



ISSN 2251-7480

اثرات کوتاه مدت بايوچار حاصل از برگ خرما بر حفظ رطوبت در خاک لوم شنی

مهرداد نوروزی^۱، سیدحسین طباطبائی^{۲*}، محمدرضا نوری^۳ و حمیدرضا متقیان^۴

(۱) دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی؛ گروه مهندسی آب؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه شهرکرد؛ ایران

(۲*) دانشیار؛ گروه مهندسی آب؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه شهرکرد؛ شهرکرد؛ ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: Tabatabaei@agr.sku.ac.ir

(۳) دانشیار؛ گروه مهندسی آب؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه شهرکرد؛ شهرکرد؛ ایران

(۴) استادیار؛ گروه علوم خاک؛ دانشکده کشاورزی؛ دانشگاه شهرکرد؛ شهرکرد؛ ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۰۲

چکیده

بايوچار، نام ترکیب آلی پایداری است که از تجزیه گرمایی هر نوع زیست توده تحت شرایط محدودیت اکسیژن که پیرولیز گفته می شود تهیه می گردد و در کشاورزی به منظور اصلاح شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده می شود. هدف اصلی در این پژوهش، بررسی اثرات بايوچار برگ خرما بر خصوصیات فیزیکی و رفتار رطوبتی خاکی با بافت لوم شنی بود. پنج نوع بايوچار تحت شرایط دمایی متفاوت (۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتیگراد) و مدت حرارت ۳ ساعت با استفاده از یک پوتنه برقی تهیه شد. بايوچارها با نسبت وزنی ۳ درصد، بطور یکنواخت و بصورت پودری با خاک عبور داده شده از الک ۲ میلی متر مخلوط شده و به مدت ۲ ماه خوابانده شدند، سپس منحنی مشخصه رطوبتی مبتنی بر مدل ون گنوختن تعیین شد. رطوبت در وضعیت های ظرفیت مزرعه (FC)، نقطه پژمردگی دائم (PWP)، آب قابل دسترس گیاه (PAWC)، ظرفیت نگهداری رطوبت (WHC) و درصد اشباع (θ_s) تعیین شدند. بر اساس نتایج بدست آمده، با افزایش دمای پیرولیز در دامنه ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد تغییرات معنی داری در خصوصیات فیزیکی و رفتار رطوبتی خاک ایجاد نشد ولی بطور کلی کاربرد بايوچار باعث کاهش معنی دار ($P < 0.01$) وزن مخصوص ظاهری گردید که به چگالی پایین ذرات بايوچار و نقش آن در بازآرایی منافذ خاک و تشکیل منافذ ثانویه نسبت داده می شود. مقادیر میانگین WHC، PAWC، θ_s و FC به ترتیب به میزان ۲۴/۴، ۲۰/۱، ۲۳/۴ و ۲۴ درصد نسبت به تیمار شاهد (خاک بدون بايوچار) افزایش پیدا کردند ولی PWP تغییرات معنی داری نداشت. داده های منحنی های مشخصه رطوبتی نشان داد که بايوچار باعث افزایش معنی دار ($P < 0.01$) منافذ بزرگتر از $0.2 \mu m$ که به لحاظ ذخیره رطوبت قابل دسترس گیاه حائز اهمیت است می گردد.

کلید واژه ها: آب قابل دسترس گیاه؛ بايوچار؛ ظرفیت نگهداری رطوبت

مقدمه

کودهای آلی در اثر دمای بالا سریعاً تجزیه و نابود می شود، لذا لازم است هر سال این گونه مواد آلی به خاک اضافه شود (Glaser et al., 2002; Uzoma et al., 2011). در سال های اخیر برای بالا بردن میزان ماده آلی خاک از مواد پایداری مانند بايوچار استفاده می شود که در مقابل تجزیه

امروزه اهمیت مواد آلی در اصلاح خصوصیات فیزیکی خاک مانند تخلخل، هدایت هیدرولیکی، ساختمان و نگهداری رطوبت به خوبی شناخته شده است. در مناطق گرمسیری عموم خاک ها به لحاظ ماده آلی فقیر بوده و

نگهداری رطوبت به ترتیب ۱۲، ۲۰ و ۳۱ درصد افزایش پیدا می‌کند.

یکی از مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی خاک در تولید کشاورزی، آب قابل دسترس گیاه^۳ است (Obia et al., 2016). طبق بعضی گزارش‌ها، بایوچار باعث افزایش آب قابل دسترس گیاه می‌شود (Mukherjee and Lal, 2013). در همین راستا de Melo Carvalho و همکاران (۲۰۱۴) اثرات بایوچار حاصل از چوب اکالیپتوس تحت فرایند پیرولیز آهسته (دمای حدود ۴۵۰ درجه سانتیگراد) بر حفظ رطوبت در یک خاک لوم شنی را بررسی کردند. آنها مقادیر مختلف بایوچار (۰، ۱۶، ۳۲ تن در هکتار) را تا عمق ۱۵ سانتیمتر با خاک مخلوط کرده و گزارش کردند که آب قابل دسترس گیاه در لایه سطحی خاک حدود ۰/۸ درصد به ازای هر تن مصرف بایوچار افزایش پیدا می‌کند. Uzoma و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که بایوچار

کود گاوی باعث افزایش آب قابل دسترس گیاه و کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع در یک خاک شنی می‌شود. Ouyang و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که خصوصیات رطوبتی خاک لوم شنی نسبت به خاک لوم رسی تغییرات بیشتری تحت تأثیر بایوچار دارد. لذا اثرات اصلاحی بایوچار بر خصوصیات فیزیکی خاک، علاوه بر شرایط پیرولیز، نوع ماده اولیه، نوع خاک و میزان مصرف بایوچار نیز بستگی دارد (Andrenelli et al., 2016).

غالب زمین‌های کشاورزی استان بوشهر در جنوب ایران از نظر میزان ماده آلی فقیر هستند که این امر بر حفظ رطوبت خاک و جذب عناصر غذایی ضروری گیاه اثرات نامطلوب دارد و کشاورزان ناچارند هر ساله مقادیر قابل توجهی کود حیوانی مصرف کنند. در همین حال، 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 ضایعات مقادیر قابل توجهی بایوچار تولید کرده و از آن در اراضی کشاورزی به منظور کاهش تنش رطوبتی

میکروبی بسیار مقاوم است (Glaser et al., 2002). بایوچار نام یک ترکیب آلی غنی از کربن است که از طریق تجزیه گرمایی هر نوع زیست توده تحت شرایط بدون اکسیژن یا حضور جزئی آن، که در اصطلاح پیرولیز^۱ گفته می‌شود، بدست می‌آید (Lehmann and Joseph., 2009).

