

Effect of palm leaf and lemon peel biochar on some physical and mechanical properties of a sandy loam soil

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

¹ Ph.D. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

² Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

³ Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

Abstract

Introduction

Increasing agricultural production is necessary due to the growing population in order to ensure food security. Also, a large part of agricultural lands in arid and semi-arid climates face the limitation of carbon storage and nutrients. This limitation is more visible in coarse textured soils with low clay content, due to the inability to supply elements required for plant growth and the ability to retain water in the soil. Therefore, modifying the physical, chemical and biological characteristics of the soil is inevitable to achieve sustainable agriculture. In the meantime, with the high use of chemical fertilizers along with the excessive tillage activities while destroying the soil, management costs increase. Soil degradation is an increasing worldwide threat to the sustainability of agriculture. The use of organic amendments like biochar may prove a key for sustainable agriculture, as it could keep the carbon pool in soil over the long term, thus improving soil fertility and crop productivity, mitigating global climate change, and finally enhancing soil physicochemical quality. The ability of biochar to enhance the physical and mechanical properties of soils is dependent on the characteristics of biochar including its particle size, application rate, feedstock type, and pyrolysis conditions. This study aimed to assess the effect of applying different application rates, feedstock, and particle sizes of biochar on the soil's physical and mechanical properties in sandy loam soil.

Materials and Methods

The study was conducted in a research greenhouse of Shiraz University in 2019. To investigate the effect of biochar feedstock, application rate, and particle size on soil bulk density, aggregate stability (mean weight diameter), penetration resistance, and shear strength in sandy loam soil, using two feedstock types (palm leaf biochar and lemon peel biochar) were pyrolyzed at a temperature of 500 °C for 3 h. Each biochar was fractioned by dry sieving into three sizes: 2-4, 0.8-2, and < 0.8 mm, and mixed with sandy loam soil at four application rates of 0.5, 1, 2, and 4 % (v/v) with zero application rates (control). The pots were incubated in standard conditions and water content was kept at near field capacity throughout the experiment for 15 months. In the production of biochar, plant residues of palm leaves and lemon peel were used, which are surplus plant wastes available in Fars province. The apparent specific gravity of the soil was measured by the conventional method of paraffin blocks. The statistical analysis of the results was done in order to check the influence of the studied treatments on the soil characteristics using SAS statistical software. The mean of the effect of each treatment separately and also the interaction of the effects of the investigated treatments (if significant) were compared using Duncan's multiple range test at the five percent probability level ($p < 0.05$).

Results and Discussion

This result indicated that applying biochar improved the physical properties of soil, including a significant decrease in soil bulk density from 5.4 to 19.8% by using application rates of 0.5 to 4% biochar, increase aggregate stability from 37.6 to 73.6% and increase shear strength from 3.2 to 15 by using application rates of 1 to 4% of biochar as compared to control. For a 4% biochar rate, penetration resistance increased by 5% as compared to control. The results show that lemon peel is more efficient in soil bulk density whereas palm leaf

biochar was efficient in aggregate stability and shear strength (no significant difference in penetration resistance was observed with the application of different biochar sources). Moreover, irrespective of biochar sources, biochar with finer particle sizes (< 0.8 mm) improved aggregate stability and shear strength, when the biochar application rate was the same, but the most notable improvement in soil bulk density was observed at the coarse fractions (2-4 mm).

Conclusion

Biochar as a type of organic compound that has great compatibility with the environment, is of interest in advanced agriculture due to its stable carbon storage and its positive effects on the biochemical and physical characteristics of the soil. According to the results of this research, the use of biochar in soil had a significant effect on reducing the apparent specific mass of the soil and also a significant increase in the stability of soil grains and shear resistance, which improves the physical and mechanical properties of the soil can have an effect on protecting the soil against water and wind erosion. On the other hand, although at the application level of 4% biochar, the resistance to subsidence increased by a significant amount of 5%, but no significant changes were observed in this feature. Palm leaf biochar had a stronger role in increasing the stability of soil grains and shear resistance, on the other hand, lemon pomace biochar had a greater effect in reducing specific mass due to its structure similar to sand particles. Also, by increasing the levels of biochar to four percent as the most effective level of biochar application, the apparent specific mass values decreased by 19.8% and the stability of soil grains and shear strength increased by 73.6% and 15% respectively. Also, the results showed that in general, by reducing the size of biochar particles from 4 mm to less than 0.8 mm, the weight average of soil grain diameter and shear strength increased significantly, but the average apparent specific mass increased with the increase of particle size (2-4 mm particles) reduced. Based on the above results, it can be concluded that choosing an optimal mode of sources, levels and size of biochar particles as an organic soil conditioner can lead to maximum productivity in agricultural production while reducing agricultural management costs. In this research, it was found that under the same conditions, the use of two percent palm leaf biochar with a particle size of less than 0.8 mm in sandy loam soil is useful. It should be kept in mind that the behavior of biochar is not only limited to the characteristics investigated in this research, and the change in the conditions of biochar production (thermal heating) causes a change in the characteristics of biochar. Therefore, it is suggested that in addition to the studied effects, the effects of characteristics based on the biochar production process, such as temperature and duration of thermomodulation, should be investigated at different times on the physical, chemical and biological characteristics of different soils and in field conditions in order to obtain more comprehensive information on the optimal amounts of charcoal. Biologically, especially at the farm scale, to obtain soil amendment.

Keywords: Aggregate stability, Penetration resistance, Shear strength, Soil amendment

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: aamousavi@shirazu.ac.ir

Citation: Yekzaban, A., Moosavi, A.A., Sameni, A., & Rezaei, M. (2023). Effect of palm leaf and lemon peel biochar on some physical and mechanical properties of a sandy loam soil. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(1), 69-83.
DOI: 10.22098/mmws.2022.11264.1111
DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.4.6

Received: 04 August 2022, Received in revised form: 16 August 2022, Accepted: 16 August 2022, Published online: 16 August 2022

Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 1, pp. 69-83

Publisher: University of MohagheghArdabili© Author(s)





تأثیرگذاری زغال زیستی برگ نخل و تفاله لیموترش بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی یک خاک لوم شنی

عباس یکزبان^۱، سید علی اکبر موسوی^{۲*}، عبدالمجید ثامنی^۳، مهرروز رضایی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

^۲ استاد، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

^۳ دانشیار، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

^۴ استادیار، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

تخریب خاک به‌عنوان تهدیدی فزاینده در کشاورزی پایدار است. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر کاربرد سطوح مختلف، مواد اولیه و اندازه ذرات زغال زیستی بر برخی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی یک خاک درشت بافت (لوم شنی) انجام شد. پژوهش در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شیراز در سال ۱۳۹۸-۱۳۹۹ انجام شد. به‌منظور بررسی اثر منابع، سطوح و اندازه ذرات زغال زیستی بر جرم مخصوص ظاهری خاک، پایداری خاکدانه‌ها (میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها)، مقاومت فروری و مقاومت برشی خاک از دو نوع زغال زیستی برگ نخل و تفاله لیمو ترش که به مدت سه ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم‌کافت شده بودند، استفاده شد. هرکدام از زغال‌های زیستی به سه کلاس اندازه ذرات کوچک‌تر از ۰/۸، ۰/۸ تا ۲ و ۲ تا ۴ میلی‌متر تفکیک شد و در چهار سطح کاربرد ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی با خاک به همراه تیمار شاهد مورد استفاده قرار گرفت. گلدان‌ها در شرایط استاندارد و تا حدود نزدیک رطوبت ظرفیت زراعی به مدت ۱۵ ماه نگهداری شدند. نتایج نشان داد کاربرد زغال‌های زیستی سبب بهبود خصوصیات فیزیکی خاک شده است بدین ترتیب که کاهش معنادار ($p < 0.05$) جرم مخصوص ظاهری خاک از ۵/۴ تا ۱۹/۸ درصد در کاربرد سطوح ۰/۵ تا چهار درصد زغال‌های زیستی، افزایش پایداری خاکدانه از ۳۷/۶ تا ۷۳/۶ درصد و افزایش مقاومت برشی از ۳/۲ تا ۱۵ درصد در کاربرد یک تا چهار درصد زغال‌های زیستی در مقایسه با شاهد شده است. در کاربرد سطح چهار درصد زغال‌های زیستی مقاومت نفوذی پنج درصد افزایش یافت. زغال زیستی تفاله لیمو در بهبود جرم مخصوص مخصوص ظاهری خاک مؤثرتر بوده، اگرچه زغال زیستی برگ نخل بر پایداری خاکدانه‌ها و مقاومت برشی اثرگذارتر بود. اختلاف معناداری در اثر کاربرد منابع مختلف زغال زیستی بر مقاومت نفوذی خاک مشاهده نشد. صرف‌نظر از منابع زغال‌زیستی، در سطوح یکسان، ذرات ریزتر زغال زیستی (کوچک‌تر از ۰/۸ میلی‌متر)، در پایداری خاکدانه‌ها و مقاومت برشی مؤثرتر بودند، ولی ذرات درشت (۲-۴ میلی‌متر) اثر بیش‌تری بر جرم مخصوص ظاهری خاک داشتند. نتایج این پژوهش می‌تواند در انتخاب زغال‌زیستی مناسب از نظر تأثیر بر کیفیت فیزیکی و مکانیکی خاک استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: اصلاح‌کننده خاک، پایداری خاکدانه‌ها، مقاومت برشی، مقاومت فروری

