مدیریت آب و آبیاری
دوره ۱۱ ■ شماره ٤ ■ زمستان ۱٤۰۰
صفحه‌های ۷۱۱-٦۹۹
DOI: 10.22059/jwim.2021.328969.910

مقاله پژوهشی:

بررسی تأثیر کاربرد بیوچار و کاه گندم بر بهره‌وری آب آبیاری در گیاه جو

حسین عباسعلیان[۱]، جابر سلطانی[۲*]، علی بهرامی سامانی[۳]، سید ابراهیم هاشمی گرمدره[۴]، اعظم برزویی[۵]، مریم احمدوند[۶]
۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳. دانشیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.
۴. استادیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۵. استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.
۶. دانش‌آموخته دکتری آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۳۰

چکیده
کاربرد ترکیباتی که ظرفیت نگهداشت رطوبت خاک را بهبود بخشند یکی از راه‌کارهای افزایش کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی و حل مشکل کم‌آبی است. در بسیاری منابع به جنبه‌های مثبت متعدد کاربرد مواد آلی از جمله بیوچار به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک و بهبودگر ظرفیت نگهداشت رطوبت اشاره شده است. بیوچار[۱]، ترکیب غنی از کربن متخلخلی است که در اثر پیرولیز مواد آلی طبیعی تولید می‌شود. در پژوهش حاضر مقادیر صفر درصد بیوچار (B_1)، دو و نیم درصد بیوچار (B_2)، پنج درصد بیوچار (B_3) و هفت و نیم درصد بیوچار (B_4)، هم‌چنین دو و نیم درصد کاه گندم (W_1) و پنج درصد کاه (W_2) به خاک با بافت لوم‌رسی (S_1) و نیز خاک لوم‌شنی (S_2) افزوده شدند. این آزمایش گلدانی بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و در گلخانه انجام شد. کاربرد بیوچار سبب شد بهره‌وری آب در تیمارهای S_1B_4 و S_2B_4 به‌ترتیب ۱۳۸ و ۱۲۸ درصد افزایش یابد. کاه بر عملکرد زراعی و بهره‌وری آب تأثیر منفی داشت، به‌طوری‌که عملکرد بیولوژیک در خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی به‌ترتیب ۸۲ و ۷۳ درصد کاهش یافت، بهره‌وری آب در تیمارهای S_1W_1 و S_2W_1، ٤۱ درصد و ۲۵ درصد کاهش نشان داد. این کاهش‌ها از لحاظ آماری معنی‌دار بودند ($P<۰/۰۱$) و در هر دو نوع خاک با افزایش کاه تشدید شدند. پژوهش حاضر نشان داد که کاربرد بیوچار می‌تواند راه‌کاری برای بهبود عملکرد و در نتیجه، بهره‌وری آب در بخش کشاورزی باشد.

کلیدواژه‌ها: رطوبت خاک، زیست توده گیاه، عناصر غذایی خاک، مواد آلی.

The effect of biochar and Wheat Straw on irrigation water productivity in barley

Hossein Abbasalian[1], Jaber Soltani[2*], Ali Bahrami Samani[3], Seyyed Ebrahim Hashemi[4], Azam Borzouei[5], Maryam Ahmadvand[6]
1. Ph.D. Candidate at Irrigation and drainage engineering, Water Engineering Department, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Water Engineering Department, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization, Tehran, Iran.
4. Assistant Professor, Water Engineering Department, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
5. Assistant Professor, Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization, Tehran, Iran.
6. Ph.D. Graduated at Irrigation and drainage engineering, Water Engineering Department, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
Received: August 16, 2021 Accepted: October, 22, 2021

Abstract
Application of compounds that improve soil moisture retention capacity is one of the strategies to increase water use efficiency in agriculture and solve the problem of water shortage. In many sources, several positive aspects of organic matter application such as biochar as soil modifier and moisture retention capacity improvement have been noted. Biochar is a carbon-rich porous compound produced by pyrolysis of natural organic matter. In the present study, 0% biochar (B_1), 2.5% biochar (B_2), 5% biochar (B_3) and 7.5% biochar (B_4), 2.5% wheat straw (W_1) and 5% straw (W_2) were added to soil with clay loam (S_1) texture and sandy loam soil (S_2). This pot experiment was performed based on a completely randomized design in three replications and in greenhouse. Biochar application increased water productivity in S_1B_4 and S_2B_4 treatments by 138% and 128%, respectively. Straw had a negative effect on agronomic yield and water productivity, so that biological yield in clay loam and sandy loam soil decreased by 82% and 73%, respectively. Water productivity decreased by 41% and 25% in S_1W_1 and S_2W_1 treatments. These reductions were statistically significant ($P<0.01$) and were exacerbated by increased straw in both soil types. The present study showed that biochar application can be a way to improve yield and, consequently, water productivity in agriculture.

Keywords: Organic matter, Plant biomass, Soil moisture, Soil nutrients.

* نویسنده مسئول Email: Jsoltani@ut.ac.ir

مقدمه

کمبود آب یک مشکل جهانی است و گرم‌شدن کره زمین، تغییر اقلیم و توزیع نامتناسب و پیش‌بینی نشده بارندگی، این مشکل را تشدید کرده است. هفتاد درصد منابع آب دنیا در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. بهره‌برداری از منابع آب شیرین در مقیاس جهانی طی ۵۰ سال اخیر سه برابر شده است و هر سال ٦٤ میلیارد مترمکعب به تقاضا برای آب شیرین افزوده می‌شود (worldometers.info, 2021).

با توجه به رشد روزافزون جمعیت دنیا و ضرورت تأمین غذا باید در صدد استفاده بهینه از منابع آب و توسعه منابع در دسترس بود. برای جلوگیری از هدرروی منابع آب راه‌کارهای مختلف پیشنهاد شده است. کاهش هدرروی ذخایر رطوبت خاک از طریق افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت یکی از این راه‌کارها می‌باشد. در منابع متعدد به نقش بیوچار در جذب و نگهداری رطوبت اشاره شده است. این ماده به‌دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، توزیع وسیع اندازه منافذ و نیز سطح ویژه زیاد می‌تواند فراهمی آب و عناصر غذایی را در زیست‌بوم‌های کشاورزی افزایش داده، از هدرروی منابع نیتروژن خاک پیش‌گیری و بدین ترتیب به رشد گیاه و بهبود عملکرد کمک کند (Paneque *et al*., 2016; Akhtar *et al*., 2014; Wang *et al*., 2016; Ramlow *et al*., 2019; Agbna *et al*., 2017).

بیوچار یک منبع تجدیدپذیر است و به سبب وجود گروه‌های عامل فراوان، در تغذیه گیاه نقش دارد (Schmidt *et al*., 2015; Kammann *et al*., 2015). با توجه به موارد یادشده، انتظار می‌رود در اثر کاربرد این ماده کارایی مصرف آب بهبود یابد.

