

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

Elham Zanganeh-Yusefabadi^{ID}, Akbar Karimi^{ID}, 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

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, 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 crop coefficients during different months compared with the control treatment. On average, biochar and compost reduced the crop coefficient of sugarcane var. CP57-614 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: Crop coefficient, Evapotranspiration, Organic amendment, Soil moisture Sugarcane residues.

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

الهام زنگنه یوسف‌آبادی^{۱*} ID، اکبر کریمی^۲ ID، علی شینی دشتگل^۱ و شعبان زارعی^۳

- 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

چکیده

مقدمه 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. روش: 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 و تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از گیاه چمن محاسبه گردید و ضریب گیاهی در ماه‌های مختلف تعیین شد. **نتایج:** نتایج نشان داد کاربرد بیوچار و کمپوست موجب کاهش ضریب گیاهی در ماه‌های مختلف سال در مقایسه با تیمار شاهد شد. کاربرد تیمارهای بیوچار و کمپوست ضریب گیاهی نیشکر رقم CP57-614 را در مقایسه با تیمار شاهد به‌طور میانگین به‌ترتیب ۷/۲ و ۶/۶ درصد کاهش داد. نتایج همچنین 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:** 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، بیلان آبی، تبخیر-تعرق، رطوبت خاک، ضریب گیاهی.

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 رطوبت، بین دوره‌های مورد محاسبه، مقدار آب آبیاری و مقدار آب زهکشی تعیین می‌شود. روش لایسیمتری معمولاً به دلیل دقت زیاد، به عنوان یک روش پایه و مبنای بررسی اعتبار سایر روش‌های برآورد تبخیر-تعرق است (Antunes Junior et al., 2021). جهت برآورد دقیق مقدار تبخیر-تعرق گیاه، لازم است ابتدا تبخیر-تعرق گیاه مرجع به روش‌های مستقیم یا به کمک داده‌های هواشناسی توسط روابط تجربی و مدل‌های کامپیوتری محاسبه شده و سپس با تعیین ضریب گیاهی (Kc)، بر مبنای مراحل رشد، مقدار دقیق تبخیر-تعرق گیاه برای یک سیستم آبیاری تعیین گردد. بنابراین تعیین ضریب گیاهی (Kc)، 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 خاک از نظر افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت، جهت مدیریت بهینه آب صورت گرفته است (Ghorbani et al., 2023). از جمله روش‌های مدیریتی مصرف بهینه آب در مزرعه، می‌توان به بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و افزایش نگهداشت آب در خاک با استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک از جمله کمپوست و بیوپچار بقایای گیاهی اشاره کرد (Lal, 2020; Ghorbani et al., 2023). بیوپچار یک ماده متخلخل و غنی از کربن است که از تجزیه حرارتی زیست‌توده‌های مختلف در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن حداقل تهیه می‌شود. به این فرآیند پیرولیز یا گرماکافت گفته می‌شود (Sing et al., 2025). نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که کاربرد بیوپچار به دلیل داشتن سطح ویژه زیاد

و ساختار متخلخل، سبب بهبود ساختمان خاک و افزایش نگهداشت آب در 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 بیوپچار بر تبخیر-تعرق، عملکرد گیاه و بهره‌وری آب به عوامل مختلفی از جمله نوع و ویژگی‌های بیوپچار، مقدار کاربرد آن و همچنین ویژگی‌های خاک بستگی دارد (Xiao et al., 2024). نتایج بررسی (Xiao et al., 2024) نشان داد کاربرد بیوپچار در خاک‌های دارای درصد زیاد رس (بیش‌تر از ۳۵ درصد) بیش‌ترین تأثیر را در افزایش عملکرد گیاه و کاهش تبخیر-تعرق دارد. (Vu et al., 2023) با بررسی تأثیر کاربرد سطوح مختلف بیوپچار (۵ و ۱۰ تن در هکتار) تهیه شده از چوب بلوط، بر عملکرد نیشکر گزارش کردند کاربرد بیوپچار در سطح ۱۰ تن در هکتار سبب افزایش معنی‌دار (۱۹/۹ درصد) عملکرد ساقه نیشکر شد. در پژوهشی (Feng et al., 2023) اثرات کاربرد بیوپچار کاه ذرت بر تبخیر سطحی خاک و محتوای رطوبت خاک را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد کاربرد بیوپچار در سطح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تن در هکتار، تبخیر تجمعی از سطح خاک را به ترتیب ۹/۶، ۶/۳ و ۱۰/۹ درصد کاهش داد. (Reyes-Cabrera et al., 2017) با بررسی تأثیر کاربرد بیوپچار تهیه شده از بقایای چوبی بر تبخیر-تعرق گیاه سویا در شرایط لایسیمتری گزارش کردند کاربرد بیوپچار در سطح ۱۰ تن در هکتار سبب کاهش معنی‌دار تبخیر-تعرق (۱۱/۱ درصد) این گیاه شد. آن‌ها همچنین گزارش کردند کاربرد بیوپچار سبب افزایش معنی‌دار بهره‌وری آب (۱۵/۴ درصد) در ذرت شد. نتایج پژوهش (Shaban et al., 2022) نیز نشان داد کاربرد بیوپچار تهیه شده از کاه و کلش گندم در 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 (Karimi et al., 2021; Safirzadeh et al., 2024a)، فرآوری بقایای نیشکر و تولید اصلاح‌کننده‌های آلی بیوپچار 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

شده است. کارگذاری زهکش‌های لوله‌ای در عمق‌های ۱/۵ و ۲ متری، صورت گرفته است (شکل ۱). میانگین آمار هواشناسی محل اجرای پژوهش، بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی سیل‌پتیک کشت و صنعت امیرکبیر، در جدول ۱ ارائه شده است.

تهیه بیوجار و کمپوست و اندازه‌گیری ویژگی‌های آن‌ها

در این پژوهش از زیست‌توده بقایای برداشت سبز نیشکر تهیه شده از کشت و صنعت امام خمینی (ره) خوزستان برای تهیه بیوجار استفاده شد. بقایای برداشت سبز تهیه شده ابتدا هوا خشک و سپس در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شدند (Singh *et al.*, 2017). فرآیند پیرولیز در کوره الکتریکی دو دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس با افزایش ۵ درجه سلسیوس در دقیقه به مدت 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 بیوجار و کمپوست اندازه‌گیری شد (Singh *et al.*, 2017) که نتایج آن در جدول ۲ آمده است.

