

Effect of nanosilica and silicon on physiological and biochemical traits of sugarcane under deficit irrigation regimes

Ali Hamdi Shengri¹, Afrasyab Rahnama^{2*}, Ali Monsefi³, Habibolah Roshanfekr⁴, Hosein Noroozi⁵

¹ Ph.D. student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: shengri5@gmail.com

² Corresponding author, Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: a.rahnama@scu.ac.ir

³ Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: a.monsefi@scu.ac.ir

⁴ Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: h.roshanfekr@scu.ac.ir

⁵ Khuzestan Sugarcane Research and Training Institute, Ahvaz, Iran Email: h.noroozi@iscrti.ir

ABSTRACT

Background and objectives: Drought stress is the major abiotic constraint affecting sugarcane productivity and quality worldwide. Water deficit not only reduces yield but also negatively affects key physiological and biochemical traits, including plant water relations, photosynthesis, chlorophyll content, and oxidative balance. Silicon, is a beneficial element known to enhance plant tolerance to abiotic stresses, particularly drought, by improving water status, preserving photosynthetic pigments, modulating antioxidant defense mechanisms, and promoting the accumulation of compatible metabolites. Silicon nanoparticles (nano-silica), owing to their small particle size and high specific surface area, exhibit greater bioavailability and physiological effectiveness than conventional silicon sources. Therefore, this study aimed to compare the effects of nano-silica and conventional silicon on drought tolerance and related physiological and biochemical responses in sugarcane.

Materials and Methods: The experiment was conducted during the 2024–2025 growing season using a split-plot arrangement within a randomized complete block design with three replications on sugarcane variety CP69-1062. Irrigation intervals (7, 10, and 13 days) were assigned to main plots, while foliar application treatments included a control (no application), nano-silica at 150 and 300 mg L⁻¹, and silicon at 300 and 600 mg L⁻¹ were allocated to sub-plots. These. Foliar applications were applied twice during the rapid growth stage (BBCH stage 3), beginning in early April, with a 15-day interval between applications.

Results: Increasing irrigation intervals significantly reduced carotenoid content, chlorophyll a and b content, chlorophyll index, relative water content, cane yield, and sugar yield. In contrast, the activities of catalase, peroxidase, and superoxide dismutase, as well as malondialdehyde (MDA) concentration, increased significantly under water deficit conditions. Foliar application of nano-silica, particularly at 300 mg L⁻¹, effectively mitigated the adverse effects of deficit irrigation. This treatment significantly

enhanced cane and sugar yield compared with untreated plants and silicon treatments. Moreover, nano-silica at 300 mg L⁻¹ increased chlorophyll index, chlorophyll a and b contents, maintained stomatal conductance and relative water content, and resulted in the highest silica accumulation in plant tissues. This treatment also showed the highest antioxidant enzyme activities and the lowest MDA content, indicating reduced oxidative damage. The superior performance of nano-silica is attributed to its higher bioavailability compared with silicon sources.

Conclusion: These findings indicate that silicon nanoparticles are more effective than conventional silicon in enhancing sugarcane tolerance to irrigation deficit. This improvement is primarily associated with enhanced photosynthetic capacity and a strengthened antioxidant defense system. Consequently, nano-silica represents a promising strategy for improving drought stress management and optimizing sugarcane productivity under limited irrigation conditions.

Keyword: Antioxidant activity, Cane yield, Chlorophyll content, Malondialdehyde content, Stomatal conductance

اثر نانوسیلیس و سیلیسیم بر برخی صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی نیشکر در شرایط رژیم‌های کم آبیاری

علی حمدی شنگری^۱، افراسیاب راهنما*^۲، علی منصفی^۳، حبیب اله روشنفکر^۴، حسین نوروزی^۵

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، رایانامه: shengri5@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، رایانامه: a.rahnama@scu.ac.ir

^۳ دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، رایانامه: a.monsefi@scu.ac.ir

^۴ دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، رایانامه: h.roshanfekr@scu.ac.ir

^۵ مؤسسه تحقیقات و آموزش توسعه نیشکر و صنایع جانبی خوزستان، اهواز، اهواز، ایران، رایانامه: h.noroozi@iscrti.ir

چکیده

سابقه و هدف: تنش خشکی، عامل اصلی محدودکننده غیرزیستی است که بر بهره‌وری و کیفیت نیشکر در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد. کمبود آب با اثرگذاری بر جنبه‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه، از جمله روابط آبی، فتوسنتز، محتوای کلروفیل و ایجاد تنش اکسیداتیو، موجب کاهش عملکرد نیشکر می‌شود. سیلیسیم به‌عنوان عنصری مفید، نقش مهمی در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های غیرزیستی از جمله خشکی دارد. این عنصر با بهبود وضعیت آبی گیاه، حفظ رنگدانه‌های فتوسنتزی، تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی و افزایش تجمع متابولیت‌های سازگار، به بهبود تحمل در برابر خشکی کمک می‌کند. در این میان، نانوذرات سیلیسیم به‌دلیل اندازه کوچک و سطح ویژه بالا، از فراهمی زیستی و اثربخشی بیشتری نسبت به سیلیسیم معمولی برخوردار بوده و پتانسیل بالایی در ارتقای تحمل به خشکی نشان داده‌اند. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف مقایسه اثر نانوسیلیس و سیلیسیم معمولی بر تحمل به خشکی و ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی نیشکر انجام شد.

مواد و روش‌ها: این آزمایش مزرعه‌ای به‌صورت کرت‌های یک‌بار خردشده و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی، در مزرعه پلنت واریته CP69-1062 در فصل زراعی ۱۴۰۳، در شرکت کشت و صنعت امام خمینی و با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل سه دور آبیاری در فواصل ۷، ۱۰ و ۱۳ روز و عامل فرعی پنج سطح کاربرد برگی شامل: شاهد (بدون محلول‌پاشی)، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوسیلیس، و ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم بود. تیمارهای محلول‌پاشی سیلیسیم در دو نوبت و در مرحله رشد سریع گیاه (مرحله ۳ بر اساس مقیاس BBCH)، از اوایل فروردین‌ماه و با فاصله زمانی ۱۵ روز اعمال شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که با افزایش دور آبیاری، محتوای کاروتنوئیدها، کلروفیل a و b، شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ، عملکرد نیشکر و عملکرد شکر به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، در حالی‌که فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و غلظت مالون‌دی‌آلدئید افزایش یافت. تیمار نانوذرات سیلیس، به‌ویژه در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، به‌طور مؤثر آثار نامطلوب کم‌آبیاری را کاهش

داده و منجر به افزایش قابل توجه عملکرد نیشکر و شکر شد. این تیمار همچنین موجب افزایش شاخص کلروفیل، کلروفیل a و b، و حفظ مقادیر بالاتر هدایت روزنه‌ای و محتوای نسبی آب برگ گردید. برگ‌های تیمار شده با نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بیشترین تجمع سیلیسیم را نشان دادند. علاوه بر این، در همین تیمار بالاترین فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز، کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز و کمترین میزان مالون‌دی‌آلدئید مشاهده شد. برتری نانوسیلیس نسبت به سیلیکات سدیم معمولی احتمالاً ناشی از فراهمی زیستی بالاتر آن است.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد نانوذرات سیلیس در مقایسه با سیلیسیم، از طریق بهبود صفات فتوسنتزی و تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی، مؤثرتر عمل کرده و موجب افزایش تحمل نیشکر به شرایط کم‌آبیری می‌شود. این ویژگی‌ها نانوذرات سیلیس را به راهبردی کارآمد برای مدیریت تنش کم‌آبیری و بهینه‌سازی تولید نیشکر در شرایط خشکی ناشی از محدودیت آبی تبدیل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: فعالیت آنتی‌اکسیدانی، عملکرد نی، محتوای کلروفیل، محتوای مالون‌دی‌آلدئید، هدایت روزنه‌ای

