

The effect of hydrochar particle size on the physical and hydraulic properties of sandy loam soil

Reza Allahy Ashloblagh^a, Hamid Zareabyaneh^{b*}, Atefeh Azadifar^c

1- Master student, Department of Water Science, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: reza.elahi184@gmail.com

2- Professor, Department of Water Science, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: zare@basu.ac.ir

3- PhD, Department of Water Science, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: a.azadifar20@yahoo.com

The conversion of plant biomass into hydrochar is recommended as a strategy to enhance the physical and hydraulic properties of soil. The objective of this study was to investigate the influence of the particle size of hydrochar from sunflower stems on physical and hydraulic properties of soil. To evaluate the physical and hydraulic characteristics of soil, a mixture of 3% by weight of three particle sizes (0-0.5, 0.5-1, and 1-2 mm) of sunflower stem hydrochar was combined with sandy-loam soil. Parameters such as bulk density, porosity, saturated moisture, field capacity, available water, permanent wilting point, discharge, velocity, hydraulic conductivity, pore-water velocity and moisture characteristics curve were measured. The results indicated that the particle size of sunflower stem hydrochar had a significant effect on the physical and hydraulic characteristics of the soil. The most influential factor on the measured parameters was the hydrochar with a particle size of 0-0.5 mm, which led to a 21.36% reduction in bulk density, and increases of 30.58%, 26.73%, 49.27%, 118.7%, and 34.10% in porosity, saturated moisture, field capacity, permanent wilting point, and available water, respectively, compared to the control soil. The application of hydrochar with a 0-0.5 mm particle size also resulted in a 65.42% reduction in discharge, velocity, hydraulic conductivity, and a 73.65% reduction in pore-water velocity compared to the control soil. Analysis of the moisture characteristics curve indicated that hydrochar increased mesopore and micropore, consequently enhancing soil water retention across various suction levels, especially at suctions ranging from 0 to 2000 cm.

Keywords: available water, bulk density, hydrochar, particle size, saturated hydraulic conductivity.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

A significant portion of Iran is characterized by arid and semi-arid regions. To enhance soil fertility in these areas, the addition of organic matter is highly recommended. Organic matter decomposes rapidly within the soil, resulting in the release of carbon dioxide, water, and various other substances. The rising emissions of greenhouse gases, particularly carbon dioxide, into the atmosphere are driving global warming and climate change. Currently, the search for solutions to mitigate this phenomenon has garnered significant attention from scientists worldwide. The conversion of plant biomass into hydrochar is recommended as a strategy to prevent the increase in global warming and to enhance the physical, chemical, and hydraulic properties of soil.

Objective:

According to our knowledge, there has been no research conducted on the effect of particle size of hydrochar derived from sunflower stems on the physical and hydraulic characteristics of soil. Therefore, the objective of this study was to investigate the influence of the particle size of hydrochar from sunflower stems on some physical and hydraulic properties of soil under laboratory conditions.

Material and method:

This research was conducted in the drainage research laboratory at the faculty of agriculture, Bu-Ali-Sina university, Hamadan, in the year 2023. The study investigated various soil properties, including bulk density, porosity, saturated moisture content, field capacity, permanent wilting point, available water, discharge, velocity, hydraulic conductivity and pore-water velocity. To evaluate the physical and hydraulic characteristics of soil, a mixture of 3% by weight of three particle sizes (0-0.5 mm, 0.5-1 mm, and 1-2 mm) of sunflower stem hydrochar was combined with sandy loam soil. The hydrochar produced resulted from a hydrothermal process on sunflower stems at a temperature of 200 degrees Celsius for 20 hours under 18 bar pressure. PVC columns with a length of 30 cm and a diameter of 5.95 cm were utilized for the experiments. The volume of sunflower stalk hydrochar necessary to fill each column to a height of 10 cm was calculated and subsequently mixed with the soil separately. Then, to assess the effect of hydrochar on the soil, the soil columns were maintained for 120 days under field capacity conditions ($FC = 0.23$) in a laboratory environment. Irrigations were conducted every 4 days over a period of 120 days.

Result and Discussion:

The results indicated that the particle size of sunflower stem hydrochar had a significant effect at the 1% probability level on the physical, hydraulic, and moisture characteristics of the soil. The most influential factor on the measured parameters was the hydrochar with a particle size of 0-0.5 mm, which led to a 21.36% reduction in bulk density, and increases of 30.58%, 26.73%, 49.27%, 118.7%, and 34.10% in porosity, saturated moisture, field capacity moisture, permanent wilting point moisture, and available water, respectively, compared to the control soil. The variations in bulk density and porosity of soil treatments containing hydrochar can be attributed to the spherical morphology of the hydrochar structure and its deformability. The application of hydrochar with a 0-0.5 mm particle size also resulted in a 65.42% reduction in discharge, velocity, hydraulic conductivity, and a 73.65% reduction in pore velocity compared to the control soil. Hydrochar primarily influences hydraulic conductivity by modifying the macropores within the amended soil. Analysis of the moisture characteristics curve indicated that hydrochar, regardless of particle size, increased mesopore and micropore, consequently enhancing soil water retention across various suction levels, especially at suctions ranging from 0 to 2000 cm. The water retention curve in soil is influenced by various factors, including organic matter content, soil porosity, and bulk density. The application of hydrochar with a fine particle size led to the development of microspore, thereby enhancing water retention.

Author Contributions

R. Allahy Ashloblagh: Investigation, Methodology, Gathering and analysis of data, Writing and editing the manuscript. **H. Zareabyaneh:** Conceptualization, Investigation, Methodology, Supervision, Funding acquisition, Validation, Writing and editing the manuscript. **A. Azadifar:** Conceptualization, Investigation, Methodology, Supervision, Validation, Writing and editing the manuscript. The final text was reviewed and approved by all authors. The authors say they have no competing interests.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers and editor for their critical comments that helped to improve the paper. The authors gratefully acknowledge the support and facilities provided by the Department of water Science, University of Bu-Ali Sina University, Iran.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

اثر اندازه ذرات هیدروچار بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک لوم‌شنی

رضا اللهی آشلوبلاغ^۱ | حمید زارع ایبانه^{۲*} | عاطفه آزادی‌فر^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه:

reza.elahi184@gmail.com

۲. استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران: رایانامه:

zare@basu.ac.ir

۳. دانش‌آموخته دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: a.azadifar20@yahoo.com

چکیده

تبدیل زیست‌توده گیاهی به هیدروچار به عنوان راه‌حلی برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک توصیه می‌شود. هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر اندازه ذرات هیدروچار ساقه آفتابگردان بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک بود. به منظور بررسی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی از ترکیب ۳ درصد وزنی سه اندازه ۰-۰/۵، ۰/۵-۱ و ۱-۲ میلی‌متر ذرات هیدروچار ساقه آفتابگردان با یک خاک لوم‌شنی استفاده شد. پارامترهای جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه، آب قابل دسترس، رطوبت در نقطه پژمردگی دائم، شدت جریان، سرعت جریان، هدایت هیدرولیکی، سرعت آب حفره‌ای و منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که اندازه ذرات هیدروچار ساقه آفتابگردان تأثیر معنی‌دار بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک دارد. اثرگذارترین عامل بر پارامترهای اندازه‌گیری شده مربوط به هیدروچار با اندازه ذرات ۰-۰/۵ میلی‌متر بود که باعث کاهش ۲۱/۳۶ درصدی جرم مخصوص ظاهری، افزایش ۳۰/۵۸، ۲۶/۷۳، ۴۹/۲۷، ۱۱۸/۷ و ۳۴/۱۰ درصدی تخلخل، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت پژمردگی دائم و آب قابل دسترس نسبت به خاک شاهد شد. کاربرد هیدروچار با اندازه ذرات ۰-۰/۵ میلی‌متر همچنین موجب کاهش ۶۵/۴۲ درصدی شدت جریان، سرعت جریان، هدایت هیدرولیکی و کاهش ۷۳/۶۵ درصدی سرعت آب حفره‌ای نسبت به خاک شاهد شد. بررسی منحنی مشخصه رطوبتی نشان داد هیدروچار با افزایش منافذ متوسط و ریز موجب افزایش نگهداشت آب در مکش‌های مختلف به‌ویژه در مکش ۰ تا ۲۰۰۰ سانتی‌متر شد.

