تأثیر بیوچارهای حاصل از مواد اولیهٔ مختلف روی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

حسین شکفته*: *دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه جیرفت*
آزاده نبی‌زاده رفسنجانی: *دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، گروه علوم خاک، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان*
قباد جلالی: *استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه جیرفت*

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۷/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۷)

چکیده

بیوچار یک ترکیب کربنی آلی است که می‌تواند خواص فیزیکوشیمیایی خاک یا به عبارتی کیفیت آن را بهبود بخشد. در این پژوهش، تأثیر بیوچارهای حاصل از پوست‌های سخت و نرم پسته و گردو بر برخی از شاخص‌های کیفیت خاک (شیمیایی و فیزیکی) در دو خاک لوم رسی و لوم شنی و در سه سطح (صفر، دو و چهار درصد وزنی) طی یک دورهٔ چهار ماهه بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش سطوح بیوچارها، تأثیر معنی‌داری در مقادیر هدایت الکتریکی خاک‌ها مشاهده نشد. همچنین دربارهٔ تغییرات pH، تأثیر بیوچارهای حاصل از پوست نرم گردو و پوست سخت پسته معنی‌دار بود؛ به نحوی که به ترتیب به افزایش و کاهش pH خاک منجر شد. از طرفی با افزودن بیوچارهای مورد استفاده، جرم مخصوص ظاهری خاک کاهش یافت. همچنین، کاربرد بیوچارهای پوست نرم پسته و پوست سخت گردو در خاک لوم رسی و بیوچار پوست سخت پسته در خاک لوم شنی، بر خاکدانه‌سازی اثرات مثبت معنی‌داری داشت و استفاده از بیوچارهای پوست نرم گردو در خاک لوم شنی، ظرفیت نگهداری آب در خاک را افزایش داد. در نهایت، بیوچار حاصل از پوست نرم گردو در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی مورد مطالعه، بیشترین مقادیر شاخص S را در بین بیوچارهای مورد استفاده به همراه داشت. به طور کلی، نتایج حاصل از این پژوهش عمدتاً بر اثرات مثبت کاربرد بیوچارها روی خصوصیات خاک‌ها دلالت دارد و به نظر می‌رسد که میزان تأثیرگذاری آنها تابعی از نوع بیوچار و بافت خاک است.

واژگان کلیدی: بافت خاک، بیوچار، خاکدانه‌سازی، شاخص S، pH خاک.

* نویسندهٔ مسئول: H.Shekofteh@ujiroft.ac.ir

۱ـ مقدمه

خاک یکی از مهم‌ترین سرمایه‌های طبیعی هر کشور است و عامل مهم تأمین غذا و نیازمندی‌های دیگر نظیر چوب، پوشاک و غیره به شمار می‌رود. با توجه به اینکه جمعیت بشر روز به روز در حال افزایش است، تولید محصولات و فرآورده‌های کشاورزی بیشتر امری اجتناب‌ناپذیر است که این موضوع به افزایش بهره‌برداری بی‌رویه از منابع و تخریب خاک منجر می‌شود. در این میان، کیفیت خاک یکی از مواردی است که باید به آن توجه کرد. کیفیت خاک، ظرفیت عملکرد آن برای حفظ بهره‌وری بیولوژیکی، کیفیت محیط زیستی و ترویج سلامتی گیاهان و حیوانات است و بنابراین، باید همواره در جهت بهبود آن تلاش شود. کیفیت خاک عاملی است که در اثر ویژگی‌های ذاتی خاک و چگونگی مدیریت حاکم بر آن تغییر می‌کند (Karlen et al, 1997). یکی از موارد تأثیرگذار بر حاصلخیزی و کیفیت خاک، مواد آلی است. در اقلیم خشک و نیمه خشک ــ که قسمت عمدهٔ کشور ایران را شامل می‌شود ــ به علت فقدان پوشش گیاهی کافی و بازگشت مقدار کم بقایای گیاهی، خاک حاوی ماده آلی کمتر از یک درصد است و این مسأله به ایجاد کیفیت فیزیکی ضعیف به ویژه از نظر پایداری ساختمان خاک در آن منجر می‌شود (Noori et al, 2021). با توجه به کمبود زمین‌های مناسب کشاورزی در کشور، بهبود خصوصیات خاک اهمیت زیادی دارد. وجود ماده آلی به افزایش پایداری خاکدانه‌ها، افزایش نگهداشت آب در خاک، کاهش جرم مخصوص ظاهری،کمک به ایجاد پوشش گیاهی و افزایش کربن آلی ذخیره شده در خاک، به عنوان یک راه حل برای کنترل تخریب خاک و بیابان‌زایی منجر می‌شود (Jackson et al, 2017). در نتیجه، استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی به منظور بهبود کیفیت خاک و افزایش ماده آلی آن در مناطق خشک و نیمه خشک گسترش دارد (Masciandaro et al, 2013)؛ از جمله این مواد می‌توان به زغال زیستی یا بیوچار[1] اشاره کرد.

بیوچار ماده‌ای جامد، حاوی کربن و متخلخل است که به وسیلهٔ حرارت شیمیایی مواد آلی، در اتمسفر بدون اکسیژن تولید می‌شود. این ماده، خواص فیزیکوشیمیایی مناسبی برای ذخیرهٔ کربن به مدت طولانی و محفوظ نگه‌داشتن آن در محیط‌زیست دارد (Shackley et al, 2012). تولید بیوچار یکی از تکنولوژی‌های صنعتی برای حذف کربن اتمسفری در دنیا محسوب می‌شود. از انواع مختلفی از مواد اولیه مانند بقایای گیاهان (سبوس برنج، علوفه سویا و بقایای پنبه)، انواع کودها و ضایعات چوب (خاک ارّه) برای تولید بیوچار استفاده می‌شود (Fawzy et al, 2021). وجود این ماده در خاک به افزایش حاصلخیزی، کاهش تغییرات اقلیمی، کاهش آب‌شویی مواد غذایی از خاک، افزایش نگهداری رطوبت خاک و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی منجر می‌شود و به این ترتیب، به افزایش کیفیت خاک می‌انجامد (Dünisch et al., 2007). بررسی‌ها نشان داد که مواد آلی با تجزیهٔ تدریجی در خاک، انواع متابولیت‌ها و اسیدهای آلی را در خاک تولید می‌کند که از یک سو، به چسبندگی بیشتر ذرات خاک می‌انجامد و از سوی دیگر، با افزایش فشار جزئی گاز دی‌اکسیدکربن، به افزایش حل شدن بیشتر ترکیبات معدنی کلسیم‌دار در خاک منجر می‌شود و نتیجهٔ آن، افزایش هم‌آوری ذرات رس، پایداری خاکدانه‌ها و افزایش خاکدانه‌های بزرگ‌تر است (Rodríguez et al, 2006). با افزودن بیوچار به خاک، تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن قابل توجه است و این ماده می‌تواند بر بافت، ساختمان، تخلخل، مقاومت، اندازهٔ منافذ و توزیع اندازه ذرات و تراکم خاک، و ویژگی‌های شیمیایی نظیر مقدار شوری، اسیدیته، نسبت

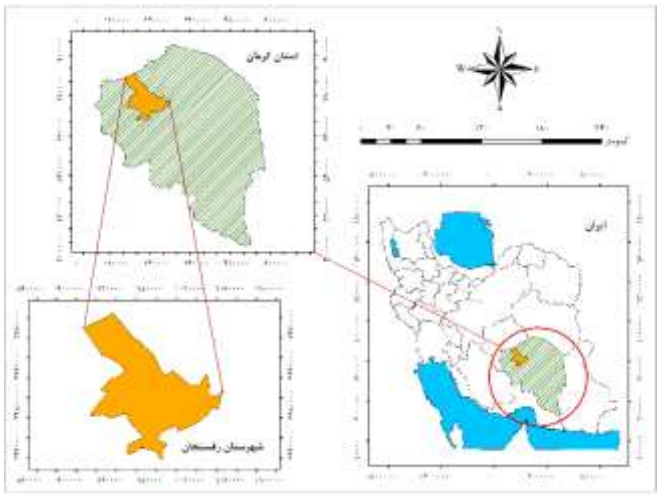
[1] Biochar

جذب سدیم، ظرفیت تبادلی و غیره تأثیر بگذارد و موجب بهبود آنها شود؛ هر چند در برخی پژوهش‌ها اثـرات منفـی بیوچار بر ویژگی‌های خاک نیز گزارش شده‌است (Singh et al, 2010). اگرچه نتایج پژوهش‌ها با توجه به نوع بیوچار و نوع خاک بسیار متفاوت است؛ با این حال، اطلاعات موجود نشان می‌دهد که بیوچار به دلیل تخلخل بالایی که دارد و به دلیل افزایش منافذ درشت خاک و افزایش پایداری ساختمان آن-که به علت وجود مـواد آلـی اسـت- بـه افـزایش تخلخل کل خاک (Libra et al, 2011)، کاهش جرم مخصوص ظاهری آن (Herath et al, 2013) و افزایش ظرفیـت نگهداری آب (Uzoma et al, 2011) منجر می‌شود. بیوچار علاوه بر اینکه شرایط فیزیکی و شیمیایی خـاک را بهبـود می‌بخشد، به دلیل سرشار بودن از عناصر غذایی و ترکیبات آروماتیک پایدار توصیه می‌شود از آن برای افزایش رشـد و عملکرد محصول در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده شود (Chan et al, 2007).

بیوچار معمولاً به عنوان ماده‌ای ناهمگن توصیف می‌شود که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن متفاوت است. ایـن تفاوت نه تنها به ویژگی‌های مرتبط با پیرولیز بلکه به مواد مورد استفاده برای تولید نیز بستگی دارد (Atkinson et al, 2010). بنابراین، توانایی بیوچار در بهبود کیفیت خاک به ویژگی‌های آن و نوع خاک وابسته است. با توجه بـه آنچـه پیرامون اهمیّت بیوچار و نقش آن در بهبود شاخص‌های کیفیت خاک مطرح شده‌است و تأثیر متفاوت انواع این مـاده بر ویژگی‌های خاک، این پژوهش با هدف بررسی اثر سطوح مختلف بیوچارهای تهیه شده از پوست‌های نرم[1] و سخت[2] پسته و گردو بر برخی از شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی کیفیت خاک انجام شد.

۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

نمونه‌های خاک از مناطق کبوترخان ("۳۹ '۲۴ °۵۶ طول شرقی و "۵۲ '۱۸ °۳۰ عرض شـمالی) و ناصـریه ("۲ '۱۴ °۵۶ طول شرقی و "۱۵ '۱۹ °۳۰ عرض شمالی) شهرستان رفسنجان و از عمق صفر تا بیست سانتی‌متر جمع‌آوری شد. در شکل ۱، موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه ذکر شده‌است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه

[1] Hull
[2] Shell

۳ـ مواد و روش

مشخصات خاک‌های مورد استفاده

برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی دو نمونه خاک انتخاب شده، در جدول ۱ ارائه شده‌است. بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)[1] در عصارهٔ اشباع خاک به وسیلهٔ EC متر، اندازه‌گیری pH خاک در گل اشباع به وسیلهٔ pH متر (Page et al, 1982)، جرم مخصوص ظاهری (BD)[2] به روش استوانه بر روی نمونه‌های خاک دست‌نخورده (Blake and Hartge, 1986a) و جرم مخصوص حقیقی (PD)[3] به وسیلهٔ پیکنومتر (Blake and Hartge, 1986b) اندازه‌گیری شد.

جدول ۱: برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد استفاده

ویژگی	منطقهٔ کبوترخان	منطقهٔ ناصریه
رس (درصد)	۲۸/۵	۱۰/۵
سیلت (درصد)	۴۷	۱۹/۵
شن (درصد)	۲۴/۵	۷۰
بافت خاک	لوم رسی	لوم شنی
pH	۷/۸۷	۷/۵۳
قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	۳/۵	۱/۶
وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۱/۴۵	۱/۷۲
وزن مخصوص حقیقی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۲/۴۶	۲/۵۹

تهیهٔ بیوچار

برای تولید بیوچار و بررسی تأثیر این مواد بر برخی از شاخص‌های کیفیت خاک، پوست نرم و سخت پسته از باغ‌های پستهٔ منطقهٔ کبوترخان و پوست نرم و سخت گردو از باغ‌های گردوی اطراف معدن مس سرچشمهٔ شهرستان رفسنجان، جمع‌آوری و هواخشک شد. سپس این مواد پس از خرد کردن، در ظروف مخصوص درب‌دار ریخته و در کورهٔ الکتریکی در شرایط پیرولیز کند به بیوچار تبدیل شد. دمای مورد استفاده در این فرایند، چهارصد درجهٔ سانتی‌گراد و زمان تبدیل مواد خام به بیوچار، چهار تا پنج ساعت بود. انتخاب اندازهٔ ذرات طبق منابع مختلف، متفاوت بود. در این پژوهش، اندازهٔ ذرات کوچک‌تر از ۴۵ مش انتخاب شد (Liu et al, 2017).

اندازه‌گیری برخی از خصوصیات بیوچار

برای تعیین pH و EC بیوچارها، نخست عصارهٔ حاصل از نسبت‌های ۱:۲۰ و ۱:۱۰ (وزن بیوچار به حجم آب مقطر) به ترتیب برای pH و EC مطابق با روش Lu (1999) تهیه شد. سپس pH عصاره‌ها به وسیلهٔ pH متر و EC نیز به

[1] Electrical Conductivity
[2] Bulk Density
[3] Particle Density

وسیلهٔ EC متر اندازه‌گیری شد. ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)[1] بیوچارها نیز بـه روش Schollenberger و Simon (1945) تعیین شد (جدول ۲).

جدول ۲: برخی خصوصیات بیوچارهای مورد استفاده

نوع بیوچار	قابلیت هدایت الکتریکی	پی‌اچ	ظرفیت تبادل کاتیونی	کربن	نیتروژن	هیدروژن	گوگرد	اکسیژن*	کربن به نیتروژن	هیدروژن به کربن
	دسی‌زیمنس بر متر		سانتی‌مول بار مثبت بر کیلوگرم خاک	درصد					نسبت اتمی	
پوست سخت پسته	۲/۲۷	۶/۵۳	۳۲	۵۴/۶	۲/۴۷	۵/۱۷	۰/۴۱۴	۳۷/۴	۲۲/۱	۰/۰۹۰
پوست نرم پسته	۸/۰۲	۸/۲	۴۳	۴۹/۱	۳/۵۳	۴/۴۱	۰/۴۵۸	۴۲/۵	۱۳/۹	۰/۰۸۰
پوست سخت گردو	۰/۹۴۰	۸/۰۸	۱۴	۸۰/۷	۱/۶۲	۲/۸۵	۰/۲۴۲	۱۴/۶	۵۰	۰/۰۳۰
پوست نرم گردو	۸/۴۱	۱۰/۰۱	۵۲	۵۶/۷	۲/۹۷	۳/۲۱	۰/۴۴۷	۳۶/۶	۱۹/۱	۰/۰۵۰

* برای محاسبهٔ درصد اکسیژن نمونه‌های بیوچار، درصد عناصر کربن، نیتروژن، هیدروژن و گوگرد را با هم جمع کرد و حاصل جمع از صد کم شد.

آماده‌سازی تیمارها

تأثیر چهار نوع بیوچار تهیه شده از پوست نرم و سخت پسته و گردو، در سه سطح (صفر، دو و چهار درصد وزنی) و دو خاک با بافت‌های لوم شنی و لوم رسی بررسی، و با سه تکرار به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصـادفی انجام شد. بیوچارها (در سطوح ذکر شده)، به پنج کیلوگرم خاک اضافه شد و در گلدان‌ها ریخته شد. نمونه‌ها بـه مـدت چهار ماه به‌صورت دست نخورده باقی ماند. در طول دوره، میزان رطوبت نمونه‌ها در محدودهٔ ظرفیت مزرعه حفظ شـد. پس از اتمام دوره، نمونه‌برداری از خاک صورت گرفت و شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی آن بررسی شد.

تعیین برخی شاخص‌های کیفیت خاک

قابلیت هدایت الکتریکی خاک‌های مورد مطالعه در عصارهٔ اشباع خاک توسط EC متر و pH خاک‌ها در گل اشباع به‌وسیلهٔ pH متر تعیین شد (Page et al, 1982). جرم مخصوص ظاهری خاک نیز به روش استوانه تعیین شـد (Blake and Hartge, 1986a). ظرفیت آب قابل استفادهٔ گیاه با استفاده از رابطهٔ ۱ به‌دست آمد:

$$PAWC^{2}= FC^{3}- PWP^{4}$$ رابطه ۱

در این رابطه، PAWC ظرفیت آب قابل استفادهٔ گیاه، FC میزان رطوبـت در ظرفیـت مزرعـه (درصـد) و PWP میزان رطوبت در نقطهٔ پژمردگی دائم (درصد) است.

[1] Cation Exchange Capacity
[2] Plant Available Water Capacity
[3] Field Capacity
[4] Permanent Wilting Point

شاخص پایداری خاکدانه نیز تعیین شد که روش کار آن بدین صورت بود: ابتدا خاک هواخشک شده از الک هشت میلی‌متری عبور داده شد، سپس پنجاه گرم از آن روی سری الک‌ها (به‌ترتیب از بالا به پایین ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵ و ۰/۰۵۳ میلی‌متر) ریخته شد. پس از آن مقدار کمی آب روی خاک‌ها اسپری شد تا زمانی‌که الک‌ها وارد آب می‌شوند، هوای محبوس درون خاکدانه‌ها به از هم پاشیدن آنها منجر نشود. پس از آن ارتفاع آب داخل مخزن دستگاه ــ که به تعداد و اندازهٔ الک‌ها بستگی دارد ــ طوری تنظیم شد که وقتی الک‌ها در بالاترین نقطه بودند، خاکدانه‌ها به مقدار کمی از آب خارج شدند و زمانی که الک‌ها در پایین‌ترین نقطه بودند، مقدار کمی آب روی آنها را می‌پوشاند. سپس سری الک‌ها به‌مدت سه دقیقه و با نوسان سی دور در دقیقه در آب تکان داده شد. پس از پایان الک کردن، الک‌ها را به آرامی از آب خارج کردند و خاکدانه‌های مانده روی آن را شستند و وزن کردند. سپس این خاکدانه‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۰۵ درجهٔ سانتیگراد در آون خشک و مجدداً وزن شد. پس از آن برای تصحیح شن، خاکدانه‌های خشک مربوط به هر الک خرد و از آن عبور داده شد تا شن و سنگ‌ریزهٔ آنها جدا و جرم واقعی خاکدانه‌ها بر روی هر الک محاسبه شود. سپس از شاخص میانگین وزنی قطر[1] (MWD) برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک استفاده شد. این شاخص با استفاده از رابطهٔ ۲ محاسبه می‌شود:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n} \bar{X}_i W_i$$ رابطهٔ ۲

در این رابطه، MWD میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، n تعداد الک‌ها، $\bar{X}_i$ میانگین قطر خاکدانه‌های باقی بر روی الک i (میانگین قطر سوراخ‌های الک بالایی و پایینی) و W_i نسبت وزن خاکدانه‌های باقی‌مانده روی الک i به وزن کل خاک به‌کار برده شده در ابتدای آزمایش، پس از کسر ذرات شن و سنگ‌ریزه است.

W_i با استفاده از رابطهٔ ۳ محاسبه شد:

$$W_i = \frac{W_i - W_{i(S)}}{W_T - \sum_{i=1}^{n} W_{i(S)}}$$ رابطهٔ ۳

که در این معادله، W_i وزن ذرات باقی‌مانده در دامنه i، $W_{i(S)}$ وزن ذرات شن و سنگ‌ریزه در دامنهٔ i و W_T وزن خاک آون خشک است.

شاخص بعدی که بررسی شد، شاخص S بود. برای محاسبهٔ این شاخص، ابتدا منحنی مشخصهٔ رطوبتی خاک با استفاده از دو دستگاه صفحه فشاری (برای اندازه‌گیری فشارهای ۰/۳، ۱، ۳، ۵ و ۱۵ بار) و جعبهٔ شنی (برای اندازه‌گیری مکش‌های صفر و ۰/۱ بار) رسم شد. سپس پارامترهای مدل Van Genuchten (1980) طبق رابطهٔ ۴ تعیین شد:

$$\theta(b) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (ab)^n\right]^m}$$ رابطهٔ ۴

[1] Mean Weight Diameter (MWD) of Soil Aggregates

در این رابطه، θ_s مقدار آب خاک در حالت اشباع (کیلوگرم بر کیلوگرم)، θ_r مقدار آب باقی‌مانده (کیلوگرم بر کیلوگرم)، b مکش آب (برابر است با قدر مطلق پتانسیل ماتریک بر حسب سانتی‌متر)، a عکس مکش ورود هوا و m,n پارامترهای بدون بعد است (m طبق رابطهٔ ۵ محاسبه می‌شود):

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$ رابطهٔ ۵

پس از تعیین پارامترها، شاخص S طبق رابطهٔ ۶ محاسبه شد:

$$S = -n(\theta_s - \theta_r)\left[\frac{2n-1}{n-1}\right]^{\left(\frac{1}{n}\right)-2}$$ رابطهٔ ۶

پس از آن با استفاده از تقسیم‌بندی دکستر، شاخص S خاک‌ها تعیین شد. مقدار این شاخص همواره منفی است؛ بنابراین، از قدر مطلق آن استفاده می‌شود. طبقه‌بندی شاخص S بر این اساس است: اگر S بیش از ۰/۰۳۵ باشد، شاخص کیفیت فیزیکی خاک خوب است، اما ۰/۰۳۵-۰/۰۲ ضعیف و کمتر از ۰/۰۲ خیلی ضعیف است (Dexter, 2004).