مقدمه: نیشکر (*Saccharum officinarum L*)، به‌عنوان محصولی راهبردی در تأمین شکر و تولید اتانول در ایران مطرح است. این محصول به‌دلیل رشد جمعیت و افزایش تقاضای شکر، به‌عنوان یک منبع حیاتی شناخته می‌شود و معمولاً نمی‌توان با اتکای کامل به واردات از خارج، نیاز کشور به شکر را برطرف کرد. در سطح جهانی، در سال ۲۰۲۳ مقدار تولید نیشکر حدود ۲ میلیارد تن، سطح زیر کشت آن حدود ۲۶ میلیون هکتار و میانگین عملکرد مزارع نیشکر حدود ۷۵ تن در هکتار گزارش شده است (۱). نیشکر به‌کمبود آب بسیار حساس است و خشکسالی ناشی از تغییرات اقلیمی و محدودیت‌های منابع آب می‌تواند به‌شدت عملکرد محصول را کاهش دهد (۲).

تنش خشکی با ایجاد اختلال در روابط آبی، کاهش محتوای نسبی آب برگ و القای بسته‌شدن روزنه‌ها، جذب دی‌اکسید کربن و سرعت فتوسنتز را محدود می‌کند (۳ و ۴). این شرایط همچنین تعرق، هدایت روزنه‌ای و پایداری رنگدانه‌های فتوسنتزی را کاهش داده و در تنش‌های شدید، محدودیت‌های غیرروزنه‌ای فتوسنتز را به دنبال دارد (۵، ۶ و ۷).

تنش خشکی با تولید گونه‌های اکسیژن‌واکنش‌گر، تنش اکسیداتیو ایجاد کرده و به ساختارهای سلولی آسیب می‌زند (۸). در واکنش به این شرایط، گیاهان فعال‌سازی سامانه‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی و تجمع متابولیت‌هایی مانند پرولین تلاش می‌کنند آثار زیان‌بار آن را کاهش دهند (۶ و ۹). با این حال، این سازوکارهای دفاعی قادر به جبران کامل خسارت نیستند و در نهایت، کاهش

زیست توده و عملکرد نیشکر را به دنبال دارند (۳). کم آبیاری به عنوان کاربرد آگاهانه آب در سطحی کمتر از نیاز کامل آبی گیاه، با هدف افزایش کارایی مصرف آب و ایجاد یک تنش خشکی خفیف و قابل کنترل تعریف می شود. این رویکرد در مقابل کاهش غیرقابل کنترل رطوبت خاک قرار دارد؛ وضعیتی که سبب بروز اختلالات فیزیولوژیک، کاهش تبادل گازی و در نهایت کاهش عملکرد محصول می گردد (۱۰).

در مدیریت تنش خشکی نیشکر، استفاده از عناصر مفید به ویژه سیلیسیم اهمیت زیادی دارد. سیلیسیم، دومین عنصر فراوان در پوسته زمین، هرچند به عنوان یک عنصر ضروری برای گیاهان در نظر گرفته نمی شود، با این حال، برخی مطالعات گزارش داده اند که این عنصر برای رشد گیاه مفید است (۸). سیلیسیم با بهبود وضعیت آبی گیاه، پایداری غشاهای فتوسنتزی، حفظ رنگدانه ها و بهینه سازی هدایت روزنه ای، تحمل نیشکر را در برابر کم آبی افزایش می دهد (۶ و ۱۱). در سال های اخیر، نانوذرات سیلیسیم به دلیل سطح ویژه بالا، اندازه نانو و فراهمی زیستی بیشتر، عملکردی مؤثرتر از منابع سیلیسی رایج نشان داده اند و حتی در غلظت های کمتر نیز می توانند تحمل گیاه به خشکی را بهبود بخشند (۱۲ و ۱۳). سازوکارهای اثرگذاری نانوسیلیسیم شامل افزایش کارایی فتوسنتزی، حفظ رنگدانه ها، بهبود وضعیت آبی و تقویت سامانه آنتی اکسیدانی گیاه است که در مجموع به سازگاری بهتر نیشکر با کم آبی کمک می کند (۶ و ۹).

سیلیسیم و نانوسیلیسیم هر دو می توانند تحمل نیشکر به خشکی را افزایش دهند، اما نانوسیلیسیم به دلیل جذب و فراهمی زیستی بالاتر احتمالاً مؤثرتر است (۱۴ و ۱۵). کارایی آن ها به ژنوتیپ، غلظت، روش کاربرد و شدت تنش بستگی دارد (۱۶ و ۱۷). تعیین دوز مناسب آن نیز اهمیت زیادی دارد و یکی از چالش های مهم است. غلظت های پایین نانوسیلیسیم می تواند مؤثر باشد (۱۸)، در حالی که غلظت های بالاتر ممکن است اثرات بازدارنده داشته باشند (۱۹). با توجه به حساسیت بالای نیشکر به تنش خشکی و نقش حیاتی این گیاه در امنیت غذایی و صنعت قند کشور، یافتن راهکارهای مؤثر برای کاهش اثرات کم آبی ضروری است. سیلیسیم و به ویژه نانوسیلیسیم به دلیل فراهمی زیستی و سطح ویژه بالا و قابلیت بهبود صفات فیزیولوژیک و آنتی اکسیدانی، به عنوان گزینه ای امیدبخش برای افزایش تحمل نیشکر در شرایط کم آبی مطرح می باشد. با وجود انجام مطالعات متعدد در شرایط کنترل شده، بررسی های مقایسه ای در شرایط واقعی مزرعه، به ویژه در اقلیم گرم و خشک خوزستان، هنوز محدود است. با این فرض که پاسخ مورفوفیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکردی مزارع پلنت نیشکر به کاربرد نانوذرات سیلیسیم و سیلیسیم در شرایط

کم آبیاری متفاوت است، این پژوهش با هدف مقایسه تأثیر سیلیسیم و نانوسیلیس بر تحمل خشکی و شناسایی سازوکارهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی مؤثر در بهبود و پایداری تولید نیشکر در شرایط کم آبیاری انجام شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش حاضر در سال زراعی ۱۴۰۳ به صورت مزرعه‌ای در اراضی شرکت کشت و صنعت نیشکر امام خمینی، واقع در شمال استان خوزستان، اجرا شد. موقعیت جغرافیایی منطقه بین ۳۹°۳۱' تا ۵۵°۳۱' عرض شمالی و ۴۸°۴۸' تا ۴۸°۴۸' طول شرقی قرار دارد. این منطقه دارای اقلیم گرم و خشک با میانگین دمای سالانه ۲۵ درجه سلسیوس و میانگین بارندگی حدود ۲۰۰ میلی‌متر است. خاک مزرعه از نوع لومرسی بوده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. به منظور تعیین این ویژگی‌ها، پیش از آغاز آزمایش، نمونه‌برداری از عمق ۰ تا ۶۰ سانتی‌متری خاک انجام و پارامترهایی نظیر بافت خاک، pH، هدایت الکتریکی، درصد ماده آلی، و مقادیر نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل‌جذب اندازه‌گیری شد. همچنین، تغییرات پارامترهای هواشناسی محل اجرای آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل انجام آزمایش

