J. Soil Plant Interact. 2026; 17(2): 41–58. https://doi.org/10.47176/jspi.17.2.21901

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

Effect of Biochar and Compost Application on Evapotranspiration and Water Productivity in Sugarcane (CP57-614 Cultivar)

Elham Zanganeh-Yusefabadi[1*], Akbar Karimi, Ali Sheini-Dashtegol and Shaban Zarei

1- Department of Irrigation and Drainage Research, Khuzestan Sugarcane Research and Training Institute, Ahvaz, Iran
2- Department of Agronomy Research, Khuzestan Sugarcane Research and Training Institute, Ahvaz, Iran
3- Deputy of Agricultural Monitoring and Research, Khuzestan Sugarcane Research and Training Institute, Ahvaz, Iran
* Corresponding author, Email: ez1357h@yahoo.com

(Received: 11 November 2025; Revised: 28 April 2026; Accepted: 28 April 2026)

Abstract

Background and Objective: The application of soil organic amendments, such as biochar and compost, can influence plant evapotranspiration and water productivity. The present study aimed to investigate the effects of biochar and compost application on yield, evapotranspiration, crop coefficient, and water productivity of sugarcane (*Saccharum officinarum* L. CP57-614 cultivar).

Methods: This experiment was conducted at Amirkabir Sugarcane Agro-Industry, Khuzestan, using drainage-type volumetric lysimeters in a completely randomized design with three treatments: 1) control, 2) application of sugarcane residue compost at 30 t ha^{-1}, and 3) application of sugarcane residue biochar at 10 t ha^{-1}, each with three replications. In one lysimeter, grass was grown as the reference plant, and sugarcane was cultivated in nine other lysimeters. Daily actual evapotranspiration was estimated using the water balance method in the lysimeters, while the reference evapotranspiration was calculated using grass, and the crop coefficients (K_c) were determined for different months of the growing period.

Results: Results indicated that the application of biochar and compost reduced the K_c values during different months compared with the control treatment. On average, biochar and compost reduced the K_c of sugarcane (CP57-614 cultivar) by 7.2 and 6.6%, respectively, compared with the control. Moreover, biochar and compost application significantly increased cane yield by 19.3 and 12.3%, sugar yield by 21.4 and 12.9%, irrigation water productivity for cane yield by 24.7 and 17.6%, respectively, and for sugar yield by 24.0 and 16.0%, respectively. Water productivity was also significantly improved by 25.7 and 17.3% for cane production, and by 27.2 and 18.2% for sugar production, under biochar and compost treatments, respectively. The increase in water productivity was primarily due to increased cane and sugar yield and secondarily due to reduced evapotranspiration.

Conclusion: Overall, the findings revealed that the application of organic soil amendments such as biochar and compost can effectively enhance irrigation water productivity and water productivity in sugarcane (CP57-614 cultivar).

Keywords: Organic amendment, Sugarcane residues, Evapotranspiration, Soil moisture, Crop coefficient.

How to Cite: Zanganeh-Yusefabadi, E., Karimi, A., Sheini-Dashtegol, A., Zarei, Sh., 2026. Effect of biochar and compost application on evapotranspiration and water productivity in sugarcane (CP57-614 cultivar). J. Soil Plant Interact. 17(2), 41–58 (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jspi.17.2.21901

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۵؛ ۱۷(۲): ۵۸-۴۱، https://doi.org/10.47176/jspi.17.2.21901

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۲۷۸۳-۵۰۱۴ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۵۲۸۶

مقاله پژوهشی

تأثیر کاربرد بیوچار و کمپوست بر تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب در نیشکر (رقم CP57-614)

الهام زنگنه یوسف‌آبادی[1*]، اکبر کریمی[2]، علی شینی دشتگل[1] و شعبان زارعی[3]

۱- گروه تحقیقات آبیاری و زهکشی، مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان، اهواز، ایران

۲- گروه تحقیقات به‌زراعی، مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان، اهواز، ایران

۳- معاونت تحقیقات و پایش کشاورزی، مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان، اهواز، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: ez1357h@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۲۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۸)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی خاک مانند بیوچار و کمپوست می‌تواند در تبخیر-تعرق گیاه و بهره‌وری آب مؤثر باشد. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر کاربرد بیوچار و کمپوست بر عملکرد، تبخیر-تعرق، ضریب گیاهی و بهره‌وری آب در نیشکر رقم CP57-614 انجام شد.

روش‌ها: این پژوهش در کشت و صنعت امیرکبیر خوزستان در لایسیمترهای حجمی زهکش‌دار در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تیمار شامل ۱) شاهد، ۲) کاربرد کمپوست بقایای نیشکر (۳۰ تن در هکتار) و ۳) کاربرد بیوچار بقایای نیشکر (۱۰ تن در هکتار) و در سه تکرار انجام شد. در یک لایسیمتر، چمن به‌عنوان گیاه مرجع و در نه لایسیمتر دیگر، نیشکر کشت شد. تبخیر-تعرق روزانه نیشکر (واقعی) به روش بیلان آب در لایسیمترها برآورد شد. تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از گیاه چمن محاسبه شده و مقادیر ضریب گیاهی (K_c) در ماه‌های مختلف فصل رشد تعیین شد.

نتایج: نتایج نشان داد کاربرد بیوچار و کمپوست موجب کاهش مقادیر K_c در ماه‌های مختلف سال در مقایسه با تیمار شاهد شد. کاربرد تیمارهای بیوچار و کمپوست مقدار K_c نیشکر رقم CP57-614 را در مقایسه با تیمار شاهد به‌طور میانگین به‌ترتیب ۷/۲ و ۶/۶ درصد کاهش داد. همچنین نتایج نشان داد کاربرد بیوچار و کمپوست سبب افزایش معنی‌دار عملکرد نیشکر (به‌ترتیب ۱۹/۳ و ۱۲/۳ درصد)، عملکرد شکر (به‌ترتیب ۲۱/۴ و ۱۲/۹ درصد)، بهره‌وری آب آبیاری در تولید نیشکر (به‌ترتیب ۲۴/۷ و ۱۷/۶ درصد) و تولید شکر (به‌ترتیب ۲۴/۰ و ۱۶/۰ درصد) و نیز افزایش معنی‌دار بهره‌وری آب در تولید نیشکر (به‌ترتیب ۲۵/۷ و ۱۷/۳ درصد) و تولید شکر (به‌ترتیب ۲۷/۲ و ۱۸/۲ درصد) شد. افزایش بهره‌وری آب در درجه نخست ناشی از افزایش عملکرد نیشکر و شکر و در درجه دوم ناشی از کاهش تبخیر-تعرق بود.

نتیجه‌گیری کلی: به‌طور کلی، نتایج نشان داد که کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی بیوچار و کمپوست می‌تواند در افزایش بهره‌وری آب آبیاری در نیشکر رقم CP57-614 مؤثر باشد.

واژه‌های کلیدی: اصلاح‌کننده‌های آلی، بقایای نیشکر، تبخیر-تعرق، رطوبت خاک، ضریب گیاهی.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۵ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

تعیین آب مورد نیاز گیاه نیازمند محاسبه تبخیر-تعرق محصول است. روش بیلان آبی یک روش آسان و ساده در مقایسه با روش‌های متعدد دیگر موجود در منابع علمی است. تبخیر-تعرق با استفاده از روش بیلان آبی با در نظر گرفتن تغییرات در ذخیره رطوبتی خاک، بین دوره‌های مورد محاسبه، مقدار آب آبیاری و مقدار آب زهکشی تعیین می‌شود. روش لایسیمتری معمولاً به‌دلیل دقت زیاد، به‌عنوان یک روش پایه و مبنا برای بررسی اعتبار سایر روش‌های برآورد تبخیر-تعرق است (Antunes Junior et al., 2021). برای برآورد دقیق مقدار تبخیر-تعرق گیاه، لازم است ابتدا تبخیر-تعرق گیاه مرجع به‌روش‌های مستقیم یا به‌کمک داده‌های هواشناسی توسط روابط تجربی و مدل‌های کامپیوتری محاسبه شده و سپس با تعیین ضریب گیاهی (K_c)، بر مبنای مراحل رشد، مقدار دقیق تبخیر-تعرق گیاه برای یک سیستم آبیاری تعیین شود. بنابراین تعیین K_c، برای محاسبه دقیق تبخیر-تعرق گیاه، استفاده بهتر از منابع آب و مدیریت بهینه آب آبیاری به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ضروری است (Dingre and Gorantiwar, 2020; Mokari et al., 2025).

در سال‌های اخیر برای افزایش بهره‌وری آب، افزون بر توسعه روش‌های نوین آبیاری، تلاش‌های زیادی برای بهبود ویژگی نگهداشت رطوبت خاک، برای مدیریت بهینه آب انجام گرفته است (Ghorbani et al., 2023). از جمله روش‌های مدیریتی مصرف بهینه آب در مزرعه، می‌توان به بهبود ویژگی‌های فیزیکی و افزایش نگه‌داشت آب خاک با استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک از جمله کمپوست و بیوچار بقایای گیاهی اشاره کرد (Lal, 2020; Ghorbani et al., 2023). بیوچار یک ماده متخلخل و غنی از کربن است که از تجزیه گرمایی زیست‌توده‌های مختلف در شرایط بدون اکسیژن و یا کم‌اکسیژن تهیه می‌شود. به این فرآیند پیرولیز یا گرماکافت گفته می‌شود (Sing et al., 2025). نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که کاربرد بیوچار به‌دلیل داشتن سطح ویژه زیاد و ساختار متخلخل، سبب بهبود ساختمان و افزایش نگه‌داشت آب خاک، کاهش تبخیر از سطح خاک و به‌دنبال آن افزایش عملکرد گیاه و افزایش بهره‌وری آب می‌شود (Acharya et al., 2024; Xiao et al., 2024; Karimi et al., 2026).

تأثیر کاربرد بیوچار بر تبخیر-تعرق، عملکرد گیاه و بهره‌وری آب به عوامل مختلفی از جمله نوع و ویژگی‌های بیوچار، مقدار کاربرد آن و همچنین ویژگی‌های خاک بستگی دارد (Xiao et al., 2024). نتایج بررسی Xiao et al. (2024) نشان داد کاربرد بیوچار در خاک‌های دارای درصد زیاد رس (بیشتر از ۳۵ درصد) بیشترین تأثیر را در افزایش عملکرد گیاه و کاهش تبخیر-تعرق داشت. Vu et al. (2023) با بررسی تأثیر کاربرد سطوح مختلف بیوچار (۵ و ۱۰ تن در هکتار) تهیه‌شده از چوب بلوط، بر عملکرد نیشکر گزارش کردند کاربرد بیوچار در سطح ۱۰ تن در هکتار سبب افزایش معنی‌دار (۱۹/۹ درصد) عملکرد ساقه نیشکر شد. Feng et al. (2023) آثار کاربرد بیوچار کاه ذرت بر تبخیر از سطح خاک و محتوای رطوبت خاک را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد کاربرد بیوچار در سطوح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تن در هکتار، تبخیر تجمعی از سطح خاک را به‌ترتیب ۹/۶، ۶/۳ و ۱۰/۹ درصد کاهش داد. Reyes-Cabrera et al. (2017) با بررسی تأثیر کاربرد بیوچار تهیه‌شده از بقایای چوبی بر تبخیر-تعرق گیاه سویا در آزمایش‌های لایسیمتری گزارش کردند کاربرد بیوچار در سطح ۱۰ تن در هکتار سبب کاهش معنی‌دار تبخیر-تعرق (۱۱/۱ درصد) این گیاه شد. آن‌ها همچنین گزارش کردند کاربرد بیوچار سبب افزایش معنی‌دار بهره‌وری آب (۱۵/۴ درصد) در ذرت شد. نتایج پژوهش Shaban et al. (2022) نیز نشان داد افزودن بیوچار تهیه‌شده از کاه و کلش گندم به خاک، تبخیر-تعرق گندم را به‌طور معنی‌داری (۲۴/۴ درصد) کاهش داد.

با توجه به سطح کشت حدود ۱۰۰ هزار هکتار نیشکر در استان خوزستان (Safirzadeh et al., 2021; Karimi et al., 2024a)، فرآوری بقایای نیشکر و تولید اصلاح‌کننده‌های آلی بیوچار و کمپوست (Khaje et al., 2025) و استفاده از آن‌ها در

شکل ۱. تصویر لایسیمترهای حجمی بتنی مورد استفاده در آزمایش

Fig. 1. Image of the concrete volumetric lysimeters used in the experiment

خاک‌های با ماده آلی کم مزارع نیشکر (Karimi et al., 2024a)، به‌منظور مدیریت منابع آب و خاک، اهمیت دارد. تاکنون پژوهش‌های چندانی در زمینه تأثیر کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی خاک بر تبخیر–تعرق واقعی گیاه نیشکر، ضریب گیاهی و بهره‌وری آب در استان خوزستان انجام نشده است. بنابراین پژوهش حاضر به‌منظور بررسی تأثیر کاربرد بیوچار و کمپوست بر تبخیر–تعرق و ضرایب گیاهی نیشکر رقم CP57-614 در ماه‌های مختلف سال و همچنین عملکرد و بهره‌وری آب انجام شد.

مواد و روش‌ها

مکان اجرای پژوهش

این پژوهش در لایسیمترهای زهکش‌دار در شرکت کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر با مختصات طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲ دقیقه شرقی واقع در کیلومتر ۴۵ جاده اهواز–خرمشهر و در غرب رودخانه کارون، انجام شد (شکل ۱). لایسیمترها از نوع بتنی با کف و دیواره عایق نسبت به ورود و خروج رطوبت هستند. مساحت کلی لایسیمترها ۱۲۰ مترمربع است که از ۱۰ لایسیمتر هر کدام با ابعاد ۲×۶ متر با کف شیب‌دار و عمق حدود ۲/۵ متر تشکیل شده است. کارگذاری زهکش‌های لوله‌ای در عمق‌های ۱/۵ و ۲ متری، صورت گرفته است (شکل ۱). میانگین آمار هواشناسی مکان اجرای پژوهش، بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کشت و صنعت امیرکبیر، در جدول ۱ ارائه شده است.

تهیه بیوچار و کمپوست و اندازه‌گیری ویژگی‌های آن‌ها

در این پژوهش از زیست‌توده بقایای برداشت سبز نیشکر تهیه‌شده از کشت و صنعت امام خمینی (ره) خوزستان برای تولید بیوچار استفاده شد. بقایای برداشت سبز ابتدا هوا–خشک شده و سپس در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شدند (Singh et al., 2017). فرآیند پیرولیز در کوره الکتریکی با دمای نهایی ۳۵۰ درجه سلسیوس با افزایش ۵ درجه سلسیوس در دقیقه به‌مدت ۳ ساعت در شرایط حداقل اکسیژن انجام شد (Karimi et al., 2020). کمپوست بقایای برداشت سبز نیشکر در سایت تولید کمپوست کشت و صنعت حکیم فارابی خوزستان تهیه شد. سپس ویژگی‌های بیوچار و کمپوست اندازه‌گیری شد (Singh et al., 2017) که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

نمونه‌برداری خاک و اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی آن

پیش از کشت، نمونه‌برداری از خاک لایسیمترها و از لایه ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری انجام شد. نمونه خاک جمع‌آوری شده و پس از

جدول ۱. میانگین ماهانه پارامترهای هواشناسی در طول دوره آزمایش (مهر ۱۴۰۲ تا شهریور ۱۴۰۳)

Table 1. Mean monthly meteorological parameters during the study period (October 2023 to September 2024)

بارش (mm) Precipitation (mm)	رطوبت نسبی بیشینه (درصد) Maximum relative humidity (%)	رطوبت نسبی کمینه (درصد) Minimum relative humidity (%)	دمای بیشینه (درجه سلسیوس) Maximum temperature (°C)	دمای کمینه (درجه سلسیوس) Minimum temperature (°C)	ماه Month
0.0	64.4	25.1	39.4	20.9	مهر (Oct)
117.2	79.4	32.2	30.4	15.7	آبان (Nov)
3.4	90.0	47.6	22.2	9.1	آذر (Des)
7.2	88.1	45.9	21.6	8.6	دی (Jan)
25.3	84.6	42.0	21.7	9.3	بهمن (Feb)
80.8	79.3	35.3	23.9	10.3	اسفند (Mar)
1.7	80.5	33.3	29.5	14.9	فروردین (Apr)
1.0	72.4	28.3	34.9	19.2	اردیبهشت (May)
0.0	59.3	17.1	43.7	23.9	خرداد (Jun)
0.0	55.2	15.8	45.9	26.0	تیر (Jul)
0.0	51.1	18.1	45.5	26.9	مرداد (Aug)
0.0	61.6	22.3	43.4	24.9	شهریور (Sep)

جدول ۲. برخی ویژگی‌های بیوچار و کمپوست مورد استفاده در این پژوهش

Table 2. Properties of the biochar and compost used in this study

K (%)	P (%)	N (%)	C (%)	SA ($g\ m^{-2}$)	BD ($g\ cm^{-3}$)	EC (1:10) ($dS\ m^{-1}$)	pH (1:10)	ویژگی Property
5.42	1.21	1.79	53.2	56.7	0.23	4.23	6.95	بیوچار Biochar
2.34	1.08	1.12	26.2	14.7	0.82	3.38	6.82	کمپوست Compost

EC: رسانایی الکتریکی؛ BD: چگالی ظاهری؛ SA: سطح ویژه؛ C: کربن؛ N: نیتروژن؛ P_{ava}: فسفر کل؛ Kava: پتاسیم کل

EC: Electrical conductivity; BD: Bulk density; SA: Surface area; C: Carbon; N: Nitrogen; P: Phosphorus; K: Potassium

انتقال به آزمایشگاه از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. pH و رسانایی الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک (Rhoades, 1996)، بافت خاک به‌روش هیدرومتری (Kroetsch and Wang, 2008)، کربنات کلسیم معادل به‌روش تیتراسیون برگشتی با اسید کلریدریک یک نرمال (Rayment and Higginson, 1992)، کربن آلی به‌روش اکسیداسیون تر (Nelson and Sommers, 1996)، غلظت فسفر قابل دسترس به‌روش عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم نیم مولار (Olsen et al., 1954)، چگالی ظاهری به‌روش استوانه‌های نمونه‌برداری (Danielson and Sutherland, 1986) اندازه‌گیری شد. همچنین رطوبت حجمی گنجایش مزرعه‌ای (FC) در مکش ماتریک ۰/۳۳ بار و رطوبت حجمی نقطه پژمردگی دایم (PWP) در مکش ماتریک ۱۵ بار، با استفاده از

جدول ۳. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی

Table 3. Selected physical and chemical properties of the studied soil

Soil texture	Clay	Silt	Sand	OC	BD	θ_{vPWP}	θ_{vFC}	P_{ava}	CCE	pH	EC_e	ویژگی Property
-	%	%	%	%	g cm^{-3}	cm^3 cm^{-3}	cm^3 cm^{-3}	mg kg^{-1}	%	-	dS m^{-1}	واحد Unit
Clay loam	36	35.5	28.5	0.43	1.65	19.8	38.77	6.82	47.2	7.6	3.79	مقدار Value

EC_e: رسانایی الکتریکی عصاره گل اشباع؛ CCE: کربنات کلسیم معادل؛ P_{ava}: فسفر قابل دسترس؛ θ_v: رطوبت حجمی ؛ OC: کربن آلی؛ BD: چگالی ظاهری

EC_e: Electrical conductivity; CCE: Calcium carbonate equivalent; P_{ava}: Available Phosphorus; θ_v: Volumetric water content; OC: Organic carbon; BD: Bulk density

دستگاه صفحه فشار تعیین شد (Kirkham, 2005). ویژگی‌های خاک مورد بررسی در جدول ۳ آورده شده است. خاک مورد بررسی دارای بافت لوم رسی، pH قلیایی، غیرشور، آهکی و دارای ماده آلی کم بود (جدول ۳).

تیمارهای آزمایشی و روش اجرای پژوهش

این آزمایش با سه تیمار شامل: ۱) شاهد (C) (بدون کاربرد اصلاح کننده‌ها)، ۲) کاربرد کمپوست بقایای نیشکر در سطح ۳۰ تن در هکتار، و ۳) کاربرد بیوچار بقایای نیشکر (B) در سطح ۱۰ تن در هکتار و با سه تکرار انجام شد. در این پژوهش به‌منظور تعیین تبخیر-تعرق ماهانه گیاه مرجع (ET_0)، در یک لایسیمتر گیاه مرجع چمن (*Cynodon dactylon* L.) کشت شد. همچنین به‌منظور تعیین تبخیر-تعرق ماهانه گیاه نیشکر (ET_c)، در ۹ لایسیمتر دیگر، کشت نیشکر (*Saccarum Officinarum*) رقم CP57-614 به روش مرسوم منطقه، انجام شد. با توجه به ابعاد هر لایسیمتر، سه ردیف جوی و پشته به طول ۲ متر و فاصله حدود ۱/۸۳ متر ایجاد شد. مقدار هر یک از اصلاح‌کننده‌ها با توجه به سطح لایسیمتر وزن شده، به‌صورت دستی در کف جویچه توزیع شده و با خاک تا عمق حدود ۳۰ سانتی‌متری مخلوط شدند. سپس قلمه‌های ۵۰ سانتی‌متری نیشکر به‌صورت دوردیفه، در کف جویچه کشت شدند (Karimi et al., 2024b; Zanganeh-Yusefabadi et al., 2024). برنامه‌ریزی کوددهی بر اساس نتایج آزمون خاک و نیاز گیاه نیشکر انجام شد (Karimi et al., 2024a). کود فسفر در زمان کشت به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع کود سوپرفسفات تریپل به خاک افزوده شد. کود اوره به مقدار ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار در سه نوبت به همراه آب آبیاری استفاده شد.

برنامه‌ریزی آبیاری، اندازه‌گیری تبخیر-تعرق و محاسبه ضریب گیاهی

در این پژوهش، آبیاری به روش سطحی جوی و پشته‌ای با دور آبیاری ۳ تا ۵ روز در ماه‌های مختلف انجام شد. در هر نوبت آبیاری، ابتدا دبی منبع آب ورودی اندازه‌گیری شد. با اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک در هر لایسیمتر با استفاده از دستگاه TDR350 ساخت شرکت Spectrum، کمبود رطوبتی خاک نسبت به گنجایش مزرعه‌ای تعیین شده و با در نظر گرفتن عمق ناحیه توسعه ریشه (برابر ۶۰ سانتی‌متر) (Safirzadeh et al., 2021) آب مورد نیاز برای آبیاری هر لایسیمتر محاسبه شد. بر این اساس، حجم و دبی منبع آب ورودی، زمان آبیاری هر تیمار مشخص شد. زه‌آب حاصل از آبیاری هر لایسیمتر توسط زهکش‌های لوله‌ای که در اعماق ۱/۵ و ۲ متری کارگذاری شده بودند، به خارج هدایت شده و در ظروف ۶۰ لیتری که در محل خروجی قرار داده شده بود، جمع‌آوری شد. مقدار تجمعی زه‌آب در فاصله زمانی پس از آبیاری پیشین تا پیش از آبیاری بعدی، اندازه‌گیری و ثبت شد. برای محاسبه تغییرات ذخیره رطوبتی خاک در هر لایسیمتر، مقدار رطوبت خاک در هر لایسیمتر در

پایان هر ماه اندازه‌گیری شد. سپس تبخیر-تعرق گیاه نیشکر و همچنین گیاه مرجع چمن، با استفاده از رابطه بیلان آبی محاسبه شد (Kandra et al., 2023).

$$ET = I + P - D - \Delta S = I + P - D - D_{rz} \times (\theta_f - \theta_i) \quad (۱)$$

که در این رابطه، ET تبخیر-تعرق گیاه (میلی‌متر)، P بارندگی (میلی‌متر)، I مقدار آب آبیاری (میلی‌متر)، D زه‌آب (میلی‌متر)، ΔS تغییرات ذخیره رطوبتی خاک (میلی‌متر) در هر ماه، D_{rz} عمق لایه توسعه ریشه (عمق نمونه‌برداری)، و θ_i و θ_f به‌ترتیب مقادیر رطوبت حجمی خاک در ابتدا و پایان هر ماه است. برای تعیین ΔS که اهمیت ویژه‌ای در معادله بیلان آبی دارد، در آخرین روز هر ماه، نمونه‌برداری خاک انجام شد و رطوبت خاک تا عمق ۶۰ سانتی‌متری به‌روش وزنی اندازه‌گیری شد.

در هر نوبت آبیاری، نیاز آبشویی با رابطه (۲) محاسبه شد و به آب مورد نیاز افزوده شد:

$$LR = \frac{EC_{iw}}{5EC_{dw} - EC_{iw}} \quad (۲)$$

که در این رابطه، EC_{iw} رسانایی الکتریکی آب آبیاری (دسی-زیمنس بر متر) و EC_{dw} رسانایی الکتریکی زه‌آب (دسی‌زیمنس بر متر) است (Matendo et al., 2026).

مقدار ضرایب گیاهی (K_c) در ماه‌های مختلف سال، با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد (Allen et al., 1998):

$$Kc = \frac{ET_C}{ET_0} \quad (۳)$$

که در این رابطه، ET_0 تبخیر-تعرق ماهانه گیاه مرجع (چمن) و ETc تبخیر-تعرق ماهانه نیشکر است.

تعیین بهره‌وری آب

در انتهای دوره رشد، عملکرد ساقه نیشکر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عملکرد، نیشکر کشت‌شده در هر لایسیمتر به‌طور کامل، به‌صورت دستی برداشت شد. وزن ساقه نیشکر در هر تیمار اندازه‌گیری شده و عملکرد ساقه (تن در هکتار) محاسبه شد. برای برآورد عملکرد شکر، ابتدا نمونه‌برداری ساقه نیشکر انجام شد و با اندازه‌گیری پارامترهای کیفی شربت نیشکر و شکر قابل استحصال، عملکرد شکر (تن در هکتار) تعیین شد (de Oliviera et al., 2022). سپس شاخص بهره‌وری آب آبیاری در تولید نیشکر و تولید شکر در تیمارهای مختلف، با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شد (Alfadil et al., 2021):

$$IWP = \frac{Y}{I + R} \quad (۴)$$

که در این رابطه، IWP[1]، بهره‌وری آب آبیاری ($kg\ m^{-3}$)، Y، عملکرد ساقه نیشکر یا عملکرد شکر ($kg\ ha^{-1}$)، I، حجم آب آبیاری ($m^3\ ha^{-1}$) و R، حجم بارش مؤثر ($m^3\ ha^{-1}$) است.

همچنین بهره‌وری آب در تولید نیشکر و تولید شکر در تیمارهای مختلف از رابطه (۵) محاسبه شد (Dayoub et al., 2024):

$$WP = \frac{Y}{ET_C} \quad (۵)$$

که در این رابطه، WP[2]، بهره‌وری آب ($kg\ m^{-3}$)، Y عملکرد ساقه نیشکر یا شکر ($kg\ ha^{-1}$) و ET_c، تبخیر-تعرق گیاه در دوره رشد ($m^3\ ha^{-1}$) است.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

این پژوهش در قالب طرح آزمایشی کاملاً تصادفی با سه تیمار و در سه تکرار انجام شد. تجزیه آماری داده‌های این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.4 انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD و در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. نمودارها نیز در محیط نرم‌افزار Excel رسم شدند.

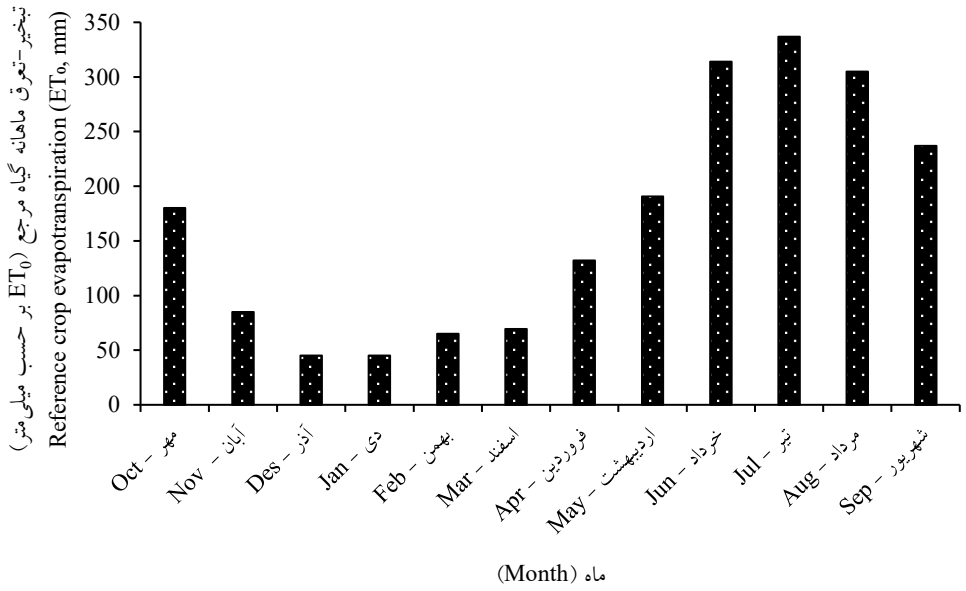
نتایج و بحث

تبخیر-تعرق گیاه مرجع

نتایج نشان داد که تبخیر-تعرق ماهانه گیاه مرجع (ET_0)، در دوره رشد نیشکر از مهرماه تا آذرماه روند کاهشی داشت و در آذرماه و دی‌ماه مقدار آن (۴۵ میلی‌متر) تغییری نکرد. پس از آن، از دی‌ماه تا خردادماه، ET_0 روند افزایشی چشم‌گیری داشت. در

1. Irrigation water productivity

2. Water productivity



شکل ۲. تبخیر-تعرق ماهانه گیاه مرجع (ET_0) در ماه‌های مختلف در طول دوره آزمایش (مهر ۱۴۰۲ تا شهریور ۱۴۰۳)

Fig. 2. Reference crop evapotranspiration (ET_0) in different months during the study period (October 2023 to September 2024)

حالی‌که از تیرماه تا مردادماه، تبخیر-تعرق گیاه مرجع تغییرات کم‌تری داشته است. به‌طور کلی کم‌ترین و بیشترین مقادیر آن به‌ترتیب مربوط به آذرماه و دی‌ماه (۴۵/۰ میلی‌متر) و تیرماه (۳۳۶/۷ میلی‌متر) بود (شکل ۲).

تبخیر-تعرق واقعی نیشکر و ضریب گیاهی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر تیمار بر تبخیر-تعرق واقعی نیشکر در همه ماه‌ها بجز مهرماه و دی‌ماه معنی‌دار بود (جدول ۴). همچنین اثر تیمار اصلاح‌کننده‌های آلی بر ضریب گیاهی در همه‌ماه‌ها در طول دوره رشد بجز دو ماه اول (مهر و آبان) معنی‌دار بود (جدول ۵). نتایج نشان داد در همه تیمارها، روند تغییرات تبخیر-تعرق و ضرایب گیاهی از مهرماه تا دی‌ماه، کاهشی بود و از دی‌ماه تا تیرماه افزایشی بود. پس از آن از تیرماه تا شهریورماه تبخیر-تعرق نیشکر در همه تیمارها کاهش یافت (شکل‌های ۲ و ۳). کم‌ترین و بیشترین مقادیر تبخیر-تعرق ماهانه نیشکر و ضریب گیاهی در همه تیمارها به‌ترتیب مربوط به دی‌ماه و تیرماه بود. مقایسه تیمارها نشان داد که از مهرماه تا اسفندماه تفاوت چندانی در تبخیر-تعرق گیاه و ضرایب گیاهی بین تیمارهای مختلف وجود نداشت. بر اساس نتایج این پژوهش، تبخیر-تعرق گیاه نیشکر رقم CP57-614 در طول دوره رشد ۲۱۰۸ میلی‌متر بود که در شرایط استفاده از بیوچار و کمپوست تبخیر-تعرق به‌ترتیب به ۲۰۰۳/۵ و ۲۰۲۳ میلی‌متر کاهش یافت. نتایج نشان داد که در همه ماه‌های مورد بررسی (بجز چهار ماه ابتدایی پس از کشت یعنی مهرماه تا دی‌ماه)، تبخیر-تعرق در تیمارهای کاربرد کمپوست و بیوچار به‌طور معنی‌داری کم‌تر از تیمار شاهد بود. بدین ترتیب که در ماه‌های اسفند تا شهریور، تبخیر-تعرق در تیمار بیوچار به‌ترتیب ۱۰/۳، ۸/۷، ۵/۱، ۴/۸، ۶/۸، ۴/۷ و ۷/۰ درصد و در تیمار کمپوست به‌ترتیب ۶/۴، ۱۱/۱، ۷/۱، ۳/۲، ۵/۳، ۳/۹ و ۵/۳ درصد کم‌تر از تیمار شاهد بود و تفاوت آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار شد (شکل‌های ۳ و ۴). همچنین تبخیر-تعرق نیشکر در تیمار کاربرد بیوچار در ماه‌های اسفند، خرداد و تیر به‌طور معنی‌داری کم‌تر از تیمار کاربرد کمپوست بود (شکل ۳). به‌طور میانگین (میانگین ماه‌های مختلف) در دوره زمانی آذرماه تا شهریورماه، کاربرد تیمارهای بیوچار و کمپوست، تبخیر-تعرق نیشکر رقم CP57-614 را در مقایسه با تیمار شاهد به‌ترتیب ۶/۶ و ۵/۷ درصد کاهش داد.

جدول ۴. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارها بر تبخیر-تعرق واقعی نیشکر رقم CP57-614 در ماه‌های مختلف در طول دوره رشد

Table 4. Analysis of variance of the effect of treatments on actual crop evapotranspiration of sugarcane CP57-614 cultivar in different months during the growing period

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares											
		مهر (Oct)	آبان (Nov)	آذر (Des)	دی (Jan)	بهمن (Feb)	اسفند (Mar)	فروردین (Apr)	اردیبهشت (May)	خرداد (Jun)	تیر (Jul)	مرداد (Aug)	شهریور (Sep)
تیمار Treatment	2	3.68^{ns}	65.1**	1.96*	0.73^{ns}	6.19**	23.3*	129.4**	142.8**	174.3**	816.1**	288.2**	290.6**
خطا Error	6	2.82	1.16	0.31	0.32	0.17	0.45	2.35	3.29	3.66	4.57	8.12	4.57
ضریب تغییرات CV (%)		2.49	3.78	4.64	3.58	2.29	1.95	3.26	2.12	1.62	2.72	2.08	3.13

ns، * و ** به‌ترتیب بیانگر نبود اثر معنی‌دار و آثار معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

ns, * and ** denote non-significantt effect, and significant effects at the 5 and 1% probability levels, respectively.

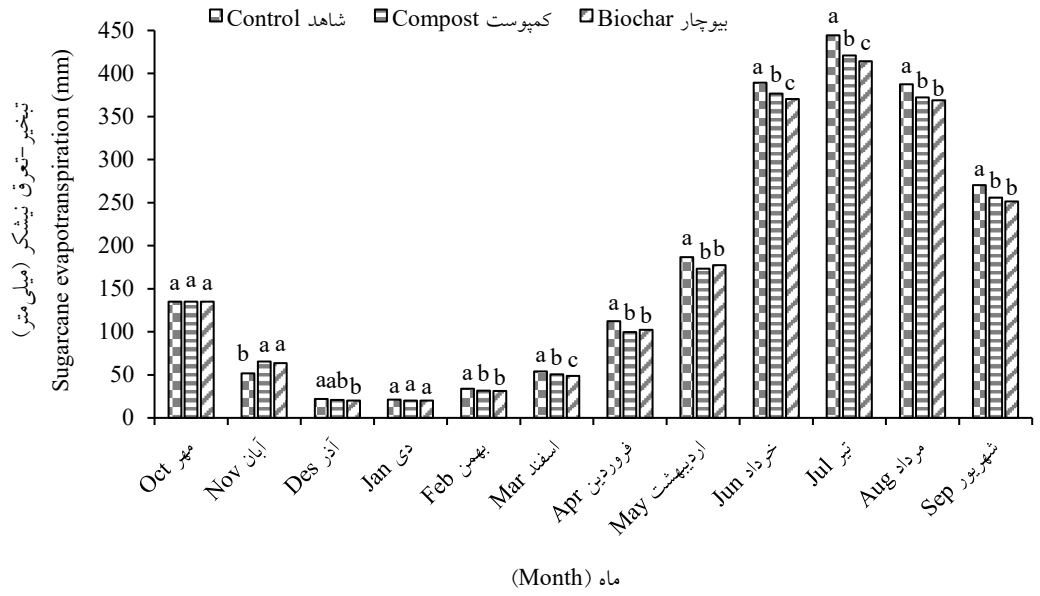
جدول ۵. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارها بر ضریب گیاهی نیشکر در ماه‌های مختلف در طول دوره رشد

Table 5. Analysis of variance of the effect of treatments on crop coefficient (Kc) CP57-614 cultivar in different months during the growing period

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares											
		مهر (Oct)	آبان (Nov)	آذر (Des)	دی (Jan)	بهمن (Feb)	اسفند (Mar)	فروردین (Apr)	اردیبهشت (May)	خرداد (Jun)	تیر (Jul)	مرداد (Aug)	شهریور (Sep)
تیمار Treatment	2	0.00001^{ns}	0.00002^{ns}	0.0008*	0.0004*	0.0018**	0.0050**	0.0071**	0.0041**	0.046**	0.0077**	0.0036**	0.0059**
خطا Error	6	0.00001	0.00008	0.0001	0.00004	0.00002	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001	0.0007	0.0006	0.0005
ضریب تغییرات CV (%)		2.36	4.12	3.62	3.37	1.75	1.94	3.08	2.48	2.54	2.68	2.34	2.34

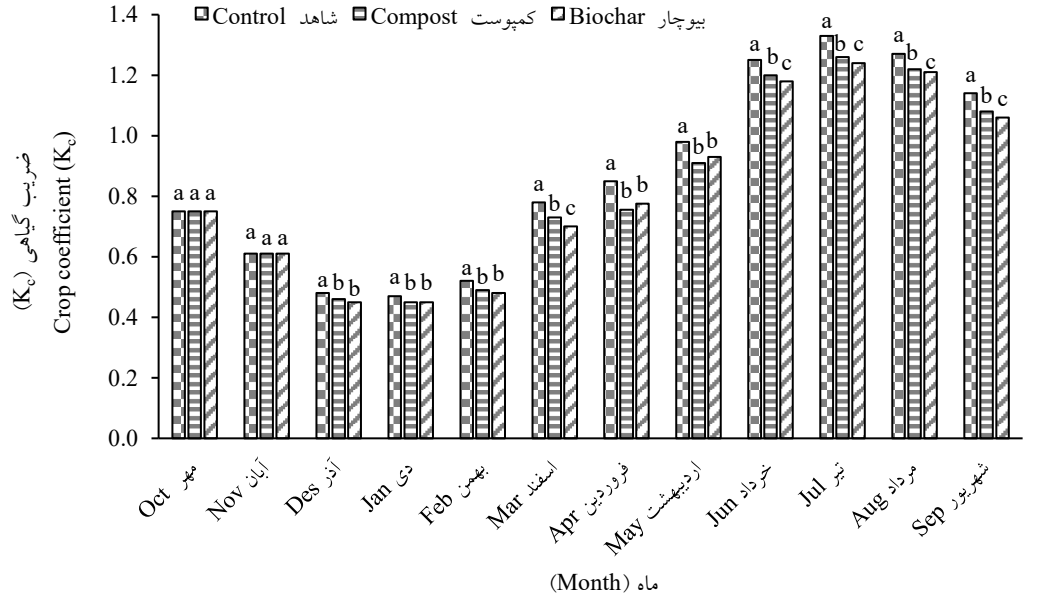
ns، * و ** به‌ترتیب بیانگر نبود اثر معنی‌دار، و آثار معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

ns, * and ** denote non-significantt effect, and significant effects at the 5 and 1% probability levels, respectively.



شکل ۳. تبخیر-تعرق نیشکر رقم CP57-614 در ماه‌های مختلف در طول دوره رشد (مهر ۱۴۰۲ تا شهریور ۱۴۰۳).میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری ($p < 0.05$) ندارند.

Fig. 3. Evapotranspiration of sugarcane CP57-614 cultivar in different months during the growing period (October 2023 to September 2024).Means with similar letters are not significantly different according to the LSD's test ($p < 0.05$).



شکل ۴. ضریب گیاهی (K_c) نیشکر رقم CP57-614 در ماه‌های مختلف در طول دوره رشد (مهر ۱۴۰۲ تا شهریور ۱۴۰۳).میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری ($p < 0.05$) ندارند.

Fig. 4. Crop coefficient (K_c) of sugarcane CP57-614 cultivar in different months during the growing period (October 2023 to September 2024).Means with similar letters are not significantly different according to the LSD's test ($p < 0.05$)

.

کاهش تبخیر-تعرق در اثر کاربرد تیمارهای آلی به‌ویژه بیوچار می‌تواند به‌دلیل تأثیر بیوچار در کاهش تبخیر از سطح خاک و به‌دنبال آن کاهش تبخیر-تعرق گیاه باشد. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داد که کاربرد بیوچار در خاک به‌دلیل تخلخل و سطح ویژه زیاد و حضور ترکیبات آب‌دوست، سبب افزایش تخلخل و نگه‌داشت آب خاک (Gao et al., 2020; Acharya et al., 2024) و کاهش تبخیر از سطح خاک و کاهش کلی تبخیر - تعرق (نیاز آبی) گیاه می‌شود (Wang et al., 2018; Xiao et al., 2024). بنابراین یکی از دلایل کاهش ضرایب گیاهی و تبخیر-تعرق نیشکر در تیمارهای بیوچار و کمپوست، می‌تواند بهبود نگه‌داشت آب در خاک و افزایش فراهمی آب برای گیاه و کاهش تبخیر از سطح خاک باشد. Alfadil et al. (2021) با انجام پژوهشی مزرعه‌ای گزارش کردند که کاربرد سطوح مختلف بیوچار سبب افزایش تخلخل کل خاک و افزایش آب قابل استفاده برای گیاه شد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که ورود بیوچار (با سطح ویژه زیاد) به درون منافذ ریز و درشت خاک، به‌عنوان یک لایه پوششی عمل نموده و سبب افزایش نگه‌داشت آب خاک و کاهش تبخیر از سطح خاک می‌شود.

یکی دیگر از دلایل کاهش تبخیر-تعرق در اثر کاربرد بیوچار رسانایی گرمایی کمتر بیوچار نسبت به ذرات خاک است که می‌تواند با کاهش رسانایی گرمایی خاک سبب شود که انتقال گرما به لایه‌های مرطوب عمقی خاک کاهش یابد و انرژی مؤثر برای تبخیر آب از خاک کم شود. همچنین تأثیر بیوچار بر کاهش چگالی ظاهری خاک، همراه با پخشیدگی گرمایی کم بیوچار نسبت به ذرات خاک، می‌تواند منجر به کاهش تبخیر از سطح خاک شود (Feng et al., 2023). یکی دیگر از سازوکارهای کاهش تبخیر در اثر کاربرد بیوچار، اختلال در پیوستگی مویینگی خاک و شکستن این پیوستگی است که در نتیجه آن انتقال آب از لایه‌های مرطوب زیرین به سطح خاک محدود شده و تبخیر از سطح خاک کاهش می‌یابد (Feng et al., 2023). همچنین به‌دلیل افزایش ماده آلی و بهبود پایداری خاکدانه‌های خاک، بیوچار و کمپوست تشکیل سله سطحی خاک را کاهش داده و بدین ترتیب سبب کاهش تبخیر از سطح خاک می‌شوند (Zhang et al., 2022). نتایج این پژوهش با یافته‌های Shaban et al. (2022) که گزارش کردند کاربرد بیوچار تهیه‌شده از کاه و کلش گندم در خاک، تبخیر-تعرق گندم را به‌طور معنی‌داری کاهش داد، همخوانی داشت. به‌طور مشابه Moslemli et al. (2024) گزارش کردند کاربرد بیوچار تهیه‌شده از بقایای چوبی درخت آلو، سبب کاهش معنی‌دار تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی در گیاه گشنیز شد.

عملکرد کمّی و کیفی نیشکر

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمار کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی بر عملکرد نیشکر (عملکرد ساقه) و عملکرد شکر معنی‌دار بود (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد در اثر کاربرد هر دو تیمار کمپوست و بیوچار، عملکرد نیشکر در مقایسه با تیمار شاهد، به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۵). به‌طوری‌که در تیمارهای کاربرد بیوچار و کمپوست، عملکرد نیشکر به‌ترتیب ۱۹/۳ و ۱۲/۳ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود. اگرچه عملکرد نیشکر در تیمار کاربرد بیوچار بیشتر از تیمار کاربرد کمپوست بود، اما تفاوت آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۵). نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که عملکرد شکر در تیمار کاربرد بیوچار به‌طور معنی‌داری بیشتر (۲۱/۴ درصد) از تیمار شاهد بود (شکل ۵). درحالی‌که تفاوت معنی‌داری بین مقادیر عملکرد شکر در تیمارهای شاهد و کمپوست وجود نداشت. همچنین تفاوت معنی‌داری بین مقادیر عملکرد شکر در دو تیمار بیوچار و کمپوست مشاهده نشد.

کاربرد بیوچار و کمپوست، می‌تواند با بهبود ویژگی‌های فیزیکی (از جمله چگالی ظاهری، تخلخل و پایداری ساختمان) و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک سبب بهبود فراهمی آب برای گیاه شود (Ghorbani et al., 2023; Acharya et al., 2024)؛ بنابراین یکی از دلایل احتمالی افزایش عملکرد نیشکر در این تیمارها و به‌دنبال آن بهبود عملکرد نیشکر، می‌تواند بهبود ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک باشد. از دیگر دلایل افزایش عملکرد نیشکر در اثر کاربرد بیوچار و کمپوست، می‌توان

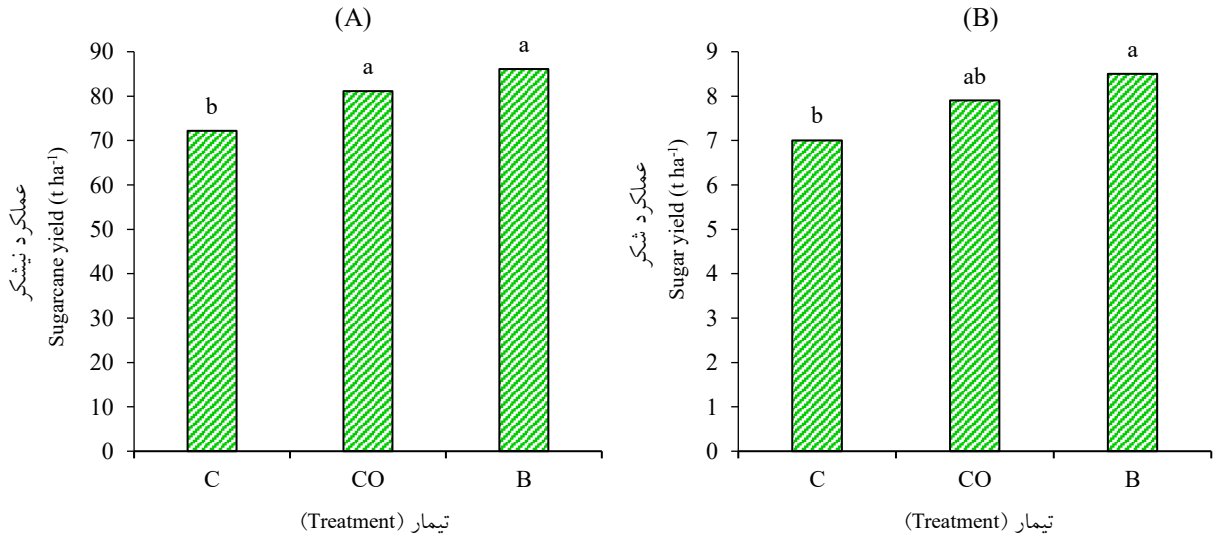
جدول ۶. تجزیه واریانس تأثیر تیمارها بر عملکرد نیشکر، عملکرد شکر، بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب در تولید نیشکر و شکر

Table 6. Analysis of variance of the effect of treatments on sugarcane yield, sugar yield, water productivity and irrigation water productivity in sugarcane and sugar production

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares					
		عملکرد نیشکر Sugarcane yield	عملکرد شکر Sugar yield	بهره‌وری آب آبیاری در تولید نیشکر Irrigation water productivity in sugarcane production	بهره‌وری آب آبیاری در تولید شکر Irrigation water productivity in sugar production	بهره‌وری آب در تولید نیشکر Water productivity in sugarcane production	بهره‌وری آب در تولید شکر Water productivity in sugar production
تیمار Treatment	2	149.2**	1.64**	0.31**	0.003*	0.59**	0.006*
خطا Error	6	13.3	0.24	0.02	0.0003	0.03	0.0006
ضریب تغییرات CV (%)		8.61	9.82	4.55	3.09	4.16	9.82

* و ** به‌ترتیب بیانگر آثار معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

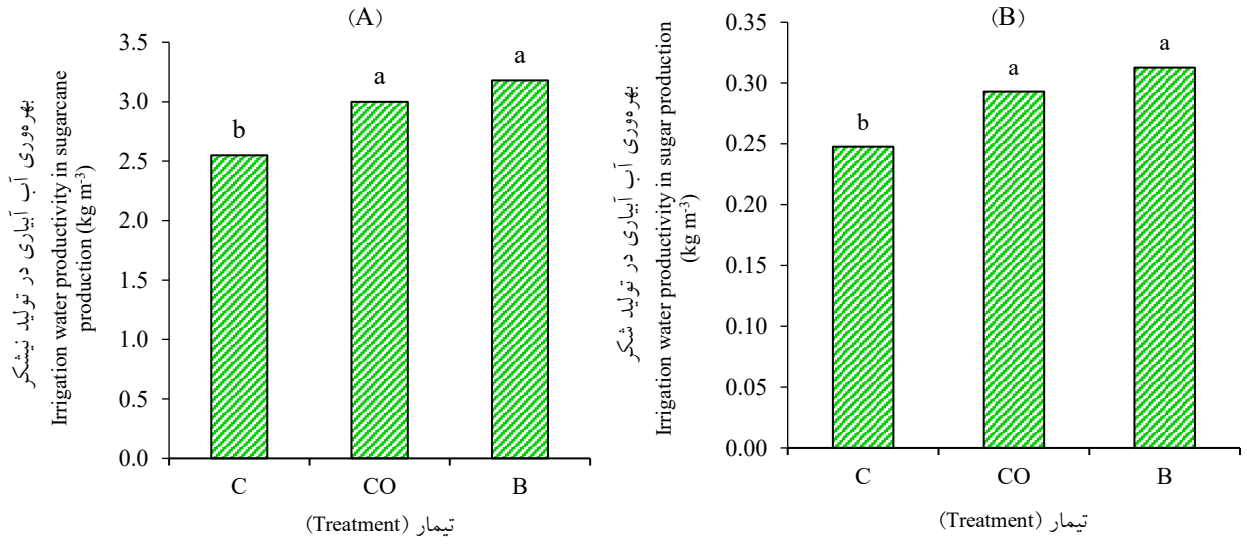
* and ** denote significant effects at the 5 and 1% probability levels, respectively.



شکل ۵. مقایسه میانگین عملکرد نیشکر (A) و عملکرد شکر (B) در تیمارهای مختلف. میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری ($p < 0.05$) ندارند. C، CO و B به‌ترتیب تیمارهای شاهد، کمپوست و بیوچار هستند.

Fig. 5. Mean comparison of sugarcane yield (A) and sugar yield (B) in different treatments. Means with similar letters are not significantly different according to the LSD's test ($p < 0.05$). C, CO and B are control, compost and biochar treatments, respectively.

به بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک از جمله کربن آلی و فعالیت میکروبی خاک، بهبود توسعه ریشه و جذب بهتر عناصر غذایی و به‌دنبال آن بهبود وضعیت تغذیه‌ای نیشکر در این تیمارها اشاره کرد (Matisic et al. 2024; Karimi et al., 2026).



شکل ۶. مقایسه میانگین بهره‌وری آب آبیاری (IWP) در تولید نیشکر (A) و شکر (B) در تیمارهای مختلف. میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری ($p < 0.05$) ندارند. C، CO و B به‌ترتیب تیمارهای شاهد، کمپوست و بیوچار هستند.

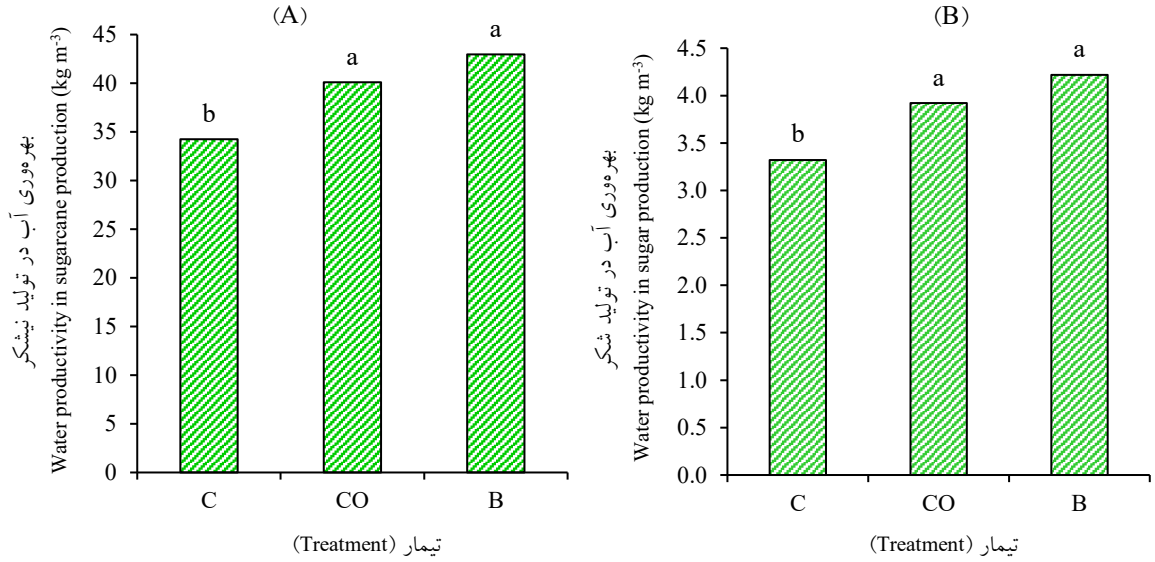
Fig. 6. Mean comparison of irrigation water productivity (IWP) in sugarcane (A) and sugar (B) production in different treatments. Means with similar letters are not significantly different according to the LSD's test ($p < 0.05$). C, CO and B are control, compost and biochar treatments, respectively.

Alvarez-Campos et al. (2018)، نیز تأثیر کاربرد بیوچارهای تهیه‌شده از زیست‌توده‌های مختلف (در دماهای ۳۵۰ و ۴۰۰ درجه‌سلسیوس) بر عملکرد نیشکر (واریته CP00-1446) را در فلوریدا بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که عملکرد نیشکر در اثر کاربرد تیمارهای مختلف بیوچار به‌طور معنی‌داری افزایش یافت.

بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای کاربرد بیوچار و کمپوست بر بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب در تولید نیشکر و شکر معنی‌دار بود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد تیمارهای بیوچار و کمپوست، بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب در تولید نیشکر و شکر را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. در تیمارهای بیوچار و کمپوست، بهره‌وری آب آبیاری در تولید نیشکر به‌ترتیب ۲۴/۷ و ۱۷/۶ درصد و بهره‌وری آب آبیاری در تولید شکر به‌ترتیب ۲۴/۰ و ۱۶/۰ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد بود (شکل ۶). همچنین در این دو تیمار نسبت به تیمار شاهد، بهره‌وری آب در تولید نیشکر به‌ترتیب ۲۵/۷ و ۱۷/۳ درصد و در تولید شکر ۲۷/۲ و ۱۸/۲ درصد بیش‌تر بود (شکل ۷). نتایج همچنین نشان داد در تیمار کاربرد بیوچار، بهره‌وری آب آبیاری در تولید نیشکر و شکر به‌ترتیب ۶/۰ و ۶/۹ درصد و بهره‌وری آب در تولید نیشکر و شکر به‌ترتیب ۷/۲ و ۷/۹ درصد بیش‌تر از تیمار کاربرد کمپوست بود، اگرچه تفاوت این دو تیمار از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل‌های ۶ و ۷). نتایج این پژوهش نشان‌دهنده تأثیر مثبت اصلاح‌کننده‌های آلی بیوچار و کمپوست، در افزایش بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب در تولید نیشکر و شکر بود. این نتیجه به‌دلیل افزایش عملکرد گیاه به‌دلایل احتمالی مختلف از جمله بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش توسعه ریشه گیاه و به‌دنبال آن بهبود تغذیه نیشکر و همچنین کاهش تبخیر-تعرق نیشکر (شکل ۳) در این تیمارها بود.

تأثیر مثبت بیوچار و کمپوست در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، افزایش گنجایش نگهداشت آب خاک و کاهش تبخیر از خاک، توسط برخی از پژوهشگران پیشین نیز گزارش شده است

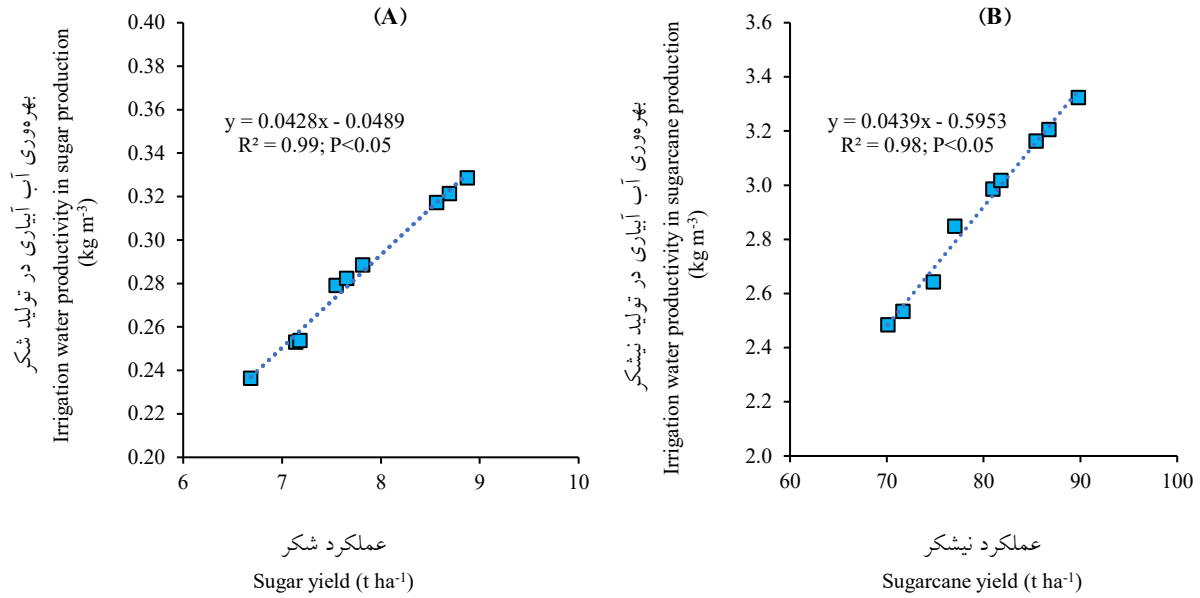


شکل ۷. مقایسه میانگین بهره‌وری آب (WP) در تولید نیشکر (A) و شکر (B) در تیمارهای مختلف. میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD تفاوت معنی‌داری ($p < 0.05$) ندارند. C، CO و B به‌ترتیب تیمارهای شاهد، کمپوست و بیوچار هستند.

Fig. 7. Mean comparison of water productivity (WP) in sugarcane (A) and sugar (B) production in different treatments. Means with similar letters are not significantly different according to the LSD's test ($p < 0.05$). C, CO and B are control, compost and biochar treatments, respectively.

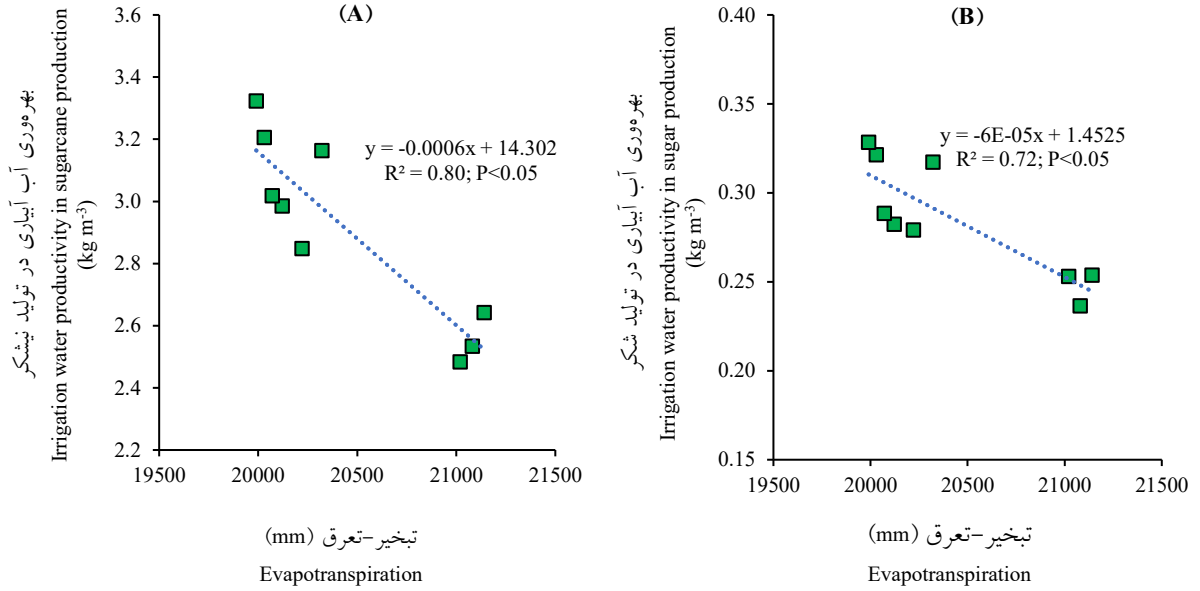
(Xiao et al., 2018). به‌طور مشابه، Faloye et al. (2019) نیز گزارش کردند که کاربرد بیوچار سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و بهره‌وری آب در ذرت شد. همچنین Wan et al. (2025) گزارش کردند کاربرد بیوچار کاه گندم و بقایای چوبی سبب افزایش معنی‌دار بهره‌وری آب در ذرت شد. Brown and Cotton (2011) گزارش کردند که کاربرد کمپوست تهیه‌شده از بقایای گیاهی در یک خاک لوم رسی، بهره‌وری آب را نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد تأثیر بیوچار در بهبود بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب بیشتر از کمپوست بود، اگرچه تفاوت آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبود. این نتیجه احتمالاً به‌دلیل سطح ویژه و تخلخل بیشتر بیوچار و کارایی بیشتر آن در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد گیاه، در مقایسه با کاربرد کمپوست باشد. Ghorbani et al. (2022) گزارش کردند که کاربرد بیوچار و کمپوست تهیه‌شده از کاه و کلش گندم در یک خاک رسی سبب افزایش معنی‌دار بهره‌وری آب در گندم شد. نتایج آن‌ها نیز نشان داد که تأثیر کاربرد بیوچار در بهبود بهره‌وری آب بیشتر از تأثیر کاربرد کمپوست بود. Abdou et al. (2024) با بررسی تأثیر کاربرد بیوچار تهیه‌شده از بقایای گیاهی و چوب درختان بر بهره‌وری آب در تولید چغندرقند گزارش کردند کاربرد بیوچار در سطح ۱۰ تن در هکتار با افزایش معنی‌دار عملکرد چغندرقند بهره‌وری آب در تولید چغندرقند و تولید شکر را به‌ترتیب ۴۵/۷ و ۵۷/۱ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد. بهبود بهره‌وری آب در گیاهان مختلف در اثر کاربرد بیوچار توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Durukan et al., 2020; Abdou et al., 2024; Wang et al., 2024).

نتایج پژوهش حاضر همچنین نشان داد سهم عملکرد در تغییرات بهره‌وری آب آبیاری بیشتر از تبخیر–تعرق بوده است. ضریب تبیین (R^2) بیشتر روابط خطی بین بهره‌وری آب آبیاری در تولید نیشکر و شکر با عملکرد نیشکر و شکر (شکل ۸) در مقایسه با روابط بین بهره‌وری آب آبیاری در تولید نیشکر و شکر و تبخیر–تعرق (شکل ۹) تأییدکننده این نتایج است.



شکل ۸. رگرسیون خطی بین بهره‌وری آب آبیاری (IWP) و عملکرد گیاه در تولید نیشکر (A) و شکر (B).

Fig. 8. Linear regression between irrigation water productivity (IWP) and crop yield in sugarcane (A) and sugar production (B).



شکل ۹. رگرسیون خطی بین بهره‌وری آب آبیاری (IWP) در تولید نیشکر (A) و شکر (B) و تبخیر–تعرق.

Fig. 9. Linear regression between irrigation water productivity (IWP) in sugarcane (A) and sugar (B) production and evapotranspiration.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان‌دهنده تأثیر مثبت کاربرد کمپوست و بیوچار بقایای نیشکر در افزایش عملکرد کمّی و کیفی نیشکر و همچنین کاهش تبخیر–تعرق نیشکر رقم CP57-614، به‌ویژه در دوره رشد سریع نیشکر (تیر تا شهریورماه)، و افزایش بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب در تولید نیشکر و شکر بود. مقایسه تأثیر دو اصلاح‌کننده بیوچار و کمپوست بر بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب در نیشکر رقم CP57-614 نشان‌دهنده تأثیر

بیش‌تر کاربرد بیوچار در بهبود عملکرد نیشکر، بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب در تولید نیشکر و شکر در مقایسه با کاربرد کمپوست بود. بر اساس این نتایج می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاربرد کمپوست و بیوچار می‌تواند در کاهش تبخیر–تعرق نیشکر مؤثر باشد. بنابراین با توجه به کاهش منابع آب در سال‌های اخیر و همچنین تولید سالانه مقدار بسیار زیادی بقایای نیشکر در کشت و صنعت‌های نیشکر استان خوزستان، فرآوری این بقایای گیاهی و تولید بیوچار و کمپوست آن‌ها اهمیت می‌یابد. کاربرد این اصلاح‌کننده‌ها در مزارع نیشکر رقم CP57-614، می‌تواند به‌عنوان یکی از راهکارهای بهبود وضعیت رطوبتی خاک، کاهش مصرف آب در آبیاری مزارع نیشکر و بهبود بهره‌وری آب مورد توجه قرار گیرد.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان برای حمایت مالی و مساعدت در مراحل مختلف اجرای این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

References

1. Abdou, N.M., EL-Samnoudi, I.M., Ibrahim, A.E.A.M. and EL-Tawwab, A.R.A., 2024. Biochar amendment alleviates the combined effects of salinity and drought stress on water productivity, yield and quality traits of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). J. Soil Sci. Plant Nutr. 24(2), 2091–2110. https://doi.org/10.1007/s42729-024-01754-5.
2. Acharya, B.S., Dodla, S., Wang, J.J., Pavuluri, K., Darapuneni, M., Dattamudi, S., Maharjan, B. Kharel, G., 2024. Biochar impacts on soil water dynamics: knowns, unknowns, and research directions. Biochar 6(1), 34. https://doi.org/10.1007/s42773-024-00323-4.
3. Alfadil, A.A., Shaghaleh, H., Alhaj Hamoud, Y., Xia, J., Wu, T., Hamad, A.A.A., Wang, Y., Oumarou Abdoulaye, A., Sheteiwy, M.S., 2021. Straw biochar-induced modification of the soil physical properties enhances growth, yield and water productivity of maize under deficit irrigation. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 1–17. https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1901913.
4. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome.
5. Antunes Junior, E.D.J., Alves Júnior, J., Evangelista, A.W.P., Casaroli, D., Battisti, R., Sena, C.C., 2021. Water demand of sugarcane varieties obtained by lysimetry. Sugar Tech. 23(5), 1010–1017. https://doi.org/10.1007/s12355-021-01002-5.
6. Alvarez-Campos, O., Lang, T.A., Bhadha, J. H., McCray, J.M., Glaz, B., Daroub, S.H., 2018. Biochar and mill ash improve yields of sugarcane on a sand soil in Florida. Agric. Ecosyst. Environ. 253, 122–130. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.006.
7. Brown, S., Cotton, M., 2011. Changes in soil properties and carbon content following compost application: Results of on-farm sampling. Compost Sci. Util. 19(2), 87–96. https://doi.org/10.1080/1065657X.2011.10736983.
8. Danielson, R.E., Sutherland, P.L., 1986. Porosity. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods. Agronomy Monograph vol. 9. ASA/SSSA, Madison, WI. pp. 443–461. https://doi.org/10.1007/BF02869702.
9. Dayoub, E.B., Tóth, Z., Anda, A., 2024. A preliminary observation in evaluating maize evapotranspiration and plant features under meteorological variables and biochar effect. Arch. Agron. Soil Sci. 70(1), 1–18. https://doi.org/10.1080/03650340.2024.2398039.
10. Dingre, S.K., Gorantiwar, S.D., 2020. Determination of the water requirement and crop coefficient values of sugarcane by field water balance method in semiarid region. Agric. Water Manag. 232, 106042. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106042.
11. Durukan, H., Demirbas, A., Turkekul, I., 2020. Effects of biochar rates on yield and nutrient uptake of sugar beet plants grown under drought stress. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 51(21), 2735–2745. https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1849257.
12. 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. Agric. Water Manag. 217, 165–178. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.044.
13. Feng, W., Wang, T., Yang, F., Cen, R., Liao, H., Qu, Z., 2023. Effects of biochar on soil evaporation and moisture content and the associated mechanisms. Environ. Sci. Eur. 35(1), 66. https://doi.org/10.1186/s12302-023-00776-7.
14. Gao, Y., Shao, G., Lu, J., Zhang, K., Wu, S., Wang, Z., 2020. Effects of biochar application on crop water use efficiency depend on experimental conditions: A meta-analysis. Field Crops Res. 249, 107763. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107763.
15. Ghorbani, M., Neugschwandtner, R.W., Konvalina, P., Asadi, H., Kopecký, M., Amirahmadi, E., 2023. Comparative effects of biochar and compost applications on water holding capacity and crop yield of rice under evaporation stress: A two-years field study. Paddy Water Environ. 21(1), 47–58. https://doi.org/10.1007/s10333-022-00912-8.
16. Kandra, B., Tall, A., Gomboš, M., Pavelková, D., 2023. Quantification of evapotranspiration by calculations and measurements using a lysimeter. Water 15(2), 373. https://doi.org/10.3390/environments8050041.
17. Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., Enayatizamir, N., 2020. Application of biochar changed the status of nutrients and biological activity in a calcareous soil. J. Soil Sci. Plant Nutr. 20, 450–459. https://doi.org/10.1007/s42729-019-00129-5.
18. Karimi, A., Moezzi, A., Chorom, M., Enayatizamir, N., 2026. Impact of acidified biochar on soil fertility, growth and nutrient uptake of maize in calcareous soil. Discover Soil 3, 23. https://doi.org/10.1007/s44378-026-00183-3.
19. Karimi, A., Zakavi, N., Safirzadeh, S., Noroozi, H., Ariz, A., 2024a. Evaluation of sugarcane nutritional status by deviation from optimum percentage (DOP) method in Khuzestan province. Iran. J. Soil Water Res. 55(3), 449–466. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.371718.669657. (In Persian with English abstract)
20. Karimi, A., Zanganeh-Yusefabadi, E., Safirzadeh, S., 2024b. Comparison of availability and uptake of phosphorus and potassium in sugarcane under subsurface drip irrigation and furrow irrigation. Irrig. Sci. Eng. 47(3), 57–67. https://doi.org/10.22055/jise.2024.43784.2078. (In Persian with English abstract)
21. Kirkham, M.B., 2005. Field capacity, wilting point, available water, and the non-limiting water range. In: Principles of Soil Plant Water Relations. Elsevier Academic Press, Amsterdam, pp. 101–115.
22. Kroetsch, D., Wang, C., 2008. Particle Size Distribution. In: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), Soil Sampling and Methods of Analysis, Taylor and Francis Group, Boca Raton, pp. 713–725. https://doi.org/10.1201/9781420005271.
23. Lal, R., 2020. Soil organic matter and water retention. Agron J. 112(5), 3265–3277. https://doi.org/10.1002/agj2.20282.
24. Matendo, S.E., Dari, J., Flammini, A., Brocca, L., Sánchez-Calvo, R., 2026. AquaLeach approach: Field-scale irrigation assessment using satellite-derived products while accounting for salinity leaching fraction in arid and semi-arid irrigation schemes of Kenya. Agric. Water Manag. 328, 110290. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2026.110290.
25. Mokari, M., Ghaderi, A.H., Alaei, J., 2025. Determination of evapotranspiration and crop coefficient of camelina (*camelina sativa* L. crantz) under deficit irrigation with different salinity levels by using lysimeter in greenhouse. J. Soil Plant Interact. 15(4), 19–35. https://doi.org/10.47176/jspi.15.4.21371. (In Persian with English abstract)
26. Moslemli, E., Behmanesh, J., Verdinejad, V.R., 2024. Interaction effects of biochar and various irrigation levels on crop coefficient at different growth stages in the greenhouse-grown coriander. Hydraul. Water Sci. 35(1), 25–37. https://doi.org/10.22034/hws.2025.65532.1008. (In Persian with English abstract)
27. Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., Sumner, M.E. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods, ASA/SSSA, Madison, WI. pp. 961–1010. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34.
28. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, E.S., Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture Circular 939, 1–18.
29. Rayment, G.E., Higginson, F.R., 1992. Australian Laboratory Handbook of Soil and Water Chemical Methods. Inkata Press: Melbourne. https://doi/abs/10.5555/19921973446.
30. Reyes-Cabrera, J., Leon, R.G., Erickson, J.E., Rowland, D.L., Silveira, M.L., Morgan, K.T., 2017. Differences in biomass and water dynamics between a cotton-peanut rotation and a sweet sorghum bioenergy crop with and without biochar and vinasse as soil amendments. Field Crops Res. 214, 123–130. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.012.
31. Rhoades, J.D., 1996. Salinity: Electerical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., Sumner, M.E. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods, ASA/SSSA, Madison, WI. pp. https://doi.org/abs/10.2136/sssabookser5.3.c14.
32. Safirzadeh, S., Chorom, M., Enayatizamir, N., 2021. Speciation and fractionation of phosphorus affected by *Enterobacter cloacae* in the rhizosphere of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). J. Soil Sci. Plant Nutr. 21, 187–199. https://doi.org/10.1007/s42729-020-00352-5.
33. Shaban, M.R., Razzaghi, F., Sepaskhah, A.R., 2022. Interaction effects of biochar levels, irrigation regimes, and irrigation water salinity levels on wheat: I: Physiological parameters, evapotranspiration, and yield. Iran. Agric. Res.

41(1), 9–17. https://doi.org/10.22099/iar.2022.42728.1478.
34. Singh, B., Camps-Arbestain, M., Lehmann, J., 2017. Biochar: A Guide to Analytical Methods. CSIRO Publishing, Clayton, VIC, Australia.
35. Vu, N.T., Bui, T.K., Vu, T.T.H., Nguyen, T. H., Le, T.T.C., Tran, A.T., Tong, V.G., Nguyen, X.T., Hwi-Chan Yang, H.C., Lee S.J., Kim, Y.H., Bae, Y.H., Hyeon, S.J., Thai-Hoang Dinh T.H., Jang, D.C., 2023. Biochar improved sugarcane growth and physiology under salinity stress. Appl. Sci. 13(13), 7708. https://doi.org/10.3390/app13137708.
36. Wan, H., Wei, Z., Liu, C., Yang, X., Wang, Y., Liu, F., 2025. Biochar amendment modulates xylem ionic constituents and ABA signaling: its implications in enhancing water-use efficiency of maize (*Zea mays* L.) under reduced irrigation regimes. J. Integr. Agric. 24(1), 132–146. https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.03.073.
37. Wang, T., Stewart, C.E., Sun, C., Wang, Y., Zheng, J., 2018. Effects of biochar addition on evaporation in the five typical Loess Plateau soils. Catena 162, 29–39. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.013.
38. Wang, X., Su, X., Wang, L., Li, S., Chang, M., Li, Y., Guan, Y., Wu, Q., Zhang W., 2024. Effect of a six-year biochar amendment on water productivity and nitrogen utilization of maize and comprehensive soil fertility. J. Soil Sci. Plant Nutr. 24, 5661–5679. https://doi.org/10.1007/s42729-024-01932-5.
39. Xiao, L., Lin, Y., Chen, D., Zhao, K., Wang, Y., You, Z., Zhao, R., Xie, Z., Liu, J., 2024. Maximizing crop yield and water productivity through biochar application: A global synthesis of field experiments. Agric. Water Manag. 305, 109134. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109134.
40. Zanganeh-Yusefabadi, E., Karimi, A., Sheini-Dashtegol, A., Naseri, A., Zarei, S., 2024. Changes in soil salinity and sodicity under subsurface drip irrigation and furrow irrigation of sugarcane. Irrig. Drain. Struct. Eng. Res. 24(93), 59–43. https://doi.org/10.22092/idser.2024.365371.1577. (In Persian with English abstract)
41. Zhang, D., Lv, Q., Xu, X., Li, B., Sun, M., 2022. Effect of corn stalk biochar on the evolution of water evaporation and cracking of soil. Geofluids 2022(1), 5703377. https://doi.org/10.1155/2022/5703377.