فرایند پیرولیز و تبدیل ماده آلی به بایوچار منجر به تبدیل حدود ۵۰ درصد کربن فعال ذخیره شده در بافت‌های گیاهی به منبعی از کربن آلی می‌شود. در حالیکه تثبیت کربن در اثر سوختن معمولی حدود ۳ درصد و در اثر تجزیه بیولوژیکی کمتر از ۲۰ درصد گزارش شده است (Woolf et al., 2010). لذا اساساً تولید بایوچار با هدف جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق تثبیت بلند مدت کربن پیشنهاد شده است (Verheijen et al., 2010) و کاربرد آن در کشاورزی از اهداف جنبی تولید بایوچار است.

علی‌رغم اهمیت خصوصیات فیزیکی خاک در افزایش تولید، به بررسی اثرات بایوچار بر این خصوصیات در مقایسه با خصوصیات شیمیایی توجه کمتری شده است. اخیراً گزارش‌هایی در خصوص نقش بایوچار در بهبود پایداری خاکدانه‌ها (Ouyang et al., 2013)، افزایش تخلخل، کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک و افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت^۲ (Mollinedo et al., 2015; Basso و همکاران (۲۰۱۲) با مصرف سطوح مختلف بایوچار حاصل از درخت بلوط تحت فرایند پیرولیز با دمای حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد (۰، ۳ و ۶ درصد وزنی)، متوجه افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک به میزان ۲۳ درصد شدند. Lu و همکاران (۲۰۱۴) بایوچار حاصل از شلتوک برنج را در سطوح ۰، ۲ و ۶ درصد وزنی به یک خاک رسی افزودند و به مدت ۱۸۰ روز خواباندند. آنها متوجه شدند که در نمونه‌های حاوی بایوچار در مقایسه با تیمار شاهد (بدون بایوچار) ظرفیت

¹ Pyrolysis

² Water Holding Capacity (WHC)

³ Plant Available Water Content (PAWC)

آسياب شده و از الک ۲ ميلي متر عبور داده شدند. pH و EC نمونه‌ها با تهیه سوسپانسیون بايوچار و آب مقطر به نسبت ۵ به ۱ و تکان دادن آن به مدت ۱ ساعت، با استفاده از pH متر و EC متر اندازه‌گیری شدند. CEC نیز به روش جانشینی با استات سدیم اندازه‌گیری شد. بايوچارهای تهیه شده به نسبت وزنی ۳ درصد (30 g.Kg^{-1}) که معادل $54/9 \text{ t/ha}$ در خاک تا عمق $0/15 \text{ m}$ می‌باشد، بصورت دستی و بطور یکنواخت با خاک مخلوط شدند. خاک مورد استفاده از عمق (۰-۳۰) سانتیمتر زمین زراعی با بافت متوسط (لوم شنی) و وزن مخصوص ظاهری $1/34$ گرم بر سانتیمتر مکعب تهیه شد که خصوصیات شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده‌اند. خاک تهیه شده در هوای آزاد خشک و کوبیده شده و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. نمونه‌های مخلوط خاک و بايوچار به مدت ۲ ماه در داخل کیسه‌های نایلونی، در دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با رطوبت ثابت خوابانده شدند.

بعد از دو ماه خواباندن وزن مخصوص ظاهری نمونه‌ها به روش سیلندر اندازه‌گیری شدند. وزن مخصوص ظاهری نمونه‌ها قبل از خواباندن بر اساس معادله ۱ محاسبه گردید:

$$\rho_b = 100 / \left[\left(\frac{x}{\rho_1} \right) + \left(\frac{100-x}{\rho_2} \right) \right] \quad (1)$$

در این معادله ρ_b وزن مخصوص ظاهری مخلوط خاک و بايوچار (g.cm^{-3})، ρ_1 وزن مخصوص ظاهری بايوچار، ρ_2 وزن مخصوص ظاهری خاک و x درصد وزنی بايوچار می‌باشد.

استفاده نمود. لذا هدف پژوهش حاضر، بررسی اثرات مصرف بايوچار برگ خرما بر شرایط فیزیکی و ویژگی‌های رطوبت خاک بود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در تابستان ۱۳۹۴ در محل مرکز تحقیقات کشاورزی استان بوشهر انجام شد. برای تهیه بايوچار برگ خرما، ابتدا برگ خشک شده خرما با استفاده از دستگاه خردکن به قطعات ریز به ابعاد کمتر از ۲ سانتیمتر تبدیل شد. با استفاده از فویل آلومینیومی، پاکت‌های مخصوص ساخته و با قرار دادن برگ خرد شده خرما در داخل آنها بسته‌های حدود ۲۰۰ گرمی تهیه و کاملاً مسدود شدند و صرفاً یک سوراخ به قطر حدود ۱ میلی‌متر در آنها تعبیه شد. بسته‌ها در یک بوته آزمایشگاهی در دماهای ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتیگراد و بطور میانگین به مدت ۳ ساعت حرارت داده شدند. لازم به ذکر است که در غالب پژوهش‌ها برای پیرولیز آهسته مدت زمان حرارت‌دهی ۱ تا ۴ ساعت و درجه حرارت لازم بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد (Wu et al., 2012) گزارش شده است. بدین ترتیب پنج نوع بايوچار با نامهای B300، B350، B400، B450 و B500 از یک نوع ماده اولیه (برگ خرما)، ولی در دماهای متفاوت تهیه شدند. مصرف بايوچار معمولاً بصورت پودری یا دانه‌ای است تا بطور یکنواخت با خاک مخلوط شود (Novak et al., 2009) و بايوچار با دانه‌های کوچکتر از ۲ میلی‌متر دارای مناسب‌ترین دانه‌بندی جهت مصارف کشاورزی است (Lehmann and Joseph, 2009). بر این اساس نمونه‌های بايوچار بدست آمده

جدول ۱- برخی از خصوصیات شیمیایی خاک مورد بررسی

SAR	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	Ca ⁺⁺ +Mg ⁺⁺	O.C %	T.N.V %	pH	CEC cmol(+)k g ⁻¹	EC ds/m	عمق cm
	meq/l										
۴/۶	۵۹	۴	۲۰	۲۵	۵۸	۰/۴	۶۰	۷/۹	۸	۷/۱	۰-۳۰

