

اثرات بلندمدت بیوپچار حاصل از برگ خرما بر تخلخل و پایداری ساختمان خاک لوم رسی شنی

پریا نسیمی، احمد کریمی و زهرا گرامی¹

دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد؛ pnasimi2017@gmail.com

استادیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد؛ karimiahmad1342@yahoo.com

دانشجوی دکتری گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد؛ z.gerami@yahoo.com

دریافت: 98/11/1 و پذیرش: 99/4/25

چکیده

بیوپچار در خاک روشی جایگزین برای افزایش کربن خاک است و در طولانی‌مدت، سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌شود. این پژوهش باهدف بررسی تأثیر طولانی‌مدت بیوپچار حاصل از برگ خرما بر انواع تخلخل خاک (تهویه‌ای، موئین و کل) و پایداری ساختمان خاک لوم رسی شنی انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو عامل شامل مقدار بیوپچار برگ خرما در چهار سطح (صفر B_0 ، $B_1=1\%$ ، $B_2=2\%$ و $B_3=5\%$) و دیگری مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار در چهار سطح (یک T_1 ، سه T_3 ، شش T_6 و نه ماه T_9) با سه تکرار به‌صورت گلدانی انجام شد. نتایج نشان داد اثر بیوپچار برگ خرما بر تخلخل تهویه‌ای و موئین در سطح یک درصد معنی‌دار شد. همچنین، اثر مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار بر جرم مخصوص ظاهری و تخلخل کل خاک در سطح یک درصد معنی‌دار بود. اثر مقدار بیوپچار، مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار و اثرات متقابل مقدار و مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نیز در سطح یک درصد معنی‌دار شد. با افزودن بیوپچار، بالاترین میزان افزایش ویژگی‌های موردبررسی نسبت به شاهد (B_0T_1) در مورد جرم مخصوص ظاهری، تیمار B_2T_6 (14/7%)، تخلخل کل B_2T_1 (5/4%)، تخلخل موئین B_2 (64/3%)، میانگین وزنی قطر خاکدانه به روش الک خشک B_1T_9 (28%) و میانگین وزنی قطر خاکدانه به روش الک تر B_2T_1 (63/2%) بود. نتایج بیانگر آن بود که بیشترین اثر بیوپچار بر جرم مخصوص ظاهری، تخلخل کل، تخلخل موئین و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر، در ماه اول و بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک در ماه نهم بوده است و گذشت زمان اثر معنی‌داری بر تغییرات تخلخل تهویه‌ای نداشت. در مجموع می‌توان گفت که بیوپچار با داشتن تخلخل و مقدار کربن آلی قابل توجه، سبب بهبود تخلخل و پایداری ساختمان خاک شده است. لذا می‌توان از بیوپچار برای بهبود ساختمان خاک‌های تخریب یافته و ضعیف استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تخلخل تهویه‌ای، تخلخل موئین، جرم مخصوص ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه

¹ نویسنده مسئول، آدرس: شهرکرد، دانشگاه شهرکرد - دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی خاک

مقدمه

تقاضا برای محصولات کشاورزی با افزایش جمعیت و تغییر رژیم‌های غذایی در حال افزایش است. تحولات جهانی که بخشی از آن تشدید عملیات کشاورزی است، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های در حال حاضر است که به‌نوبه خود، پایداری طولانی‌مدت تولید محصولات کشاورزی را تهدید می‌کند. توسعه فن-آوری‌های نوآورانه کشاورزی برای پرداختن به چالش-هایی از قبیل دستیابی به امنیت غذایی، محافظت از منابع خاک و کاهش و انطباق با تغییرات جهانی به یک اولویت اصلی تحقیقات تبدیل شده است (وونگ و همکاران، 2017) که بیوپچار¹ (زغال زیستی) یکی از روش‌های نوین برای دستیابی به این اهداف است.

بیوپچار از طریق تجزیه گرمایی زیست‌توده، در شرایط بدون اکسیژن یا حضور جزئی آن، طی فرآیند حرارتی گرماکافت² به دست می‌آید که در این فرآیند، کربن آلی پایدار و برگشت‌پذیر تولید می‌شود (پندی و همکاران، 2020). تولید بیوپچار و استفاده از آن به‌عنوان یک اصلاح‌کننده‌ی خاک، به‌عنوان روشی امیدوارکننده برای تثبیت کربن خاک در نظر گرفته شده است. مطالعات نشان می‌دهد تحت تأثیر افزودن بیوپچار به خاک، طیف وسیعی از مزایای کشاورزی، از جمله بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی خاک و افزایش عملکرد محصول به-دست می‌آید. با این حال، پیامدهای استفاده از بیوپچار به‌عنوان ماده اصلاح‌کننده‌ی بالقوه خاک، بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک به‌طور گسترده‌ای مورد بحث قرار نگرفته است.

اثر بیوپچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک با زمان بعد از کاربرد آن می‌تواند تغییر کند. اکسیداسیون و خشک شدن بیوپچار در طی زمان، می‌تواند محتوی ماده آلی سطح ذرات بیوپچار و ویژگی‌های آب‌گریزی آن را کاهش دهد. همچنین کربن بیوپچار می‌تواند با ماده آلی و ذرات غیر آلی خاک در طی زمان واکنش دهد و خاکدانه‌های خاک و دیگر فرآیندهای خاک را بهبود بخشد (بریگز و همکاران، 2012). همان‌طور که از زمان کاربرد بیوپچار می‌گذرد، واکنش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی روی سطح ذرات بیوپچار می‌تواند خصوصیات بیوپچار را تغییر دهد که به‌نوعی می‌تواند بر اثر بیوپچار بر خصوصیات فیزیکی خاک مؤثر باشد. بنابراین بررسی تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک باگذشت زمان پس از کاربرد بیوپچار، برای

تعیین چگونگی تغییر اثرات بیوپچار ضروری است (بلنکوکنکویی، 2017).

بیوپچار بر محیط فیزیکی خاک تأثیر می‌گذارد و موجب تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌شود که یکی از این اثرات، افزایش تخلخل خاک (جوریگا و همکاران، 2018؛ زنگ و همکاران، 2019) است که تخلخل خاک شامل دو بخش موئین و تهویه‌ای است. تخلخل موئین به بخشی از خلل و فرج گفته می‌شود که آب را با نیروی موئین نگهداری کرده و قطر آن‌ها در حدود 0/6 میلی‌متر یا کمتر است و تخلخل تهویه‌ای آن بخش از تخلخل کل است که قطر حفره‌های آن بیشتر از 0/6 میلی‌متر باشد و در مکش 50 سانتی‌متری ارتفاع آب از رطوبت خالی شود (برزگر، 1379). تخلخل موئین بر نگهداری آب در خاک و تخلخل تهویه‌ای بر زهکشی مؤثر است که اطلاع از تغییرات آن‌ها در استنباط حرکت آب در خاک کمک می‌کند (لوسوزا کاروالیو و همکاران، 2020). بیوپچار ماده‌ای متخلخل و حاوی مواد آلی زیاد است که افزودن آن به خاک موجب افزایش پایداری ساختمان خاک و افزایش تخلخل و انواع آن می‌شود (نیک‌روش و همکاران، 1397). بیوپچارها معمولاً جرم مخصوص ظاهری کمی (حدود 0/3 گرم بر سانتی‌متر مکعب) دارند، زیرا بیوپچار در طول فرآیند گرماکافت ساختار متخلخل پیدا کرده، سطح ویژه آن زیاد و جرم مخصوص ظاهری آن کم می‌شود، لذا به دلیل داشتن سطح ویژه و تخلخل زیاد، اغلب سبب تغییر در توزیع اندازه منافذ و افزایش تخلخل خاک و کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک می‌شود (تنبور و همکاران، 2019، اتول و همکاران، 2018، بلنکوکنکویی، 2017 و هافل و همکاران، 2011). البته این اثرات بسته به نوع خاک متفاوت بوده است که در تحقیقاتی که بر روی خاک‌های آهکی انجام شده است اثر سودمند بیوپچار در بهبود انواع ویژگی‌های خاک و افزایش رشد گیاه را گزارش کرده‌اند (کریمی و همکاران، 1398؛ موسوی و همکاران، 1397 و ایبولیته و همکاران، 2015).

برخی تحقیقات کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل (جونز و همکاران، 2010 و موخرجی و لیل، 2013) و برخی دیگر افزایش جرم مخصوص ظاهری (کارهو و همکاران، 2011) در اثر مصرف بیوپچار را گزارش کردند. نتایج بررسی‌ها در یک آزمایش مزرعه‌ای نشان داد که افزودن بیوپچار تهیه شده از بلال ذرت، در دمای 350 درجه سانتی‌گراد، در یک خاک لوم رسی، جرم مخصوص ظاهری خاک را 3 تا 5 درصد کاهش و تخلخل

¹ Biochar
² Pyrolysis

روشی جایگزین برای افزایش سطح کربن خاک در طولانی مدت ضمن افزایش بالقوه کیفیت خاک، بهره‌وری محصول را مورد توجه قرار داده است (آتول و همکاران، 2018). با توجه به اینکه اغلب خاک‌های ایران با اقلیم خشک و نیمه خشک، دارای کم‌تر از یک درصد ماده آلی هستند، این مساله ممکن است سبب کیفیت فیزیکی ضعیف به‌ویژه از نظر پایداری ساختمان و تخلخل خاک در آن‌ها شده است که استفاده از بیوپچار به‌عنوان اصلاح-کننده‌ی خاک سبب بهبود کیفیت فیزیکی خاک شود. همچنین تولید بیوپچار از ضایعات و بقایای گیاهی و جانوری با مصرف انرژی (خادم و همکاران، 1396) صورت می‌گیرد که این عوامل می‌توانند تولید بیوپچار را دچار محدودیت کنند. از این رو با وجود میلیون‌ها اصله نخل و هرس سالانه‌ی آن‌ها در مناطق مختلف کشور به وسعت 215 هزار هکتار، این امکان فراهم است که از این بقایا برای تولید بیوپچار برگ خرما استفاده شود تا علاوه بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، سبب کاهش و بهره‌وری مجدد از بقایای درخت خرما شود که در نهایت تولید بیوپچار علاوه بر مدیریت بقایا، سبب کاهش آلودگی‌های محیط زیست نیز شود. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی تأثیر بیوپچار حاصل از برگ خرما بر تخلخل و پایداری ساختمان طی دوره‌های زمانی مختلف در یک خاک لوم رسی شنی انجام شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های خاک

