

Original article

Evaluation of physiological traits and responses of some antioxidant enzymes in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) to salinity stress and silicon application

Ali Ansori Savari¹, Majid Nabipour^{2*}, Masoume Farzaneh³

1. Ph.D. Student of Crop Physiology, Department of Plant Production and Genetics. Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2. Professor, Department of Plant Production and Genetics. Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics. Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received 9 January 2025; Revised 17 March 2025; Accepted 28 March 2025

Extended abstract

Introduction

Drought stress has substantially reduced the availability of freshwater resources for agricultural production in many regions worldwide. Consequently, the use of drainage water has been considered a practical strategy for sustaining crop productivity under water-limited conditions. In addition, soil and irrigation water salinity are among the major factors limiting agricultural yield. Therefore, this study was conducted to evaluate the effects of silicon application on growth, physiological traits, and antioxidant enzyme activity of sugarcane under salinity stress conditions.

Materials and methods

The experiment was conducted over two consecutive growing seasons (2021–2022) in a greenhouse at the Dehkhoda Sugarcane Agriculture and Industry Company. A split–split plot arrangement based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications was implemented. Sugarcane variety (CP73-21 and CP69-1062) was considered as the sub-plot factor. Salinity stress was assigned to the main plots at three levels: a control level of 1.4 ± 0.2 dS m⁻¹ (S₀) derived from river water, and two salinity stress levels of 4.1 ± 0.2 dS m⁻¹ (S₁) and 8.2 ± 0.2 dS m⁻¹ (S₂) obtained from drainage water. The timing of silicon application was considered a sub-sub-factor with four levels: S₀ (no silicon application, control); S₁ (one month before stress imposition); S₂ (during salinity stress); and S₃ (30 days after the onset of salinity stress). In the second year, a split-plot arrangement based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications was implemented using the variety CP69-1062 (which showed greater tolerance to salinity stress than the other variety in the previous experiment). The main factor was irrigation at three salinity levels, consistent with the previous year, while the sub-factor was the timing of silicon application at two levels: no application (control, S₀) and the optimal timing identified in the first experiment (one month before stress imposition, S₁).

Results and discussion

Salinity stress significantly reduced the maximum weekly stem growth of both sugarcane varieties by 36 and 68% at salinity levels of 4.1 and 8.2 dS m⁻¹, respectively. Irrigation with salinity levels of 4.1 and 8.2 dS m⁻¹ resulted in significant reductions in stem weight (37 and 66%), leaf relative water content (6.4 and 10.8%), and photosynthetic rate (28 and 42%), while electrolyte leakage increased by 17.2 and 29.4%, respectively, compared with the control treatment. Applying silicon fertilizer one month before stress imposition was the most effective timing, significantly improving most measured traits under mild

* Corresponding author: Majid Nabipour; E-Mail: m.nabipour@scu.ac.ir

to moderate salinity levels (1.4 and 4.1 dS m⁻¹). Silicon application significantly increased leaf relative water content of sugarcane compared with the control treatment. The highest leaf-sheath moisture content, showing a 2.5% increase compared with the control treatment, was observed following silicon application one month before stress imposition. Also, the highest leaf relative water content across all salinity levels was achieved when silicon was applied one month before stress. Delaying silicon application diminished its effectiveness in maintaining leaf relative water content, particularly under higher salinity conditions. Under salinity stress, silicon application increased catalase (CAT) activity by 15.2, 56.4, and 88.9% at salinity levels of 1.4 (control), 4.1, and 8.2 dS m⁻¹, respectively, compared with non-silicon treatments. The activity of ascorbate peroxidase (APX) increased by 99.8% and 115% following silicon application under salinity stress levels of 4.1 and 8.2 dS m⁻¹, respectively, compared with the control treatment. Superoxide dismutase (SOD) activity decreased by 9.5 and 15.8% under salinity stress at 4.1 and 8.2 dS m⁻¹, respectively, relative to the control. However, silicon application increased the activity of this enzyme by 12% compared with treatments without silicon application.

Conclusion

Based on the results, sugarcane cultivation can be maintained during periods of water scarcity by using drainage water from sugarcane farming, which has an average salinity of approximately 4 dS m⁻¹. This water can be used for irrigation throughout the growing season with no marked adverse effects on growth and physiological performance. Moreover, silicon fertilizer application enhanced antioxidant enzyme activity and contributed to increased sugarcane tolerance to salinity stress.