کلیدواژه‌ها: آب قابل دسترس، اندازه ذرات، جرم مخصوص ظاهری، هدایت هیدرولیکی/اشباع، هیدروچار

بخش عظیمی از مناطق ایران را مناطق خشک و نیمه خشک دربرمی گیرد. از این رو به منظور افزایش حاصل خیزی خاک این مناطق، افزودن مواد آلی به خاک توصیه می شود. مواد آلی به سرعت در خاک تجزیه شده و به گاز دی اکسید کربن، آب و مواد دیگر تبدیل می شود. ورود افزایشده گازهای گلخانه ای به ویژه دی اکسید کربن به اتمسفر موجب گرمایش زمین و تغییرات اقلیمی می شود (Lehmann and Joseph., 2009). امروزه یافتن راه حل های مقابله با این پدیده، توجه دانشمندان را در سراسر جهان به خود جلب کرده است. زمان تجزیه مواد آلی با تبدیل به بیوپار و هیدروپار افزایش می یابد. بیوپار محصول تجزیه مواد آلی در اثر حرارت در عدم حضور اکسیژن است که در موارد متعدد محیط زیستی از جمله اصلاح خاک و ترسیب کربن استفاده می شود (Zimmerman et al., 2011; Mohan et al., 2014). استفاده از روش سنتی تولید بیوپار معایبی نظیر امکان استفاده از بقایای گیاهی تنها به صورت خشک، تولید گازهایی مانند مونواکسید کربن، هیدروکربن های آلكان و هیدروکربن های آروماتیک حلقوی (PAHs) و تولید روغن دارد. به منظور رفع خطرات محیط زیستی این گازها نیازمند استفاده از تجهیزات گسترده و پیچیده است (Titirici et al., 2009; Sevilla and Fuertes, 2009). از طرفی یکی از چالش های عمده در سطح جهان افزایش روزافزون ذخایر زیست توده مرطوب تولید شده از صنعت کشاورزی و شهرداری ها و پتانسیل آن ها برای افزودن گازهای گلخانه ای به اتمسفر در حین کمپوست سازی است. علاوه بر این، پسماند مرطوب به مقدار زیادی انرژی برای تبخیر رطوبت و تبدیل به بیوپار نیاز دارند. اخیراً کربن سازی هیدروترمال به دلیل مزایای آن نسبت به سایر روش ها مورد توجه مجامع علمی قرار گرفته است (Peng et al., 2017; Bona et al., 2023; Ge et al., 2024). هیدروپارهای ایجاد شده از طریق کربن سازی هیدروترمال (HTC) نیز می توانند با اهدافی مشابه با بیوپار استفاده شوند (Xue et al., 2012; Libra et al., 2011). در فرآیند کربن سازی هیدروترمال هیدرولیز نسبت به بسیاری از واکنش های تجزیه پیرولیز خشک به انرژی کمتری برای فعال سازی نیاز دارد (Funke and Ziegler., 2010; Reza et al., 2014). زیرا، تولید ماده اولیه خشک برای ساخت بیوپار به انرژی زیادی نیاز دارد و کربن سازی در غیاب اکسیژن نیازمند دمایی در حدود ۳۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی گراد است (Kambo and Dutta, 2015). فرآیند کربن سازی هیدروترمال، شکل ساده ای از پیرولیز مرطوب است که در آن کربن سازی در زیر آب در محیطی با دمای ۱۸۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی گراد رخ می دهد. این فرآیند به روشی کارآمد از نظر انرژی با زیست توده مرطوب سر و کار دارد و آن را به مواد کربنی مشابه زغال سنگ تبدیل می کند (Funke and Ziegler, 2010; Breulmann et al., 2017a). در فرآیند هیدروترمال، خواص آب در شرایط زیر بحرانی تغییر می کند. افزایش دما باعث کاهش ثابت دی الکتریک آب می شود. به عنوان مثال، ثابت دی الکتریک آب در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد ۲۱ و در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد ۴/۱ است، در حالی که در دمای محیط ۷۸ است. با کاهش ثابت دی الکتریک، آب مانند یک حلال آلی قطبی عمل کرده و امتزاج پذیری بین ترکیبات آلی کوچک و حلال آب را تقویت می کند. این امر انحلال ترکیبات آلی کوچک مواد اولیه را افزایش می دهد و باعث بهبود ساختار منفذی هیدروپار می شود (Fu et al., 2019; Naoko and Phillip, 2002). اساس فرآیند هیدروترمال، تجزیه ساختار کربوهیدرات ها به وسیله عمل گرمایی می باشد و در طی آن مواد قندی آزاد و سایر محصولات تولید می شوند (Heilmann et al., 2010). در نتیجه این در این فرآیند محیط زیستی ابتدا زیست توده و مواد قندی به پلیمرهای غلیظ تبدیل می شوند و در طی فرآیندهای آگیری، پلیمری شدن و متراکم شدن مشتقاتی غنی از کربن حاصل می شود (Akhter et al., 2004). محلول های غنی از مواد مغذی محصول جانبی تولید هیدروپار هستند در حالی که در طول تولید بیوپار گازها و روغن های زیستی تولید می شوند. هیدروپار بر خلاف بیوپار دارای pH و هدایت الکتریکی کمتری است (Libra et al., 2011; Bargmann et al., 2013). از مزایای هیدروپار می توان به کاهش گازهای گلخانه ای از قبیل دی اکسید کربن و نیترور اکسید (Lehmann, 2009; Laird, 2010; sohi et al., 2007)، افزایش حاصل خیزی (Li et al., 2012)، تخلخل و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (Masto et al., 2013) و ترسیب کربن در خاک (Lehmann and Joseph., 2009) اشاره کرد. با این وجود هیدروپار به اندازه بیوپار مورد توجه محققان قرار نگرفته است. با توجه به اینکه اغلب خاک های ایران آهکی بوده و خاصیت قلیایی دارند، کاربرد هیدروپار ضمن بهبود حاصل خیزی خاک می تواند pH آن را تا حدودی تعدیل کند (Nakhshiniev et al., 2014). ایبیش و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که استفاده از هیدروپار ممکن است چگالی ظاهری خاک را کاهش دهد (Eibisch et al., 2015a). افزودن هیدروپار به خاک با بافت سبک موجب تغییرات مثبت در برخی ویژگی های فیزیکی خاک از جمله وزن مخصوص ظاهری، تخلخل کل و درصد رطوبت خاک در مکش های مختلف می شود (Nikraves et al., 2018; Rohrdanz et al., 2016). بنتو و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی دریافتند که افزودن هیدروپار به خاک مواد مغذی، کربن آلی و حاصل خیزی

¹ Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

² hydrothermal carbonization

خاک را افزایش می‌دهد. فنگ و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی که بر روی هیدروچار تولید شده در سه دمای مختلف ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس و سه نوع زیست‌توده باگاس نیشکر، درخت گردو و پوست بادام زمینی انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که هیدروچار تولید شده در در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس در هر سه نوع زیست‌توده از بیش‌ترین سطح ویژه و تخلخل برخوردار بود. مائو و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که تخلخل خاک با هیدروچار تولید شده در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد افزایش و با هیدروچار تولید شده در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی هیدروچار بستگی زیادی به ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی زیست‌توده و شرایط تولید آن دارد. به‌عنوان مثال، پژوهش‌ها نشان داده‌اند، افزودن هیدروچار علوفه ذرت تخلخل خاک را افزایش داد، اما استفاده از هیدروچار تراشه‌های چوب (Eibisch et al., 2015) و کود مرغی (Xu et al., 2012) تأثیر معنی‌داری بر تخلخل خاک نداشت. به‌دلیل تفاوت در نحوه فرآوری، هیدروچارها در اندازه ذرات مختلف تولید می‌شوند. به‌علاوه ذرات هیدروچار به‌تدریج در محیط خاک خرد شده و به ذرات کوچک‌تری تبدیل می‌شوند که می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر عملکرد هیدروچار در خاک داشته باشد. افزودن هیدروچار با اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت، ویژگی‌های منافذ خاک از جمله اندازه، شکل، اتصال و حجم را تغییر می‌دهند که بر نگهداشت و حرکت آب تأثیرگذار است. برای مثال، ذرات ریزتر هیدروچار می‌توانند منافذ بین ذرات درشت خاک را پر کنند و موجب تغییر اندازه، شکل و نحوه اتصال منافذ به یک‌دیگر شوند. در مقابل، ذرات هیدروچار با ابعاد بزرگ‌تر منجر به افزایش اندازه بین منافذ می‌شوند. می‌توان انتظار داشت که هر دوی این موارد احتباس آب خاک را تغییر دهند (Ouyang et al., 2013). علی‌رغم اهمیت بررسی اثر اندازه ذرات هیدروچار ساقه آفتابگردان بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک، تاکنون مطالعات محدودی در این زمینه انجام گرفته است. از این‌رو هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر اندازه ذرات مختلف هیدروچار ساقه آفتابگردان بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک لوم‌شنی بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در آزمایشگاه تحقیقاتی زهکشی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا همدان در سال ۱۴۰۲ انجام شد. در این پژوهش ویژگی‌های چگالی ظاهری خاک، تخلخل، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت پژمردگی دائم آب قابل دسترس و هدایت هیدرولیکی خاک مورد بررسی قرار گرفت. به منظور انجام این پژوهش خاک مورد نظر از لایه ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری مزارع مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان برداشت و جهت آماده‌سازی و آزمایش‌های اولیه به آزمایشگاه انتقال یافت. نمونه خاک‌های برداشتی پس از هوا خشک شدن و حذف بقایای سنگ و کلوخه‌ها، با چکش پلاستیکی خرد و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. از ساقه‌های آفتابگردان جمع‌آوری شده از مزارع شهر شاهین‌دژ استان آذربایجان غربی در اندازه‌های کمتر از ۲ سانتی‌متر به‌عنوان منبع هیدروچار استفاده شد. ساقه آفتابگردان تهیه شده طی فرایند هیدروترمال در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۰ ساعت و در فشار ۱۸ بار به هیدروچار تبدیل شد (Fang et al., 2015) و پس از عبور از الک‌های با اندازه ۲، ۱ و ۰/۵ میلی‌متری در سه گروه اندازه‌ای (۱-۲، ۰/۵-۱ و ۰-۰/۵) آماده و به مقدار ۳ درصد وزنی با خاک مخلوط شد. در نهایت تیمارهای پژوهش به صورت یک تیمار خاک شاهد فاقد هیدروچار (S0) بود. تیمارهای دوم، سوم و چهارم به ترتیب شامل ۳ درصد وزنی هیدروچار ساقه آفتابگردان با اندازه ذرات ۰-۰/۵ (SH1)، ۰/۱-۰/۵ (SH2) و ۱-۲ (SH3) در ترکیب با خاک طبیعی آماده شدند. بافت خاک مورد استفاده در پژوهش لوم‌شنی بود. برای انجام آزمایشات از ستون‌های PVC با طول ۳۰ و قطر ۵/۹۵ سانتی‌متر استفاده شد. میزان هیدروچار ساقه آفتابگردان مورد نیاز برای پر کردن هر ستون تا ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری محاسبه و به‌طور جداگانه با خاک مخلوط شد. مقادیر خاک مورد استفاده در تیمارهای S0، SH1، SH2 و SH3 به ترتیب ۴۲۵/۲، ۴۱۲/۴۵، ۴۱۲/۴۵ و ۴۱۲/۴۵ گرم و مقادیر هیدروچار مورد استفاده در این تیمارها به ترتیب ۰، ۱۲/۷۵، ۱۲/۷۵ و ۱۲/۷۵ گرم بود. برای ایجاد محیطی یکنواخت و همگن و جلوگیری از فشردگی و غیریکنواختی خاک، در هنگام پر کردن ستون‌ها ضربه‌هایی به‌صورت متوالی به ستون خاک زده شد. سپس جهت اثرگذاری هیدروچار بر خاک، ستون‌های خاک به مدت ۱۲۰ روز در شرایط رطوبتی مزرعه ($FC=0/23$) و در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. آبیاری با استفاده از آب مقطر انجام گردید و وزن هر ستون بلافاصله بعد از آبیاری توسط ترازو ثبت شد. فاصله آبیاری‌های بعدی به روش وزنی با فاصله زمانی ۴ روز یک‌بار به مدت ۱۲۰ روز به طول انجامید. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و هیدروچار تولیدی در جدول‌های (۱) و (۲) آمده است.

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک و هیدروچار مورد استفاده

تیمار	هدایت الکتریکی (dS m ⁻¹)	اسیدیته (-)	چگالی ظاهری (gcm ⁻³)	عناصر (mgkg ⁻¹)			ماده آلی (%)	کربن آلی (%)
				سدیم	پتاسیم	کلسیم		
خاک	۰/۱۵۳	۸/۰۲	۱/۵۳	۵۴/۹۵	۲۱۰۰/۱	۱۴۲۴	۰/۹	۰/۵۲
هیدروچار	۲/۵۱	۵/۵۷	۰/۲۲	۳۹۹/۶	۲۴۳۹۲/۴	۱۵۵۳/۶۴	۷۳/۹۵	۴۲/۹

بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos., 1962)، جرم مخصوص ظاهری با استفاده از سیلندره‌ای استوانه‌ای، درصد ماده آلی و درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک (Walkley and Black., 1934)، قابلیت هدایت الکتریکی و اسیدیته در عصاره گل اشباع (Haluschak., 2006)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به روش بار ثابت (Klute and Dirksen., 1986)، سدیم، پتاسیم و کلسیم با استات آمونیوم اندازه‌گیری شد (Flannery et al., 1980). رطوبت اشباع برابر اختلاف وزن نمونه خشک و اشباع، رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه (FC) معادل اختلاف وزن نمونه‌های مرطوب با وزن متناظر نمونه‌های خاک خشک در آن لحاظ شد. جهت اندازه‌گیری رطوبت اشباع، نمونه‌های آماده شده به مدت ۲۴ ساعت درون ظرف پر از آب قرار داده شدند و پس از اندازه‌گیری وزن آن‌ها در آن خشک شدند. برای این کار، نمونه‌ها پس از اشباع شدن بر روی یک صفحه توری فلزی قرار داده شدند و جهت عدم تبخیر آب، روی آن‌ها با پلاستیک پوشانیده شد. نمونه‌ها مرتباً (چند بار در روز و به مدت ۴ روز) وزن می‌شدند زملی که تغییر وزن در نمونه‌ها مشاهده نشد، این مقدار به عنوان رطوبت در حد ظرفیت مزرعه منظور گردید (برای اندازه‌گیری رطوبت در حد اشباع و پرمردگی دائم از نمونه‌های دست نخورده استفاده شد). به همین ترتیب رطوبت در نقطه پرمردگی دائم (PWP) به کمک دستگاه صفحات فشاری در مکش ۱۵ بار و آب قابل دسترس (AW) از اختلاف رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی (در مکش ۰/۳۳ اتمسفر) و پرمردگی دائم (در مکش ۱۵ اتمسفر) به دست آمد. ترسیم منحنی مشخصه رطوبتی براساس اختلاف وزن نمونه خاک‌ها در مکش‌های ۰، ۳۳، ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۸۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر در دستگاه صفحات فشاری با نمونه‌های خشک شده در آن انجام شد (Zare Abyaneh et al., 2022). ترسیم کامل منحنی رطوبتی و توابع هیدرولیکی خاک در بازه مکشی ۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر با برازش مدل ون‌گنوختن با n و m وابسته به هم بر داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی در نرم‌افزار RETC انجام شد. ویژگی‌های هیدرولیکی شدت جریان، سرعت، سرعت آب منفذی و هدایت هیدرولیکی اشباع تیمارهای مختلف به ترتیب با استفاده از روابط (۱)، (۲)، (۳) و (۴) به دست آمدند.

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$v_d = \frac{v}{n} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$k_s = \frac{v l}{h a} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن‌ها Q شدت جریان (سانتی‌متر مکعب در دقیقه)، V حجم (سانتی‌متر مکعب)، t زمان (دقیقه)، v سرعت جریان (سانتی‌متر بر دقیقه)، v_d سرعت آب منفذی، n تخلخل، k_s هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی‌متر در دقیقه)، l طول ستون خاک، a سطح مقطع ستون خاک، h اختلاف سطح آب بین ابتدا و انتهای ستون خاک (سانتی‌متر) است.

چیدمان آزمایش بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در مقیاس آزمایشگاهی بود. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 و مقایسه میانگین‌ها به کمک آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

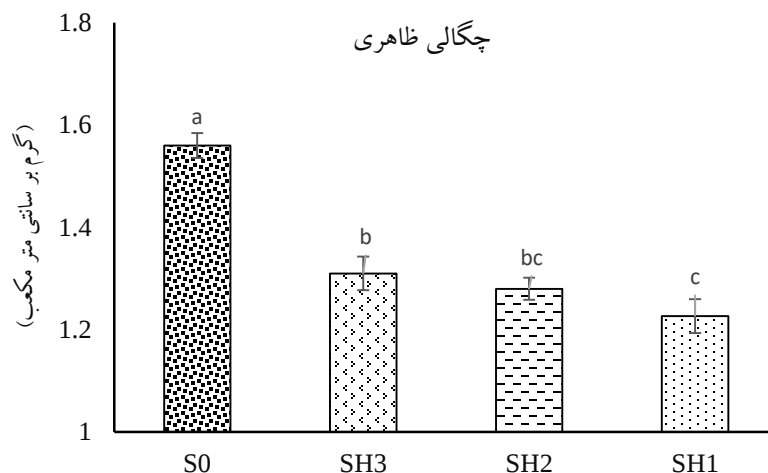
نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها در قالب سه اندازه هیدروچار بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک در جدول ۲ بیان شده است. جدول ۲ نشان دهنده اثر معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد سه اندازه ذرات ۰/۵-۱، ۰/۵-۰/۰۰۵ و ۱-۲ میلی‌متر هیدروچار در ترکیب با خاک لوم شنی بر چگالی ظاهری، سرعت آب منفذی، هدایت هیدرولیکی اشباع، شدت جریان، رطوبت نقطه اشباع، میزان رطوبت در ظرفیت زراعی، پژمردگی دائم و سرعت جریان نسبت به تیمار شاهد است. به‌همین ترتیب تأثیر تیمارهای اندازه ذرات هیدروچار بر ویژگی‌های آب قابل دسترس در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. در مجموع هیدروچار بر تمامی متغیرهای مورد بررسی اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد داشت.

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس پارامترهای اندازه‌گیری شده.

منابع	درجه آزادی	چگالی ظاهری	تخلخل	آب قابل دسترس	رطوبت حجمی			سرعت آب منفذی	هدایت هیدرولیکی اشباع	شدت جریان	سرعت جریان
					اشباع	زراعی	پژمردگی				
تیمار	۳	۰/۰۶۵۶۷**	۰/۰۰۹۳۵**	۰/۰۰۲۴۰*	۰/۰۰۷۱**	۰/۰۰۶۹۱**	۰/۰۰۱۲۲**	۰/۰۰۰۶*	۰/۰۱۳۸۴**	۲۷/۲۵**	۰/۰۴۵۲**
خطا	۸	۰/۰۰۱۲۰	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۵۸	۰/۰۰۰۷۳	۰/۰۰۰۶۱	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۷۳	۱/۰۷۲۶	۰/۰۰۱۷
ضریب تغییرات C.V	-	۲/۵۸	۲/۶۶	۱۰/۶۴	۵/۶۳	۸/۴۴	۱۰/۷۹	۱۹/۶	۱۶/۰۹	۱۵/۹۲	۱۵/۹۲

*** و * به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد، ns: غیر معنی‌دار.

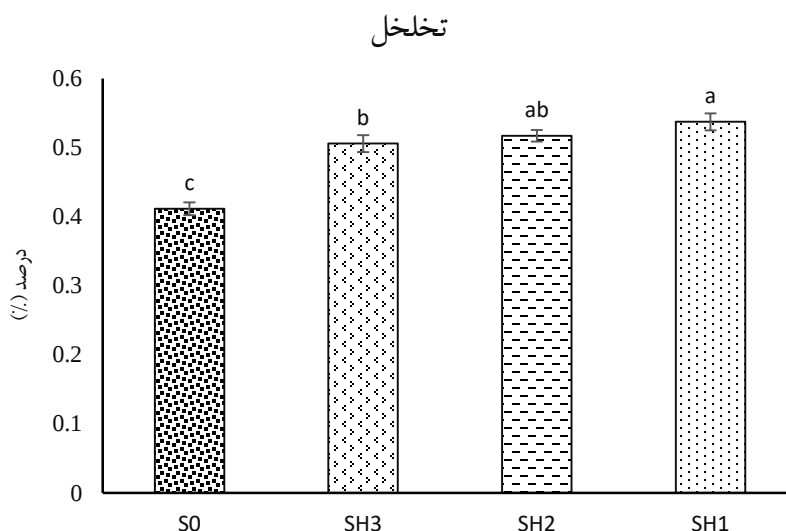
در ادامه نتایج مقایسه میانگین اثرات هیدروچار بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی اندازه‌گیری شده آمده است. نتایج نشان‌دهنده بهبود شرایط فیزیکی خاک به‌واسطه کاربرد هیدروچار در خاک می‌باشد. در شکل ۱ تأثیر اندازه ذرات هیدروچار ساقه گیاه آفتابگردان بر چگالی ظاهری خاک نشان داده شده است.



شکل ۱. مقایسه میانگین چگالی ظاهری در پاسخ به کاربرد هیدروچار در خاک. حروف متفاوت روی ستون‌ها بیان‌گر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۱ درصد است.

نتایج مقایسه میانگین‌ها در شکل ۱ نشان‌دهنده کاهش چگالی ظاهری خاک در اثر کاربرد هیدروچار نسبت به تیمار شاهد است. مقدار چگالی ظاهری خاک از ۱/۵۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب در تیمار شاهد (S0) به ۱/۲۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب در تیمار SH1 حاوی هیدروچار با اندازه

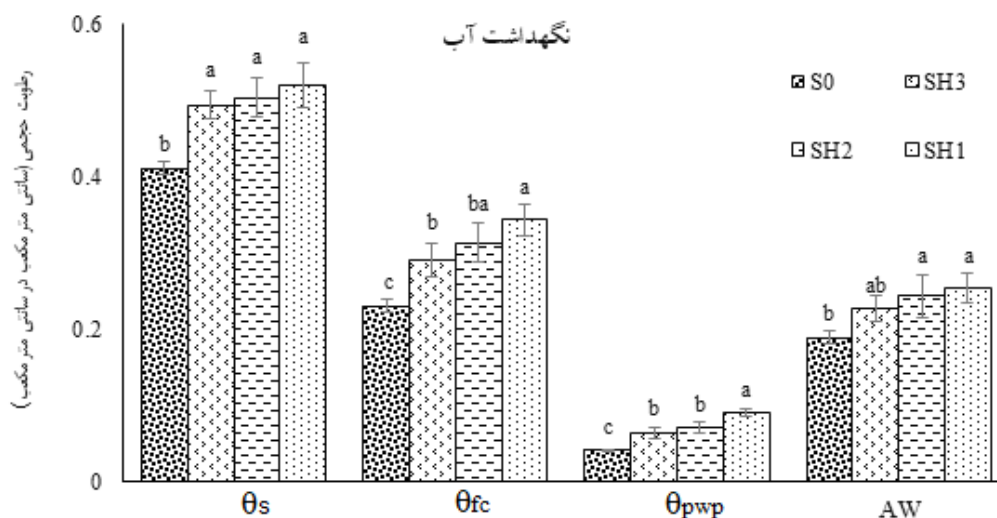
ذرات ۰-۰/۵ میلی متر، ۱/۲۸ گرم بر سانتی متر مکعب در تیمار SH2 دارای هیدروچار با اندازه ذرات ۰/۵-۱ میلی متر و ۱/۳۱ گرم بر سانتی متر مکعب در تیمار SH3 حاوی هیدروچار با اندازه ذرات ۱-۲ میلی متر کاهش یافت. به عبارت دیگر چگالی ظاهری خاک در تیمارهای SH1، SH2 و SH3 به ترتیب ۲۱، ۱۸ و ۱۶ درصد کمتر از تیمار شاهد بود. تیمار هیدروچار در اندازه ذرات ۰-۰/۵ میلی متر (تیمار SH1) بیشترین کاهش چگالی ظاهری را داشت. کاهش چگالی ظاهری خاک با کاربرد هیدروچار می تواند ناشی از اختلاط خاک با ماده ای دارای چگالی ظاهری کمتر و ماده آلی بیش تر باشد. در تایید این نتیجه و بر اساس جدول ۱، چگالی ظاهری هیدروچار برابر با ۰/۲۲ گرم بر سانتی متر مکعب است که ۸۵/۸۹ درصد از چگالی ظاهری خاک کمتر است. شکل ۲ نتایج مقایسه میانگین اثر اندازه ذرات هیدروچار بر تخلخل خاک را نشان می دهد که بیان گر افزایش مقدار تخلخل خاک در تیمارهای حاوی هیدروچار است. ماده آلی موجب بهبود ساختمان خاک، شکل گیری خاک دانه ها و پایداری آن ها می گردد و باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک و افزایش تخلخل خاک می شود (خدارحمی و همکاران، ۱۳۹۸). خدارحمی و همکاران (۱۳۹۸) به ترتیب در کاربرد دو و پنج گرم هیدروچار با گاس نیشکر بر کیلوگرم خاک کاهش ۴/۷ و ۷/۳ درصدی چگالی ظاهری خاک را گزارش کردند. کاهش و افزایش وزن مخصوص ظاهری و تخلخل کل خاک تیمارهای حاوی هیدروچار به دلیل شکل کروی ساختمان و قابلیت تغییر شکل پذیری هیدروچار می باشد (Stella Mary et al., 2016). ابل و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی کاربرد هیدروچار بقایای ذرت تولید شده در دو دمای ۲۰۰ و ۵۵۰ درجه سلسیوس، کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل به ترتیب به مقدار ۸۴ و ۸۲ درصدی را گزارش کردند. عامل اصلی کاهش چگالی ظاهری خاک تیمار شده با هیدروچار، شکل گیری خاکدانه ها و افزایش منافذ خاک است. دوریکس و همکاران (۲۰۱۲) دریافتند که کاربرد هیدروچار در خاک باعث افزایش منافذ خاک و کاهش چگالی ظاهری خاک گردید.



شکل ۲. مقایسه میانگین تخلخل در پاسخ به کاربرد هیدروچار در خاک. حروف متفاوت روی ستون ها بیان گر تفاوت معنی دار بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵ درصد است.

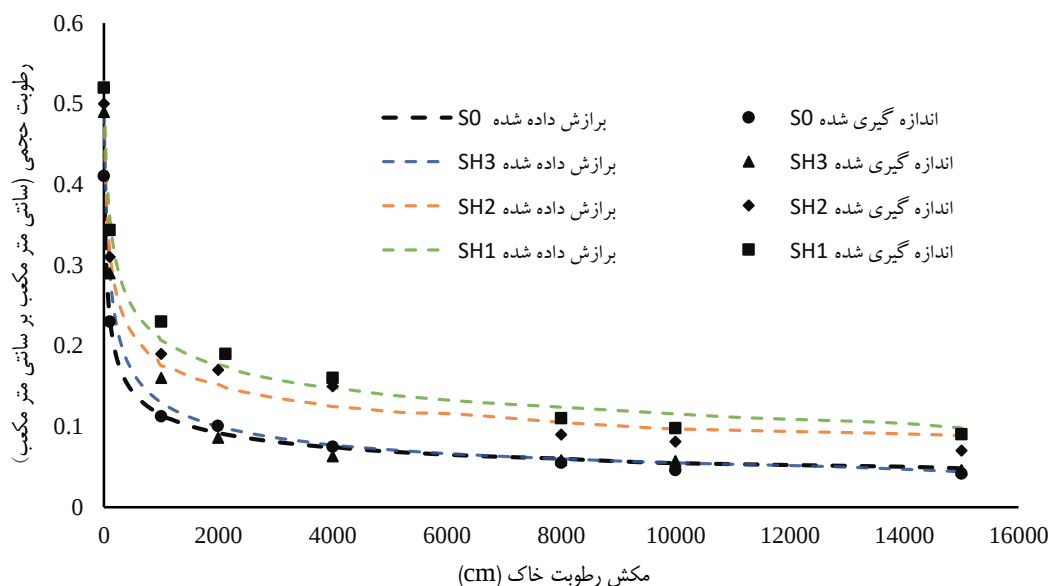
مطابق شکل ۲ کاربرد هیدروچار اثر معنی داری در سطح ۱ درصد در افزایش تخلخل خاک نسبت به تیمار شاهد دارد. به طوری که مقدار تخلخل از ۴۱/۱ درصد در تیمار شاهد با افزایش ۳۰/۵۸ درصدی به ۵۳/۷۱ درصد در تیمار SB1 تغییر پیدا کرد. به همین ترتیب کاربرد هیدروچار با اندازه ذرات ۰/۵-۱ و ۱-۲ میلی متر سبب افزایش معنی دار ۲۵/۶۹ و ۲۲/۹۴ درصدی تخلخل در تیمارهای SB2 و SH3 نسبت به تیمار شاهد شد. از این رو مقدار تخلخل خاک شاهد از ۴۱/۱ در تیمارهای SB2 و SH3 به ترتیب به مقدار ۵۱/۶۹ و ۵۰/۵۶ افزایش پیدا کرد. براساس نتایج به دست آمده کاهش قطر ذرات هیدروچار تا اندازه ۰/۵-۱ میلی متر بیشترین تأثیر را بر افزایش تخلخل و کاهش چگالی ظاهری خاک داشت. افزایش تخلخل خاک در اثر کاربرد هیدروچار ناشی از ساختار متخلخل داخلی هیدروچار است. باسو (۲۰۱۲) افزایش تخلخل خاک را ناشی از کاهش چگالی ظاهری آن عنوان کرد. خدارحمی و همکاران (۱۳۹۸) افزایش ۵/۱۷ و ۹/۴۱ درصدی تخلخل خاک را به ترتیب با کاربرد دو و پنج گرم هیدروچار با گاس نیشکر بر کیلوگرم خاک گزارش کردند.

اثر اندازه ذرات هیدروچار ساقه آفتابگردان بر ویژگی‌های رطوبتی خاک لوم شنی، در شکل ۳ بیان شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده در شکل ۳، کاربرد هیدروچار در خاک موجب افزایش معنی‌دار رطوبت خاک شده است. مقدار رطوبت اشباع در تیمار شاهد (بدون کاربرد هیدروچار) ۰/۴۰ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب بود که به‌مقدار ۰/۴۹، ۰/۵۰ و ۰/۵۲ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب به‌ترتیب در تیمارهای SH3، SH2 و SH1 افزایش پیدا کرد. بیش‌ترین تأثیر هیدروچار در افزایش رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت زراعی و رطوبت قابل دسترس در اندازه ذرات ۰-۰/۵ میلی‌متر مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار و در گروه آماری جدا گانه‌ای با یکدیگر قرار گرفتند (شکل ۳).



شکل ۳. مقایسه میانگین رطوبت حجمی در پاسخ به کاربرد هیدروچار در خاک. حروف متفاوت روی ستون‌ها بیان‌گر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵ درصد است.

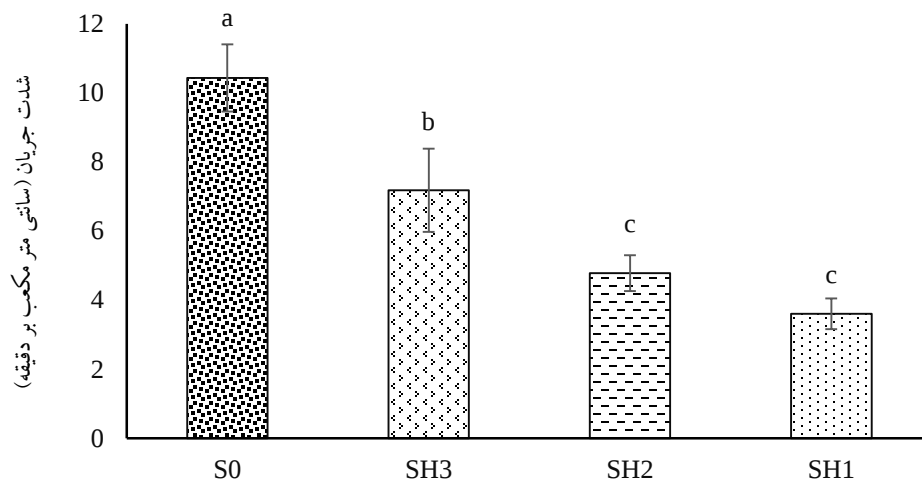
مطابق نتایج شکل ۳ هیدروچار در اندازه ذرات ۰-۰/۵ میلی‌متری بیش‌ترین اثر را بر افزایش پارامترهای رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس داشت. تیمار SH1 با افزایش ۲۶/۷۳، ۴۹/۲۷، ۱۸/۷۷ و ۳۰/۵۸ درصدی به‌ترتیب رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس را از مقدار ۰/۴۱ به ۰/۵۲، ۰/۲۳ به ۰/۴۳، ۰/۰۴۱ به ۰/۰۹۰ و ۰/۱۸ به ۰/۲۵ افزایش داد. هیدروچار در تیمارهای SH2 و SH3 به‌ترتیب سبب افزایش مقدار رطوبت اشباع خاک از ۰/۴۱ به ۰/۴۹ و ۰/۵۰، ظرفیت زراعی از ۰/۲۳ به ۰/۲۹ و ۰/۳۱، پژمردگی دائم از ۰/۴۱ به ۰/۶۴ و ۰/۷۰ و آب قابل دسترس از ۰/۱۸ به ۰/۲۲ و ۰/۲۴ شد. بر اساس شکل ۳ با کاهش اندازه ذرات هیدروچار پارامترهای رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس روند افزایشی داشتند. محققان گزارش کردند نگهداشت آب در محدوده پتانسیل ماتریک ۰/۱ تا ۵ بار متکی به عواملی مانند مواد آلی و ساختمان خاک است (Li et al., 2012; Kutilek et al., 2006). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هیدروچار به‌دلیل افزایش مواد آلی، افزایش خلل و فرج و بهبود ساختمان خاک به‌واسطه تشکیل خاکدانه‌ها، بر افزایش نگهداشت آب در مکش‌های کم اثر مثبت داشت. اویانگ و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که منحنی نگهداشت آب در خاک از عواملی چون مواد آلی، خلل و فرج خاک و چگالی ظاهری تأثیر می‌پذیرد. کاهش اندازه ذرات هیدروچار باعث کاهش چگالی ظاهری و افزایش نگهداشت آب در مکش‌های مختلف می‌شود. دلیل آن می‌تواند افزایش تخلخل هیدروچار با ریزتر شدن اندازه ذرات باشد که موجب حفظ بیش‌تر رطوبت در خاک می‌شود.



شکل ۴. منحنی مشخصه رطوبتی خاک شاهد و خاک اصلاح شده با هیدروچار در اندازه ذرات مختلف

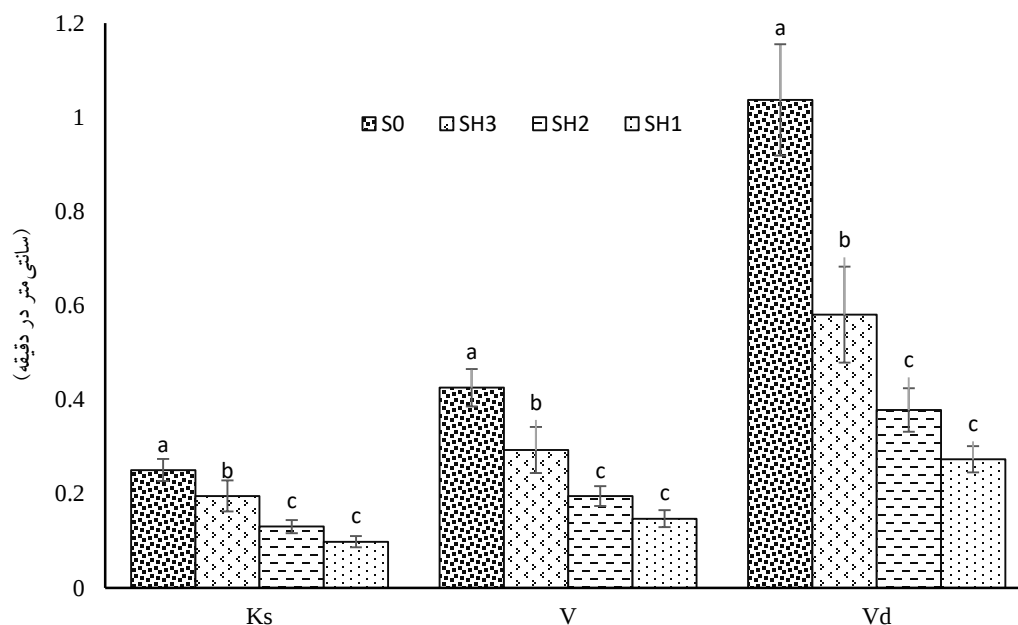
بررسی و مقایسه اثر اندازه ذرات هیدروچار سافه آفتابگردان بر مقدار رطوبت حجمی خاک در مکش‌های صفر تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر (شکل ۴) نشان داد که کاربرد هیدروچار موجب افزایش نگهداشت آب بین نقطه اشباع تا پژمردگی دائم در تیمارهای حاوی هیدروچار نسبت به مقدار متناظر آن در تیمار خاک طبیعی شد و این نتیجه مطابق با نتایج انجام شده دیگر است (Libra et al., 2011؛ برومندنسب و همکاران، ۱۳۹۷). با کاربرد هیدروچار با اندازه ذرات ریز تخلخل ریز و به تبع آن میزان نگهداشت آب افزایش پیدا کرد. دلیل افزایش مقدار آب موجود در تیمارهای حاوی هیدروچار در پتانسیل‌های مشترک می‌تواند ناشی از افزایش تخلخل هیدروچار با کاهش اندازه ذرات و همچنین قرارگیری هیدروچار در بین ذرات درشت خاک و ایجاد ریز حفرات بیش‌تر در ماتریکس خاک باشد. خداحمی و همکاران (۱۳۹۸) افزایش ۹ و ۱۸ درصدی میزان رطوبت حجمی در نقطه ظرفیت زراعی و ۴۳/۰ و ۲۲/۱ درصدی میزان رطوبت حجمی نقطه پژمردگی دائم نسبت به تیمار شاهد را در کاربرد به‌ترتیب دو و پنج گرم هیدروچار باگاس نیشکر بر کیلوگرم خاک گزارش دادند.

در شکل ۵ تغییرات مقادیر شدت جریان بر حسب سانتی‌متر مکعب بر دقیقه برای ۳ تیمار اندازه ذرات هیدروچار در مقایسه با تیمار خاک طبیعی نشان داده شده است.



شکل ۵. مقایسه میانگین میزان شدت جریان آب در پاسخ به کاربرد هیدروچار در خاک. حروف متفاوت روی ستون‌ها بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵ درصد است.

براساس نتایج به‌دست آمده کاربرد هیدروچار در تمامی اندازه‌ذرات موجب کاهش مقدار شدت جریان در خاک طبیعی شده است. براساس نتایج به‌دست آمده مقادیر شدت جریان با کاهش اندازه ذرات در تیمارهای SH1، SH2 و SH3 به ترتیب از مقدار ۱۰/۴۳ در خاک طبیعی به مقادیر ۳/۶، ۴/۷۸ و ۷/۱۸ کاهش پیدا کرده است. تیمار هیدروچار با اندازه ذرات ۰-۰/۵ میلی‌متر با کاهش ۶۵/۴۳ درصدی بیش‌ترین تأثیر را بر کاهش پارامتر شدت جریان داشت. در شکل ۶ تغییرات هدایت هیدرولیکی، سرعت آب منفذی و سرعت جریان به ازای سه اندازه ذرات هیدروچار ساقه گیاه آفتابگردان مورد استفاده نسبت به تیمار شاهد ترسیم شده است. شکل ۶ نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع، شدت جریان، سرعت جریان و سرعت آب منفذی در کاربرد هیدروچار در تمامی اندازه‌ها نسبت به خاک شاهد فاقد هیدروچار است.



شکل ۶. مقایسه میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks)، سرعت جریان (V) و سرعت آب منفذی (Vd) در پاسخ به کاربرد هیدروچار در خاک. حروف متفاوت روی ستون‌ها بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری ۵ درصد است.

بر اساس نتایج به دست آمده در شکل ۶ کاربرد هیدروچار در تمامی اندازه ذرات موجب کاهش معنی دار مقادیر هدایت هیدرولیکی، سرعت آب منفذی و سرعت جریان نسبت به تیمار شاهد بود. هیدروچار با اندازه ذرات ۰/۵-۰ میلی متر بیشترین تأثیر را بر کاهش پارامترهای هیدرولیکی نسبت به سایر تیمارها داشت. به گونه ای که با کاهش ۶۰/۸۲ و ۷۳/۶۵ درصدی پارامترهای هدایت هیدرولیکی، سرعت آب منفذی و سرعت جریان مقادیر آن ها را به ترتیب از ۰/۲۵، ۰/۴۲ و ۱/۰۳۶ در تیمار خاک شاهد به ۰/۰۹۸، ۰/۱۴ و ۰/۵۳ در تیمار SH1 کاهش پیدا کرد. دونگ و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی دریافتند که هیدروچار عمدتاً از طریق تغییر درشت منافذ خاک اصلاح شده بر روی هدایت هیدرولیکی تأثیرگذار است. بر خلاف نتایج پژوهش حاضر ژو و همکاران (۲۰۲۳) دریافتند که با کاربرد هیدروچار تولید شده از باقیمانده مواد غذایی هدایت هیدرولیکی اشباع به طور قابل توجهی افزایش یافت. به نظر می رسد اثرگذاری هیدروچار بر ویژگی های هیدرولیکی خاک تا حد زیادی به نوع ماده اولیه بستگی دارد (Mau et al., 2020). دونگ و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی دریافتند که هیدروچار به دلیل مسدود کردن منافذ کوچک تر از ۹۰ میکرومتر هدایت هیدرولیکی خاک را کاهش داد.

نتیجه گیری

در این تحقیق اثر سه دامنه اندازه ذرات هیدروچار ساقه گیاه آفتابگردان بر برخی ویژگی های فیزیکی و هیدرولیکی یک خاک لوم شنی در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی پژوهش نشان داد که استفاده از هیدروچار به عنوان منبع پایدار کربن سبب بهبود ویژگی های هیدرولیکی و فیزیکی خاک شد. نتایج همچنین نشان داد که اثر تیمارهای هیدروچار بر جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه، آب قابل دسترس، رطوبت در نقطه پژمردگی دائم، شدت جریان، سرعت جریان، هدایت هیدرولیکی، سرعت آب منفذی و منحنی رطوبتی معنی دار بود. کاربرد هیدروچار باعث کاهش معنی دار جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه، رطوبت پژمردگی دائم و آب قابل دسترس نسبت به خاک شاهد شد. کاربرد هیدروچار همچنین موجب کاهش شدت جریان، سرعت جریان، هدایت هیدرولیکی و سرعت آب منفذی نسبت به خاک شاهد شد. اثرگذارترین عامل بر پارامترهای اندازه گیری شده، مربوط به هیدروچار با اندازه ذرات ۰/۵-۰ میلی متر بود. بررسی منحنی مشخصه رطوبتی نشان داد هیدروچار در هر سه اندازه ذرات با افزایش منافذ متوسط و ریز موجب افزایش نگهداشت آب در مکش های مختلف شد. نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد هیدروچار اثر معنی داری بر ویژگی های فیزیکی و هیدرولیکی یک خاک سبک دارد و می تواند به عنوان اصلاح کننده مؤثر برای بهبود خصوصیات فیزیکی خاک و افزایش رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی و آب قابل دسترس گیاه مورد استفاده قرار گیرند. لذا یافته های این پژوهش می تواند در مدیریت آب و کشاورزی در خاک های با بافت سبک بسیار کاربردی باشد.

منابع

- خدارحمی، یزدان؛ سلطانی محمدی، امیر؛ برومند نسب، سعید؛ ناصری، عبدعلی. (۱۳۹۸). ارزیابی تأثیر بیوچار و هیدروچار اصلاح شده بر کاهش آبشویی نیترات در خاک لوم در شرایط غیر اشباع. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳ (۳): ۷۶۱-۷۷۲.
- Abel, S., Peters A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., Wessolek, G. (2013). Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 202–203: 183–191.
- Bargmann, I., M.C. Rillig, W. Buss, A. Kruse, and M. Kuecke. (2013). Hydrochar and biochar effects on germination of spring barley. *J. Agron. Crop Sci*, 199 (5): 360-373.
- Basso, A. S. (2012). Effect of fast pyrolysis biochar on physical and chemical properties of a sandy soil. Master of Science, Iowa State University Ames. Iowa.
- Bento, L. R., Castro, A. J. R., Moreira, A. B., Ferreira, O. P., Bisinoti, M. C., Melo, C. A. (2019). Release of nutrients and organic carbon in different soil types from hydrochar obtained using sugarcane bagasse and vinasse. *Geoderma*, 334: 24-32.
- Bona, D., Bertoldi, D., Borgonovo, G., Mazzini, S., Ravasi, S., Silvestri, S., Tambone, F. (2023). Evaluating the potential of hydrochar as a soil amendment. *Waste Management*, 159: 75-83.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*, 54 (5): 464-465.
- Breulmann, M., van Afferden, M., Müller, R.A., Schulz, E., Fühner, C. (2017a). Process conditions of pyrolysis and hydrothermal carbonization affect the potential of sewage sludge for soil carbon sequestration and amelioration. *J Anal Appl Pyrolysis*, 124: 256–265.

- Devereux, R. C., Sturrock, C. J., Mooney, S. J. (2012). The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 103 (1): 13-18.
- Dong, H., Leung, A. K., Chen, R., Lourenco, S., Kamchoom, V. (2023). Changes in pore-size distribution and hydraulic conductivity of compacted soils by grass-derived hydrochar. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149 (9): 04023079.
- Dong, H., Leung, A. K., Liu, J., Chen, R., Lui, W. (2024). Microstructural investigation of the unsaturated hydraulic properties of hydrochar-amended soils. *Acta Geotechnica*, 19 (2): 833-853.
- Eibisch, N., Durner, W., Bechtold, M., Fuß, R., Mikutta, R., Woche, S. K., Helfrich, M. (2015a). Does water repellency of pyrochars and hydrochars counter their positive effects on soil hydraulic properties? *Geoderma*, 245: 31–39.
- Fang J., Gao B., Chen J., and Zimmerman A. R. (2015). Hydro-chars derived from plant biomass under various conditions: Characterization and potential applications and impacts. *Chemical Engineering Journal*, 267: 253–259.
- Flannery, R. L., & Markus, D. K. (1980). Automated analysis of soil extracts for phosphorus, potassium, calcium, and magnesium. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 63(4): 779-787.
- Fu, M.M., Mo, C., Li, H., Zhang, Y.N., Huang, W.X., Wong, M.H. (2019). Comparison of physicochemical properties of biochars and hydrochars produced from food wastes. *J. Clean. Prod.* 236: 117637.
- Funke, A, Ziegler F (2010) Hydrothermal carbonization of biomass: a summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels Bioprod Biorefin*: 4:160–177.
- Ge, M., Wang, B., Chen, B., Xie, H., Sun, H., Sun, K., & Feng, Y. (2024). Hydrochar and Its Dissolved Organic Matter Aged in a 30-Month Rice–Wheat Rotation System: Do Primary Aging Factors Alter at Different Stages?. *Environmental Science & Technology*, 58(6): 3019-3030.
- Haluschak, P. (2006). Laboratory methods of soil analysis. *Canada-Manitoba soil survey*: 3, 133.
- Heilmann, S. M., Davis, H. T., Jader, L. R., Lefebvre, P. A., Sadowsky, M. J., Schendel, F. J. (2010). Hydrothermal Carbonization of Microalgae. *Biomass Bioenerg.* 34: 875-882.
- Hseu, Z. Y., Jien, S. H., Chein, W. H., Liou, R. (2014). Impacts of biochar on physical properties and erosion potential of a mudstone slope land soil. *The scientific world journal*.
- J.A. Libra, K.S. Ro, C. Kammann, A. Funke, N.D. Berge, Y. Neubauer, M.-M. Titirici, C. Fühner, O. Bens, J. Kern, K.-H. (2011). Emmerich, Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis, *Biofuels*, 2: 89–124.
- Kambo, H. S., Dutta, A. (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renew Sust Energ Rev*, 45:359–378.
- khodarahmi, Y., Soltani mohamadi, A., Boroomand Nasab, S., Naseri, A. (2019). The effect of modified biochar and hydrochar on reducing nitrate leaching in loam soil under unsaturated conditions. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13 (3): 761-772. (In Persian)
- Klute, A., Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5: 687-734.
- Laird D., Fleming P., Wang B., Horton R., Laird Z., Karlen, D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158: 436–442.
- Lehmann J. (2007). A Handful of Carbon. *Nature*, 447: 143-144.
- Lehmann, J., S. Joseph. (2009). *Biochar for environmental management: science and technology*: Earthscan.
- Li, X. H., Han, P. and X. C. Zhang. (2012). Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: results from incubation experiments. *International Journal of Agriculture and Biology*, 14: 975-979.
- Libra, J. A, Ro, K. S, Kammann, C., Funke, A., Berge, N. D., Neubauer, Y., Titirici, M. M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J., Emmerich, K.H. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2:71–106.
- Libra, J.A., K.S. Ro, C. Kammann, A. Funke, N.D. Berge, Y. Neubauer, J. Kern. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2 (1): 71-106.
- Reza, M.T., Wirth, B., Luder, U. (2014). Behavior of selected hydrolyzed and dehydrated products during hydrothermal carbonization of biomass, *Bioresour. Technol*, 169: 352–361.
- Mau, V., Arye, G., Gross, A. (2020). Poultry litter hydrochar as an amendment for sandy soils. *Journal of Environmental Management*, 271: 110959.
- Mau, V., Arye, G., Gross, A. (2020). Poultry litter hydrochar as an amendment for sandy soils. *J. Environ. Manag*: 271, 110959.
- Nakhshiniev, B., M.K. Biddinika, H.B. Gonzales, H. Sumida, K. Yoshikawa. (2014). Evaluation of hydrothermal treatment in enhancing rice straw compost stability and maturity. *Bioresource Technol*, 151: 306-313.

- Naoko, A., Phillip, E.S. (2002). Roles of water for chemical reactions in high-temperature water. *Chem. Rev*, 102: 2725–2750.
- Nikraves, I., Boroomandnasab, S., Naseri, A.A., Soltani Mohammadi, A. (2018). Investigating the effect of wheat straw biochar and hydrochar on physical properties of a sandy loam soil. *Journal of Water and Soil*, 32 (2): 378-397 (in Persian).
- Osooli, H., Karimi, A., Shirani, H. (2022). Biochar amount and Particle Sizes Effects on Plant Available Water, Stomatal Resistance, Root Dry Weight and Water Use Efficiency of Wheat. *Applied soil research*, 10(2): 66-78 (in Persian).
- Ouyang, L., Wang, F., Tang, J., Yu, L., Zhang, R. (2013). Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13: 991–1002.
- Peng, N., Li, Y., Liu, T., Lang, Q., Gai, C., Liu, Z. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons and toxic heavy metals in municipal solid waste and corresponding hydrochars. *Energy Fuel*, 31:1665–1671.
- Sevilla, M., Fuertes, A.B. (2009). Chemical and Structural Properties of Carbonaceous Products Obtained by Hydrothermal Carbonization of Saccharides. *Chem-Eur J*, 15: 4195-4203.
- Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E., Bol, R. (2009). Biochar, climate change and soil: A review to guide future research. *CSIRO Land and Water Science Report*, 64.
- Stella Mary, G., Sugumaran, P., Niveditha, S., Ramalakshmi, B., Ravichandran, P., Seshadri, S. (2016). Production, characterization and evaluation of biochar from pod (*Pisum sativum*), leaf (*Brassica oleracea*) and peel (*Citrus sinensis*) wastes. *Int J Recycl Org Waste Agricult*, 5:43–53.
- Titirici, M.M., Demir-Cakan, R., Baccile, N., Antonietti, M. (2009). Carboxylate-Rich Carbonaceous Materials holding capacity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2: 103 –111.
- Walkley, A., Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
- Xu, G., Lv, Y., Sun, J., Shao, H., Wei, L. (2012). Recent advances in biochar applications in agricultural soils: benefits and environmental implications. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 40(10): 1093-1098.
- Xu, H., Shan, Y., Ling, N., Ren, L., Qu, H., Liu, Z., Xu, G. (2023). Divergent effects of food waste derived hydrochar on hydraulic properties and infiltration in a sandy soil. *Journal of Hydrology*: 626, 130267.
- Xue, Y., Gao, Y., Yao, Y., Inyang, Zhang, M., Zimmerman, K. S. (2012). Hydrogen peroxide modification enhances the ability of biochar (hydrochar) produced from hydrothermal carbonization of peanut hull to remove aqueous heavy metals: batch and column tests, *Chemical engineering journal*, 200: 673–680.