این پژوهش در دانشگاه شهرکرد، واقع در مرکز استان چهارمحال و بختیاری با موقعیت جغرافیایی 32 درجه و 21 دقیقه عرض شمالی و 50 درجه و 53 دقیقه طول شرقی و با ارتفاع 2074 متری از سطح دریا انجام شد. برای انجام این پژوهش خاک سطحی مورد نیاز از عمق 30 سانتی‌متری تهیه شد و نمونه خاک پس از جمع-آوری به آزمایشگاه دانشگاه شهرکرد منتقل شد. بخشی از نمونه خاک پس از هوا خشک شدن از الک دو میلی‌متری برای اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک عبور داده شد. ویژگی‌های فیزیکی شامل: جرم مخصوص ظاهری (ρ_b) به روش استوانه نمونه‌برداری و جرم مخصوص حقیقی (ρ_s) به روش پیکنومتر (بلک و هارتج، 1986)، تخلخل کل خاک به روش محاسباتی و با توجه به مقدار جرم مخصوص ظاهری و حقیقی (هزلتون و مورفی، 2007)، ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) با استفاده از دستگاه صفحه فشاری و تعیین درصد رطوبت خاک به ترتیب با اعمال مکش-های 33 و 1500 کیلوپاسکال (رینولدز و همکاران،

خاک را 2 درصد به ازای هر درصد بیوپچار اضافه‌شده، افزایش داد (اویبا و همکاران، 2016). همچنین مطالعات اثر بیوپچار تولید شده از خرده چوب در دمای 525 درجه سانتی‌گراد را بر جرم مخصوص ظاهری خاک و آب قابل‌دسترس در سه نوع خاک با بافت‌های لوم شنی، سیلتی لوم و لوم رسی بررسی کردند که نتایج نشان داد افزودن 3 درصد وزنی بیوپچار به خاک‌های لومی شنی و سیلتی لوم و لوم رسی، به ترتیب سبب کاهش 13/3، 10/3 و 9/9 درصدی جرم مخصوص ظاهری خاک شد (بورل و همکاران، 2016). میزان تخلخل بیوپچار به ماده اولیه، دما و مدت زمان تولید بیوپچار بستگی دارد (گلاسر و همکاران، 2002؛ ماجور و همکاران، 2010).

یکی دیگر از تغییراتی که بیوپچار در محیط فیزیکی خاک ایجاد می‌کند، بهبود پایداری خاکدانه‌ها (اویانگ و همکاران، 2013؛ هراس و همکاران، 2013؛ موخرجی و همکاران، 2013) است. مطالعات متعددی از بهبود ساختمان خاک با افزایش پایداری خاکدانه‌ها گزارش شده است. حضور خاکدانه‌های خاک که عمدتاً مسئول ساختار خاک هستند، برای عملکرد خاک و بهره‌وری کشاورزی اساسی است. خاکدانه‌های پایدار در آب می‌توانند از نظر فیزیکی ماده آلی خاک را تثبیت کرده و آن را از تجزیه محافظت کنند (سیکس و همکاران، 2002). خاکدانه‌ها و ساختمان خاک پیوسته، حرکت آب و انرژی در خاک را نیز بهبود می‌بخشند (برونیک و لال، 2005). نتایج تحقیقات (انابی و همکاران، 2007) به نقش مؤثر مواد آلی در افزایش پایداری خاکدانه‌ها و به دنبال آن ایجاد خاکدانه‌های بزرگ‌تر و افزایش مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه¹ را با افزایش نیروی پیوستگی بین خاکدانه‌ها توسط ترکیبات موجود در مواد آلی مرتبط می‌دانند. همچنین ارتباط بین پایداری خاکدانه‌ها و افزایش مقدار MWD با ماده آلی بستگی به عوامل پیوندی (هیفاها و ریشه‌ها) و ترشحات پلی‌ساکاریدی قارچ‌ها دارد که سبب ایجاد خاکدانه‌های بزرگ‌تر خواهد شد (بواجیلا و گالالی، 2010). افزایش ماده آلی در خاک نیز از 2/3 به 3/5 درصد سبب افزایش اندازه خاکدانه‌های با قطر 2 تا 4 و 4 تا 6 میلی‌متری شد که کاهش فرسایش و هدرروی خاک و افزایش MWD و پایداری خاکدانه‌ها را به دنبال داشت (لادو و همکاران، 2004).

چالش تولید مواد غذایی بیشتر برای جمعیت رو به رشد جهان و در عین حال کاهش تغییرات آب و هوا، نیازمند راه‌حل‌های جدید برای مدیریت سیستم‌های کشاورزی است. استفاده از بیوپچار در خاک به‌عنوان

¹. MWD

تبادل کاتیونی (CEC) به روش جانشین با استات سدیم (چاپمن، 1965)، نیتروژن کل با استفاده از روش کجلاال (برمنر، 1965)، پتاسیم قابل استفاده به روش عصاره‌گیری با استات آمونیم (ریچاردز، 1954) و فسفر قابل جذب به روش اولسن (اولسن و سامرز، 1982) انجام شدند که نتایج در جدول‌های 1 و 2 نشان داده شده است.

2009)، بافت خاک به روش هیدرومتری (جی و بادر، 1986)، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار افتان (کلوت، 1986) و ویژگی‌های شیمیایی شامل: اسیدیته (pH) و شوری (EC) در سوسپانسیون 2 به 1 آب به خاک و به کمک pH متر و EC متر (توماس، 1996)، ماده آلی به روش اکسیداسیون تر (نلسون و سامرز، 1996)، ظرفیت

جدول 1- برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد آزمایش

ویژگی	واحد	مقدار
جرم مخصوص ظاهری (pb)	g cm ⁻³	1/37
جرم مخصوص حقیقی (ρ _s)	g cm ⁻³	2/58
تخلخل کل (F)	%	48/5
رطوبت ظرفیت زراعی (θ _{fc})	weight percentage	20/4
رطوبت نقطه پژمردگی دائم (θ _{pwp})		10/9
شن (Sand)		51/5
سیلت (Silt)	%	26/5
رس (Clay)		22
بافت (Texture)	-	لوم رسی شنی
هدایت هیدرولیکی اشباع (K _s)	cm hr ⁻¹	2/4

جدول 2- برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد آزمایش

ویژگی	اسیدیته (pH)	شوری (EC)	ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)	ماده آلی (OM)	نیتروژن کل (N)	فسفر قابل جذب (P)	پتاسیم قابل استفاده (K)
واحد	-	dS m ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	%	%	mg kg ⁻¹	
مقدار	7/82	0/46	12/5	1/86	0/45	23	300/6

تهیه بیوجار و ویژگی‌های آن

تیمارهای آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند. برخی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده بیوجار مورد استفاده در این آزمایش در جدول 3 نشان داده شده است که جرم مخصوص ظاهری (pb) به روش استوانه نمونه‌برداری (بلک و هارتج، 1986)، ویژگی‌های شیمیایی شامل: اسیدیته (pH) و شوری (EC) در سوسپانسیون 2 به 1 آب به خاک و به کمک pH متر و EC متر (توماس، 1996)، ماده آلی به روش اکسیداسیون تر (نلسون و سامرز، 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش جانشین با استات سدیم (چاپمن، 1965)، نیتروژن کل با استفاده از روش کجلاال (برمنر، 1965)، پتاسیم قابل استفاده به روش عصاره‌گیری با استات آمونیم (ریچاردز، 1954) و فسفر قابل جذب به روش اولسن (اولسن و سامرز، 1982) اندازه‌گیری شدند.

بیوجار مورد استفاده در این پژوهش ضایعات نخل خرما بود که در اثر هرس سالیانه حاصل می‌شود. برگ نخل خرما از مرکز تحقیقات استان خوزستان تهیه و پس از خشک شدن با کمک قیچی دستی به ابعاد کم‌تر از چهار سانتی‌متر خرد شدند. برگ‌های خشک شده نخل در پاکت‌های آلومینیومی که کاملاً مسدود شده و صرفاً یک سوراخ به قطر حدود یک میلی‌متر به منظور خروج گاز حاصل از فرآیند گرماکافت در آن‌ها تعبیه شده بود قرار داده شدند و سپس در یک کوره الکتریکی تهویه‌دار مدل (ATRA; PC-12) به مدت دو ساعت در دمای 400 درجه سانتی‌گراد برای تهیه بیوجار قرار داده شد تا فرآیند گرماکافت (وو و همکاران، 2012) انجام شود. بیوجار تولید شده از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و در

جدول 3- برخی از ویژگی‌های برگ خرما و بیوجار مورد استفاده در آزمایش

ویژگی	جرم مخصوص (ρ)	اسیدیته (pH)	شوری (EC)	ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)	ماده آلی (OM)	نیترژن کل (N)	فسفر قابل جذب (P)	پتاسیم قابل استفاده (K)
واحد	g cm ⁻³	-	ds m ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	%		mg kg ⁻¹	
برگ خرما	0/85	7/3	7/8	13/2	37/12	2/52	50/16	472
بیوجار	0/43	6/7	8/9	44/2	42/62	1/06	58/12	2218

طرح آزمایشی

فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو عامل مقدار بیوجار برگ خرما و مدت زمان پس از کاربرد بیوجار هر کدام در چهار سطح و سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش در جدول 4 نشان داده شده است.