Paneque *et al*. (2016) اثر اصلاح‌گر بیوچار را بر رشد و فیزیولوژی گیاه آفتابگردان در شرایط دیم بررسی کردند. در این مطالعه از چهار نوع بیوچار (بیوچار چوب کاج، بیوچار ضایعات کاغذ، بیوچار لجن فاضلاب و بیوچار چوب درخت انگور) استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که بیوچار باعث افزایش ظرفیت نگهداشت رطوبت خاک، تحریک رشد گیاه، افزایش سطح برگ و ساقه، بهبود عملکرد و افزایش کارایی مصرف آب می‌شود. Slavich *et al*. (2013) اثر اصلاحی بیوچار کود آلی و بیوچار بقایای گیاهی را بر عملکرد مرتع در یک خاک اسیدی فروسول بررسی و به این نتیجه رسیدند که بیوچار کود آلی باعث اصلاح اسیدیته خاک، افزایش کارایی مصرف نیتروژن و بهبود عملکرد می‌شود. Akhtar *et al*. (2014) در بررسی تأثیر بیوچار بر فیزیولوژی، عملکرد و کیفیت گوجه‌فرنگی در رژیم‌های مختلف آبیاری مشاهده کردند که بیوچار موجب حفظ رطوبت خاک، بهبود فیزیولوژی، عملکرد، راندمان مصرف آب، مقدار نسبی رطوبت برگ، مقدار و کیفیت محصول گوجه‌فرنگی می‌شود. Graber *et al*. (2010) اثر بیوچار چوب، را بر رشد و تولید فلفل در محیط کشت بدون خاک که در آن آب و عناصر غذایی به روش کود آبیاری تحویل گیاه می‌شد، بررسی کردند. افزایش یک تا پنج درصد وزنی بیوچار به محیط کشت باعث شد تا جمعیت موجودات ذره‌بینی خاک و هم‌چنین رشد و عملکرد محصول فلفل به شکل معنی‌دار بهبود یابد. Genesio *et al*. (2015) در یک پژوهش چهار ساله برای بررسی تأثیر بیوچار بر کمیت و کیفیت محصول انگور در شرایط دیم در ایتالیا مشاهده کردند مقدار محصول انگور در کرت‌های تیمارشده با بیوچار ٦٦ درصد افزایش یافت. بیوچار تأثیر معنی‌داری بر کیفیت محصول نداشت ولی توانست اثر تنش آب در دوره خشکی را کاهش دهد. Wang *et al*. (2016) گزارش کردند که افزودن بیوچار به خاک باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی آن شامل نفوذپذیری، ضریب آبگذری اشباع، ظرفیت نگهداری آب و افزایش ذخیره رطوبت خاک می‌شود.

Ahmadvand *et al.* (2018) طی پژوهشی رابطه بین ویژگی‌های بیوچار تولیدشده در دماهای مختلف و تأثیر آن بر جذب NO3-N را موردمطالعه قرار دادند. در این پژوهش، سه نوع بیوچار از کاه گندم در سه دمای مختلف پیرولیز ۳۰۰، ٤۰۰ و ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید شد و برای هر بیوچار سه بار نمونه‌برداری انجام شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار با استفاده از روش‌های مختلف از جمله سطح ویژه تعیین شد. این مطالعه نشان داد که دمای پیرولیز تا حد زیادی بر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی بیوچار و در نتیجه بر توانایی جذب نیترات بیوچارها تأثیر می‌گذارد.

Ramlow *et al.* (2019) اثر بیوچار چوب را بر تنش آب و سایر متغیرها در شمال کلرادو بررسی کردند در این پژوهش، تیمارهای آبیاری شامل آبیاری کامل، آبیاری محدود با حذف آبیاری‌های غیر ضروری و تیمار خشکی (۵۰ درصد) بودند. نتایج نشان داد اگر چه بیوچار ظرفیت نگهداری رطوبت خاک را افزایش می‌دهد، اما نمی‌تواند ضریب تنش خشکی را کاهش دهد. Gavili *et al.* (2019) اثر مقادیر بیوچار کود گاو و تنش‌های مختلف خشکی را بر راندمان مصرف آب و سایر متغیرهای فیزیویولوژی و زراعی سویا موردمطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که تیمار تنش شدید خشکی، اثر معنی‌داری بر راندمان مصرف آب داشته و آن را کاهش می‌دهد، درحالی‌که این متغیر در دو تیمار دیگر آبیاری تفاوت معنی‌داری نداشت. Faloye *et al.* (2019) در مطالعه‌ای نشان دادند که زغال زیستی می‌تواند اثر منفی تنش خشکی را کاهش داده و عملکرد و کارایی مصرف آب را بهبود ببخشد. Edeh *et al.* (2020) مشاهده کردند کاربرد بیوچار در اغلب بافت‌های خاک موجب افزایش رطوبت قابل دسترس گیاه و کاهش ضریب آبگذری اشباع می‌شود. Miri *et al.* (2021) که تأثیر سطوح مختلف بیوچار ضایعات برداشت پسته بر ویژگی‌های رشدی و بهره‌وری آب ذرت را بررسی می‌کردند به این نتیجه رسیدند که تأثیر کاربرد بیوچار، بسته به نوع خاک متفاوت است کاربرد بیوچار در خاک لوم‌سیلتی باعث افزایش وزن اندام هوایی گیاه و افزایش بهره‌وری آب شد حال آن‌که در خاک شنی نتیجه برعکس بود. Karami Niya *et al.* (2019) مشاهده کردند که تبدیل کمپوست مصرف‌شده قارچ به بیوچار سبب افزایش مؤلفه‌های رشدی و جذب عناصر غذایی گیاه شد. نتایج پژوهش Kazemizadeh *et al.* (2020) نشان داد که استفاده از بیوچار باگاس نیشکر موجب افزایش عملکرد و بهره‌وری آب در گیاه ذرت می‌شود.

طبق تعریف، بهره‌وری آب مقدار ماده گیاهی تولیدشده به‌ازای آب مصرفی است واحد آن می‌تواند کیلوگرم بر مترمکعب یا کیلوگرم بر میلی‌متر آب در هکتار و نظایر آن باشند:

$$WP = \frac{Y}{ET_c} \qquad (۱)$$

که WP بهره‌وری آب، Y عملکرد و ET_c تبخیر و تعرق هستند. در مخرج معادله (۱)، مجموع تبخیر و تعرق و نیاز آبشویی نیز می‌تواند قرار گیرد (Heydari, 2014).

در پژوهش‌های موجود و به‌ویژه در منابع فارسی، به‌طور عمده اثر بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و یا پالایندگی بیوچار در خاک مطالعه شده است. تأثیر بیوچار بر بهره‌وری آب در گیاه جو بررسی نشده است. مهم‌تر این‌که روی اثر بیوچار در کنار ماده اولیه آن بر بهره‌وری آب پژوهش نشده است، درحالی‌که در پژوهش حاضر تلاش شده است تا به‌عنوان نوآوری، اثر کاربرد هر دو ماده بر متغیرهای موردنظر بررسی شود. فرایند تولید بیوچار، هزینه‌بر است باید دید آیا این هزینه توجیه‌پذیر است؟

هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر کاربرد بیوچار بر بهره‌وری آب آبیاری در گیاه جو می‌باشد تا

بتوان راه‌کاری برای تولید محصول بیش‌تر به‌ازای مصرف آب کم‌تر و در راستای سازگاری بیش‌تر با تغییرات اقلیمی ارائه نمود.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از آذرماه ۱۳۹۹ تا پایان فروردین‌ماه ۱۴۰۰ در پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای کرج انجام شد. موقعیت جغرافیایی ایستگاه "۲۸ ′۵۹ °۵۰ طول شرقی، "۴۵ ′۵۱ °۳۵ عرض شمالی و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۴۹۱ متر است. به‌منظور شبیه‌سازی در شرایط کنترل‌شده و نیز کاهش هزینه‌ها، پژوهش حاضر در گلخانه به شکل کشت گلدانی انجام گرفت و در آن گیاه جو بهاره رقم گوهران در واحدهای آزمایشی طرح، کشت شد. رقم گوهران جو که در سال ۱۳۹۴ توسط مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر و نهال معرفی شده است، بهاره و مناسب کاشت در اقلیم معتدل کشور است. میانگین عملکرد دانه آن در تنش خشکی ۴۹۵۸ و در شرایط عادی ۷۱۶۱ کیلوگرم در هکتار با میانگین وزن هزاردانه، ۴۳ گرم می‌باشد.

