و افزودن ۲٪ وزنی برگ خرما پس از ۶ ماه بیشترین افزایش در PAWC را به وجود آورد. اثر تیمارهای برگ خرما و بیوجار بر PAWC نشان‌دهنده آن است که

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل اصلاح‌کننده، سطوح کاربرد و زمان بر رطوبت نقطه پژمردگی دائم

میانگین	زمان				سطح	اصلاح‌کننده
	T <sub>4</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>		
۱۰/۹۱ <sup>C</sup>	۱۰/۹۷ <sup>ghi</sup>	۱۱/۰۱ <sup>ghi</sup>	۱۰/۴۱ <sup>i</sup>	۱۱/۲۷ <sup>fghi</sup>	B <sub>0</sub>	بیوجار
۱۱/۹۰ <sup>AB</sup>	۱۲/۶۵ <sup>bcd</sup>	۱۰/۹۳ <sup>ghi</sup>	۱۱/۲۱ <sup>fghi</sup>	۱۲/۸۰ <sup>bcd</sup>	B <sub>1</sub>	
۱۱/۵۲ <sup>BC</sup>	۱۱/۶۹ <sup>d-i</sup>	۱۱/۴۳ <sup>e-i</sup>	۱۱/۶۶ <sup>d-i</sup>	۱۱/۳۱ <sup>fghi</sup>	B <sub>2</sub>	
۱۲/۲۹ <sup>A</sup>	۱۲/۴۶ <sup>bcd</sup>	۱۴/۴۸ <sup>a</sup>	۱۱/۷۵ <sup>d-i</sup>	۱۰/۴۸ <sup>i</sup>	B <sub>3</sub>	
۱۰/۹۱ <sup>C</sup>	۱۰/۹۷ <sup>ghi</sup>	۱۱/۰۱ <sup>ghi</sup>	۱۰/۴۱ <sup>i</sup>	۱۱/۲۷ <sup>fghi</sup>	D <sub>0</sub>	برگ خرما
۱۲/۶۲ <sup>A</sup>	۱۲/۰۰ <sup>c-h</sup>	۱۴/۴۷ <sup>a</sup>	۱۲/۱۵ <sup>cdefg</sup>	۱۱/۸۵ <sup>c-h</sup>	D <sub>1</sub>	
۱۲/۲۱ <sup>AB</sup>	۱۳/۵۲ <sup>ab</sup>	۱۰/۹۴ <sup>ghi</sup>	۱۱/۲۹ <sup>fghi</sup>	۱۳/۱۱ <sup>bc</sup>	D <sub>2</sub>	
۱۲/۹۶ <sup>AB</sup>	۱۲/۴۳ <sup>bcd</sup>	۱۰/۷۴ <sup>hi</sup>	۱۱/۵۶ <sup>d-i</sup>	۱۳/۱۲ <sup>bc</sup>	D <sub>3</sub>	
	۱۲/۰۹ <sup>A</sup>	۱۱/۸۸ <sup>A</sup>	۱۱/۳۰ <sup>B</sup>	۱۱/۹۰ <sup>A</sup>	میانگین	

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ۹- مقایسه میانگین اثر متقابل اصلاح‌کننده، سطوح کاربرد و زمان بر رطوبت قابل استفاده گیاه