نمونه‌برداری خاک و اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی آن

نمونه‌برداری از خاک لایسیمترها قبل از کشت از عمق ۰ تا ۳۰

خاک‌های با ماده آلی کم مزارع نیشکر (Karimi *et al.*, 2024a)، به‌منظور مدیریت منابع آب و خاک، حائز اهمیت است. از آنجایی‌که تاکنون مطالعات 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 این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر کاربرد بیوجار و کمپوست بر تبخیر-تعرق و ضرایب گیاهی نیشکر رقم CP57- در 614 ماه‌های مختلف سال و همچنین عملکرد و بهره‌وری آب انجام شد.

مواد و روش‌ها

محل 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 می‌باشند. مساحت کلی لایسیمترها ۱۲۰ مترمربع می‌باشد که از ۱۰ لایسیمتر هر کدام با ابعاد ۶×۲ متر با کف شیب‌دار و عمق حدود ۲/۵ متر تشکیل

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-September 2024)

بارش (mm)	حداکثر رطوبت نسبی (درصد)	حداقل رطوبت نسبی (درصد)	حداکثر دما (درجه سلسیوس)	حداقل دما (درجه سلسیوس)	ماه Month
Precipitation (mm)	Maximum humidity (%)	Minimum humidity (%)	Maximum temperature (°C)	Minimum temperature (°C)	
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 بیوجار و کمپوست مورد استفاده در این پژوهش

Table 2. Selected 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	بیوجار Biochar
2.34	1.08	1.12	26.2	14.7	0.82	3.38	6.82	کمپوست Compost

EC: هدایت الکتریکی؛ BD: جرم ویژه ظاهری؛ SA: سطح ویژه؛ C: کربن؛ N: نیتروژن؛ P_{ava}: فسفر کل؛ K_{ava}: پتاسیم کل

غلظت فسفر قابل دسترس به روش عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم نیم مولار (Olsen et al., 1954)، چگالی ظاهری به روش استوانه‌های نمونه‌برداری (Danielson and Sutherland, 1986) اندازه‌گیری شد. همچنین رطوبت حجمی ظرفیت مزرعه‌ای (FC) در مکش ۳۳/۰ بار و رطوبت حجمی نقطه پژمردگی دایم (PWP) در مکش ۱۵ بار، با استفاده از دستگاه صفحات فشاری تعیین شد (Kirkham, 2005). نتایج آنالیز ویژگی‌های خاک مورد مطالعه در

ساعتی متری انجام شد. نمونه خاک جمع‌آوری شده و پس از انتقال به آزمایشگاه از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. pH و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک (Rhoades, 1996)، بافت خاک به روش هیدرومتری (Kroetsch and Wang, 2008)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با اسید کلریدریک یک نرمال (Rayment and Higginson, 1992)، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Nelson and Sommers, 1996)،

جدول ۳. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

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

Soil texture	Clay	Silt	Sand	OC	BD	Θ_{vpp}	Θ_{vfc}	Pava	CCE	pH	ECe	ویژگی Property
-	%	%	%	%	g cm ⁻³	cm cm ⁻³	cm 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

ECe: هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع؛ CCE: کربنات کلسیم معادل؛ Pava: فسفر قابل دسترس؛ Θ_v : رطوبت حجمی؛ OC: کربن آلی؛ BD: چگالی ظاهری

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. مقدار آب مورد نیاز هر تیمار با اندازه‌گیری رطوبت خاک در هر لایسیمتر با استفاده از دستگاه TDR350 ساخت شرکت Spectrum، کمبود رطوبتی خاک نسبت به وضعیت ظرفیت مزرعه‌ای تعیین و با در نظر گرفتن عمق ریشه حجم (معادل ۶۰ سانتی‌متر) (Safirzadeh et al., 2021) آب مورد نیاز هر لایسیمتر محاسبه شد. بر اساس همین 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 شده‌اند، به خارج هدایت و در ظروف ۶۰ لیتری که در محل خروجی قرار داده شده بود، جمع‌آوری شد. مقدار تجمعی آب زهکشی شده در فاصله زمانی پس از آبیاری قبلی و قبل از آبیاری بعدی، اندازه‌گیری و ثبت گردید. جهت محاسبه تغییرات رطوبتی خاک در هر لایسیمتر، 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).

جدول ۳ آورده شده است. خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم رسی، pH قلیایی، غیر شور، 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 اصلاح‌کننده‌ها)، ۲- کاربرد کمپوست بقایای نیشکر در سطح ۳۰ تن در هکتار و ۳- کاربرد بیوجار بقایای نیشکر (B) در سطح ۱۰ تن در هکتار و در سه تکرار انجام شد. در این پژوهش به منظور تعیین تبخیر-تعرق ماهانه گیاه مرجع (ET_0)، در یک لایسیمتر گیاه مرجع چمن (*Cynodon dactylon* L.)، کشت شد. همچنین به منظور تعیین تبخیر-تعرق ماهانه گیاه نیشکر (ET_c)، در ۹ لایسی‌متر دیگر، کشت نیشکر (*Saccharum Officinarum*) رقم CP57-614 طبق روش مرسوم منطقه، انجام شد. با توجه به ابعاد هر لایسیمتر، سه ردیف جوی و پشت به طول ۲ متر و فاصله حدود ۱/۸۳ متر ایجاد شد. مقدار هر یک از اصلاح‌کننده‌ها با توجه به سطح لایسی‌متر وزن شد و به صورت دستی در کف جویچه توزیع شدند و با خاک تا عمق حدود ۳۰ سانتی‌متری مخلوط شدند. سپس قلمه‌های ۵۰ سانتی‌متری نیشکر به صورت 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., 2024). کود فسفر در زمان کشت به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع کود سوپرفسفات تریپل به خاک اضافه شد. کود

استحصال، عملکرد شکر (تن در هکتار) تعیین شد (de Oliveira et al., 2022). سپس جهت تعیین شاخص بهره‌وری آب آبیاری در تولید نیشکر و تولید شکر در تیمارهای مختلف، با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد (Alfadil et al., 2021):

$$IWP = \frac{Y}{I + R} \quad (3)$$

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 (۴)، محاسبه شد (Dayoub et al., 2024):

$$WP = \frac{Y}{ET_c} \quad (4)$$

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 نیشکر ($m^3\ ha^{-1}$) 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، روند افزایشی چشم‌گیری داشت. در حالی که از تیرماه تا مردادماه، تبخیر-تعرق گیاه مرجع تغییرات کم‌تری

$$ET = I + P - D - \Delta S = I + P - D - Drz \times (\theta_f - \theta_i) \quad (1)$$