در این پژوهش به منظور بررسی اثرات سطوح مصرف بیوجار بر انواع تخلخل خاک و پایداری خاکدانه‌ها در دوره‌های زمانی مختلف، آزمایشی به صورت

جدول 4- تیمارهای بیوجار و زمان اعمال شده در آزمایش

سطح (ماه)	مدت زمان پس از کاربرد بیوجار	سطوح مصرف		مقدار بیوجار برگ خرما
		(تن در هکتار) [*]	درصد وزنی	
1	T ₁	0	0 (شاهد)	B ₀
3	T ₃	18	0/5	B _{0.5}
6	T ₆	36	1	B ₁
9	T ₉	72	2	B ₂

*: بر اساس جرم مخصوص ظاهری خاک مصرفی و عمق 30 سانتی‌متری

چگونگی انجام آزمایش‌ها

پژمردگی و ظرفیت زراعی خاک، مقدار آب قابل استفاده محاسبه و با توزین روزانه گلدان‌ها اجازه داده شد تا 50 درصد آن تخلیه شود. با توجه به فاکتور مدت زمان پس از کاربرد بیوجار، پس از گذشت یک، سه، شش و نه ماه پس از اعمال تیمارهای آزمایش با توجه به اهداف آزمایش جرم مخصوص ظاهری، تخلخل کل، موین، تهویه‌ای، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش خشک و تر به شرح زیر اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری و انواع تخلخل خاک
اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری با استفاده از نمونه‌برداری از مرکز گلدان‌ها با استوانه نمونه‌برداری که دارای ارتفاع 6/13 سانتی‌متر و قطر داخلی 5/2 سانتی‌متر بود، انجام شد. پس از نمونه‌برداری و با قرار گرفتن کامل خاک در داخل رینگ و نمونه خاک در آون با دمای 105 درجه سانتی‌گراد به مدت 24 ساعت قرار داده شد (بلک و هارتج، 1986) تا خشک شود. سپس جرم مخصوص از نسبت وزن خاک خشک به حجم داخلی استوانه نمونه‌برداری (حجم کل خاک) محاسبه شد. جرم مخصوص حقیقی خاک نیز به روش آزمایشگاهی با استفاده از پیکنومتر (بلک و هارتج، 1986) و درصد

در این پژوهش برای انجام آزمایش‌ها از 48 گلدان پلاستیکی با ظرفیت سه کیلوگرم با ارتفاع 18 سانتی‌متر و قطر 22 سانتی‌متر استفاده شد. در کف گلدان‌های سوراخ‌هایی به منظور زهکشی ایجاد و فیلتر شنی (با دانه‌بندی دو تا چهار میلی‌متر) به ضخامت دو سانتی‌متر در کف گلدان قرار داده شد. بیوجار پس از عبور از الک دو میلی‌متر به نسبت وزنی تیمارهای آزمایش (شاهد، 0/5، یک و دو درصد وزنی معادل صفر، پنج، 10 و 20 گرم بر کیلوگرم خاک) به صورت دستی و به طور یکنواخت با سه کیلوگرم خاک عبور داده شده از الک چهار میلی‌متر مخلوط شدند. نمونه‌های مخلوط خاک و بیوجار به مدت یک ماه در داخل کیسه‌های نایلونی، در شرایط انکوباسیون در دمای 20 تا 25 درجه سانتی‌گراد و با رطوبت ثابت در حد رطوبت ظرفیت زراعی خوابانده شدند و سپس به گلدان‌ها منتقل شدند (عباس و همکاران، 2018). با اندازه‌گیری رطوبت ظرفیت زراعی خاک در ابتدای آزمایش، رطوبت همه تیمارها به حد ظرفیت زراعی رسانده شد. در طول دوره آزمایش آبیاری بر اساس کسر 50 درصد آب قابل استفاده انجام شد. برای دستیابی به این منظور با اندازه‌گیری رطوبت نقطه

که در آن \bar{w}_i متوسط قطر یا اندازه خاکدانه‌ها در هر کلاس اندازه‌ای (میانگین قطر سوراخ الک‌های بالا و پایین) و W_i وزن نسبی خاکدانه‌های با قطر متوسط \bar{w}_i است.

تجزیه و تحلیل آماری

برای پی بردن به اثر تیمارهای آزمایش از جدول تجزیه واریانس (ANOVA) و برای مقایسه میانگین‌ها از روش چند دامنه‌ای دانکن به کمک نرم‌افزار STATISTICA10 و برای رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر مقدار بیوچار برگ خرما و مدت زمان پس از کاربرد بیوچار بر میانگین جرم مخصوص ظاهری، تخلخل کل، تخلخل موئین، تخلخل تهویه‌ای و میانگین وزنی قطر خاکدانه به روش الک خشک و الک تر در جدول 5 آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اثر اصلی مدت زمان پس از کاربرد بیوچار ($P < 0.01$) و اثر متقابل مدت زمان پس از کاربرد بیوچار و مقدار بیوچار ($P < 0.05$) بر جرم مخصوص ظاهری و تخلخل کل معنی‌دار بودند ولی اثر اصلی مقدار بیوچار بر جرم مخصوص ظاهری و تخلخل کل معنی‌دار نبود. اثر اصلی مقدار بیوچار و مدت زمان پس از کاربرد بیوچار ($P < 0.01$) نیز بر تخلخل موئین معنی‌دار بود و اثر متقابل مقدار بیوچار و مدت زمان پس از کاربرد بیوچار بر تخلخل موئین معنی‌دار نبود. اثر اصلی مقدار بیوچار ($P < 0.01$) بر تخلخل تهویه‌ای معنی‌دار بود و اثر اصلی مدت زمان پس از کاربرد بیوچار و اثر متقابل مدت زمان پس از کاربرد بیوچار و مقدار بیوچار بر تخلخل تهویه‌ای معنی‌دار نبود. همچنین اثر اصلی مقدار بیوچار، مدت زمان پس از کاربرد بیوچار و اثر متقابل مقدار بیوچار و مدت زمان پس از کاربرد بیوچار بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به روش الک خشک و تر، در سطح یک درصد ($P < 0.01$) معنی‌دار بودند.

تخلخل کل خاک با استفاده از جرم مخصوص ظاهری و جرم مخصوص حقیقی از رابطه 1 محاسبه شد.

$$F = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \right) * 100 \quad (1)$$

که در آن ρ_b جرم مخصوص ظاهری (g cm^{-3})، ρ_p جرم مخصوص حقیقی (g cm^{-3}) و F درصد تخلخل کل خاک است.

برای تعیین تخلخل موئین خاک، نمونه‌های هر تیمار با استفاده از دستگاه صفحات فشاری، تحت مکش (پنج کیلو پاسکال) قرار گرفتند و سپس رطوبت خاک که معادل تخلخل موئین است با قراردادن نمونه‌ها در آون و به دست آوردن رطوبت آن‌ها به دست آمد. همچنین تخلخل تهویه‌ای از رابطه 2 به دست آمد (علیزاده، 1388).

$$AFP = F - CP \quad (2)$$

که در آن: AFP تخلخل تهویه‌ای و CP تخلخل موئین است.

اندازه‌گیری میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک و تر

برای اندازه‌گیری پایداری ساختمان خاک از شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) با دو روش الک خشک (MWD_{Dry}) و تر (MWD_{wet}) استفاده شد. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک اغلب برای بررسی تأثیر خاک‌ورزی بر خرد و نرم شدگی خاک و ارزیابی فرسایش‌پذیری خاک در برابر باد به کار می‌رود. در صورتی که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر عموماً برای تعیین پایداری خاکدانه‌های درشت در برابر تنش‌های آبی استفاده می‌شود (واعظی و همکاران، 1397) که روش تعیین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها بر اندازه‌گیری وزن خاکدانه‌هایی با اندازه مشخص استوار است (کمپر و روزن، 1986). شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) با روش الک خشک و تر از رابطه‌ی زیر محاسبه شد.

$$MWD = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (3)$$

جدول 5- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر مقدار بیوچار برگ خرما و مدت زمان پس از کاربرد بیوچار بر میانگین جرم

مخصوص ظاهری، تخلخل کل، تخلخل موئین، تخلخل تهویه‌ای و میانگین وزنی قطر خاکدانه به روش الک خشک و الک تر

MWD _{wet}	MWD _{Dry}	تخلخل تهویه- ای	تخلخل موئین	تخلخل کل	pb	درجه آزادی	منبع تغییر
0/0063**	1/18**	371/9**	340/3**	1/7 ^{ns}	0/0012 ^{ns}	3	مقدار بیوچار
0/0101**	2/94**	5/9 ^{ns}	104/1**	86/7**	0/0609**	3	مدت زمان پس از کاربرد بیوچار
0/0020**	0/33**	7/4 ^{ns}	1/3 ^{ns}	6/8*	0/0048*	9	مدت زمان پس از کاربرد بیوچار × مقدار بیوچار
0/0005	0/05	4/3	0/9	2/9	0/0020	32	خطا

** بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد، * معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و ^{ns} غیر معنی‌داری است.

جرم مخصوص ظاهری خاک

ششم، بیشترین مقدار pb را دارد که نسبت به شاهد (B₀T₁) 14/7 درصد افزایش یافت. کمترین مقدار pb مربوط به تیمارهای B_{0.5}T₁، B₁T₁ و B₂T₁ که نسبت به شاهد (B₀T₁) مقدار pb به ترتیب 2/9، 1/5 و 5/1 درصد کاهش یافته است. در مجموع با توجه به اثرات متقابل، تیمارهای B_{0.5}T₁، B₁T₁ و B₂T₁ بهترین تیمارها از نظر کمتر بودن مقدار pb نسبت به شاهد (B₀T₁) بودند که با توجه به عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارهای ذکر شده، تیمار B_{0.5}T₁ با مقدار بیوپچار مصرفی کمتر، عملکرد مناسب‌تری در داشتن pb پایین تر نسبت به شاهد (B₀T₁) دارد. در مجموع نتایج نشان داد که با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار، مقدار pb روند افزایشی و با افزایش مقدار بیوپچار مقدار pb روند ثابتی ندارد.