آنالیز آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار SPSS (نسخهٔ ۲۴) و مقایسهٔ میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن انجام شد. همچنین برای رسم منحنی رطوبتی و به‌دست آوردن شاخص S، از نرم‌افزار RETC و برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

۴ـ یافته‌ها (نتایج)

بررسی اثر بیوچارها بر برخی شاخص‌های شیمیایی کیفیت خاک در دو بافت لوم شنی و لوم رسی

قابلیت هدایت الکتریکی

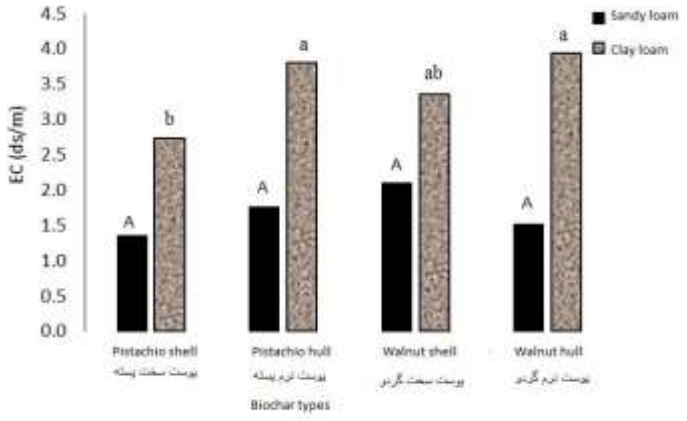
نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر متقابل بافت خاک، نوع بیوچار و سطوح آن، در سطح پنج درصد و اثرات مستقل بیوچار و بافت به‌ترتیب در سطوح پنج و یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳).

جدول ۳: تجزیه واریانس اثر بیوچارها بر برخی از شاخص‌های شیمیایی کیفیت خاک در دو بافت لوم شنی و رسی

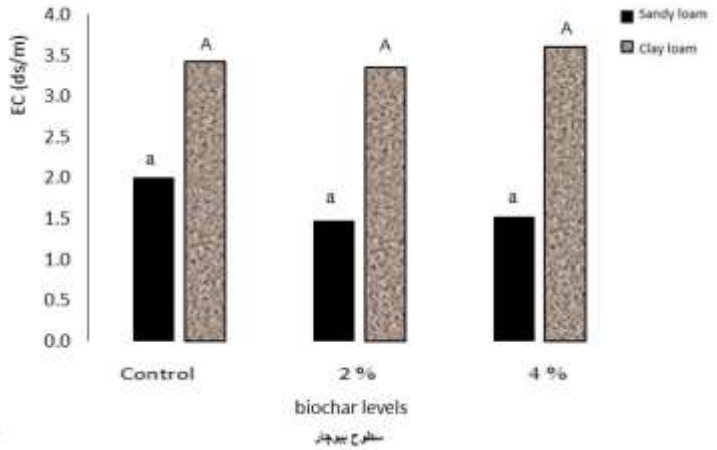
منابع تغییرات	درجه‌آزادی	میانگین مربعات	
		قابلیت هدایت الکتریکی	pH
بافت	۱	۵۶/۹**	۱/۲۸**
بیوچار	۳	۲/۲۵*	۰/۳۴۴**
بافت× بیوچار	۳	۱/۴۰ns	۰/۰۱۳ns
سطح	۲	۰/۶۴۷ns	۰/۰۰۳ns
بیوچار× سطح	۶	۰/۶۱۱ns	۰/۰۵۴ns
بافت× سطح	۲	۰/۸۵۲ns	۰/۱۴۱**
بافت× بیوچار× سطح	۶	۱/۹۵*	۰/۰۱۴ns
خطا	۴۸	۰/۷۵۲	۰/۰۲۴
ضریب تغییرات		۰/۵۵۹	۰/۵۸۳

**، * و ns به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و فقدان معنی‌داری طبق آزمون دانکن را نشان می‌دهند.

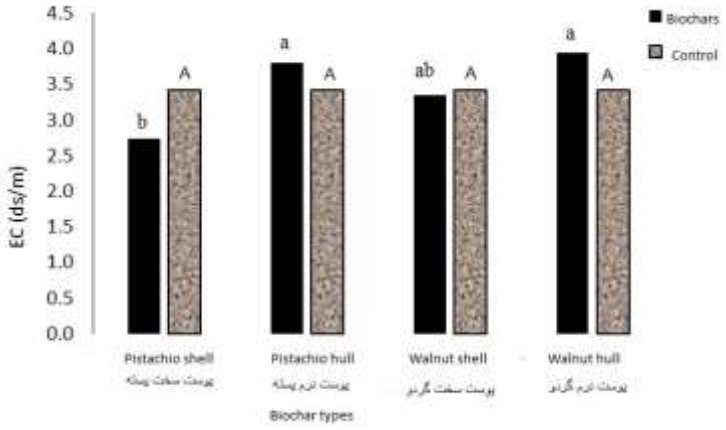
همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، بیوچارهای تولید شده از پوست‌های نرم پسته و گردو در تغییر قابلیت هدایت الکتریکی در خاک لوم رسی، تأثیر بیشتری داشت؛ اما تأثیر بیوچارها در بافت لوم شنی از نظر آماری یکسان بود. تأثیر سطوح بیوچارها نیز نسبت به شاهد در هر دو بافت از نظر آماری فاقد معنی‌داری بود (شکل ۳). بیوچارهای تولید شده از پوست نرم پسته و گردو نیز توانستند در بافت لوم رسی نسبت به شاهد، به‌ترتیب ۰/۳۸ و ۰/۵۲ واحد افزایش در EC خاک ایجاد کنند (شکل ۴)؛ این درحالی است که در خاک لوم شنی نه تنها تأثیر فزاینده‌ای نسبت به شاهد مشاهده نشد، بلکه میانگین‌ها در تمامی انواع بیوچار ــ به جز پوست سخت گردو ــ نسبت به شاهدها کمتر بود و با نمونهٔ شاهد اختلاف معنی‌دار نداشت (شکل ۵).



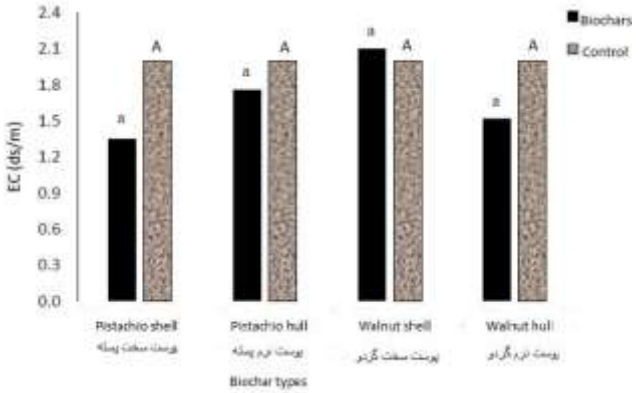
شکل ۲: مقایسهٔ میانگین نوع بیوچارها نسبت به یکدیگر بر قابلیت هدایت الکتریکی در خاک‌های لوم شنی و لوم رسی
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.
(مقایسهٔ میانگین برای هر خاک به‌صورت جداگانه انجام شد)



شکل ۳: مقایسهٔ میانگین سطوح بیوچارها نسبت به یکدیگر بر قابلیت هدایت الکتریکی در خاک‌های لوم شنی و لوم رسی
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.
(مقایسهٔ میانگین برای هر خاک به‌صورت جداگانه انجام شد)



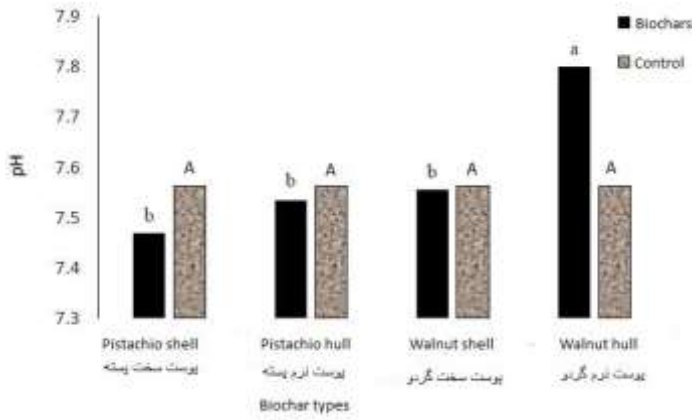
شکل ۴: مقایسهٔ میانگین اثر بیوچارها نسبت به یکدیگر بر قابلیت هدایت الکتریکی در خاک لوم رسی
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.



شکل ۵: مقایسهٔ میانگین اثر بیوچارها نسبت به یکدیگر بر قابلیت هدایت الکتریکی در خاک لوم شنی
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.