در این پژوهش از بیوچار کاه گندم استفاده شد. دلیل انتخاب این ماده، فراوانی ماده اولیه و صرفه اقتصادی است. طبق تعریف و توصیه بنیاد بیوچار اروپا، بیوچار باید از ماده اولیه‌ای که تولید آن پایدار باشد مثل گیاهان تندرشد، بقایای آلی کشاورزی یا پسماندهای آلی شهری و خانگی تهیه شود (European Biochar Foundation, 2012).

بیوچار کاه گندم طی فرایند پیرولیز تولید گردید. بدین منظور، کاه به‌مدت ۹۰ دقیقه در معرض دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. مطالعات نشان داده‌اند که زغال تولیدشده در این شرایط با معیارهای گواهی بیوچار اروپا[۲] (EBC) مطابقت دارد (Lehmann *et al*., 2015). براساس ضوابط EBC، باید درصد وزنی کربن در ماده خشک بیوچار بیش از ۵۰ درصد، سطح ویژه بیش از ۱۵۰ مترمربع بر گرم، نسبت هیدروژن به کربن در آن کم‌تر از ۰/۷، نسبت اکسیژن به کربن کم‌تر از ۰/٤ و مقدار عناصر سنگین آن در محدوده توصیه‌شده، باشد (Sedmihradská *et al*., 2020). جدول (۱) آنالیز عنصری و شکل (۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی از زغال تولیدشده را نشان می‌دهد. آنالیز عنصری به‌روش طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس[۳] (EDAX) انجام شد و برای تصویربرداری از میکروسکوپ الکترونی (Hitachi S4160) استفاده شد. بیوچار این آزمایش، فاقد عناصر گوگرد، سرب و ارسنیک بود. مقدار سایر عناصر برحسب درصد وزنی در ماده خشک در جدول (۱) آمده است.

Table 1. Elemental analysis of biochar (by Nano electronic lab, University of Tehran)

Element										Unit
Mercury	Zinc	Copper	Nickel	Chromium	Cadmium	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Carbon	
0.1	0.5	0.6	0.3	0.2	0.4	2.31	13.4	3.4	69.9	% W/W

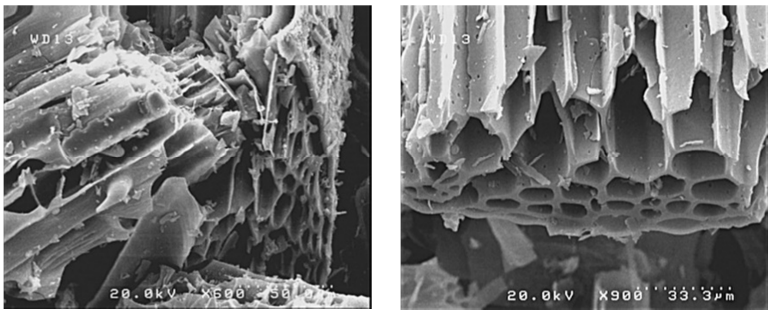

Figure 1. Electron microscope image of biochar (by Nano electronic lab, University of Tehran)

مقدار بیوچار تیمارهای طرح متفاوت بود. از طرف دیگر بیوچار، شوری خاک را افزایش می‌دهد، لذا احتمالاً تفاوت شوری بسترهای کشت، اثر خود را به شکل تغییر در زیست‌توده گیاه نشان می‌داد به‌منظور به حداقل‌رساندن این اثر، از گیاه جو استفاده شد. جو مقاوم به شوری و کم‌آبی است. هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در آستانه تحمل شوری جو، هشت دسی‌زیمنس بر متر است. پس از آن به‌ازای هر واحد افزایش هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، عملکرد دانه پنج درصد کاهش می‌یابد (Haghnia, 1989).

در این پژوهش از دو نوع بافت خاک استفاده شد. هدف این بود که ظرفیت نگهداری رطوبت خاک‌ها تا حد امکان متفاوت باشد. بدین منظور نمونه‌های خاک از چند محل گردآوری شدند، درصد اجزای بافت به‌روش هیدرومتری و بافت خاک‌ها به‌کمک مثلث بافت خاک وزارت کشاورزی آمریکا تعیین شد. سپس ظرفیت نگهداری رطوبت خاک، با توجه به درصد اجزای شن، رس و به‌کمک مدل (SPAW Hydrology) برآورد شد (Saxton, 2006). داده‌های مربوط به ظرفیت نگهداری رطوبت با در نظرگرفتن یک درصد وزنی کربن آلی در خاک لوم‌رسی و ۰/۳ درصد کربن آلی برای خاک لوم‌شنی در جدول (۲) آمده‌اند. سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مربوط به خاک لوم‌رسی و خاک لوم‌شنی به‌ترتیب در سطر B_1S_1 و B_1S_2 جدول (٤) تشریح شده‌اند.

Table 2. Soil texture and hydraulic properties

Soil texture	Sand %W/W	Silt %W/W	Clay %W/W	Water holding capacity (% V/V)
Clay Loam (S_1)	35.2	32	32.8	34
Sandy Loam (S_2)	74.6	14.6	10.8	13

بافت خاک در دو سطح (لوم‌شنی، لوم‌رسی)، مقدار بیوچار در چهار سطح (صفر، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد وزنی) و کاه گندم در دو سطح (۲/۵ و ۵ درصد وزنی) از عوامل آزمایش بودند. آزمایش بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه انجام شد. طرح شامل ۳٦ تیمار یا واحد آزمایشی بود. تعداد ۳٦ گلدان پلاستیکی که در بازار به‌عنوان سطل اندازه نُه شناخته می‌شوند، تهیه شدند تا ۷/۵ کیلوگرم محیط کشت شامل خاک، ترکیب خاک و بیوچار، ترکیب خاک و کاه در آن‌ها ریخته شود. از این پس، خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی به‌ترتیب با نماد S_1 و S_2، سطوح صفر، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد وزنی بیوچار به‌ترتیب با نمادهای B_1، B_2، B_3، B_4 و سطوح ۲/۵ و ۵ درصد وزنی کاه به‌ترتیب با نمادهای W_1 و W_2 نمایش داده می‌شوند. جدول (۳) ترکیب خاک گلدان را در تیمارهای آزمایش نشان می‌دهد.