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: amousavi@shirazu.ac.ir

استاد: یکزبان، ع.، موسوی، ع.ا.، ثامنی، ع.م.، و رضایی، م. (۱۴۰۲). تأثیرگذاری زغال زیستی برگ نخل و تفاله لیموترش بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی یک خاک لوم شنی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۱)، ۶۹-۸۳.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11264.1111

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.1.4.6

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۱، صفحه ۶۹ تا ۸۳

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان



۱- مقدمه

افزایش تولیدات کشاورزی، با توجه به جمعیت رو به رشد به‌منظور تامین امنیت غذایی، امری ضروری است (De Jesus Duarte et al., 2019). هم‌چنین بخش بزرگی از زمین‌های کشاورزی در اقلیم خشک و نیمه خشک با محدودیت ذخیره کربن و عناصر غذایی مواجه هستند (Karami et al., 2019). این محدودیت در خاک‌های بافت درشت و با مقدار رس کم، به‌دلیل عدم توانایی در تامین عناصر مورد نیاز رشد گیاه و قابلیت نگهداشت آب در خاک، نمایان‌تر است. لذا اصلاح ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک برای نیل به کشاورزی پایدار امری اجتناب‌ناپذیر هست. در این میان، با کاربرد زیاد کود شیمیایی به‌همراه فعالیت‌های بی‌رویه خاک‌ورزی ضمن تخریب خاک، هزینه‌های مدیریتی افزایش می‌یابد (Glaser et al., 2002)، از طرفی استفاده مستقیم از بقایای آلی به‌دلیل ناپایدار بودن (سهولت تجزیه زیستی) و عدم تعادل نسب کربن به نیتروژن (C/N)، در بلندمدت چندان کارایی قابل قبولی ندارد (Mahmood et al., 2017). در این میان، یکی از روش‌های کارآمد برای مقابله با این چالش، استفاده از زغال زیستی^۱ به‌عنوان اصلاح‌کننده آلی در خاک است، که علاوه بر ایجاد شرایط مطلوب رشد گیاهان در خاک، از طریق مدیریت پسماند آلی و صنعتی و کاهش تغییرات اقلیمی، اثرات مثبت محیط زیستی را نیز در پی دارد (Yoo et al., 2014; Gupta and Kua, 2019).

زغال زیستی ترکیب جامد غنی از کربن است که از گرماکافت بقایای آلی در دمای زیاد تحت شرایط کم یا بدون اکسیژن تولید می‌شود (Alghamdi et al., 2020). در برتری زغال زیستی در مقایسه با سایر ترکیبات آلی می‌توان به ذخیره پایدار کربن به‌دلیل مقاومت زیاد به تجزیه میکروبی (Alghamdi et al., 2020)، افزایش جمعیت میکروبی خاک (Li et al., 2020)، افزایش میزان عناصر غذایی (Kalu et al., 2021; Liu et al., 2021)، کاهش گازهای گلخانه‌ای نظیر دی‌اکسیدکربن، متان و اکسید نیتروژن (Ajayi and Horn, 2017) و اصلاح خاک‌های آلوده و آب آلوده از طریق جذب آلاینده‌ها و فلزات سنگین (Ye et al., 2017; Gupta and Kua, 2019) اشاره کرد. در این خصوص، مقدار کاربرد زغال زیستی در خاک عموماً بین ۱۰ تا ۱۰۰ تن در هکتار گزارش شده است (Zhao et al., 2016). خصوصیات فیزیکی و شیمیایی زغال زیستی با تغییر در نوع مواد اولیه، دما و مدت زمان گرمادهی، نرخ گرمادهی تغییر می‌نماید که برآیند آن منجر به تولید زغال زیستی می‌شود که از

نظر ترکیب عنصری، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، سطح ویژه، توزیع اندازه منافذ، pH، بارسطحی، عناصر قابل جذب، ظرفیت تبادل کاتیونی و قابلیت هدایت الکتریکی، منحصر به فرد است (Laird et al., 2010; Moradi Choghmarani et al., 2019a, 2019b).

ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کلیدی که زغال زیستی بر آن اثر می‌گذارد شامل پایداری خاکدانه، جرم مخصوص ظاهری، مقاومت برشی و مقاومت فروری هستند (Zhang et al., 2021)، این اثرگذاری، ارتباط مستقیمی با نوع زغال زیستی، مقدار کاربرد آن، اندازه ذرات زغال زیستی و خصوصیات بافت خاک دارد (Wong et al., 2018; Edeh et al., 2020; Razzaghi et al., 2020). کاهش مقاومت نفوذی و برشی در خاک می‌تواند به افزایش ریشه‌زایی و سهولت مدیریت خاک‌ورزی در خاک کمک کند (Obia et al., 2017). از طرفی کاهش جرم مخصوص ظاهری از طریق ایجاد منافذ درشت و به‌هم‌پیوسته، خاکدانه‌سازی را بهبود بخشیده و سبب جلوگیری از فرسایش خاک و افزایش نفوذ آب و املاح در خاک می‌شود (Liu et al., 2017).

در مطالعات اخیر توجه کم‌تری به اثر زغال زیستی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک شده و اکثر تحقیقات معطوف به جنبه‌های بیوشیمیایی خاک (Zahedifar, 2017; Zahedifar and Moosavi, 2017; Gavili et al., 2019b; Zahedifar and Moosavi, 2020; Ginebra et al., 2022; Kapoor et al., 2022) و رشد گیاه (Kapoor et al., 2022; Najafian, 2017, 2018; Gavili et al., 2019a) بوده است. از طرفی در همین مطالعات پراکنده، بیش‌ترین توجه به کاربرد مقادیر مختلف زغال زیستی بر خصوصیات هیدروفیزیکی خاک بوده و بررسی اثرات مقادیر و اندازه ذرات مختلف زغال زیستی بر شاخص‌های فیزیکی-مکانیکی خاک چه به‌صورت مستقل و چه متأثر از هم کم‌تر توجه شده است. به‌عنوان نمونه، Li et al. (2019) تاثیر چهار مقدار زغال زیستی از اندازه ذرات ۱-۲، ۲۵-۱/۱ و کوچک‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر را بر ویژگی‌های فیزیکی و فرسایشی خاک بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که ذرات ۱-۲ میلی‌متر بیش‌ترین تأثیر بر پایداری خاکدانه‌ها را داشت و زغال زیستی با ذرات کوچک‌تر از آن در کاهش رواناب و کنترل فرسایش خاک مؤثر بودند. هم‌چنین Verheijen et al. (2019) اثر زغال زیستی با ذرات ۲-۴ و ۱-۰/۰۵ میلی‌متر را مقادیر ۱، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد در دو خاک شنی و لوم شنی را بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که اگرچه ذرات ریز زغال زیستی سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری شده، ولی با افزایش اندازه ذرات زغال زیستی، مقدار کاهش در خاک لوم شنی

¹ Illage

² Biochar

روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد که در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۳- تهیه و آماده‌سازی زغال زیستی

در تولید زغال زیستی از بقایای گیاهی برگ نخل و پوست لیمو ترش (تفاله لیمو ترش) که از ضایعات گیاهی مازاد و در دسترس در استان فارس است، استفاده شد. برای تهیه زغال‌های زیستی، پس از شستن و هوا خشک نمودن بقایای اولیه، به‌منظور همگن‌سازی بقایا و به منظور کاهش خطای گرماکافت، ابتدا به ذرات کوچک‌تر خرد شده تا توزیع یکنواخت ایجاد شود. سپس بقایا درون ظروف درب‌دار فلزی ریخته شد و به مدت سه ساعت با شدت افزایش دمای سه درجه سانتی‌گراد در دقیقه در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره الکتریکی حرارت داده شدند (Liang et al., 2016). همچنین برخی ویژگی‌های زغال زیستی هم‌چون میزان کربن، نیتروژن و هیدروژن با دستگاه CHNS Analyer مدل (LEO1455vp)، قابلیت هدایت الکتریکی، pH و بازدهی تولید که به‌عنوان شاخصی از نسبت بقایای اولیه است که به زغال زیستی تبدیل می‌شود، نیز اندازه‌گیری شد که در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۴- ترکیب زغال زیستی با خاک