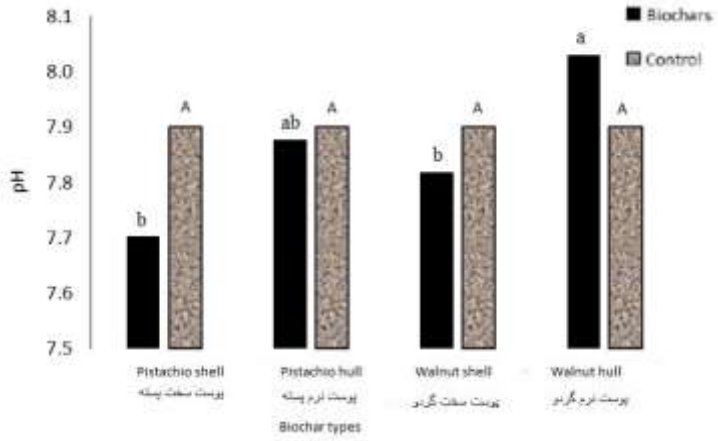
pH خاک

نتایج این بخش از پژوهش نشان داد که اثر متقابل بافت و سطح و اثرات مستقل بافت و بیوچار بر pH خـاک، در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). بر اساس نتایج به دست آمده، کاربرد بیوچار حاصل از پوست نرم گردو، بـه افزایش معنی‌دار pH در هر دو بافت خاک منجر شد؛ در حالی که کاربرد سایر بیوچارها با کاهش pH نسبت به شاهد همراه بود و بیشترین کاهش، به بیوچار حاصل از پوست سخت پسته تعلق داشت (شکل‌های ۶ و ۷). علت افزایش pH ناشی از کاربرد بیوچار پوست نرم گردو، به افزوده شدن میزان بیشـتری از کاتیون‌هـای بـازی اسـت کـه بـه خـاک برمی‌گردد (Liu et al, 2012) و بالا بودن میزان pH این بیوچار نسبت به سایر بیوچارها نیز بیانگر این موضوع اسـت (جدول ۲). بیوچار پوست نرم گردو باعث شد تا در بافت لوم شنی ۰/۲۴ و در بافت لوم رسی ۰/۱۳ واحد pH نسبت بـه شاهد در هر بافت افزایش یابد. همچنین کاربرد بیوچارها در خاک لوم شنی در سطح چهار درصـد، بـه افـزایش ۰/۰۱۷ درصدی و در خاک لوم رسی، به کاهش ۰/۰۰۶ درصدی pH نسبت به شاهد منجر شد (شکل ۸).



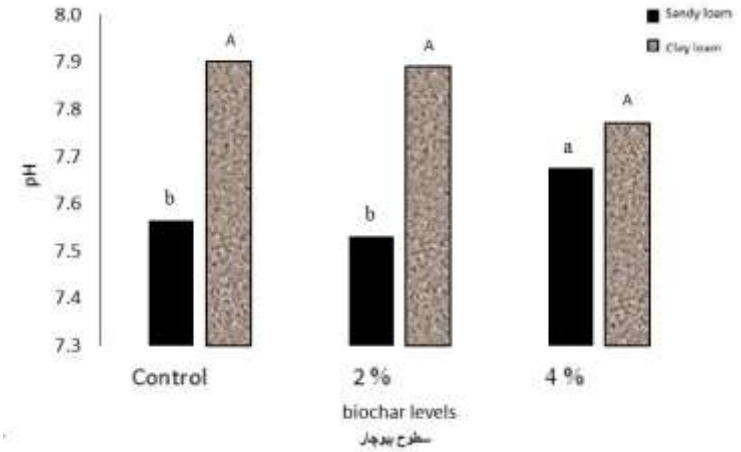
شکل ۶: مقایسهٔ میانگین اثر بیوچارها نسبت به یکدیگر بر pH خاک لوم شنی

ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.



شکل ۷: مقایسهٔ میانگین اثر بیوچارها نسبت به یکدیگر بر pH خاک لوم رسی

ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.



شکل ۸: مقایسهٔ میانگین اثر سطوح بیوچارها نسبت به یکدیگر بر pH در خاک‌های لوم شنی و لوم رسی
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.
(مقایسهٔ میانگین برای هر خاک به‌صورت جداگانه انجام شد)

بررسی اثر بیوچارها بر شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک در دو بافت لوم شنی و لوم رسی

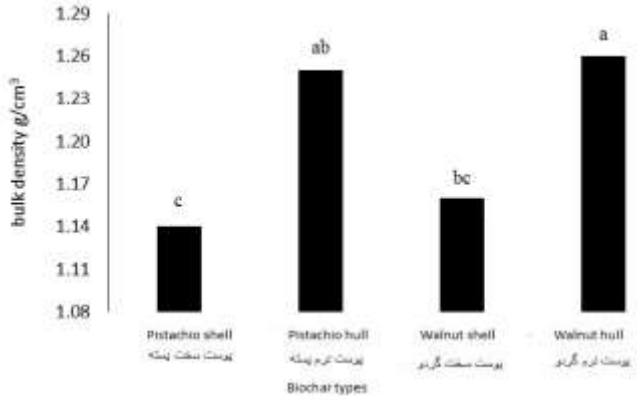
جرم مخصوص ظاهری

نتایج نشان داد که اثرات مستقل سطح و بیوچار، به‌ترتیب در سطح یک و پنج درصد از نظر آماری معنی‌دار شد (جدول ۴). همچنین بر اساس نتایج، تغییر در جرم مخصوص ظاهری خاک، تابعی از نوع بیوچار نبود و هر چهار نوع بیوچار توانستند این شاخص را در خاک کاهش دهند (شکل ۹). افزایش سطوح بیوچار نیز با کاهش جرم مخصوص ظاهری نسبت به شاهد همراه بود (شکل ۱۰).

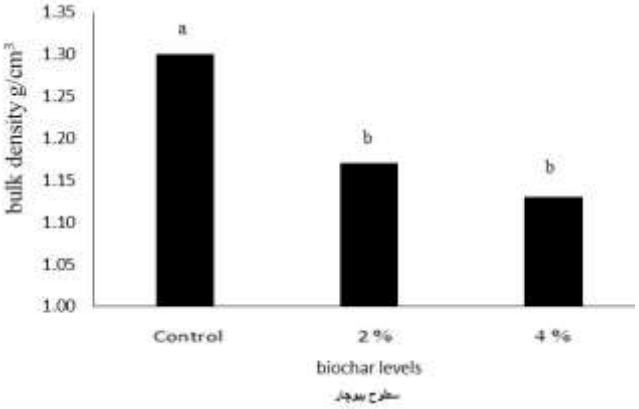
جدول ۴: تجزیه واریانس اثر بیوچارها بر برخی شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک در دو بافت لوم شنی و لوم رسی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		جرم مخصوص ظاهری	پایداری خاکدانه	آب قابل استفاده	شاخص S
بافت	۱	۰/۰۰۰۶^{ns}	۱۱/۴**	۰/۰۸۷**	۰/۱۱۰**
بیوچار	۳	۰/۰۶۶*	۵/۰۴**	۰/۰۰۹*	۰/۰۰۰*
بافت× بیوچار	۳	۰/۰۱۰^{ns}	۱/۶۰**	۰/۰۰۹*	۰/۰۰۰۸*
سطح	۲	۰/۱۸۱**	۸/۱۰**	۰/۰۲۷**	۰/۰۰۲*
بیوچار× سطح	۶	۰/۰۲۷^{ns}	۰/۹۱۲**	۰/۰۰۳^{ns}	۰/۰۰۰۸^{ns}
بافت× سطح	۲	۰/۰۰۷^{ns}	۱/۱۳**	۰/۰۰۴^{ns}	۰/۰۰۰۴^{ns}
بافت× بیوچار× سطح	۶	۰/۰۱۳^{ns}	۲/۴۴**	۰/۰۱۸**	۰/۰۰۰۶^{ns}
خطا	۴۸	۰/۰۲۰	۰/۱۰۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۴
ضریب تغییرات		۰/۲۹۴	۰/۳۱۴	۰/۴۴۱	۰/۱۵۶

**، * و ns به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و فقدان معنی‌داری طبق آزمون دانکن را نشان می‌دهند.



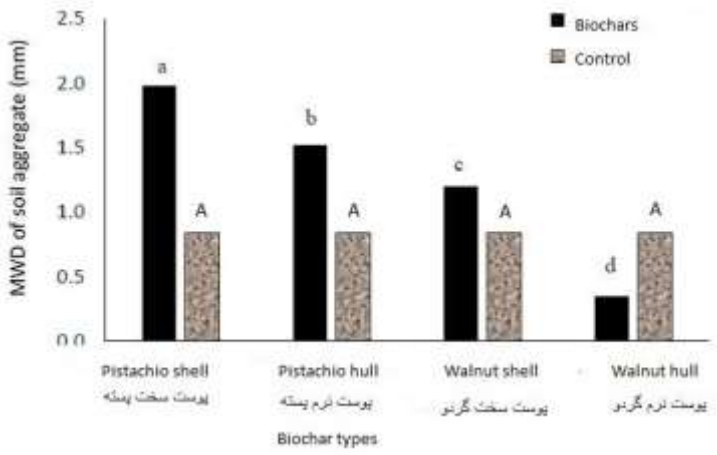
شکل ۹: مقایسهٔ میانگین اثر بیوچارها نسبت به یکدیگر بر جرم مخصوص ظاهری خاک
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.



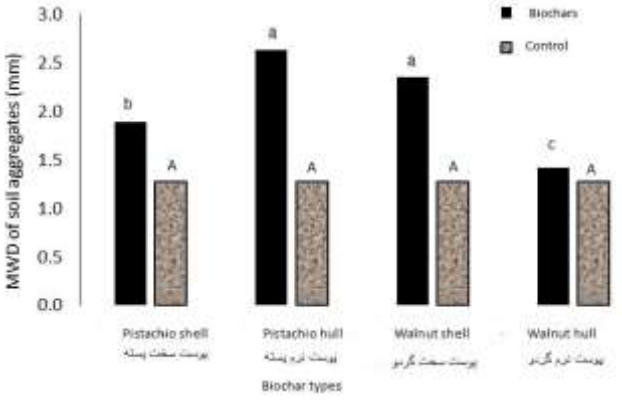
شکل ۱۰: مقایسهٔ میانگین اثر سطوح بیوچارها بر جرم مخصوص ظاهری خاک
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.

پایداری خاکدانه

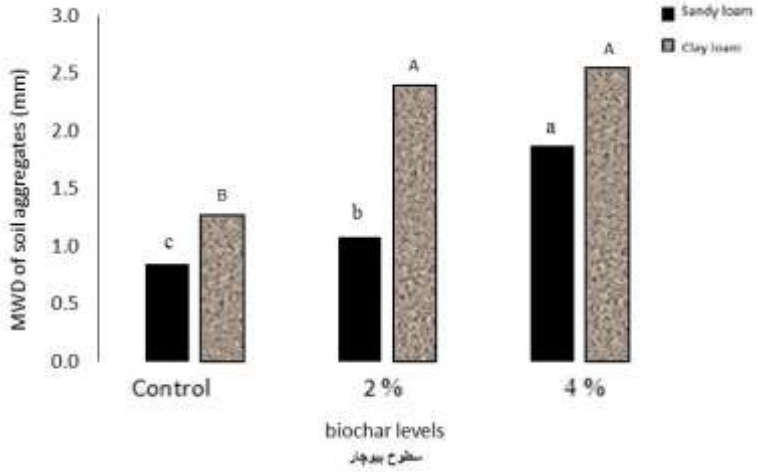
نتایج این بخش از پژوهش نشان داد که همهٔ اثرات متقابل و مستقل بر پایداری خاکدانه، در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). بر اساس نتایج به‌دست آمده، در خاک لوم شنی تمامی انواع بیوچارها به جز پوست نرم گردو، به افزایش پایداری خاکدانه‌ها نسبت به شاهد منجر شد. کاربرد بیوچار حاصل از پوست سخت پسته در بافت لوم شنی نیز بیشترین تأثیر را بر افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها داشت و توانست در سطح دو و چهار درصد نسبت به شاهد، به‌ترتیب ۰/۲۴ و ۱/۰۳ واحد افزایش ایجاد کند (شکل ۱۱). در بافت لوم رسی نیز کاربرد تمامی بیوچارها با افزایش پایداری خاکدانه‌ها نسبت به شاهد همراه بود و بیوچارهای حاصل از پوست نرم پسته و سخت گردو بیشترین تأثیر را در افزایش پایداری خاکدانه‌ها نسبت به شاهد داشت. این بیوچارها توانستند در سطح دو و چهار درصد به‌ترتیب ۱/۱۲ و ۱/۲۸ واحد، نسبت به شاهد افزایش ایجاد کنند (شکل ۱۲). همچنین با افزایش سطوح بیوچار در هر دو نوع خاک، پایداری خاکدانه‌ها نیز بیانگر افزایش بود (شکل ۱۳).