Table 1. Physicochemical properties of the soil at the experimental site

عمق خاک	مواد	روی	منگنز	آهن	مس	سدیم	پتاسیم	فسفر	سیلیسیم	نیتروژن	واکنش خاک	هدایت الکتریکی
Soil depth (cm)	آلی O.C %	Zn (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Na (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	Si (mg kg ⁻¹)	N (%)	pH	EC (dS.m ⁻¹)
0-30	0.85	0.428	4.624	7.754	2.848	329	206.00	6.2	32	0.09	7.67	1.91
30-60	0.56	0.321	3.725	5.326	1.897	450	175.00	4.3	27	0.07	7.65	1.82

جدول ۲- روند تغییرات دماهای کمینه، بیشینه، رطوبت نسبی و مدت تابش خورشیدی در سال زراعی ۱۴۰۳

Table 1. Trends in minimum and maximum temperatures, relative humidity, and sunshine duration during the 2024 growing season

ماه	مجموع تبخیر ماهانه	ساعات آفتابی	تبخیر روزانه	متوسط رطوبت	رطوبت حداکثر	رطوبت حداقل	متوسط دما	دمای حداکثر	دمای حداقل
Month	Total monthly evaporation (mm)	Sunny hours (h)	Daily evaporation (mm)	Average humidity (%)	Maximum humidity (%)	Minimum humidity (%)	Average temperature (C°)	Maximum temperature (C°)	Minimum temperature (C°)
فروردین April	194.2	290.6	6.26	53.02	77.58	28.45	22.26	29.8	14.72
اردیبهشت May	253.4	292.1	8.17	46	66.68	25.32	26.84	34.72	18.96
خرداد June	331.8	377.5	10.7	38.52	56.58	20.45	33.67	44.19	23.16

July تیر	302	374.9	9.74	47.13	66.84	27.42	35.41	45.82	25.01
August مرداد	275.9	355.8	8.9	52.06	73.77	30.35	35.85	45.2	26.5
September شهریور	225.3	335.9	7.27	53.39	73.29	33.48	33.2	42.68	23.72

آزمایش به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اصلی شامل سه سطح دور آبیاری (۷، ۱۰ و ۱۳ روز) و فاکتور فرعی شامل پنج سطح محلول‌پاشی سیلیسیم شامل: شاهد (بدون کاربرد)، نانوسیلیس با غلظت ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، و سیلیسیم (سیلیکات سدیم) با غلظت ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود. دوره‌های آبیاری از ابتدای مرحله رشد سریع تا پایان دوره رشد اعمال شدند. از سیلیکات سدیم (شرکت مرک-آلمان) به عنوان فرم تجاری سیلیسیم و از سوسپانسیون نانوذرات سیلیکا کلوئیدی (شرکت مرک-آلمان) با اندازه ذرات ۳۵-۵ نانومتر و خلوص ۹۹/۹۹ درصد به عنوان فرم تجاری نانوسیلیس به صورت محلول‌پاشی برگ‌گی در دو نوبت طی مرحله رشد سریع گیاه (مرحله ۳ بر اساس مقیاس BBCH)، یک ماه پس از شروع تیمارهای آبیاری و با فاصله ۱۵ روز بین نوبت‌ها، استفاده شدند. محلول‌پاشی با سم‌پاش پشت‌تراکتوری به گونه‌ای انجام شد که محلول به‌طور یکنواخت بر سطح برگ‌ها پخش گردد. هر دو نوبت، محلول‌پاشی در ساعت ۸ صبح انجام شد.

هر واحد آزمایشی شامل پنج خط کاشت به طول شش متر بود که نمونه‌برداری تنها از دو خط میانی انجام شد. پیش از آغاز آزمایش، به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، از عمق ۰ تا ۶۰ سانتی‌متری بخش‌های مختلف مزرعه نمونه‌برداری شد. نتایج این آنالیزها در جدول ۱ ارائه شده است. براساس گزارش‌های پیشین، حد بحرانی سیلیسیم قابل جذب برای نیشکر در بازه ۴۹ تا ۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (۲۰). با توجه به میزان سیلیسیم خاک محل اجرای آزمایش (۲۷ تا ۳۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم، جدول ۱)، می‌توان نتیجه گرفت که خاک در شرایط کمبود سیلیسیم قرار داشته است. همچنین، تغییرات پارامترهای هواشناسی محل اجرای آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. در طول دوره رشد، ۴۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار از منبع کود اوره (۴۶ درصد نیتروژن)، طبق دستورالعمل‌های مؤسسه تحقیقات نیشکر، به مزرعه داده شد. آزمایش در مزرعه پلنت با رقم CP69-1062 (رقمی تجاری از برنامه به نژادی USDA/فلوریدا، میان‌رس متمایل به زودرس، مناسب برای مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری مانند خوزستان، با محتوای ساکارز بالا، عملکرد مناسب و مقاومت نسبی به بیماری‌ها) اجرا گردید. عملیات کاشت در تاریخ ۱۸ اردیبهشت ۱۴۰۲ با تراکم ۳۰ هزار قلمه در هکتار انجام شد.

به منظور اندازه‌گیری عملکرد نی و شکر در زمان رسیدگی کامل محصول (اواخر آذرماه ۱۴۰۳)، از هر واحد آزمایشی، بوته‌ها از مساحت سه متر مربع به طور کامل کف‌بر شده و پس از جداسازی برگ، ساقه‌ها توزین شد. به منظور بررسی صفات کیفی شربت نیشکر و روند ذخیره‌سازی ساکارز در ساقه، پس از توقف رشد، از هر واحد آزمایشی تعداد ۲۰ ساقه به صورت تصادفی انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شد و پس از عصاره‌گیری شربت نیشکر با استفاده از دستگاه آسیاب، درصد ساکارز شربت (پل)، و کل مواد جامد محلول در شربت نیشکر (بریکس)، اندازه‌گیری شد و سپس درجه خلوص شربت و درصد قند قابل استحصال محاسبه شد. درصد قند شربت نیشکر توسط دستگاه ساکاریمتر (پلاریمتر) اندازه‌گیری و با استفاده از جدول پل فاکتور (ضریب اصلاح پل) اصلاح و مقدار پل واقعی براساس رابطه ۱ محاسبه شد.

$$\text{پل فاکتور} \times \text{عدد قرائت شده توسط دستگاه} = \text{درصد پل} \quad (1)$$

درصد بریکس شربت با استفاده از دستگاه رفاکتومتر اندازه‌گیری شد. پس از به دست آوردن درصد پل و بریکس شربت، با تقسیم پل بر بریکس، درجه خلوص شربت از رابطه ۲ محاسبه شد:

$$\text{درصد خلوص شربت} = \frac{\text{پل}}{\text{بریکس}} \times 100 \quad (2)$$

درصد شکر قابل استحصال ساقه نیز با استفاده از روابط ۳ و ۴ محاسبه شد.

$$\text{درصد شکر ناخالص} = \frac{100}{\text{کیفیت شربت}} \quad (3)$$

$$\text{درصد شکر ناخالص} \times 0.83 = \text{درصد شکر قابل استحصال} \quad (4)$$

عملکرد شکر از حاصلضرب عملکرد نی و درصد شکر قابل استحصال محاسبه شد. هدایت روزنه‌ای برگ با استفاده از دستگاه پرومتر (Leaf Porometer model SC-1-USA) بین ساعات ۹ تا ۱۱ صبح بر روی آخرین برگ‌های توسعه یافته شش بوته اندازه‌گیری شد. شاخص کلروفیل نیز با استفاده از دستگاه کلروفیل متر (Monilota SPAD-502 Chlorophyll meter, Japan) در ۱۰ نقطه از برگ‌های توسعه یافته انتهایی سه بوته در مرکز هر کرت آزمایشی انجام و میانگین مقادیر ثبت شد. محتوای نسبی آب به روش بارز و ویتزلی (۲۱) تعیین شد. به منظور سنجش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شامل کاتالاز، پراکسیداز، سوپراکسید

