



Effect of Type, Particle Size and Application Rate of Biochar on Some Physical Properties in a Silty Clay Loam Soil

Abbas Yekzaban¹, Ali Akbar Moosavi^{2✉}, Abdolmajid Sameni³, Mahrooz Rezaei⁴

1. Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: a.yekzaban@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: aamousavi@gmail.com

3. Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: majid.baba@gmail.com

4. Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, Email: mahrooz.rezaei@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history:</p> <p>Received: July. 17, 2022</p> <p>Revised: Sep. 23, 2022</p> <p>Accepted: Nov. 19, 2022</p> <p>Published online: Dec. 22, 2022</p> <p>Keywords: Aggregate stability, Penetration resistance, Shear strength, Soil Amendment</p>	<p>Biochar application has been proposed as a suitable amendment for soil properties to sustainable agriculture. However, its effect depends on biochar application and soil properties. The purpose of this study was to investigate the sole and combined effects of different sources, rates and particle size of biochar on soil bulk density, aggregate stability, penetration resistance and shear strength in a silty clay loam soil. Palm leaf and lemon peel biochar prepared at a pyrolysis temperature of 500°C with three particle sizes 2–4, 0.8–2 and smaller than 0.8 mm, mixed in the soil at application rates of 0, 0.5, 1, 2 and 4 % (by weight). After 15 months (2019 to 2020) incubation at standard condition in research glasshouse of faculty of agriculture Shiraz University, soil properties analyzed by standard methods. In general, the applied biochar decreased soil bulk density, penetration resistance, and shear strength and increased aggregate stability significantly, as compared to the control. Palm leaf biochar played better roles in improving soil properties as compared to lemon peel biochar. On average, by increasing biochar rates to 4%, the soil bulk density, penetration resistance and shear strength decreased by 14.5, 85 and 59.8% respectively and the aggregate stability increased by 50.5%. The greatest effect of biochar was obtained at particle size smaller than 0.8 mm for aggregate stability and penetration resistance. Bulk density and tension strength of the soil did not considerably change using different particle size of biochar. Base on the results, improvement in soil physical properties can be accomplished by application of appropriate particle size and rate of different sources of biochar.</p>

Cite this article: Yekzaban, A., Moosavi, A. A., Sameni, A., & Rezaei, M., (2022). Effect of Type, Particle Size and Application Rate of Biochar on Some Physical Properties in a Silty Clay Loam Soil, Iranian Journal of Soil and Water Research, 53 (10), 2399- 2412. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345908.669320>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345908.669320>

اثر نوع، اندازه ذرات و سطوح کاربرد بیوپچار بر برخی ویژگی‌های فیزیکی در یک خاک لوم رسی سیلتی

عباس یکزبان^۱، سید علی اکبر موسوی^۲، عبدالمجید ثامنی^۳، مهروز رضایی^۴۱. بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ایمیل: a.yekzaban@gmail.com۲. نویسنده مسئول، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ایمیل: amousavi@gmail.com۳. بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ایمیل: majid.baba@gmail.com۴. بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ایمیل: mahrooz.rezaei@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	کاربرد بیوپچار به عنوان یک روش اصلاح ویژگی‌های خاک در راستای کشاورزی پایدار پیشنهاد شده است. البته میزان این تاثیر به ویژگی‌های خاک و بیوپچار کاربردی بستگی دارد. هدف از این مطالعه بررسی اثرات منفرد و متقابل منابع، مقادیر و اندازه ذرات بیوپچار بر جرم ویژه ظاهری خاک، پایداری خاکدانه‌ها، مقاومت نفوذی و مقاومت برشی در یک خاک لوم رسی سیلتی بود. بدین منظور بیوپچار تهیه شده از گرماکافت برگ نخل و تقاله لیموترش در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در سه کلاس اندازه ذرات ۲-۴، ۲-۸ و ۰/۸ میلی‌متر با نسبت‌های ۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی با خاک مخلوط شدند. پس از ۱۵ ماه انکوباسیون (۱۳۹۹-۱۳۹۸) در شرایط استاندارد در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، ویژگی‌های مذکور با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند. به‌طور کلی بیوپچار سبب کاهش معنی‌دار ($P < 0/01$) جرم ویژه ظاهری خاک، مقاومت نفوذی و مقاومت برشی و افزایش معنی‌دار پایداری خاکدانه‌ها در مقایسه با شاهد شد. بیوپچار برگ نخل در مقایسه با بیوپچار تقاله لیمو از نظر بهبود ویژگی‌های خاک، عملکرد بهتری داشت. به‌طور میانگین با افزایش سطوح بیوپچار به ۴ درصد، جرم ویژه ظاهری ۱۴/۵ درصد، مقاومت نفوذی ۸۵ درصد و مقاومت برشی ۵۹/۸ درصد کاهش و پایداری خاکدانه‌ها ۵۰/۵ درصد افزایش یافت. بیش‌ترین تاثیر بیوپچار بر پایداری خاکدانه‌ها و مقاومت فروری با ذرات بیوپچار کوچک‌تر از ۰/۸ میلی‌متر بدست آمد. با تغییر اندازه ذرات بیوپچار، تغییرات قابل توجهی در جرم ویژه ظاهری و مقاومت برشی ایجاد نشد. براساس نتایج به‌دست آمده، می‌توان با انتخاب اندازه ذرات و سطوح کاربرد مناسب از هر نوع منبع بیوپچار، بهترین عملکرد در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک را بدست آورد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۲۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۷/۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۲۸	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۰/۱	
واژه‌های کلیدی: اصلاح کننده خاک، پایداری خاکدانه‌ها، مقاومت برشی، مقاومت فشاری.	

استناد: یکزبان؛ عباس، موسوی؛ سیدعلی اکبر، ثامنی؛ عبدالمجید، رضایی؛ مهروز، (۱۴۰۱). اثر نوع، اندازه ذرات و سطوح کاربرد بیوپچار بر برخی ویژگی‌های فیزیکی در یک خاک لوم رسی سیلتی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱۰)، ۲۴۱۲-۲۳۹۹. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345908.669320>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345908.669320>

مقدمه

ویژگی‌های فیزیکی خاک نقش مهمی بر عملکرد گیاهان دارند. شرایط فیزیکی بهینه خاک سبب بهره‌وری پایدار و افزایش راندمان تولید محصولات کشاورزی می‌شود (Yang et al., 2021). کاربرد زیاد کودهای شیمیایی با فعالیت‌های بی‌رویه خاک‌ورزی سبب تخریب خاک می‌شود (Negis et al., 2020). تخریب خاک، جرم ویژه ظاهری و مقاومت^۱ فروری را افزایش می‌دهد و با کاهش نفوذپذیری آب در خاک، ظرفیت نگه‌داشت آب و تخلخل کل خاک، سبب تضعیف رشد گیاهان می‌شود (Riahi et al., 2018). بنابراین پایش تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک به همراه ویژگی‌های شیمیایی خاک ضروری می‌باشد (Horak et al., 2019). همچنین کاربرد اصلاح‌کننده مناسب در خاک برای بهبود ویژگی‌های خاک امری رایج می‌باشد (Alkhasha et al., 2018). از متداول‌ترین اصلاح‌کننده‌های خاک می‌توان به شکل‌های مختلف مواد آلی هم‌چون بقایای تازه گیاهی، کود حیوانی، بقایای آلی کمپوست شده و بیوجار^۲ اشاره کرد (Bhatt et al., 2016)، که ضمن تامین بخشی از عناصر غذایی مورد نیاز برای رشد گیاهان، سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و بیوشیمیایی خاک می‌شوند (Rahim et al., 2019). بیوجار ترکیب غنی از کربن آلی است، که از گرماکافت مواد آلی در دمای زیاد در شرایط بدون اکسیژن تولید می‌شود (Saffari et al., 2021). مواد اولیه برای تولید بیوجار می‌تواند از بقایای چوبی، ضایعات آلی و صنعتی (کود دامی و لجن) و بقایای گیاهی باشد (Razzaghi et al., 2019). درجه حرارت و مدت زمان گرماکافت، نرخ حرارت دادن و نوع مواد اولیه، ویژگی‌های بیوجار را تعیین می‌کنند (Lehman and Joseph, 2015). بیوجار نسبت به سایر ترکیبات آلی مقاوم بوده و سالیان طولانی پایدار می‌ماند. بنابراین اثرات بالقوه بیوشیمیایی و فیزیکی بیوجار، طولانی مدت در خاک می‌ماند (Atkinson et al., 2010; Castellini et al., 2015). بیش‌ترین تاثیر بیوجار در خاک‌های اسیدی، تخریب شده، با ماده آلی کم و درشت بافت می‌باشد (Novak et al., 2012; Crane-Droesch et al., 2013)، که می‌تواند ناشی از افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، افزایش مواد آلی و تغییر در ساختمان خاک باشد (Liu et al., 2012). عمده پژوهش‌های انجام شده به بررسی ویژگی‌های شیمیایی بیوجار در خاک پرداخته و توجه کم‌تری به جنبه‌های فیزیکی خاک شده، از طرفی با توجه به ماهیت متفاوت بیوجارهای تولید شده از منظر مواد اولیه، شرایط تولید آن، شرایط ذاتی ماتریکس خاک و مدت زمان اثرگذاری در خاک، نتایج در زمینه ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک بسیار متفاوت و متناقض می‌باشد. به عنوان نمونه اثر بیوجار بر جرم ویژه ظاهری (Singh et al., 2020; Tokov et al., 2022)، پایداری خاکدانه‌ها (Batista et al., 2018; Pituello et al., 2018; Xue et al., 2022) و مقاومت نفوذی و مقاومت برشی^۳ (Ahmed et al., 2017; Goyal et al., 2022; Ma et al., 2022; Wani et al., 2022) بررسی شده است. به بیان کلی‌تر و بر اساس نتایج یک فراتحلیل، گزارش شد که کاربرد بیوجار به طور متوسط سبب کاهش جرم ویژه ظاهری خاک‌ها از ۳ الی ۶۴ درصد، افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به عنوان شاخص پایداری خاکدانه‌ها از ۴ الی ۵۸ درصد و کاهش یا عدم تاثیر معنی‌دار بیوجار بر مقاومت نفوذی و برشی شده است (Blanco-Canqui, 2017). در اکثر این پژوهش‌ها به تفاوت در نوع مواد اولیه، اندازه ذرات بیوجار و برهم‌کنش‌های آن‌ها کم‌تر توجه شده و عموماً اثر مقادیر مختلف بیوجار بررسی شده است (Kumar et al., 2021). لذا بررسی هم‌زمان اثر منابع، اندازه ذرات و سطوح بیوجار می‌تواند در تعیین شرایط بهینه خاک موثر باشد. از طرفی گستردگی عوامل تاثیرگذار در تولید بیوجار سبب شده هر بیوجار حتی با مواد اولیه یکسان، ولی در دما و زمان گرماکافت متفاوت، ویژگی‌های منحصر به فرد خود را داشته و به دلیل این تفاوت‌ها می‌تواند اثرات و واکنش‌های متفاوت و متناقضی در خاک داشته باشند. علاوه بر آن خاک محیطی پویا است و برهم‌کنش بیوجار و خاک می‌تواند بسیار پیچیده و متفاوت باشد (De Jesus Duarte et al., 2019). لذا کمی‌سازی اثرات کاربرد اشکال مختلف بیوجار در کشاورزی پیشرفته ضروری به نظر می‌رسد. بر همین اساس پژوهش حاضر با هدف بررسی و مقایسه اثر منابع، سطوح و اندازه ذرات بیوجار به عنوان ماده اصلاح‌کننده زیستی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل جرم ویژه ظاهری، پایداری خاکدانه‌ها، مقاومت نفوذی و مقاومت برشی در یک خاک لوم رسی سیلتی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه بخش علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز به مدت ۱۵ ماه از آذر ۱۳۹۸ لغایت اسفند ۱۳۹۹ انجام شد.