شکل ۱۱: مقایسهٔ میانگین اثر بیوچارها نسبت به یکدیگر بر پایداری خاکدانه در خاک لوم شنی
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.



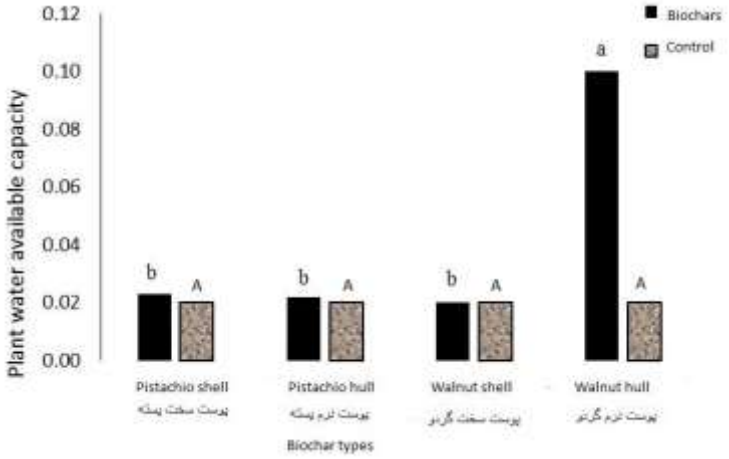
شکل ۱۲: مقایسهٔ میانگین اثر بیوچارها نسبت به یکدیگر بر پایداری خاکدانه در خاک لوم رسی
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.



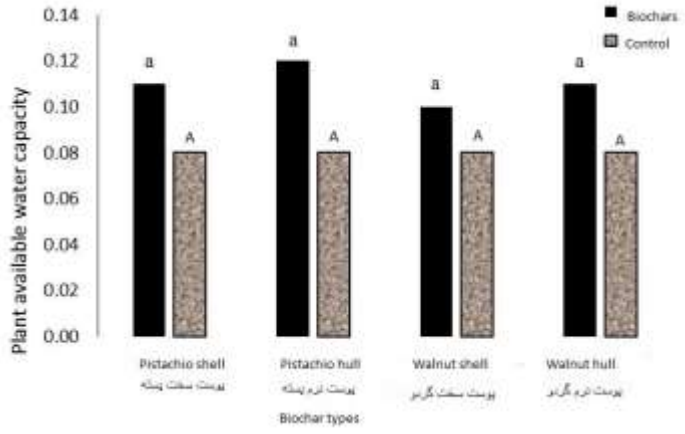
شکل ۱۳: مقایسهٔ میانگین اثر سطوح بیوچارها نسبت به یکدیگر بر پایداری خاکدانه در خاک لوم رسی و لوم شنی
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.
(مقایسهٔ میانگین برای هر خاک به‌صورت جداگانه انجام شد)

ظرفیت آب قابل استفادهٔ گیاه

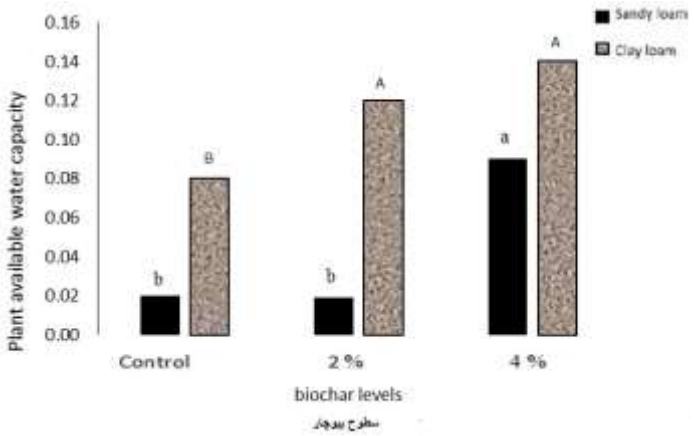
نتایج این بخش از پژوهش نشان داد که اثرات متقابل بافت و بیوچار و اثر سادهٔ بیوچار، در سطح پنج درصد و اثرات مستقل سطح و بافت و اثر متقابل سه‌گانهٔ بافت، سطح و بیوچار، در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). بر اساس نتایج به‌دست آمده، بیوچار حاصل از پوست نرم گردو در افزایش نسبت آب قابل استفادهٔ گیاه در بافت لوم شنی نسبت به شاهد، بیشترین تأثیر را داشت (شکل ۱۴)؛ اما در بافت لوم رسی، تأثیر افزایشی بیوچارها تقریباً یکسان بود (شکل ۱۵). همچنین با افزایش سطوح بیوچار در خاک لوم رسی، نسبت آب قابل استفادهٔ گیاه نسبت به شاهد افزایش یافت. در خاک لوم شنی نیز افزایش معنی‌داری در نسبت آب قابل استفادهٔ گیاه نسبت به شاهد، در سطح چهار درصد بیوچار مشاهده شد (شکل ۱۶).



شکل ۱۴: مقایسهٔ میانگین اثر بیوچارها نسبت به یکدیگر بر ظرفیت آب قابل استفادهٔ گیاه در خاک لوم شنی
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.



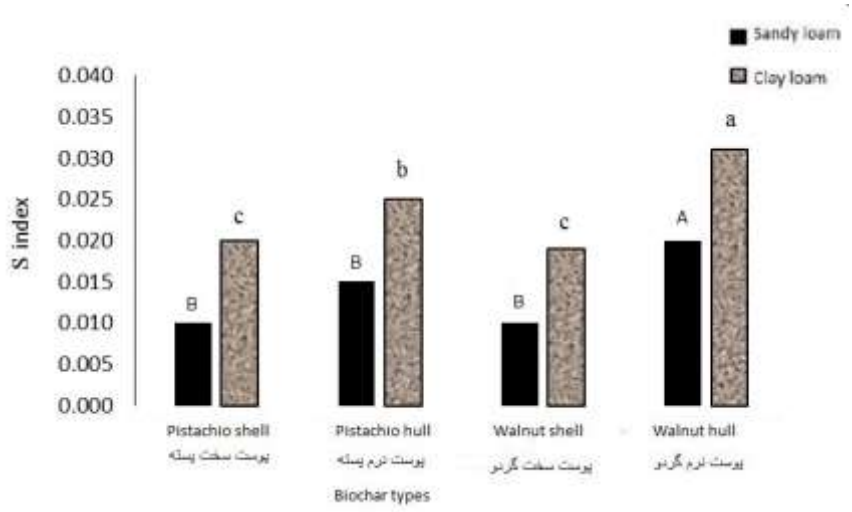
شکل ۱۵: مقایسهٔ میانگین اثر بیوچارها نسبت به یکدیگر بر ظرفیت آب قابل استفادهٔ گیاه در خاک لوم رسی
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.



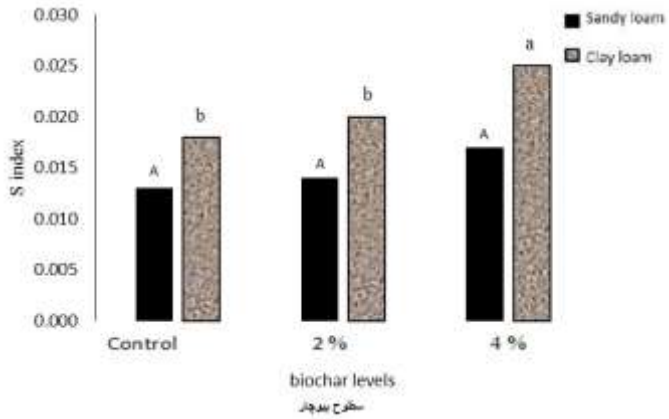
شکل ۱۶: مقایسهٔ میانگین اثر سطوح بیوچارها نسبت به یکدیگر بر ظرفیت آب قابل استفادهٔ گیاه در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.
(مقایسهٔ میانگین برای هر خاک به‌صورت جداگانه انجام شد)

شاخص S

بر اساس نتایج ذکر شده در جدول ۴، اثر سادهٔ بافت در سطح یک درصد و اثرات سادهٔ بیوچار و سطح بیوچار همچنین اثر متقابل بافت و بیوچار، در سطح پنج درصد معنی‌دار شد. همچنین نتایج مقایسهٔ میانگین نشان داد که بیوچار حاصل از پوست نرم گردو، بیشترین تأثیر را در تغییرات شاخص S در هر دو بافت خاک داشت (شکل ۱۷)؛ به‌طوری‌که در خاک لوم شنی، ۰/۰۰۷ و در خاک لوم رسی، ۰/۰۱۷ واحد نسبت به سطح شاهد در هر خاک افزایش مشاهده شد. همچنین با افزایش سطوح بیوچار در خاک لوم رسی، شاخص S در سطح چهار درصد نسبت به شاهد بیشتر و اختلاف معنی‌دار داشت. سطوح بیوچار در خاک لوم شنی نیز تأثیر معنی‌داری بر این شاخص نداشت (شکل ۱۸).