هرکدام از زغال‌های زیستی برگ نخل و تفاله لیمو به‌وسیله الک به سه کلاس اندازه ذرات کوچک‌تر از ۰/۸، ۰/۸-۲ و ۲-۴ میلی‌متر تفکیک شدند و از هر کدام از این کلاس اندازه ذرات، با نسبت‌های وزنی ۰ (شاهد)، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد (۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ گرم بر کیلوگرم زغال زیستی به خاک) به خاک اضافه شدند. به بیان خلاصه‌تر تیمارها شامل دو نوع مختلف از زغال زیستی، سه کلاس اندازه ذرات زغال زیستی و چهار سطح کاربرد زغال زیستی به همراه تیمار شاهد بوده است که در جدول ۲ ارائه شده است. در نهایت چهار کیلوگرم از خاک مذکور توزین شد و با نسبت‌های وزنی صفر (شاهد)، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد از هرکدام از سه کلاس اندازه ذرات، برای هر کدام از انواع زغال زیستی به‌طور یکنواخت با خاک مخلوط شد و به گلدان‌های پلاستیکی استوانه‌ای با وزن و حجم مشخص منتقل شدند. با توجه به اینکه شرایط محیطی (نور، دما و رطوبت) در تمام فضای گلخانه یکسان بود با این حال، به‌منظور به حداقل رساندن خطای آزمایش، گلدان‌ها در گلخانه به‌صورت کاملاً تصادفی چیده شدند. سپس به مدت ۱۵ ماه و تا حدود ۷۰ الی ۸۰ درصد رطوبت وزنی ظرفیت مزرعه (که قبلاً با استفاده از صفحات فشاری تعیین شده بود) به‌طور منظم آبیاری شدند. در پایان مدت آزمایش (۱۵ ماه)، ویژگی‌های مورد نظر به‌شرح زیر در نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شدند.

چشم‌گیرتر است. (Nasimi et al. (2020 اثر چهار سطح از زغال زیستی برگ نخل در زمان‌های مختلف در تخلخل و پایداری ساختمان خاک لوم رسی شنی بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که زغال زیستی با داشتن تخلخل و مقدار کربن آلی قابل توجه، سبب بهبود تخلخل و پایداری ساختمان خاک شده است. در یک بیان جامع‌تر، اثر زغال زیستی بر خصوصیات جرم مخصوص ظاهری (Githinji, 2014; De Jesus Duarte et al., 2019)، پایداری خاکدانه (Herath et al., 2013; Li et al., 2019)، مقاومت نفوذی (Busscher et al., 2010; Obia et al., 2017)، مقاومت برشی (Ahmed et al., 2017) و کنترل فرسایش خاک و رواناب (Sadeghi et al., 2016; Sadeghi et al., 2021)، بررسی شده است. با توجه به اینکه تاکنون اثر مقایسه‌ای زغال‌های زیستی تهیه شده از منابع مختلف و در سطوح و اندازه‌های مختلف بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک به‌ویژه در خاک‌های نسبتاً درشت بافت مطالعه نشده است. بر همین اساس پژوهش حاضر با هدف بهبود شاخص‌های فیزیکی و مکانیکی خاک از دو نوع زغال زیستی در سطوح و اندازه‌های مختلف ذرات زغال زیستی بر جرم مخصوص ظاهری، پایداری خاکدانه‌ها، مقاومت نفوذی و مقاومت برشی انجام شد. با توجه به نقش کلیدی شاخص‌های فیزیکی و مکانیکی خاک در حفاظت از خاک در برابر فرسایش آبی و بادی، پتانسیل تولید رواناب سطحی، فرآیندهای مرتبط با شخم، نگهداری آب در خاک، رشد و استقرار گیاه، نتایج این پژوهش می‌تواند در موارد ذکر شده راهگشا بوده و مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در منطقه باجگاه با مختصات طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۲ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۳۶ دقیقه و از آذر ۱۳۹۸ تا اسفند ۱۳۹۹ به مدت ۱۵ ماه انجام شد. این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی به‌صورت نمونه‌های گلدانی و با سه تکرار (در مجموع ۹۰ گلدان) انجام شد (شکل ۱).

۲-۲- تهیه و آماده‌سازی خاک

خاک مورد مطالعه با بافت لوم شنی از لایه سطحی تا عمق ۲۵ سانتی‌متری و از منطقه گریبانگان فسا در استان فارس که از قبل بافت آن به روش هیدرومتری تعیین شده بود، تهیه شد. نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک شده و قبل از افزودن زغال زیستی به آن از الک دو میلی‌متر عبور داده شدند. هم‌چنین به منظور اطلاع خوانندگان از ویژگی‌های خاک مورد آزمایش، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی معمول در خاک شاهد با استفاده از



شکل ۱- نمای کلی از مراحل پژوهش
Figure 1- General view of research steps

درون خاک قرار داده شد و سپس شروع به دوران پره برشی در جهت عقربه‌های ساعت کرده و تا زمان گسیختگی خاک و متوقف شدن عقربه نشان‌گر ادامه یافت. حداکثر مقدار تنش وارد شده بر خاک به‌وسیله عقربه و صفحه مدرج بالای پره برشی بر حسب مگاپاسکال ثبت شد (Khosravani et al., 2021). برای تعیین مقاومت فروروی و برشی خاک در رطوبت ظرفیت مزرعه ابتدا برای هر نمونه این پارامترها در روزهای مختلف که رطوبت خاک متفاوت است اندازه‌گیری شد. هم‌زمان نیز نمونه رطوبتی تهیه و رطوبت خاک نیز اندازه‌گیری شد. در نهایت با رسم نمودار رطوبت و مقاومت فروروی و همچنین نمودار رطوبت و مقاومت برشی مقادیر مقاومت فروروی و مقاومت برشی در رطوبت ظرفیت مزرعه از نمودار مربوط به خود محاسبه شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های خاک و زغال زیستی مورد مطالعه

Table 1- Some properties of the studied soil and biochar

زغال	زغال	خاک اولیه	خاک و زغال زیستی	ویژگی
زیستی	زیستی	(شاهد)		
تفاله لیمو	برگ نخل			
-	-	57.72	(%)	شن
-	-	33.78	(%)	سیلت
-	-	8.50	(%)	رس
-	-	28.68	(%)	رطوبت ظرفیت زراعی
0.268	0.205	1.47	(g cm ⁻³)	جرم مخصوص ظاهری
65.34	57.84	0.27	(%)	کربن آلی
2.94	2.05	-	(%)	نیترژن
2.98	2.92	-	(%)	هیدروژن
22.76	9.69	-	(%)	بازدهی تولید
9.59	7.21	8.32	(بدون واحد)	pH
6.80	3.15	0.58	(dS m ⁻¹)	قابلیت هدایت الکتریکی

pH و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱ به ۱۰ زغال زیستی به آب و عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری شده است.

۲-۵- اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک

جرم مخصوص ظاهری خاک به روش مرسوم کلوخه‌های پارافین (Blake, 1965) اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی پایداری خاکدانه‌ها نیز از روش توزیع اندازه خاکدانه‌های مرطوب به‌وسیله الک تر استفاده شد. برای این منظور ۵۰ گرم از خاک هواخشک عبور داده شده از الک هشت میلی‌متری برداشته و بر روی کاغذ صافی قرار داده شد و از زیر اشباع شدند. سپس خاک اشباع شده از آب بر روی سری الک‌های به قطر منافذ به ترتیب ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵، ۰/۰۶۳ میلی‌متر و درون سطل محتوی آب قرار گرفت و به‌وسیله الک برقی به مدت پنج دقیقه با دور ۲۵ دور در دقیقه و دامنه نوسان ۲۸ میلی‌متر الک شد. خاک باقی‌مانده بر روی هر الک به دقت جمع‌آوری و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شد و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد (Kemper and Rosenau, 1986):

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

که در آن، MWD میانگین وزنی قطر ذرات خاکدانه (میلی‌متر)، d_i میانگین قطر خاکدانه‌هایی است که بر روی هر الک باقی‌مانده است (میلی‌متر)، w_i نسبت وزنی خاکدانه در روی هر الک به وزن کل خاک و n تعداد الک به کار برده شده است. مقاومت فروروی در خاک نیز به‌وسیله دستگاه نفوذسنج جیبی (ELE International, 29-3729, Soiltest Inc.) با میله باریک استوانه‌ای شکل به قطر شش میلی‌متر و طول ۷/۵ سانتی‌متر در سه تکرار برای هر گلدان و برای رطوبت ظرفیت زراعی اندازه‌گیری شد. در این روش نفوذسنج تا قسمت علامت‌گذاری شده (حدود شش میلی‌متر) به داخل خاک فشار داده شد و مقدار مقاومت فروروی به وسیله صفحه مدرج روی دسته بر حسب مگاپاسکال به‌دست آمد (Gavili et al., 2018). همچنین، برای اندازه‌گیری مقاومت برشی لایه رویین خاک از دستگاه برش پره‌ای مدل SO843 در رطوبت ظرفیت زراعی استفاده شد. روش کار بدین صورت است که ابتدا پره برشی به‌طور کامل

منابع و سطوح زغال زیستی در سطح احتمال پنج درصد ($p < 0.05$) و برهم‌کنش سطوح و اندازه ذرات زغال زیستی در سطح احتمال یک درصد ($p < 0.01$) معنادار است.