دیسموتاز و گلوکاتایون ریداکتاز، همچنین اندازه‌گیری غلظت مالون‌دی‌آلدهید، نمونه‌برداری از آخرین برگ‌های توسعه‌یافته انجام شد. فعالیت آنزیم کاتالاز به روش بیرز و سیزر (۲۲)، پراکسیداز به روش ناکانو و آسادا (۲۳)، سوپر اکسید دیسموتاز به روش جیانوپولیتیس و ریس (۲۴)، و گلوکاتایون ریداکتاز به روش نهار و همکاران (۲۵) اندازه‌گیری شد. همچنین غلظت مالون‌دی‌آلدهید بر اساس روش هیث و پاکر (۲۶) تعیین شد. میزان سیلیسیم برگ با روش هضم مرطوب طبق دستورالعمل اسنیدر و الیوت (۲۷) اندازه‌گیری شد. برای این منظور، ۰/۵ گرم از نمونه خشک‌شده در محلول NaOH هضم و محتوای سیلیسیم با استفاده از روش رنگ‌سنجی مولیبدات آبی و قرائت جذب در طول موج ۶۵۰ نانومتر با اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شد. نتایج به صورت میلی‌گرم سیلیسیم در گرم وزن خشک گزارش شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

شاخص کلروفیل: تجزیه واریانس نشان داد، اثر اصلی دور آبیاری، کاربرد سیلیسیم و برهم‌کنش آن‌ها بر شاخص کلروفیل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). میانگین شاخص کلروفیل در دور آبیاری ۷ روزه ۳۰ واحد بود که با افزایش دور به ۱۰ و ۱۳ روز، به ترتیب ۱۰ و ۳۳ درصد کاهش یافت. کاربرد سیلیسیم شاخص کلروفیل را نسبت به شاهد بهبود بخشید؛ به طوری که میانگین شاخص در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوسیلیس ۳۰ واحد (۲۵ درصد افزایش نسبت به شاهد) و در تیمار ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر سیلیسیم ۲۶ واحد (۸ درصد افزایش) بود. بیشترین مقدار شاخص کلروفیل (۳۳ واحد) در دور آبیاری ۷ روز همراه با نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین مقدار (۲۰ واحد) در دور آبیاری ۱۳ روز و تیمار شاهد حاصل شد (جدول ۵). کاهش کلروفیل تحت تنش خشکی به تخریب کلروفیل و آسیب به غشاهای فتوسنتزی نسبت داده می‌شود (۲۸)، در حالی که نانوسیلیس با کاهش تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر، تثبیت غشاهای تیلاکوئیدی و حفظ کلروفیل اثر حفاظتی دارد (۲۹). این اثر به‌ویژه در آبیاری ۷ روز و نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بارزتر بود که احتمالاً ناشی از بهبود جذب نور و افزایش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی است (۷). این نتایج با یافته‌های حافظ و همکاران (۳۰) نیز مطابقت داشت که نقش نانوسیلیس را در ارتقای کارایی فتوسنتزی و کاهش اثرات منفی تنش‌های محیطی تأیید کرده‌اند.

محتوای کلروفیل a: نتایج نشان داد اثر دور آبیاری، کاربرد سیلیس و برهم کنش آن‌ها بر محتوای کلروفیل a در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین کلروفیل a در تیمار نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین در تیمار شاهد به‌دست آمد. افزایش فاصله آبیاری موجب کاهش کلروفیل a شد، اما تیمار نانوسیلیس این کاهش را تعدیل کرد، به‌طوری‌که بیشینه مقدار (۲/۵) میلی‌گرم بر گرم وزن تازه) در آبیاری ۷ روز با نانوسیلیس و کمینه آن (۰/۶ میلی‌گرم بر گرم) در آبیاری ۱۳ روز و شاهد ثبت گردید (جدول ۵). کاهش کلروفیل a تحت تنش خشکی به اختلال در مسیر بیوستز و پراکسیداسیون لیپیدی غشاهای کلروپلاستی نسبت داده شد (۶)، در حالی‌که کاربرد نانوسیلیس با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و پایداری غشاها از تخریب آن جلوگیری کرد (۳۱).

محتوای کلروفیل b: اثر دور آبیاری، کاربرد سیلیسیم و برهم کنش آن‌ها بر محتوای کلروفیل b در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین محتوای کلروفیل b در تیمار نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین مقدار در شاهد مشاهده شد. افزایش فاصله آبیاری باعث کاهش محتوای کلروفیل b گردید، اما تیمار نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر این کاهش را تا حد زیادی جبران کرد؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار (۰/۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه) در آبیاری ۷ روز با نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین مقدار (۰/۱۵ میلی‌گرم بر گرم) در آبیاری ۱۳ روز و شاهد به‌دست آمد (جدول ۵). کاهش محتوای کلروفیل b تحت خشکی به تخریب ساختارهای فتوستزی و فعالیت آنزیم کلروفیل‌لاز نسبت داده شده است (۲۸)، در حالی‌که نانوسیلیس با تقویت دیواره سلولی و کاهش سطح گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر، از این تخریب جلوگیری نمود (۱۳).

جدول ۳- میانگین مربعات صفات فیزیولوژیک و عملکردی نیشکر تحت تأثیر محلول پاشی ذرات نانوسیلیس و سیلیسیم و دور آبیاری

Table 3. Mean squares for physiological and yield traits of sugarcane as affected by nanosilica and silicon and irrigation intervals

منابع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Means of squares												
		شاخص کلروفیل Chlorophyll index	محتوای کلروفیل a Chlorophyll a content	محتوای کلروفیل b Chlorophyll b content	محتوای کاروتنوئید Carotenoid content	هدایت روزنه ای Stomatal conductance	محتوای نسبی آب Relative water content	فعالیت کاتالاز CAT activity	فعالیت پراکسیداز POD activity	فعالیت سوپراکسید دیسموتاز SOD activity	محتوای مالوندی آلدهاید MDA content	محتوای سیلیسیم Silicon content	عملکرد نی Cane yield	عملکرد شکر Sugar yield
بلوک Block	2	7.26 ^{ns}	0.177 ^{ns}	0.22 [*]	0.157 ^{ns}	10582 ^{ns}	34.5 [*]	0.000004 ^{ns}	0.063 ^{ns}	1.66 ^{ns}	28.3 ^{**}	8.64 ^{ns}	13.6 ^{ns}	0.29 ^{ns}
دور آبیاری Irrigation interval (A)	2	124 ^{**}	5.59 ^{**}	0.98 ^{**}	1.31 [*]	32114 ^{**}	526 ^{**}	0.00154 ^{**}	21.4 ^{**}	33756 ^{**}	192 [*]	376 ^{**}	9536 ^{**}	135 ^{**}
خطای اصلی Errorr (a)	4	15.9 ^{**}	0.102 ^{**}	0.032 ^{**}	0.10 [*]	1762 [*]	3.59 ^{ns}	0.000003 ^{ns}	0.03 ^{ns}	1.98 ^{ns}	11.1 ^{**}	8.99 ^{**}	14.6 [*]	0.4 ^{ns}
سیلیسیم Silicon (B)	4	86.3 ^{**}	0.60 ^{**}	0.178 ^{**}	0.319 ^{**}	3870 ^{**}	78.9 [*]	0.00018 ^{**}	5.10 ^{**}	5777 ^{**}	18.6 ^{**}	55.6 ^{**}	643 ^{**}	16.7 ^{**}
دور آبیاری×سیلیسیم A×B	8	2.23 [*]	0.09 ^{**}	0.032 ^{**}	0.012 ^{ns}	1067 [*]	4.21 [*]	0.00004 ^{**}	1.72 ^{**}	2963 ^{**}	1.36 [*]	2.38 ^{**}	16.9 ^{**}	0.40 ^{ns}
خطای فرعی Errorr (b)	24	18.4	0.015	0.004	0.027	427	1.61	0.000002	0.025	4.64	0.46	6.89	4.09	0.41
ضریب تغییرات C.V (%)	-	3.41	9.60	14.8	19.8	15.8	1.5	8.02	10.5	4.34	9.17	3.24	1.8	5.57

ns: غیر معنی دار ** و *: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

ns: not significant; *and ** significant at 5% and 1% probability levels, respectively