Keywords: Ascorbate peroxidase, Catalase, Growth, Photosynthesis rate, Superoxide dismutase

بررسی صفات فیزیولوژیکی و پاسخ برخی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نیشکر (*Saccharum officinarum* L.) به شوری و کاربرد کود سیلیسیم

علی انصوری سواری^۱، مجید نبی‌پور^۲، معصومه فرزانه^۳

۱. دانشجوی دکتری اگروتکنولوژی- فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز
۲. استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز
۳. دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: آسکوربات پراکسیداز رشد سرعت فتوسنتز سوپراکسید دیسموتاز کاتالاز	شوری آب یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که مانع رشد و بهره‌وری محصول در سراسر جهان می‌شود. به‌منظور ارزیابی تأثیر سیلیسیم بر رشد و وزن ساقه نیشکر تحت تنش شوری حاصل از زه‌آب، آزمایشی در دو سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱ به‌صورت گلدانی در محیط گلخانه در شرکت کشت و صنعت نیشکر دهخدا با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اصلی آبیاری در سه سطح شوری شامل ۱/۴ (شاهد)، ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر، فاکتور فرعی شامل دو واریته CP73-21 و CP69-1062 و زمان کاربرد سیلیسیم در چهار سطح شامل شاهد (بدون کاربرد سیلیسیم)، یک ماه قبل از تنش، هم‌زمان با تنش و یک ماه بعد از اعمال سطوح شوری به‌عنوان فاکتور فرعی فرعی در نظر گرفته شد. نتایج برتری وزن تک ساقه واریته CP69-1062 نسبت به واریته CP73-21 در همه سطوح شوری نشان داد. آبیاری با سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب سبب کاهش ۳۶ و ۶۸ درصدی میانگین رشد هفتگی ساقه، ۳۷ و ۶۶ درصدی وزن تک ساقه، ۶/۴ و ۱۰/۸ درصدی محتوای نسبی آب برگ و افزایش ۱۷/۲ و ۲۹/۴ درصدی نشت الکترولیت نسبت به تیمار شاهد گردید. بهترین زمان کاربرد کود سیلیسیم یک ماه قبل از اعمال تنش بود که سبب افزایش معنی‌دار به ترتیب ۳۱/۳ و ۱۶/۳ درصدی رشد هفتگی ساقه و ۳/۷ و ۱/۹ درصدی محتوای نسبی آب برگ در سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر گردید. همچنین کاربرد کود سیلیسیم یک ماه قبل از اعمال شوری سبب افزایش فعالیت کاتالاز به ترتیب ۱۳/۱ و ۲۳/۱ درصد و آسکوربات پراکسیداز به ترتیب ۱۸/۹ و ۵/۴ درصد در سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر شدند. در شرایط بروز تنش کم‌آبی جهت آبیاری گیاه نیشکر استفاده از زه‌آب با شوری ۴ دسی‌زیمنس بر متر همراه با کود سیلیسیم به‌منظور افزایش تحمل گیاه نیشکر به تنش شوری قابل توصیه است.

مقدمه

تنش شوری یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده رشد و عملکرد گیاهان در مناطق خشک و نیمه خشک جهان است (Fahad et al., 2015). غلظت بالای نمک در خاک سبب افزایش پتانسیل اسمزی خاک و کاهش جذب آب در گیاهان می‌شود. علاوه بر این، غلظت بالاتر سدیم (Na^+) و کلر (Cl^-) سبب ایجاد سمیت یونی، عدم تعادل تغذیه‌ای و همچنین افزایش تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر (ROS) در گیاه شده و در نهایت منجر به کاهش رشد و زیست‌توده گیاه می‌گردد (Liang et al., 2015; Liu et al., 2015; Xie et al., 2015). طبق گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)، ۴۵ میلیون هکتار، که ۱۹/۵ درصد از اراضی آبی جهان را تشکیل می‌دهد، خاک‌های شور می‌باشند (FAO, 2020). تحمل گیاه به شوری از خاکی به خاک دیگر و از نوع یونی به یون دیگر و همچنین تفاوت بین گونه‌های گیاهی و مراحل رشد بسیار متفاوت است (Serrano et al., 1999). گونه‌های گیاهی تفاوت‌های زیادی را در تحمل به