بر اساس گزارش روش Rowell (1994) منافذ خاک به سه گروه متفاوت به لحاظ اندازه و نقشی که در خاک ایفا می‌کنند تقسیم می‌شوند: ۱- منافذ انتقال ($d > 50\mu\text{m}$) که نقش آنها در تخلیه آب اشباع و ایجاد شرایط تهویه برای گیاهان اهمیت دارد. ۲- منافذ ذخیره ($d = 50 - 0.2\mu\text{m}$) که نقش آنها در ذخیره آب قابل دسترس گیاه حائز اهمیت است. ۳- منافذ باقیمانده ($d < 0.2\mu\text{m}$) که آب ذخیره شده در آنها قابل جذب گیاه نیست. به منظور تعیین میزان رطوبت در این دامنه‌های منافذ خاک، با استفاده از فرم ساده شده معادله یانگ-لاپلاس است (معادله ۳) و بر اساس منحنی‌های مشخصه رطوبتی بدست آمده، توزیع اندازه منافذ خاک در تیمارهای مختلف تعیین شد (Andrenelli et al., 2016).

$$d = \frac{30}{|h|} \quad (3)$$

در این معادله d قطر معادل منافذ (μm) و h پتانسیل ماتریک (m) می‌باشد.

رطوبت در مکش‌های ۳۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتیمتر را به ترتیب رطوبت در ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم در نظر گرفته و با استفاده از معادله ۴ آب قابل دسترس گیاه (PAWC) در تیمارهای مختلف تعیین شد:

$$PAWC = \theta_{FC} - \theta_{PWP} \quad (4)$$

که در آن θ_{FC} رطوبت در ظرفیت مزرعه و θ_{PWP} رطوبت در نقطه پژمردگی دائم می‌باشد.

برای تعیین ظرفیت نگهداری رطوبت در تیمارهای مختلف، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت به حالت اشباع نگهداری شدند. سپس به مدت ۲۴ ساعت در کاغذ صافی قرار داده شدند تا پس از خروج آب ثقلی وزن تر آنها (M_{wet}) تعیین شود. نمونه‌های مرطوب به مدت ۲۴ ساعت دیگر در آون ۱۰۵ درجه سانتیگراد قرار داده شدند تا وزن خشک آنها (M_{dry}) تعیین شود و در نهایت ظرفیت نگهداری رطوبت (درصد وزنی) با استفاده از معادله ۵ تعیین گردید (Yu et al., 2013):

یکی از رایج‌ترین روش‌ها در توصیف خصوصیات رطوبتی خاک غیر اشباع، تعیین منحنی مشخصه رطوبتی است (Mollinedo et al., 2015). این منحنی‌ها شدیداً تحت تأثیر ساختمان، بافت و میزان ماده آلی خاک قرار دارد. از مدل‌های معروف که منحنی رطوبتی بر اساس آن تعیین می‌شود مدل ون‌گنوختن است (Van Genuchten, 1980) که بصورت زیر توصیف می‌گردد (معادله ۲):

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |ah|^n)^m} & \text{for } h < 0 \\ \theta_s & \text{for } h > 0 \end{cases} \quad (2)$$

در این معادله α پارامتر عکس مکش نقطه ورود هوا (cm^{-1})، n پارامتر توزیع اندازه منافذ (بدون بعد)، θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت اشباع و رطوبت باقیمانده ($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$) می‌باشند. معمولاً به منظور کاستن از تعداد پارامترهای نیازمند برآورد ($m = 1 - \frac{1}{n}$) در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین θ_s ، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت اشباع شدند، سپس وزن شده و به مدت ۲۴ ساعت دیگر در آون ۱۰۵ درجه سانتیگراد نگهداری شدند. نمونه‌های خشک شده مجدداً وزن شده و θ_s محاسبه گردید.

به دلیل غیرخطی بودن مدل ون‌گنوختن، برآورد مؤثر پارامترهای آن مستلزم یک روش بهینه‌سازی غیر خطی و داشتن نقاط داده کافی (حداقل ۵ تا ۸ نقطه) است (Wraith and Or, 1998). لذا رطوبت نمونه‌ها در مکش‌های ۱۰۰۰، ۱۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۵۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۱۰۰۰ سانتیمتر آب، با استفاده از دستگاه صفحات فشار و در مکش‌های ۳۰۰، ۲۵۰، ۲۰۰، ۱۵۰ و ۱۰۰ سانتیمتر آب با استفاده از ستون آویزان آب اندازه‌گیری شد. با استفاده از این داده‌ها و بهره‌گیری از قابلیت بهینه‌سازی غیرخطی (Wraith and Or, 1998) در نرم‌افزار اکسل پارامترهای مدل برآورد شدند، به گونه‌ای که ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین مقادیر رطوبت برآورد شده و اندازه‌گیری شده به کمترین میزان ممکن کاهش و ضریب تعیین (R^2) به بیشترین میزان ممکن افزایش پیدا کند.

$$WHC(\%) = \frac{M_{wet} - M_{dry}}{M_{dry}} \times 100 \quad (5)$$

نتایج بدست آمده پس از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار اکسل مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت، به این صورت که معنی‌داری تفاوت بین تیمارهای مختلف از طریق تجزیه واریانس یکطرفه داده‌ها تعیین شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن صورت گرفت.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس یک طرفه نتایج بدست آمده، حاکی از تأثیر معنی‌دار کاربرد بایوچار بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و رفتار رطوبتی خاک، شامل بازدهی تولید بایوچار و برخی ویژگی‌های شیمیایی، وزن مخصوص ظاهری و ضرایب رطوبتی خاک و پارامترهای مربوط به منحنی مشخصه رطوبتی خاک می‌باشد که در ادامه مورد بحث و تحلیل آماری قرار خواهد گرفت.

اثر بایوچار بر وزن مخصوص ظاهری خاک

تجزیه واریانس یک طرفه نتایج مربوط به اثرات بایوچار بر وزن مخصوص ظاهری خاک قبل از خواباندن (که با استفاده از معادله ۱ محاسبه گردید) و اندازه‌گیری شده بعد از خواباندن به مدت ۲ ماه در جدول ۲ و مقایسه میانگین‌های مربوطه بر اساس آزمون دانکن در شکل ۱ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود وزن مخصوص ظاهری در تیمارهای مختلف بایوچار با افزایش دمای پیرولیز از ۳۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتیگراد تغییرات معنی‌داری نداشته است ولی نسبت به خاک بدون

بایوچار (تیمار شاهد) هم قبل از خواباندن و هم بعد از خواباندن تغییرات معنی‌دار ($P < 0.01$) داشته است.

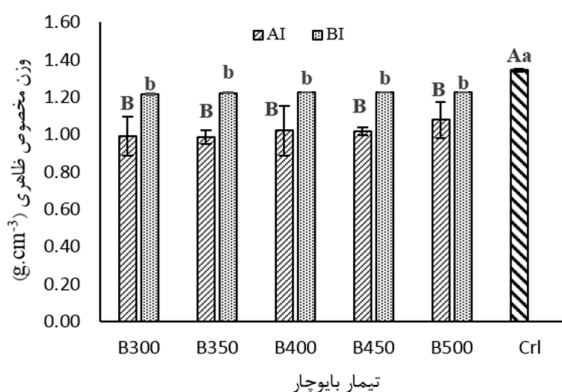
وزن مخصوص ظاهری محاسبه شده بر اساس معادله ۱ به میزان ۹ درصد نسبت به خاک بدون بایوچار کاهش داشت که به دلیل چگالی کم ذرات بایوچار (g.cm^{-3}) ۰/۳۲) دور از انتظار نبود (Lim et al., 2015) و نتیجه مشابه در تحقیقات دیگر هم گزارش شده است (Mukherjee and Lal, 2013). ولی وزن مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شده بعد از دوره خواباندن ۲۴ درصد نسبت به خاک بدون بایوچار کاهش داشت. این نتیجه نشان می‌دهد که بایوچار علاوه بر نقش مستقیم آن در کاهش وزن مخصوص ظاهری، قادر است از طریق تغییر در تراکم دانه‌های خاک وزن مخصوص ظاهری آن را کاهش دهد (Lim et al., 2015).

به نظر می‌رسد در این تغییر دو فرآیند نقش اساسی ایفا می‌کند: ۱- افزایش تخلخل از طریق تشکیل منافذ ثانویه بین ذرات بایوچار و خاکدانه‌های دربرگیرنده آنها که تحت تأثیر بافت خاک و اندازه ذرات بایوچار قرار دارد (Hardie et al., 2014). این فرآیند به دلیل ماهیت صرفاً مکانیکی آن می‌تواند در زمان کوتاهی اتفاق بیفتد (Novak et al., 2012). Major و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کرده‌اند که ۹۵ درصد منافذ بایوچارها دارای قطر معادل کمتر از ۰/۰۰۲ میکرومتر می‌باشند.

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر بایوچار بر وزن مخصوص ظاهری خاک قبل و بعد از خواباندن

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات وزن مخصوص ظاهری خاک	میانگین مربعات وزن مخصوص ظاهری خاک
		قبل از خواباندن	بعد از خواباندن
بایوچار	۵	۰/۰۰۷۴۸۷ **	۰/۰۵۶۶۶۸ **
خطا	۱۲	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۶۴۹۱
کل	۱۷	۰/۰۰۲۲۱۱	۰/۰۲۱۲۴۹
ضریب تغییرات (%)		۰/۲۷	۷/۵

** بیانگر معنی‌داری اثر در سطح احتمال ۱ درصد می‌باشد.



شکل ۱. مقایسه مقادیر وزن مخصوص ظاهری تیمارهای مختلف قبل از خواباندن (BI) و بعد از خواباندن (AI) با آزمون دانکن. تیمارهای با حروف بزرگ یا کوچک مشترک در سطح احتمال ۱ درصد اختلاف معنی دار ندارند. نوارهای خطا (Error Bar) انحراف از معیار می باشند (n=3).

اثر دمای پیرولیز بر برخی خصوصیات بایوچارهای تولید شده

تجزیه واریانس یک طرفه نتایج مربوط به اثرات دمای پیرولیز بر خصوصیات شیمیایی بایوچار شامل بازدهی تولید بایوچار (BC)، pH، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، هدایت الکتریکی (EC) و وزن مخصوص ظاهری (BD) در جدول ۳ و مقایسه میانگین‌های مربوطه بر اساس آزمون دانکن در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به این جداول، همانطور که انتظار می‌رفت BC بطور معنی‌داری ($P < 0.01$) با افزایش دما کاهش یافت. بر اساس گزارش Lehman و همکاران (۲۰۰۶) بازدهی تولید بایوچار تحت تأثیر دمای پیرولیز و ساختار مولکولی ماده آلی اولیه است. بطور کلی تجزیه گرمایی ماده آلی در دمای پایین اتفاق می‌افتد و با افزایش دما مواد فرار اولیه سریع‌تر از بایوچار شکسته شده و به گاز و مواد آلی با وزن مولکولی کم تبدیل می‌شود (Thangalazhy *et al.*, 2010).

لذا بطور کلی می‌توان گفت کاهش معنی‌دار وزن مخصوص ظاهری بعد از دوره خواباندن، به جای اینکه تحت تأثیر چگالی کم بایوچار باشد، بیشتر تحت تأثیر تشکیل منافذ ثانویه است. ۲- برهمکنش بایوچار با ماتریکس خاک تحت تأثیر فرایندهای شیمیایی و بیولوژیکی فرآیند دیگری است که قادر است باعث تشکیل و پایداری خاکدانه‌های درشت‌تر، افزایش تخلخل و نهایتاً کاهش وزن مخصوص ظاهری شود (Verheijen *et al.*, 2010). برهمکنش شیمیایی و بیولوژیک بایوچار با ماتریکس خاک معمولاً به دوره خواباندن طولانی‌تری احتیاج دارد و در این تحقیق به دلیل کوتاه بودن مدت آزمایش و دوره خواباندن نمونه‌ها، احتمال وقوع این فرآیند کم است، با این حال در همین دوره کم هم نباید نقش تأثیرگذار این فرآیند را نادیده گرفت (Andrenelli *et al.*, 2016).

جدول ۳. تجزیه واریانس نتایج مربوط به اثرات دمای پیرولیز بر برخی خصوصیات شیمیایی بایوچار تولیدی

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		CEC	pH	EC	BD
دمای پیرولیز	۴	۱۹۶/۱۸۳۶ **	۱/۷۰۸۳ *	۱/۱۵۷۶ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}
خطا	۱۰	۲۳/۱۳۷۰	۰/۴۳۲۵	۰/۶۷۵۸	۰/۰۰۰۰۵
کل	۱۴	۷۲/۵۷۸۹	۰/۷۹۷۰	۰/۸۱۳۴	۰/۰۰۰۰۷
ضریب تغییرات (%)		۹/۷	۸/۰	۱۱/۵	۲/۳

***، * و ns به ترتیب بیانگر سطح معنی‌داری ۱ درصد، ۵ درصد و عدم معنی‌داری می‌باشد.

BC، BD، EC، pH و CEC: به ترتیب بازدهی تولید بایوچار (%، /)، وزن مخصوص ظاهری (g.cm⁻³)، شوری (dS.m⁻¹)، اسیدیته و ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol(+)kg⁻¹).

جدول ۴. مقایسه اثرات دمای پیرولیز بر برخی خصوصیات بایوجارهای تولید شده بر اساس آزمون دانکن

CEC ⁺⁺ (cmol(+)kg ⁻¹)	pH [*]	EC ^{ms} (dS.m ⁻¹)	BD ^{ms} (g.cm ⁻³)	BC ^{**} (%)	تکرار	تیمار
۴۱/۶ B	۷/۴ B	۷/۲ A	۰/۳۱ A	۶۳/۶ A	۳	B300
۴۳/۷ B	۷/۴ B	۷/۰ A	۰/۳۲ A	۵۴/۶ AB	۳	B350
۴۸/۴ B	۸/۴ AB	۶/۱ A	۰/۳۲ A	۴۷/۱ BC	۳	B400
۵۳/۲ AB	۸/۵ A	۷/۶ A	۰/۳۲ A	۴۱/۱ C	۳	B450
۶۱/۸ A	۸/۵ A	۷/۶ A	۰/۳۲ A	۳۸/۰ C	۳	B500

(Glaser *et al.*, 2002). اگرچه با افزایش دما تغییرات معنی‌داری در EC مشاهده نگردید، ولی روند کلی تغییرات افزایشی بوده است که بر اساس گزارش‌ها (Singh *et al.*, 2010) ناشی از حضور نمک‌های محلول در آب در بایوجار تولید شده در دمای بالا می‌باشد.

اثر بایوجار بر ضرایب رطوبتی خاک

تجزیه واریانس نتایج مربوط به اثر تیمارهای مختلف بایوجار بر ضرایب رطوبتی خاک شامل ظرفیت نگهداری رطوبت (WHC)، رطوبت در وضعیت ظرفیت مزرعه (FC)، آب قابل دسترس گیاه (PAWC) و رطوبت در نقطه پژمردگی دائم (PWP) در جدول ۵ و مقایسه میانگین‌های مربوطه بر اساس آزمون دانکن در جدول ۶ ارائه شده است. بر اساس این جداول، بطور کلی کاربرد بایوجار سبب شده است تا ضرایب فوق به جز PWP، نسبت به تیمار شاهد بطور معنی‌دار ($P < 0.01$) افزایش پیدا کنند ولی با افزایش دمای پیرولیز از ۳۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتیگراد تغییرات معنی‌داری در این ضرایب ایجاد نشده است.

جدول ۵. تجزیه واریانس نتایج مربوط به اثرات بایوجار بر برخی ضرایب رطوبتی خاک

میانگین مربعات				درجه آزادی	منبع تغییرات
PWP	PAWC	FC	WHC		
۰/۲۸۹۳ **	۶/۹۳۹ **	۱۰/۷۵ ^{ms}	۱۵/۲۷۷ **	۵	دمای پیرولیز
۰/۱۸۴۶	۰/۶۹۱	۰/۵۰۹۸	۱/۰۸۵	۱۲	خطا
۰/۲۱۵۴	۲/۵۲۸	۲/۵۲۳	۵/۲۵۹	۱۷	کل
۳/۸	۴/۴	۶/۷	۳/۸		ضریب تغییرات (%)

WHC، FC، PAWC و PWP: به ترتیب ظرفیت نگهداری رطوبت، رطوبت ظرفیت مزرعه، آب قابل دسترس گیاه و رطوبت در نقطه پژمردگی دائم.

تغییرات دمای پیرولیز در دامنه ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد اثرات معنی‌داری بر BD و EC بایوجار نداشت ولی مقادیر pH و CEC با افزایش دما بطور معنی‌دار ($p < 0.01$) افزایش پیدا کردند. pH بایوجارها عموماً با افزایش دمای پیرولیز افزایش پیدا می‌کند (Singh *et al.*, 2010) که می‌تواند ناشی از حضور نسبتاً بالای نمک فلزات قلیایی (سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم) در آن باشد (Kookana *et al.*, 2011). افزایش سطح ویژه و گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار در اثر افزایش دمای پیرولیز از عوامل مؤثر در افزایش CEC گزارش شده است (Cheng *et al.*, 2006). نتایج مشابه این نتایج توسط سایر محققین (Guo and Rockstraw, 2007; Gaskin *et al.*, 2008) نیز گزارش شده است.

نظر به pH بالا و فقر مواد آلی در خاک‌های مناطق خشک، بایوجار تولید شده در دمای پایین ممکن است به لحاظ تولید کشاورزی سودمند تر باشد. افزایش CEC باعث افزایش حاصلخیزی خاک می‌شود و مشابه این نتایج در تحقیقات دیگر هم گزارش شده است

جدول ۶. مقایسه میانگین‌های ضرایب رطوبتی خاک با آزمون چند دامنه‌ای دانکن

PWP ^{ns}	PAWC ^{**}	FC ^{**}	WHC ^{**}	تکرار	تیمار
(درصد وزنی)					
۶/۶ A	۱۹/۶ A	۲۶/۲ A	۲۸/۵ A	۳	B300
۶/۵ A	۱۹/۴ A	۲۶/۶ A	۲۸/۷ A	۳	B350
۶/۳ A	۱۹/۱ A	۲۵/۴ A	۲۸/۴ A	۳	B400
۶/۶ A	۲۰/۰ A	۲۶/۶ A	۲۸/۰ A	۳	B450
۶/۵ A	۱۹/۳ A	۲۵/۸ A	۲۸/۷ A	۳	B500
۵/۸ A	۱۵/۸ B	۲۱/۶ B	۲۳/۰ B	۳	Ctrl (شاهد)

^{**} میانگین‌های مربوط به هر ستون که دارای حروف لاتین مشترک هستند در سطح احتمال ۱٪ تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند. ^{ns} میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک هستند اختلاف معنی‌دار ندارند.

اطمینان روش بهینه‌سازی و برازش کامل مدل بر داده‌های اندازه‌گیری شده را تضمین می‌کند.

تجزیه واریانس اثر بایوچار بر پارامترهای اندازه‌گیری شده (θ_s) و برآورد شده مدل ون‌گنوختن (θ_r ، α ، n و m) در جدول ۸ و مقایسه میانگین‌های مربوطه بر اساس آزمون دانکن در جدول ۹ ارائه شده است. این جداول نیز نشان می‌دهند که درصد اشباع (θ_s) و α با افزایش دمای پیرولیز از ۳۰۰ به ۵۰۰ درجه سانتیگراد تغییری نکرده ولی نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی‌دار ($P < 0.01$) داشته‌اند. همچنین کاربرد بایوچار اثر معنی‌داری بر مقادیر رطوبت باقیمانده (θ_r)، n و m نداشته است.

علی‌رغم اینکه زمان آزمایش کوتاه بود و بررسی‌ها به فاصله کمی بعد از افزودن بایوچار به خاک (بعد از ۲ ماه خواباندن مخلوط خاک و بایوچار) صورت گرفت، ولی بایوچار حاصل از برگ خرما باعث بهبود معنی‌دار شرایط فیزیکی خاک گردید. میزان رطوبت در وضعیت‌های FC، WHC و PAWC به ترتیب به میزان ۲۴/۴، ۲۴، ۲۰/۱ درصد افزایش پیدا کرد ولی در وضعیت PWP تغییرات معنی‌داری نداشت معادله‌های منحنی‌های مشخصه رطوبتی در تیمارهای مختلف در جدول ۷ ارائه شده‌اند. مقادیر بسیار کم ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و مقادیر بالای ضریب تعیین (R^2) قابلیت

جدول ۷. معادله‌های منحنی‌های مشخصه رطوبتی مبتنی بر مدل ون‌گنوختن (ون‌گنوختن، ۱۹۸۰)

تیمار	معادله منحنی مشخصه رطوبتی	R^2	RMSE
B300	$\theta(h) = 0.069 + 0.37[1 + (1 + 0.452 h ^{1.88})^{-0.466}]$	۰/۹۹۰۶	۰/۰۱۲۶
B350	$\theta(h) = 0.068 + 0.38[1 + (1 + 0.455 h ^{1.93})^{-0.482}]$	۰/۹۹۰۲	۰/۰۱۳۱
B400	$\theta(h) = 0.063 + 0.39[1 + (1 + 0.466 h ^{1.84})^{-0.456}]$	۰/۹۹۰۹	۰/۰۱۲۶
B450	$\theta(h) = 0.06 + 0.39[1 + (1 + 0.496 h ^{1.76})^{-0.430}]$	۰/۹۸۷۲	۰/۰۱۴۷
B500	$\theta(h) = 0.06 + 0.39[1 + (1 + 0.492 h ^{1.75})^{-0.427}]$	۰/۹۸۹۱	۰/۰۱۳۵
Ctrl	$\theta(h) = 0.07 + 0.32[1 + (1 + 0.402 h ^{2.02})^{-0.504}]$	۰/۹۹۲۰	۰/۰۱۰۸

جدول ۸. تجزیه واریانس نتایج مربوط به اثرات بایوچار بر پارامترهای مدل ون گنوختن

m	n	میانگین مربعات			درجه آزادی	منبع تغییرات
		α	θ_r	θ_s		
۰/۰۰۲۷ ^{ns}	۰/۰۳۴ ^{ns}	۱/۰۰۳۴ ^{**}	۰/۰۰۰۰۶ ^{ns}	۰/۰۰۱۶ ^{**}	۵	بایوچار
۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۲۸	۱۲	خطا
۰/۰۰۱۳	۰/۰۱۶	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۴۸	۱۷	کل
۵/۸	۵/۱	۵/۳	۱۱/۶	۱/۲		ضریب تغییرات (%)

طرفی با کوچکتر شدن اندازه منافذ این منحنی‌ها به همدیگر نزدیک و نزدیک‌تر شوند (شکل ۲).

این موضوع به لحاظ کاهش تنش رطوبتی وارد شده به گیاه در فاصله آبیاری‌ها و بارندگی‌ها مخصوصاً در خاک‌های با ظرفیت کم در نگهداری رطوبت حائز اهمیت زیادی است (Mollinedo et al., 2015).

از آنجا که اساساً 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 می‌باشد (Hillel, 1982). از طرفی بخش اعظم تخلخل بایوچار را منافذ ریز تشکیل می‌دهد (Major et al., 2009). لذا انتظار این بود که با افزودن بایوچار تخلخل ریز خاک افزایش پیدا کرده و به تبع آن رطوبت در وضعیت PWP نیز افزایش معنی‌دار پیدا کند ولی در عمل اینگونه نشد.

تجزیه واریانس نتایج مربوط به اثرات بایوچار بر مقادیر رطوبت وزنی در دامنه‌های اندازه منافذ خاک در جدول ۱۰ و مقایسه میانگین‌های مربوطه بر اساس آزمون دانکن در جدول ۱۱ ارائه شده است. این جداول نشان می‌دهند که رطوبت منافذ ذخیره و انتقال (بزرگ‌تر از $2\mu\text{m}$) بطور معنی‌داری ($P < 0.01$) نسبت به تیمار شاهد (خاک بدون بایوچار) افزایش داشته ولی در منافذ باقیمانده (کوچک‌تر از $2\mu\text{m}$) تغییرات معنی‌دار نبوده است. بطوری که رطوبت در منافذ ذخیره و انتقال که ذخیره آب قابل دسترس گیاه و جریان آب و عناصر غذایی در این بخش از تخلخل خاک اتفاق می‌افتد بطور متوسط به میزان ۲۳ درصد نسبت به شاهد افزایش پیدا کرده است. این شرایط باعث شده تا منحنی‌های مشخصه رطوبتی به لحاظ شکل کلی تفاوتی با یکدیگر نداشته باشند ولی به لحاظ نگهداری رطوبت متفاوت باشند و از

جدول ۹. مقایسه میانگین‌های ضرایب معادله‌های منحنی مشخصه رطوبتی در تیمارهای مختلف با آزمون دانکن

m	n	m ^۱ α^1	اندازه‌گیری شده		تکرار	تیمار
			θ_r (cm ³ .cm ⁻³)	θ_s (cm ³ .cm ⁻³)		
A	A	AB	۰/۰۶۹A	۰/۴۴A	۳	B300
A	A	AB	۰/۰۶۸A	۰/۴۷A	۳	B350
A	A	AB	۰/۰۶۳A	۰/۴۵A	۳	B400
A	A	۴۹۶A	۰/۰۶A	۰/۴۵A	۳	B450
A	A	۴۹۲A	۰/۰۶A	۰/۴۵A	۳	B500
۰/۵۰۴A	A	۴۰۲B	۰/۰۷A	۰/۳۹B	۳	Ctrl (شاهد)

** میانگین‌های مربوط به هر ستون که دارای حروف لاتین مشترک هستند در سطح احتمال ۱٪ تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

جدول ۱۰. تجزیه واریانس نتایج اثر بایوچار بر رطوبت وزنی در دامنه‌های اندازه قطر منافذ خاک

میانگین مربعات رطوبت وزنی			درجه آزادی	منبع تغییرات
<0.2 μm	0.2-50 μm	>50 μm		
0.230 ^{ns}	12/881 ^{**}	0.297 ^{**}	5	دمای پیرولیز
0.101	2/521	0.046	12	خطا
0.139	5/568	0.12	17	کل
5/2	5/8	18/1		ضریب تغییرات (%)

مکش ماتریک که خاک در اثر نیروی ثقل از وضعیت اشباع خارج شده و در آن تهویه صورت می‌گیرد را اصطلاحاً مکش ورود هوا می‌گویند و مقدار عددی آن عکس پارامتر α می‌باشد (Andrenelli et al., 2016). در این تحقیق، تحلیل پارامتر α و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن نشان می‌دهد که اگر چه افزایش دمای پیرولیز در دامنه 300 تا 500 درجه سانتیگراد اثر معنی‌داری بر α نداشته است ولی اثر کلی بایوچار بر این پارامتر معنی‌دار ($P < 0.01$) بوده است. بطوریکه مقادیر α^{-1} در تیمارهای مختلف بطور متوسط 16 درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داشته است. این نتیجه بدان معنی است که کاربرد بایوچار باعث شده است تا ورود هوا در بار مکش ماتریک پایین‌تر (بطور متوسط 2/1 متر آب) نسبت به خاک بدون بایوچار (2/5 متر آب) اتفاق بیفتد که بیانگر وقوع زهکشی و تهویه سریع‌تر خاک در اثر تشکیل منافذ بزرگ‌تر می‌باشد.

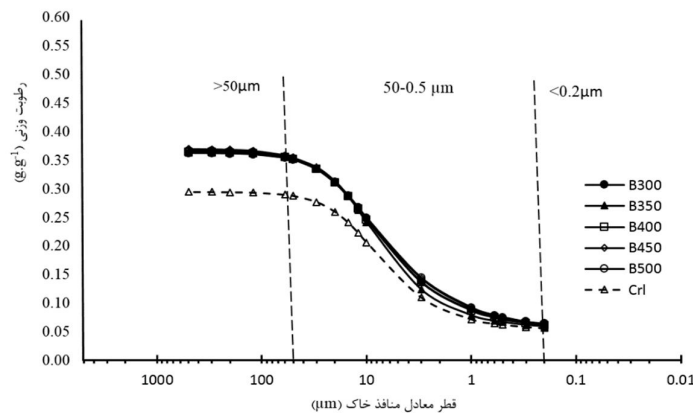
لذا این نتایج تأییدی است بر گزارش Andrenelli و همکاران (2016) مبنی بر این که کاربرد بایوچار باعث اصلاح شرایط ساختمانی خاک و تخلخل درشت آن شده ولی در بافت و منافذ ریز آن تغییری ایجاد نمی‌کند. به همین دلیل رطوبت در وضعیت‌های PWC، FC، WHC و θ_s افزایش پیدا کرده، ولی در وضعیت PWP که تحت کنترل منافذ ریز خاک قرار دارد تغییرات معنی‌داری نداشته است. Uzoma و همکاران (2011) در تحقیقات خود متوجه شدند که بایوچار اثر معنی‌داری بر θ_r ندارد. در پژوهش‌های مشابه دیگر هم گزارش شده است که با افزودن بایوچار رطوبت در وضعیت PWP افزایش پیدا نمی‌کند (Hardie et al., 2014).

قسمت بالایی منحنی مشخصه رطوبتی شامل تخلخل درشت و منافذی از خاک است که آب ذخیره شده در آن تحت تأثیر نیروی ثقل به راحتی تخلیه شده و هوا جایگزین آن می‌شود و پارامتر α مربوط به همین قسمت منحنی است (Mollinedo et al., 2015). حدی از بار

جدول ۱۱. مقایسه میانگین مقادیر رطوبت وزنی در دامنه‌های اندازه قطر منافذ خاک بر اساس آزمون دانکن

<0.2 μm	0.2-50 μm	>50 μm	تعداد تکرار	تیمار
(درصد وزنی)				
6.39 A ^{ns}	27/82 A ^{**}	1/15 AB ^{**}	3	B300
6.02 A	28/56 A	1/03 BC	3	B350
6.05 A	28/22 A	1/28 AB	3	B400
6.15 A	28/39 A	1/51 A	3	B450
6.18 A	26/82 AB	1/49 A	3	B500
5/56 A	23/12 B	0/67 C	3	Ctrl (شاهد)

^{**} میانگین‌های مربوط به هر ستون که دارای حروف لاتین مشترک هستند در سطح احتمال 1٪ تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

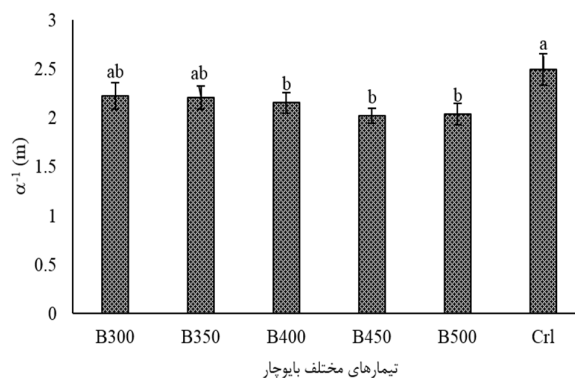


شکل ۲. منحنی‌های مشخصه رطوبتی بر اساس مقادیر رطوبت وزنی در مقابل قطر معادل منافذ در تیمارهای مختلف

نتیجه‌گیری

تراکم خاکدانه‌های خاک افزایش دهد که به لحاظ ذخیره آب قابل دسترس گیاه و انتقال آب و عناصر غذایی حائز اهمیت است ولی بر منافذ باقیمانده ($d < 0.2 \mu\text{m}$) اثر معنی‌دار ندارد. با افزایش دمای پیرولیز در دامنه ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد تغییرات معنی‌داری در خصوصیات فیزیکی و رفتار رطوبتی خاک ایجاد نشد، ولی بررسی خصوصیات شیمیایی و ویژگی‌هایی مانند خاصیت آبگریزی ناشی از ترکیبات چربی‌دار به آزمایش‌های دیگر موکول می‌گردد.

این آزمایش ثابت کرد که کاربرد بایوچار حاصل از برگ خرما به نسبت وزنی ۳ درصد و به صورت پودری و آسیاب شده در یک خاک لوم شنی می‌تواند یک اصلاح کننده مؤثر برای بهبود خصوصیات فیزیکی خاک و افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت و آب قابل دسترس گیاه باشد. در عین حال کاربرد این بایوچار بر نگهداری رطوبت در نقطه پژمردگی دائم تأثیری ندارد. در واقع این بایوچار قادر است منافذ ذخیره و انتقال خاک (μm) را با تشکیل منافذ ثانویه و نیز تغییر اندازه و



تیمارهایی که حروف مشترک دارند در سطح احتمال ۱ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند. نوارهای خطا بیانگر انحراف از معیار می‌باشند ($n=3$).