Table 3. Potting medium composition

Treatment	Soil (gr)	Biochar or wheat straw (gr)
B_1 S*	7500	0
B_2 S*	7312.5	187.5
B_3 S*	7125	375
B_4 S*	6937.5	562.5
S* W_1	7312.5	187.5
S* W_2	7125	375

*** denotes either soil texture**

پس از آماده‌شدن محیط‌های کشت، از آن‌ها نمونه‌برداری شد تا مقدار قابل دسترس عناصر غذایی پرمصرف شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم- هدایت الکتریکی عصاره اشباع[٤] (EC)، اسیدیته یا واکنش خاک (pH)، درصد وزنی کربن آلی هم‌چنین متغیرهای فیزیکی شامل درصد اشباع[٥] (SP)، رطوبت در ظرفیت مزرعه[٦] (θ_{FC})، رطوبت در نقطه پژمردگی[٧] (θ_{PWP}) و چگالی ظاهری[٨] (ρb) اندازه‌گیری شوند (جدول ٤).

عناصر غذایی پرمصرف نیتروژن، فسفر و پتاسیم با توجه به مقدار قبلی این عناصر در خاک، عملکرد هدف نُه تن دانه در هکتار و توصیه نشریه شماره ٦٦ فائو به‌ترتیب از منابع اوره، سوپرفسفات‌تریپل و سولفات‌پتاسیم برای محیط‌های کشت تأمین شدند.

Table 4. Physical and chemical properties of potting medium

Treatment	ρ_b (gr/cm^3)	Θ_{PWP} (%W/W)	Θ_{FC} (%W/W)	SP (%W/W)	pH	EC (ds/m)	K_{ava} (ppm)	P_{ava} (ppm)	N_{ava} (ppm)	C (%)
B_1S_1	1.19	15.46	23.48	39	7.88	1.41	398	32.6	5.6*	1
B_2S_1	1.01	16.63	25.47	45	8.04	2.75	388.1	31.8	6.0	-
B_3S_1	0.95	16.57	25.54	43	8.14	3.63	378.1	31.0	6.4	-
B_4S_1	0.86	20.15	32.23	57	8.37	4.78	368.2	30.2	6.8	-
B_1S_2	1.41	7.95	12.48	23	7.92	0.96	175	3.0	5.3*	0.34
B_2S_2	1.26	9.20	14.94	29	7.99	2.92	170.6	2.9	5.7	-
B_3S_2	1.16	10.45	18.29	37	8.1	4.00	166.3	2.9	6.1	-
B_4S_2	0.97	12.97	19.40	44	8.23	4.69	161.9	2.8	6.5	-
S_1W_1	0.93	14.77	20.95	50	6.66	4.43	388.1	31.8	5.5	-
S_1W_2	0.86	11.70	20.24	51	7.16	3.4	378.1	31.0	5.3	-
S_2W_1	1.09	9.05	13.41	37	6.88	3.79	170.6	2.9	5.1	-
S_2W_2	1.07	6.01	10.72	35	6.9	3.15	166.3	2.9	5.0	-

*** Available nitrogen is in the form of ammonium, nitrate nitrogen content is negligible**

هدف این بود که مقدار نیتروژن، فسفر و پتاسیم همه تیمارها یکسان باشد تا اثر فراهمی عناصر غذایی به‌عنوان یک عامل ایجاد تغییر در عملکرد گیاه حذف شود. برای تولید هر تن دانه جو در هکتار با فرض تراکم کاشت دویست بوته در مترمربع به ۳۰ کیلوگرم نیتروژن، ۵ کیلوگرم فسفر و ۲۰ کیلوگرم پتاسیم نیاز است (Carr, 2013). منابع فسفر و پتاسیم قبل از کاشت به محیط کشت افزوده شدند، حال آن‌که کود نیتروژن در طول دوره رشد به شکل اقساط و در پنج مرحله داده شد تا میزان هدرروی آن طی فرایندهای آبشویی و یا نیترات‌زدایی کاهش یابد (جدول ۵).

Table 5. Fertilizer used in each pot by treatment

Treatment	Urea (gr)	Triple super phosphate (gr)	Potassium sulfate (gr)
B_1S_1	1.5	-	-
B_2S_1	1.5	0.03	0.18
B_3S_1	1.5	0.06	0.36
B_4S_1	1.5	0.09	0.55
B_1S_2	1.5	1.11	4.08
B_2S_2	1.5	1.11	4.16
B_3S_2	1.5	1.12	4.24
B_4S_2	1.5	1.12	4.32
S_1W_1	1.5	0.03	0.18
S_1W_2	1.5	0.06	0.36
S_2W_1	1.5	1.11	4.16
S_2W_2	1.5	1.12	4.24

خزانه‌کاری در نیمه آذرماه ۱۳۹۹ انجام شد و اوایل دی‌ماه وقتی ارتفاع بوته‌ها به حدود ده سانتی‌متر رسید، بوته‌ها به گلدان منتقل شدند. سطح خاک گلدان ۰/۰۲۵ مترمربع بود. از این‌رو، به‌منظور رعایت تراکم ۲۰۰ بوته در مترمربع، در هر گلدان تعداد شش نهال کشت شدند.

برای پایش رطوبت خاک و مدیریت آبیاری از رطوبت‌سنج TDR[۹] مدل Minitrase (شرکت Soilmoisture) استفاده شد. به‌منظور واسنجی تی‌دی‌آر، مقدار ۷/۵ کیلوگرم خاک لوم‌رسی و نیز ۷/۵ کیلوگرم خاک لوم‌شنی به دو گلدان جداگانه منتقل شدند. با توجه به داده‌های جدول (٤)، رطوبت در ظرفیت مزرعه برای این خاک‌ها به‌ترتیب ۲۳/٤۸ و ۱۲/٤۸ درصد و چگالی ظاهری ۱/۱۹ و ۱/٤۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب است. برای محاسبات بعدی از روابط (۲)، (۳) و (٤) استفاده شد.

$$V_s = \rho_b . m_s \qquad (۲)$$

$$\theta_v = \rho_b . \theta_m \qquad (۳)$$

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_s} \qquad (٤)$$

که V_s، ρ_b، m_s، V_w، θ_v، θ_m به‌ترتیب حجم خاک، چگالی ظاهری خاک، وزن خاک، حجم آب، رطوبت حجمی خاک و رطوبت وزنی خاک می‌باشند. ابتدا حجم خاک گلدان با توجه به وزن خاک و چگالی ظاهری آن، از معادله (۲) برآورد شد. سپس رطوبت حجمی خاک در ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی با توجه به داده‌های رطوبت وزنی و چگالی ظاهری خاک جدول (٤) و معادله (۳) محاسبه شدند. در مرحله بعد، حجم آب لازم برای

این‌که رطوبت خاک گلدان به ظرفیت مزرعه برسد از معادله (٤) برآورد شد. رطوبت اولیه خاک لوم‌رسی سه درصد و برای لوم‌شنی حدود دو درصد بود داده‌های رطوبت اولیه، در محاسبات لحاظ شدند (جدول ٦).