شکل ۱۷: مقایسهٔ میانگین اثر بیوچارها نسبت به یکدیگر بر شاخص S در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.
(مقایسهٔ میانگین برای هر خاک به‌صورت جداگانه انجام شد)



شکل ۱۸: مقایسهٔ میانگین اثر سطوح بیوچارها نسبت به یکدیگر بر شاخص S در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی
ستون‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن است.
(مقایسهٔ میانگین برای هر خاک به‌صورت جداگانه انجام شد)

۵ـ بحث و نتیجه‌گیری

افزایش یا کاهش میزان شوری خاک با اضافه کردن بیوچارها به آن، به‌دلیل وجود میزان متفاوت املاح محلـول در خاک است. عواملی که در این تغییرات نقش دارند شامل نوع مواد اولیه، قابلیت هدایت الکتریکی خود بیوچارها ــ کـه به نوع مادهٔ اولیه برمی‌گردد ــ و میزان کاربرد آنها در خاک است (Chintala et al, 2014). در ایـن راسـتا، Noori و همکاران (2020) پس از کاربرد بیوچار پوست گردو در یک خاک شور و سدیمی گزارش کردند کـه کـاربرد ایـن بیوچار در خاک به افزایش معنی‌دار قابلیت هدایت الکتریکی منجر شد؛ در حالی که کاربرد بیوچار باگاس نیشکر سبب کاهش این ویژگی شد. Zolfi Bavariani و همکاران (2016) در پژوهشی، اثر بیوچار حاصل از کود مرغ را بعـد از طی یک دورهٔ ۱۵۰ روزه، در خاک لوم شنی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که به‌دلیل حل شـدن بـالای نمک‌هـای محلول در بیوچار، قابلیت هدایت الکتریکی خاک افزایش یافت. همچنین نتایج Nabavinia و همکاران (2015) نشـان داد که بیوچار تولید شده از ضایعات دباغی به‌دلیل داشتن مقادیر فراوان کلسیم، منیـزیم و پتاسـیم، هـدایت الکتریکـی خاک را افزایش می‌دهد. از طرفی در راستای نتایج این پژوهش، کاربرد غلظت‌های مختلف بیوچار میگو و بادمجان در همهٔ تیمارها به کاهش معنی‌دار هدایت الکتریکی خاک شنی منجر شد (Moradi et al, 2022).

بیوچار می‌تواند به‌عنوان یک عامل آهکی، pH خاک را افزایش دهد و در نتیجه، بر قابلیت دسترسی عناصر غـذایی در خاک تأثیرگذار باشد. تجمع کاتیون‌ها و تشکیل کربنات‌ها مانند کربنات کلسیم و منیزیم، و غلظت آنهـا در طـول فرایند پیرولیز به آهکی شدن بیوچارها منجر می‌شود (Glaser et al, 2002). در هر حال، باز هم نوع بیوچار می‌تواند بر pH خاک تأثیرات متفاوتی داشته باشد. در این راستا، Noori و همکاران (2020) مشاهده کردند که کـاربرد بیوچـار پوست گردو به افزایش جزیی pH خاک در یک خاک شور و سدیمی منجر شد؛ در حالی که کاربرد بیوچـار باگـاس نیشکر، با کاهش معنی‌دار pH نسبت به شاهد همراه بود. Tryon (1948) در پژوهشی تأثیر بیوچارهای تولیـد شـده از کاه وکلش برنج، کود مرغی، کود گوسفندی و چوب درختان جنگلی را بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌هـای با بافت رسی، لومی و شنی بررسی کرد. وی افزایش pH خاک را در پی افزودن بیوچارهای تولید شده از چوب درختان جنگلی گزارش کرد. وی همچنین نشان داد که pH خاک‌های شنی و لومی در مقایسـه بـا خاک‌هـای رسـی افـزایش

بیشتری داشت و این تفاوت، به ظرفیت بافری بیشتر خاک‌های رسی در مقایسه با خاک‌های شنی برمی‌گردد. مشابه این نتیجه در پژوهش حاضر نیز دیده می‌شود. در پژوهش دیگری، Fathi Gerdelidani و Mirseyed Hosseini (2017) با بررسی اثر کاربرد بیوچار حاصل از باگاس نیشکر به میزان صفر، پانزده و سی تن در هکتار در خاک‌های لوم رسی و شنی گزارش کردند که تغییرات pH در مقایسه با شاهد فاقد معنی‌داری بود. آنها بیان کردند که با کاربرد بیوچار در خاک‌های آهکی به‌دلیل ظرفیت بالای بافری این خاک‌ها، تغییرات محسوسی در pH آنها دیده نمی‌شود؛ در حالی که در پژوهشی دیگر، کاربرد غلظت‌های مختلف بیوچار میگو و بادمجان به افزایش معنی‌داری مقدار pH یک خاک شنی نسبت به شاهد منجر می‌شود (Moradi et al, 2022). به نظر می‌رسد نوع بیوچار و ویژگی‌های خاک از جمله بافت، بر افزایش یا کاهش اسیدیتهٔ خاک تأثیرگذار است.

دلیل کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک را می‌توان به ماهیت متخلخل بیوچار ــ که به ایجاد تغییر در تراکم خاک منجر می‌شود ــ نسبت داد. بیوچار به مرور زمان با ایجاد ساختمان جدیدی در خاک، به افزایش تخلخل آن منجر می‌شود و در نتیجه، جرم معینی از خاک در حجم بیشتری به‌نظر می‌رسد (Głąb et al, 2016). Spokas و همکاران (2015) پژوهشی را روی بیوچار حاصل از خرده چوب‌های درخت کاج و خرده چوب‌های خام همان درخت (زی‌توده) انجام دادند. این پژوهش در سه سطح وزنی صفر، پنج و ده تن بر هکتار، به مدت سه ماه در بافت شنی لومی انجام شد و نتایج نشان داد که صرف‌نظر از نوع ماده، جرم مخصوص ظاهری خاک در هر دو تیمار در سطح ده تن بر هکتار نسبت به شاهد کاهش یافت. همچنین آنها بیان کردند که میزان کاربرد تیمارها تنها شاخص معنی‌دار است (P<۰/۰۵). همچنین در پژوهشی که توسط Obia و همکاران (2016) در کشور زامبیا انجام شد، آنها تأثیر بیوچارهای حاصل از ضایعات چوب ذرت و سبوس برنج را در سه سطح صفر، ۱۷/۵ و ۳۵ تن بر هکتار، بر روی جرم مخصوص ظاهری خاک لوم شنی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که به دلیل ماهیت متخلخل بیوچار ــ که به افزایش تخلخل خاک منجر می‌شود ــ جرم مخصوص ظاهری خاک کاهش یافت. Yazdanpanahi و همکاران (2019) نیز پس از بررسی اثر بیوچار طبیعی و بیوچار کمپوست زبالهٔ شهری بر جرم مخصوص ظاهری یک خاک شنی تحت کشت اسکنبیل گزارش کردند که سطوح مختلف بیوچار، بر وزن مخصوص ظاهری اثر کاهشی معنی‌داری داشت. آنها بیان کردند که بیوچار می‌تواند با تغییر تراکم خاک، به کاهش وزن مخصوص ظاهری آن منجر شود.

به‌نظر می‌رسد با افزودن بیوچارها به خاک، به مرور زمان این مواد توانسته‌اند بین ذرات خاک پیوند برقرار کنند و به ایجاد خاکدانه‌هایی در آن منجر شوند. نتایج پژوهش Moshtagh و همکاران (2022) نیز نشان داد که افزودن بیوچار حاصل از ضایعات بادمجان و میگو، به افزایش معنی‌دار پایداری خاکدانه‌ها می‌انجامد. Abdulwahhab و Seker (2019) نیز پس از افزودن بیوچار آفتابگردان به خاک گزارش کردند که پایداری خاکدانه‌های آن در مقایسه با شاهد، به نحو معنی‌داری افزایش یافت. نتایج یافته‌های Mahmoodi و همکاران (2019) نیز بیانگر تأثیر معنی‌دار کاربرد بیوچار پودر استخوان بر پایداری خاکدانه‌ها در خاک‌های مورد مطالعهٔ آنها بود. Khazaee و همکاران (2008) از بین ویژگی‌های مؤثر بر پایداری ساختمان خاک، بیشترین نقش را به ماده آلی سپس به میزان رس و کربنات کلسیم نسبت دادند. همچنین Cañasveras و همکاران (2010) گزارش کردند که بین میزان رس با میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و درصد خاکدانه‌های درشت در آب، همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. البته باید یادآور شد در مناطقی که میزان

کربن آلی خاک کم باشد، این کربنات‌ها هستند که در ایجاد خاکدانه‌ها مؤثر است (Bronick and Lal, 2005). بیوچار هم به‌عنوان نوعی ماده آلی، برای بهبود ساختمان، حاصلخیزی و به طور کلی اصلاح خاک به‌کار می‌رود (Glaser et al, 2002). Liang و همکاران (2008) نیز نشان دادند که معمولاً بیوچار به‌صورت یک ماده آلی مستقل در خاک وجود ندارد و به شکل دسته‌های کوچکی در ذرات خاک و خاکدانه‌ها دیده می‌شود. Brodowski و همکاران (2006) مشاهده کردند که بخش کوچکی از ذرات بیوچار در محدودهٔ خاکدانه‌های بزرگ خاک ــ بزرگ‌تر از دو میلی‌متر ــ قرار دارند و این ذرات ممکن است به عنوان یک عامل پیوند، در تشکیل خاکدانه مؤثر باشد و آنها را در مقابل تخریب حفظ کند. همچنین بیوچار می‌تواند رشد زی‌تودهٔ ریشهٔ گیاهان را افزایش دهد و از این طریق به خاکدانه‌سازی و پایداری آنها کمک کند (Obia et al, 2016).