علت کمتر بودن میزان pb در ماه اول نسبت به شاهد (B₀T₁) و مقدار اولیه جرم مخصوص ظاهری خاک آن است که با مخلوط شدن بیوپچار با داشتن جرم مخصوص ظاهری کمتر و تخلخل ذاتی بیشتر از ذرات معدنی خاک، به‌طور کلی سبب با افزایش تخلخل خاک (اختر و همکاران، 2014)، بهبود نسبی ساختمان خاک (هافل و همکاران، 2011) و در نهایت موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک در ماه اول شده است. همچنین نتایج این پژوهش افزایش مقدار pb را در بلند مدت (T₃)، T₆ و T₉) نشان داده است. علت آن است که گاهی به علت پایین بودن استحکام مکانیکی بیوپچار، با گذشت مدت زمان پس از کاربرد آن، بیوپچار نسبتاً به سرعت به ذرات ریزتر تجزیه شده است و با پر کردن منافذ خاک، pb خاک خشک را افزایش می‌دهد که این یافته‌ها با نتایج ورهایجن و همکاران (2006) مبنی بر افزایش pb در صورت مخلوط نکردن همگن بیوپچار با خاک و عدم استحکام مکانیکی بیوپچار همخوانی دارد.

نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی مقدار بیوپچار برگ خرما، مدت زمان پس از کاربرد آن و اثر متقابل مقدار بیوپچار و مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار بر pb در جدول 6 آورده شده است. نتایج اثر اصلی مقدار بیوپچار برگ خرما نشان می‌دهد که بین اثر سطوح بیوپچار (B_{0.5}، B₁ و B₂) بر جرم مخصوص ظاهری با شاهد B₀ در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار وجود ندارد. همچنین اثر اصلی مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار نشان می‌دهد بین سطوح مختلف زمانی پس از کاربرد بیوپچار (T₁، T₃، T₆ و T₉) بر جرم مخصوص ظاهری اختلاف معنی‌دار وجود دارد (P<0.05) و وجود دارد به‌طوری‌که با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار روند کلی مقدار pb افزایشی است. بیشترین و کمترین مقدار pb مربوط به ماه ششم T₆ و اول T₁ است. با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار از ماه اول T₁ تا ششم T₆، مقدار pb روند افزایشی دارد (1/33، 1/44 و 1/49 گرم بر سانتی‌متر مکعب) و مقدار pb در ماه سوم T₃ و ششم T₆ نسبت به ماه اول T₁ به ترتیب 8/3 و 12 درصد بیشتر شده است ولی مقدار pb در T₁ نسبت به مقدار pb اولیه خاک 2/9 درصد کاهش یافته است. همچنین مقدار pb در T₉ نسبت به T₆، 1/3 کمتر شد.

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح بیوپچار و مدت زمان پس از کاربرد آن بر مقدار pb نشان می‌دهد با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار از ماه اول تا ششم (T₁ تا T₆)، روند تغییرات مقدار pb افزایشی و از ماه ششم تا نهم (T₆ تا T₉)، مقدار pb کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان داد تمامی تیمارهای مورد بررسی به جز تیمارهای B_{0.5}T₁، B_{0.5}T₃، B_{0.5}T₆، B₁T₁، B₁T₃، B₁T₆ و B₂T₁ در سطح پنج درصد با شاهد (B₀T₁) اختلاف معنی‌دار دارند. تیمار B₂T₆ با 2 درصد وزنی بیوپچار در ماه

جدول 6- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل مقدار بیوپچار برگ خرما و مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار بر جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

میانگین	مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار (ماه)				مقدار بیوپچار (درصد وزنی)
	T ₉	T ₆	T ₃	T ₁	
1/42 ^A	1/46 ^{bc}	1/46 ^{bc}	1/42 ^{cd}	1/36 ^{de}	B ₀
1/43 ^A	1/45 ^{bc}	1/50 ^{ab}	1/43 ^{bcd}	1/32 ^e	B _{0.5}
1/43 ^A	1/47 ^{bc}	1/43 ^{bed}	1/47 ^{bc}	1/34 ^e	B ₁
1/43 ^A	1/50 ^{abc}	1/56 ^a	1/43 ^{bed}	1/29 ^e	B ₂
	1/47 ^{AB}	1/49 ^A	1/44 ^B	1/33 ^C	میانگین

وجود حروف لاتین مشترک در بین میانگین‌ها با حروف کوچک (اثر متقابل) و بزرگ (اثر اصلی) نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

انواع تخلخل

15/4 درصد کاهش یافت و بیشترین مقدار تخلخل کل نیز مربوط به تیمارهای B_0T_1 ، B_1T_1 و B_2T_1 بود که نسبت به شاهد (B_0T_1) مقدار تخلخل کل آنها به ترتیب 3/2، 2 و 5/4 درصد افزایش یافت. با توجه به اثر متقابل مقدار بیوچار و مدت زمان پس از کاربرد آن بر مقدار تخلخل کل، تیمارهای B_0T_1 ، B_1T_1 و B_2T_1 بهترین تیمارها از نظر بیشتر بودن مقدار تخلخل کل نسبت به شاهد (B_0T_1) بودند که با توجه به عدم اختلاف معنی دار ($P < 0.05$) بین تیمارهای ذکر شده، تیمار B_0T_1 با مقدار بیوچار مصرفی کمتر، بهترین تیمار از نظر بالاترین مقدار تخلخل کل بود. در مجموع نتایج نشان داد با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوچار، تخلخل کل کاهش یافت و بیشترین مقادیر آن در ماه اول کاربرد بیوچار (T_1) بود.

علت افزایش تخلخل کل در ماه اول آن است که افزودن بیوچار سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری و تراکم ذرات خاک شده است و بر تخلخل کل خاک تأثیر گذاشته است به این صورت که در یک واحد حجم خاک، بیوچار وزن خاک را کاهش می‌دهد و سبب افزایش حجم منافذ خاک نیز می‌شود. همچنین ذرات بیوچار تخلخلی بین 70 تا 90 درصد دارند که اضافه کردن این ذرات متخلخل به خاک، می‌تواند در تخلخل کل خاک تأثیر بگذارد و سبب افزایش آن شود (بلنکوکنکویی، 2017) که افزایش تخلخل کل بیشتر در خاک‌هایی با بافت متوسط دیده می‌شود (آمندی و همکاران، 2016). علاوه بر موارد ذکر شده، بیوچار به‌عنوان منبع غنی از کربن آلی، سبب بهبود ساختمان خاک و تشکیل خاکدانه‌های جدید، افزایش منافذ درشت و در واقع کاهش منافذ ریز در خاک می‌شود که یافته‌های این پژوهش با نتایج بایامونته و همکاران (2019) مبنی بر افزایش تخلخل خاک به ازای بیوچار اضافه شده و نتایج تحقیقات بلنکوکنکویی (2017) که نشان دادند افزایش بیوچار، تخلخل خاک را 14 تا 64 درصد در کوتاه مدت افزایش می‌دهد، همخوانی دارد.

جدول 7 نتایج مقایسه میانگین اثر اصلی مقدار بیوچار برگ خرما، مدت زمان پس از کاربرد آن و اثر متقابل مقدار بیوچار و مدت زمان پس از کاربرد بیوچار بر تخلخل کل را نشان می‌دهد. نتایج اثر اصلی سطوح بیوچار برگ خرما بر تخلخل کل نشان می‌دهد که بین سطوح بیوچار مصرفی (B_0 ، B_1 و B_2) با شاهد B_0 در سطح پنج درصد بر میزان تخلخل کل اختلاف معنی دار وجود ندارد. همچنین اثر اصلی مدت زمان پس از کاربرد بیوچار بر تخلخل کل نشان می‌دهد بین سطوح مختلف زمانی پس از کاربرد بیوچار (T_1 ، T_3 ، T_6 و T_9) اختلاف معنی دار ($P < 0.05$) وجود دارد و با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوچار از T_1 تا T_4 روند کلی تغییرات تخلخل کل کاهش است. بیشترین و کمترین مقدار تخلخل کل مربوط به ماه اول T_1 و ششم T_6 است که با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوچار از ماه اول T_1 تا ششم T_6 ، مقدار تخلخل کل روند کاهشی دارد (49/84، 45/78، 43/86 و 44/49 درصد) و مقدار تخلخل کل در T_3 و T_6 نسبت به T_1 به ترتیب 8/1 و 12 درصد کمتر شد ولی مقدار تخلخل کل در T_1 نسبت به مقدار تخلخل کل اولیه خاک 2/9 درصد کاهش یافته است. همچنین مقدار تخلخل کل در T_9 نسبت به T_6 ، 1/4 بیشتر شد.

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل مقدار بیوچار و مدت زمان پس از کاربرد آن بر مقدار تخلخل کل نشان داد تمامی تیمارها به جز تیمارهای B_0T_3 ، B_0T_1 ، B_0T_3 ، B_1T_1 ، B_1T_6 ، B_2T_1 و B_1T_3 با شاهد (B_0T_1) اختلاف معنی دار در سطح پنج درصد دارند. همچنین با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوچار از ماه اول تا ششم (T_1 تا T_6)، روند تغییرات تخلخل کل کاهشی ولی با افزایش از ماه ششم تا نهم (T_6 تا T_9) مقدار تخلخل کل بیشتر شد. کمترین مقدار تخلخل کل مربوط به تیمار B_2T_6 (2 درصد وزنی بیوچار در ماه ششم) که نسبت به شاهد (B_0T_1)

جدول 7- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل مقدار بیوچار و مدت زمان پس از کاربرد بیوچار بر تخلخل کل (درصد)