جدول ۴- مقایسه میانگین صفات فیزیولوژیک و عملکردی نیشکر تحت تأثیر محلول پاشی ذرات نانوسیلیس و سیلیسیم و دور آبیاری

Table 4- Mean comparison for physiological and yield traits of sugarcane as affected by nanosilica and silicon and irrigation intervals

دور آبیاری Irrigation interval	سیلیسیم Silicon	شاخص کلروفیل Chlorophyll index	محتوای کلروفیل a Chlorophyll a content	محتوای کلروفیل b Chlorophyll b content	هدایت روزنه ای Stomatal conductance	محتوای نسبی آب Relative water content	فعالیت کاتالاز CAT activity	فعالیت پراکسیداز POD activity	فعالیت سوپراکسید دیسموتاز SOD activity	محتوای مالون دی آلد هاید MDA content	محتوای سیلیسیم Silicon content	عملکرد نی Cane yield
		-	mg. g ⁻¹	mg. g ⁻¹	mmol.m ⁻² s ⁻¹	%	unit g ⁻¹ FW	unit g ⁻¹ FW	unit g ⁻¹ FW	μmol g ⁻¹ FW	mg. g ⁻¹ DW	ton. ha ⁻¹
۷ روز 7 Days	Control	24.0 fg	1.42 d	0.45 cd	147cd	86.4 c	0.007 h	0.339 i	0.28 j	5.6 h-j	9.06 i	124 de
	Nano-150	29.3 bc	2.18 b	0.72 b	162 bc	89.4 b	0.011 g	0.535 hi	7.83hi	4.1 k	13.3 fg	129 c
	Nano-300	33.0 a	2.57 a	1.10 a	246 a	92.6 a	0.014 f	0.864 fg	28.2 g	2.6 l	15.3 f	140 a
	Silicon -300	25.7 ed	1.68 c	0.52 c	151cd	87.2 c	0.011 g	0.477 hi	5.42 i	4.6 jk	10.2 h	125 d
	Silicon -600	30.0 b	2.03 b	0.80 b	191b	90.7 ab	0.013 fg	0.654 gh	11.1 h	4.3 k	13.7 fg	136 b
۱۰ روز 10 Days	Control	21.3 h	0.99 fg	0.26 e-g	118 e	81.0 de	0.015 ef	1.105 f	31.9 f	8.31 ef	12.8 g	107 g
	Nano-150	27.7 cd	1.14 ef	0.36 de	125 ed	85.4 c	0.016 e	2.784 c	32.2 f	6.7 gh	15.4 ef	120 e
	Nano-300	30.0 b	1.38 d	0.479 c	139 de	87.0 c	0.022 d	5.331 a	43.3 e	4.9 h-k	17.3 d	127 cd
	Silicon -300	24.3 fe	1.04 ef	0.32 ef	120 de	82.8 d	0.015 ef	1.851 d	31.6fg	7.4 fg	14.1 f	111 f
	Silicon -600	26.3 d	1.21 ed	0.44 cd	125 de	86.4 c	0.016 e	3.322 b	39.9 e	5.8 hi	16.6 de	125 d
۱۳ روز 13 Days	Control	18.7 i	0.56 i	0.066 h	66 g	70.8 h	0.024 d	0.667 gh	34.3 f	14.7 a	17.2 d	70 k
	Nano-150	23.7 fg	0.70 hi	0.25 fg	94 e-g	78.8 fg	0.029 bc	1.065 f	88.4 c	10.9 bc	22.2 c	80 j
	Nano-300	25.0 d-f	1.06 e-g	0.31 e-g	102 ef	80.6 ef	0.046 a	1.825 d	174 a	9.4 de	25.8 a	96 h
	Silicon -300	21.7 gh	0.69 i	0.21 g	75 g	76.8 g	0.027 c	0.891 fg	57.6 d	11.3 b	21.5 c	78 j
	Silicon -600	24.3 ef	0.90 h-g	0.26 e-g	100 e-g	80.3 ef	0.030 b	1.389 e	156.76 b	10.1 dc	23.7 b	87i

* میانگین‌های دارای حروف مشترک برای هر صفت در هر ستون و هر فاکتور آزمایشی با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد دارای تفاوت معنی‌دار نیستند.

Means followed by the same letters for each trait in each column and each experimental factor using LSD test at 5% probability level did not differ significantly.

محتوای کاروتنوئیدها: نتایج نشان داد دور آبیاری بر محتوای کاروتنوئیدها در سطح پنج درصد و کاربرد سیلیسیم در سطح یک درصد معنی دار بود، اما برهم کنش آن‌ها معنی دار نشد (جدول ۳). بیشترین مقدار کاروتنوئیدها (۱/۱۵ میلی‌گرم بر گرم) در آبیاری ۷ روز و کمترین (۰/۵۷ میلی‌گرم بر گرم) در آبیاری ۱۳ روز به دست آمد (جدول ۵). در میان تیمارهای سیلیسیم، نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بیشترین (۱/۰۵) و شاهد کمترین (۰/۵۸ میلی‌گرم بر گرم) مقدار را داشت (جدول ۵). کاهش کاروتنوئیدها در شرایط خشکی به محدودیت سنتز و افزایش گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر نسبت داده شده است (۶)، در حالی که نانوسیلیس با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و پایداری ساختارهای فتوسنتزی موجب حفظ آن شد (۷، ۲۹ و ۳۲). عدم معنی‌داری برهم‌کنش آن‌ها بیانگر آن است که خشکی شدید اثرات مثبت سیلیسیم را بر سنتز کاروتنوئیدها کاهش داده است.

جدول ۵- مقایسه میانگین محتوای کاروتنوئیدها و عملکرد شکر تحت تأثیر سیلیسیم و نانوسیلیس و دوره‌های آبیاری
Table 5. Mean comparison for carotenoid content and sugar yield as affected by nano silica and silicon and irrigation intervals

تیمارها Treatments	محتوای کاروتنوئید Carotenoid content	عملکرد شکر Sugar yield
	mg. g ⁻¹	(ton ha ⁻¹)
دور آبیاری Irrigation interval	۷ روز 7 day	14.26 ^a
	۱۰ روز 10 day	12 ^b
	۱۳ روز 13 day	8.3 ^c
سیلیسیم Silicon	شاهد Control	9.8 ^c
	نانوسیلیس Nano silica (150 mg l ⁻¹)	12 ^b
	نانوسیلیس Nano silica (300 mg l ⁻¹)	13.1 ^a
	سیلیسیم Silicon (300 mg l ⁻¹)	10.4 ^c
	سیلیسیم Silicon (600 mg l ⁻¹)	12.4 ^{ab}

* میانگین‌ها با حروف مشترک برای هر صفت با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.
Means followed by the same letters for each trait using LSD test at 5% probability level did not differ significantly.