با افزودن مواد آلی به خاک، به مرور زمان، میزان رطوبت در نقاط ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم در خاک افزایش می‌یابد و بدین ترتیب، آب قابل استفادهٔ گیاه نیز افزایش می‌یابد. پژوهش Liu و همکاران (2017) نیز افزایش محتوای آب قابل دسترس گیاه را با افزودن بیوچار به خاک نشان داد. همچنین Edeh و همکاران (2020) گزارش کردند که کاربرد بیوچار، نگهداری آب خاک را در خاک‌های شنی افزایش داد. Tryon (1948)، Abel و همکاران (2013) و Ulyett و همکاران (2014) نیز در پژوهش‌هایی متفاوت گزارش کردند که بیوچارهای حاصل از خرده‌های چوب درختان می‌توانند میزان نگهداشت آب را در نقطهٔ پژمردگی دائم افزایش دهند. دلیل این امر، تخلخل بالای این مواد است که در نگهداشت آب در پتانسیل‌های ماتریک بالا قابلیت زیادی دارد. مشابه این نتیجه در این پژوهش نیز دیده می‌شود. همچنین Zeelie (2012) در پژوهشی نشان داد که بیوچار تولید شده از خاک ارهٔ درخت کاج در دمای ۴۵۰ درجهٔ سانتیگراد، می‌تواند به افزایش رطوبت در نقطه پژمردگی دائم در خاک شنی منجر شود. میزان آب قابل دسترس گیاه نیز نقش مهمی در میزان آبیاری آن ایفا می‌کند؛ به نحوی که می‌تواند بر تعداد دور آبیاری تأثیر بگذارد و آن را کاهش دهد. در این میان، عواملی مانند بافت خاک (مهم‌ترین)، خاکدانه‌سازی و مقدار ماده آلی خاک نیز تأثیرگذار است (Baronti et al, 2014). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که با افزودن بیوچار به خاک‌های شنی و لومی، آب قابل استفادهٔ گیاه افزایش می‌یابد که بیانگر تغییر توزیع اندازهٔ منافذ در خاک است. این افزایش می‌تواند به‌علت تأثیر مستقیم بیوچار به‌دلیل تخلخل بالا یا تأثیر نامستقیم آن به‌دلیل خاکدانه‌سازی باشد (Sun et al, 2014). خاک‌های دارای بافت متوسط مانند لوم سیلتی و لوم رسی سیلتی به‌علت داشتن منافذ ریز و ذرات رس و سیلت، در مقایسه با خاک‌های شنی ظرفیت نگهداشت آب بیشتری دارد و از این رو، آب قابل دسترس گیاه بیشتری را نیز می‌توانند داشته باشند. Novak و همکاران (2009) در پژوهشی دریافتند که کاربرد بیوچار تولید شده از علف سوئیچ[1] و پوست نرم بادام زمینی در دمای پانصد درجهٔ سانتی‌گراد در خاک شنی لومی، بعد از یک دورهٔ ۱۲۰ روزه به طور معنی‌داری میزان نگهداشت آب را در خاک افزایش داد. در مقابل، آنها نشان دادند که بیوچارهای تولید شده از پوست سخت گردوی آمریکایی و کود مرغ، در میزان نگه‌داشت آب در خاک تأثیر معنی‌داری نداشت.

طبق تقسیم‌بندی Dexter (2004)، کیفیت فیزیکی خاک به چهار دسته خیلی خوب، خوب، ضعیف و خیلی ضعیف تقسیم می‌شود. تغییرات شاخص S در این پژوهش در هر دو بافت خاک در دستهٔ ضعیف قرار گرفت. Asghari و

[1] Switch Grass

همکاران (2011) نشان دادند که افزودن پلی‌آکریل آمید در یک خاک شنی، به افزایش معنی‌دار شاخص S منجر شد، ولی میزان مصرفی کود دامی، ورمی‌کمپوست و لجن پتروشیمی بر این شاخص تأثیر معنی‌داری نداشت. Esmaeelnejad و همکاران (2016) نیز تأثیر بیوچارهای مختلف را بر خصوصیات خاک بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که پس از گذشت سی روز از انکوباسیون بیوچارهای مختلف با یک خاک لوم شنی، شاخص S به نحو معنی‌داری افزایش یافت. Dokoohaki و همکاران (2017) نیز گزارش کردند که کاربرد بیوچار حاصل از مواد خام بلوط قرمز[1] در یک خاک لوم شنی، به افزایش شاخص S نسبت به شاهد منجر شد. Baygi و Banitalebi (2013) گفتند که شاخص‌های بالاتر از ۰/۰۳۵، بیانگر ساختمانی خوب در خاک است که می‌تواند در افزایش آب قابل استفادهٔ گیاه نقش داشته باشد. شاخص S با چگالی ظاهری خاک، محتوای مواد آلی و ظرفیت رشد ریشه در ارتباط است (Dokoohaki et al, 2017). خاک‌های دارای شاخص S بالا، ظرفیت رشد ریشه‌ای بالایی دارند؛ زیرا شاخص S با تراکم‌پذیری خاک همبستگی دارد (Dexter, 2004).

به طور کلی، نتایج به‌دست آمده از این پژوهش بیانگر این موضوع است که افزایش سطوح بیوچارها، در مقادیر هدایت الکتریکی خاک‌ها تأثیر معنی‌داری نداشت. بیوچارهای حاصل از پوست نرم گردو و پوست سخت پسته، بر میزان pH خاک تأثیر معنی‌داری داشت؛ به نحوی که به‌ترتیب به افزایش و کاهش pH خاک منجر شد. همچنین به مروز زمان با افزودن بیوچارهای مورد استفاده، تخلخل کل و حجم منافذ خاک افزایش و در عین حال، جرم مخصوص ظاهری خاک کاهش یافت. از دیگر اثرات مهم بیوچارهای مورد استفاده، تأثیر مثبت آنها بر خاکدانه‌سازی بود؛ به طوری که نتایج نشان داد بیوچارهای پوست نرم پسته و سخت گردو در خاک لوم رسی و بیوچار پوست سخت پسته در خاک لوم شنی، اثرات مثبت معنی‌داری در این زمینه داشت. این امر می‌تواند در افزایش نفوذ آب و کاهش فرسایش خاک به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک مؤثر واقع شود. همچنین بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، با استفاده از بیوچارهای پوست نرم گردو در خاک لوم شنی، ظرفیت نگهداری آب در خاک افزایش می‌یابد و این به‌واسطهٔ به‌وجود آمدن تخلخل میکروی بیوچارها است. این موضوع می‌تواند راهکار مناسبی به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک باشد. البته باید به این نکته هم توجه داشت که افزایش بیوچار، به افزایش شوری خاک منجر می‌شود؛ پس باید از سطوح مناسبی از این ماده در خاک استفاده شود. از طرفی، بیوچار حاصل از پوست نرم گردو در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی مورد مطالعه، بیشترین مقادیر شاخص S را در بین بیوچارهای مورد استفاده، به همراه آورد. شاخص دکستر به عنوان یکی از شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک، به نحو ویژه‌ای در ظرفیت رشد ریشهٔ گیاهان تأثیر دارد. در نهایت، پیشنهاد می‌شود که اثر ترکیبی این بیوچارها (پوست نرم و سخت هر بیوچار با هم) در خاک بررسی شود تا مشخص گردد که آیا گروه‌های عامل آنها با هم نقش رقابتی دارند، یا مکمل هم هستند.

[1] *Quercus rubra*

منابع

1. Abdulwahhab, Q., & C. Şeker., (2019). Effect of biochar applications on soil aggregation status. International Soil Congress. 17-19 June, Ankara, Turkey.
2. Abel, S.; Peters, A.; Trinks, S.; Schonsky, H.; Facklam, M.; & G. Wessolek, 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil, *Geoderma*, 202, 183-91.
3. Asghari, S.; Abbasi, F.; & M. R. Neyshabouri, 2011. Effects of soil conditioners on physical quality and bromide transport properties in a sandy loam soil, *Biosystems engineering*, 109(1), 90-7.
4. Atkinson, C. J.; Fitzgerald, J. D.; & N. A. Hipps, 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review, *Plant Soil*, 337 (1-2), 1-18.
5. Baronti, S.; Vaccari, F.; Miglietta, F.; Calzolari, C.; Lugato, E.; Orlandini, S.; Pini, R.; Zulian, C.; & L. Genesio, 2014. Impact of biochar application on plant water relations in Vitis vinifera (L.), *European Journal of Agronomy*, 53, 38-44.
6. Beigi Harchegani, H., & G. Banitalebi., (2013). The effect of long-term applicatin of municipal wastewater on soil physical quality indices: a case study in the taqanak farms, shahrekord. Journal of water and soil (agricultural sciences and technology), 27(5), 1046-56. (In persian)
7. Blake, G. R., & K. Hartge., (1986a). Particle density. Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods, 5, 377-82.
8. Blake, G. R., & K. Hartge., (1986b). Bulk density. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods, 5, 363-75.
9. Brodowski, S.; Amelung, W.; Haumaier, L.; Abetz, C.; & W. Zech, 2005. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy, *Geoderma*, 128(1-2), 116-29.
10. Bronick, C., & R. Lal., (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*. 124, 3-22.
11. Cañasveras, J. C.; Barrón, V.; Del Campillo, M.; Torrent, J.; & J. Gómez, 2010. Estimation of aggregate stability indices in Mediterranean soils by diffuse reflectance spectroscopy, *Geoderma*, 158(1-2), 78-84.
12. Chan, K. Y.; Van Zwieten, L.; Meszaros, I.; Downie, A.; & S. Joseph, 2007. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment, *Australian Journal of Soil Research*, 45, 629-634.
13. Chintala, R.; Mollinedo, J.; Schumacher, T. E.; Malo, D. D.; & J. L. Julson, 2014. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(3), 393-404.
14. Dexter, A., 2004. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting, *Geoderma*, 120(3-4), 215-25.
15. Dokoohaki, H.; Miguez, F. E.; Laird, D.; Horton, R.; & A. S. Basso, 2017. Assessing the biochar effects on selected physical properties of a sandy soil: an analytical approach, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(12), 1387-98.
16. Dünisch, O.; Lima, V. C.; Seehann, G.; Donath, J.; Montoia, V. R.; & T. Schwarz, 2007. Retention properties of wood residues and their potential for soil amelioration, *Wood Science and Technology*, 41, 169-89.
17. Edeh, I. G.; Mašek, O.; & W. Buss, 2020. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties–New insights and future research challenges, *Science of the Total Environment*, 714, 136857.