میانگین	زمان				سطح	اصلاح‌کننده
	T <sub>4</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>		
۱۰/۰۵ <sup>C</sup>	۱۰/۰۴ <sup>cd</sup>	۱۰/۰۳ <sup>cd</sup>	۱۰/۴۸ <sup>bcd</sup>	۹/۶۶ <sup>d</sup>	B <sub>0</sub>	بیوجار
۱۱/۲۱ <sup>A</sup>	۱۱/۳۱ <sup>abcd</sup>	۱۲/۰۱ <sup>ab</sup>	۱۰/۹۷ <sup>abcd</sup>	۱۰/۵۶ <sup>bcd</sup>	B <sub>1</sub>	
۱۱/۳۶ <sup>A</sup>	۱۲/۴۳ <sup>a</sup>	۱۱/۰۹ <sup>abcd</sup>	۱۰/۹۰ <sup>abcd</sup>	۱۱/۰۲ <sup>abcd</sup>	B <sub>2</sub>	
۱۰/۴۳ <sup>BC</sup>	۱۱/۰۴ <sup>abcd</sup>	۷/۹۳ <sup>e</sup>	۱۱/۵۹ <sup>abc</sup>	۱۱/۱۷ <sup>abcd</sup>	B <sub>3</sub>	
۱۰/۰۵ <sup>C</sup>	۱۰/۰۴ <sup>cd</sup>	۱۰/۰۳ <sup>cd</sup>	۱۰/۴۸ <sup>bcd</sup>	۹/۶۶ <sup>d</sup>	D <sub>0</sub>	برگ خرما
۱۰/۸۶ <sup>A<sup>B</sup></sup>	۱۱/۵۵ <sup>abc</sup>	۱۰/۰۶ <sup>cd</sup>	۱۰/۵۷ <sup>bed</sup>	۱۱/۲۶ <sup>abcd</sup>	D <sub>1</sub>	
۱۱/۱۱ <sup>AB</sup>	۱۰/۳۵ <sup>bcd</sup>	۱۱/۸۹ <sup>ab</sup>	۱۰/۸۴ <sup>abcd</sup>	۱۱/۳۶ <sup>abcd</sup>	D <sub>2</sub>	
۱۱/۵۹ <sup>A</sup>	۱۱/۰۹ <sup>abcd</sup>	۱۲/۵۱ <sup>a</sup>	۱۲/۰۵ <sup>ab</sup>	۱۰/۷۴ <sup>abcd</sup>	D <sub>3</sub>	
	۱۰/۹۸ <sup>A</sup>	۱۰/۶۹ <sup>A</sup>	۱۰/۹۹ <sup>A</sup>	۱۰/۶۸ <sup>A</sup>	میانگین	

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر پایه آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

با گذشت زمان  $\theta_{RFC}$  افزایش می‌یابد؛ به طوری که با افزودن ۰/۵، ۱ و ۲ درصد برگ خرما به خاک پس از گذشت ۹ ماه (T<sub>4</sub>) در همه سطوح کاربرد ۱۶/۵ درصد، و افزودن بیوجار به ترتیب باعث ۲۳، ۲۳ و ۱۶ درصد افزایش در  $\theta_{RFC}$  شد.

مقایسه میانگین اثر متقابل نوع ماده اصلاح‌کننده، سطوح کاربرد و زمان بر  $\theta_{RFC}$  (جدول ۱۰) نشان داد که مقدار  $\theta_{RFC}$  افزایش یافته است و بیشترین افزایش مربوط به تیمارهای  $B_2T_4$  و  $B_1T_4$  و کمترین افزایش در تیمارهای  $D_3T_1$  و  $B_3T_1$  است. با افزودن برگ خرما در همه سطوح

جدول ۱۰- مقایسه میانگین اثر متقابل اصلاح کننده، سطوح کاربرد و زمان بر رطوبت ظرفیت زراعی نسبی