در این رابطه ET : تبخیر-تعرق گیاه (میلی‌متر)، P : بارندگی (میلی‌متر)، I : مقدار آب آبیاری (میلی‌متر)، D : آب زهکشی شده (میلی‌متر)، ΔS : تغییرات ذخیره‌ای رطوبت خاک یا محتوای آب خاک (میلی‌متر) در ابتدا و انتهای هر ماه، Drz عمق حداکثر تراکم ریشه (عمق نمونه‌برداری) در نظر گرفته شد. θ_f رطوبت حجمی خاک در پایان هرماه (درصد) و θ_i رطوبت حجمی خاک در ابتدای هر ماه (درصد). جهت تعیین ΔS که اهمیت ویژه‌ای در معادله بیلان دارد، در آخرین روز هر ماه، نمونه‌برداری خاک انجام شد و رطوبت خاک تا عمق ۶۰ سانتی‌متری به روش وزنی اندازه‌گیری شد.

در هر نوبت آبیاری نیاز آبتجویی از رابطه (۲) محاسبه شد و به آب مورد نیاز اضافه گردید:

$$LR = \frac{EC_{iw}}{5EC_{dw} - EC_{iw}} \quad (2)$$

در این رابطه EC_{iw} هدایت الکتریکی آب آبیاری (دسی‌زیمنس بر متر)، EC_{dw} هدایت الکتریکی آب زهکشی (دسی‌زیمنس بر متر) می‌باشد (Matendo et al., 2026).

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

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (3)$$

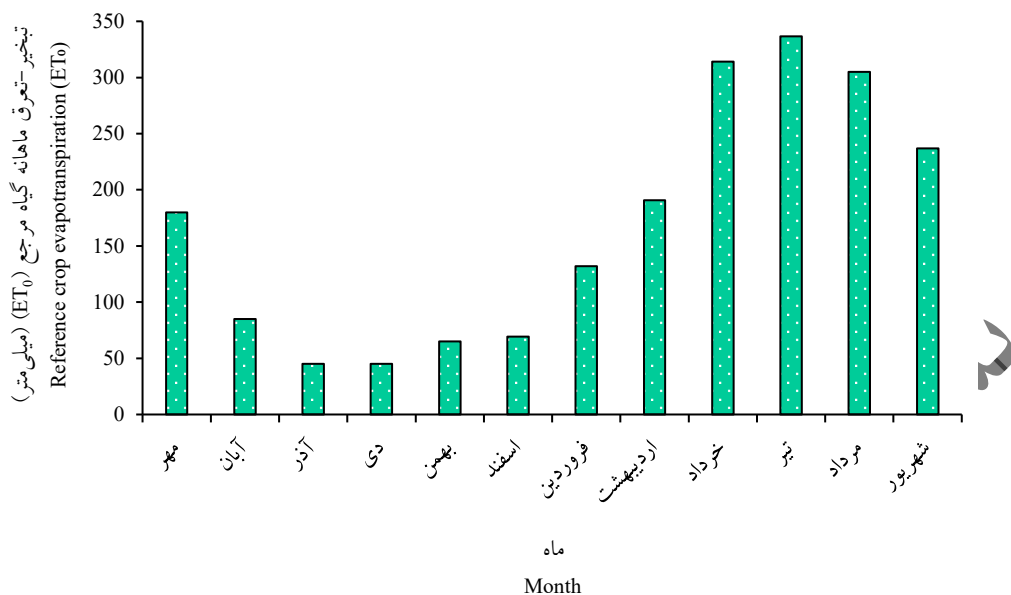
در این رابطه ET_0 تبخیر - تعرق ماهانه گیاه مرجع (چمن) و ET_c تبخیر - تعرق ماهانه نیشکر می‌باشد.

تعیین بهره‌وری آب

در انتهای دوره رشد، عملکرد ساقه نیشکر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عملکرد، نیشکر کشت شده در هر لایسیمتر به‌طور کامل، به‌صورت دستی برداشت شد. وزن ساقه نیشکر در هر تیمار اندازه‌گیری 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

1. Irrigation water productivity

2. Water Productivity



شکل ۲. تبخیر-تعرق ماهانه گیاه مرجع (ET₀) در ماه‌های مختلف در طول آزمایش (مهر ۱۴۰۲ - شهریور ۱۴۰۳)

Fig. 2. Reference crop evapotranspiration (ET₀) in different months during the study period (October 2023-september 2024)

داشته است. به طور کلی کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار آن به ترتیب تبخیر-تعرق گیاه نیشکر رقم CP57-614 در طول دوره رشد مربوط به آذرماه و دی‌ماه (۴۵/۰ میلی‌متر) و تیر ماه (۳۳۶/۷ میلی‌متر) بود (شکل ۲).

نتایج نشان داد که در همه ماه‌های بررسی شده بجز چهار ماه ابتدایی پس از کشت (مهرماه تا دی‌ماه)، تبخیر-تعرق در تیمارهای کاربرد کمپوست و بیوجار به طور معنی‌داری کم‌تر از تیمار شاهد بود. بدین ترتیب که در ماه‌های اسفند تا شهریور، تبخیر-تعرق در تیمار بیوجار به ترتیب ۱۰/۳، ۸/۷، ۵/۱، ۴/۸، ۶/۸، ۴/۷ و ۷/۰ درصد و در تیمار کمپوست به ترتیب ۱۱/۱، ۷/۱، ۳/۲، ۵/۳، ۳/۹ و ۵/۳ درصد کم‌تر از تیمار شاهد بود و اختلاف آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار بود (شکل‌های ۳ و ۴). همچنین تبخیر-تعرق نیشکر در تیمار کاربرد بیوجار در ماه‌های اسفند، خرداد و تیر به طور معنی‌داری کم‌تر از تیمار کاربرد کمپوست بود (شکل ۳). به طور میانگین (میانگین ماه‌های مختلف) در دوره زمانی آذرماه تا شهریورماه، کاربرد تیمارهای بیوجار و کمپوست، تبخیر-تعرق نیشکر رقم CP57-614 را در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب ۶/۶ و ۵/۷ درصد کاهش داد. کاهش تبخیر-تعرق در اثر کاربرد تیمارهای آلی به‌ویژه