هدایت روزنه‌ای: اثر دور آبیاری در سطح یک درصد و کاربرد سیلیسیم و برهم کنش آن‌ها در سطح پنج درصد بر هدایت روزنه‌ای معنی‌دار بودند (جدول ۴). بیشترین هدایت روزنه‌ای در تیمار نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین در تیمار شاهد مشاهده شد. با افزایش فاصله آبیاری هدایت روزنه‌ای کاهش یافت، اما نانوسیلیس این کاهش را تعدیل کرد به طوری که بیشترین

مقدار (۱۸۰ مول بر مترمربع بر ثانیه) در آبیاری ۷ روز با نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین مقدار (۷۰ مول بر مترمربع بر ثانیه) در آبیاری ۱۳ روز و شاهد ثبت شد (جدول ۶). تغییرات سریع هدایت روزانه‌ای هنگام مواجهه با تنش می‌تواند به‌عنوان معیاری قابل‌اعتماد برای غربالگری ژنوتیپ‌های مقاوم به تنش اسمزی در گندم و سایر غلات مورد استفاده قرار گیرد (۳۳). کاهش هدایت روزانه‌ای در شرایط خشکی به بسته‌شدن روزنه‌ها و محدودیت دی‌اکسید کربن نسبت داده شده است (۶ و ۳۳)، در حالی‌که نانوسیلیس با بهبود تنظیم اسمزی و افزایش هدایت هیدرولیکی ریشه، بازماندن روزنه‌ها را تسهیل نمود (۳۰، ۳۲ و ۳۴).

محتوای نسبی آب: اثر دور آبیاری در سطح یک درصد، کاربرد سیلیسیم و برهم‌کنش آن‌ها در سطح پنج درصد بر محتوای نسبی آب معنی‌دار بودند (جدول ۳). بیشترین محتوای نسبی آب (۹۰ درصد) در آبیاری ۷ روز با تیمار نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین مقدار (۷۵ درصد) در دور آبیاری ۱۳ روز و تیمار شاهد ثبت شد (جدول ۵). کاهش محتوای نسبی آب تحت تنش خشکی به دلیل کاهش جذب آب و افزایش تعرق نسبت داده شده است (۱۱). نانوسیلیس با تقویت دیواره سلولی، کاهش تعرق و بهبود هدایت هیدرولیکی موجب حفظ بیشتر آب گردید (۷). این اثر در آبیاری ۷ و ۱۰ روز بارزتر بود که بیانگر نقش مؤثر نانوسیلیس در تنظیم تعادل آب گیاه است (۱۳).

فعالیت آنزیم کاتالاز: نتایج نشان داد دور آبیاری، کاربرد سیلیسیم و برهم‌کنش آن‌ها در سطح یک درصد بر فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار بودند (جدول ۳). بیشترین فعالیت کاتالاز در آبیاری ۱۳ روز با نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین در آبیاری ۷ روز و تیمار شاهد ثبت شد (جدول ۴). افزایش فاصله آبیاری موجب افزایش فعالیت کاتالاز گردید که ناشی از تجمع پراکسید هیدروژن و تحریک سازوکارهای دفاعی گیاه است (۳۵). نانوسیلیس با بهبود جذب آب و عناصر غذایی، تقویت دیواره سلولی و ارتقای فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، نقش مهمی در کاهش اثرات منفی تنش خشکی و حفظ کارایی سیستم دفاعی گیاه ایفا کرد (۳۶، ۳۷، ۳۸ و ۳۹).

فعالیت آنزیم پراکسیداز: دور آبیاری، کاربرد سیلیسیم و برهم‌کنش آن‌ها در سطح یک درصد بر فعالیت آنزیم پراکسیداز معنی‌دار بودند (جدول ۳). بیشترین فعالیت آن در آبیاری ۱۰ روز با نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد، در حالی‌که در آبیاری ۷ روز کمتر و در ۱۳ روز به دلیل شدت تنش، افزایش آن محدود بود (جدول ۴). افزایش فعالیت پراکسیداز در تنش

خشکی متوسط نشان‌دهنده فعال شدن سیستم دفاعی گیاه است (۳۱) و کاربرد نانوسیلیس با تحریک سنتز آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی این واکنش را تقویت نمود (۴۰). کاهش فعالیت آن در خشکی شدید احتمالاً به محدودیت سنتز پروتئین‌ها مربوط است.

فعالیت آنزیم سوپراکسیداز: نتایج نشان داد که دور آبیاری، کاربرد سیلیسیم و برهم‌کنش آن‌ها بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین فعالیت این آنزیم در تیمار نانوسیلیس با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد و این روند در تمام سطوح آبیاری تداوم یافت (جدول ۴). افزایش فاصله آبیاری از ۷ به ۱۳ روز موجب افزایش معنی‌دار فعالیت سوپراکسید دیسموتاز شد، به طوری که در تیمار شاهد (بدون محلول‌پاشی) نسبت به تیمار نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، فعالیت این آنزیم حدود ۳۸ درصد کمتر بود. همچنین، اعمال نانوسیلیس در مقایسه با شاهد، به‌طور میانگین باعث افزایش ۲۵ تا ۴۰ درصدی فعالیت سوپراکسید دیسموتاز در سطوح مختلف آبیاری گردید. بالاترین میزان فعالیت در شرایط آبیاری هر ۱۳ روز همراه با نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر ثبت شد که نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی تنش خشکی و نانوسیلیس در تحریک سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه است (۳۹). در مقابل، کمترین فعالیت در آبیاری ۷ روز و تیمار شاهد مشاهده شد. به‌طور کلی، نانوسیلیس با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و تحریک فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، توانست نقش مؤثری در کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تنش خشکی ایفا کند (۳۵، ۳۸ و ۴۱).

محتوای مالون‌دی‌آلدئید: دور آبیاری، کاربرد سیلیسیم و برهم‌کنش آن‌ها بر میزان مالون‌دی‌آلدئید معنی‌دار بودند (جدول ۳). مالون‌دی‌آلدئید به‌عنوان یکی از شاخص‌های اصلی پراکسیداسیون لیپیدی، بیانگر میزان آسیب به غشاهای سلولی بوده و به‌طور مستقیم با تجمع گونه‌های اکسیژن‌واکنش‌گر تحت تنش‌های محیطی مرتبط است. بیشترین محتوای مالون‌دی‌آلدئید در شاهد و آبیاری ۱۳ روز ثبت شد که بیانگر آسیب شدید غشایی تحت تنش خشکی است (۳۶ و ۴۲). کمترین مقدار در تیمار نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و آبیاری ۷ روز مشاهده گردید (جدول ۴)، که بیانگر نقش برجسته نانوسیلیس در کاهش آسیب اکسیداتیو است. نانوسیلیس با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی، کاهش تولید گونه‌های اکسیژن‌واکنش‌گر و افزایش پایداری غشا، به‌طور مؤثری سطح مالون‌دی‌آلدئید را کاهش داد (۲۹ و ۴۳).