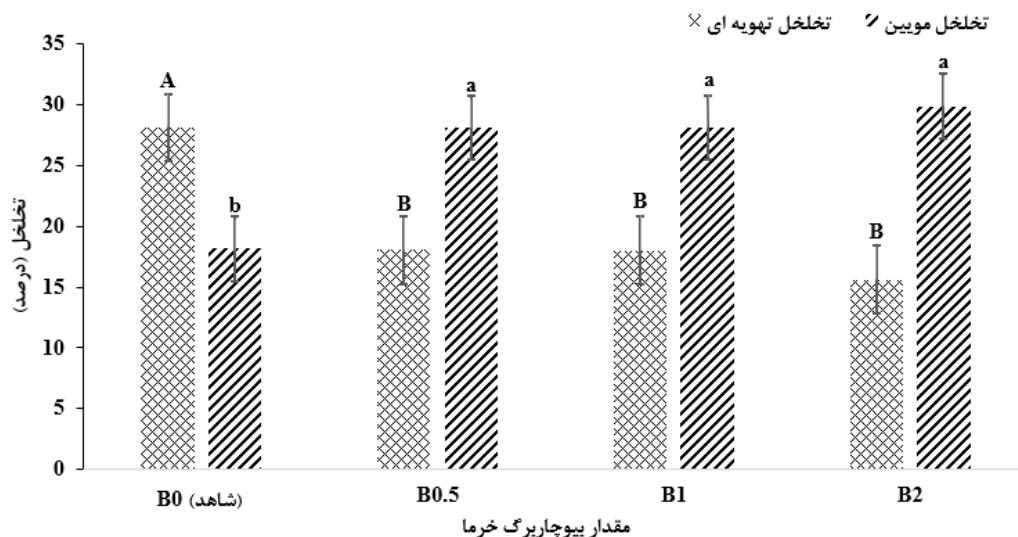
میانگین	مدت زمان پس از کاربرد بیوچار (ماه)				مقدار بیوچار (درصد وزنی)
	T_9	T_6	T_3	T_1	
46/28 ^A	45/02 ^{cd}	45/01 ^{cd}	46/50 ^{bc}	48/57 ^{ab}	B_0
46/20 ^A	45/17 ^{cd}	43/30 ^{de}	46/02 ^{bcd}	50/10 ^a	$B_{0.5}$
46/10 ^A	44/38 ^{cd}	46/06 ^{bcd}	44/50 ^{cd}	49/52 ^a	B_1
45/40 ^A	43/40 ^{cde}	41/09 ^e	46/11 ^{bcd}	51/18 ^a	B_2
	44/49 ^{BC}	43/86 ^C	45/78 ^B	49/84 ^A	میانگین

وجود حروف لاتین مشترک در بین میانگین‌ها با حروف کوچک (اثر متقابل) و بزرگ (اثر اصلی) نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

کلی تغییرات تخلخل تهویه‌ای با افزایش مقدار بیوجار برگ خرما از B_0 (شاهد) تا B_2 ، کاهش یافته است. به طوری که تخلخل تهویه‌ای در سطوح B_0 ، B_1 ، B_2 با 0/5، 1 و 2 درصد وزنی بیوجار (معادل 18، 36 و 72 تن در هکتار)، نسبت به شاهد (B_0) به ترتیب 35/8، 36 و 44/5 درصد کاهش یافت و بین سطوح ذکر شده و شاهد اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) وجود دارد. همچنین بیشترین مقدار تخلخل تهویه‌ای در سطح شاهد (B_0) و کمترین مقدار تخلخل تهویه‌ای در B_0 ، B_1 ، B_2 رخ داده است. با توجه به نتایج اثر اصلی مقدار بیوجار برگ خرما بر تخلخل تهویه‌ای، تیمار شاهد (B_0) بالاترین مقدار تخلخل تهویه‌ای را دارد و مصرف بیوجار بر تخلخل تهویه‌ای تأثیر مثبتی نگذاشته است. تأثیر مصرف بیوجار بر تخلخل تهویه‌ای می‌تواند به صورت منفی و یا مثبت باشد (وره‌ایجن و همکاران، 2006) که در این مطالعه تأثیر منفی بود. ذرات بیوجار زمانی که با خاک مخلوط می‌شوند می‌توانند سبب پر شدن یا مسدود شدن ماکروپوره‌های خاک به عنوان عوامل تأثیر گذار بر زهکشی خاک، با ذرات ریز بیوجار شوند. اغلب بیوجار در قطر-های کمتر از دو میلی‌متر استفاده می‌شود که ذرات ریز می‌توانند فضای منافذ را پر کنند و با ذرات معدنی خاک واکنش دهند که در نهایت موجب کاهش میزان تخلخل تهویه‌ای در خاک شده است (گیتینجی، 2014). نتایج این تحقیق نیز نشان داد که با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوجار، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل کل به-علت پر شدن ماکروپوره‌های خاک نیز افزایش یافت.

نتایج مقایسه میانگین اثر مقدار بیوجار برگ خرما بر تخلخل مویین و تخلخل تهویه‌ای (شکل 1) نشان می‌دهد که روند کلی تغییرات تخلخل مویین با افزایش مقدار بیوجار برگ خرما از B_0 (شاهد) تا B_2 ، افزایشی است. به طوری که تخلخل مویین در سطوح B_0 ، B_1 ، B_2 با 0/5، 1 و 2 درصد وزنی بیوجار (معادل 18، 36 و 72 تن در هکتار)، نسبت به شاهد (B_0) به ترتیب 54/6، 54/8 و 64/3 درصد افزایش یافت و بین سطوح ذکر شده و شاهد اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد وجود دارد. همچنین کمترین مقدار تخلخل مویین در سطح شاهد (B_0) و بیشترین مقدار تخلخل مویین در سطوح B_1 ، B_2 رخ داده است. با توجه به اینکه بین مقدار مصرف بیوجار در سطوح B_0 ، B_1 ، B_2 اختلاف معنی‌دار وجود ندارد، سطح B_0 (0/5 درصد وزنی بیوجار) بهترین مقدار از کاربرد بیوجار است که بر تخلخل مویین تأثیر مثبتی گذاشته است و با شاهد نیز اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) دارد. علت تأثیر مصرف بیوجار بر تخلخل مویین آن است که بیوجار به عنوان ماده‌ای با درصد تخلخل زیاد، منافذ ریز در آن بیشتر است و افزودن آن به خاک سبب افزایش میکروپورها و تخلخل مویین در خاک می‌شود و تخلخل مویین به این علت که بر ظرفیت نگهداری آب در خاک مؤثر است، در مجموع موجب افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک می‌شود (لوسوزا کاروالیو و همکاران، 2020).

نتایج مقایسه میانگین اثر مقدار بیوجار برگ خرما بر تخلخل تهویه‌ای (شکل 1) نشان می‌دهد که روند



شکل 1- نتایج مقایسه میانگین اثر مقدار بیوجار برگ خرما بر تخلخل مویین و تهویه‌ای (درصد)

وجود حروف لاتین مشترک در بین میانگین‌ها با حروف بزرگ (تخلخل تهویه‌ای) و کوچک (تخلخل مویین) نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

داشته است. علت بیشتر بودن مقدار تخلخل موئین در ماه اول آن است که توزیع اندازه‌ی منافذ خاک به علت استفاده از بیوپچار در طول زمان تغییر می‌کند و با استفاده از بیوپچار با ساختار متخلخل، مقدار تخلخل موئین در طی یک ماه افزایش یافته است که با نتایج لوستوزا کاروالیو و همکاران (2020) مبنی بر افزایش میکروپورها در مدت زمان 50 روز پس از کاربرد بیوپچار، میزان میکروپورهای خاک با افزایش سطح مصرف بیوپچار از صفر تا 25 تن بر هکتار، همخوانی دارد. یافته‌های جین و وانگ (2013) نیز نشان داد که با کاربرد 2/5 و 5 درصد بیوپچار چوب درخت در خاک، موجب افزایش تخلخل خاک شده است. همچنین نتایج مطالعات اوبیا و همکاران (2016) نشان داد که افزودن بیوپچار حاصل از بلال ذرت در دمای 350 درجه سانتی‌گراد به خاک، میزان تخلخل موئین را 3 تا 5 درصد به ازای هر درصد بیوپچار اضافه شده، افزایش داد. همچنین مقایسه‌ی میانگین نه ماهی اثر مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار بر تخلخل تهویه‌ای و موئین نشان داد تخلخل موئین مقدار بالاتر (26/06 درصد) و معنی‌داری نسبت به تخلخل تهویه‌ای با مقدار 19/94 درصد دارد و در تمامی ماه‌های مورد بررسی (ماه اول، سوم، ششم و نهم) تخلخل موئین مقادیر بالاتری نسبت به تخلخل تهویه‌ای داشته است.

نتایج تجزیه واریانس (جدول 5) نشان داد که اثر سطوح اصلی مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار بر تخلخل تهویه‌ای در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار نبوده است و با گذشت زمان پس از کاربرد بیوپچار، مقدار تخلخل تهویه‌ای تفاوت معنی‌دار نداشته است. ولی اثر اصلی مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار بر تخلخل موئین ($P < 0.01$) معنی‌دار بود. تمام سطوح مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار از نظر میزان تخلخل موئین با هم در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار دارند. نتایج مقایسه میانگین اثر مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار بر تخلخل موئین (جدول 8) نشان می‌دهد که روند کلی تغییرات تخلخل موئین با گذشت مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار از ماه اول تا نهم (T_1 تا T_9)، کاهشی است. به طوری که مقدار تخلخل موئین در سطوح T_3 ، T_6 و T_9 نسبت به T_1 به ترتیب 15/3، 18/7 و 22 درصد کاهش یافت. همچنین کمترین مقدار تخلخل موئین در این سطوح مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار (T_3 ، T_6 و T_9) رخ داده است و این سطوح در سطح پنج درصد با هم اختلاف معنی‌دار دارند. بالاترین مقدار تخلخل موئین در ماه اول (T_1) از مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار بوده است و با توجه به وجود تفاوت معنی‌دار بین T_1 و سطوح T_3 ، T_6 و T_9 ، سطح T_1 (ماه اول) بهترین سطح از نظر مقدار تخلخل موئین را

جدول 8- نتایج مقایسه میانگین اثر مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار بر تخلخل تهویه‌ای و موئین (درصد)

شاخص	مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار (ماه)			
	T_9	T_6	T_3	T_1
تخلخل موئین	23/64 ^a	24/62 ^c	25/67 ^b	30/30 ^a
تخلخل تهویه‌ای	20/85 ^a	19/24 ^a	20/12 ^a	19/55 ^a