^۱-Penetration Resistance

^۲-Biochar

^۳-Shear strength

مراحل آماده‌سازی تیمارها، آزمایش‌ها و آنالیزها

پژوهش حاضر به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت گلدانی و با سه تکرار انجام شد. بیوپارهای مورد استفاده در آزمایش شامل دو نوع بیوپار بقایای گیاهی حاصل از هرس برگ درختان نخل و پوست حاصل از آبیگری و فرآوری لیمو ترش (تفاله لیمو ترش) بوده که هر دو در استان فارس به عنوان بقایای مازاد حاصل از فرآیندهای مرتبط با کشاورزی یافت می‌شوند. هرکدام از این دو نوع بیوپار به وسیله الک به سه کلاس اندازه ذرات کوچک‌تر از $0/8$ میلی‌متر، $0/8$ تا 2 میلی‌متر و 2 تا 4 میلی‌متر تفکیک شده و از هر کدام به نسبت‌های $0/5$ ، 1 ، 2 و 4 درصد وزنی به خاک اضافه شد. (جدول ۱). مقادیر سطوح انتخابی و تعیین کلاس اندازه ذرات با بررسی مقالات انتخاب شد. اندازه ذرات نیز به گونه‌ای انتخاب شد که علاوه بر داشتن حداکثر بازدهی از منظر جنبه‌های بیوشیمیایی خاک، بتوان نتایج تحقیق را در مقیاس مزرعه در کشاورزی به کار برد. خاک با بافت لوم رسی سیلتی از عمق 25 سانتی‌متری و از سری دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز با مختصات طول جغرافیایی 52 درجه و 33 دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی 29 درجه و 36 دقیقه تهیه شد. نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک شده و از الک 2 میلی‌متر عبور داده شدند. برای نمونه اولیه خاک برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی معمول با استفاده از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد (جدول ۲). برای تهیه بیوپارها، پس از شستن و هوا خشک نمودن بقایای اولیه به منظور همگن‌سازی بقایا، ابتدا به ذرات کوچک‌تر خرد شده و از الک درشت 20 میلی‌متری عبور داده شدند تا توزیع یکنواخت ایجاد شود (به منظور کاهش خطای گرم‌کافت). سپس درون ظروف درب‌دار فلزی ریخته شد و برای ایجاد شرایط کم یا بدون اکسیژن چندین شمع درون کوره الکتریکی و داخل ظروف فلزی روشن شد تا سطح اکسیژن درون کوره و ظروف به حداقل رسیده و شرایط برای انجام فرآیند گرم‌کافت آماده شود. بقایا به مدت 3 ساعت با نرخ افزایش دمای 3 درجه سلسیوس در دقیقه تا دمای 500 درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد (Liang *et al.*, 2016). برخی ویژگی‌های بیوپار هم‌چون میزان کربن آلی، نیتروژن و هیدروژن با دستگاه CHNS Analyser مدل (1455vp LEO)، قابلیت هدایت الکتریکی با هدایت‌سنج الکتریکی و پهاش با دستگاه پهاش‌متر اندازه‌گیری شد (جدول ۳). در نهایت 4 کیلوگرم از خاک توزین شده و با نسبت‌های وزنی مورد اشاره از سه کلاس اندازه ذرات، برای هر کدام از انواع بیوپار به طور یکنواخت با خاک مخلوط شد و به گلدان‌های پلاستیکی با قطر بیرونی و ارتفاع به ترتیب 25 و 35 سانتی‌متر و با وزن تقریبی 250 گرم منتقل شدند. با توجه به اینکه شرایط محیطی (نور، دما و رطوبت) در تمام فضای گلخانه یکسان بود با این حال، به منظور به حداقل رساندن خطای آزمایش، گلدان‌ها در گلخانه به صورت کاملاً تصادفی چیده شدند. سپس به مدت 15 ماه و تا حد 70 الی 80 درصد رطوبت ظرفیت مزرعه (که قبلاً با استفاده از صفحات فشاری تعیین شده بود) به طور منظم آبیاری شد. در پایان مدت آزمایش (15 ماه)، ویژگی‌های نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شدند.

جرم ویژه ظاهری به روش کلوخه و پارافین (Blake, 1965) اندازه‌گیری شد. ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها، بر مبنای توزیع اندازه خاکدانه‌های مرطوب با روش الک‌تر تعیین گردید. (Kemper and Rosenau, 1986). مقاومت فروری در خاک به وسیله دستگاه نفوذسنج جیبی (ELE international 29- 3729, Soiltest Inc.) با میله باریک استوانه‌ای شکل به قطر 6 میلی‌متر و طول $7/5$ سانتی‌متر در سه تکرار برای هر گلدان و در شرایط رطوبت ظرفیت زراعی اندازه‌گیری شد (Gavili *et al.*, 2018). برای اندازه‌گیری مقاومت برشی لایه روئین خاک از دستگاه برش پره‌ای مدل SO843 در رطوبت ظرفیت زراعی استفاده شد. (Khosravani *et al.*, 2021). برای تعیین مقاومت فروری و برشی خاک در رطوبت ظرفیت مزرعه ابتدا برای هر نمونه این پارامترها در روزهای مختلف با رطوبت خاک متفاوت و همراه با رطوبت خاک اندازه‌گیری شد. در نهایت با رسم نمودار رطوبت و مقاومت فروری و هم‌چنین نمودار رطوبت و مقاومت برشی، مقادیر مقاومت فروری و مقاومت برشی در رطوبت ظرفیت مزرعه از نمودار مربوطه استخراج شد.

تجزیه و تحلیل آماری نتایج به منظور بررسی میزان تاثیرگذاری تیمارها بر ویژگی‌های فیزیکی مورد مطالعه خاک با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS انجام شد. میانگین مربوط به اثر هر یک از تیمارها به صورت جداگانه و هم‌چنین برهم‌کنش اثرات تیمارهای مورد بررسی با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان 5 درصد ($p < 0.05$) مقایسه شد.

نتایج و بحث

جرم ویژه ظاهری خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی کاربرد منابع، سطوح و اندازه ذرات بیوپار بر جرم ویژه ظاهری خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴).

جدول ۱- مشخصات تیمارهای استفاده شده در این مطالعه

تیمار	حروف اختصاری	زیر کلاس	شرح حروف اختصاری
منابع بیوپچار	NL	N	بیوپچار برگ نخل
		L	بیوپچار تفاله لیموترش
سطوح بیوپچار	T	T1	سطح صفر درصد وزنی بیوپچار (شاهد)
		T2	سطح ۰/۵ درصد وزنی بیوپچار
		T3	سطح ۱ درصد وزنی بیوپچار
		T4	سطح ۲ درصد وزنی بیوپچار
		T5	سطح ۴ درصد وزنی بیوپچار
کلاس اندازه ذرات بیوپچار	P	P1	کلاس اندازه ذرات بیوپچار ۴ - ۲ میلی‌متر
		P2	کلاس اندازه ذرات بیوپچار ۲ - ۰/۸ میلی‌متر
		P3	کلاس اندازه ذرات بیوپچار کوچک‌تر از ۰/۸ میلی‌متر

جدول ۲- برخی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

ویژگی خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	جرم ویژه ظاهری (g cm ⁻³)	قابلیت هدایت الکتریکی (dS m ⁻¹)	پهش	ماده آلی (%)	ظرفیت زراعی (%)
لوم رسی سیلتی	۳/۲۱	۵۷/۸۸	۳۸/۹۱	۱/۳۴	۰/۵۲	۷/۸۲	۱/۰۷	۳۷/۴۲

پهش و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری شده است.