Table 6. Calculations for formation of soil water potential points and TDR calibration

Parameter	Soil texture	
	Clay Loam	Sandy Loam
Soil weight (gr)	7500	7500
Soil volume (Cm^3)	6302	5319
Volumetric water content in field capacity (%)	28	18
Volumetric water content in wilting point (%)	18	11
Total available water (% V/V)	10	7
Water needed to reach field capacity (Cm^3)	1575	851

در نقطه پتانسیلی ظرفیت مزرعه، رطوبت خاک در هر دو بافت توسط تی‌دی‌آر قرائت شد. با توجه به جدول (٦)، ٥٠ درصد تخلیه مجاز رطوبتی در خاک لوم‌رسی برابر پنج درصد و در لوم‌شنی برابر ٣/٥ درصد کاهش رطوبت حجمی است. این معادل ٣١٥ گرم کاهش وزن گلدان در خاک لوم‌رسی و ١٨٦ گرم کاهش وزن گلدان در خاک لوم‌شنی بود. گلدان‌ها هر روز توزین شدند وقتی کاهش وزن محاسبه‌شده اتفاق افتاد، بار دیگر رطوبت خاک گلدان با تی‌دی‌آر قرائت شد. این نقطه، به‌عنوان نقطه نیاز آبیاری در نظر گرفته شد. از آن به بعد در طول دوره رشد، رطوبت خاک به‌طور روزانه توسط تی‌دی‌آر پایش شد، با رسیدن رطوبت خاک به نقطه نیاز آبیاری که از قبل تعیین شده بود گلدان‌ها آبیاری می‌شدند. در این پژوهش، اگر چه رطوبت خاک همه گلدان‌ها در طول دوره رشد به‌کمک تی‌دی‌آر پایش شد (شکل‌های ٢ و ٣)، اما هر تیمار به‌طور جداگانه و براساس نیاز آبی خود، آبیاری نشد بلکه در همه تیمارهای خاک لوم‌رسی (صرف‌نظر از نوع و مقدار کاه یا بیوچار) آبیاری براساس نیاز آبی تیمار S_1B_1 (خاک لوم‌رسی بدون کاه یا بیوچار) و در تیمارهای خاک لوم‌شنی (صرف‌نظر از نوع و مقدار کاه یا بیوچار) آبیاری براساس نیاز آبی تیمار S_2B_1 (خاک لوم‌شنی بدون کاه یا بیوچار) انجام شد. بدین ترتیب حجم آب در هر نوبت آبیاری در گلدان‌های خاک لوم‌رسی یکسان و برابر نیاز آبی تیمار S_1B_1 و در تیمارهای خاک لوم‌شنی یکسان و برابر نیاز آبی تیمار S_2B_1 بود. برنامه‌ریزی آبیاری چنان بود که کمبود رطوبت خاک تیمارهای شاخص (S_1B_1 و S_2B_1) جبران شده و به ظرفیت مزرعه برسد.

پایان فروردین‌ماه ١٤٠٠ عملیات برداشت محصول انجام گرفت. بدین ترتیب که ساقه از ارتفاع پنج سانتی‌متری سطح خاک قطع شد. پس از شمارش تعداد خوشه و بوجاری، کاه و دانه هر گلدان توزین شدند و تعداد دانه نیز به تفکیک گلدان شمارش شد. در این مرحله، از خاک گلدان حدود یک کیلوگرم نمونه فرعی برداشته و شوری عصاره اشباع آن با دستگاه هدایت‌سنج مدل Jenway 4320 اندازه‌گیری شد. به‌منظور انجام آنالیز آماری، ابتدا مفروضات آزمون‌های آماری پارامتری شامل نرمال‌بودن توزیع داده‌ها و نیز همگنی واریانس تیمارها با نرم‌افزار Analyse-it بررسی و سپس تجزیه واریانس و مقایسه میانگین تیمارها برای متغیرهای موردنظر در محیط برنامه MSTAT-C انجام شد. برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون چند دامنه دانکن استفاده شد.

نتایج و بحث

بررسی شوری خاک گلدان‌ها نشان داد که با افزایش مقدار بیوچار، شوری افزایش می‌یابد. این افزایش به‌جز در تیمار S_1B_4 معنی‌دار نبود (جدول‌های ٧ و ٩). نتایج نشان داد که استفاده از کاه در تغییر شوری خاک بی‌تأثیر است. Wang *et al.* (2020) که اثر بیوچار و پسماند صنایع فولاد را بر میزان انتشار دی‌اکسیدکربن از شالیزارها بررسی می‌کردند

و نیز Brtnicky *et al.* (2021) در نقد اثرات نامطلوب بیوچار بر محیط خاک، گزارش کردند که در اثر کاربرد بیوچار، شوری خاک افزایش می‌یابد.

Table 7. Analysis of variance for salinity of the potting medium

Source of variation	df	SS	MS	F
Treatment	11	33.03	3	9.87**
Error	24	7.3	0.3	
Total	35	40.33		

**: Significant at 1% of probability level.

دلیل شوربودن بیوچار این است که ضمن فرایند تولید آن که در غیاب اکسیژن یا در حضور اکسیژن محدود انجام می‌شود، ساختار فیزیکی و شیمیایی ماده آلی اولیه دگرگون می‌شود. در فرایند پیرولیز دی‌اکسیدکربن متصاعد نمی‌شود بلکه گازهای خاص[10] و هم‌چنین روغن زیستی[11] تولید می‌شوند (Lehmann *et al.*, 2015).

در این پژوهش، عملکرد بیولوژیک (وزن اندام هوایی گیاه) و کل آب مصرفی در طول دوره رشد، ملاک محاسبه بهره‌وری آب قرار گرفت. داده‌های عملکرد بیولوژیک و آب مصرفی به تفکیک تیمار و تکرار در جدول (۱۲) آمده‌اند. جدول (۸) نشان می‌دهد که عوامل آزمایش تأثیر معنی‌داری بر وزن اندام هوایی گیاه داشته‌اند.

Table 8. Analysis of variance for biological yield

Source of variation	df	SS	MS	F
Treatment	11	11588.6	1053.5	131.8**
Error	24	191.8	7.99	
Total	35	11780.4		

**: Significant at 1% of probability level.

بیوچار به‌طورکلی باعث افزایش بهره‌وری آب شد. این نتیجه‌گیری با پژوهش‌های Liu *et al.* (2021) و Guo *et al.* (2021) و Zhang *et al.* (2020) و Liu *et al.* (2021) و Chen *et al.* (2021) و Mannan *et al.* (2021) مطابقت دارد. اما نتایج بیانگر آن هستند که افزایش بهره‌وری آب در مقادیر کم بیوچار (تا ترکیب پنج درصد وزنی) معنی‌دار نیست. بهره‌وری آب در تیمارهای کاه به‌طور معنی‌داری کم‌تر از تیمارهای بیوچار و یا تیمارهای فاقد بیوچار است و هر چه مقدار کاه بیش‌تر می‌شود بهره‌وری آب کاهش بیش‌تری نشان می‌دهد (جدول‌های ۹ و ۱۰). بیش‌ترین مقدار بهره‌وری آب در تیمار خاک لوم‌رسی با ۷/۵ درصد زغال و کم‌ترین آن در خاک لوم‌رسی با پنج درصد کاه مشاهده شد (به‌ترتیب ۳/۱۸، ۰/۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب). در تیمارهای کاه، عملکرد و بهره‌وری آب به‌طور معنی‌دار کاهش نشان دادند (عملکرد بیولوژیک در تیمارهای S_1W_1 و S_1W_2 به‌ترتیب ۷۲۷۰ و ۳۷۰۰ کیلوگرم در هکتار، عملکرد بیولوژیک در تیمارهای S_2W_1 و S_2W_2 به‌ترتیب ۸۴۰۰ و ۵۳۰۰ کیلوگرم در هکتار، بهره‌وری آب در تیمارهای S_1W_1 و S_1W_2 به‌ترتیب ۱/۳۷، ۰/۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب و در تیمارهای S_2W_1 و S_2W_2 به‌ترتیب ۱/۶۸، ۱/۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود).

Table 9. Analysis of variance for water productivity

Source of variation	df	SS	MS	F
Treatment	11	16	1.455	33.4**
Error	24	1.04	0.044	
Total	35	17.04		

**: Significant at 1% of probability level.

افزایش بهره‌وری آب در تیمارهای بیوچار به‌دلیل تأثیر مثبت بیوچار در عملکرد و اجزای آن است. بهره‌وری آب نسبت عملکرد به آب مصرفی در طول دوره رشد گیاه است. از این‌رو افزایش عملکرد، افزایش بهره‌وری آب را به‌دنبال خواهد داشت. افزایش عملکرد در تیمارهای بیوچار از اثر اصلاح‌کننده خاک بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی خاک ناشی می‌شود. همان‌گونه که با ارجاع به منابع متعدد،

در مقدمه مقاله اشاره شد، بیوچار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش می‌دهد، pH خاک را تعدیل می‌کند، میزان هدرروی نیتروژن که نقش عمده در عملکرد گیاه دارد را کاهش و در مجموع دسترسی گیاه به عناصر غذایی را بهبود می‌بخشد. در حضور بیوچار ظرفیت نگهداشت رطوبت خاک افزایش می‌یابد. بدین ترتیب قدر مطلق پتانسیل آب کاهش می‌یابد. در این حالت، گیاه برای جذب آب، انرژی کم‌تری مصرف می‌کند در عوض، این انرژی را برای ساخت متابولیت‌های خود نظیر کربوهیدرات، چربی و پروتئین هزینه می‌کند. از این‌رو، جرم زیست‌توده گیاه افزایش می‌یابد.

پایش رطوبت خاک تیمارهای کاه در طول دوره رشد، وجود رطوبت کافی (حتی بیش از ظرفیت مزرعه) و نیاز آبی کم‌تر را نشان می‌داد (شکل‌های ۲ و ۳). بنابراین دور آبیاری در این تیمارها طولانی‌تر از سایر تیمار بود. اما وضعیت ظاهری گیاه در این تیمارها بیانگر آن بود که با وجود رطوبت کافی در خاک، گیاه به نوعی از تنش آب و عناصر غذایی رنج می‌برد. به نظر می‌رسید کاه، آب را جذب نموده و آن را از دسترس گیاه خارج می‌کند. آزمایش‌های تکمیلی در محیط مشابه نشان داد که ۲۵۰ گرم کاه، تا چهار برابر وزن خود آب جذب کرد و در معرض هوا، دوازده روز طول کشید تا کاملاً خشک شده و به وزن اولیه برسد. اما به هر حال، ابزارهای سنجش رطوبت خاک صرف‌نظر از این‌که رطوبت جذب کاه شده یا در خاک موجود است، آن را حس کرده و گزارش می‌کنند. گذشته از این موارد، با افزودن کاه به خاک، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک تغییر می‌کند، به‌طوری‌که مقدار آبِ خاک در نقاط پتانسیل رطوبت کاهش می‌یابد. در این خاک، گیاه بیش‌تر تحت تنش آب قرار می‌گیرد (جدول ٤). در گیاهانی که ریشه عمیق دارند اثر این تنش کم‌تر است. شکل‌های (۲) و (۳) میانگین رطوبت خاک تیمارها را در کل دوره رشد نشان می‌دهد.

با وجود طولانی‌بودن دور آبیاری در تیمارهای کاه، در این تیمارها به‌ویژه آن‌هایی که کاه بیش‌تری داشتند به محض آبیاری، زه‌آب تولید می‌شد، اما این پدیده در سایر تیمارها اتفاق نیفتاد. به‌نظر می‌رسد با افزودن کاه، نفوذپذیری خاک و هدایت هیدرولیکی آن افزایش یابند. این ویژگی کاه می‌تواند در مناطق حساس به فرسایش خاک، ضریب رواناب را کاهش داده و از فرسایش خاک جلوگیری کند و یا در طرح‌های احیای اراضی، راندمان آب‌شویی خاک‌های شور را بهبود بخشد. Lu *et al.* (2019) مشاهده کردند که افزودن کاه به خاک باعث شد نفوذ عمقی افزایش یابد و آب شور تأثیر منفی کم‌تری بر عملکرد ذرت داشته باشد. Xie *et al.* (2017) کاربرد کاه را به‌عنوان یک راه‌کار مؤثر برای کاهش شوری خاک سطحی مناطق ساحلی معرفی کردند. ضمن این‌که خروجی مقالات یاد شده، با مشاهدات این پژوهش هم‌خوانی دارد، پیشنهاد می‌شود در زمینه اثرات کاه بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، بیش‌تر پژوهش شود.

مقایسه گروهی مستقل تیمارهای ۲/۵ درصد و ۵ درصد کاه با تیمارهای ۲/۵ درصد و ۵ درصد بیوچار نشان داد که وجود کاه در خاک بر عملکرد و در نتیجه، بهره‌وری آب تأثیر منفی معنی‌دار دارد (جدول ۱۱). درحالی‌که تأثیر بیوچار با وجودی که در مقادیر کم آن از لحاظ آماری نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار نیست، اما غالباً مثبت و مطلوب است. در تیمار ۲/۵ درصد کاه، عملکرد بیولوژیک و بهره‌وری آب به‌ترتیب ۷۸ درصد و ۳۳ درصد کاهش یافتند. در تیمار ۲/۵ درصد بیوچار عملکرد بیولوژیک و بهره‌وری آب به‌ترتیب ۱۱۱ درصد و ۱۱۱ درصد افزایش یافتند. این مقادیر، میانگین برای هر دو نوع خاک هستند (جدول ۱۰).

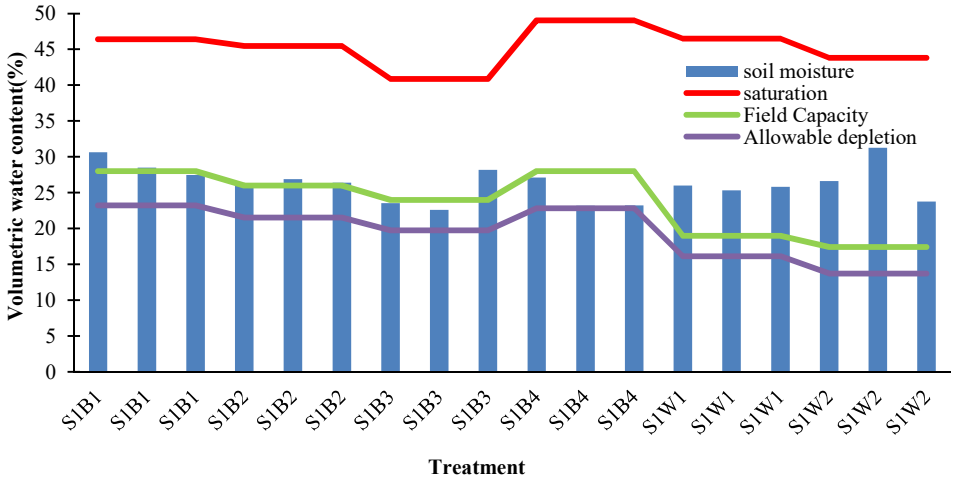

Figure 2. Average soil moisture in clay loam treatments during growth period

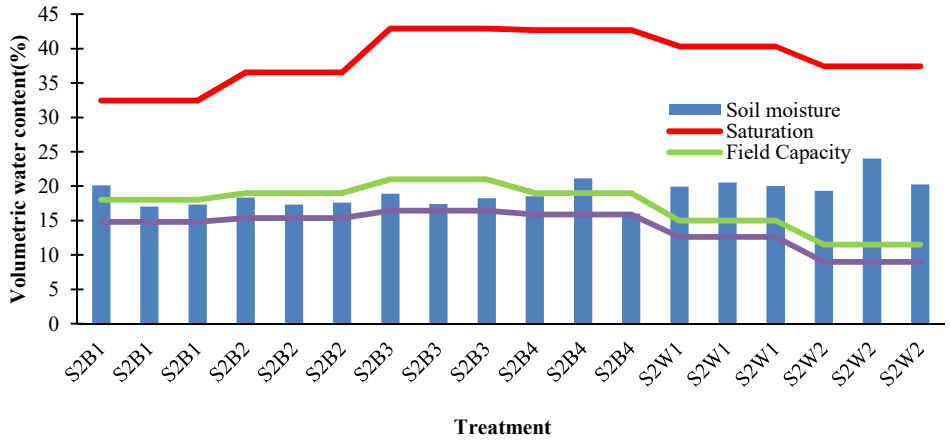

Figure 3. Average soil moisture in sandy loam treatments during growth period

Table 10. Mean comparison for biological yield, potting medium salinity and water productivity

Treatment	Biological yield (Kg. ha^{-1})	Used water (m^3. ha^{-1})	Potting medium salinity(dS.m^{-1})	Water productivity (kg.m^{-3})
S_1B_1	41400^{bc}	17692	3.84^{bcd}	2.34^{bc}
S_1B_2	47700^{b}	17732	3.92^{bcd}	2.69^{bc}
S_1B_3	46600^{bc}	17854	4.73^{ab}	2.61^{bc}
S_1B_4	57200^{a}	17987	5.75^{a}	3.18^{a}
S_1W_1	7270^{e}	5307	2.93^{d}	1.37^{d}
S_1W_2	3700^{e}	4353	3.75^{bcd}	0.85^{e}
S_2B_1	31100^{d}	13946	4.36^{abc}	2.23^{c}
S_2B_2	33200^{d}	13950	4.81^{ab}	2.38^{bc}
S_2B_3	33100^{d}	13966	5.14^{ab}	2.37^{bc}
S_2B_4	39900^{c}	14099	5.59^{a}	2.83^{ab}
S_2W_1	8400^{e}	5000	3.05^{cd}	1.68^{d}
S_2W_2	5300^{e}	3926	2.88^{d}	1.35^{d}

Table 11. Orthogonal comparison of straw treatments with biochar treatments (equal concentration) for water productivity

Source of variation	Water productivity (kg.m^{-3})
Sum of squares	8.61
Treatments	0.38
Error	0.027
F stat	197.8**

Table 12. Biological yield (BY) and used water data in all experimental units

Treatment	Replication	BY ($t.ha^{-1}$)	Used water ($m^3. ha^{-1}$)	Treatment	Replication	BY ($t.ha^{-1}$)	Used water ($m^3. ha^{-1}$)
S_1B_1	1	41.3	17560.8	S_2B_1	1	34.7	13936.4
S_1B_1	2	42.9	17772	S_2B_1	2	28.5	13936.4
S_1B_1	3	39.9	17772	S_2B_1	3	30.0	13936.4
S_1B_2	1	52.5	17772	S_2B_2	1	33.1	13936.4
S_1B_2	2	46.6	17772	S_2B_2	2	34.2	13936.4
S_1B_2	3	44.1	17772	S_2B_2	3	32.2	13936.4
S_1B_3	1	50.0	17844.8	S_2B_3	1	34.4	13970
S_1B_3	2	48.3	17844.8	S_2B_3	2	32.8	13970
S_1B_3	3	41.4	17844.8	S_2B_3	3	32.2	13970
S_1B_4	1	60.9	17956.8	S_2B_4	1	41.9	14084.8
S_1B_4	2	57.4	17956.8	S_2B_4	2	43.6	14084.8
S_1B_4	3	53.4	17956.8	S_2B_4	3	34.4	14084.8
S_1W_1	1	7.3	5282.4	S_2W_1	1	8.8	4966
S_1W_1	2	8.3	5282.4	S_2W_1	2	8.9	4966
S_1W_1	3	6.2	5282.4	S_2W_1	3	7.4	4966
S_1W_2	1	4.8	4328	S_2W_2	1	5.0	3978.4
S_1W_2	2	2.9	4328	S_2W_2	2	6.3	3978.4
S_1W_2	3	3.4	4328	S_2W_2	3	4.7	3978.4

نتیجه‌گیری

با توجه به اثرات منفی کاه بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و کارایی مصرف آب از یک‌سو و نقش مثبت بیوچار در ویژگی‌های خاک و بهره‌وری آب از سوی دیگر، پیشنهاد می‌شود سازوکاری تدوین شود که به موجب آن، کشاورزان بقایای گیاهی پس از برداشت گندم را از سطح مزرعه جمع‌آوری و پس از تبدیل به بیوچار، همراه با عملیات خاک‌ورزی و آماده‌کردن بستر کاشت در مزرعه استفاده کنند. چنان‌چه این قبیل عملیات در سطح گسترده انجام شود صرف‌نظر از اقتصادی‌ترشدن تولیدات کشاورزی، گام مؤثری در راستای مهار کم‌آبی برداشته خواهد شد.

در شرایطی که راه‌کار بالا عملی نباشد، باید به کاه فرصت داده شود تا تحت اثر فعل و انفعالات بیوشیمیایی خاک تجزیه شود. مدت زمان لازم، به شرایط محیطی بستگی دارد و اگر از آن صرف‌نظر شود افت عملکرد در محصول بعدی اتفاق خواهد افتاد. Yuan *et al.* (2021) و Zhang *et al.* (2021) مشاهده کردند که با گذشت چند سال از افزودن کاه به خاک، کاهش عملکرد در کشت‌های بعدی روی نداد.

پی‌نوشت‌ها

1. Biochar
2. European biochar certificate
3. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
4. Electrical Conductivity
5. Saturation percentage
6. Field capacity
7. Permanent wilting point
8. Bulk density
9. Time domain reflectometry
10. Syngas
11. Bio Oil

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Agbna, G. H., Dongli, S., Zhipeng, L., Elshaikh, N. A., Guangcheng, S., & Timm, L. C. (2017). Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato. *Scientia Horticulturae*, *222*, 90-101.
2. Ahmadvand, M., Soltani, J., Hashemi G. S. E., & Varavipour, M., (2018). The relationship between the characteristics of Biochar produced at different temperatures and its impact on the uptake of NO3--N. Environ. health eng. manag. 5 (2), 67-75.
3. Akhtar, S. S., Li, G., Andersen, M. N., & Liu, F. (2014). Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agricultural Water Management*, *138*, 37-44.