وجود حروف لاتین مشترک در بین میانگین‌ها با حروف کوچک (اثر اصلی زمان) و بزرگ (میانگین کلی اثر زمان) نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

مختلف مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار به جز T_6 و T_9 اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) وجود دارد و با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار از T_1 تا T_3 ، مقدار MWD_{Dry} کاهش و با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار از T_3 تا T_9 مقدار MWD_{Dry} افزایش یافت که مقدار MWD_{Dry} در T_6 و T_9 نسبت به T_1 به ترتیب 37/2 و 41/7 درصد افزایش یافت و بیشترین مقدار MWD_{Dry} نیز در این دو سطح مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار (T_6 و T_9) ایجاد شده است و کمترین مقدار MWD_{Dry} در T_3 بوده است. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل مقدار بیوپچار و مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار بر میانگین وزنی

نتایج مقایسه میانگین اثر مقدار بیوپچار برگ خرما بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک (MWD_{Dry}) (جدول 9) نشان می‌دهد بین اثر سطوح مختلف مقدار بیوپچار به جز B_1 اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد وجود دارد و با افزایش سطوح بیوپچار از B_0 تا B_2 ، روند کلی تغییرات MWD_{Dry} کاهشی است. مقدار MWD_{Dry} در سطوح $B_{0.5}$ ، B_1 و B_2 نسبت به شاهد (B_0) به ترتیب 14/5، 8/7 و 30/6 درصد کاهش یافت. بیشترین مقدار MWD_{Dry} در سطح شاهد (B_0) و کمترین در سطح B_2 بوده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد بین سطوح

در مطالعه‌ای لیو و همکاران (2012) بیان کردند که بیوچار نتوانست به طور قابل توجهی مقدار MWD_{Dry} را در خاک‌هایی با درصد شن بیشتر از 17/3 درصد افزایش دهد که خاک‌هایی با درصد شن زیاد ممکن است به مقدار بیشتری از بیوچار برای اعمال تغییرات در میزان MWD_{Dry} نیاز داشته باشد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، نتایج گمیگ و همکاران (2016) نشان داد که MWD_{Dry} در خاک‌هایی با درصد شن زیاد تا سطح یک درصد میزان بیوچار سبب افزایش MWD_{Dry} می‌شود و بیشتر از آن تأثیری بر MWD_{Dry} ندارد که نتایج این تحقیق نیز نشان داد با افزایش مقدار بیوچار از B_1 تا B_2 ، MWD_{Dry} کاهش یافت. همچنین نتایج تحقیقات نشان داده است که ذرات بیوچار می‌تواند مقدار MWD_{Dry} را در طولانی مدت بهبود دهد. به این علت که ذرات بیوچار در طولانی مدت اکسید شده و با ذرات خاک واکنش داده و موجب افزایش مقدار MWD_{Dry} می‌شود (بلنکوکنکویی، 2017) که این نتایج با یافته‌های حاصل از این تحقیق همخوانی دارد.

نتایج مقایسه میانگین اثر مقدار بیوچار برگ خرما بر میانگین وزنی قطر خاکدانه به روش الک تر (MWD_{wet}) (جدول 9) نشان می‌دهد بین سطوح مقدار بیوچار B_0 و B_1 با سطوح $B_{0.5}$ و B_2 اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد وجود دارد و با افزایش سطوح بیوچار از B_0 تا $B_{0.5}$ و از B_1 تا B_2 ، مقدار MWD_{wet} بیشتر شده است. مقدار MWD_{wet} در $B_{0.5}$ و B_2 نسبت به شاهد (B_0) به ترتیب 15/8 و 21/1 درصد افزایش یافت. کمترین مقدار MWD_{wet} در سطح شاهد (B_0) و B_1 و بیشترین مقدار در سطح $B_{0.5}$ و B_2 بوده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد بین سطوح T_1 و T_3 با T_6 و T_9 از مدت زمان پس از کاربرد بیوچار اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) وجود دارد و با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوچار از T_1 تا T_9 ، مقدار MWD_{wet} کاهش یافت. مقدار MWD_{wet} در T_3 ، T_6 و T_9 نسبت به T_1 به ترتیب 8/3، 25 و 25 درصد کمتر شد و بیشترین مقدار MWD_{wet} نیز در دو سطح T_1 و T_3 از مدت زمان پس از کاربرد بیوچار ایجاد شده است. کمترین مقدار MWD_{wet} در T_6 و T_9 بوده است.

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل مقدار بیوچار و مدت زمان پس از کاربرد بیوچار بر میانگین وزنی قطر خاکدانه به روش الک تر نشان داد تمامی تیمارها به جز تیمارهای $B_{0.5}T_1$ ، $B_{0.5}T_3$ و B_2T_1 با تیمار شاهد (B_0T_1) اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) ندارند. با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوچار از T_1 تا T_3 ، مقدار MWD_{wet} به جز تیمارهای B_1T_3 و B_2T_3 بیشتر و با افزایش از T_3 تا T_6 مقدار MWD_{wet} کمتر و در نهایت با

قطر خاکدانه‌ها به روش الک خشک نشان داد تمامی تیمارها به جز تیمارهای B_0T_3 ، $B_{0.5}T_6$ ، B_1T_1 ، B_1T_6 ، B_2T_6 و B_2T_9 با تیمار شاهد (B_0T_1) در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌دار دارند. با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوچار از T_1 تا T_3 ، مقدار MWD_{Dry} به جز تیمار $B_{0.5}T_3$ کاهش و با افزایش از T_3 تا T_9 مقدار MWD_{Dry} به جز تیمار B_2T_9 بیشتر شد. همچنین با افزایش مقدار بیوچار از B_0 تا $B_{0.5}$ مقدار MWD_{Dry} به جز در تیمار $B_{0.5}T_9$ کاهش یافت و با افزایش بیوچار از $B_{0.5}$ تا B_1 مقدار MWD_{Dry} به جز در دو تیمار B_1T_3 و B_1T_6 افزایش و در نهایت با افزایش مقدار بیوچار از B_1 تا B_2 مقدار MWD_{Dry} کاهش یافت. بیشترین مقدار MWD_{Dry} مربوط به تیمار B_1T_9 که نسبت به شاهد (B_0T_1) 28 درصد مقدار MWD_{Dry} بیشتر شد و کمترین مقدار MWD_{Dry} مربوط به تیمار B_2T_3 که نسبت به شاهد (B_0T_1) 47/2 درصد مقدار MWD_{Dry} کاهش یافت. با توجه به نتایج اثر متقابل مقدار بیوچار و مدت زمان پس از کاربرد بیوچار بر MWD_{Dry} ، تیمار B_1T_9 با یک درصد وزنی بیوچار در ماه نهم، بیشترین مقدار MWD_{Dry} را دارد.

در مجموع نتایج نشان داد روند کلی تغییرات MWD_{Dry} با افزایش مقدار بیوچار برگ خرما از B_0 تا B_2 ، کاهش و با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوچار از T_1 تا T_9 ، افزایش بود و کاربرد و ماندگاری بیوچار در طولانی مدت سبب افزایش MWD_{Dry} شده است. دلیل افزایش MWD_{Dry} به‌عنوان شاخصی از بهبود ساختمان خاک، را می‌توان به کربن آلی بیوچار نسبت داد. کربن آلی به‌عنوان عامل پیونددهنده‌ی ذرات عمل کرده و در نتیجه سبب ایجاد خاکدانه‌هایی با میانگین وزنی قطر بیشتر شده است که اسچونگ و همکاران (2004) نیز بیان کردند که بیوچار به علت کربن زیاد موجب تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها به طرز چشمگیری شده است. همچنین بیوچار به دلیل داشتن ساختار متخلخل، شبکه‌ی منافذ و ساختمان خاک را با گذشت مدت زمان پس از کاربردش تقویت می‌کند و بر جریان آب و هوا تأثیر می‌گذارد. نتایج تحقیقات ماجور (2010) نیز نشان داد که اتصال ذرات خاک به علت اضافه کردن بیوچار موجب افزایش جرم و حجم خاکدانه‌ها شده و میزان مقاومت برشی خاک در مقابل تنش‌های برشی افزایش پیدا کرد. با توجه به بافت لوم رسی شنی در این مطالعه می‌توان بیان کرد بیوچار ممکن است واکنش یا پیوندی با ذرات خاک حتی در میزان کم در خاک‌ها با درصد شن بیشتر ایجاد کند اما تأثیر بیوچار بر افزایش MWD_{Dry} تحت تأثیر بافت خاک، مقدار مصرف بیوچار و مدت زمان پس از کاربرد آن دارد.

سپس خاکدانه‌های درشت و مقاوم می‌شود که تحقیقات نشان داده‌اند که MWD_{wet} به‌عنوان شاخص حساس از پایداری و مقاومت ساختمان خاک است که با افزایش مقدار مصرف بیوپچار، مقدار MWD_{wet} بدون در نظر گرفتن بافت و مقدار کربن آلی اولیه خاک، افزایش می‌باید (بلنکوکنکویی، 2017). همچنین بورل و همکاران (20116) نشان دادند که بیوپچار، میزان MWD_{wet} را در خاک با شن زیاد بیشتر از خاک رسی و سیلتی افزایش داد به این علت که ذرات آلی بیوپچار ممکن است پیوند بین ذرات درشت را بهبود و خاکدانه‌سازی را در خاک درشت بافت افزایش دهد که با نتایج حاصل از این تحقیق نیز همخوانی دارد. از آنجایی که میزان تأثیر بیوپچار به مقدار اولیه کربن آلی خاک نیز بستگی دارد و می‌تواند دارای اثر مثبت و یا منفی باشد و از آنجایی که مقدار ماده آلی خاک مورد مطالعه در سطح مطلوبی است (1/86 درصد)، این عامل موجب آن شده است که افزودن بیوپچار در خاک در کوتاه مدت موجب افزایش MWD_{wet} شود. این در حالی است که نتایج تحقیقات دونگ و همکاران (2016) نشان داد در خاک‌هایی با غلظت کربن آلی کمتر از 0/43 درصد، ممکن است بعد از اضافه کردن بیوپچار به خاک، میزان MWD_{wet} تغییری مشاهده نشود. یافته‌های این پژوهش با یافته‌های شنگ و همکاران (2014) و انابی و همکاران (2007) مبنی بر نقش مؤثر مواد آلی در افزایش پایداری خاکدانه‌ها و به دنبال آن ایجاد خاکدانه‌های بزرگتر و افزایش مقدار MWD_{wet} را با افزایش نیروی پیوستگی بین خاکدانه‌ها توسط ترکیبات موجود در مواد آلی مرتبط می‌دانند، نیز همخوانی دارد.