جدول ۳- برخی ویژگی‌های بیوپچارهای مورد مطالعه

ویژگی بیوپچار	کربن (%)	نیترژن (%)	هیدروژن (%)	بازدهی تولید (%)	پهش	قابلیت هدایت الکتریکی (dS m ⁻¹)	جرم ویژه ظاهری (g cm ⁻³)
بیوپچار برگ نخل	۵۷/۸۴	۲/۰۵	۲/۹۲	۹/۶۹	۷/۲۱	۳/۱۵	۰/۲۰۵
بیوپچار تفاله لیمو	۶۵/۳۴	۲/۹۴	۲/۹۸	۲۲/۷۶	۹/۵۹	۶/۸۰	۰/۲۶۸

پهش و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱ به ۱۰ بیوپچار به آب اندازه‌گیری شده است.

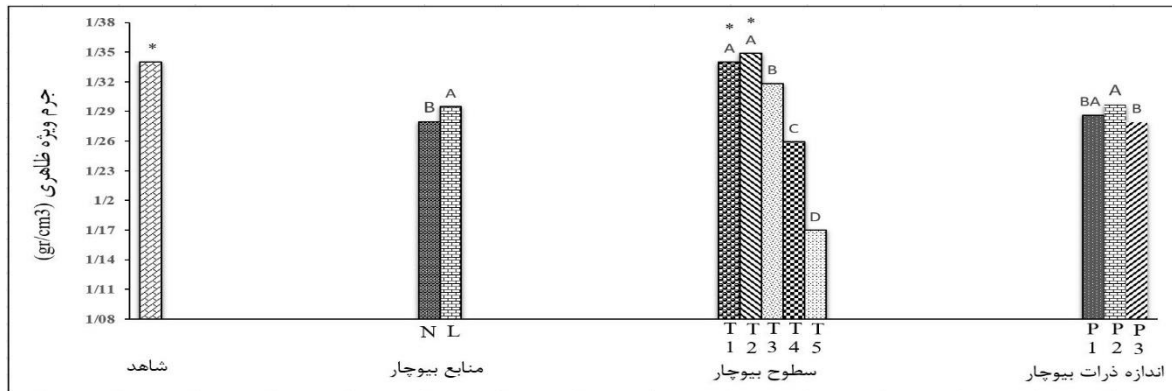
جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر منابع، سطوح و کلاس اندازه ذرات بیوپچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک لوم رسی سیلتی

میانگین مربعات						
منابع تغییرات	درجه آزادی	جرم ویژه ظاهری (g cm ⁻³)	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)	مقاومت فروری (Mpa)	مقاومت برشی (Mpa)	
منابع بیوپچار	۱	۰/۰۰۵۴**	۰/۱۳۴۰**	ns/۰/۲۴۸	۰/۱۷۶۸**	
سطوح بیوپچار	۴	۰/۰۹۹۳**	۰/۴۹۰۶**	۱/۸۱۴۲**	۴/۰۴۱۸**	
اندازه ذرات بیوپچار	۲	۰/۰۰۲۳**	**/۰/۱۶۵۴	۰/۲۲۷۶**	۰/۱۳۲۳**	
برهم‌کنش منابع و سطوح بیوپچار	۴	۰/۰۰۱۵*	ns/۰/۱۱۴	۰/۰۲۲۰**	۰/۱۰۳۹**	
برهم‌کنش منابع و اندازه ذرات بیوپچار	۲	۰/۰۰۰۷ ^{ns}	۰/۰۰۱۰ ^{ns}	۰/۰۰۱۹ ^{ns}	۰/۰۴۲۸ ^{ns}	
برهم‌کنش سطوح و اندازه ذرات بیوپچار	۸	۰/۰۰۱۵**	۰/۰۲۲۷**	۰/۰۵۵۳**	۰/۰۴۳۸*	
برهم‌کنش منابع، سطوح و اندازه ذرات بیوپچار	۸	۰/۰۰۰۴ ^{ns}	۰/۰۰۴۲ ^{ns}	۰/۰۰۱۵ ^{ns}	۰/۰۰۸۹ ^{ns}	
خطا	۶۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۱۳۷	۰/۰۰۴۹	۰/۰۱۷۹	
ضریب تغییرات		۲/۶۲۲	۱۰/۴۶۱	۵/۰۸۳	۵/۳۶۶	

ns, *, ** به ترتیب نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، ۵ درصد و عدم اختلاف معنی‌دار آماری می‌باشد.

براساس نتایج شکل (۱) استفاده از بیوپچار برگ نخل و تفاله لیمو سبب کاهش جرم ویژه ظاهری به ترتیب به میزان ۴/۷ و ۳/۴ درصد در مقایسه با عدم کاربرد بیوپچار شد. هم‌چنین به استثناء سطح ۰/۵ درصد وزنی بیوپچار که اثر معنی‌داری بر جرم ویژه ظاهری نداشت،

با کاربرد سطوح ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی بیوجار، جرم ویژه ظاهری در سطح احتمال یک درصد به ترتیب به مقدار ۱/۷، ۴/۶ و ۱۴/۵ درصد در مقایسه با عدم کاربرد بیوجار کاهش یافت.



شکل ۱- اثر منابع، سطوح و اندازه ذرات بیوجار بر جرم ویژه ظاهری خاک

(*) بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار آماری با شاهد است و برای هر متغیر ستون‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

به طور مشابه سایر پژوهشگران نیز کاهش جرم ویژه ظاهری با افزایش سطوح بیوجار را گزارش کردند (Razzaghi and Rezaie, 2017.; Zanutel et al., 2022). به عنوان نمونه *Khodarahmi et al.* (2019) کاهش ۳/۳۳ و ۶ درصدی جرم ویژه ظاهری به ترتیب در کاربرد مقادیر ۲ و ۵ گرم بر کیلوگرم بیوجار باگاس نیشکر به خاک را گزارش کرده‌اند. گزارش شده کاهش جرم ویژه ظاهری از طریق افزایش تعداد خاکدانه‌ها و در نتیجه آن ایجاد منافذ بزرگ بین خاکدانه‌ها می‌باشد (Speratti et al., 2017; Wang et al., 2017). *Burell et al.* (2016) گزارش کردند که در بلند مدت، بیوجار فعالیت‌های میکروبی خاک که در تشکیل ساختمان خاک اثر دارند را افزایش می‌دهد. براساس نتایج شکل (۱)، اگرچه با کاربرد بیوجار با اندازه ذرات کوچکتر از ۰/۸، ۲-۰/۸ و ۴-۲ میلی‌متر، جرم ویژه ظاهری در مقایسه با عدم کاربرد بیوجار به طور معنی‌دار به ترتیب به میزان ۴/۱، ۳/۳ و ۵/۳ درصد کاهش یافت، ولی اختلاف بین مقادیر اندازه ذرات بیوجار معنی‌دار نبود. نتایج مشابهی توسط *Edeh et al.* (2020) گزارش شد و آنان نیز بیان داشتند اختلاف معنی‌داری بین کاربرد ذرات کوچک‌تر و بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر از نظر اثر بر جرم ویژه ظاهری خاک مشاهده نشد.

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل دوگانه سطوح و منابع بیوجار و همچنین اثر متقابل دوگانه سطوح و اندازه ذرات بیوجار بر جرم ویژه ظاهری (g cm⁻³) خاک

میانگین	سطوح (درصد وزنی)					منابع بیوجار
	T5 (۴)	T4 (۲)	T3 (۱)	T2 (۰/۵)	T1 (شاهد)	
۱/۲۷۹۵ ^B	۱/۱۵۰ ^f	۱/۲۴۴۴ ^d	۱/۳۱۷۷ ^b	۱/۳۴۵۵ ^a	۱/۳۴۰۰ ^a	بیوجار برگ نخل (N)
۱/۲۹۵۱ ^A	۱/۱۹۰۰ ^e	۱/۲۷۴۴ ^c	۱/۳۱۸۸ ^b	۱/۳۵۲۲ ^a	۱/۳۴۰۰ ^a	بیوجار تفاله لیمو (L)
	۱/۱۷۰۰ ^D	۱/۲۵۹۴ ^C	۱/۳۱۸۳ ^B	۱/۳۴۸۸ ^A	۱/۳۴۰۰ ^A	میانگین
میانگین	سطوح (درصد وزنی)					اندازه ذرات بیوجار (mm)
	T5 (۴)	T4 (۲)	T3 (۱)	T2 (۰/۵)	T1 (شاهد)	
۱/۲۸۶۳ ^{BA}	۱/۱۶۳۳ ^g	۱/۲۶۶۶ ^d	۱/۳۳۰۰ ^{bac}	۱/۳۵۰۰ ^a	۱/۳۴۰۰ ^{ba}	P1 (۲-۴)
۱/۲۹۶۶ ^A	۱/۲۰۱۶ ^f	۱/۲۷۶۶ ^d	۱/۳۱۶۶ ^{bc}	۱/۳۴۸۳ ^a	۱/۳۴۰۰ ^{ba}	P2 (۰/۸-۲)
۱/۲۷۹۰ ^B	۱/۱۴۵۰ ^g	۱/۲۳۵۰ ^e	۱/۳۰۸۳ ^c	۱/۳۴۷۲ ^a	۱/۳۴۰۰ ^{ba}	P3 (کوچک‌تر از ۰/۸)
	۱/۱۷۰۰ ^D	۱/۲۵۹۴ ^C	۱/۳۱۸۳ ^B	۱/۳۴۸۸ ^A	۱/۳۴۰۰ ^A	میانگین