4. Brtnicky, M., Datta, R., Holatko, J., Bielska, L., Gusiatin, Z. M., Kucerik, J., ... & Pecina, V. (2021). A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. *Science of The Total Environment*, 796, 148756.
5. Carr, M. K. V. (2013). Crop Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper 66. By P. Steduto, TC Hsiao, E. Fereres and D. Raes. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
6. Chen, X., Yang, S. H., Jiang, Z. W., Ding, J., & Sun, X. (2021). Biochar as a tool to reduce environmental impacts of nitrogen loss in water-saving irrigation paddy field. *Journal of Cleaner Production*, *290*, 125811.
7. Edeh, I. G., Mašek, O., & Buss, W. (2020). A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties–New insights and future research challenges. *Science of the Total Environment*, *714*, 136857.
8. Faloye, O. T., Alatise, M. O., Ajayi, A. E., & Ewulo, B. S. (2019). Effects of biochar and inorganic fertiliser applications on growth, yield and water use efficiency of maize under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, *217*, 165-178.
9. Gavili, E., Moosavi, A. A., & Haghighi, A. A. K. (2019). Does biochar mitigate the adverse effects of drought on the agronomic traits and yield components of soybean? *Industrial crops and products*, *128*, 445-454.
10. Genesio, L., Miglietta, F., Baronti, S., & Vaccari, F. P. (2015). Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: Results from a four years field experiment in Tuscany. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *201*, 20-25.
11. Graber, E. R., Harel, Y. M., Kolton, M., Cytryn, E., Silber, A., David, D. R., ... & Elad, Y. (2010). Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant and soil*, *337*(1), 481-496.
12. Guo, L., Bornø, M. L., Niu, W., & Liu, F. (2021). Biochar amendment improves shoot biomass of tomato seedlings and sustains water relations and leaf gas exchange rates under different irrigation and nitrogen regimes. *Agricultural Water Management*, *245*, 106580.
13. Haghnia, G. (1989). *Plant Salinity Tolerance guideline*. Mashad. Ferdowsi University Press. (In Persian)
14. Heydari, N. (2014). Water productivity in agriculture: challenges in concepts, terms and values. *Irrigation and drainage*, *63*(1), 22-28.
15. Kammann, C. I., Schmidt, H. P., Messerschmidt, N., Linsel, S., Steffens, D., Müller, C., ... & Joseph, S. (2015). Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Scientific reports*, *5*(1), 1-13.
16. Karami Niya, F., Rang Zan, N., Nadian Ghomsheh, H., & Lotfi Jalal Abadi, A. (2019). The Effect of Spent Mushroom Compost and Its Biochar on Parsley Yield under Salinity Stress. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *50*(6), 1453-1465.(In Persian)
17. Kazemizadeh, M., Naseri, A., Hooshmand, A., Golabi, M., & Meskarbashee, M. (2020). Investigating the Effect of Biochar and Hydrochar (Sugar Cane Bagasse) on Yield, Water Productivity and Nitrogen Leaching in Maize Cultivation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *51*(3), 753-761.(In Persian)
18. Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.) (2015). Biochar for environmental management: *science, technology and implementation.* Routledge.
19. Liu, X., Wei, Z., Ma, Y., Liu, J., & Liu, F. (2021). Effects of biochar amendment and reduced irrigation on growth, physiology, water-use efficiency and nutrients uptake of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) on two different soil types. *Science of the Total Environment*, *770*, 144769.
20. Lu, P., Zhang, Z., Sheng, Z., Huang, M., & Zhang, Z. (2019). Effect of Surface Straw Incorporation Rate on Water–Salt Balance and Maize Yield in Soil Subject to Secondary Salinization with Brackish Water Irrigation. *Agronomy*, *9*(7), 341.
21. Mannan, M. A., Mia, S., Halder, E., & Dijkstra, F. A. (2021). Biochar application rate does not improve plant water availability in soybean under drought stress. *Agricultural Water Management*, *253*, 106940.
22. Miri, F., Zamani, J., & Zarebanadkouki, M. (2021). The Effect of Different Levels of Pistachio Harvesting Wastes Biochar on Growth and Water Productivity of Maize (Zea mays L.). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *52*(1), 227-236(In Persian).
23. Paneque, M., José, M., Franco-Navarro, J. D., Colmenero-Flores, J. M., & Knicker, H. (2016). Effect of biochar amendment on morphology, productivity and water relations of sunflower plants under non-irrigation conditions. *Catena*, *147*, 280-287.

24. Ramlow, M., Foster, E. J., Del Grosso, S. J., & Cotrufo, M. F. (2019). Broadcast woody biochar provides limited benefits to deficit irrigation maize in Colorado. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *269*, 71-81.
25. Sadeghi, S. H., Hazbavi, Z., & Harchegani, M. K. (2016). Controllability of runoff and soil loss from small plots treated by vinasse-produced biochar. *Science of the Total Environment*, *541*, 483-490.
26. Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, *70*(5), 1569-1578.
27. Schmidt, H. P., Pandit, B. H., Martinsen, V., Cornelissen, G., Conte, P., & Kammann, C. I. (2015). Fourfold increase in pumpkin yield in response to low-dosage root zone application of urine-enhanced biochar to a fertile tropical soil. *Agriculture*, *5*(3), 723-741.
28. Schmidt, H. P., Bucheli, T., Kammann, C., Glaser, B., Abiven, S., & Leifeld, J. (2016). European biochar certificate-guidelines for a sustainable production of biochar.
29. Sedmihradská, A., Pohořelý, M., Jevič, P., Skoblia, S., Beňo, Z., Farták, J., ... & Hartman, M. (2020). Pyrolysis of wheat and barley straw. *Research in Agricultural Engineering*, *66*(1), 8-17.
30. Slavich, P. G., Sinclair, K., Morris, S. G., Kimber, S. W. L., Downie, A., & Van Zwieten, L. (2013). Contrasting effects of manure and green waste biochars on the properties of an acidic ferralsol and productivity of a subtropical pasture. *Plant and Soil*, *366*(1), 213-227.
31. Wang, Y., Wei, Y., Sun, J., & Zhang, Y. (2016). Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, *32*(8), 113-119.
32. Wang, M., Lan, X., Xu, X., Fang, Y., Singh, B. P., Sardans, J., ... & Wang, W. (2020). Steel slag and biochar amendments decreased CO2 emissions by altering soil chemical properties and bacterial community structure over two-year in a subtropical paddy field. *Science of The Total Environment*, *740*, 140403.
33. worldometers.info.(2021). (https://www.worldometers.info/water/)
34. Xie, W., Wu, L., Zhang, Y., Wu, T., Li, X., & Ouyang, Z. (2017). Effects of straw application on coastal saline topsoil salinity and wheat yield trend. *Soil and Tillage Research*, *169*, 1-6.
35. Yuan, G., Huan, W., Song, H., Lu, D., Chen, X., Wang, H., & Zhou, J. (2021). Effects of straw incorporation and potassium fertilizer on crop yields, soil organic carbon, and active carbon in the rice–wheat system. *Soil and Tillage Research*, *209*, 104958.
36. Zhang, X., Qu, J., Li, H., La, S., Tian, Y., & Gao, L. (2020). Biochar addition combined with daily fertigation improves overall soil quality and enhances water-fertilizer productivity of cucumber in alkaline soils of a semi-arid region. *Geoderma*, *363*, 114170.
37. Zhang, H., Hobbie, E. A., Feng, P., Zhou, Z., Duan, W., Hao, J., & Hu, K. (2021). Responses of soil organic carbon and crop yields to 33-year mineral fertilizer and straw additions under different tillage systems. *Soil and Tillage Research*, *209*, 104943.