شکل ۳. مقایسه مقادیر میانگین مربوط به α^{-1} در تیمارهای مختلف بایوچار بر اساس آزمون دانکن.

فهرست منابع

- 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.
- Basso, A. S. 2012. Effect of fast pyrolysis biochar on physical and chemical properties of a sandy soil. Master's Thesis, Iowa State University, Ames, 69 pp.

- Bird, M. I., Ascough, P. L., Young, I. M., Wood, C. V. and Scott, A. C. 2008. X-ray microtomographic imaging of charcoal. *Journal of Archaeological Science*, 35: 2698-2706.
- de Melo Carvalho, M.T., de Holanda Nunes Maia, A., Madari, B.E., Bastiaans, L., van Oort, P.A.J., Heinemann, A.B., Soler da Silva, M.A., Petter, F.A., Marimon Jr., B.H. and Meinke, H. 2014. Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system. *Solid Earth*, 5: 939–952.
- Cheng, C. H., Lehmann, J., Thies, J. E., Burton, S. D. and Engelhard, M. H. 2006. Oxidation of Black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry*, 37: 1477-1488.
- Gaskin, J. W., Steiner, C., Harris, K., Das, K. C. and Bibens, B. 2008. Effect of low temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions of the ASABE*, 51: 2061-2069.
- Glaser, B., Lehmann, J. and Zech, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Journal of Biology and Fertility of Soils*, 35: 219–230.
- Guo, Y. and Rockstraw, D. A. 2007. Activated carbons prepared from rice hull by one-step phosphoric acid activation. *Microporous and Mesoporous Materials*, 100: 12-19.
- 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.
- Hillel, D. 1982. *Introduction to Soil Physics*. Academic Press, New York, 364 pp.
- Kookana R. S., Sarmah, A. K., van Zwieten, L., Krull, E. and Singh B. 2011. Biochar application to soil: Agronomic and environmental benefits and unintended consequences. *Advances in Agronomy*, 112: 103-143.
- Lehmann, J. and Joseph, S. 2009. Biochar for environmental management: An introduction. P. 67-84. In J. Lehmann and S. Joseph (ed.) *Biochar for environmental management*. Science and Technology. James & James. Earthscan. London. UK.
- Lim, T.J., Spokas, K.A., Feyereisen, G. and Novak, J. M. 2015, predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties, *Chemosphere*, 142:136-44.
- 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.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J. and Lehmann, J. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 333: 117–128.
- Mollinedo, J., Schumacher, E.T. and Chintala, R. 2015. Influence of feedstocks and pyrolysis on biochar's capacity to modify soil water retention characteristics, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 114:100–108.
- Mukherjee, A. and Lal, R. 2013. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*, 3:313–39.
- Novak, J.M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J. W., Steiner, C., Das, K. C., Ahmedna, M., Rehrah, D., Watts, D.W., Busscher, W.J. and Schomberg, H. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*, 3: 195–206.
- Obia, A., Muldera, J., Martinsena, V., Cornelissen, G. and Børresen, T. 2016. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 155:35–44.
- 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.
- Rowell, D. L. 1994. *Soil Science: Methods and Applications*. Longman Scientific & Technical, UK, 350 pp.
- Singh, B., Singh, B. P. and Cowie, A. L. 2010. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*, 48: 516-525.
- Thangalazhy, G. S., Adhikari, S., Ravindran, H., Gupta, R. B., Fasina, O., Tu, M. and Fernando, S. D. 2010. Physiochemical properties of bio-oil produced at various temperatures from pine wood using an auger reactor. *Bioresource Technology*, 101(21): 8389-8395.
- Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Zahoor, A. and Nishihara E. 2011. Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 9:1137–1143.
- van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44: 892-898.
- 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 pp.
- Wraith, M. and Or, D. 1998. Nonlinear Parameter Estimation Using Spreadsheet Software. *Journal of Natural Resources and Life Sciences Education*, 27: 13-19.

- Woolf, D., Amonette, J., E., Street-Perrott, F., A., Lehmann, J. and Joseph, S. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communicaions*, 1: 1-9.
- 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 Bioenergy*, 47: 268–276.
- Yu, O. Y., Raichle, B. Sink, S. 2013. Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4(1):1-9.



ISSN 2251-7480

Short-term effects of biochar produced from date palm's leaves on moisture retention in sandy loam soil

Mehrdad Nowroozi¹, Seyed hassan Tabatabaei^{2*}, Mohamad reza Nouri³ and Hamidreza Motaghian⁴

1) Ph.D Student, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

2*) Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

*Corresponding author email: Tabatabaei@agr.sku.ac.ir

3) Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Iran

4) Assistant Professor, Department of Soil Science, Shahrekord University, Iran

Received: 22-05-2016

Accepted: 26-07-2016

Abstract

Biochar is a durable organic compound obtained by thermal decomposition of biomass under oxygen-limited conditions (called pyrolysis). It is used for improving chemical and physical properties of soil in agriculture. The main objective of this paper was to evaluate the effects of biochar, produced from date palm's leaves, on the physical properties and hydrological behavior of a sandy loam soil by carrying out a pot experiment. Pyrolyzed at different temperatures (300, 350, 400, 450 and 500 degree of centigrade) in an electric furnace five biochars were obtained. Biochars were in powdered form and evenly added to soil (air-dried and passed through a 2 mm sieve) at the rate of 3% (w/w) and incubated for 2 months. Water retention curves (WRCs) based on Van Genuchten model determined. By measuring gravimetric water content at field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP), plant available water content (PAWC) calculated. Also, water holding capacity (WHC) and saturation percentage (θ_s) determined. The results showed that by increasing pyrolysis temperature from 300 to 500 degree of centigrade, physical properties and hydrological behavior of the soil had not significant changes. Generally, soil bulk density (BD) significantly ($P < 0.01$) decreased compared to control, which could be attributed to low density of biochar particles and its contribution on rearrangement of soil pores and creation of new accommodation pores. WHC, PAWC, θ_s and FC increased 24.4%, 20.1%, 23.4% and 24% respectively compared to control, but PWP had not significant changes. Data of WRCs indicated a significant ($P < 0.01$) increase in pores greater than 0.2 μm , which are important in storing plant available water.

Keywords: biochar; plant available water; soil structure; water holding capacity