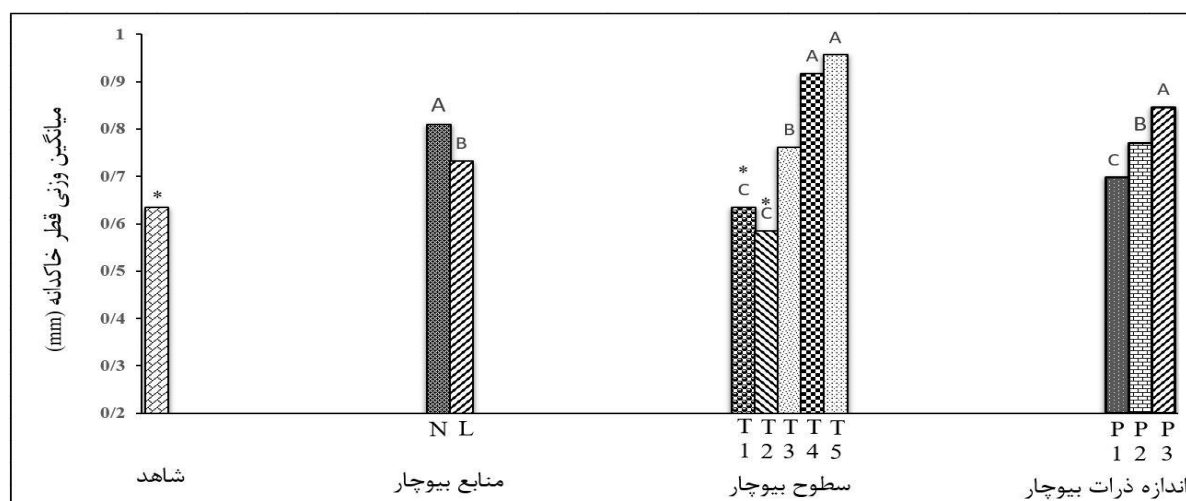
* در مورد اثر متقابل دوگانه سطوح و منابع بیوجار و همچنین سطوح و اندازه ذرات بیوجار، میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون حداقل در یک حرف آماری بزرگ و اعدادی که در بدنه جدول حداقل در یک حرف آماری کوچک مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

براساس مقایسه میانگین برهم‌کنش منابع و سطوح بیوجار، کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار جرم ویژه ظاهری به ترتیب مربوط به سطح ۴ درصد بیوجار برگ نخل (NT5) و سطح ۰/۵ درصد بیوجار تفاله لیمو (LT2) می‌باشد، که این سطح اختلاف معنی‌داری با شاهد نداشت (جدول ۵). همچنین در هر کدام از سطوح ۰/۵ و ۱ درصد اختلاف معنی‌داری بین کاربرد بیوجار برگ نخل و تفاله لیمو در آن سطح مشاهده

نشد، ولی در سطوح ۲ و ۴ درصد این اختلاف در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که با افزایش سطوح بیوپچار علاوه بر اثرات بیوپچار در بهبود ویژگی های ساختمانی و تخلخل خاک، ویژگی های خود بیوپچار نیز در تقلیل جرم ویژه ظاهری موثر می باشد. بیوپچار برگ نخل در مقایسه با بیوپچار تفاله لیمو از جرم ویژه ظاهری کمتر و سطح ویژه بیشتر دارا بوده که مبین تخلخل بیشتر درون ذرات بیوپچار است. نتایج مقایسه میانگین برهم کنش سطوح و اندازه ذرات بیوپچار (جدول ۵) نشان داد که در هر کدام از سطوح ۰/۵ و ۱ درصد اختلاف معنی داری بین اثر کاربرد بیوپچار با اندازه ذرات مختلف مشاهده نشد، ولی در سطوح ۲ و ۴ درصد این اختلاف در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد و کمترین جرم ویژه ظاهری در هر کدام از این دو سطح مربوط به کلاس اندازه کوچکتر از ۰/۸ میلی متر بود. بنابراین می توان نتیجه گرفت با کوچک تر شدن اندازه ذرات بیوپچار علاوه بر اینکه سطح ویژه افزایش می یابد، تشکیل کمپلکس های کربن - خاک تسهیل شده که خود از عوامل خاکدانه سازی و به تبع آن منافذ خاک است.

پایداری خاکدانه ها (میانگین وزنی قطر خاکدانه ها)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی کاربرد منابع، سطوح و اندازه ذرات بیوپچار بر میانگین وزنی قطر خاکدانه ها در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار است. برهم کنش سطوح و اندازه ذرات بیوپچار نیز در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار است (جدول ۴). براساس نتایج شکل (۲) استفاده از بیوپچار برگ نخل و تفاله لیمو سبب افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه ها به ترتیب به میزان ۲۷/۵ و ۱۵/۳ درصد در مقایسه با عدم کاربرد بیوپچار شد. همچنین به استثناء سطح ۰/۵ درصد وزنی بیوپچار که اثر معنی داری نداشت، با کاربرد سطوح ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی بیوپچار، میانگین وزنی قطر خاکدانه ها به طور معنی داری در سطح احتمال یک درصد به ترتیب به میزان ۱۹/۹، ۴۴/۵ و ۵۰/۵ درصد در مقایسه با عدم کاربرد بیوپچار افزایش یافت (هرچند اختلاف بین سطوح ۲ و ۴ درصد بیوپچار از نظر آماری معنی دار نبود).



شکل ۲- اثر منابع، سطوح و اندازه ذرات بیوپچار بر میانگین وزنی قطر خاکدانه ها

(*) بیانگر عدم اختلاف معنی دار آماری با شاهد است و برای هر متغیر ستون هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی دار ندارند.

افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه ها با افزایش سطوح بیوپچار در سایر پژوهش ها نیز گزارش شده است (Han et al., 2021; Hu et al., 2021; Gumus et al., 2022). Nasimi et al. (2020) گزارش کردند که ترکیبات آلی بیوپچار در اطراف ذرات معدنی می توانند از طریق نیروهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به هم متصل شده و خاکدانه ها را تشکیل دهند. به عبارتی کربن آلی در بیوپچار می تواند لیگاندهای آلی را به همراه پیوند با کاتیون چند ظرفیتی در سطح ذرات تشکیل دهند که ترکیب این ذرات در طول زمان خاکدانه های مقاوم تشکیل می دهند. براساس نتایج شکل (۲) هم چنین با کاربرد بیوپچار با اندازه ذرات کوچکتر از ۰/۸، ۰/۸-۲ و ۴-۲ میلی متر، میانگین وزنی قطر خاکدانه ها به طور معنی داری در سطح احتمال یک درصد به ترتیب به میزان ۳۳/۲، ۲۱/۳ و ۹/۸ درصد در مقایسه با عدم کاربرد بیوپچار افزایش یافت. Hu et al. (2021) بیان نمودند که ذرات بیوپچار به ویژه ذرات ریزتر بیوپچار که سطح ویژه و بار الکتریکی زیادی دارند سبب افزایش بار سطحی ذرات خاک می شوند و بر نیروهای دافعه الکترواستاتیکی و جاذبه واندرالس موثر می باشند. به طوری که نیروهای دافعه داخلی ذرات خاک را کاهش داده و سبب پایداری بیشتر خاکدانه ها می شوند. با کاربرد بیوپچار نسبت خلل و فرج درشت در مقایسه با

خلل و فرج ریز افزایش می‌یابد که این مهم از طریق اتصال خاکدانه‌های ریز محقق می‌شود و در پژوهش‌های Moosavi *et al.* (2019) نیز گزارش شده است. پایداری خاکدانه‌ها، خاک را قادر می‌سازد در برابر تنش‌های مکانیکی هم‌چون باران، رواناب سطحی و فرسایش مقاومت کرده و از شکسته شدن و از بین رفتن تخریل تهویه‌ای جلوگیری نماید (Shabani Rofchae *et al.*, 2021).