محتوای سیلیس برگ: دور آبیاری، کاربرد سیلیسیم و برهم‌کنش آن‌ها بر محتوای سیلیسیم برگ در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). در تمامی شرایط، بیشترین تجمع سیلیسیم در تیمار نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین آن در تیمار شاهد

مشاهده شد. با افزایش فاصله آبیاری از ۷ به ۱۳ روز، محتوای سیلیسیم برگ در همه تیمارها افزایش یافت، به طوری که بیشترین مقدار (بیش از ۲۴ میلی گرم بر گرم) در تیمار نانوسیلیس و کمترین مقدار (۱۲ میلی گرم بر گرم) در تیمار شاهد ثبت گردید (جدول ۵). این افزایش در شرایط خشکی بیانگر نقش سیلیسیم در تقویت سازوکارهای دفاعی گیاه است. نانوسیلیس به دلیل فراهمی زیستی بالا موجب جذب بیشتر و رسوب سیلیسیم در برگ شد که با کاهش تعرق، حفظ آب و پایداری غشاهای سلولی همراه بود (۷ و ۱۳).

عملکرد نی: اثر اصلی دور آبیاری، کاربرد سیلیسیم و برهم کنش آن‌ها در سطح یک درصد بر عملکرد نی معنی دار بود (جدول ۳). افزایش دور آبیاری از ۷ به ۱۳ روز موجب کاهش ۳۷ درصدی عملکرد نی شد. محلول پاشی با نانوسیلیس در غلظت‌های ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی گرم در لیتر (به ترتیب موجب افزایش ۵ و ۲۱ درصدی) و سیلیسیم در غلظت‌های ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم در لیتر (به ترتیب موجب افزایش ۵ و ۱۶ درصدی) توانست به طور متفاوتی عملکرد نی را نسبت به تیمار شاهد (عدم محلول پاشی) بهبود بخشد. در این میان، محلول پاشی با ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیس بیشترین تأثیر را در بهبود عملکرد داشت (۱۴۱ تن در هکتار در آبیاری ۷ روزه) و در تمامی دوره‌های آبیاری به عنوان مؤثرترین تیمار در کاهش اثرات تنش خشکی شناخته شد، در حالی که کمترین عملکرد (۷۰ تن در هکتار) در تیمار شاهد همراه با دور آبیاری ۱۳ روز مشاهده شد (جدول ۴). تیمارهای ۱۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیس و ۳۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیسیم نیز عملکرد بهتری نسبت به شاهد داشتند، اما کارایی آن‌ها کمتر از تیمار ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیس بود (۳۴). بنابراین، کاربرد نانوسیلیس به ویژه در غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر می تواند به عنوان یک راهبرد مؤثر در مدیریت تنش خشکی و افزایش بهره‌وری نیشکر توصیه شود.

عملکرد شکر: نتایج نشان داد که اثر دور آبیاری و کاربرد سیلیسیم بر عملکرد شکر در سطح یک درصد معنی دار بود، در حالی که برهم کنش این دو عامل معنی دار نشد (جدول ۳). بیشترین عملکرد شکر در دور آبیاری ۷ روز با مقدار ۲۶/۱۴ تن در هکتار به دست آمد که به طور معنی داری بالاتر از دوره‌های ۱۰ و ۱۳ روز (به ترتیب ۱۲ و ۳/۸ تن در هکتار) بود. در میان تیمارهای سیلیسیم، ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیس با عملکرد ۱/۱۳ تن در هکتار، بیشترین بهبود را نسبت به شاهد نشان داد و پتانسیل بالای آن در افزایش تجمع شکر آشکار شد. به طور کلی، دور آبیاری مهم‌ترین عامل تعیین کننده عملکرد شکر است، اما ترکیب یک برنامه آبیاری بهینه با محلول پاشی نانوسیلیس (به ویژه در غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر) می تواند به ارتقای بهره‌وری نیشکر کمک

کند (جدول ۵). با توجه به نتایج عملکرد نی، می‌توان استنباط کرد که افزایش عملکرد شکر در اثر کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیس عمدتاً ناشی از بهبود عملکرد نی بوده است (جدول ۵). این یافته با گزارش‌های پیشین نیز همخوانی دارد، به طوری که کاهش دور آبیاری موجب بهبود رشد و عملکرد نیشکر شده است (۴۴ و ۴۵). همچنین، تغذیه با سیلیسیم از طریق افزایش غلظت سیلیسیم محلول در خاک، بهبود جذب عناصر غذایی، افزایش زیست‌توده و در نهایت ارتقای عملکرد ساقه و شکر، به بازیابی بهتر گیاه پس از کم‌آبی کمک می‌کند (۴۶).

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش فاصله آبیاری از ۷ به ۱۳ روز باعث کاهش معنی‌دار عملکرد نی و شکر نیشکر شد. اما محلول‌پاشی نانوسیلیس، به‌ویژه در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، توانست با بهبود صفات فیزیولوژیک (افزایش هدایت روزنه‌ای، محتوای نسبی آب برگ، غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی) و بیوشیمیایی (افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی)، بخش زیادی از این کاهش را جبران کند. همچنین تجمع سیلیسیم در برگ با تقویت دیواره سلولی و بهبود وضعیت آبی گیاه، به پایداری غشا و حفظ فتوسنتز کمک کرد. در نتیجه، رشد و عملکرد نیشکر حتی تحت تنش خشکی بهبود یافت. بر این اساس، محلول‌پاشی نانوسیلیس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌عنوان روشی مؤثر برای افزایش بهره‌وری آب و پایداری تولید نیشکر در مناطق خشک و نیمه‌خشک توصیه می‌شود.

سپاسگزاری: به‌این‌وسیله نویسندگان از حمایت‌های معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز به شماره پژوهانه

SCU.AA402.96 کمال قدردانی را دارند.

References

- 1- FAO, 2023. Food and Agricultural Organization Statistical Yearbook. <http://www.fao.org>.
- 2- Kumar, R., Sagar, V., Verma, V.C., Kumari, M., Gujjar, R.S., Goswami, S.K., & Prasad, P.V. (2023). Drought and salinity stresses induced physio-biochemical changes in sugarcane: an overview of tolerance mechanism and mitigating approaches. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1225234.
- 3- Bashir, S.S., Hussain, A., Hussain, S.J., Wani, O.A., Zahid Nabi, S., Dar, N.A., & Mansoor, S. (2021). Plant drought stress tolerance: Understanding its physiological, biochemical and molecular mechanisms. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 35(1), 1912–1925.
- 4- Sajid, M., Amjid, M., Munir, H., Ahmad, M., Zulfiqar, U., Ali, M.F., & Artyszak, A. (2023). Comparative analysis of growth and physiological responses of sugarcane elite genotypes to water stress and sandy loam soils. *Plants*, 12(15), 2759.