افزایش از T_6 تا T_9 مقدار MWD_{wet} به‌جز تیمار B_0T_9 بیشتر شد. همچنین با افزایش مقدار بیوپچار از B_0 تا $B_{0.5}$ مقدار MWD_{wet} به‌جز در تیمار $B_{0.5}T_6$ بیشتر شد و با افزایش بیوپچار از $B_{0.5}$ تا B_1 مقدار MWD_{wet} به‌جز در تیمار B_1T_6 کمتر و در نهایت با افزایش مقدار بیوپچار از B_1 تا B_2 مقدار MWD_{wet} بیشتر شد. کمترین مقدار MWD_{wet} مربوط به تیمارهای B_0T_6 ، $B_{0.5}T_6$ ، B_1T_6 ، B_2T_6 ، B_0T_9 ، $B_{0.5}T_9$ و B_1T_9 است که نسبت به شاهد (B_0T_1) به طور متوسط 5/3 درصد مقدار MWD_{wet} کاهش یافت. بیشترین مقدار MWD_{wet} مربوط به تیمار B_2T_1 که نسبت به شاهد (B_0T_1) 63/2 درصد مقدار MWD_{wet} افزایش یافت و با توجه به نتایج اثر متقابل مقدار بیوپچار و مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار بر MWD_{wet} ، تیمار B_2T_1 با دو درصد وزنی بیوپچار در ماه اول، بیشترین مقدار MWD_{wet} را دارد که نسبت به شاهد (B_0T_1) نیز اختلاف معنی‌دار ($P < 0.05$) دارد. در مجموع نتایج نشان داد روند کلی تغییرات MWD_{wet} با افزایش مقدار بیوپچار برگ خرما از B_0 تا B_2 ، افزایشی و با افزایش مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار از T_1 تا T_9 ، کاهش بود و کاربرد بیوپچار در کوتاه مدت سبب افزایش MWD_{wet} شده است. علت افزایش MWD_{wet} با افزودن بیوپچار در سطوح مختلف به این علت است که بیوپچار هسته‌های آلی است که در اطراف آن ذرات معدنی می‌توانند از طریق نیروهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به هم متصل و خاکدانه را تشکیل دهند که کربن آلی موجود در بیوپچار می‌تواند لیگاند‌های آلی را به همراه پیوند با کاتیون‌های چند ظرفیتی در سطح ذرات خاک تشکیل دهند که ترکیب ذرات آلی و معدنی سبب تشکیل خاکدانه‌های ریز و

جدول 9- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل میزان بیوپچار برگ خرما و مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار بر میانگین وزنی قطر خاکدانه به روش الک خشک و الک تر (میلی‌متر)

میانگین	مدت زمان پس از کاربرد بیوپچار (ماه)				مقدار بیوپچار (درصد وزنی)	شاخص
	T_9	T_6	T_3	T_1		
2/42 ^A	2/73 ^{abc}	2/66 ^{abc}	2/12 ^{ef}	2/18 ^{def}	B_0	MWD_{Dry}
2/07 ^B	2/76 ^{ab}	2/59 ^{abcd}	1/62 ^{gh}	1/30 ^{hi}	$B_{0.5}$	
2/21 ^{AB}	2/79 ^a	2/32 ^{def}	1/30 ^{hi}	2/42 ^{a-e}	B_1	
1/68 ^C	1/94 ^{fg}	2/31 ^{b-f}	1/15 ⁱ	1/30 ^{hi}	B_2	
	2/55 ^a	2/47 ^a	1/55 ^c	1/80 ^b	میانگین	
0/19 ^B	0/17 ^c	0/18 ^c	0/21 ^{cde}	0/19 ^{de}	B_0	MWD_{wet}
0/22 ^A	0/18 ^c	0/17 ^c	0/27 ^b	0/25 ^{bc}	$B_{0.5}$	
0/19 ^B	0/18 ^c	0/18 ^c	0/19 ^e	0/20 ^{cde}	B_1	
0/23 ^A	0/21 ^{cde}	0/19 ^c	0/23 ^{bcd}	0/31 ^a	B_2	
	0/18 ^B	0/18 ^B	0/22 ^A	0/24 ^A	میانگین	

وجود حروف لاتین مشترک در بین میانگین‌ها با حروف کوچک (اثر متقابل) و بزرگ (اثر اصلی) نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بر پایه آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد می‌باشند.

نتیجه‌گیری

کربن آلی قابل توجه، سبب بهبود تخلخل و پایداری ساختمان خاک شده است که این نقش با مقدار مصرف بیوچار و مدت زمان‌های مختلف پس از کاربرد بیوچار، اثرات متفاوتی را ایجاد می‌کند. لذا می‌توان از بیوچار برای بهبود ساختمان خاک‌های تخریب یافته و ضعیف استفاده کرد که این مطلب نیاز به مطالعه و تحقیقات پیشنهادی دیگری خواهد داشت. همچنین برای بررسی‌های بیشتر و درک پتانسیل بیوچار به‌عنوان ماده اصلاحی برای مدیریت خاک به داده‌ها در مقیاس‌های مختلفی نیاز است که پیشنهاد می‌شود سطوح بیوچار در دامنه‌های گسترده‌تر و در بازه‌ی زمانی طولانی‌تر هم در گلدان و هم در سطح مزرعه، بر ویژگی‌های فیزیکی بررسی شود. علاوه بر اینها، از آنجایی که تولید بیوچار نیاز به انرژی، ضایعات و بقایای گیاهی دارد، این عوامل می‌توانند موجب محدود شدن تولید آن شوند. از این رو وجود و دسترسی آسان به ضایعات گیاهی و انرژی مورد نیاز برای تولید بیوچار، باید مورد توجه تولیدکنندگان، محققان و توصیه‌کنندگان به استفاده از بیوچار قرار گیرد.

این تحقیق با افزودن مقدار مختلف بیوچار برگ خرما و در مدت زمان‌های مختلف پس از کاربرد بیوچار بر روی ویژگی‌های فیزیکی خاک از قبیل جرم مخصوص ظاهری، تخلخل کل، تخلخل تهویه‌ای، تخلخل موئین، میانگین وزنی قطر خاکدانه به روش الک تر (MWD_{wet}) و خشک (MWD_{Dry}) انجام شد که نتایج نشان داد اضافه کردن بیوچار به خاک با گذشت زمان اثرات متفاوتی بر ویژگی‌های ذکر شده دارد. مقدار جرم مخصوص ظاهری، تخلخل کل و تخلخل موئین و MWD_{wet} در ماه اول (T_1) و MWD_{Dry} در ماه نهم (T_9) بیشترین مقدار را در مدت زمان‌های مختلف پس از کاربرد بیوچار داشته‌اند و اثر زمان بر تخلخل تهویه‌ای در سطح یک درصد معنی‌دار نشد. همچنین حداکثر مقادیر جرم مخصوص ظاهری، تخلخل کل و تخلخل موئین با مصرف 0/5 درصد وزنی بیوچار ($B_{0.5}$)، تخلخل تهویه‌ای صفر درصد وزنی (B_0)، MWD_{wet} دو درصد وزنی (B_2) و MWD_{Dry} یک درصد وزنی (B_1)، به دست آمد. در مجموع نتایج این تحقیق نشان داد که بیوچار با داشتن تخلخل ذاتی زیاد و مقدار

فهرست منابع:

1. برزگر، ع.ا. 1379. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، 235 صفحه.
2. خادم، ا. رئیسی، ف. و بشارتی، ح. 1396. مروری بر اثرات کاربرد بیوچار بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک. نشریه علمی ترویجی مدیریت اراضی، جلد 5، شماره 1، صفحات 13 تا 30.
3. کرمی، ش. یثربی، ج. صفرزاده شیرازی، ص. رونقی، ع. و قاسمی، ر. 1398. مقایسه اثر چند ماده آلی و بیوچار آن‌ها بر برخی ویژگی‌های خاک. نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، جلد 33، شماره 3، صفحات 401 تا 414.
4. موسوی، س.ع.ا.، گوپلی، ا. و مسعودی، ف. 1397. اثر بیوچارهای کود گاوی و بقایای نخل تهیه شده در دماهای مختلف بر هدایت هیدرولیکی اشباع و ضرایب انتقال یون کلر در یک خاک لوم شنی. نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، جلد 32، شماره 4، صفحات 553 تا 567.
5. نیکروش، ا. برومند نسب، س. ناصری، ع.ع. و سلطانی محمدی، ا. 1397. بررسی اثر کاربرد بیوچار و هیدروچار کاه گندم بر خصوصیات فیزیکی یک خاک لوم شنی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد 32، شماره 2، صفحات 387 تا 397.
6. واعظی، ع.ل.، رحمتی، س. و بیات، ح. 1397. ارزیابی حساسیت اندازه‌های خاکدانه به فرسایش بین شپاری بر اساس شاخص‌های پایداری خاکدانه. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد 25، شماره 2، صفحات 169 تا 185.
7. Abbas, T., M. Rizwan, S. Ali, M. Adrees, A. Mahmood, M. Zia-ur-Rehman, M. Ibrahim, M. Arshad and M.F. Qayyum. 2018. Biochar application increased the growth and yield and reduced cadmium in drought stressed wheat grown in an aged contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 148:825–833.
8. Akhtar, S.S., G.T. Li, M.N. Andersen and F.L. Liu. 2014. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agricultural Water Management*. 138:37–44.