به‌طور کلی زغال زیستی برگ نخل و تفاله لیمو سبب کاهش معنادار ($P < 0.05$) جرم مخصوص ظاهری در خاک لوم شنی به‌ترتیب به‌میزان $7/95$ و $10/11$ درصد در مقایسه با شاهد شد (شکل ۲ که در آن N و L به‌ترتیب نشان‌دهنده زغال زیستی برگ نخل و تفاله لیمو، T1 تا T5 به‌ترتیب نشان‌دهنده سطوح ۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی زغال زیستی، P1 تا P3 به‌ترتیب نشان‌دهنده کلاس‌های اندازه ذرات ۲ تا ۴، ۰/۸ تا ۲ و کوچک‌تر از ۰/۸ میلی‌متر زغال زیستی هستند). با افزایش سطوح زغال زیستی جرم مخصوص ظاهری خاک به‌طور معناداری در مقایسه با شاهد کاهش یافت، که کم‌ترین و بیش‌ترین کاهش در جرم مخصوص ظاهری مربوط به سطوح ۰/۵ و چهار درصد وزنی زغال زیستی به‌میزان به‌ترتیب $5/4$ و $19/8$ درصد بود. همچنین اختلاف بین مقادیر جرم مخصوص ظاهری در سطوح مختلف کاربرد زغال زیستی معنادار ($p < 0.05$) بود. کاهش جرم مخصوص ظاهری در اثر افزودن زغال زیستی در خاک لوم شنی در سایر پژوهش‌ها (Khademalrasoul et al., 2014; Esmaeelnejad et al., 2017; Razzaghi et al., 2020) نیز گزارش شده است.

جدول ۲- تیمارهای استفاده شده در این مطالعه

Table 2. The applied treatment in the present study

شرح حروف اختصاری	حروف اختصاری
زغال زیستی برگ نخل	N
زغال زیستی تفاله لیمو ترش	L
سطح صفر درصد وزنی زغال زیستی (شاهد)	T1
سطح 0.5 درصد وزنی زغال زیستی	T2
سطح 1 درصد وزنی زغال زیستی	T3
سطح 2 درصد وزنی زغال زیستی	T4
سطح 4 درصد وزنی زغال زیستی	T5
اندازه ذرات زغال زیستی 2-4 میلی‌متر	P1
اندازه ذرات زغال زیستی 0.8-2 میلی‌متر	P2
اندازه ذرات زغال زیستی کوچک‌تر از 0.8 میلی‌متر	P3

۲-۶- تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری نتایج به‌منظور بررسی میزان تأثیرگذاری تیمارهای مورد مطالعه بر ویژگی‌های خاک با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS انجام شد. میانگین مربوط به اثر هر یک از تیمارها به‌صورت جداگانه و هم‌چنین برهم‌کنش اثرات تیمارهای مورد بررسی (در صورت معنی‌دار بودن) با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد ($p < 0.05$) مقایسه شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- جرم مخصوص ظاهری خاک

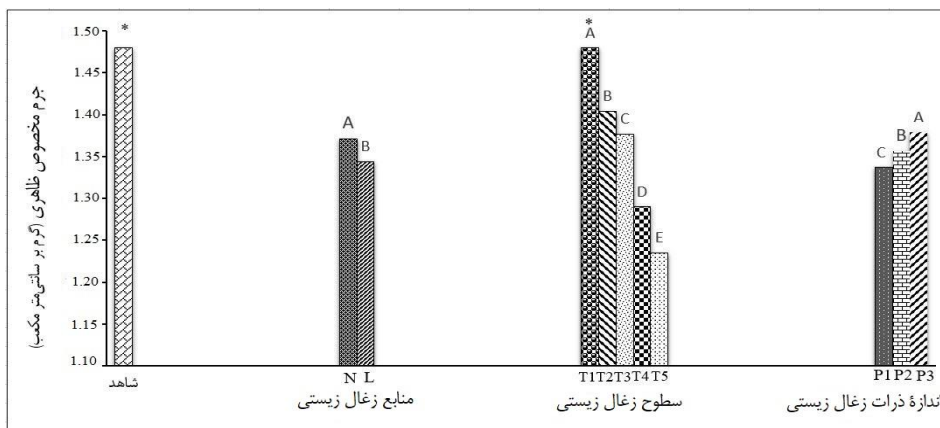
نتایج تجزیه واریانس در جدول ۳ نشان داد که اثر نوع، سطوح و اندازه ذرات زغال زیستی بر جرم مخصوص ظاهری خاک در سطح احتمال یک درصد ($p < 0.01$) معنادار است، هم‌چنین اثر برهم‌کنش

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر منابع، سطوح و کلاس اندازه ذرات زغال زیستی بر جرم مخصوص ظاهری، پایداری خاکدانه‌ها (میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها)، مقاومت فروری و مقاومت برشی در خاک لوم شنی مورد مطالعه

Table 3- Results of ANOVA for the effect of biochar types, levels, and particle size on bulk density, aggregate stability (mean weight diameter of aggregates) penetration resistance and shear strength in the studied sandy loam soil

میانگین مربعات			جرم مخصوص ظاهری (g cm ⁻³)	درجه آزادی	منابع تغییرات
مقاومت برشی (Mpa)	مقاومت فروری (Mpa)	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)			
0.0088**	0.0032 ^{ns}	0.0324**	0.0165**	1	NL منابع زغال زیستی
0.0955**	0.0089**	1.2991**	0.1662**	4	T سطوح زغال زیستی
0.0165*	0.0014 ^{ns}	0.0437**	0.0128**	2	P اندازه ذرات زغال زیستی
0.0041 ^{ns}	0.0004 ^{ns}	0.0089**	0.0028*	4	NL*T برهم‌کنش منابع و سطوح زغال زیستی
0.0007 ^{ns}	0.0002 ^{ns}	0.0017 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	2	NL*P برهم‌کنش منابع و اندازه ذرات زغال زیستی
0.0028 ^{ns}	0.0010 ^{ns}	0.0040*	0.0033**	8	T*P برهم‌کنش سطوح و اندازه ذرات زغال زیستی
0.0009 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	0.0007 ^{ns}	0.0005 ^{ns}	8	NL*T*P برهم‌کنش منابع، سطوح و اندازه ذرات زغال زیستی
0.0026	0.0021	0.0019	0.0008	60	خطا

*، ** و ^{ns} به‌ترتیب نشان‌دهنده اثر معنادار در سطوح احتمال یک و پنج درصد و عدم اختلاف معنادار آماری است.



شکل ۲- اثر تیمارهای مختلف بر جرم مخصوص ظاهری خاک

(* بیانگر عدم اختلاف معنادار آماری با شاهد است و برای هر متغیر ستون‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال پنج درصد ($p < 0.05$) اختلاف معنادار ندارند)

Figure 2- Effect of different treatment on soil bulk density

(* indicates no significant difference with control and for each variable, columns with the same capital letters are not significantly different at $p < 0.05$ according to the Duncan's Multiple Range Test)

کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک به‌طور غیرمستقیم مربوط به اثرات بهبود ویژگی‌های ساختمان و خاکدانه‌های خاک است که منافذ و تخلخل خاک را افزایش می‌دهد و در حالت مستقیم مربوط به ترکیب شدن خاک شنی با زغال زیستی است که جرم مخصوص ظاهری آن چندین برابر از جرم مخصوص ظاهری خاک کمتر است و در سطوح بالای زغال زیستی بیش‌تر نمود پیدا می‌کند. (Uzoma et al. (2011 افزایش سطح ویژه کل خاک در نتیجه افزودن زغال زیستی به خاک را عامل اصلی در کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک‌های درشت بافت عنوان کردند. از طرفی با افزودن زغال زیستی به خاک ظرفیت نگه‌داشت آب در خاک و تأمین عناصر غذایی برای فعالیت ریزوموژودات مؤثر در خاکدانه‌سازی مهیا می‌شود. با استفاده از ذرات زغال زیستی با اندازه‌های مختلف اگرچه شدت کاهش جرم

مخصوص ظاهری نسبت به کاربرد سطوح مختلف کم‌تر بود، ولی مشاهده شد با افزایش اندازه ذرات زغال زیستی جرم مخصوص ظاهری خاک شنی افزایش یافت (شکل ۲)، به طوری که این نسبت کاهش در کاربرد اندازه ذرات زغال زیستی ۲-۴، ۲-۸ و کوچک‌تر از ۰/۸ میلی‌متر به‌ترتیب به‌میزان ۱۰/۷، ۹/۱ و ۷/۳ درصد در مقایسه با شاهد بود. (Glab et al. (2016 با بررسی سه کلاس اندازه ذرات زغال زیستی در دو خاک لومی و شنی گزارش کردند که در خاک لومی اندازه ذرات بزرگ‌تر از دو میلی‌متر و در خاک شنی اندازه ذرات ۲-۱۵ میلی‌متر بیش‌ترین تاثیر را در کاهش جرم مخصوص ظاهری داشتند و کم‌ترین تاثیر مربوط به ذرات کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر در هر دو خاک بوده است که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد.

جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین اثر دو جانبه سطوح و منابع زغال زیستی و همچنین اثر دوجانبه سطوح و اندازه ذرات زغال زیستی بر جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) خاک

Table 4- Results of mean comparison for interaction of the level and type of biochar and interaction of the level and particle size of applied biochar on soil bulk density (g cm^{-3})

میانگین	سطوح (درصد وزنی)					منابع زغال زیستی
	T5 (4)	T4 (2)	T3 (1)	T2 (0.5)	T1 (شاهد)	
1.371 ^A	1.264 ^e	1.310 ^d	1.395 ^b	1.405 ^b	1.480 ^{*a}	زغال زیستی برگ نخل (N)
1.344 ^B	1.206 ^f	1.271 ^e	1.358 ^c	1.403 ^b	1.480 ^a	زغال زیستی تفاله لیمو (L)
	1.235 ^E	1.290 ^D	1.377 ^C	1.404 ^B	1.480 ^A	میانگین
میانگین	سطوح (درصد وزنی)					اندازه ذرات زغال زیستی (میلی‌متر)
	T5 (4)	T4 (2)	T3 (1)	T2 (0.5)	T1 (شاهد)	
1.337 ^C	1.183 ^g	1.260 ^e	1.362 ^c	1.403 ^b	1.480 ^a	P1 (2-4)
1.356 ^B	1.226 ^f	1.293 ^d	1.381 ^{cb}	1.398 ^b	1.480 ^a	P2 (0.8-2)
1.379 ^A	1.296 ^d	1.318 ^d	1.388 ^{cb}	1.411 ^b	1.480 ^a	P3 (< 0.8)
	1.235 ^E	1.290 ^D	1.377 ^C	1.404 ^B	1.480 ^A	میانگین

* در مورد هر اثر دوجانبه، 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 چند دامنه دانکن در سطح احتمال پنج درصد ($p < 0.05$) اختلاف معنادار ندارند.

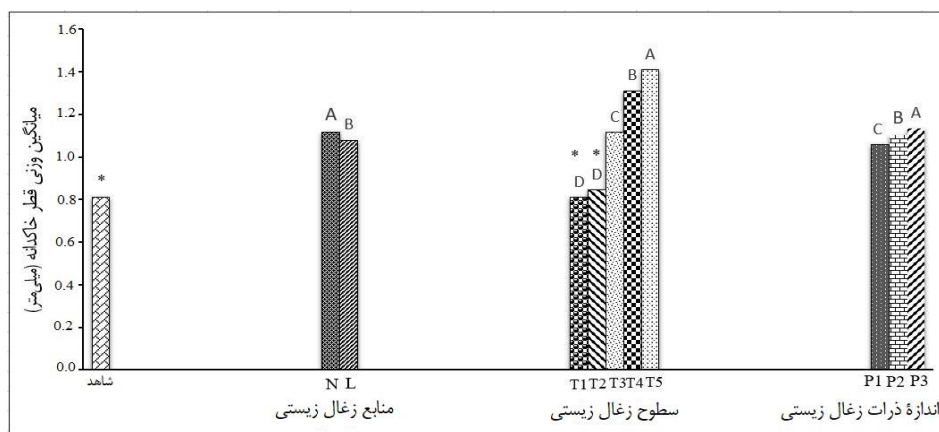
شاهد است (شکل ۳). هم‌چنین استفاده از سطوح یک، دو و چهار درصد زغال زیستی صرف نظر از نوع و اندازه زغال زیستی، سبب افزایش معنادار پایداری خاکدانه‌ها به ترتیب به میزان ۳۷/۶، ۶۱/۵ و ۷۳/۶ درصد در مقایسه با شاهد شد، ولی اختلاف معنادار آماری بین سطح ۰/۵ درصد و شاهد مشاهده نشد. هم‌چنین اختلاف بین مقادیر پایداری خاکدانه‌ها متاثر از سطوح مختلف زغال زیستی معنادار بود. نتایج Burrell et al., 2016; Gamage et al., 2016; Li et al., 2019. نیز مبنی بر افزایش پایداری خاکدانه‌ها در خاک‌های درشت بافت با پژوهش حاضر هم‌سو است. در مقابل برخی پژوهشگران تأثیر معنی‌داری در پایداری خاکدانه‌ها در خاک لوم شنی در اثر افزودن زغال زیستی مشاهده نکردند (Hardie et al., 2014). هم Burrell et al. (2016) گزارش نمودند که با افزودن زغال زیستی به خاک، غلظت نمک‌های محلول افزایش یافته که باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه پخشیده شده و سبب به هم پیوستگی ذرات خاک می‌شود. از طرفی سطوح زغال زیستی مواد آلی فعال را جذب کرده و به‌عنوان بستر مناسب فعالیت‌های میکروبی سبب افزایش خاکدانه‌سازی و به هم پیوستگی ذرات خاک می‌شود (Liang et al., 2010).

هم‌چنین از نتایج شکل ۳ مشاهده شد که با کاهش اندازه ذرات زغال زیستی در خاک شنی، پایداری خاکدانه‌های مرطوب به ترتیب به میزان ۳۰/۴، ۳۵/۷ و ۳۹/۸ درصد در اندازه‌های P3, P2, P1 در مقایسه با شاهد افزایش یافته است. ذرات ریز زغال زیستی به دلیل داشتن سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد در مقایسه با ذرات درشت نقش مؤثرتری در هم‌آوری و ترکیب ذرات خاک دارند. نتایج مقایسه میانگین اثر سطوح و منابع زغال زیستی (جدول ۵) نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین پایداری خاکدانه‌ها مربوط به سطح چهار درصد زغال زیستی برگ نخل و شاهد است. هم‌چنین اختلاف بین نوع زغال زیستی در هر سطح به استثنای سطح ۰/۵ درصد معنادار است که نشان می‌دهد در هر سطح کاربرد، زغال زیستی برگ نخل عملکرد بهتری داشته است. از مقایسه میانگین سطوح و اندازه ذرات زغال زیستی مشاهده شد که در تمام سطوح، بین اندازه ذرات ۲-۴ و ۰/۸-۲ میلی‌متر اختلاف معنادار آماری نبود، ولی این اختلاف با اندازه ذرات زغال زیستی کوچک‌تر از ۰/۸ میلی‌متر معنادار بود. از طرفی اختلاف بین T4P3 و T5P1 معنادار نشد که اهمیت انتخاب اندازه ذرات مناسب در راستای کاهش هزینه‌های مصرف و مدیریت بقایا را تداعی می‌نماید.

براساس نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش منابع و سطوح زغال زیستی (جدول ۴) کم‌ترین و بیش‌ترین کاهش در جرم مخصوص ظاهری مربوط به شاهد و سطح چهار درصد زغال زیستی تفاله لیمو (LT5) بود. هم‌چنین در هر کدام از سطوح به استثنای سطح ۰/۵ درصد وزنی، اختلاف بین دو نوع زغال زیستی معنادار ($p < 0.05$) آماری بود و جرم مخصوص ظاهری در تفاله لیمو کم‌تر بود، که می‌تواند در نتیجه ساختار ذرات زغال زیستی تفاله لیمو باشد که شبیه‌تر (کروی) به ذرات شن بوده و در توزیع با ذرات شن سبب افزایش تخلخل درشت و تهویه‌ای می‌شود. هم‌چنین مقایسه میانگین برهم‌کنش سطوح و اندازه ذرات زغال زیستی نشان داد که تا سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری ($p < 0.05$) بین اندازه‌های مختلف زغال زیستی بر جرم مخصوص ظاهری مشاهده نشد، ولی در سطوح دو و چهار درصد، استفاده از ذرات اندازه ۴-۲ میلی‌متر به علت درشت بودن و قرار گرفتن در فضای بین ذرات و ایجاد تخلخل درشت، در کاهش جرم مخصوص ظاهری موثر بودند. در صورتی که ذرات ریز زغال زیستی عموماً در منافذ درشت خاک، جایی که امکان حضور ذرات درشت زغال زیستی را نیست پر کرده و پیوند بین ذرات خاک را بهبود می‌بخشد. (De Jesus Duarte et al., 2019) گزارش نمودند که ذرات ریز و پودری زغال زیستی در خاک‌های درشت بافت، منافذ و کانال‌های تهویه‌ای را پر و مسدود کرده و با عدم تعادل بین فاز مایع و هوا سبب کاهش تخلخل درشت می‌شود. مشابه چنین نتایجی در پژوهش‌های سایر پژوهشگران (Laird et al., 2010; Glab et al., 2016) نیز گزارش شده است. Zhang et al. (2021) بیان نمودند ذرات درشت زغال زیستی همانند ذرات شن ولی با وزن کم‌تر، جایگزین ذرات شن می‌شوند، از طرفی مقادیر قابل توجهی از فضای بین ذرات ایجاد می‌شود؛ زیرا ذرات درشت خاک نمی‌توانند به‌طور کامل ذرات زغال زیستی را احاطه نمایند.