جدول ۶- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل دوگانه سطوح و اندازه ذرات بیوجار بر پایداری خاکدانه‌ها (میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، mm)

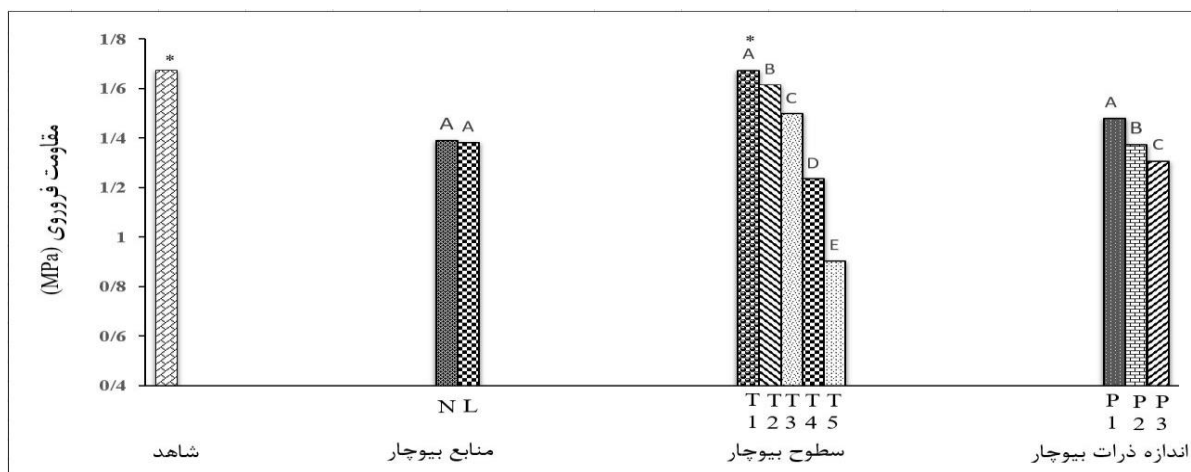
میانگین	سطوح (درصد وزنی)					اندازه ذرات بیوجار (mm)	
	T5 (۴)	T4 (۲)	T3 (۱)	T2 (۰/۵)	T1 (شاهد)		
۰/۶۹۷۳ ^C	۰/۸۲۲۸ ^{de}	۰/۸۰۵۱ ^{de}	۰/۶۶۲۶ ^{fg}	۰/۵۶۱۷ ^g	۰/۶۳۵۰ ^g	P1	(۲-۴)
۰/۷۷۰۱ ^B	۰/۹۵۶۸ ^{bc}	۰/۹۲۳۶ ^c	۰/۷۳۹۱ ^{fe}	۰/۵۹۵۸ ^g	۰/۶۳۵۰ ^g	P2	(۰/۸-۲)
۰/۸۴۵۸ ^A	۱/۰۸۹۱ ^a	۱/۰۲۴۰ ^{ba}	۰/۸۸۳۶ ^{dc}	۰/۵۹۷۶ ^g	۰/۶۳۵۰ ^g	P3	(کوچک‌تر از ۰/۸)
	۰/۹۵۶۲ ^A	۰/۹۱۷۶ ^A	۰/۷۶۱۸ ^B	۰/۵۸۴۸ ^C	۰/۶۳۵۰ ^C		میانگین

* در مورد اثر متقابل دوگانه سطوح و اندازه ذرات بیوجار، میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون حداقل در یک حرف آماری بزرگ و اعدادی که در بدنه جدول حداقل در یک حرف آماری کوچک مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش سطوح و اندازه ذرات بیوجار (جدول ۶) نشان داد که به استثنای سطح ۰/۵ درصد در هر کدام از سطوح ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی با کاهش اندازه ذرات بیوجار، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد افزایش یافته است. علت این روند از آنجایی نشأت می‌گیرد که ذرات بزرگ‌تر بیوجار به دلیل سطح ویژه کمتر، توانایی کم‌تری در ایجاد کمپکس کربن-خاک و هم‌آوری ذرات خاک دارند. از طرفی براساس نتایج همین جدول مشاهده شد که با افزایش سطوح بیوجار از ۲ به ۴ درصد تفاوت معنی‌داری در افزایش قطر خاکدانه‌ها مشاهده نشد، زیرا با افزایش بیوجار تا حد مشخصی، پایداری خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر از آن حد در کاربرد بیوجار (مخصوصاً ذرات بزرگ‌تر بیوجار) نه تنها پیوستگی و چسبندگی ذرات خاک افزایش نمی‌یابد بلکه به دلیل فراوانی ذرات بیوجار و پیوند ضعیف ذرات بیوجار به بیوجار، پایداری خاکدانه‌ها و در نتیجه آن میانگین قطر خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد. مشابه چنین نتایجی در پژوهش Sun *et al.* (2021) مشاهده شد. آنان گزارش کردند با کاربرد بیوجار تا سطح ۳۱/۵ تن در هکتار پایداری خاکدانه‌ها افزایش یافته ولی با افزایش این سطح به ۴۷/۲۵ تن در هکتار پایداری خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به نتایج جدول (۵) مشاهده شد که اثر سطح ۱ درصد بیوجار با اندازه ذرات بیوجار کوچک‌تر از ۰/۸ میلی‌متر (T3P3) با کاربرد سطوح ۲ و ۴ درصد بیوجار از اندازه ذرات ۴-۲ میلی‌متر (T5P1 و T4P1) یکسان بوده و اختلاف معنی‌دار آماری ندارند. لذا اهمیت انتخاب بهینه در پارامترهای بیوجار از منظر نوع بیوجار، سطوح و کلاس اندازه ذرات بیوجار به منظور کاهش هزینه‌های مدیریت خاک و افزایش بهره‌وری و بازدهی را نمایان می‌نماید. Fazeli Sangani *et al.* (2020) گزارش کردند که اندازه ذرات بیوجار از طریق فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی می‌تواند بر تعامل بیوجار با محیط تحت تاثیر در ارتباط باشد. آنان نتیجه گرفتند که اقدامات بعد از گرماکافت از جمله کلاس‌بندی ذرات بیوجار می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد آن برای یک کاربرد خاص منجر شود. هم‌چنین Blanco-Conqui (2017) بیان داشتند که تفاوت بافت خاک و اندازه ذرات بیوجار تاثیرات متفاوتی در پایداری خاکدانه‌ها دارد.

مقاومت فروری خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی کاربرد سطوح و اندازه ذرات بیوجار بر مقاومت فروری در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است و اثر اصلی منابع بیوجار معنی‌دار نشد. هم‌چنین برهم‌کنش منابع و سطوح بیوجار و برهم‌کنش سطوح و اندازه ذرات بیوجار در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۴). براساس نتایج شکل ۳، با کاربرد سطوح ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی بیوجار، مقاومت فروری به طور معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد به ترتیب به میزان ۳/۵، ۱۱/۶، ۳۵/۴ و ۸۵ درصد در مقایسه با عدم کاربرد بیوجار کاهش یافت. در پژوهشی مشابه نیز کاهش مقاومت فروری با افزایش سطوح بیوجار نیز توسط Negis *et al.*, (2020) گزارش شد. آنان گزارش کردند که با کاربرد سطوح ۲ و ۴ درصد بیوجار مقاومت فروری در مدت ۷ ماه به ترتیب به میزان ۸/۸۰ و ۹/۳۳ درصد کاهش یافته است. براساس نتایج شکل (۳) هم‌چنین با کاربرد بیوجار با اندازه ذرات کوچک‌تر از ۰/۸، ۰/۸-۲ و ۲-۴ میلی‌متر، مقاومت فروری به طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد به ترتیب به میزان ۲۸/۲، ۲۱/۸ و ۱۳/۲ درصد در مقایسه با عدم کاربرد بیوجار کاهش یافت.



شکل ۳- اثر منابع، سطوح و اندازه ذرات بیوجار بر مقاومت فروری خاک

(*) بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار آماری با شاهد است و برای هر متغیر ستون‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

کاهش مقاومت فروری به عنوان شاخصی از کیفیت از آنجایی اهمیت پیدا می‌کند که، عموماً حد بحرانی مقاومت فروری خاک برای رشد ریشه گیاهان ۲ مگاپاسکال می‌باشد (Negis et al., 2020). از طرفی نتایج تحقیقات نشان داده است که فعالیت میکروبی، جذب عناصر غذایی، نگهداری آب در خاک و تهویه آن به طور مستقیم به فشردگی در خاک وابسته هستند (Blanco-Canqui, 2021) و زیاد بودن مقاومت فروری (فشردگی خاک) کاهش نفوذ آب در خاک و فرسایش را به دنبال دارد. در اکثر پژوهش‌ها، افزودن بقایای آلی به خاک عامل اصلی در کاهش مقاومت فشاری عنوان شده است (Iqbal, 2018).

جدول ۷- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل دوگانه سطوح و منابع بیوجار و همچنین اثر متقابل دوگانه سطوح و اندازه ذرات بیوجار بر مقاومت فروری خاک (MPa)

میانگین	سطوح (درصد وزنی)					منابع بیوجار
	T5 (۴)	T4 (۲)	T3 (۱)	T2 (۰/۵)	T1 (شاهد)	
۱/۳۸۸۸ ^A	۰/۹۴۴۴ ^f	۱/۲۹۳۳ ^c	۱/۴۹۸۸ ^b	۱/۶۱۴۴ ^a	۱/۶۷۳۳ ^a	بیوجار برگ نخل (N)
۱/۳۸۲۸ ^A	۰/۸۶۴۴ ^e	۱/۱۷۷۷ ^d	۱/۵۰۰۰ ^b	۱/۶۱۸۸ ^a	۱/۶۷۳۳ ^a	بیوجار پوست لیمو (L)
	۰/۹۰۴۴ ^E	۱/۲۳۵۵ ^D	۱/۴۹۹۴ ^C	۱/۶۱۶۶ ^B	۱/۶۷۳۳ ^A	میانگین
میانگین	سطوح (درصد وزنی)					اندازه ذرات بیوجار (میلی‌متر)
	T5 (۴)	T4 (۲)	T3 (۱)	T2 (۰/۵)	T1 (شاهد)	
۱/۴۷۸۳ ^A	۱/۰۹۶۶ ^{hg}	۱/۴۰۵۰ ^f	۱/۵۴۰۰ ^{edc}	۱/۶۲۶۶ ^{bac}	۱/۶۷۳۳ ^a	P1 (۲ - ۴)
۱/۳۷۴۰ ^B	۰/۸۳۶۶ ⁱ	۱/۲۰۵۰ ^g	۱/۵۰۱۶ ^{ed}	۱/۶۵۳۳ ^{ba}	۱/۶۷۳۳ ^a	P2 (۰/۸ - ۲)
۱/۳۰۵۳ ^C	۰/۷۳۰۰ ^j	۱/۱۴۶۶ ^h	۱/۴۵۶۶ ^{ef}	۱/۵۷۰۰ ^{bdc}	۱/۶۷۳۳ ^a	P3 (کوچک‌تر از ۰/۸)
	۰/۹۰۴۴ ^E	۱/۲۳۵۵ ^D	۱/۴۹۹۴ ^C	۱/۶۱۶۶ ^B	۱/۶۷۳۳ ^A	میانگین

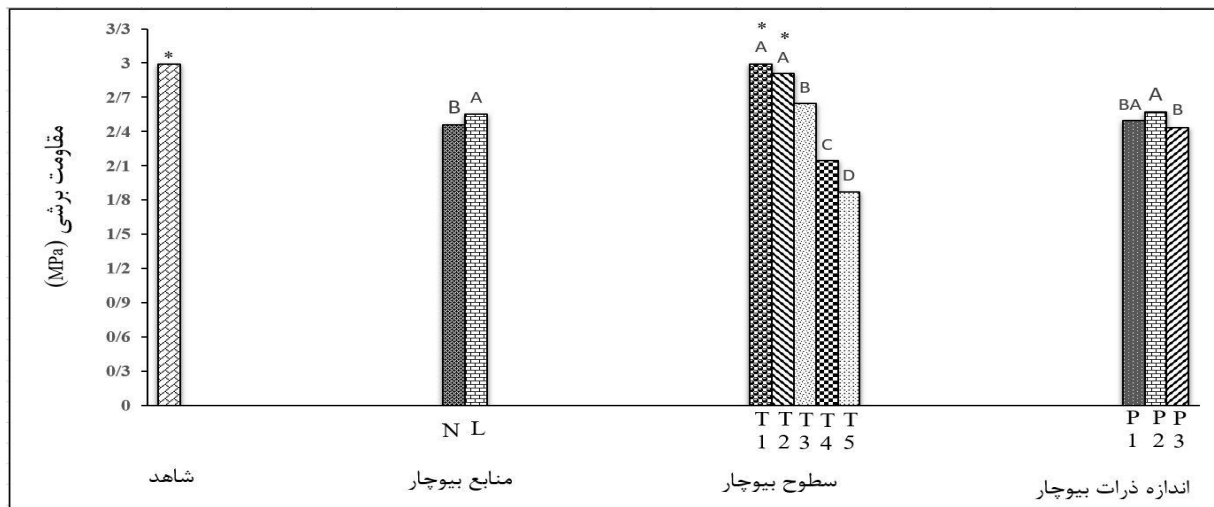
* در مورد اثر متقابل دوگانه سطوح و منابع بیوجار و همچنین سطوح و اندازه ذرات بیوجار، میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون حداقل در یک حرف آماری بزرگ و اعدادی که در بدنه جدول حداقل در یک حرف آماری کوچک مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

بر اساس مقایسه میانگین برهم‌کنش منابع و سطوح بیوجار (جدول ۷)، کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار مقاومت فروری به ترتیب مربوط به سطح ۴ درصد بیوجار تفاله لیمو (LT5) و شاهد می‌باشد. همچنین در هر کدام از سطوح ۰/۵ و ۱ درصد اختلاف معنی‌داری بین کاربرد بیوجار برگ نخل و تفاله لیمو در آن سطح مشاهده نشد. ولی در هر کدام از سطوح ۲ و ۴ درصد این اختلاف معنی‌دار شد. نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش سطوح و اندازه ذرات بیوجار (جدول ۷) نشان داد که در هر کدام از سطوح ۰/۵ و ۱ درصد اختلاف معنی‌داری بین اندازه ذرات مختلف بیوجار از نظر اثر بر مقاومت فروری مشاهده نشد ولی در سطوح ۲ و ۴ درصد این اختلاف معنی‌دار بود. به طوری که کم‌ترین مقاومت فروری در هر کدام از این دو سطح مربوط به کلاس اندازه کوچکتر از ۰/۸ میلی‌متر می‌باشد. نکته قابل توجه این است که در تمام سطوح، مقاومت فروری در کلاس اندازه ذرات کوچکتر از ۰/۸ میلی‌متر با کلاس اندازه ذرات ۲-۴ میلی‌متر در سطح بعدی اختلاف معنی‌دار آماری نداشت. به عبارت دیگر مقادیر مقاومت فروری در تیمارهای T2P3 با T3P1 و T3P3 با T4P1 و T4P3 با T5P1

اختلاف معنی دار آماری نداشتند. به بیان ساده تر نتایج پژوهش نشان داد با کوچک تر کردن ذرات بیوپچار به کوچک تر از $0/8$ میلی متر، سطوح کاربرد را می توان به نصف تقلیل داد. که از دلایل آن اثر اندازه ذرات ریزتر بیوپچار به دلیل توزیع یکنواخت در خاک و جلوگیری از ایجاد سله در سطح خاک می باشد. (Zong *et al.*, 2014). بیان نمودند که ذرات بیوپچار به دلیل سطح ویژه زیاد، سطوح کانی های رس را پوشانده و فضای منافذ خاک را پر می کنند که خود مانع ایجاد سله و درز و ترک می شوند.

مقاومت برشی خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی کاربرد منابع بیوپچار، سطوح و اندازه ذرات بیوپچار بر مقاومت برشی در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار است. همچنین برهم کنش منابع و سطوح بیوپچار در سطح احتمال ۱ درصد و برهم کنش سطوح و اندازه ذرات بیوپچار در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار شد (جدول ۴).



شکل ۴- اثر منابع، سطوح و اندازه ذرات بیوپچار بر مقاومت برشی خاک

(*) بیانگر عدم اختلاف معنی دار آماری با شاهد است و برای هر متغیر ستون هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی دار ندارند.

بر اساس نتایج شکل ۴، استفاده از بیوپچار برگ نخل و تفاله لیمو سبب کاهش مقاومت فروری به ترتیب به میزان $21/8$ و $14/6$ درصد در مقایسه با عدم کاربرد بیوپچار شد. همچنین به استثنا سطح $0/5$ درصد وزنی بیوپچار که اثر معنی داری بر مقاومت برشی خاک نداشت، با کاربرد سطوح ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی بیوپچار، مقاومت برشی به طور معنی داری در سطح احتمال یک درصد به ترتیب به میزان $39/7$ و $59/8$ درصد در مقایسه با عدم کاربرد بیوپچار کاهش یافت. در سایر پژوهش ها نیز کاهش مقاومت برشی با افزایش سطوح بیوپچار گزارش شده است (Zong *et al.*, 2014; Ganesan *et al.*, 2020). همچنین Behnam *et al.* (2017) گزارش نمودند که با کاربرد سطوح ۲، ۴ و ۶ درصد بیوپچار مقاومت برشی به ترتیب $21/02$ ، $22/72$ و $27/84$ درصد کاهش یافت. (Zong *et al.*, 2014) گزارش نمودند که با کاربرد ۶ درصد از انواع مختلف بیوپچار نیروی پیوستگی بین ذرات رس از 32 تا 68 درصد کاهش یافت. (Sun and Lu, 2014) بیان داشتند که بیوپچار به دلیل داشتن منافذ زیاد خود، تعداد منافذ خاک را افزایش داده و ترکیب این منافذ زیاد، حفرات درشت را ایجاد می کند. از طرفی افزودن بیوپچار سبب می شود بخشی از کربن موجود در بیوپچار با ذرات رس خاک تشکیل کمپلکس کربن-رس دهند و بخش دیگر کربن به صورت آزاد بماند. لذا بخشی از سطوح با انرژی کم پوشیده می شوند که کاهش تماس کانی های خاک با یکدیگر سبب تضعیف پیوند فاز جامد و مایع می شود. عامل دیگر کاهش تنش برشی مربوط به افزایش خاصیت آب گریزی خاک اصلاح شده با بیوپچار می باشد (Kinney *et al.*, 2012)، زیرا بیوپچار بر روی سطوح خود باندهای آب گریز هم چون گروه های آلیفاتیک و آروماتیک غیر قطبی دارد (Briggs *et al.*, 2012). بر اساس نتایج شکل (۴)، همچنین با کاربرد بیوپچار با اندازه ذرات کوچکتر از $0/8$ ، 2 و 4 میلی متر، مقاومت برشی به طور معنی داری در سطح احتمال یک درصد به ترتیب به میزان $22/8$ ، $16/5$ و $19/8$ درصد در مقایسه با عدم کاربرد بیوپچار کاهش یافت. ولی اختلاف معنی داری بین مقادیر مقاومت برشی در تیمارهای P1، P2 و P3 مشاهده نشد. در بسیاری از مطالعات از مقاومت برشی سطح خاک به عنوان شاخص مناسب فرسایش پذیری خاک نام برده می شود، شرایط خاک زمانی که به وسیله جریان

شیاری به حد آستانه فرساینده‌گی برسد به وسیله مقاومت برشی سطح خاک کنترل می‌شود. همچنین جداسازی ذرات خاک به وسیله قطرات باران با مقاومت برشی سطح خاک در ارتباط است (Daryae et al., 2021). از طرفی، کاربرد ماده آلی در خاک می‌تواند با کاهش جرم ویژه ظاهری خاک، موجب کم شدن مقاومت برشی خاک شده و از این طریق انرژی لازم برای سست کردن خاک در عملیات خاک‌ورزی را کاهش داده و موجب سهولت مدیریت خاک شود (Behnam et al., 2017). لذا دستیابی به مقادیر بهینه از مقاومت برشی که در عین حفاظت خاک در برابر فرسایش، عملیات خاک‌ورزی را محدود نماید، در کشاورزی پیشرفته ضروری به نظر می‌رسد.

جدول ۸- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل دوگانه سطوح و منابع بیوجار و همچنین اثر متقابل دوگانه سطوح و اندازه ذرات بیوجار بر مقاومت برشی خاک (MPa)

میانگین	سطوح (درصد وزنی)					منابع بیوجار
	T5 (۴)	T4 (۲)	T3 (۱)	T2 (۰/۵)	T1 (شاهد)	
۲/۴۵۶۴ ^B	۱/۸۰۲۲ ^e	۲/۹۸۵۵ ^d	۲/۶۰۸۸ ^b	۲/۹۵۲۲ ^a	۲/۹۳۳۳ ^a	بیوجار برگ نخل (N)
۲/۵۴۵۱ ^A	۱/۹۴۲۲ ^d	۲/۳۰۰۰ ^c	۲/۶۸۴۴ ^b	۲/۸۶۵۵ ^a	۲/۹۳۳۳ ^a	بیوجار پوست لیمو (L)
	۱/۸۷۲۲ ^D	۲/۱۴۲۷ ^C	۲/۶۴۶۶ ^B	۲/۹۰۸۸ ^A	۲/۹۳۳۳ ^A	میانگین

میانگین	سطوح (درصد وزنی)					اندازه ذرات بیوجار (mm)
	T5 (۴)	T4 (۲)	T3 (۱)	T2 (۰/۵)	T1 (شاهد)	
۲/۴۹۷۰ ^{BA}	۱/۸۰۰۰ ^f	۲/۰۷۸۳ ^e	۲/۷۲۰۰ ^{bc}	۲/۹۵۲۲ ^a	۲/۹۳۳۳ ^a	P1 (۲-۴)
۲/۵۶۹۰ ^A	۲/۰۵۵۰ ^e	۲/۲۹۶۶ ^d	۲/۶۲۶۶ ^c	۲/۹۳۳۳ ^a	۲/۹۳۳۳ ^a	P2 (۰/۸-۲)
۲/۴۳۶۳ ^B	۱/۷۶۱۶ ^f	۲/۰۵۳۳ ^e	۲/۵۹۲۳ ^c	۲/۸۴۰۰ ^{ba}	۲/۹۳۳۳ ^a	P3 (کوچک‌تر از ۰/۸)
	۱/۸۷۲۲ ^D	۲/۱۴۲۷ ^C	۲/۶۴۶۶ ^B	۲/۹۰۸۸ ^A	۲/۹۳۳۳ ^A	میانگین

* در مورد اثر متقابل دوگانه سطوح و منابع بیوجار و همچنین سطوح و اندازه ذرات بیوجار، میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون حداقل در یک حرف آماری بزرگ و اعدادی که در بدنه جدول حداقل در یک حرف آماری کوچک مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

بر اساس نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش منابع و سطوح بیوجار (جدول ۸)، کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار مقاومت برشی به ترتیب مربوط به سطح ۴ درصد بیوجار برگ نخل (NT5) و سطح ۰/۵ درصد بیوجار برگ نخل (NT2) است که البته اختلاف معنی‌دار آماری با شاهد نداشت. البته اختلاف معنی‌دار آماری بین سطح ۰/۵ درصد هر دو منبع بیوجار با شاهد مشاهده نشد. در هر کدام از سطوح ۰/۵ و ۱ درصد اختلاف معنی‌داری بین کاربرد بیوجار برگ نخل و تفاله لیمو در آن سطح مشاهده نشد. ولی در سطوح ۲ و ۴ درصد این اختلاف بین منابع بیوجار معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد شد. که در هر دو این سطوح بیوجار برگ نخل به میزان بیشتری مقاومت برشی را کاهش داد. از طرفی مشاهده شد مقدار مقاومت برشی در تیمار NT4 در مقایسه با تیمار LT5 اختلاف معنی‌دار آماری ندارد. نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش سطوح و اندازه ذرات بیوجار (جدول ۸) نشان داد که در هر کدام از سطوح ۰/۵ و ۱ درصد، اختلاف معنی‌داری بین کاربرد اندازه ذرات مختلف بیوجار مشاهده نشد ولی با افزایش سطوح کاربرد (به عبارت دیگر در سطوح ۲ و ۴ درصد) این اختلاف بین ذرات کوچک‌تر از ۰/۸ و ۲-۴ میلی‌متر با ذرات بیوجار ۲-۰/۸ میلی‌متر از نظر آماری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. که دلیل آن این است که ذرات بیوجار ۲-۴ میلی‌متر به دلیل بزرگ‌تر بودن از اندازه ذرات خاک، خاکدانه‌های ناپایدارتری ایجاد نمودند. از طرفی ذرات بیوجار کوچک‌تر از ۰/۸ میلی‌متر به دلیل سطح ویژه بیشتر و سطوح کربن آزاد و آب‌گریزی بیشتر در مقایسه با اندازه ذرات دیگر، سبب کاهش مقاومت برشی می‌شوند.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان داد که بیوجار اثر معنی‌داری بر کاهش جرم ویژه ظاهری، مقاومت فروروی و مقاومت برشی داشت که همگی در مدیریت عملیات خاک و خاک‌ورزی نقش کلیدی دارند. از طرفی سبب افزایش معنی‌دار در پایداری خاکدانه‌ها شد. اثرگذاری بیوجار برگ نخل در مقایسه با بیوجار تفاله لیمو به دلیل ساختار فیزیکی و شیمیایی آن، در تمام ویژگی‌های مورد بررسی مطلوب‌تر بود. همچنین با افزایش سطوح بیوجار به ۴ درصد به عنوان موثرترین سطح کاربرد بیوجار، مقادیر جرم ویژه ظاهری، مقاومت فروروی و مقاومت برشی کاهش و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها را افزایش داد. از طرفی در شرایط یکسان از نوع و سطح کاربرد بیوجار مشاهده شد که با کاهش اندازه ذرات بیوجار، مقادیر میانگین جرم ویژه ظاهری، مقاومت فروروی و مقاومت برشی به‌طور معنی‌داری کاهش و پایداری خاکدانه‌ها



افزایش یافت. بر اساس نتایج فوق می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده و انتخاب مناسب از ترکیبی از منابع، سطوح و اندازه ذرات بیوچار به عنوان اصلاح‌کننده آلی خاک می‌تواند ضمن کاهش هزینه‌های مدیریت کشاورزی و مخاطرات زیست محیطی، حداکثر بهسازی در ویژگی‌های فیزیکی خاک را ایجاد نماید که تضمین‌کننده تولید پایدار محصولات در کشاورزی پایدار می‌باشد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Ahmed, A., Garipey, Y. & Raghavan, V. (2017). Influence of wood-derived biochar on the compactibility and strength of silt loam soil. *International Agrophysics*, 31(2), 149.
- Alkhasha, A., Al-Omran, A. & Aly, A. (2018). Effects of biochar and synthetic polymer on the hydro-physical properties of sandy soils. *Sustainability*, 10(12), 4642.
- Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D. & Hips, N. A. (2010). Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil*, 337(1), 1-18.
- Batista, E. M., Shultz, J., Matos, T. T., Fornari, M. R., Ferreira, T. M., Szpoganicz, B., Freitas, R. A. D. & Mangrich, A. S. (2018). Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. *Scientific Reports*, 8(1), 1-9.
- Behnam, H., Farrokhian Firouzi, A. & Moezzi, A. (2017). Effect of biochar and compost sugarcane bagasse on some soil mechanical properties. *Journal of water and soil conservation*, 23(4), 235-250. (In Farsi)
- Bhatt, B., Chandra, R., Ram, S. & Pareek, N. (2016). Long-term effects of fertilization and manuring on productivity and soil biological properties under rice (*Oryza sativa*)–wheat (*Triticum aestivum*) sequence in Mollisols. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(8), 1109-1122.
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687-711.
- Blanco-Canqui, H. (2021). Does biochar application alleviate soil compaction? Review and data synthesis. *Geoderma*, 404, 115317.
- Blake, G. R. (1965). Bulk density. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 9, 374-390.
- Briggs, C., Breiner, J. M. & Graham, R. C. (2012). Physical and chemical properties of *Pinus ponderosa* charcoal: implications for soil modification. *Soil Science*, 177(4), 263-268.
- Burrell, L. D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B. & Soja, G. (2016). Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma*, 282, 96-102.
- Castellini, M., Giglio, L., Niedda, M., Palumbo, A. D. & Ventrella, D. (2015). Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. *Soil and Tillage Research*, 154, 1-13.
- Crane-Droesch, A., Abiven, S., Jeffery, S. & Torn, M. S. (2013). Heterogeneous global crop yield response to biochar: a meta-regression analysis. *Environmental Research Letters*, 8(4), 044-049.
- Daryaee, R., Moosavi, A. A., Ghasemi, R. & Riazzi, M. (2021). Effect of petroleum products on the strength of calcareous soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(10), 2607-2621. (In Farsi)
- De Jesus Duarte, S., Glaser, B. & Pellegrino Cerri, C. E. (2019). Effect of biochar particle size on physical, hydrological and chemical properties of loamy and sandy tropical soils. *Agronomy*, 9(4), 165.
- Edeh, I. G., Mašek, O. & Buss, W. (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.
- Ganesan, S. P., Bordoloi, S., Ni, J., Sizmur, T., Garg, A. & Sekharan, S. (2020). Exploring implication of variation in biochar production on geotechnical properties of soil. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-11.
- Gavili, E., Moosavi, A. A. & Moradi, F. (2018). Assessing cattle manure biochar potential for ameliorating physical soil features and spinach responses under drought stress conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(12), 1714-27.
- Gee, G. W. & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods*, (methodsofsoilan1), 383-411.
- Goyal, R. & Kahlon, M. S. (2022). Soil physico-chemical properties and water productivity of maize as affected by biochar application under different irrigation regimes in northwest India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(9), 1068-1084.
- Gümüş, İ., Negiş, H. & Şeker, C. (2022). Effects of two different biochar on physical quality characteristics of

- a heavy clay soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9), 1-8.
- Han, L., Zhang, B., Chen, L., Feng, Y., Yang, Y. & Sun, K. (2021). Impact of biochar amendment on soil aggregation varied with incubation duration and biochar pyrolysis temperature. *Biochar*, 3(3), 339-347.
- Horak, J., Simansky, V. & Igaz, D. (2019). Biochar and biochar with N fertilizer impact on soil physical properties in a silty loam Haplic Luvisol. *Journal of Ecological Engineering*, 20(7).
- Hu, F., Xu, C., Ma, R., Tu, K., Yang, J., Zhao, S., Yang, M. & Zhang, F. (2021). Biochar application driven change in soil internal forces improves aggregate stability: Based on a two-year field study. *Geoderma*, 403, 115276.
- Iqbal, I. (2018). Effect of sugarcane litter compost on soil compaction. *International Journal of Agriculture System*, 6(1), 35-44.
- Kemper, W. D. & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 425-442.
- Khodarahmi, Y., Boroomand, N. S., Soltani, M. A. & Nasser, A. A. (2019). Evaluation of modified biochar and zeolite effect on some physical and chemical properties of loamy soil. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 8(4), 87-101. (In Farsi)
- Khosravani, P., Moosavi, A. A. & Baghernejad, M. (2021). Spatial Variations of Soil Penetration Resistance and Shear Strength and the Effect of Land Use Type and Physiographic Unit on These Characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(4), 1041-1057. (In Farsi)
- Kinney, T. J., Masiello, C. A., Dugan, B., Hockaday, W. C., Dean, M. R., Zygourakis, K. & Barnes, R. T. (2012). Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass and Bioenergy*, 41, 34-43.
- Kumar, H., Huang, S., Mei, G. & Garg, A. (2021). Influence of feedstock type and particle size on efficiency of biochar in improving tensile crack resistance and shear strength in lean clayey soil. *International Journal of Damage Mechanics*, 30(4), 646-661.
- Lehmann, J. & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. Routledge.
- Liang, C., Gasco, G., Fu, S., Mendez, A. & Paz-Ferreiro, J. (2016). Biochar from pruning residues as a soil amendment: Effects of pyrolysis temperature and particle size. *Soil and Tillage Research*, 164, 3-10.
- Liu, J., Schulz, H., Brandl, S., Miehtke, H., Huwe, B., & Glaser, B. (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.
- Ma, F., Dai, J., Fu, Z., Li, C., Wen, Y., Jia, M., Wang, Y. & Shi, K. (2022). Biochar for asphalt modification: A case of high-temperature properties improvement. *Science of The Total Environment*, 804, 150194.
- Moosavi, A. A., Gavili, E. & Masoudi, F. (2019). Effect of Cattle Manure and Palm Residue Biochars Produced at Different Pyrolysis Temperatures on Saturated Hydraulic Conductivity and the Coefficients of Chloride Transportation in a Sandy Loam Soil. *Iranian Journal of Soil Research*, 32(4), 553-566. (In Farsi)
- Nasimi, P., Karimi, A. & Motaghian, H. R. (2019). Effects of Biochar produced from date palm's leaves on saturated hydraulic conductivity and soil moisture coefficients of sandy clay loam soil. *Iranian Water Research Journal*, 13, 161-171. (In Farsi)
- Negiş, H., Şeker, C., Gümüş, I., Manirakiza, N. & Mücevher, O. (2020). Effects of biochar and compost applications on penetration resistance and physical quality of a sandy clay loam soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(1), 38-44.
- Novak, J., Sigua, G., Watts, D., Cantrell, K., Shumaker, P., Szogi, A., Johnson, M. G. & Spokas, K. (2016). Biochars impact on water infiltration and water quality through a compacted subsoil layer. *Chemosphere*, 142, 160-167.
- Pituello, C., Dal Ferro, N., Francioso, O., Simonetti, G., Berti, A., Piccoli, I., Pisi, A. & Morari, F. (2018). Effects of biochar on the dynamics of aggregate stability in clay and sandy loam soils. *European Journal of Soil Science*, 69(5), 827-842.
- Rahim, H. U., Mian, I. A., Arif, M., Rahim, Z. U., Ahmad, S., Khan, Z., Ayoub Khan, M. & Haris, M. (2019). 3. Residual effect of biochar and summer legumes on soil physical properties and wheat growth. *Pure and Applied Biology (PAB)*, 8(1), 16-26.
- Razzaghi, F., Obour, P. B. & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361, 114055.
- Riahi, R., Hatira, A., Baccouche, S. & Nakouri, A. (2018). Development of an empiric model of estimation of the environmental risk of soil physical degradation in the context of climate change application in the



- Mejerda valley, Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 147, 498-510.
- Saffari, N., Hajabbasi, M. A., Shirani, H., Mosaddeghi, M. R. & Owens, G. (2021). Influence of corn residue biochar on water retention and penetration resistance in a calcareous sandy loam soil. *Geoderma*, 383, 114734.
- Sangani, M. F., Abrishamkesh, S. & Owens, G. (2020). Physicochemical characteristics of biochars can be beneficially manipulated using post-pyrolyzed particle size modification. *Bioresource technology*, 306, 123157.
- Shaabani Roofchae, A., Abrishamkesh, S., Shabanpour Shahrestani, M. & Fazeli Sangani, M. (2020). Effect of olive kernel biochar suspension on physical properties and loss of an erosion-prone soil. *Environmental Erosion Research Journal*, 10(3), 74-95. (In Farsi)
- Singh, H., Northup, B. K., Rice, C. W. & Prasad, P. V. (2022). Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. *Biochar*, 4(1), 1-17.
- Speratti, A. B., Johnson, M. S., Martins Sousa, H., Nunes Torres, G. & Guimarães Couto, E. (2017). Impact of different agricultural waste biochars on maize biomass and soil water content in a Brazilian Cerrado Arenosol. *Agronomy*, 7(3), 49.
- Sun, F. & Lu, S. (2014). Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177, 26-33.
- Sun, Q., Meng, J., Lan, Y., Shi, G., Yang, X., Cao, D., Chen, W. & Han, X. (2021). Long-term effects of biochar amendment on soil aggregate stability and biological binding agents in brown earth. *Catena*, 205, 105460.
- Toková, L., Igaz, D., Horák, J. & Aydin, E. (2020). Effect of biochar application and re-application on soil bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity, water content and soil water availability in a silty loam Haplic Luvisol. *Agronomy*, 10(7), 1005.
- Wani, I., Kushvaha, V., Garg, A., Kumar, R., Naik, S. & Sharma, P. (2022). Review on effect of biochar on soil strength: Towards exploring usage of biochar in geo-engineering infrastructure. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-32.
- Wong, J. T. F., Chen, Z., Chen, X., Ng, C. W. W. & Wong, M. H. (2017). Soil-water retention behavior of compacted biochar-amended clay: a novel landfill final cover material. *Journal of soils and sediments*, 17(3), 590-598.
- Xue, P., Fu, Q., Li, T., Liu, D., Hou, R., Li, Q., Li, M. & Meng, F. (2022). Effects of biochar and straw application on the soil structure and water-holding and gas transport capacities in seasonally frozen soil areas. *Journal of Environmental Management*, 301, 113943.
- Yang, C., Liu, J. & Lu, S. (2021). Pyrolysis temperature affects pore characteristics of rice straw and canola stalk biochars and biochar-amended soils. *Geoderma*, 397, 115097.
- Zanutel, M., Garré, S. & Biolders, C. L. (2022). Long-term effect of biochar on physical properties of agricultural soils with different textures at pre-industrial charcoal kiln sites in Wallonia (Belgium). *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13157.
- Zong, Y., Chen, D. & Lu, S. (2014). Impact of biochars on swell-shrinkage behavior, mechanical strength, and surface cracking of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(6), 920-926.