9. Annabi, M., H. Houot, F. Francou, M. Poitrenaud and Y. Le Bissonnais. 2007. Soil aggregate stability improvement with Urban Composts of different Maturities. *Soil Science Society of America Journal*. 71: 413-423.
10. Baiamonte, G., G. Crescimanno, F. Parrino and C.D. Pasquale. 2019. Effect of biochar on the physical and structural properties of a sandy soil. *Catena*. 175:294-303.
11. Blake, G.R. and K.H. Hartge. 1986. Bulk density. p. 363-382. In A., Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*, 2nd ed. Agronomy Monograph no. 9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.
12. 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.
13. Bouajila, A., and T. Gallali. 2010. Land use effect on soil and particulate organic carbon and aggregate stability in some soils in Tunisia. *African Journal Agricultural Research*. 5(8):764-774.
14. Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. p. 1148-1158. 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*.
15. Briggs, C., J.M. Breiner and R.C. Graham. 2012. Physical and chemical properties of *Pinus ponderosa* charcoal: Implications for soil modification. *Soil Science*. 177(4):263-268.
16. Bronick, C.J., and R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*. 124(1-2):3-22.
17. Burrell, L.D., F. Zehetner, N. Rampazzo, B. Wimmer and G. Soja. 2016. Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma*. 282: 96-102.
18. 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.
19. Dong, X., T. Guan, G. Li, Q. Lin and X. Zhao. 2016. Long-term effects of biochar amount on the content and composition of organic matter in soil aggregates under field conditions. *Journal of Soils and Sediments*. 16:1481-1497.
20. Githinji, L. 2014. Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 60:457-470.
21. Glaser, B., J. Lehmann and W. Zech. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biology and Fertility of Soils*. 35: 219-230.
22. Haefele, S.M., Y. Konboon, W. Wongboon, S. Amarante, A.A. Maarifat, E.M. Pfeiffer and C. Knoblauch. 2011. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems. *Field Crops Research*. 121: 430-440.
23. Hazelton, P., and B. Murphy. 2007. *Interpreting soil test results: what do all the numbers mean?*. CSIRO publishing, Australia.
24. Herath, H.M.S.K., M. Camps-Arbestain and M. Hedley. 2013. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol. *Geoderma*. 209-210:188-197.
25. Ippolito, J.A., T.F. Ducey, K.B. Cantrell, J.M. Novak and R.D. Lentz. 2015. Designer, acidic biochar influences calcareous soil characteristics. *Chemosphere*. 142:184-191.
26. Jien, S.H., and C.S. Wang. 2013. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*. 110: 225-233.
27. Jones, B.E.H., R.J. Haynes and I.R. Phillips. 2010. Effect of amendment of bauxite processing sand with organic materials on its chemical. Physical and microbial properties *Journal of Environmental Management*. 91: 2281-2288.

28. Juriga, M., V. Simansky, J. Horak, E. Kondrlova, D. Igaz, N. Pollakova, N. Buchkina and E. Balashov. 2018. The effect of different rates of biochar and biochar in combination with N fertilizer on the parameters of soil organic matter and soil structure. *Journal of Ecological Engineering*. 19(6):153-161.
29. Karhu, K., T. Mattila, I. Bergström and K. Regina. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity. Results from a short-term pilot field study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 140:309–13.
30. Kemper, W.D., and R.C. Rosen. 1986. Aggregate stability and distribution. p. 425-441. In D.L.Sparks et al. (ed.) *Method of soil analysis. Part 3*. 3rd ed. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America Madison, WI.
31. Klut, A. 1986. *Method of Soil Analysis: Physical, Chemical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA.
32. Lado, M., A. Paz and M. Ben-Hur. 2004. Organic matter and aggregate size interaction, seal formation, and soil loss. *Soil Science Society of America Journal*. 68:935-942.
33. Liu, X.H., F.P. Han and X.C. Zhang. 2012. Effect of biochar on soil aggregates in the loess plateau: Results from incubation experiments. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 14:975–979.
34. Lustosa Carvalho, M., M. Tuzzin de Moraes, C.E.P. Cerri and M.R. Cherubin. 2020. Biochar amendment enhances water retention in a tropical sandy soil. *Agriculture*. 10(62):1-13.
35. Major, J., M. Rondon, D. Molina, S.J. Riha and J. Lehmann. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*. 333: 117–128.
36. Mukherjee, A., and R. Lal. 2013. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy*. 3: 313–339.
37. Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1996. Total carbon organic carbon and organic matter. p. 961-1010. In D.L. Sparks et al. (ed). *Method of Soil Analysis. Part 3*. 3rd ed. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America Madison, WI.
38. O'Toole, A., C. Moni, S. Weldon, A. Schols, M. Carnol, B. Bosman and D.P. Rasse. 2018. Miscanthus biochar had limited effects on soil physical properties, microbial biomass, and grain yield in a four-year field experiment in Norway. *Agriculture*. 8(171):1-19.
39. O'Toole, A., C. Moni, S. Weldon, A. Schols, M. Carnol, B. Bosman and D.P. Rasse. 2018. Miscanthus biochar had limited effects on soil physical properties, microbial biomass, and grain yield in a four-year field experiment in Norway. *Agriculture*. 8(171):1-19.
40. Obia, A., J. Mulder, V. Martinsen, G. Cornelissen and T. Børresen. 2016. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*. 155: 35–44.
41. Olsen, S.R., and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus. p. 403–427. In A.L. Page et al. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2*. 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.
42. Omondi, M.O., X. Xia, A. Nahayo, X. Liu, P.K. Korai and G. Pan. 2016. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. *Geoderma*. 274:28–34.
43. Ouyang, L., F. Wang, J. Tang, L. Yu and R. Zhang. 2013. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 13(4): 991-1002.
44. Pandey, D., A. Daverey and K. Arunachalam. 2020. Biochar: production, properties and emerging role as a support for enzyme immobilization. *Journal of Cleaner Production*. 255 (In Press).

45. Reynolds, W.D., C.F. Drury, C.S. Tan, C.A. Fox and X.M. Yang. 2009. Use of indicators and pore volume–function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*.152: 252-263.
46. Richards, L.A. 1954. *Diagnosis and Importance of Salin and Alkali Soil*. U.S.D.A. Handbook, No. 60, Washington, D.C.
47. Schjønning P., L.J. Munkholm and S. Elmholt. 2004. Soil quality in organic. Book of abstracts Eurosoil. Farming effects of crop rotation animal manure and soil compaction.
48. Sheng, G., S. Fang-fang and Z. Tong, 2014. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena*. 114: 17-44.
49. Six, J., R.T. Conant, E.A. Paul and K. Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant Soil*. 241(2):155–176.
50. Tanure, M.M.C., L.M.D. Costa, H.A. Huiz, R.B.A. Fernandes, P.R. Cecon, J.D.P. Junior and J.M.R.D. Luz. 2019. Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil & Tillage Research*. 192:164–173.
51. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil asidity. p. 475-490. In Sparks D.L. et al. (ed). *Method of Soil Analysis*. Part 3. 3rd ed. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America Madison. WI.
52. Verheijen, F., S. Jeffery, A. Bastos, M. Van der Velde and I. Diafas. 2009. Biochar application to soils-a critical scientific review of effects on soil properties. Processes and functions, European commission joint research centre for scientific and technical reports. pp. 51-68.
53. Wang, D., S.J. Fonte, S.J. Parikh, J. Six and M. Scow. 2017. Biochar additions can enhance soil structure and the physical stabilization of C in aggregates. *Geoderma*. 303:110–117.
54. Wu, W., M. Yang, Q. Feng, K. McGrouther, H. Wang, H. Lu and Y. Chen. 2012. Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment. *Biomass and Bioenergy*. 47: 268–276.
55. Zhang, Z., Z. Zhu, B. Shen and L. Liu. 2019. Insights into biochar and hydrochar production and applications: a review. *Energy*. 1(35):1-59.

Long-Term Effects of Palm Leaf Biochar on the Porosity and Structure Stability of a Sandy Clay Loam Soil

P Nasimi, A. Karimi, and Z. Gerami¹

MSc., Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Iran;

E-mail: pnasimi2017@gmail.com

Assistant Professor., Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Iran;

E-mail: karimiahmad1342@yahoo.com

PhD Candidate, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Iran;

E-mail: z.gerami@yahoo.com

Received: January, 2020 and Accepted: July, 2020

Abstract

Biochar in soil is an alternative way to increase soil carbon in the long term and improves soil physical properties. The aim of this study was to investigate the long-term effect of palm leaf biochar on different types of soil porosity (air filled, capillary, and total) and structure stability of a sandy clay loam soil. A factorial experiment was performed in pots using a completely randomized design with two factors including the amount of biochar of date leaves at four levels (control=B₀, B_{0.5}=0.5%, B₁=1%, and B₂=2% by weight) and the time after application of biochar at four levels (T₁=one, T₃=3, T₆=6, and T₉=9 months), with three replications. The results showed that the effect of palm leaf biochar on air-filled and capillary porosity was significant. Also, the effect of time after biochar application on bulk density and porosity was significant. The effect of biochar amount, time after biochar application, and their interaction effects on mean weight diameter (MWD) of aggregates were significant. The highest percentage of increases in treatments compared to the control (B₀T₁) belonged to B₂T₆ in bulk density (14.7%), total porosity in B₂T₁ (5.4%), capillary porosity in B₂ (64.3%), MWD of aggregates by dry sieve method in B₁T₉ (28%), and MWD of aggregates by wet sieve method in B₂T₁ (63.2%). The results showed that the highest effect of biochar on bulk density, total porosity, capillary porosity, and MWD of aggregates by wet sieve method was in the first month, and on MWD of aggregates by dry sieve method was in the ninth month, while the effect of time on changes in air filled porosity was not significant. Overall, biochar with significant porosity and carbon content improved the porosity and soil structure stability in this study. Therefore, biochar can be used to improve structure of degraded and weak soils.

Keywords: Air filled porosity, Capillary porosity, Bulk density, Mean weight diameter of aggregates

¹ Corresponding author: Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord.