تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۳ | خرداد ۱۴۰۱ (ص ۴۸۳-۴۷۱)

DOI:https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.337513.669188

(مقاله علمی - پژوهشی)

Investigation of Biochar Effect on Some Physical Properties of Soil, Crop Water Stress Index and Wheat Yield in Sandy Loam Soil

HASSAN OSOOLI[1], AHMAD KARIMI[*1], HOSSEIN SHIRANI[2], SAYYED HASSAN TABATABAEI[3]

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.
3. Department of Irrigation Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
(Received: Jan. 17, 2022- Revised: March. 10, 2022- Accepted: March. 13, 2022)

ABSTRACT

Soil remediation with biochar is a new approach in crop residue management. The aim of this study was to investigate the effect of different amounts of wheat straw biochar in different particle sizes on soil air capacity (AC), macro-pores (P_{MAC}), plant available water (PAW), Dexter index, crop water stress index (CWSI) and wheat yield in a sandy loam soil. A factorial experiment with a randomized complete block design was conducted at the East Azerbaijan Agricultural Research and Education Center (Saeidabad Station) in 2018 and 2019 in three replications. Wheat biochar with amounts of 0.5%, 1.5% and 3% and particle sizes of 0-0.5, 0.5-1 and 1-2 were mixed with soil to a depth of 15 cm. The results showed that the AC was improved by adding 0.5% and 1.5% biochar amount and with the particle size of 0-0.5 mm and 0.5-1 mm, respectivilly, compared to the control. The biochar with amount of 3% and the particle size of 0.5-1 mm produced the highest amount of P_{MAC}. In all treatments, the PAW increased significantly compared to the control. Dexter index had a significant increase compared to the control, only in 0.5% and 1.5% amounts with particle sizes of 0-0.5 and 0.5-1 mm respectivily. The change in biochar particle size at 0.5% and 1.5% had no significant effect on dextr index. The lowest CWSI compared to the control observed in biochar amount of 1.5% and particle size of 1-2 mm. In 1.5% and 3% biochar values with 0.5-1 mm particle size and also in 3% biochar values with 0-0.5 mm particle size, the increase in wheat yield was significant compared to the control. The highest significant positive correlation was observed between wheat yield and Dexter index. The results of this study showed that the changes of soil physical properties depend on the amount and particle size of biochar and it should be considered when using this remediation method.

Keywords: Dexter Index, Plant Available Water, Soil Air Capacity, Soil Macro-Pore, Wheat Straw Biochar.

[*]Corresponding Author's Email: karimiahmad1342@sku.ac.ir

بررسی اثر بیوچار بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک، شاخص تنش آبی و عملکرد گندم در خاک لوم شنی

حسن اصولی[۱]، احمد کریمی[۱*]، حسین شیرانی[۲]، سیدحسن طباطبایی[۳]

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷- تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۱۹- تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۲۲)

چکیده

اصلاح خاک با بیوچار، رهیافت جدیدی در مدیریت بقایای گیاهی است. این پژوهش با هدف بررسی اثر مقادیر مختلف بیوچار کاه گندم در اندازه ذرات متفاوت بر گنجایش هوای خاک (AC)، منافذ درشت (P_{MAC})، آب قابل‌استفاده گیاه (PAW)، شاخص دکستر، شاخص تنش آبی (CWSI) و عملکرد گندم در یک خاک لوم شنی انجام شد. آزمایشی به‌صورت فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی آذربایجان شرقی (ایستگاه سعیدآباد) در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ در سه تکرار اجرا شد. بیوچار گندم در مقادیر ۰/۵٪، ۱/۵٪ و ۳٪ و با اندازه ذرات ۰/۵-۰، ۱-۰/۵ و ۲-۱ میلی‌متر تا عمق ۱۵ سانتی‌متری با خاک مخلوط شدند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که ویژگی AC با مقادیر ۰/۵٪ و ۱/۵٪ بیوچار و به ترتیب اندازه ذرات ۰/۵-۰ mm و ۱-۰/۵ mm بیوچار نسبت به شاهد بهبود یافت. مقدار ۳٪ بیوچار و اندازه ذرات ۱-۰/۵ آن، سبب تولید بیشترین مقدار P_{MAC} گردید. در تمام تیمارها، میزان PAW نسبت به شاهد به‌صورت معنی‌داری افزایش یافت. شاخص دکستر صرفاً در مقادیر R_1 و R_2 با اندازه ذرات ۰/۵-۰ و ۱-۰/۵ افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد داشت. تغییر در اندازه ذرات بیوچار در مقادیر ۰/۵٪ و ۱/۵٪، تأثیر معنی‌داری در تغییر شاخص دکستر نداشت. کمترین مقدار شاخص CWSI نسبت به شاهد، در مقدار ۱/۵٪ و اندازه ذرات ۲-۱ بیوچار مشاهده شد. در مقادیر ۱/۵٪ و ۳٪ بیوچار با اندازه ذرات ۱-۰/۵ mm و نیز در مقدار ۳٪ بیوچار با اندازه ذرات ۰/۵-۰ mm، افزایش عملکرد نسبت به شاهد معنی‌دار بود. بیشترین همبستگی مثبت معنی‌دار بین عملکرد و شاخص دکستر مشاهده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک به مقدار و اندازه ذرات بیوچار بستگی داشته و در اصلاح خاک با بیوچار، لازم است که موردتوجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آب قابل‌استفاده، بیوچار کاه گندم، شاخص دکستر، گنجایش هوای خاک، منافذ درشت خاک.

مقدمه

خاک علاوه بر نقش خود در چرخه کربن، به‌عنوان بستر تولید غذا و نیز زیست سوخت[۱] بوده و نقشی اساسی در مدیریت هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز دارد. خاک در ایفای نقش خود در طبیعت، متناوباً دچار تخریب می‌شود (Lal, 2015). تخریب خاک، در بسیاری از مناطق جهان، یک محدودیت جدی در زنجیره تولید پایدار محصولات کشاورزی به‌حساب می‌آید (Agegnehu *et al.*, 2017).

ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های کشاورزی، عملکردهای خاک مانند نفوذ آب به خاک، انتقال و نگهداشت آب در منطقه ریشه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Reynolds *et al.*, 2009). با کاهش کیفیت فیزیکی خاک، تنش‌های فیزیکی مانند کاهش پخشیدگی اکسیژن به سمت ریشه‌ها، افزایش مقاومت فروروی خاک، کاهش توسعه ریشه گیاهان و کاهش مقدار آب قابل‌استفاده گیاه به وجود آمده و منجر به کاهش رشد گیاه می‌شود (Emami *et al.*, 2008). ویژگی‌های فیزیکی خاک را می‌توان با افزودن مواد آلی (بقایای گیاهی و جانوری) و مواد آلی کمپوست شده و بیوچار اصلاح نمود (Osooli *et al.*, 2021; Emami *et al.*, 2014). افزودن بیوچار به خاک به‌منظور اصلاح ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن، رهیافت جدیدی در مدیریت بقایای آلی است. بیوچار یک ماده آلی غنی از کربن است که از حرارت دادن زیست‌توده در دمای بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، در شرایط بدون اکسیژن یا با اکسیژن کم تولید می‌شود (Verheijen *et al.*, 2010).

بررسی مطالعات انجام‌شده نشان‌دهنده نقش مثبت بیوچار در افزایش تخلخل کل، کاهش چگالی ظاهری خاک و نیز افزایش ظرفیت نگهداشت رطوبت خاک است (Blanco-Canqui, 2017).

* نویسنده مسئول: karimiahmad1342@sku.ac.ir

1 Biofuel

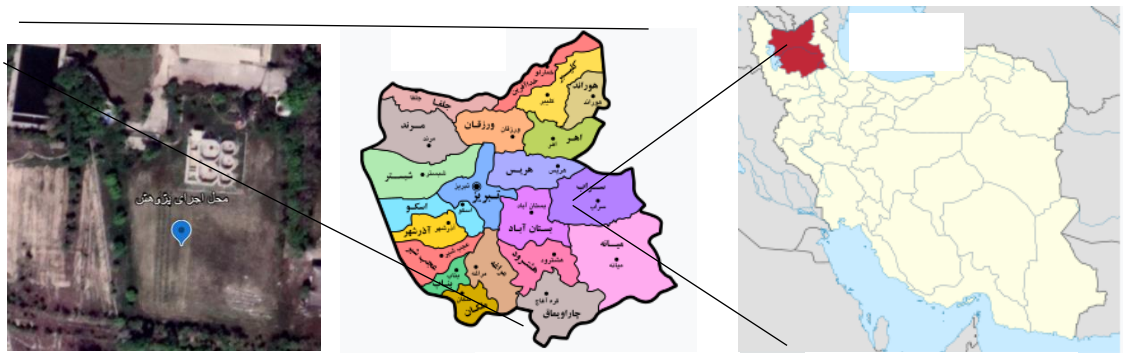
طی پژوهشی Nowrouzi *et al.*, (2016) با بررسی اثر کوتاه‌مدت بیوچار تهیه‌شده از برگ خرما بر حفظ رطوبت در خاک لوم شنی، گزارش کردند که بیوچار سبب افزایش میزان رطوبت اشباع، گنجایش ظرفیت زراعی، مقدار منافذ درشت خاک و آب قابل‌استفاده گیاه در مقایسه با تیمار شاهد گردید. نتایج مطالعه Ru *et al.*, (2020) نشان داد که افزایش آب قابل‌استفاده گیاه با افزودن بیوچار به خاک، همیشه سبب افزایش جذب آب توسط گیاه نشده و افزایش محصول را به دنبال ندارد؛ چرا که وضعیت آبی گیاه نه‌تنها به میزان رطوبت موجود در خاک، بلکه به توزیع ریشه گیاه و ظرفیت انتقال آن بستگی دارد. برای بهره‌گیری از ویژگی‌های بیوچار در افزایش آب قابل‌استفاده گیاه و کاهش اثرات تنش خشکی (حتی تنش‌های جزئی) و تعیین مقدار بهینه بیوچار برای این منظور، می‌توان از ویژگی‌هایی مانند شاخص تنش آبی گیاه[1](CWSI) در کنار میزان آب قابل‌استفاده گیاه استفاده کرد (Khorsand *et al.*, 2021). این شاخص که بر اساس رابطه تجربی بین اختلاف دمای هوا و دمای شاخساره گیاهی با کمبود فشار بخار تعیین می‌شود، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مناسب جهت رصد کردن وضعیت آبی گیاه مورداستفاده قرار گیرد (Ahmadi *et al.*, 2018).

مطالعات نشان می‌دهد که اثر کاربرد بیوچار بر ویژگی‌های خاک، عملکرد و شاخص‌های رشد گیاهی به نوع بیوچار، مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک و ویژگی‌های خاک بستگی دارد. بررسی منابع نشان می‌دهد که در مطالعات انجام‌شده بیشتر بر نوع و مقدار بیوچار تأکید شده و کمتر به بررسی اثر توأم مقدار و اندازه ذرات بیوچار پرداخته شده است. همچنین، مطالعات اندکی در خصوص اثر مقدار و اندازه ذرات بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های آهکی مناطق نیمه‌خشک و شاخص تنش آبی گندم انجام شده است. این پژوهش مزرعه‌ای با هدف بررسی اثر اندازه ذرات و مقادیر مختلف بیوچار کاه گندم بر گنجایش هوای خاک، منافذ درشت خاک، آب قابل‌استفاده، شاخص دکستر، شاخص تنش آبی و عملکرد گندم و نیز رابطه عملکرد گندم با ویژگی‌های موردمطالعه در یک خاک آهکی با بافت لوم شنی انجام شد.

مواد و روش‌ها

محل انجام آزمایش

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی آذربایجان شرقی (واقع در ۳۵ کیلومتری جنوب شرقی تبریز (ایستگاه سعیدآباد)) با مختصات جغرافیایی °۳۷/۹۷۵۲۷۸ عرض شمالی و °۴۶/۵۵۱۶۶۷ طول شرقی و ارتفاع ۱۸۴۳ متر از سطح دریا اجرا گردید (شکل ۱). بارش سالانه منطقه ۳۳۱ میلی‌متر و میانگین سالانه دمای آن ۱۷/۵ درجه سلسیوس است. بر اساس روش تقسیم‌بندی اقلیمی آمبرژه، اقلیم منطقه نیمه‌خشک سرد است. برای اطلاع از برخی ویژگی‌های خاک موردمطالعه، قبل از افزودن بیوچار، یک نمونه خاک مرکب از محل آزمایش تهیه شده و pH خاک در سوسپانسیون ۱ به ۱ خاک به آب مقطر و قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره گل اشباع، مقدار کربنات کلسیم معادل با روش کلسی‌متری، کربن آلی خاک با روش اکسیداسیون تر(Jones, 1999)، چگالی ظاهری خاک با روش استوانه نمونه‌برداری فلزی، چگالی حقیقی خاک با پیکنومتر آب و بافت خاک با روش هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986) اندازه‌گیری گردیدند. مقدار فسفر قابل جذب خاک به روش اولسن (Olsen and Sommers, 1982) و مقدار پتاسیم قابل‌استفاده خاک به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم (Richards, 1975) تعیین شدند. برخی از ویژگی‌های خاک موردمطالعه در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محل اجرای پژوهش

1 Crop Water Stress Index (CWSI)

چگونگی تهیه و ویژگی‌های بیوچار

در این تحقیق برای تهیه بیوچار از کاه گندم استفاده گردید. مواد اولیه هوا خشک در یک کوره از نوع دو بشکه با ظرفیت ۲۰۰ لیتر در دمای ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد در زمان ۸ ساعت گرماکافت شدند. بیوچار تهیه شده با الک‌های با قطر منافذ ۲، ۱ و ۰/۵ میلی‌متری جداسازی شده و تا زمان اضافه‌شدن به خاک در کیسه‌های پلی‌اتیلنی غیرقابل‌نفوذ در برابر هوا بسته‌بندی شدند. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچارهای تهیه‌شده، در ذراتی با ابعاد ۱۵۰ تا ۸۵۰ میکرون تعیین گردید (Rajkovich et al., 2012). pH و قابلیت هدایت الکتریکی بیوچار (EC) در محلولی با نسبت ۱:۲۰ (وزن به حجم) بیوچار به آب مقطر (Definition, 2015)، چگالی ظاهری بیوچار با استفاده از یک قالب با قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۷۰ میلی‌متر، مقدار کربن و هیدروژن بیوچار با دستگاه CHNS Analyzer مدل LEO 1455 VP اندازه‌گیری شد (Rajkovich et al., 2012). چگالی حقیقی بیوچار با پیکنومتر و نفت سفید تعیین گردید (Gupta et al., 2002). اندازه‌گیری پتاسیم و فسفر قابل‌استفاده بیوچار با روش ارائه توسط Houba et al (2000)، انجام شدند (جدول ۱).

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های خاک و بیوچار کاه گندم مورد استفاده در آزمایش

ویژگی‌ها	واحد	خاک	بیوچار کاه گندم
شن	٪	۵۷	-
سیلت	٪	۳۰	-
رس	٪	۱۳	-
کربنات کلسیم معادل	٪	۱۳/۵	-
چگالی ظاهری خاک	g cm^{-3}	۱/۲۷	۰/۱۵
چگالی حقیقی خاک	g cm^{-3}	۲/۴۵	۱/۰۹۹
pH	-	۷/۸۵	۹/۲۲
قابلیت هدایت الکتریکی	dS m^{-1}	۱/۶۵	۲/۱۵
فسفر	mg kg^{-1}	۱۸	۱۴۰۰
پتاسیم	mg kg^{-1}	۵۴۷	۱۲۵۰۰
کربن آلی (C)	٪	۰/۵۱۷	۴۸/۹
هیدروژن (H)	٪	-	۳/۱۹

اجرای آزمایش

این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور مقدار و اندازه بیوچار در سه تکرار انجام شد. بیوچار گندم تهیه شده در مقادیر ۰/۵، ۱/۵ و ۳ درصد وزنی (به ترتیب ۹/۵، ۲۸/۵ و ۵۷/۱۵ تن در هکتار) و اندازه ذرات ۰/۵ —۰، ۱-۰/۵ و ۲-۱ میلی‌متر، به خاک موردمطالعه اضافه شد. برای این منظور، بعد از شخم زمین، کرت‌های آزمایشی در ابعاد یک متر در یک متر ایجاد شدند. برای عدم نشت آب به کرت‌های مجاور و نیز سهولت تردد و نمونه‌برداری بین کرت‌ها در هر بلوک نیم متر و بین بلوک‌های متوالی یک متر فاصله در نظر گرفته شد. در هر تکرار، یک کرت شاهد هم در نظر گرفته شد. قبل از اختلاط بیوچار با خاک، کرت‌ها آبیاری شده و اجازه داده شد تا رطوبت خاک به ظرفیت زراعی برسد. در تاریخ ۲۰ ام مرداد ۱۳۹۷، تیمارها به سطح خاک کرت‌ها اضافه و با بیل تا عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری با خاک مخلوط شدند. مطابق تقویم کشت منطقه در کرت‌های آزمایشی گندم واریته میهن کشت شد. بر اساس آنالیز خاک، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (۲۲۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره) در سه تقسیط به هر کرت اضافه شد Malakouti and Ghaybi, 1997). نیاز آبی گندم با استفاده از مدل پنمن-مانتیث- فائو ۵۶ بر اساس داده‌های اقلیمی محل مورد آزمایش، به‌صورت ماهانه (۳۷۰ میلی‌متر در یک فصل زراعی) تعیین شد که بعد از کسر میزان بارش اتفاق افتاده بین دو مرحله آبیاری، کرت‌ها در هر ماه به طور مساوی آبیاری شدند. شاخص تنش آبی در مرحله خوشه‌دهی گندم و شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک، ۲۷۰ روز بعد از افزودن بیوچار به خاک، پس از برداشت گندم اندازه‌گیری شدند.

تعیین ویژگی‌های فیزیکی خاک

برای به‌دست‌آوردن مقادیر گنجایش هوای خاک، مقدار منافذ درشت خاک، آب قابل‌استفاده و شاخص دکستر نیاز به تعیین منحنی نگهداشت آب خاک[1] (SWRC) بود. برای تعیین SWRC، از نمونه‌های خاک دست‌نخورده استفاده شد. نمونه‌ها قبل از قرار داده شدن در دستگاه‌های اندازه‌گیری، به مدت ۲۴ ساعت از آب اشباع شدند. برای این منظور، یک طرف استوانه‌های نمونه‌برداری حاوی خاک با پارچه‌های نبافته پوشیده شده و در داخل ظرف پلاستیکی حاوی آب قرار داده شد، به‌نحوی‌که دو سوم ارتفاع استوانه‌ها در آب قرار گرفت. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در این وضعیت نگهداری شدند تا نمونه‌های خاک از آب اشباع شوند. سپس در هر نمونه، میزان رطوبت خاک در مکش‌های ماتریک ۴ و ۱۰ کیلو پاسکال با دستگاه جعبه شن[2] و نیز در مکش‌های ماتریک ۳۳، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال با دستگاه صفحه فشاری[3] تعیین گردید. در هر مرحله، نمونه‌های خاک بعد از بعد تعادل رسیدن با مکش اعمال‌شده توزین شدند. درنهایت نمونه‌های خاک در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک و توزین شده و رطوبت وزنی هر نمونه در مکش‌های

1 Soil Water Retention Curve (SWRC)
2 Sand box
3 Pressure plate

موردنظر محاسبه گردید.

آب استفاده گیاه[1] (PAW)، از اختلاف رطوبت حجمی گنجایش مزرعه‌ای[2] (FC) در مکش ۱۰ کیلو پاسکال (باتوجه‌به بافت لوم شنی خاک) و رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی دائمی[3] (PWP) در مکش ۱۵۰۰ کیلو پاسکال تعیین گردید (Głab *et al.*, 2016).

گنجایش هوای خاک[4] (AC) از معادله زیر محاسبه شد (Reynolds *et al.*, 2009):

$0 \leq AC \leq \theta s \;\; \theta_{FC}\,(\Psi=-1m)\,;\,-\,(\Psi=0)\;AC=\theta_s$ (رابطه ۱)

که در آن θ_s ($m^3\ m^{-3}$) میزان رطوبت اشباع خاک، (m^{-3}) θ_{FC} (m^3) میزان رطوبت خاک در ظرفیت زراعی است.

منافذ درشت خاک[5] (P_{MAC}) از معادله زیر محاسبه شد:

(رابطه ۲)

$$P_{MAC}=\theta_s(\Psi=0)-\theta_m(\Psi=-0.1m);\;\; 0\leq P_{MAC}\leq \theta s$$

که در آن θs ($m^3\ m^{-3}$) میزان رطوبت اشباع خاک، (m^{-3}) θm (m^3) میزان رطوبت خاک در مکش ۰/۱ m- (۱- کیلو پاسکال) است (Reynolds *et al.*, 2009).

بر داده‌های رطوبت وزنی نمونه‌های خاک به‌دست‌آمده در مکش‌های ۴، ۱۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال، مدل ون‌گنوختن (رابطه ۳) برازش گردید (Van Genuchten, 1980). برای برازش مدل مذکور، از نرم‌افزار آنلاین SWRC fit 3.1 استفاده شد (Seki, 2007).

$$\theta(\psi)=\theta r+\frac{(\theta s-\theta r)}{\{1+(\alpha h)^{n}\}^{-m}}$$ (رابطه ۳)

برای محاسبه شاخص دکستر (شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف) از معادله زیر استفاده شد (Dokoohaki *et al.*, 2018).

$$S_{gi}=\frac{d(\theta_{g_i})}{d(lnh_i)}=\left|-n\,(\theta_s-\theta_r\,\left[1+\frac{1}{m}\right]^{-[m+1]}\right|$$ (رابطه ۴)

که در آن S_{gi} شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف آن است و سایر پارامترهای معادله ۵، در معادله ۳ تعریف شده‌اند.

شاخص تنش آبی گیاه و عملکرد گندم

مراحل گلدهی و خوشه‌دهی گندم از مراحل حساس به تنش آبی است که وقوع تنش آبی در این مرحله منجر به کاهش قابل‌توجه عملکرد می‌شود (Mohseni Movahed and Akbari, 2012). برای ارزیابی اثر بیوچار بر وضعیت آبی گندم در مرحله خوشه‌دهی، از شاخص تنش آبی گیاه استفاده شد. شاخص تنش آبی[6] (CWSI)، از روی دمای شاخسار گیاه[7] تعیین گردید. برای این منظور دمای شاخسار گیاه در ساعات بین ۱۲ تا ۱۴ با دماسنج فروسرخ دستی مدل Testo 830T2 با زاویه ۴۵ درجه و فاصله ۰/۵ متر از هر کرت اندازه‌گیری شد (Idso,1982). برای کاهش اثر زاویه تابش خورشید بر قرائت دستگاه، اندازه‌گیری‌ها در چهار جهت انجام گرفت. دمای هوا با دماسنج تر و خشک در زمان بین ۱۲ تا ۱۴ در ایستگاه هواشناسی واقع در محل اجرای آزمایش اندازه‌گیری گردید و با استفاده از نمودار سایکرومتر، میزان رطوبت نسبی[8] (RH) هوا به دست آمد. فشار بخار هوا (es) و میزان کمبود رطوبت اشباع[9] (VPD) از معادله زیر محاسبه شد (Nakhjavani Mogaddam and Ghahraman, 2007).

(رابطه ۵)

$$es=۳۳/۸۶۳۹(۰/۰۰۷۳۸\,Ta+۰/۸۰۷۳)^{۸}-۰/۰۰۰۰۱۹(۱/۸\,Ta+۴۸)+\;\;۰/۰۰۳۱۶$$

که در آن Ta دمای هوا برحسب درجه سلسیوس و es فشار بخار هوا در دمای Ta و برحسب میلی بار است.

VPD = es (1 - RH) (رابطه ۶)

که در آن VPD کمبود فشار بخار اشباع هوا (میلی بار) و RH رطوبت نسبی هوا در دمای Ta است.

برای تعیین CWSI از معادله زیر استفاده شد.

$$CWSI=\frac{dTc-dTl}{dTu-dTl}$$ (رابطه ۷)

که در آن dTc اختلاف دمای هوا و شاخساره گیاه در شرایط آزمایش، dTu حد بالای اختلاف دمای هوا و شاخساره گیاه (حد تنش کامل و بسته شدن روزنه‌ها)، dTl حد پایین اختلاف دمای هوا و شاخساره گیاه که در آن گیاه در شرایط بدون تنش آبی قرار دارد. در این پژوهش بر اساس پیشنهاد Nakhjavani Moghaddam and Ghahraman (2007)، $dTu=2$ در نظر گرفته شد و dTl از معادله زیر محاسبه شد. این معادله برای مرحله خوشه‌دهی گندم و بعد از آن، ارائه‌شده است.

$$dTl=Tc-Ta=1.822-1.42VPD$$ (رابطه ۸)

که در آن Tcو Ta به ترتیب دمای شاخساره گیاه و دمای هوا برحسب درجه سلسیوس و VPD کمبود فشار بخار برحسب KPa است. بعد از رسیدن کامل گندم برای اندازه‌گیری میزان عملکرد گیاه در تیمارهای آزمایش در هر کرت از سطحی به ابعاد ۰/۶ × ۰/۶ متر (جهت حذف اثرات حاشیه‌ای در کرت‌ها) بوته‌های گندم برداشت گردید و بعد از کوبیدن آنها، دانه‌های تولیدی در هر کرت وزن گردید.

تجزیه و تحلیل آماری

1 Plant Available Water (PAW)
2 Field Capacity (FC)
3 Permanent Wilting Point (PWP)
4 Air Capacity (AC)
5 Soil macro-pore
6 Crop Water Stress Index (CWSI)
7 Crop canopy
8 Relative Humidity (RH)
9 Vapor Pressure Deficiency (VPD)

برای انجام تحلیل‌های آماری، نرمال بودن نتایج با آزمون شاپیرو-ویلک و یکنواختی واریانس‌ها با آزمون لوون[1] تست گردید. برای مقایسه نتایج تیمارها با شاهد، آنالیز واریانس یک‌طرفه در قالب بلوک‌های کامل تصادفی انجام و نتایج تیمارها با شاهد از طریق آزمون دانت در سطح احتمال ۵٪ ($P<0.05$) مقایسه شد. برای مشخص نمودن اثرات اصلی تیمارها و نیز اثرات متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های موردمطالعه، تجزیه واریانس دو عامله انجام شد (در این مرحله نتایج کرت‌های شاهد دخالت داده نشد). میانگین ویژگی‌ها در تیمارهای موردمطالعه با آزمون LSD[2] در سطح احتمال ۵٪ ($P<0.05$) مقایسه گردیدند. ماتریس همبستگی بین میزان عملکرد و ویژگی‌های موردمطالعه، (ضریب همبستگی پیرسون) ویژگی‌های موردمطالعه محاسبه شد. برای انجام تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار Statistix 9 و SPSS 16 استفاده شد.

نتایج و بحث

ظرفیت هوای خاک

اثر تیمارها بر ظرفیت هوای خاک معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج این پژوهش نشان داد که ظرفیت هوای خاک در تیمار شاهد m^3 m^{-3} ۰/۰۹۹۱ بود و بیوچار گندم بسته به مقدار و اندازه ذرات موجب افزایش یا کاهش ظرفیت هوای خاک نسبت به تیمار شاهد شد. به‌این‌ترتیب که ظرفیت هوای خاک، در مقادیر ۱/۵٪ و ۳٪ با اندازه ذرات ۰/۵-۰ mm بیوچار، در مقایسه با شاهد تغییر معنی-داری نداشت، ولی در مقادیر ۰/۵٪ و ۱/۵٪، به ترتیب با اندازه ذرات ۰/۵-۰ mm و ۱-۰/۵ mm در مقایسه با شاهد به‌صورت معنی‌داری (به ترتیب ۳۳/۳٪ و ۶۰/۵٪) افزایش یافت. در بقیه مقادیر و اندازه‌های موردمطالعه بیوچار، ظرفیت هوای خاک نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری داشت. بیشترین مقدار کاهش ظرفیت هوای خاک (۶۷/۳٪) نسبت به شاهد در مقدار ۳٪ با اندازه ذرات ۱-۰/۵ mm بیوچار کاه گندم مشاهده شد.

تغییر در ظرفیت هوای خاک (AC) با کاربرد بیوچار زمانی می‌تواند به افزایش محصول منجر شود که اکسیژن‌رسانی به ریشه گیاهان را افزایش دهد. Reynolds *et al.*, (2009) پیشنهاد کرده-اند که در خاک‌های معدنی، مقدار $AC \geq 0/10$ m^3 m^{-3} به‌عنوان مقدار بهینه ظرفیت هوای خاک (AC) برای رشد گیاه است. به‌طوری‌که در مقدار ذکرشده صدمه به ریشه گیاه و کاهش محصول در اثر کمی تهویه در محیط ریشه به حداقل کاهش می-یابد. بررسی نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در کرت شاهد، میزان ظرفیت هوای خاک m^3 m^{-3} ۰/۰۹۹۱ بود، که در محدوده مطلوب برای رشد گیاه قرار نداشت. با افزودن بیوچار کاه گندم در مقادیر ۰/۵٪ و R_2، به ترتیب با اندازه ذرات ۰/۵-۰ mm و ۱-۰/۵ mm، میزان ظرفیت هوای خاک به ترتیب m^3 m^{-3} ۰/۱۳۲۱ و m^3 m^{-3} ۰/۱۵۹۱ گردید که نسبت به میزان ظرفیت هوای خاک در تیمار شاهد بهبودیافته و در محدوده مطلوب برای رشد گیاه قرارگرفتند. در بقیه تیمارها، میزان ظرفیت هوای خاک از میزان مطلوب برای رشد گیاه ($AC \geq 0/10$ m^3 m^{-3}) کاهش نشان داد.

جدول ۲- تجزیه واریانس یک‌طرفه نتایج ویژگی‌های فیزیکی خاک، شاخص دکستر و عملکرد گندم

منابع تغییرات	درجه آزادی	گنجایش هوای خاک	منافذ درشت	آب قابل‌استفاده گیاه	شاخص دکستر	شاخص تنش آبی	عملکرد گندم
بلوک	۲	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۲۰	$۴/۳۸\times۱۰^{-۵}$	۰/۰۰۰۵۳	۷۰۸۸۷
تیمار	۹	۰/۰۰۴۱۳*	۰/۰۲۵۹*	۰/۰۰۲۱۳*	$۱/۷۲۷\times۱۰^{-۴}$*	۰/۴۲۲۶۶*	۹۸۱۰۷۵*
خطا	۱۸	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۷	$۹/۴۲۶\times۱۰^{-۷}$	۰/۰۰۷۱۳	۷۹۸۳۵
ضریب تغییرات	-	۸/۹۸	۳/۰۲	۵/۱۷	۶/۶۶	۲۱/۶۹	۶/۸۴

*: معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ ($P<0.05$)، ns: غیر معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ ($P<0.05$).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مقدار و اندازه ذرات بیوچار و نیز اثرات متقابل آن‌ها اثر معنی‌داری در تغییر ظرفیت هوای خاک داشتند (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات متقابل مقدار و اندازه ذرات بیوچار نشان داد که ظرفیت هوای خاک (AC) در مقدار ۰/۵٪ بیوچار کاه گندم، با افزایش اندازه ذرات بیوچار، کاهش معنی‌داری یافت و در مقدار ۱/۵٪ بیوچار با افزایش اندازه ذرات بیوچار از ۰/۵-۰ mm به ۱-۰/۵ mm، ظرفیت هوای خاک افزایش معنی‌داری نشان داد؛ ولی در همان مقدار بیوچار، با افزایش اندازه ذرات از ۱-۰/۵ mm به ۲-۱ mm، ظرفیت هوای خاک به‌صورت معنی‌داری کاهش یافت. در مقدار ۳٪ بیوچار کاه گندم تغییرات ظرفیت هوای خاک با تغییر اندازه ذرات برعکس مقدار ۱/۵٪ بود. بیشترین ظرفیت هوای خاک در مقدار ۱/۵٪ و

1 Leven's test
2 Fisher's Least Significant Difference

اندازه ذرات mm ۱-۰/۵ این بیوچار مشاهده شد (جدول ۴). نتایج متفاوتی از اثر بیوچار بر ظرفیت هوای خاک توسط محققان گزارش شده است. Esmailnajad *et al.*, (2016) گزارش کردند که اثر اضافه‌کردن بیوچارهای تراشه چوب سیب[1] و شلتوک[2] در اندازه ذرات مختلف در افزایش ظرفیت هوای خاک نسبت به شاهد با گذشت زمان کاهش یافت و در زمان ۸۰ و ۱۲۰ روز بعد از افزودن بیوچار به خاک، تیمار بیوچار چوب سیب گرماکافت شده در دمای ۵۵۰ درجه با اندازه ذرات بزرگ‌تر از یک میلی‌متر سبب افزایش ظرفیت هوای خاک نسبت به شاهد شد. Pranagal and Kraska (2020) بعد از مطالعه ده‌ساله گزارش کردند که اثر بیوچار که افزودن بیوچار به خاک باعث تغییر در ظرفیت هوای خاک شد، ولی این تغییر همیشه مثبت نبود. ایشان نتیجه‌گیری کردند که بیشتر شدن مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک، سبب تغییر نامطلوب در نسبت هوا - خاک در مخلوط خاک و بیوچار شد. Werdin et al., (2021) دلیل آن را انسداد منافذ درشت خاک توسط ذرات ریز بیوچار عنوان کردند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تغییر ظرفیت هوای خاک و قرارگرفتن آن در وضعیت نامطلوب برای رشد گیاه، علاوه بر مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک، به‌اندازه ذرات بیوچار نیز بستگی داشت.

جدول ۳- تجزیه واریانس دوطرفه ویژگی‌های فیزیکی خاک، شاخص دکستر و عملکرد گندم

منابع تغییرات	درجه آزادی	گنجایش هوای خاک	منافذ درشت	آب قابل‌استفاده	شاخص S	شاخص تنش آبی	عملکرد گندم
		میانگین مربعات					
بلوک	۲	۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۰۰۰۳۶۵۴	۰/۰۰۱۷۷	۴۳۲۷۳
مقدار بیوچار (BR)	۲	۰/۰۰۴۶۱*	۰/۰۳۹۸*	۰/۰۰۰۳۴*	۰/۰۰۰۱۷۱*	۰/۴۶۴۳۲*	۱۴۳۹۶۲۲۵*
اندازه ذرات بیوچار (BS)	۲	۰/۰۰۴۱۵*	۰/۰۱۸۲۱*	۰/۰۰۱۰۵*	۰/۰۰۰۲۱۷*	۰/۰۰۷۹۳ns	۱۶۹۸۶۸۳*
BS×BR	۴	۰/۰۰۴۸*	۰/۰۰۳۹۲*	۰/۰۰۰۵۱*	۰/۰۰۰۱۳۷۴*	۰/۶۸۹۹۸*	۵۸۵۸۴۷*
خطا	۱۶	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۱۰۵۲	۰/۰۰۷۱۴	۸۶۹۶۲

***: معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ (P<0.05)، ns: غیر معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ (P<0.05).**

منافذ درشت خاک (P_{MAC})

تیمارهای موردمطالعه اثر معنی‌داری بر منافذ درشت خاک داشتند (جدول ۲). در این پژوهش میانگین منافذ درشت خاک در تیمار شاهد ۰/۱۱۲ بود و در تمام تیمارها، منافذ درشت خاک در مقایسه با شاهد افزایش معنی‌داری داشت (جدول ۳). در بین تیمارهای موردمطالعه، بیشترین افزایش منافذ درشت خاک (۲۸۵/۱۸٪) نسبت به شاهد، در مقدار ۳٪ و اندازه ذرات بیوچار mm ۱-۰/۵ مشاهده شد (جدول ۴). تجزیه واریانس نشان داد که مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک و اندازه ذرات بیوچار و نیز اثرات متقابل آن‌ها اثر معنی‌داری در تغییر منافذ درشت خاک داشتند (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل مقدار بیوچار و اندازه ذرات بیوچار بر منافذ درشت نشان داد که در مقدار ۰/۵٪ و ۱/۵٪ بیوچار کاه گندم، با افزایش اندازه ذرات بیوچار، منافذ درشت افزایش معنی‌داری داشت. در مقدار ۳٪ بیوچار کاه گندم، با افزایش اندازه ذرات از mm ۰/۵-۰ به mm ۱-۰/۵، P_{MAC} افزایش معنی‌داری داشت؛ ولی در همان مقدار بیوچار با افزایش اندازه ذرات از mm ۱-۰/۵ به mm ۲-۱، منافذ درشت خاک به‌صورت معنی‌داری کاهش یافت. در تیمارهای بیوچار گندم، بزرگ‌ترین میانگین منافذ درشت (۰/۴۳۱۴) در مقدار ۳٪ و اندازه ذرات mm ۱-۰/۵ این بیوچار مشاهده شد (جدول ۳). Esmaeelnejad *et al.*, (2016) بعد از یک آزمایش ۱۲۰ روزه انکوباسیون[3] بیوچار-خاک با تیمارهای بیوچارهای مختلف در اندازه ذرات متفاوت گزارش کردند که افزودن بیوچار به خاک لوم شنی سبب تأثیر مثبت بر منافذ ریز و منافذ متوسط شده و تأثیری بر میزان منافذ درشت ندارد.

نتایج این پژوهش نشان داد که بیوچار کاه گندم موجب افزایش منافذ درشت خاک می‌شود. Major *et al., (2010)* دلیل ایجاد منافذ درشت در خاک توسط بیوچار را افزودن شدن مستقیم منافذ داخلی ذرات بیوچار به منافذ خاک، ایجاد منافذ جدید بین ذرات خاک - بیوچار و در نهایت اصلاح منافذ خاک (ایجاد منافذ درشت) از طریق تشکیل خاکدانه‌ها تغییر می‌کند. نتایج مطالعه Hseu *et al.*, (2014) نشان داد که ذرات رس خاک بر روی ذرات بیوچار جذب سطحی می‌شوند و ادامه یافتن تشکیل کمپلکس خاک - بیوچار منجر به تولید خاکدانه‌های درشت در خاک می‌شود.

Reynolds *et al.*, (2009) میزان P_{MAC} بزرگ‌تر از ۰/۰۵ را مقدار مطلوب برای رشد گیاهان پیشنهاد کردند. در این

1 Apple wood chips
2 Rice husk
3 Incubation

پژوهش، مقدار P_{MAC} در تیمار شاهد ۰/۰۵ بود که با افزودن بیوچار گندم به خاک موردمطالعه، مقدار P_{MAC} بین ۰/۱۸ تا ۰/۳۳ قرار گرفت؛ که همه آن‌ها در محدوده مطلوب برای رشد گیاه بود.

آب قابل‌استفاده گیاه

اثر تیمارهای موردمطالعه در تغییر آب قابل‌استفاده گیاه (PAW) معنی‌دار بود (جدول ۲). میزان آب قابل‌استفاده گیاه در خاک در تیمار شاهد $cm^3\ cm^{-3}$ ۰/۱ بود و در تمام مقادیر و اندازه‌های موردمطالعه بیوچار کاه گندم به‌صورت معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش یافت (جدول ۴). Ibrahim and Horton (2021) دلیل افزایش آب قابل‌استفاده بعد از افزودن بیوچار (تهیه شده از برگ خرما) به خاک لوم شنی را، کاهش میانگین منافذ خاک عنوان کردند.

تجزیه واریانس نشان داد که مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک و اندازه ذرات بیوچار و نیز اثرات متقابل آن‌ها اثر معنی‌داری در تغییر مقدار آب قابل‌استفاده گیاه (PAW) داشتند (جدول ۳). اثر تغییر در اندازه ذرات بیوچار در یک مقدار ثابت به مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک بستگی داشت. به‌طوری‌که با بزرگ‌تر شدن اندازه ذرات از ۰/۵ mm-۰ به ۱-۰/۵ mm، در مقدار ۰/۵٪، تفاوت آماری معنی‌داری در آب قابل‌استفاده گیاه ایجاد نشد، ولی با افزایش اندازه ذرات بیوچار از ۱-۰/۵ mm به ۲-۱ mm، میزان آب قابل‌استفاده گیاه به‌صورت معنی‌داری ($P<0/05$) افزایش یافت. در مقدار ۱/۵٪ بیوچار کاه گندم با بیشتر شدن قطر ذرات بیوچار، میزان آب قابل‌استفاده گیاه به‌صورت معنی‌داری کاهش یافت؛ ولی در مقدار ۳٪ آن بیوچار، با بیشتر شدن قطر ذرات از ۰/۵ mm-۰ به ۱-۰/۵ mm، میزان آب قابل‌استفاده افزایش معنی‌داری داشت. بیشترین مقدار آب قابل‌استفاده گیاه در مقدار ۳٪ و اندازه ذرات ۱-۰/۵ mm بیوچار گندم مشاهده شد که با سایر مقادیر و اندازه‌های موردمطالعه آن بیوچار تفاوت معنی‌داری ($P<0/05$) داشت.

آب قابل‌استفاده گیاه (PAW) متأثر از میزان رطوبت در نقطه گنجایش زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائمی (PWP) بوده و نقش مهمی در مدیریت آب‌کشت‌های آبی دارد. اثر مثبت بیوچار بر افزایش قابلیت نگهداشت آب در خاک و نیز آب قابل‌دسترس گیاه توسط برخی محققین گزارش‌شده است (Verheijen *et al.*, 2019). این ویژگی‌ها با کاهش مصرف آب و کاهش دفعات آبیاری، می‌تواند در مناطق نیمه‌خشک فشار بر منابع آب را کم کند (Langeroodi *et al.*, 2018). نتایج این پژوهش نشان داد که بیوچار کاه گندم با اندازه ذرات متفاوت و با مقادیر مختلف، سبب افزایش آب قابل‌استفاده گیاه در خاک لوم شنی گردید. تغییر در این ویژگی‌های خاک موردمطالعه در این پژوهش، با نتایج مطالعات آزمایشگاهی و گلخانه‌ای Verheijenet *et al.*, (2019) و مزرعه‌ای Obia *et al.*, (2016) هم‌خوانی دارد. در این مطالعه، اندازه ذرات بیوچار نقش مهمی را در افزایش ضرایب رطوبتی خاک موردمطالعه داشت. اندازه ذرات بیوچار از طریق تغییر در فضاهای بین ذرات خاک[1] و نیز افزودن منافذ ساختمانی بیوچار به منافذ خاک[2]، میزان ذخیره آب در خاک را تحت‌تأثیر قراردادند. نتایج پژوهش‌ها نشان داده است که اثر تغییر در اندازه ذرات بسته به نوع بیوچار، مقدار بیوچار اضافه‌شده به خاک، اندازه ذرات ماده اولیه برای تهیه بیوچار و روش آماده‌سازی ذرات بیوچار، می‌تواند متفاوت باشد (Obia *et al.*, 2016).

افزایش آب قابل‌استفاده گیاه توسط ذرات متوسط (۱ mm-۰/۵) بیوچار کاه گندم، زمانی که در مقدار زیاد به خاک اضافه شده بودند، مشاهده شد، که با نتایج پژوهش Liu *et al.*, (2017) هم‌خوانی نداشت. نتایج پژوهش وی نشان داد که افزایش میزان آب قابل‌استفاده گیاه به‌وسیله ذرات درشت بیوچار، بیشتر به منافذ بین ذرات بیوچار و ماتریکس خاک (منافذ ساختمانی) بستگی داشت. در این پژوهش، در تیمار بیوچار گندم در اندازه درشت (۲mm-۱) با مقدار زیاد (۳٪)، فضاهای بین ذرات به حدی بیشتر شد که با افزایش میزان زه آب، مقدار آب قابل‌استفاده گیاه را نسبت به ذرات متوسط (۱ mm-۰/۵) و کوچک (۰/۵ mm-۰) بیوچار کاهش داد. میزان آب قابل‌دسترس گیاه می‌تواند میزان محصول کشت‌شده را تحت‌تأثیر قرار دهد

تصور می‌شود که برای رشد و عملکرد حداکثر به طور معمول، آب قابل‌دسترس گیاه برابر یا بیشتر از m^3m^{-3} ۰/۲ باشد (Reynolds *et al.*, 2009). در این پژوهش با اضافه‌کردن بیوچار کاه گندم میزان آب قابل‌استفاده گیاه در تمام مقادیر و اندازه‌های موردمطالعه نسبت به تیمار شاهد، که در محدوده مطلوب برای رشد گیاه نبود ($m^3\ m^{-3}$ ۰/۱)، افزایش یافت. با افزودن بیوچار کاه گندم به خاک موردمطالعه میزان آب قابل‌استفاده گیاه بین $m^3\ m^{-3}$ ۰/۲ – ۰/۱۸ قرار گرفت؛ که در محدوده مطلوب برای رشد گیاه قرار داشت.

1 interpores

2 intrapores

جدول ۴- مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی خاک، شاخص تنش آبی و عملکرد گندم

مقدار بیوچار	اندازه ذرات بیوچار	گنجایش هوای خاک	منافذ درشت	آب قابل‌استفاده	شاخص دکستر	شاخص تنش آبی	عملکرد گندم
٪	mm	$m^3\ m^{-3}$	$m^3\ m^{-3}$	$m^3\ m^{-3}$	-	-	$kg\ ha^{-1}$
شاهد		۰/۰۹۹۱	۰/۱۱۲	۰/۱۲	۰/۰۳۷۹	۰/۲۱۶۷	۳۸۸۱/۷
۰/۵	۰/۵-۰	۰/۱۳۲۱(*)b	۰/۱۷۸۸(*)g	۰/۲(*)d	۰/۰۴۸۳(*)bc	۰/۱۹۶۵ (ns)de	۳۷۸۳/۷ (ns)d
۰/۵	۱-۰/۵	۰/۰۷۴۴(*)de	۰/۲۲۶۳(*)ef	۰/۱۹۵(*)e	۰/۰۴۷۶(*)c	۰/۲۵۶۷ (ns)cd	۳۶۳۴/۳ (ns)d
۰/۵	۲-۱	۰/۰۵۷۴(*)f	۰/۲۸۶۸(*)d	۰/۲۰۷(*)c	۰/۰۴۱(ns)de	۰/۸۴۸ (*)b	۳۷۱۱/۷ (ns)d
۱/۵	۰/۵-۰	۰/۱۰۱۲(ns)c	۰/۲۱۱۶(*)f	۰/۲۱۳(*) b	۰/۰۵۳۹(*)b	۱/۰۷۳۷ (*)a	۴۱۲۵ (ns)cd
۱/۵	۱-۰/۵	۰/۱۵۹۱(*)a	۰/۲۳۱۱(*)e	۰/۲۰۸(*)c	۰/۰۶۲۸(*)a	۰/۷۹۱۳ (*)b	۴۹۵۰/۷ (*)ab
۱/۵	۲-۱	۰/۰۶۴۴(*)ef	۰/۳۴۵۹(*)b	۰/۱۸(*)f	۰/۰۳۹۱(ns)e	۰/۰۰۱۷ (*)f	۳۸۱۶/۳ (ns)d
۳	۰/۵-۰	۰/۰۸۶۸(ns)d	۰/۳۱۲(*)c	۰/۱۹۶(*)e	۰/۰۴۱۱(ns)de	۰/۰۵۵۹ (ns)ef	۴۵۶۹/۷ (*)bc
۳	۱-۰/۵	۰/۰۳۲۴(*)g	۰/۴۳۱۴(*)a	۰/۲۲۱(*)a	۰/۰۴۴۲(ns)cde	۰/۱۰۷۵ (ns)ef	۵۲۰۰/۷ (*)a
۳	۲-۱	۰/۰۶۹۹(*)ef	۰/۳۳۲(*)b	۰/۱۹۴(*)e	۰/۰۴۵۲(ns)cd	۰/۳۴۶۸ (ns)c	۳۶۵۱ (ns)d
مقدر بهینه برای رشد گیاه		۰/۶-۰/۷	≤۰,۷	≤۰/۲	۰/۰۳۵≥	-	-

(*): تفاوت معنی‌دار با شاهد (P<0.05)، (ns): عدم تفاوت معنی‌دار با شاهد (P<0.05)، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف کوچک مشترک تفاوت معنی‌داری ندارند (P<0.05).

شاخص دکستر

در این پژوهش میانگین شاخص دکستر در تیمار شاهد ۰/۰۳۷۹ بود. میانگین شاخص دکستر در تمام مقادیر و اندازه‌های موردمطالعه بیوچار کاه گندم در مقایسه با شاهد افزایش یافت ولی این افزایش صرفاً در مقادیر ۰/۵٪ و۱/۵٪ با اندازه ذرات ۰/۵-۰ mm و ۱-۰/۵ mm معنی‌دار بود. بیشترین افزایش شاخص دکستر (۶۵٪) نسبت به شاهد در مقدار ۱/۵٪ و اندازه ذرات ۱- ۰/۵ mm این بیوچار مشاهده شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که با تغییر مقدار بیوچار و اندازه ذرات بیوچار، شاخص دکستر تغییر معنی‌داری داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین شاخص دکستر در تیمارهای موردمطالعه نشان داد که بیشترین شاخص دکستر (۰/۰۶۲۸) در مقدار ۱/۵٪ و اندازه ذرات ۱- mm ۰/۵ این بیوچار مشاهده شد (جدول ۴).

اثر تغییر در اندازه ذرات بیوچار در یک مقدار ثابت بسته به مقدار بیوچار اضافه شده به خاک متفاوت بود. در مقدار ۰/۵٪ و ۱/۵٪ بیوچار کاه گندم، با افزایش اندازه ذرات، شاخص دکستر کاهش یافت و در مقدار ۳٪ بیوچار کاه گندم با افزایش اندازه ذرات، شاخص دکستر به‌صورت معنی‌داری تغییر نیافت. Liu *et al* (2017)،دلیل این موضوع را تغییر اندازه منافذ بین ذرات (منافذ ساختمانی خاک) و داخل ذرات خاک به دلیل کاربرد بیوچار در خاک بیان کرده‌اند؛ که البته این امر را با اندازه ذرات بیوچار اضافه شده به خاک مرتبط دانسته‌اند.

شکل منحنی مشخصه رطوبتی غالباً توسط منافذ ساختمانی خاک تعیین می‌شود و نقش منافذ ماتریکس[1] خاک کم است (Dokoohaki, 2018). در این پژوهش تغییر مشاهده‌شده در شیب منحنی رطوبتی، بیان‌کننده این موضوع است که تیمارهای موردمطالعه، بیشتر سبب تغییر منافذ ساختمانی خاک شدند.

اثر بیوچار بر توزیع اندازه منافذ خاک به ویژگی‌های منافذ خاک (اندازه منافذ خاک) بستگی دارد. Trifunovic et al.,، (۲۰۱۸) گزارش کردند که ذرات کوچک‌تر بیوچار سبب انسداد منافذ درشت در ترکیب ماسه-بیوچار شد. ولی نکته قابل‌توجه این است که در این پژوهش، اثر بیوچار با اندازه ذرات کوچک، سبب افزایش میانگین منافذ متوسط و کوچک خاک (افزایش شیب منحنی رطوبتی) نسبت به تیمار شاهد شد که احتمالا علت آن فرم بیوچار کاه گندم (اندازه طویل آن) باشد و زمانی که آن بیوچار به مقدار متوسط و کم به خاک اضافه‌شدند، قرارگرفتن تصادفی آنها نهایتاً منجر به افزایش میانگین اندازه منافذ خاک و افزایش شیب منحنی رطوبتی خاک در نقطه عطف آن شد.

شاخص دکستر (S) نشان‌دهنده کیفیت فیزیکی خاک است و با سایر ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند چگالی ظاهری و تخلخل کل خاک ارتباط نزدیکی دارد و حد تئوریکی آن، $0 \leq S < \infty$ است؛ ولی غالباً در خاک‌های کشاورزی، این شاخص در محدوده $0.007 < S \leq 0.14$ قرار می‌گیرد (Reynolds *et al.*, 2009). برای غالب خاک‌ها، $S \geq 0.05$ نشان‌دهنده کیفیت فیزیکی خیلی خوب، $0.05 \leq S \leq 0.035$ کیفیت فیزیکی خوب، $S < 0.035 \leq 0.020$ کیفیت فیزیکی فقیر و $S \leq 0.02$ کیفیت فیزیکی بسیار فقیر را نشان می‌دهد. در این پژوهش میزان شاخص دکستر در

1matrix pores

تیمار بدون بیوچار (شاهد)، ۰/۰۳۷۹ بود و خاک موردمطالعه در کلاس خاک‌های با کیفیت فیزیکی خوب قرار گرفت. با افزودن بیوچار کاه گندم به خاک موردمطالعه، در تمام سطوح مقدار و اندازه این بیوچار، میزان شاخص دکستر در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت. بیوچار کاه گندم در مقدار ۱/۵٪ با اندازه ذرات mm ۰/۵-۰ و mm ۱-۰/۵ میلی‌متر سبب شدند که کیفیت فیزیکی خاک لوم شنی موردمطالعه بهبودیافته و در کلاس خاک با کیفیت خیلی خوب قرار گیرد (جدول ۴). همچنین نتایج نشان داد که بیوچار کاه گندم در مقادیر کم (۰/۵٪) و زیاد (۱/۵٪) تغییراتی را در کلاس کیفیت فیزیکی خاک به وجود نیاوردند.

شاخص تنش آبی

بیوچار کاه گندم سبب تغییر معنی‌دار این شاخص در مقایسه با شاهد شد (جدول ۲) ولی این تغییر در همه تیمارها معنی‌دار نبود (جدول ۴). میانگین شاخص تنش آبی (CWSI) در تیمار شاهد ۰/۲۱۶۷ بود. بیشترین کاهش شاخص CWSI (۹۹/۲٪) نسبت به شاهد، در مقدار ۱/۵٪ و اندازه ذرات mm ۱-۰/۵ بیوچار به دست آمد (جدول ۴). Gavili *et al.*, (2016) گزارش کردند که کاربرد ۱/۲۵ ٪ (۲۵ تن در هکتار) بیوچار کود گاوی سبب کاهش اثرات تنش خشکی و بهبود شاخص‌های رشد اسفناج نسبت به شاهد در شرایط گلخانه‌ای شد. Khashei *et al.*, (2019) نیز گزارش کردند که کاربرد بیوچار به مقدار ۴۵ تن در هکتار در شرایط تحت تنش آبی و آبیاری کامل می‌تواند منجر به حداکثر میزان عملکرد و خصوصیات رشد گیاه زنیان شود.

اثر بیوچار بر بهبود ویژگی‌های خاک و رشد گیاه به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. چنانچه نتایج این پژوهش نشان داد، تغییر در مقدار و اندازه ذرات بیوچار کاه گندم سبب تغییر معنی‌دار شاخص CWSI شد (جدول ۳). نتایج این پژوهش نشان داد، تغییر در اندازه ذرات بیوچار کاه گندم، زمانی که در مقادیر کم و متوسط به خاک اضافه شده بودند، سبب تغییر معنی‌دار شاخص CWSI گندم شد (جدول ۴). Danish and Zafar-ul-Hye (2019) کاربرد هم‌زمان بیوچار و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی را راهکار مناسبی برای کاهش اثرات تنش خشکی معرفی کردند. ایشان کاربرد مقادیر بیشتر بیوچار برای حصول نتیجه بهتر را توصیه کردند. این در حالی است که بر اساس نتایج این پژوهش، اثرات مقدار بیوچار وابسته به‌اندازه ذرات بیوچار می‌تواند متفاوت باشد. نتایج نشان داد که کم‌ترین تنش آبی در کاربرد مقدار ۱/۵٪ و اندازه ذرات mm ۲-۱ است که با تیمارهای اندازه ذرات کوچک (mm ۰/۵-۰) و متوسط (mm ۱-۰/۵) که در مقادیر ۰/۵٪ و متوسط ۱/۵٪ به خاک اضافه شده بودند، تفاوت معنی‌داری نداشت. البته به این موضوع هم باید توجه داشت که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار بسته به روش آماده‌سازی آن بعد از گرماکافت (الک کردن یا آسیاب کردن) و اندازه ذرات بیوچار متفاوت بوده و واکنش گیاهان به‌اندازه ذرات بیوچار بسته به نوع گیاه می‌تواند متفاوت باشد (Liao and Thomas, 2021).

عملکرد دانه

افزودن بیوچار به خاک لومی شنی سبب تغییر معنی‌دار ($P<0.05$) میزان عملکرد گندم شد (جدول ۲). میزان عملکرد در تیمار شاهد ۳۸۸۱/۷ کیلوگرم در هکتار بود. در بین تمام تیمارها، میزان عملکرد صرفاً در تیمارهای بیوچار با مقدار ۱/۵٪ و ۳٪ با اندازه ذرات mm ۱-۰/۵ و در مقدار ۳٪ و اندازه ذرات کوچک‌تر از ۰/۵ میلی‌متر افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد داشت. تغییر در مقدار و اندازه ذرات بیوچار سبب تغییر معنی‌دار ($P<0.05$) میزان عملکرد گندم شد. بیشترین میزان عملکرد گندم (۵۲۰۰/۷ کیلوگرم در هکتار) در تیمار بیوچار با مقدار ۳٪ و اندازه ذرات mm ۱-۰/۵ به دست آمد که با بقیه سطوح مقدار و اندازه ذرات بیوچار تفاوت معنی‌داری ($P<0.05$) داشت. بررسی نتایج مطالعات انجام شده نشان‌دهنده اثر مثبت Ali *et al.*, (2019) و منفی (Deenik *et al.*, 2010) بیوچار بر عملکرد واریته‌های مختلف گیاهی است. مطالعات نشان داده است که کار آیی بیوچار در افزایش عملکرد به واکنش و بافت خاک بستگی دارد. بیشترین اثر مثبت بیوچار بر عملکرد، در خاک‌های اسیدی (۱۴٪) و خاک‌های خنثی (۱۳٪) بود (Jeffery *et al.*, 2011). Li *et al.*, (2015) گزارش کردند که افزودن بیوچار کاه گندم در مقادیر ۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ تن در هکتار به خاک، با بهبود شاخص‌های رشد گندم زمستانه، بعد از گذشت یک سال، به‌صورت مؤثری سبب افزایش میزان عملکرد و کار آیی مصرف آب شد. Ali *et al.*, (2019) دلیل افزایش میزان عملکرد گندم بعد از افزودن بیوچار به خاک را افزایش قابلیت دسترسی نیتروژن و فسفر و نیز افزایش کار آیی مصرف نیتروژن و فسفر بیان کردند.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که مقادیر ۱/۵ و ۳٪ بیوچار کاه گندم سبب افزایش عملکرد نسبت به شاهد گردید (جدول ۴). Li and Shangguan (2018) نیز گزارش کردند که بیوچار مواد حاصل از هرس درختان سیب در مقادیر ۱ و ۲٪ میزان عملکرد گندم را ۷/۴ تا ۱۲٪ را افزایش دادند و این در حالی بود که آن بیوچار در مقادیر ۴ و ۶٪ کاهش ۶/۲۵ تا ۲۰/۸۳ ٪ عملکرد گندم را سبب شدند. Gao *et al.*, (2020) برای بیان دلیل این امر مکانیسم افزودن ماده قلیایی به خاک قلیایی را معرفی کردند و نتیجه‌گیری کردند که با افزایش میزان کربن موجود در بیوچار،

به دلیل آزاد شدن کربن زیاد از بیوچار، میزان عملکرد و کار آیی مصرف آب چندان افزایش پیدا نمی‌کند.

همبستگی ویژگی‌های مورد مطالعه با عملکرد گندم

بررسی همبستگی بین میزان عملکرد با گنجایش هوای خاک، منافذ درشت، آب قابل‌استفاده و شاخص تنش آبی نشان داد که بیشترین همبستگی مثبت، بین عملکرد و شاخص دکستر وجود دارد. همچنین بین شاخص تنش آبی و آب قابل‌دسترس گیاه همبستگی منفی (جدول ۵) وجود دارد که این یافته با نتایج گزارش شده Ahmadi *et al.*, (2018) مطابقت دارد. در این پژوهش میزان عملکرد و آب قابل‌استفاده گیاه همبستگی منفی نشان داد که با نتایج Castellini *et al.*, (2019) هم‌خوانی دارد.

نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص دکستر در مقایسه با آب قابل‌استفاده گیاه (PAW) و شاخص تنش آبی، به‌خوبی تغییر در مقدار عملکرد را تبیین می‌نماید. به دلیل این‌که شاخصS با تراکم خاک ارتباط مستقیمی دارد، خاک‌های با شاخص دکستر بالا، ظرفیت رشد ریشه بالایی دارند (Dexter, 2004) و بالا بودن آب قابل‌استفاده گیاه در خاک، زمانی می‌تواند سبب کاهش شاخص تنش آب و افزایش عملکرد شود که گیاه کشت‌شده، با گسترش ریشه از آب موجود در خاک به‌صورت بهینه استفاده نماید.

جدول ۴- ضرایب همبستگی (پیرسون) ویژگی‌های فیزیکی خاک و شاخص تنش آبی با عملکرد گندم

	گنجایش هوای خاک	منافذ درشت خاک	آب قابل‌استفاده	شاخص دکستر	شاخص تنش آبی	عملکرد گندم
گنجایش هوای خاک	۱					
منافذ درشت خاک	-۰/۲۲۹	۱				
آب قابل‌استفاده	۰/۳۰۴	-۰/۲۷۳	۱			
شاخص دکستر	-۰/۴۶۱*	۰/۲۹۳	-۰/۲۶۸	۱		
شاخص تنش آبی	۰/۳۳۴	-۰/۱۹۷	۰/۲۱۴	-۰/۲۱۶	۱	
عملکرد گندم	۰/۱۱۷	۰/۳۲۳	-۰/۲۲۳	۰/۴۵۱*	-۰/۰۴۷	۱

*** : معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ (P<0.05)**

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی اثر مقادیر مختلف بیوچار کاه گندم با اندازه ذرات متفاوت بر گنجایش هوای خاک، منافذ درشت خاک، آب قابل‌استفاده، شاخص دکستر، شاخص تنش آبی و عملکرد گندم و نیز رابطه عملکرد گندم با ویژگی‌های موردمطالعه در خاکی با بافت لوم شنی انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که اثر بیوچار کاه گندم بر گنجایش هوای خاک به مقدار و اندازه ذرات آن بستگی داشت. بیوچار کاه گندم در تمام مقادیر و اندازه-های موردمطالعه، سبب شد که مقدار منافذ درشت خاک نسبت به شاهد افزایش‌یافته و در محدوده مطلوب برای رشد گیاه قرار گیرد. تیمارهای موردمطالعه سبب افزایش گنجایش آب قابل‌استفاده و نیز بهبود شاخص S در مقایسه با شاهد شدند. بیوچار کاه گندم با مقدار ۱/۵٪ و اندازه ذرات ۱-۰/۵ mm، شاخص تنش آبی گیاه را به کمترین مقدار کاهش داد؛ درحالی‌که بیشترین میزان عملکرد گندم در تیمار بیوچار با مقدار ۳٪ و اندازه ذرات ۱-۰/۵ mm به دست آمد. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان عملکرد گندم با شاخص دکستر همبستگی مثبت و معنی-داری داشت. باتوجه‌به نتایج حاصل‌شده می‌توان بیان کرد که اثر بیوچار در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، کاهش تنش آبی گندم و افزایش عملکرد گندم به مقدار و اندازه ذرات بیوچار بستگی دارد. جهت دستیابی به نتیجه بهتر در استفاده از بیوچار در خاک، برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و افزایش میزان عملکرد محصول کشت‌شده، باید ویژگی‌های بیوچار، به‌ویژه اندازه ذرات آن، موردتوجه قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود که اثر مقدار و اندازه ذرات بیوچار تهیه شده از مواد چوبی بر عملکرد گندم و نیز اثر بیوچار بر جذب عناصر غذایی به‌ویژه عناصر کم‌مصرف در خاک‌های آهکی بررسی شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Agegnehu, G., Srivastava, A. K., and Bird, M. I. (2017). The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied soil ecology*, 119, 156-170.

Ahmadi, H., Nasrollahi, A.H., Sharifipour, M., and Isvand, H. (2018). Determination of soybean water stress index (CWSI) for irrigation management for maximum yield and water productivity. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 8 (4), 121-131. (In Farsi)

Ali, K., Wang, X., Riaz, M., Islam, B., Khan, Z. H., Shah, F., Munsif, F. and Haq, S. I. U. (2019). Biochar: an eco-friendly approach to improve wheat yield and associated soil properties on sustainable basis. Pakistan Journal of Botan, 51(4), 1255-1261.

Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4): 687-711.

Castellini, M., Stellacci, A. M., Tomaiuolo, M., and Barca, E. (2019). Spatial variability of soil physical and hydraulic properties in a durum wheat field: An assessment by the BEST-Procedure. *Water*, 11(7), 1434.

Danish, S., and Zafar-ul-Hye, M. (2019). Co-application of ACC-deaminase producing PGPR and timber-waste biochar improves pigments formation, growth and yield of wheat under drought stress. Scientific reports, 9(1), 1-13.

Deenik, J. L., McClellan, T., Uehara, G., Antal, M. J., and Campbell, S. (2010). Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations. *Soil Science Society of America Journa*,. 74(4), 1259-1270.

Definition S. P. (2015). Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil. International Biochar Initiative. Version, 2.

Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part ii. friability, tillage, tilth and hard-setting. *Geoderma*, 120(3-4),215–225.

Dokoohaki, H., (2018). The promise of biochar: From lab experiment to national scale impacts. Graduate Theses and Dissertations, IOWA,US.

Emami, H., Astarai, A., and Fotoovat, A. (2014). Evaluating the effect of organic matter on soil quality scoring functions. *Water and Soil*, 28 (3), 574-565. (In Farsi)

Emami, H., Shorafa, M., Neyshabouri, M., and Liaqat, A. (2008). Estimation of soil physical quality index using rapid soil properties in a number of saline and calcareous soils. *Iranian Soil and Water Research (Iranian Agricultural Sciences)*, 39 (1), 39-46. (In Farsi)

Esmaeelnejad, L., Shorafa, M., Gorji, M., and Hosseini, S. M. (2016). Enhancement of physical and hydrological properties of a sandy loam soil via application of different biochar particle sizes during incubation period. *Spanish journal of agricultural research*, 14(2), 22.

Gao, Y., Shao, G., Lu, J., Zhang, K., Wu, S., and Wang, Z. (2020). Effects of biochar application on crop water use efficiency depend on experimental conditions: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 249, 107763.

Gavili, I., Moosavi, S. A. A., Kamgar Haghighi A. A. (2016). Effect of Cattle Manure Biochar and Drought Stress on the Growth Characteristics and Water Use Efficiency of Spinach under Greenhouse Conditions . Water Research in Agriculture, 30.2 (2), 243-259. (In Farsi)

Gee, G. W., and Bauder, J. W. (1986). Particle-size Analysis 1. Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods, (Methodsofsoilan1).

Głąb, T., Palmowska, J., Zaleski, T., and Gondek, K. (2016). Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. *Geoderma*, 281, 11-20.

Gupta M., Yang J., and Roy C. (2002). Density of softwood bark and softwood char: procedural calibration and measurement by water soaking and kerosene immersion method. *Fuel*, 81(10), 1379-1384.

Hseu, Z. Y., Jien, S. H., Chien, W. H., and Liou, R. C. (2014). Impacts of biochar on physical properties and erosion potential of a mudstone slopeland soil. *The Scientific World Journal*, 2014.

Houba, V. J. G., Temminghoff, E. J. M., Gaikhorst, G. A., and Van Vark, W. (2000). Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent. *Communications in soil science and plant analysis*, 31(9-10), 1299-1396.

Ibrahim, A., and Horton, R. (2021). Biochar and compost amendment impacts on soil water and pore size distribution of a loamy sand soil. *Soil Science Society of America Journal*, 85(4), 1021-1036.

Idso, S. B. (1982). Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 27(1-2), 59-70.

Jeffery, S., Verheijen, F. G., van der Velde, M., and Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, ecosystems & environment*, 144(1), 175-187.

Jones Jr, J. B. (Ed.). (1999). Soil Analysis Handbook of Reference Methods. CRC Press.382 p.

Khashei , A., Shahidi, A., Yaghoobzadeh, M., Dastourani, M. (2019). Effect of biochar application and water tensin levels on yield and yield components of medicinal plant (Trachyspermum ammi.). Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 13 (2), 319-328. (In Farsi)

Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni-Heris, A., Rahimi, A., Besharat, S., and Sadraddini, A. A. (2021). Linking plant and soil indices for water stress management in black gram. Scientific Reports, 11(1), 1-19.

Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. Sustainability, 7(5), 5875-5895.

Langroodi, A.R.S. and Nora, R. (2018). Effect of different levels of biochar on physiological properties of squash (Cucurbita pepo L.) under water stress. Plant environmental physiology. 13(49): 13-32.

Li, S., and Shangguan, Z. (2018). Positive effects of apple branch biochar on wheat yield only appear at a low application rate, regardless of nitrogen and water conditions. *Journal of Soils and Sediments*, 18(11), 3235-3243.

Li, Z., Qi, X., Fan, X., Wu, H., Du, Z., Li, P., and Lü, M.)2015(. Influences of biochars on growth, yield, water use efficiency and root morphology of winter wheat. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 31(12), 119-124.

Liao, W., and Thomas, S. C. (2019). Biochar particle size and post-pyrolysis mechanical processing affect soil pH, water retention capacity, and plant performance. Soil Systems. 3(1): 14.

Liu, Z., Dugan, B., Masiello, C. A., and Gonnermann,

H. M. (2017). Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *Plos one*. 12(6), e0179079.

Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J., and Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and soil*, 333(1), 117-128.

Malakouti, M., and Ghaybi, M. (1997). Determining the critical limit of nutrients of strategic products and fertilizer recommendations in the country. Soil and Water Research Institute, 40 p. (In Farsi)

Mohseni Movahed, S. A., and Akbari, M. (2012). Effect of Deficit Irrigation in Different Stages of Growth on Yield of Alvand Cultivar Wheat (Case Study: Hamedan).*Water and soil (agricultural sciences and industries)*, 25 (6), 1386-1394. (In Farsi)

Nakhjavani Moghaddam M.,And ghahraman B. (2007). Evaluation of canopy temperature associated with time of irrigation and yield of winter wheat. Journal of Agricultural Sciences and Industries, Ferdowsi Mashhad. Volume 22, Number 1. (In Farsi)

Nowrouzi, M., Tabatabai, S., Nouri , M., and Motaghian, H. (2016). Short-term effects of palm leaf biochar on moisture retention in sandy loam soil. *Conservation of water and soil resources*, 6 (2), 137-150. (In Farsi)

Obia, A., Mulder, J., Martinsen, V., Cornelissen, G., and Børresen, T. (2016). In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 155, 35-44.

Olsen, S. R., Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.). Methods of Soil Analyses, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, 403–430 pp.

Osooli, H., Karimi, A., Shirani, H., and Tabatabai, S. H. (2021). Effect of type, size and amount of biochar on some physical and mechanical properties of calcareous soil. Journal of Soil and Water Resources Protection (Scientific - Research), 11 (1), 113-128. (In Farsi)

Pranagal, J., and Kraska, P. (2020). 10-Years Studies of the Soil Physical Condition after One-Time Biochar Application. *Agronomy*, 10(10), 1589.

Rajkovich S., Enders A., Hanley K., Hyland C., Zimmerman A. R., and Lehmann J.)2012(. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. Biology and Fertility of Soils, 48(3), 271-284.

Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., and Yang, X. M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3-4), 252-263.

Richards, L. A. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.*Soil Sci*. 78: 2. 154-158.

Ru, C., Hu, X., Wang, W., Ran, H., Song, T., and Guo, Y. (2020). Evaluation of the Crop Water Stress Index as an Indicator for the Diagnosis of Grapevine Water Deficiency in Greenhouses. *Horticulturae*, 6(4), 86.

Seki, K. (2007) SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4, 407-437.

Trifunovic B., Gonzales H.B., Ravi S., Sharratt B.S., and Mohanty S.K. (2018). Dynamic effects of biochar concentration and particle size on hydraulic properties of sand. *Land Degradation and Development*. 29(4): 884-893.

Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.

Verheijen, F. G., Zhuravel, A., Silva, F. C., Amaro, A., Ben-Hur, M., and 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.

Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A. C., Van der Velde, M., and Diafas, I. (2010). Biochar application to soils. A critical scientific review of effects on soil properties, processes, and functions. *EUR*, 24099, 162.

Werdin, J., Conn, R., Fletcher, T. D., Rayner, J. P., Williams, N. S., and Farrell, C. (2021). Biochar particle size and amendment rate are more important for water retention and weight of green roof substrates than differences in feedstock type. *Ecological Engineering*, 171, 106391.

Olsen, S. R., Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.). Methods of Soil Analyses, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, 403–430 pp.