میانگین	زمان				سطح	اصلاح کننده
	T <sub>4</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>		
۰/۴۷ <sup>C</sup>	۰/۴۸ <sup>efghi</sup>	۰/۴۹ <sup>efghi</sup>	۰/۴۷ <sup>ghi</sup>	۰/۴۵ <sup>i</sup>	B <sub>0</sub>	بیوچار
۰/۵۳ <sup>AB</sup>	۰/۵۹ <sup>a</sup>	۰/۵۵ <sup>abcd</sup>	۰/۵۱ <sup>defgh</sup>	۰/۴۸ <sup>efghi</sup>	B <sub>1</sub>	
۰/۵۳ <sup>AB</sup>	۰/۵۹ <sup>a</sup>	۰/۵۲ <sup>cdefg</sup>	۰/۵۳ <sup>bcdef</sup>	۰/۴۷ <sup>ghi</sup>	B <sub>2</sub>	
۰/۵۳ <sup>AB</sup>	۰/۵۶ <sup>abc</sup>	۰/۵۷ <sup>ab</sup>	۰/۵۳ <sup>bcdef</sup>	۰/۴۴ <sup>i</sup>	B <sub>3</sub>	
۰/۴۷ <sup>C</sup>	۰/۴۹ <sup>efghi</sup>	۰/۴۹ <sup>efghi</sup>	۰/۴۷ <sup>ghi</sup>	۰/۴۵ <sup>i</sup>	D <sub>0</sub>	برگ خرما
۰/۵۴ <sup>A</sup>	۰/۵۶ <sup>abc</sup>	۰/۵۷ <sup>abc</sup>	۰/۵۶ <sup>abc</sup>	۰/۴۶ <sup>hi</sup>	D <sub>1</sub>	
۰/۵۳ <sup>AB</sup>	۰/۵۶ <sup>abc</sup>	۰/۵۷ <sup>abc</sup>	۰/۵۱ <sup>b-f</sup>	۰/۴۶ <sup>ghi</sup>	D <sub>2</sub>	
۰/۵۰ <sup>B</sup>	۰/۵۶ <sup>abc</sup>	۰/۵۲ <sup>bcde</sup>	۰/۴۸ <sup>fghi</sup>	۰/۴۴ <sup>i</sup>	D <sub>3</sub>	
	۰/۵۵ <sup>A</sup>	۰/۵۴ <sup>B</sup>	۰/۵۱ <sup>C</sup>	۰/۴۶ <sup>D</sup>	میانگین	

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی دار ندارند.

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که بیوچار اثر معنی‌داری بر رطوبت ظرفیت زراعی و رطوبت نقطه پژمردگی دائم دارد که بر این اساس، آب قابل دسترس گیاه نیز افزایش یافت. نتایج نشان داد کاربرد برگ خرما و بیوچار آن در یک خاک لوم رسی شنی می‌تواند به عنوان اصلاح‌کننده مؤثر برای بهبود خصوصیات فیزیکی خاک و افزایش رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی و آب قابل دسترس گیاه مورد استفاده قرار گیرند. با افزایش زمان و مقدار برگ خرما و بیوچار حاصل از آن در خاک، تغییرات معنی‌داری در خصوصیات فیزیکی و رفتار رطوبتی خاک ایجاد شد. کاربرد بیوچار در خاک‌های لوم رسی شنی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک با توجه به کمبود منابع آب در این مناطق، راهکار مناسبی خواهد بود. اثر افزودن بیوچار بر افزایش K<sub>s</sub> در درازمدت بیشتر از اثر افزودن برگ خرما بود. بنابراین، با تحقیقات دیگر می‌توان علاوه بر بررسی تأثیرات مثبت آن بر ویژگی‌های فیزیکی خاک به سایر آثار کاربرد آن نیز دست پیدا کرد. در این راستا، ملاحظات اقتصادی و آثار آن در شرایط مزرعه‌ای باید مورد توجه قرار گیرد. بررسی سایر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، مانند تخلخل و پایداری ساختمان خاک و همچنین آثار طولانی‌مدت (بیش از ۹ ماه) به آزمایش‌های دیگر موکول می‌شود.

### منابع

۱. حیدری ف. رسول‌زاده ع. سپاسخواه ع. ر. اصغری ع. و قویدل ا. ۱۳۹۲. اثر مدیریت بقایای گیاهی بر

ویژگی‌های فیزیکی و بیولوژیکی خاک و عملکرد ذرت علوفه‌ای و جو. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱۷(۶۵): ۲۳۳-۲۴۸.

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

۳. نوروزی م. طباطبائی س. ح. نوری م. ر. و متقیان ح. ۱۳۹۵. آثار کوتاه مدت بایوچار حاصل از برگ خرما بر حفظ رطوبت در خاک لوم رسی. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۶(۲): ۱۳۷-۱۵۰.