- 5- Ferreira, T.H., Tsunada, M.S., Bassi, D., Araújo, P., Mattiello, L., Guidelli, G.V., & Menossi, M. (2017). Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1077.
- 6- Verma, K.K., Anas, M., Chen, Z., Rajput, V.D., Malviya, M. K., & Verma, C.L. (2020). Silicon supply improves leaf gas exchange, antioxidant defense system and growth in *saccharum officinarum* responsive to water limitation. *Plants*, 9(10), 1300.
- 7- Teixeira, G. C. M., de Prado, R. M., Rocha, A. M. S., de Oliveira Filho, A. S. B., da Sousa Junior, G. S., & Grato, P.L. (2022). Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. *Scientific Reports*, 12(1), 17487.
- 8- Verma, K.K., Song, X.P., Lin, B., Guo, D.J., Singh, M., & Rajput, V.D. (2021). Silicon induced drought tolerance in crop plants: Physiological adaptation strategies. *Silicon*, 13(12), 4641-4657.
- 9- El-Beltagi, H.S., Shehata, W.F., Ahmad, A., Hassim, M.F., & Hadid, M.L. (2023). Role of silica nanoparticles in enhancing drought tolerance of cereal crops. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 51(4), 13480–13480.
- 10- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147-159.
- 11- Farooq, M., & Dietz, K. J. (2015). Silicon as versatile player in plant and human biology: Overlooked and poorly understood. *Frontiers in Plant Science*, 6, 408.
- 12- Das, A., & Das, B. (2019). Nanotechnology a Potential Tool to Mitigate Abiotic Stress in Crop Plants. In *Abiotic and Biotic Stress in Plants* (pp. 445-460). IntechOpen.
- 13- Elsheery, N. I., Sunoj, V. S.J., Wen, Y., Zhu, J.J., Muralidharan, G., & Cao, K.F. (2020). Foliar application of nanoparticles mitigates the chilling effect on photosynthesis and photoprotection in sugarcane. *Plant Physiology and Biochemistry*, 149, 50–60.
- 14- Hoang, C.V., Thoai, D.N., Cam, N.T.D., Phuong, T.T.T., Lieu, N.T., Hien, T.T.T., & V, Q.V. (2022). Large-scale synthesis of nanosilica from silica sand for plant stimulant applications. *ACS Omega*, 7(45), 41687-41695.
- 15- Nadeem, M., Anwar-Ul-Haq, M., Xin, X., Shohag, M.J.I., Ayub, M.A., Ahmad, W., & He, Z. (2025). Exogenous Application of silica and nano silica particles improves nutrient acquisition and growth of Maize (*Zea mays* L.) under saline and water deficit conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 56(12), 1872-1888.
- 16- horne, S.J., Hartley, S.E., & Maathuis, F.J. (2020). Is silicon a panacea for alleviating drought and salt stress in crops? *Frontiers in Plant Science*, 11, 568588.

- 17- Hajizadeh, H.S., Azizi, S., Rasouli, F., & Okatan, V. (2022). Modulation of physiological and biochemical traits of two genotypes of *Rosa damascena* Mill. by SiO₂-NPs under In vitro drought stress. *BMC Plant Biology*, 22(1), 1-19.
- 18- Verma, K.K., Zeng, Y., Song, X.P., Singh, M., Wu, K.C., Rajput, V.D., & Li, Y.R. (2022). Nanosilicon: An approach for abiotic stress mitigation and sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1025974.
- 19- Mathur, P., & Roy, S. (2020). Nanosilica facilitates silica uptake, growth and stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 157, 114–127.
- 20- Liang, Y.C., Nikolic, M., Belanger, R., Gong, H.J., & Song, A.L. (2015). *Silicon in Agriculture: From Theory to Practice*. Dordrecht: Springer
- 21- Barrs, H.D., & Weatherley, P.E. (1962). A re-examination of the relative turgidity techniques for estimating water deficits in leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15, 413-428.
- 22- Beers, R.F., & Sizer, J.W. (1952). Spectrophotometric method for measuring breakdown of hydrogen peroxide catalase. *Journal of Biological Chemistry*, 195, 133-140.
- 23- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22(7), 867-880.
- 24- Giannopolitis, C.N., & Ries, S.K. (1997). Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 59(2), 309-314.
- 25- Nahar, K., Hasanuzzaman, M., Alam, M.M., & Fujita, M. (2015). Roles of exogenous glutathione in antioxidant defense system and methylglyoxal detoxification during salt stress in mung bean. *Biologia Plantarum*, 59(4), 745-756.
- 26- Heath, R.L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125(1), 189-198.
- 27- Elliott, C.L., & Snyder, G.H. (1991). Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 39, 1118-1119.
- 28- Verma, K.K., Wu, K.C., Singh, P., Malviya, M.K., Singh, R.K., Song, X.P., & Li, Y.R. (2019). The protective role of silicon in sugarcane under water stress: photosynthesis and antioxidant enzymes. *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*, 15(2), 1-7.
- 29- Siddiqui, M. H., & Al-Whaibi, M.H. (2014). Role of nano-SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seeds. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 21(1), 13–17.
- 30- Hafez, E., Osman, H.S., Gowayed, S., Okasha, S., Omara, A., & Sami, R. (2021). Minimizing the adversely impacts of water deficit and soil salinity on maize growth and productivity in response to the application of plant growth-promoting rhizobacteria and silica nanoparticles. *Agronomy*, 11(11), 2127.

- 31- Siddiqui, M. H., Al-Wahaibi, M.H., Firoz, M., & Al-Khaishany, M.Y. (2015). Role of nanoparticles in plants. *Nanotechnology and Plant Sciences: Nanoparticles and Their Impact on Plants*, 19-35.
- 32- De Camargo, M.S., Baltieri, G.J., Santos, H.L., Carnietto, M.R.A., dos Reis, A.R., Pacheco, A.C., & de Almeida Silva, M. (2023). Silicon fertilization enhances photosynthetic activity and sugar metabolism in sugarcane cultivars under water deficit at the ripening phase. *Silicon*, 15(7), 3021–3033.
- 33- Rahnema, A., James, R.A., Poustini, K., & Munns, R. (2010). Stomatal conductance as a screen for osmotic stress tolerance in durum wheat growing in saline soil. *Functional Plant Biology*, 37, 255-263.
- 34- Gong, H., Chen, K.M., Chen, G.C., Wang, S.M., & Zhang, C.L. (2003). Effects of silicon on growth of wheat under drought. *Journal of Plant Nutrition*, 26(5), 1055–1063.
- 35- Apel, K., & Hirt, H. (2004). Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annual Review of Plant Biology*, 55(1), 373-399.
- 36- Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 7(9), 405–410.
- 37- Gill, S.S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), 909-930.
- 38- Ma, J.F., & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 11(8), 392-397.
- 39- Tripathi, D.K., Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M., Dubey, N.K., & Chauhan, D.K. (2017). Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 70–81.
- 40- Liang, Y., Chen, Q., Liu, Q., Zhang, W., & Ding, R. (2003). Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Plant Physiology*, 160(10), 1157–1164.
- 41- Yousefvand, P., Sohrabi, Y., Heidari, G., Weisany, W., & Mastinu, A. (2022). Salicylic acid stimulates defense systems in *Allium hirtifolium* grown under water deficit stress. *Molecules*, 27.
- 42- Davey, M.W., Stals, E., Panis, B., Keulemans, J., & Swennen, R. L. (2005). High-throughput determination of malondialdehyde in plant tissues. *Analytical Biochemistry*, 347(2), 201–207.
- 43- Suriyaprabha, R., Karunakaran, G., Yuvakkumar, R., Prabu, P., Rajendran, V., & Kannan, N. (2012). Growth and physiological responses of maize (*Zea mays* L.) to porous silica nanoparticles in soil. *Journal of Nanoparticle Research*, 14(12), 1294.
- 44- Mehareb, E., & Gadallah, A. (2020). Yield and quality of some sugarcane varieties as affected by irrigation number. SVU-International. *Journal of Agricultural Sciences*, 2(2), 144-165.

- 45- Noorghadami, Z., Mansoori, Y., Sheikhdavoodi, M.J., Rahnama, A., & Taghizadeh, A. (2022). Investigation on the effect of drying-off and harvest date management on quantitative and qualitative yield of sugarcane. *Sugar Tech*, 24, 1699–1709.
- 46- De Camargo, M.S., Bezerra, B.K.L., Vitti, A.C., Silva, M.A., & Oliveira, A.L. (2017). Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(1), 99-111.