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 همه ماه‌ها 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 تیر ماه افزایشی بود. پس از آن از تیر ماه تا شهریور ماه تبخیر-تعرق نیشکر در همه تیمارها کاهش یافت (شکل‌های ۲ و ۳). کم‌ترین و بیش‌ترین تبخیر-تعرق ماهانه نیشکر و ضریب گیاهی در همه تیمارها به ترتیب 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،

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

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

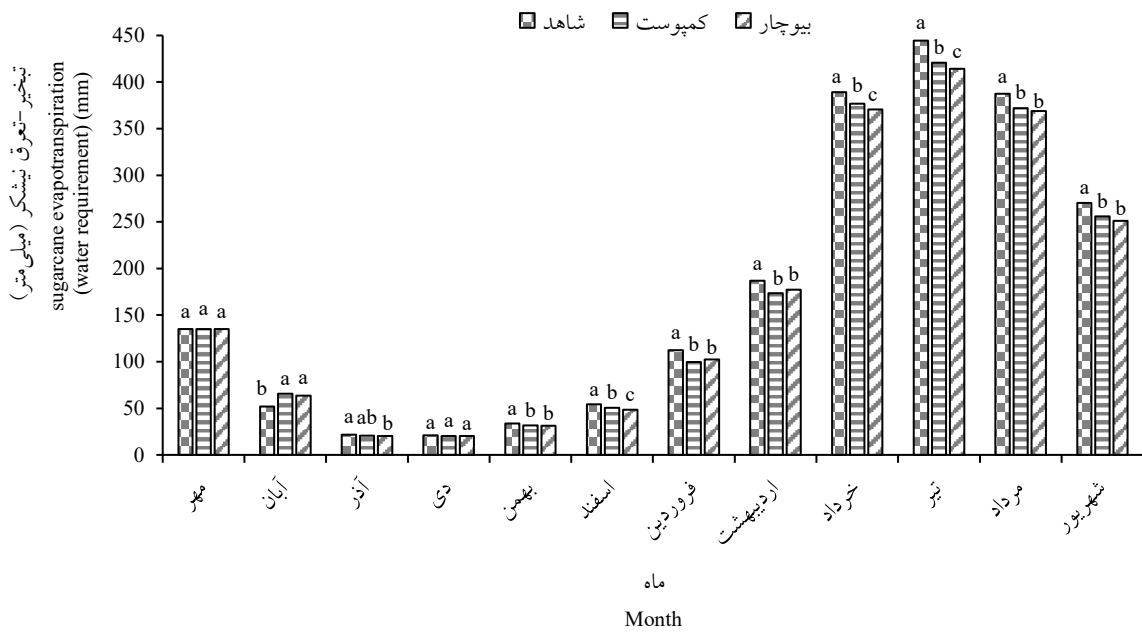
ns, * and ** denote significant at the 5 and 1% probability level respectively

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

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

ns, * and ** denote significant at the 5 and 1% probability level respectively

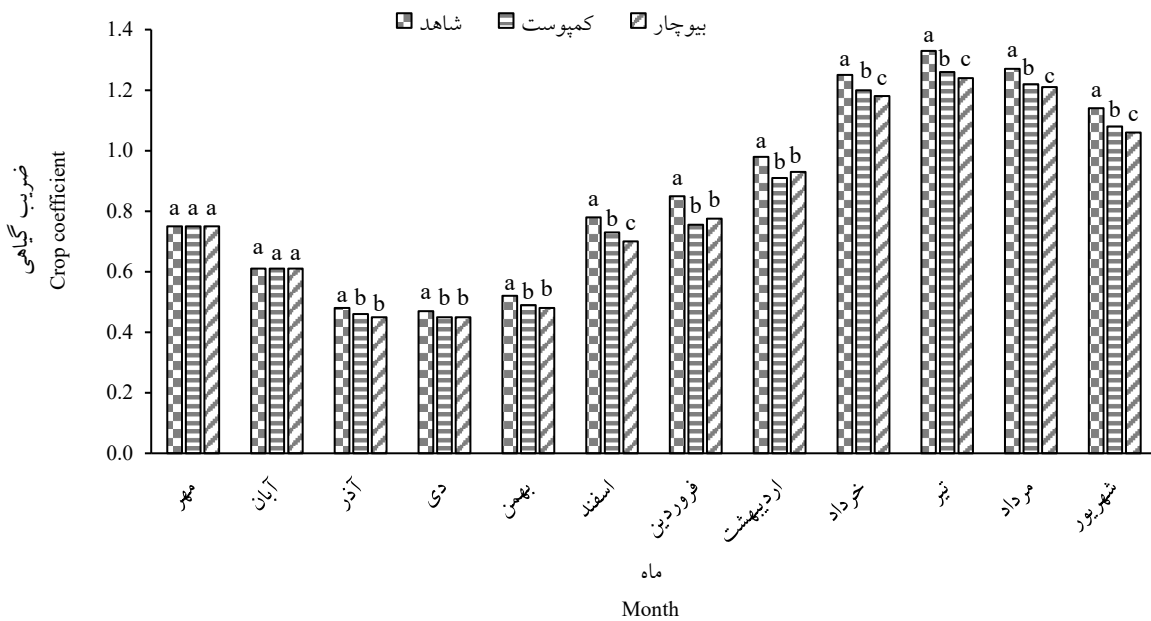


شکل ۳. تبخیر-تعرق نیشکر رقم CP57-614 در ماه‌های مختلف در طول دوره رشد (مهر ۱۴۰۲ - شهریور ۱۴۰۳)

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند.

Fig. 3. Evapotranspiration of sugarcane CP57-614 cultivar in different months during the growing period (October 2023-september 2024)

Means with similar letter (s) are not significantly different according to the LSD's test ($p < 0.05$).



شکل ۴. ضریب گیاهی نیشکر رقم CP57-614 در ماه‌های مختلف در طول دوره رشد

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند.

Fig. 4. Crop coefficient (Kc) of sugarcane CP57-614 cultivar in different months during the growing period

Means with similar letter (s) are not significantly different according to the LSD's test ($p < 0.05$).