۳-۲- پایداری خاکدانه‌ها (میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها)

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که اثر منابع، سطوح و اندازه ذرات زغال زیستی بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در سطح احتمال یک درصد ($p < 0.01$) معنادار است، هم‌چنین برهم‌کنش منابع و سطوح زغال زیستی و برهم‌کنش سطوح و اندازه ذرات زغال زیستی به ترتیب در سطوح یک و پنج درصد معنی‌دار است. استفاده از زغال زیستی برگ نخل در مقایسه با زغال زیستی تفاله لیمو سبب افزایش بیش‌تر پایداری خاکدانه‌های مرطوب شد، که این میزان افزایش به ترتیب ۳۷/۷ و ۳۳ درصد در زغال زیستی برگ نخل و تفاله لیمو در مقایسه با



شکل ۳- اثر تیمارهای مختلف بر پایداری خاکدانه (میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها)

(*یپانگر عدم اختلاف معنادار آماری با شاهد است و برای هر متغیر ستون‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال پنج درصد ($p < 0.05$) اختلاف معنی‌دار ندارند).

Figure 3- The effect of different treatment on aggregate stability

(mean weight diameter aggregate) (*indicates no significant difference with control and for each variable, columns with the same capital letters are not significantly different at $p < 0.05$ according to the Duncan's Multiple Range Test)

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین اثر دو جنبه سطوح و منابع زغال زیستی و همچنین اثر دوجانبه سطوح و اندازه ذرات زغال زیستی بر پایداری خاکدانه‌ها (میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، mm)

Table 5-Results of mean comparison for intraction of the level and type of biochar and intraction of the level and particle size of applied biochar on aggregate stability (mean weight diameter, mm)

میانگین	سطوح (درصد وزنی)					منابع زغال زیستی
	T5 (4)	T4 (2)	T3 (1)	T2 (0.5)	T1 (شاهد)	
1.117 ^A	1.432 ^a	1.340 ^c	1.164 ^e	0.837 ^g	0.811 ^{*g}	زغال زیستی برگ نخل (N)
1.079 ^B	1.384 ^b	1.280 ^d	1.069 ^f	0.850 ^g	0.811 ^g	زغال زیستی تفاله لیمو (L)
	1.408 ^A	1.310 ^B	1.116 ^C	0.844 ^D	0.811 ^D	میانگین
میانگین	سطوح (درصد وزنی)					اندازه ذرات زغال زیستی (میلی‌متر)
	T5 (4)	T4 (2)	T3 (1)	T2 (0.5)	T1 (شاهد)	
1.058 ^C	1.376 ^b	1.261 ^d	1.040 ^f	0.801 ^h	0.811 ^h	P1 (2-4)
1.101 ^B	1.407 ^{ba}	1.312 ^c	1.133 ^e	0.845 ^{hg}	0.811 ^h	P2 (0.8-2)
1.134 ^A	1.441 ^a	1.357 ^{bc}	1.176 ^e	0.885 ^g	0.811 ^h	P3 (< 0.8)
	1.408 ^A	1.310 ^B	1.116 ^C	0.844 ^D	0.811 ^D	میانگین

* در مورد هر اثر دوجانبه، 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 چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

اگرچه با افزایش سطوح زغال زیستی از یک تا دو درصد، اندکی مقاومت فروری افزایش یافت ولی این اختلاف به استثنای سطح چهار درصد با مقادیر شاهد تفاوت معنادار آماری نداشت. در سطح چهار درصد زغال زیستی، مقاومت فروری به میزان پنج درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. این افزایش می‌تواند در نتیجه افزایش ظرفیت نگهداشت آب در خاک در نقطه رطوبت ظرفیت مزرعه باشد که مولکول‌های آب در پیوستگی ذرات شن نقش داشته‌اند. از طرفی مقدار زیاد زغال زیستی که نوعی از بقایای آلی است در کنار فراهمی رطوبت در طول مدت انکوباسیون سبب ایجاد لایه‌ای سله و جلیک مانند در این سطح از کاربرد زغال زیستی شده بود که می‌توانسته به صورت کمرنگ بر این افزایش مقاومت نفوذی در خاک لوم شنی مؤثر باشد.

۳-۳- مقاومت فروری خاک

بر اساس نتایج جدول ۳ به استثنای اثر سطوح زغال زیستی بر مقاومت فروری که در سطح احتمال یک درصد ($p < 0.05$) معنادار است، سایر اثرات اصلی و برهم‌کنش‌های آن‌ها از منظر آماری معنی‌دار نبود. مشابه چنین نتایجی در پژوهش‌های سایرین (Eastman et al., 2011; Rogovska et al., 2014; Obia et al., 2017) نیز گزارش شده است. که با بررسی ترکیبی از زغال زیستی‌ها با اندازه ذرات کوچک‌تر از ۰/۵ میلی‌متر تا پنج میلی‌متر با سطوح ۱/۵ تا چهار درصد، تفاوت معناداری در تغییرات مقاومت فروری خاک لوم شنی مشاهده نکردند. از طرفی Mukherjee et al. (2014) گزارش کردند که زغال زیستی بر مقاومت فروری خاک لومی در سال اول تاثیر معنادار نداشته و حتی در سال دوم این مقاومت افزایش یافت. بر اساس نتایج شکل ۴

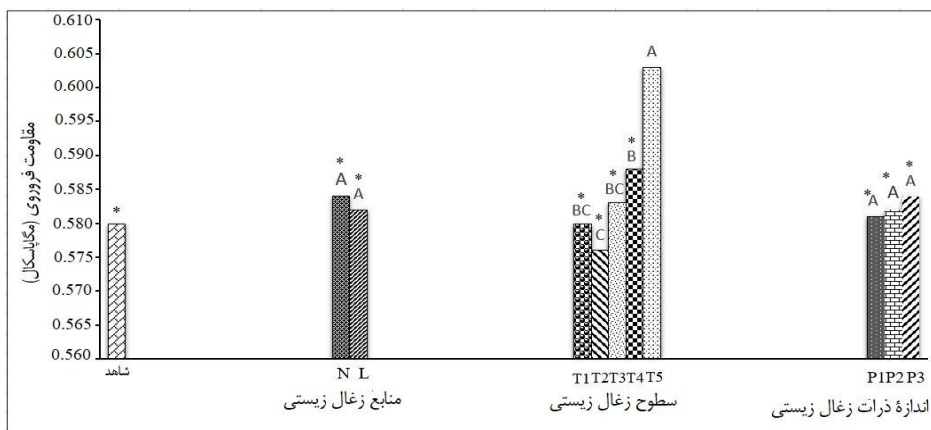
۳-۴- مقاومت برشی خاک

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد اثر منابع، سطوح بر مقاومت برشی در سطح احتمال یک درصد ($p < 0.01$) و اندازه ذرات زغال زیستی در سطح احتمال پنج درصد ($p < 0.05$) معنادار بود. همچنین اثرات معناداری در برهم‌کنش‌ها مشاهده نشد. براساس نتایج شکل ۵ استفاده از زغال زیستی برگ نخل و تفاله لیمو ترش، مقاومت برشی در خاک لوم شنی را افزایش داد، که این افزایش در کاربرد زغال زیستی برگ نخل و تفاله لیمو به ترتیب به میزان $7/3$ و $4/3$ درصد در مقایسه با شاهد بود. همچنین استفاده از سطوح مختلف زغال زیستی به استثنای سطح $0/5$ درصد (که معنادار نبود) سبب افزایش معنادار مقاومت برشی خاک لوم شنی به ترتیب به میزان 15 ، $11/3$ و $3/2$ درصد در سطوح چهار، دو و یک درصد شد. در نتایج مشابه (Khademalrasoul et al. (2014) با کاربرد مقدار 500 مگاکرم بر هکتار از ترکیب زغال زیستی با کود خاکی گزارش کردند که مقاومت برشی افزایش یافته است. ایشان بیان کردند که ذرات ریز زغال زیستی درون فضای خاکدانه‌ها به راحتی قرار گرفته و ارتباط بین ذرات در خاک لوم شنی را بهبود بخشیده و سبب افزایش مقاومت برشی می‌شود، که این امکان در خاکدانه‌های ریز به دلیل درشت بودن ذرات زغال زیستی میسر نیست. همچنین (Ajayi and Horn (2017) با افزودن ترکیبات آلی با نسبت 100 گرم بر کیلوگرم خاک، افزایش مقاومت برشی را گزارش کردند و بیان نمودند افزودن زغال زیستی به خاک سبب بهبود به هم‌پیوستگی و زاویه اتصال داخلی ذرات می‌شود. از طرفی استفاده از ذرات زغال زیستی با اندازه‌های $2-4$ و $2-8/0$ میلی‌متر اگرچه سبب افزایش معنادار حدود $4/6$ درصدی مقاومت برشی در مقایسه با شاهد شد ولی اختلاف معنادار آماری بین این دو کلاس اندازه ذرات مشاهده نشد. همچنین استفاده از ذرات زغال زیستی کوچک‌تر از $0/8$ میلی‌متر مقاومت برشی را به طور معنادار به میزان $8/4$ درصد افزایش داد.

۴- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی زغال زیستی به‌عنوان یک نوع از ترکیبات آلی که سازگاری شگرفی با محیط زیست دارد به‌دلیل ذخیره پایدار کربن و اثرات مثبت آن بر ویژگی‌های بیوشیمیایی و فیزیکی خاک، در کشاورزی پیشرفته مورد توجه است. بر اساس نتایج این پژوهش، کاربرد زغال زیستی در خاک اثر معناداری بر کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک و همچنین افزایش معناداری در پایداری خاکدانه‌ها و مقاومت برشی داشت، که بهبود خصوصیات فیزیکی و

مکانیکی خاک می‌تواند بر حفاظت خاک در مقابل فرسایش آبی و بادی اثرگذار باشد. از طرفی اگرچه در سطح کاربرد چهار درصد زغال زیستی، مقاومت فروروی به میزان معنادار پنج درصد افزایش یافت ولی تغییرات قابل توجهی در این ویژگی مشاهده نشد. زغال زیستی برگ نخل در افزایش پایداری خاکدانه‌ها و مقاومت برشی نقش پررنگ‌تری داشت، از طرفی زغال زیستی تفاله لیمو به‌دلیل ساختار شبیه با ذرات شن اثر بیش‌تری در کاهش جرم مخصوص ظاهری داشت. همچنین با افزایش سطوح زغال زیستی به چهار درصد به‌عنوان موثرترین سطح کاربرد زغال زیستی، مقادیر جرم مخصوص ظاهری $19/8$ درصد کاهش و پایداری خاکدانه‌ها و مقاومت برشی به ترتیب $73/6$ و 15 درصد افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد به‌طور کلی با کاهش اندازه ذرات زغال زیستی از چهار میلی‌متر به کوچک‌تر از $0/8$ میلی‌متر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و مقاومت برشی به‌طور معناداری افزایش یافت، ولی میانگین جرم مخصوص ظاهری با بزرگ‌تر شدن اندازه ذرات (ذرات $4-2$ میلی‌متر) کاهش یافت. بر اساس نتایج فوق می‌توان نتیجه‌گیری کرد که انتخاب حالتی بهینه از منابع، سطوح و اندازه ذرات زغال زیستی به‌عنوان اصلاح‌کننده آلی خاک می‌تواند ضمن کاهش هزینه‌های مدیریت کشاورزی، حداکثر بهره‌وری در تولیدات کشاورزی را به‌دنبال داشته باشد. در این پژوهش به‌طور کلی مشخص شد در شرایط یکسان استفاده از سطح دو درصد زغال زیستی برگ نخل با اندازه ذرات کوچک‌تر از $0/8$ میلی‌متر در خاک لوم شنی مفید و منطقی به نظر می‌رسد. البته باید در نظر داشت رفتار زغال زیستی صرفاً محدود به ویژگی‌های بررسی شده در این پژوهش نیست و تغییر در شرایط تولید زغال زیستی (گرماکافت) سبب تغییر در ویژگی‌های زغال زیستی می‌شود. بنابراین، پیشنهاد می‌شود علاوه بر اثرات مورد مطالعه، اثرات ویژگی‌های مبتنی بر فرآیند تولید زغال زیستی همچون دما و مدت زمان گرماکافت، در زمان‌های مختلف بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک‌های مختلف و در شرایط مزرعه بررسی شود تا اطلاعات جامع‌تری از مقادیر بهینه زغال زیستی به‌ویژه در مقیاس مزرعه، به‌منظور اصلاح خاک به‌دست آید.

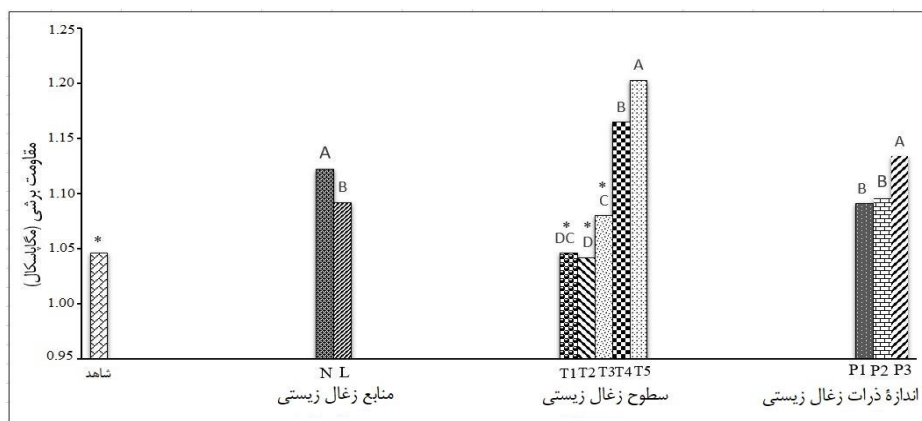


شکل ۴- اثر تیمارهای مختلف بر مقاومت فروری

*بیانگر عدم اختلاف معنادار آماری با شاهد است و برای هر متغیر ستون‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال پنج درصد ($p < 0.05$) اختلاف معنادار ندارند.

Figure 4- The effect of different treatment on penetration resistance

(* indicates no significant difference with control and for each variable, columns with the same capital letters are not significantly different at $p < 0.05$ according to the Duncan's Multiple Range Test).



شکل ۵- اثر تیمارهای مختلف بر مقاومت برشی

*بیانگر عدم اختلاف معنادار آماری با شاهد است و برای هر متغیر ستون‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون چند دامنه دانکن در سطح احتمال پنج درصد ($p < 0.05$) اختلاف معنادار ندارند.

Figure 5- The effect of different treatment on shear strength

(* indicates no significant difference with control and for each variable, columns with the same capital letters are not significantly different at $p < 0.05$ according to the Duncan's Multiple Range Test).

کریمی، ش.، یثربی، ج.، صفرزاده شیرازی، ص.، رونقی، ع.، و قاسمی، ر. (۱۳۹۸). مقایسه اثر چند ماده آلی و بیوچار آن‌ها بر برخی ویژگی‌های خاک. پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، ۳۳(۳)، ۴۰۱-۴۱۴.

نسیمی، پ.، کریمی، ا.، و گرامی، ز. (۱۳۹۹). اثر بلندمدت بیوچار حاصل از برگ خرما بر تخلخل و پایداری ساختمان خاک لوم رسی شنی. پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، ۳۴(۲)، ۱۹۹-۲۱۴.

منابع

- خسروانی، پ.، موسوی، س.ع.ا.، و باقرنژاد، م. (۱۴۰۰). تغییرات مکانی مقاومت فروری و برشی خاک و اثر نوع کاربری و واحد فیزیوگرافی بر آن‌ها. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۲(۴)، ۱۰۴۱-۱۰۵۷.
- 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.
- Ajayi, A.E., & Rainer, H.O.R.N. (2017). Biochar-induced changes in soil resilience: effects of soil texture and biochar dosage. *Pedosphere*, 27(2), 236-247.
- Ajayi, A.E., Holthusen, D., & Horn, R. (2016). Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils. *Soil and Tillage Research*, 155, 166-175.

- Alghamdi, A.G., Alkhasha, A., & Ibrahim, H.M. (2020). Effect of biochar particle size on water retention and availability in a sandy loam soil. *Journal of Saudi Chemical Society*, 24(12), 1042-1050.
- Blake, G.R. (1965). Bulk density in Methods of Soil Analysis. *Agronomy*, 9, Part 1, C. A. Black, 374-390.
- 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.
- Busscher, W.J., Novak, J.M., Evans, D.E., Watts, D.W., Niandou, M.A.S., & Ahmedna, M. (2010). Influence of pecan biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand. *Soil Science*, 175(1), 10-14.
- 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.
- Eastman, C.M. (2011). Soil physical characteristics of an Aeric Ochraqualf amended with Biochar. Ph.D. Thesis, The Ohio State University, Columbus, US.
- 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.
- Esmaelnejad, L., Shorafa, M., Gorji, M., & Hosseini, S.M. (2017). Impacts of woody biochar particle size on porosity and hydraulic conductivity of biochar-soil mixtures: an incubation study. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(14), 1710-1718.
- Gamage, D.V., Mapa, R.B., Dharmakeerthi, R.S., & Biswas, A. (2016). Effect of rice-husk biochar on selected soil properties in tropical Alfisols. *Soil Research*, 54(3), 302-310.
- Gavili, E., Moosavi, A.A., & Kamkar Haghighi, A. A. (2019a). Does biochar mitigate the adverse effects of drought on the agronomic traits and yield components of soybean? *Industrial Crops and Products*, 128, 445-454.
- Gavili, E., Moosavi, A.A., & Zahedifar, M. (2019b). Integrated effects of cattle manure-derived biochar and soil moisture conditions on soil chemical characteristics and soybean yield. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65, 1758-1774.
- 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.
- Githinji, L. (2014). Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(4), 457-470.
- Ginebra, M., Muñoz, C., Calvelo-Pereira, R., Doussoulin, M., & Zagal, E. (2022). Biochar impacts on soil chemical properties, greenhouse gas emissions and forage productivity: A field experiment. *Science of the Total Environment*, 806, 150465.
- Glab, T., Palmowska, J., Zaleski, T., & Gondek, K. (2016). Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. *Geoderma*, 281, 11-20.
- Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219-230.
- Gupta, S., & Kua, H.W. (2019). Carbonaceous micro-filler for cement: Effect of particle size and dosage of biochar on fresh and hardened properties of cement mortar. *Science of The Total Environment*, 662, 952-962.
- Hardie, M., Clothier, B., Bound, S., Oliver, G., & Close, D. (2014). Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant and Soil*, 376(1), 347-361.
- Herath, H.M.S.K., Camps-Arbestain, M., & Hedley, M. (2013). Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol. *Geoderma*, 209, 188-197.
- Kalu, S., Simojoki, A., Karhu, K., & Tammeorg, P. (2021). Long-term effects of softwood biochar on soil physical properties, greenhouse gas emissions and crop nutrient uptake in two contrasting boreal soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 316, 107454.
- Kapoor, A., Sharma, R., Kumar, A., & Sepehya, S. (2022). Biochar as a means to improve soil fertility and crop productivity: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 1-9.
- Karami, S., Yasrebi, J., Safarzadeh Shirazi, S., Ronaghi, A., & Ghasemi-Fasaee, R. (2019). Comparison of the Effects of Some Organic Compounds and Their Biochar on Some Soil Properties. *Iranian Journal of Soil Research*, 33(3), 401-414 (in Persian).
- 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.
- Khademalrasoul, A., Naveed, M., Heckrath, G., Kumari, K.G.I.D., de Jonge, L.W., Elsgaard, L., Vogel, H.J., & Iversen, B.V. (2014). Biochar effects on soil aggregate properties under no-till maize. *Soil Science*, 179(6), 273-283.
- 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 Persian).
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., & Karlen, D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3-4), 436-442.
- Li, X., Wang, T., Chang, S.X., Jiang, X., & Song, Y. (2020). Biochar increases soil microbial biomass but has variable effects on microbial diversity: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 749, 141593.
- Li, Y., Zhang, F., Yang, M., & Zhang, J. (2019). Effects of adding biochar of different particle sizes on hydro-erosional processes in small scale laboratory rainfall experiments on cultivated loessial soil. *Catena*, 173, 226-233.
- Liang, B., Lehmann, J., Sohi, S.P., Thies, J.E., O'Neill, B., Trujillo, L., Gaunt, J., Solomon, D., Grossman, J., Nevas, E.G., & Luizao, F.J. (2010). Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Organic Geochemistry*, 41(2), 206-213.
- 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, Q., Liu, B., Zhang, Y., Lin, Z., Zhu, T., Sun, R., Wang, X., Ma, J., Bei, Q., Liu, G., Lin, X., & Xie, Z. (2017). Can biochar alleviate soil compaction stress on wheat growth and mitigate soil N₂O emissions? *Soil Biology and Biochemistry*, 104, 8-17.
- Liu, X., Wei, Z., Ma, Y., Liu, J., & Liu, F. (2021). Effects of biochar amendment and reduced irrigation on growth, physiology, water-use efficiency and nutrients uptake of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) on two different soil types. *Science of the Total Environment*, 770, 144769.
- Mahmood, F., Khan, I., Ashraf, U., Shahzad, T., Hussain, S., Shahid, M., Abid, M., & Ullah, S. (2017). Effects of organic and inorganic manures on maize and their residual impact on soil physico-chemical properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(1), 22-32.
- Moradi-Choghamarani, F., Moosavi, A.A., & Baghernejad, M. (2019a). Determining organo-chemical composition of sugarcane bagasse-derived biochar as a function of pyrolysis temperature using proximate and Fourier transform infrared analyses. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138, 331-342.
- Moradi-Choghamarani, F., Moosavi, A.A., Sepaskhah, A.R., & Baghernejad, M. (2019b). Physico- hydraulic properties of sugarcane bagasse-derived biochar: the role of pyrolysis temperature. *Cellulose*, 26, 7125-7143.
- Mukherjee, A., Lal, R., & Zimmerman, A.R. (2014). Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. *Science of the Total Environment*, 487, 26-36.
- Nasimi, P., Karimi, A., & Gerami, Z. (2020). Long-Term Effects of Palm Leaf Biochar on the Porosity and Structure Stability of a Sandy Clay Loam Soil. *Iranian Journal of Soil Research*, 34(2), 199-214 (in Persian).
- Obia, A., Børresen, T., Martinsen, V., Cornelissen, G., & Mulder, J. (2017). Effect of biochar on crust formation, penetration resistance and hydraulic properties of two coarse-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 170, 114-121.
- Razzaghi, F., Obour, P.B., & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361, 114055.
- Rogovska, N., Laird, D.A., Rathke, S.J., & Karlen, D.L. (2014). Biochar impact on Midwestern Mollisols and maize nutrient availability. *Geoderma*, 230, 340-347.
- Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., & Harchegani, M.K. (2016). Controllability of runoff and soil loss from small plots treated by vinasse-produced biochar. *Science of the Total Environment*, 541, 483-490.
- Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., Kiani-Harchegani, M., Younesi, H., Sadeghi, P., Angulo-Jaramillo, R., & Lassabatere, L. (2021). The hydrologic behavior of Loess and Marl soils in response to biochar and polyacrylamide mulching under laboratorial rainfall simulation conditions. *Journal of Hydrology*, 592, 125620.
- Sadeghi, S.H.R., Kiani-Harchegani, M., Hazbavi, Z., Sadeghi, P., Angulo-Jaramillo, R., Lassabatere, L., & Younesi, H. (2020). Field measurement of effects of individual and combined application of biochar and polyacrylamide on erosion variables in loess and marl soils. *Science of the Total Environment*, 728, 138866.
- Uzoma, K.C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., & Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management*, 27(2), 205-212.
- Verheijen, F.G., Zhuravel, A., Silva, F.C., Amaro, A., Ben-Hur, M., & Keizer, J.J. (2019). The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam

- soil in a column experiment. *Geoderma*, 347, 194-202.
- Wong, J.T.F., Chen, Z., Wong, A.Y.Y., Ng, C.W. W., & Wong, M.H. (2018). Effects of biochar on hydraulic conductivity of compacted kaolin clay. *Environmental Pollution*, 234, 468-472.
- Ye, S., Zeng, G., Wu, H., Zhang, C., Dai, J., Liang, J., Yu, J., Ren, X., Yi, H., Cheng, M., & Zhang, C. (2017). Biological technologies for the remediation of co-contaminated soil. *Critical Reviews in Biotechnology*, 37(8), 1062-1076.
- Yoo, G., Kim, H., Chen, J., & Kim, Y. (2014). Effects of biochar addition on nitrogen leaching and soil structure following fertilizer application to rice paddy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 78(3), 852-860.
- Zahedifar, M., & Moosavi, A.A. (2020) Assessing cadmium availability of contaminated saline-sodic soils subjected to biochar using the adsorption isotherm models. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66, 1735-1752.
- Zahedifar, M., & Moosavi, A.A. (2017). Modeling desorption kinetics of the native and applied zinc in biochar-amended calcareous soils of different land uses. *Environmental Earth Sciences*, 76, 567.
- Zahedifar, M., & Najafian, Sh. (2017). *Ocimum basilicum* L. growth and nutrient status as influenced by biochar and potassium-nano-chelate fertilizers. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(5), 638-650.
- Zahedifar, M. (2017). Sequential extraction of zinc in the soils of different land use types as influenced by wheat straw derived biochar. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 22-31.
- Zahedifar, M. (2020). Iron fractionation in the calcareous soils of different land uses as influenced by biochar. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 2321-2330.
- Zahedifar, M., & Najafian, Sh. (2018). Productivity, essential oil components and herbage yield, of Sweet Basil as a function of biochar and potassium-nano chelate. *Essential Oil of Bearing Plants*, 21, 886-894.
- Zhang, Y., Wang, J., & Feng, Y. (2021). The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: A review. *Catena*, 202, 105284.
- Zhao, J., Ren, T., Zhang, Q., Du, Z., & Wang, Y. (2016). Effects of biochar amendment on soil thermal properties in the North China Plain. *Soil Science Society of America Journal*, 80(5), 1157-1166.