18. Esmaeelnejad, L.; Shorafa, M.; Gorji, M.; & S. M. Hosseini, 2016. Enhancement of physical and hydrological properties of a sandy loam soil via application of different biochar particle sizes during incubation period, *Spanish journal of agricultural research*, 14(2), e1103-e.
19. Fathi Gerdelidani, A.; Mirseyed Hosseini, H.; & M. Farahbakhsh, 2016. Effect of spent mushroom compost (SMC) and sugar cane bagasse biochar on availability and fractions of inorganic phosphorus in a calcareous soil, Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization (Scientific Journal of Agriculture), 39(1), 127-44. (In Persian)
20. Fawzy, S.; Osman, A. I.; Yang, H.; Doran, J.; & D. W. Rooney, 2021. Industrial biochar systems for atmospheric carbon removal: a review, *Environmental Chemistry Letters*, 19, 3023-55.
21. Gee, G. W., & J. M. Bauder., (1986). Partical-size analysis. In Methods of Soil Analysis, Part 1. *Physical and Mineralogical Methods*. 383-411.
22. Głąb, T.; Palmowska, J.; Zaleski, T.; & K. Gondek, 2016. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil, *Geoderma*, 281, 11-20.
23. Glaser, B.; Lehmann, J.; & 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, 219-30.
24. Herath, H .M. S. K.; Camps-Arbestain, M.; & 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. Jackson, R. B.; Lajtha, K.; Crow, S. E.; Hugelius, G.; Kramer, M. G.; & G. Piñeiro, 2017. The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls, *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 48, 419-45.
26. Karlen, D. L.; Mausbach, M.; Doran, J. W.; Cline, R.; Harris, R.; & G. Schuman, 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial), *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10.
27. Khazaee, A.; Mosaddeghi, M.; & A. Mahboubi, 2008. Structural stability assessment using wet sieving method and its relations with some intrinsic properties in 21 soil series from Hamadan province, *Journal of Agricultural Research (Water, Soil and Plants in Agriculture)*, 8(1),171-182. (In Persian)
28. Liang, B.; Lehmann, J.; Solomon, D.; Sohi, S.; Thies, J. E.; Skjemstad, J. O.; Luizao, F. J.; Engelhard, M. H.; Neves, E. G.; & S. Wirick, 2008. Stability of biomass-derived black carbon in soils, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(24), 6069-78.
29. Libra, J. A.; Kammann Ro, K. S.; Funke, C.; Berge, A.; & N. D. Neubauer, 2011. Hydrothermal Carbonization of Biomass Residuals: A Comparative Review of the Chemistry, Processes and Applications of Wet and Dry Pyrolysis, *Biofuels*, 2, 89-124.
30. Liu, J.; Schulz, H.; Brandl, S.; Miehtke, H.; Huwe, B.; & B. Glaser, 2012. Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(5), 698-707.
31. Liu, Z.; Dugan, B.; Masiello, C. A.; & H. M. Gonnermann, 2017. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties, *Plos one*, 12(6), e0179079.
32. Lu, R., 1999. Analytical methods of soil agrochemistry, China Agricultural Science and Technology Press, Beijing: 85-96.
33. Mahmoudi, F.; Sheklabadi, M.; & S. Ferasat, 2019. The effect of bone powder Biochar on the distribution and stability of aggregates in acidic and calcareous soils, 16th Iranian Soil Science Congress, University of Zanjan, August 27-29. (In Persian)
34. Masciandaro, G.; Macci, C.; Peruzzi, E.; Ceccanti, B.; & S. Doni, 2013. Organic matter-microorganism plant in soil bioremediation: a synergic approach, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 12, 399-419.

35. Moradi, N.; Moshtagh, R.; & H. Gholami, 2022. The effect of applying two types of agricultural and marine waste biochar on some properties of a sandy soil, *Desert Management*. (In Persian)
36. Moshtagh, R.; Moradi, N.; & H. Gholami, 2022. Investigation of the role of biochar from eggplant plant residues and shrimp waste on some soil stability characteristics, *Environmental Erosion Research*, 12(1), 1-17. (In Persian)
37. Nabavinia, F.; Emami, H.; Astaraee, A.; & A. Lakzian, 2015. Effect of tannery wastes and biochar on soil chemical and physicochemical properties and growth traits of radish, *International Agrophysics*, 29(3), 333-339.
38. Noori, Z.; Delavar, M.; & Y. Safari, 2021. Applying Biochar and Mineral Amendments to Remediate the Chemical Properties of a Saline-Sodic Soil, *JWSS-Isfahan University of Technology*, 24(4), 21-36. (In Persian)
39. Novak, J. M.; Lima, I.; Xing, B.; Gaskin, J. W.; Steiner, C.; Das, K.; Ahmedna, M.; Rehrah, D.; Watts, D. W.; & W. J. Busscher, 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand, *Annals of environmental science*, 3(2), 195-206.
40. Obia, A.; Mulder, J.; Martinsen, V.; Cornelissen, G.; & 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. Page, A.; Miller, R. H.; & D. R. keeney, 1982. Methods of Soil Analysis" Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Amer. Soc. of Agron., Madison Wisconsin. USA.
42. Rodríguez, A. R.; Arbelo, C. D.; Guerra, J. A.; Mora, J. L.; Notario, J. S.; & C. M. Armas, 2006. Organic carbon stocks and soil erodibility in Canary Islands Andosols, *Catena*, 66(3), 228-235.
43. Schollenberger, C., & R. Simon., (1945). Determination of exchange capacity and exchangeable bases in soil-ammonium acetate method. *Soil science*. 59(1), 13-24.
44. Shackley, S.; Carter, S.; Knowles, T.; Middelink, E.; Haefele, S.; Sohi, S.; Cross, A.; & S. Haszeldine, 2012. Sustainable gasification–biochar systems? A case-study of rice-husk gasification in Cambodia, Part I: Context, chemical properties, environmental and health and safety issues, *Energy Policy*, 42, 49-58.
45. Singh, B.; Singh, B. P.; & A. L. Cowie, 2010. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment, *Australian Journal of Soil Research*, 48, 516-525.
46. Spokas, K.; Weis, R.; Feyereisen, G.; Watts, D.; Novak, J.; Lim, T.; & J. Ippolito, editors, 2015. Biomass or biochar–which is better at improving soil hydraulic properties? III International Symposium on Organic Matter Management and Compost Use in Horticulture, 1146, 235-242.
47. Sun, J.; Lian, F.; Liu, Z.; Zhu, L.; & Z. Song, 2014. Biochars derived from various crop straws: characterization and Cd (II) removal potential, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 106, 226-31.
48. Tryon, E. H., 1948. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils, *Ecological Monographs*, 18(1), 81-115.
49. Ulyett, J.; Sakrabani, R.; Kibblewhite, M.; & M. Hann, 2014. Impact of biochar addition on water retention, nitrification and carbon dioxide evolution from two sandy loam soils, *European Journal of Soil Science*, 65(1), 96-104.
50. Uzoma, K. C.; Inoue, M.; Andry, H.; Zahoor, A.; & E. Nishihara, 2011. Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention, *The Journal of Food, Agriculture and Environment*, 9, 1137-43.
51. Van Genuchten, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-8.

52. Yazdanpanahi, A.; Ahmadaali, K.; Zare, S.; & M. Jafari, 2019. The effect of two different biochars on the soil physical properties affecting irrigation management in desert regions, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), 965-75. (In Persian)
53. Zeelie, A., 2012. Effect of biochar on selected soil physical properties of sandy soil with low agricultural suitability, (Master Thesis) Stellenbosch University, Stellenbosch, 145.
54. Zolfi Bavariani, M.; Ronaghi, A.; Karimian, N.; Ghasemi, R.; & J. Yasrebi, 2016. Effect of poultry manure derived biochars at different temperatures on chemical properties of a calcareous soil, *Journal of Water and Soil Science*, 20(75), 73-86. (In Persian)

Effects of Biochar Derived from Various Feedstock Sources on some Physical and Chemical Properties of Soil

Hosein Shekofteh [1]: *Associate Professor, Department of Soil Science, University of Jiroft*
Azadeh Nabizadeh Rafsanjani**:** *M.Sc. of Soil Sciences, Vali-e-Asr University of Rafsanjan*
Ghobad Jalali**:** *Assistant Professor, Department of Soil Science, University of Jiroft*

Article History (Received: 21/10/2022 Accepted: 29/07/2023)

Extended abstract

1- Introduction

Organic matter is one of the factors affecting soil fertility and quality. The presence of organic matters increases the stability of aggregate, increases water retention in soil, reduces bulk density and thus reduces soil erosion. Biochar is one of these organic matters which is a carbon-containing and porous solid produced by the chemical heating of organic matter in an oxygen-free atmosphere. It has good physicochemical characteristics for long-term storage of carbon and its preservation in the environment. Different types of raw materials such as plant residues (rice bran, soybean forage, and cotton residues), fertilizers and wood waste (sawdust) are used to produce biochar. The presence of this matter in the soil increases fertility, reduces climate change, reduces nutrient leaching from the soil, increases the soil moisture retention and increases the cation exchange capacity, resulting in increased soil quality. Given the importance of biochar and its role in improving soil quality indices, the present study was conducted with the aim of investigating the effect of different levels of biochar prepared from pistachio and walnut hulls and shells on some physical and chemical indicators of soil.

2- Methodology

The effect of four types of biochar prepared from hull and shell of pistachio and walnut, at three levels (zero, two and four percent by weight) on two soils with sandy loam and clay loam textures and with three replications were examined in a completely randomized factorial design. To produce biochar, pistachio and walnut hulls and shells were collected from pistachio and walnut orchards in Iran-Kerman Province-Rafsanjan region. These materials were converted to biochar under pyrolysis conditions. The temperature used in this process was 400 C° and the conversion time of raw materials to biochar was four to five hours. Particle size selection was different according to different articles and in this study; therefore, a particle size smaller than 45 meshes was selected. Biochar (at the mentioned levels) was added to five kilograms of soil and poured into pots. The samples remained intact for four months. During the period, the moisture content of the samples was maintained within the field capacity. At the end of the period, the soil was sampled and the physical and chemical characteristics of the soil were examined.

3- Results

The results showed that with increasing the levels of biochar, no significant effect was observed on the electrical conductivity of soils. In relation to the changes in pH, the effects of the biochar obtained from the hull of walnut and shell of pistachio were significant, so that the application of the first increased and the second decreased the soil pH in a significant manner. On the other hand, after adding biochar, the soil bulk density decreased. Furthermore, the application of the biochar obtained from the hull of pistachio and shell of walnut in clay loam soil and that of shell of pistachio in sandy

[1] **Corresponding Author: h.shekofteh@ujiroft.ac.ir**

loam soil had significant positive effects on aggregation. Moreover, the use of the biochar obtained from the hull of walnut increased the soil water holding capacity in sandy loam soil. Finally, in both clay loam and sandy loam soils, the biochar obtained from the hull of walnut resulted in the highest values of S index among the used biochar types.

4- Discussion & Conclusions

In general, the results of this study mainly indicate the positive effects of the use of biochar on soil properties, and it seems that the amount of their impact is a function of the type of biochar and soil texture. Also, based on the results of this study, using walnut hull biochar in sandy loam soil increases the water retention capacity of the soil, and this is due to the micro porosity of biochar. This can be a good solution, especially in arid and semi-arid regions. However, it should be noted that increasing biochar level leads to increased soil salinity, so appropriate levels of this material in the soil should be used. Also, the biochar produced from the walnut hull in both clay loam and sandy loam soils yielded the highest values of S index among the biochar types used. Dexter index, as one of the indices of physical quality of soil, has a special effect on root growth capacity of plants. Finally, it is recommended that the combined effect of these biochar types (hull and shell of each biochar together) be investigated in the soil to determine whether their functional groups compete with each other or complement each other.

Key Words: Soil texture, biochar, soil aggregation, S index, pH.