4. Abel S. Peters A. Trinks S. Schonsky H. Facklam M. and Wessolek G. 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*. 202-203: 183-191.
5. Andrenelli M. C. Maienzab A. Genesiob L. Migliettab 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.
6. Atkinson C. J. Fitzgerald J. D. and Hipps N. A. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil*. 337: 1-18.
7. Basso A. S. Miguez F. E. Laird D. A. Horton R. and Westgate M. 2013. Assessing potential of biochar for increasing water holding capacity of sandy soils. *Global Change Biology Bioenergy*. 5: 132-143.

- on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena*. 114: 37-44.
21. Olsen S. Cole C. Watanabe F. Dean L. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular Nr 939, US Gov. Print. Office, Washington, D.C. pp:1-18.
  22. Ouyang. L. Wang F. Tang J. Yu L. and Zhang R. 2013. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 13(4): 991-1002.
  23. 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: 252-263.
  24. Sohi S. P. Krull E. Lopez-Capel E. and Bol R. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*. 105: 47-82.
  25. Streubel J. D. Collins H. P. Garcia-Perez M. Tarara J. Granatstein D. and Kruger C. E. 2011. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application. *Soil Biology and Biochemistry*. 75: 1402-1413.
  26. Suliman W. Harsh J. B. Abu-Lail N. I. Fortuna A. M. Dallmeyer I. and Garcia-Pérez M. 2017. The role of biochar porosity and surface functionality in augmenting hydrologic properties of a sandy soil. *Science of The Total Environment*. 574:139-147.
  27. Sumner M. E. and Miller W. P. 1996. Cation exchange capacity, and exchange coefficients. In: D. L. Sparks (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical properties* (3rd ed.). ASA, SSSA, CSSA, Madison, WI.
  28. Verheijen F. Jeffery S. Bastos A. C. van der Velde M. and Diafas I. 2010. *Biochar Application to Soils – A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties Processes and Functions*. EUR 24099 EN. Office for the Official Publications of the European Communities. Luxembourg. 149 p.
  29. Walkley A. Black I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29-38.
  30. Woolf D. Amonette J. E. Street-Perrott F. A. Lehmann J. and Joseph S. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communicaions*.
  8. Bouyoucos C. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agronomy Journal* 54: 464-465.
  9. Bremner J. M. 1996. Nitrogen-total. P. 1085-1122. In Sparks, D. L. et al., *Method of soil analysis*. Published by: Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
  10. Case S. D. Whitaker J. McNamara N. P. and Reay D. S. 2012. The effect of biochar addition on N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions from a sandy loam soil. The role of soil aeration. *Soil Biology and Biochemistry*. 51: 125-134.
  11. Fellet G. Marchiol L. Delle Vedove G. and Peressotti A. 2011. Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation. *Chemosphere*. 83: 1262-1267.
  12. 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.
  13. Haluschak P. 2006. Laboratory methods of soil analysis. *Canada-Manitoba soil survey*, 3-133.
  14. 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: 347-361.
  15. 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*. 209-210:188-197.
  16. Klute A. 1986. Water retention: Laboratory methods In: Klute A. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1*. 2nd ed. Agronomy Monograph 9 ASA/SSSA Madison WI. pp. 635-662.
  17. Laghari M. Naidu R. Xiao B. Hu Z. Mirjat M. S. Hu M. Kandhro M. N. Chen Z. Guo D. Jogie Q. Abudia Z. N. and Fazala S. 2016. Recent developments in biochar as an effective tool for agricultural soil management: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 96(15): 4840-4849.
  18. Lehmann J. Gaunt J. and Rondon M. 2006. Biochar sequestration in terrestrial ecosystem: a review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 11: 403-427.
  19. Lim T. Spokas K. A. eyereisen G. F and Novak J. M. 2016. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere*. 142: 136-144.
  20. Lu S. G. Sun F. F. and Zong Y. T. 2014. Effect of rice husk biochar and coal fly ash