بیوچار می‌تواند به دلیل تأثیر بیوچار در کاهش تبخیر از سطح خاک و به دنبال آن کاهش تبخیر-تعرق گیاه باشد. نتایج مطالعات مختلف نشان داد که کاربرد بیوچار در خاک به دلیل تخلخل بالا، سطح ویژه بالا و حضور ترکیبات آبدوست و افزایش تخلخل خاک، سبب افزایش نگره‌داشت آب در خاک (Gao et al., 2020; Acharya et al., 2024) و کاهش تبخیر از سطح خاک و کاهش کلی تبخیر-تعرق گیاه و نیاز آبی آن 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 نگره‌داشت آب در خاک و افزایش فراهمی آب برای گیاه و کاهش تبخیر از سطح خاک باشد. Alfadil et al. (2021) با انجام مطالعه مزرعه‌ای گزارش کردند کاربرد سطوح مختلف بیوچار سبب افزایش تخلخل کل خاک و افزایش آب قابل دسترس برای گیاه شد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که ورود بیوچار به دلیل سطح ویژه بالا به منافذ ریز و درشت خاک، به عنوان یک لایه پوششی عمل نموده و سبب افزایش نگره‌داشت آب در خاک و کاهش تبخیر از سطح خاک می‌شود.

یکی دیگر از دلایل کاهش تبخیر-تعرق در اثر کاربرد بیوچار رسانایی حرارتی کمتر بیوچار نسبت به ذرات خاک است که می‌تواند با کاهش رسانایی حرارتی 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 انتشار حرارتی پایین بیوچار نسبت به ذرات خاک، نیز می‌تواند منجر به کاهش رسانایی حرارتی خاک و کاهش تبخیر از سطح خاک شود (Feng et al., 2023). یکی دیگر از مکانیسم‌های کاهش تبخیر در اثر کاربرد بیوچار، اختلال در پیوستگی مویبندی خاک و شکستن این پیوستگی است که در نتیجه آن انتقال آب از لایه‌های مرطوب زیرین به سطح خاک محدود و تبخیر از سطح خاک کاهش می‌یابد (Feng et al., 2023). بیوچار و کمپوست همچنین احتمالاً از طریق افزایش مواد آلی خاک و بهبود پایداری خاکدانه‌های خاک، 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 نتایج Shaban et al. (2022) که گزارش کردند کاربرد بیوچار تهیه شده از کاه و کلش گندم در خاک، تبخیر-تعرق گندم را به طور معنی‌داری کاهش داد، همخوانی داشت. به طور مشابه مسلم‌لی و همکاران (۱۴۰۴) با انجام پژوهشی گزارش کردند کاربرد بیوچار تهیه شده از بقایای چوبی درخت آلو، سبب کاهش معنی‌دار تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی در گیاه گشنیز شد.

عملکرد کمی 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، به طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۵). به طوری که در تیمارهای کاربرد بیوچار و کمپوست عملکرد نیشکر به ترتیب 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 به طور معنی‌داری بیش‌تر (۲۱/۴ درصد) از تیمار شاهد بود (شکل ۵). درحالی‌که تفاوت معنی‌داری میان عملکرد شکر در تیمارهای شاهد و کمپوست وجود نداشت. همچنین تفاوت معنی‌داری بین عملکرد شکر در دو تیمار بیوچار و کمپوست مشاهده نشد.

کاربرد بیوچار و کمپوست، می‌تواند با بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک (از جمله چگالی ظاهری، تخلخل و پایداری ساختمان خاک) و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در 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 به دنبال آن بهبود عملکرد نیشکر، می‌تواند بهبود ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک باشد. یکی دیگر از دلایل افزایش عملکرد نیشکر در اثر کاربرد بیوچار و کمپوست، می‌تواند

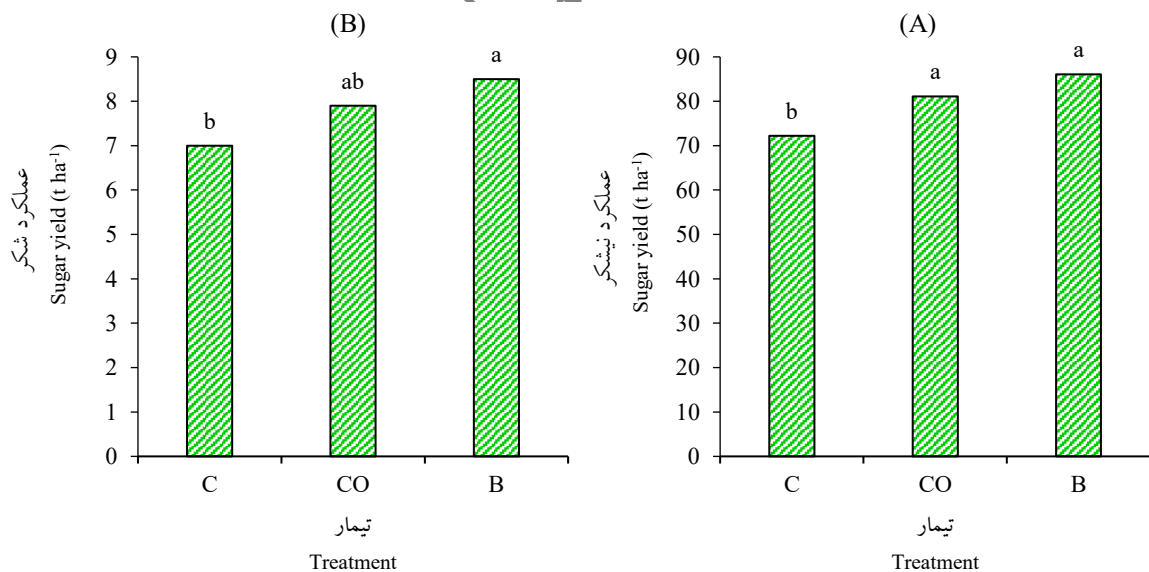
جدول ۶. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر تیمارها بر عملکرد نیشکر، عملکرد شکر، بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب در تولید نیشکر و شکر

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

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

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

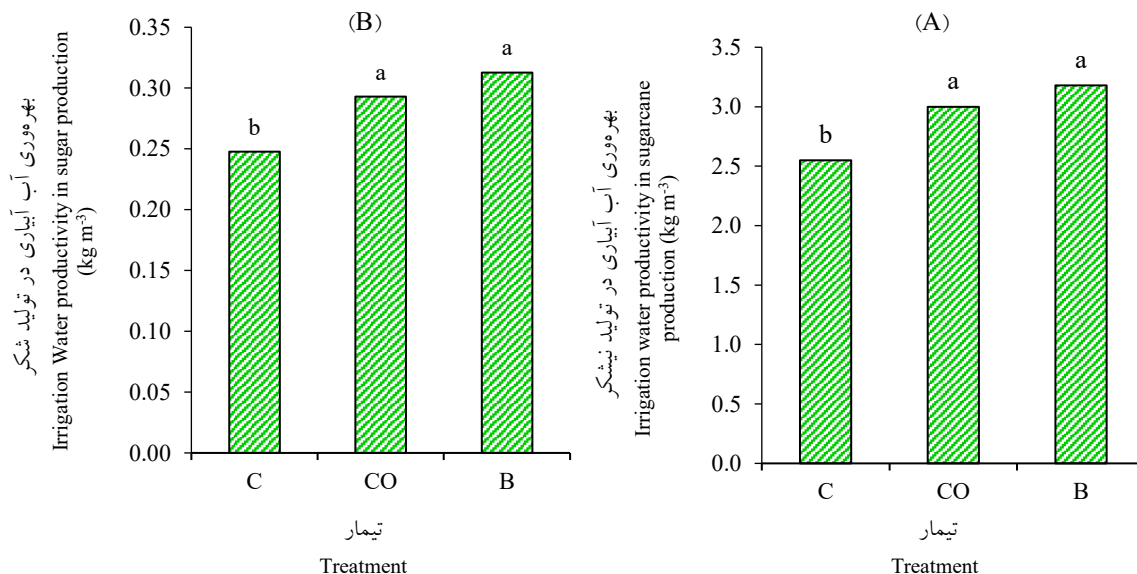
* and ** denote significant at the 5 and 1% probability level respectively



شکل ۵. مقایسه میانگین عملکرد نیشکر (A) و عملکرد شکر (B) در تیمارهای مختلف میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری (P<0.05) ندارند. C, CO و B به ترتیب تیمارهای شاهد، کمپوست و بیوجار هستند.

Fig. 5. Mean comparison of sugarcane yield (A) and sugar yield (B) production in different treatments. Means with similar letter (s) are not significantly different according to the LSD's test (p<0.05)

C, CO and B are control, compost and biochar treatments respectively



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 اختلاف معنی‌داری ($P < 0.05$) ندارند. C، CO و B به ترتیب تیمارهای شاهد، کمپوست و بیوچار هستند.

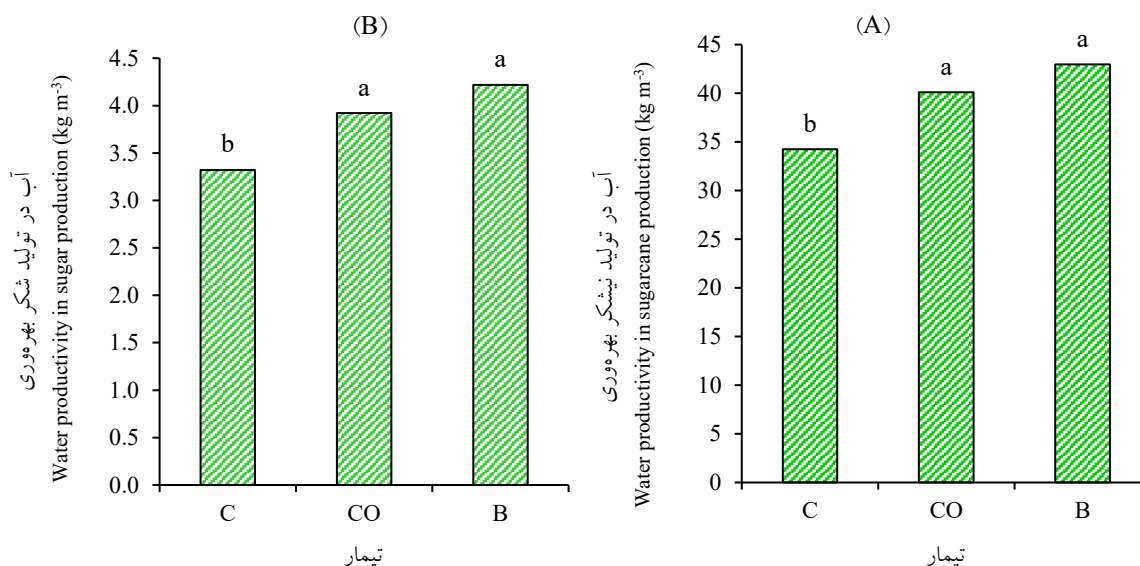
Fig. 6. Mean comparison of irrigation water productivity in sugarcane (A) and sugar (B) production in different treatments. Means with similar letter (s) are not significantly different according to the LSD's test ($p < 0.05$). C, CO and B are control, compost and biochar treatments respectively

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 به ترتیب ۲۴/۷ و ۱۷/۶ درصد و بهره‌وری آب آبیاری در تولید شکر به ترتیب 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 به ترتیب 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 به ترتیب ۶/۰ و ۶/۹ درصد و بهره‌وری آب در تولید نیشکر و شکر به ترتیب ۷/۲ و ۷/۹ درصد بیش‌تر از تیمار کاربرد کمپوست بود، اگرچه اختلاف این دو تیمار از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل‌های ۶ و ۷). نتایج این پژوهش نشان دهنده تأثیر مثبت اصلاح‌کننده‌های آلی بیوچار و کمپوست، در افزایش بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب در تولید نیشکر و شکر بود که این نتیجه به دلیل افزایش عملکرد گیاه به دلایل احتمالی مختلف از

بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک از جمله کربن آلی خاک و بهبود فعالیت میکروبی خاک، بهبود توسعه ریشه و جذب بهتر عناصر غذایی و به دنبال آن بهبود وضعیت تغذیه‌ای نیشکر در این تیمارها باشد (Alvarez-Matisic et al. 2024; Karimi et al., 2026). Campos et al. (2018) نیز با انجام پژوهشی تأثیر کاربرد بیوچارهای تهیه شده از زیست‌توده‌های مختلف (در دماهای ۳۵۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس) بر عملکرد نیشکر (وارته 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

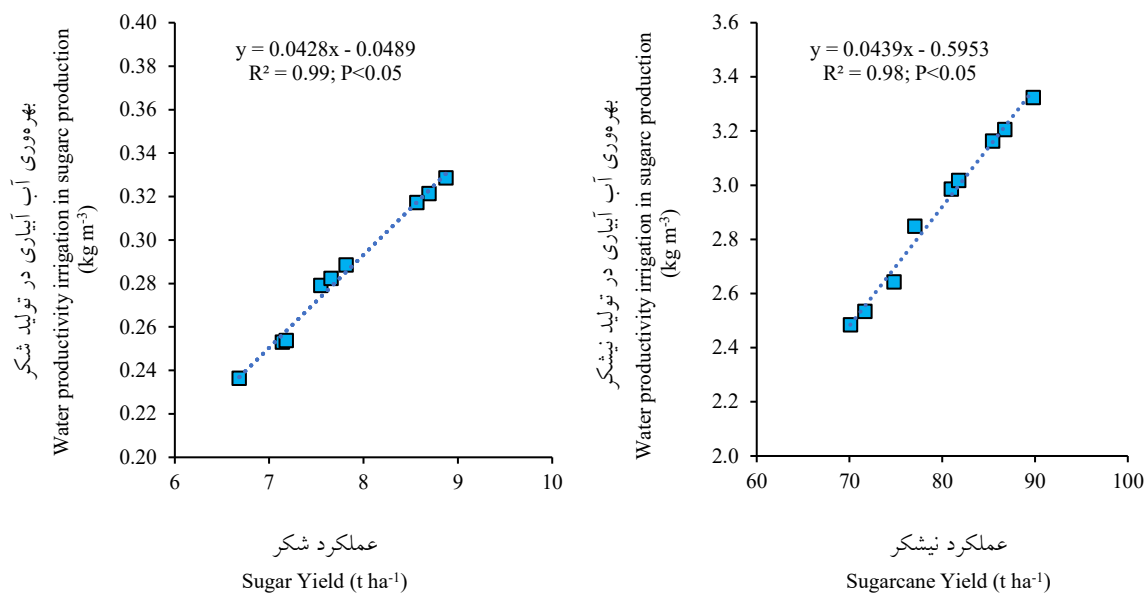


شکل ۷. مقایسه میانگین بهره‌وری آب (WP) در تولید نیشکر (A) و شکر (B) در تیمارهای مختلف میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری (P<0.05) ندارند. C, CO و B به ترتیب تیمارهای شاهد، کمپوست و بیوجار هستند.

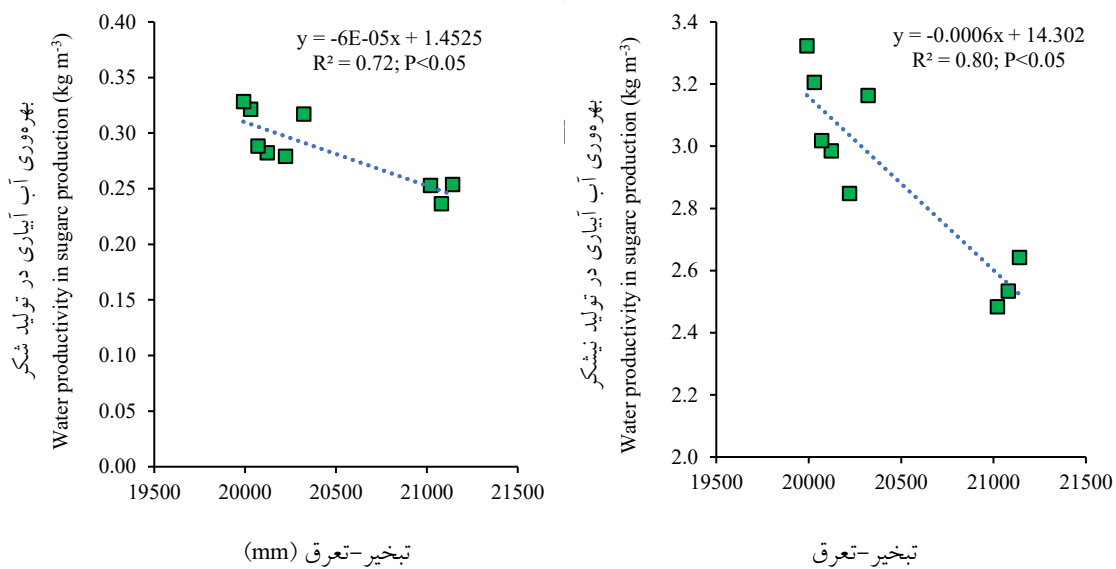
Fig. 7. Mean comparison of water productivity (WP) in sugarcane (A) and sugar (B) production in different treatments Means with similar letter(s) are not significantly different according to the LSD's test ($p < 0.05$) C, CO and B are control, compost and biochar treatments respectively

این پژوهش نشان داد تأثیر بیوجار در بهبود بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب بیش‌تر از کمپوست بود، اگرچه اختلاف آن‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبود. این نتیجه احتمالاً به دلیل سطح ویژه و تخلخل بیش‌تر بیوجار 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 بیوجار و کمپوست تهیه شده 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 بیوجار در بهبود بهره‌وری آب بیش‌تر از تأثیر کاربرد کمپوست بود. (Abdou et al., 2024) با بررسی تأثیر کاربرد بیوجار تهیه شده از بقایای گیاهی و چوب درختان بر بهره‌وری آب در تولید چغندر قند گزارش کردند کاربرد بیوجار در سطح ۱۰ تن در هکتار با افزایش معنی‌دار عملکرد چغندر قند بهره‌وری آب در تولید چغندر قند و تولید شکر را به ترتیب ۴۵/۷ و ۵۷/۱ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش

جمله بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش توسعه ریشه گیاه و به دنبال آن بهبود تغذیه نیشکر و همچنین کاهش تبخیر-تعرق نیشکر (شکل ۳) در این تیمارها بود. تأثیر مثبت بیوجار و کمپوست در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک و کاهش تبخیر از خاک، توسط برخی از پژوهش‌گران پیشین نیز گزارش شده است (Xiao et al., 2018). به طور مشابه، Faloye et al. (2019) نیز گزارش کردند که کاربرد بیوجار سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و بهره‌وری آب در ذرت، شد. (Wan et al., 2025)، نیز با بررسی تأثیر کاربرد بیوجار کاه گندم و بقایای چوبی بر بهره‌وری آب در ذرت، گزارش کردند که کاربرد تیمارهای بیوجار، بهره‌وری آب در ذرت را به طور معنی‌داری افزایش داد. (Brown and Cotton, 2011) گزارش کردند که کاربرد کمپوست تهیه شده از بقایای گیاهی در یک خاک با بافت لوم رسی، بهره‌وری آب را نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. نتایج



شکل ۸. رگرسیون خطی بین عملکرد نیشکر و عملکرد شکر با بهره‌وری آب آبیاری (IWP) در تولید نیشکر (A) و شکر (B)
Fig. 8. Linear regression between sugarcane yield and irrigation water productivity (IWP) and sugarcane yield and sugar yield



شکل ۹. رگرسیون خطی بین تبخیر-تعرق با بهره‌وری آب آبیاری (IWP) در تولید نیشکر و شکر

Fig. 9. Linear regression between sugarcane evapotranspiration yield and irrigation water productivity (IWP) and sugarcane yield and sugar yield

آب آبیاری بیش‌تر از تبخیر-تعرق بوده است. ضریب تبیین (R^2) بالاتر بین بهره‌وری آب آبیاری در تولید نیشکر و شکر با عملکرد نیشکر و عملکرد شکر (شکل ۸) در مقایسه با رابطه بین بهره‌وری آب آبیاری در تولید نیشکر و شکر و تبخیر-تعرق (شکل ۹)

داد. بهبود بهره‌وری آب در گیاهان مختلف در اثر کاربرد بیوجار توسط سایر پژوهش‌گران نیز گزارش شده است (Durukan et al., 2020; Abdou et al., 2024; Wang et al., 2024). نتایج همچنین نشان داد سهم عملکرد در تغییرات بهره‌وری

بهره‌وری آب در تولید نیشکر و شکر در مقایسه با کاربرد کمپوست بود. بر اساس این نتایج می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاربرد کمپوست و بیوجار 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 بیوجار و کمپوست آن‌ها و به‌دنبال آن کاربرد آن‌ها 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

تضاد منافع

تأییدکننده این نتایج است. بیش‌تر بودن ضریب متغیر X در روابط رگرسیونی مربوط به بهره‌وری آب آبیاری و عملکرد نیشکر و عملکرد شکر (شکل ۸) نیز نشان داد که تغییرات بهره‌وری آب و بهره‌وری آب آبیاری بیش‌تر تحت تأثیر عملکرد بوده است تا تبخیر-تعرق (شکل ۹). به‌عبارت دیگر این ضریب نشان می‌دهد به‌ازای هر واحد تغییر در عملکرد نیشکر و شکر، بهره‌وری آب بیش‌تر تغییر کرده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان‌دهنده تأثیر مثبت کاربرد کمپوست و بیوجار در افزایش عملکرد کمی 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 بیوجار و کمپوست بر بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب در نیشکر رقم CP57-614 نشان‌دهنده تأثیر بیش‌تر کاربرد بیوجار در بهبود عملکرد نیشکر، بهره‌وری آب آبیاری و

References

منابع مورد استفاده

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 and 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., Sheteiw, 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. and 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. and 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. and 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. and 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. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America Journal. Madison, WI, pp. 443–461. <https://doi.org/10.1007/BF02869702>

9. Dayoub, E.B., Tóth, Z. and 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. and 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. and Turkecul, 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. and 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. and 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. and 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 and Water Environ*, 21(1), 47–58. <https://doi.org/10.1007/s10333-022-00912-8>
16. Kandra, B., Tall, A., Gomboš, M. and 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. and 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. and 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), pp.449–466. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.371718.669657> (In Persian with English abstract)
20. Karimi, A., Zanganeh-Yusefabadi, E. and Safirzadeh, S. 2024b. Comparison of availability and uptake of phosphorus and potassium in sugarcane under subsurface drip irrigation and furrow irrigation. *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(3), 57–67. <https://doi.org/10.22055/ijse.2024.43784.2078> (In Persian with English abstract)
21. Kirkham, M. 2005. Field capacity, wilting point, available water, and the non-limiting water range. In: *Principles of Soil Plant Water Relations*. Sonnack, K. (Eds.). Dana Dreibelbisplace. Kansas State University, pp. 101–115.
22. Kroetsch, D. and Wang, C. 2008. Particle Size Distribution. In: Carter, M.R. and Gregorich, E.G., Eds., *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 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/agj.2.20282>
24. Matendo, S.E., Dari, J., Flammini, A. Brocca, L. and 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. and 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 Interactions*, 15(4), 19–35. <https://doi.org/10.47176/jspi.15.4.21371> (In Persian with English abstract)
26. Moslemli, E., Behmanesh, J. and Verdinejad, V.R. 2024. Interaction effects of biochar and various irrigation levels on crop coefficient at different growth stages in the greenhouse-grown coriander. *Hydraulics and Water Science*, 35(1), 25–37. <https://doi.org/10.22034/hws.2025.65532.1008> (In Persian with English abstract)
27. Nelson, D.W. and Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In *Methods of Soil Analysis (Part 3)*. Edited by Sparks, D. L. Soil Science Society of America Publishing: Madison, Wisconsin, USA. 961-1010. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>
28. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, E.S. and 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. and Higginson, F.R., 1992. Australian laboratory handbook of soil and water chemical methods. Inkata Press: Melbourne. <https://doi.org/10.5555/19921973446>
30. Reyes-Cabrera, J., Leon, R.G., Erickson, J.E., Rowland, D.L., Silveira, M.L. and 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: Electrical conductivity and total dissolved solids. In *Methods of Soil Analysis (Part 3)*. Edited by Sparks, D.L. Soil Science Society of America Publishing: Madison, Wisconsin, USA. <https://doi.org/abs/10.2136/sssabookser5.3.c14>
32. Safirzadeh, S., Chorom, M. and 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. and 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. and Lehmann, J. eds., 2017. *Biochar: a guide to analytical methods*. Csiro Publishing.
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. and 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. and 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. and 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. and 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-Yusefabad, E., Karimi, A., Sheini-Dashtegol, A., Naseri, A. and Zarei, S. 2024. Changes in soil salinity and sodicity under subsurface drip irrigation and furrow irrigation of sugarcane. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 24(93), 59–43. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22092/idser.2024.365371.1577>
41. Zhang, D., Lv, Q., Xu, X., Li, B. and 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>

اصلاح نشده