تنش شوری یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده رشد و عملکرد گیاهان در مناطق خشک و نیمه خشک جهان است (Fahad et al., 2015). غلظت بالای نمک در خاک سبب افزایش پتانسیل اسمزی خاک و کاهش جذب آب در گیاهان می‌شود. علاوه بر این، غلظت بالاتر سدیم (Na^+) و کلر (Cl^-) سبب ایجاد سمیت یونی، عدم تعادل تغذیه‌ای و همچنین افزایش تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر (ROS) در گیاه شده و در نهایت منجر به کاهش رشد و زیست‌توده گیاه می‌گردد (Liang et al., 2015; Liu et al., 2015; Xie et al., 2015). طبق گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)، ۴۵ میلیون هکتار، که ۱۹/۵ درصد از اراضی آبی جهان را تشکیل می‌دهد، خاک‌های شور می‌باشند (FAO, 2020). تحمل گیاه به شوری از خاکی به خاک دیگر و از نوع یونی به یون دیگر و همچنین تفاوت بین گونه‌های گیاهی و مراحل رشد بسیار متفاوت است (Serrano et al., 1999). گونه‌های گیاهی تفاوت‌های زیادی را در تحمل به

اما امکان کاربرد زه آب‌های حاصل از کشت و کار این گیاه جهت آبیاری محدود و نادر مطالعه شده است. هدف از این پژوهش امکان کاربرد زه آب‌های حاصل از کشت و کار گیاه نیشکر جهت آبیاری و ادامه تولید نیشکر در شرایط بحران کم‌آبی است. همچنین بررسی توانایی کود سیلیسیم بر بهبود رشد نیشکر در شرایط تنش شوری است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی تأثیر سیلیسیم بر رشد، پاسخ‌های فیزیولوژیک و فعالیت برخی آنزیم‌های آنتی اکسیدان نیشکر تحت سطوح مختلف شوری زه آب، آزمایشی دو ساله طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱ به‌صورت گلدانی در محیط گلخانه در شرکت کشت و صنعت نیشکر دهخدا واقع در ۲۳ کیلومتری شمال شهر اهواز اجرا شد. با توجه به دمای بالاتر گلخانه نسبت به محیط به‌ویژه در ماه‌های گرم، از کولر آبی و تورهای سبز رنگ جهت تنظیم دما و رطوبت داخل گلخانه استفاده گردید. آزمایش سال اول به‌صورت اسپلیت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. برای تسهیل در انتقال آب از مخازن، آبیاری در فاکتور اصلی در سه سطح شاهد با شوری $(0/2 \pm 1/4)$ دسی‌زیمنس بر متر از آب رودخانه (S_0) و شوری‌های $(0/2 \pm 4/1)$ و $(0/2 \pm 8/2)$ دسی‌زیمنس بر متر (به‌ترتیب S_1 و S_2) از منبع زه آب، قرار گرفت. واریته به صورت فاکتور فرعی در دو سطح با نام‌های CP73-21 (V1) و CP69-1062 (V2) و زمان کاربرد کود سیلیسیم در چهار سطح شامل شاهد، بدون کاربرد سیلیسیم (Si_0)، یک ماه قبل (Si_1)، هم‌زمان (Si_2) و یک ماه بعد از اعمال سطوح شوری (Si_3) به‌عنوان فاکتور فرعی فرعی در نظر گرفته شد. زمان‌های کاربرد کود سیلیسیم در یک ماه قبل، هم‌زمان و یک ماه بعد از اعمال سطوح شوری به ترتیب مطابق با سه زمان ۵ برگی، ۷ برگی و ۹ برگی نیشکر انتخاب گردید. دیگر محققین نیز کاربرد سیلیکون به‌صورت خاک کاربرد یا همراه آب آبیاری را گزارش کرده‌اند (Silva et al., 2023; Teixeira et al., 2022). آزمایش سال دوم باتوجه به نتایج حاصل از آزمایش سال اول، بر روی واریته CP69-1062 که به‌عنوان واریته متحمل‌تر به تنش شوری تعیین شد، به‌صورت اسپلیت پلات در قالب بلوک کامل تصادفی در سه تکرار انجام گردید. فاکتور اصلی شامل آبیاری در سه سطح شوری مشابه سال اول و فاکتور فرعی زمان کاربرد سیلیسیم در دو سطح

شوری از خود نشان می‌دهند (Brenes et al., 2020). معمولاً پاسخ رقم‌های مختلف گیاهان زراعی در شرایط به تنش شوری متفاوت است. نتایج مطالعات مختلف نشان داد که تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر در گیاهان در پاسخ به تنش‌های محیطی مختلف از جمله شوری افزایش می‌یابد (Ashraf and Harris, 2004). از این رو، مکانیسم‌های پاکسازی گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر از سلول‌ها برای غلبه بر شوری که باعث تنش اکسیداتیو می‌شود، حیاتی هستند. آنزیم‌های آنتی اکسیدانی از جمله کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POX) و سوپراکسید دیسموتاز (SOD) پاک‌کننده‌های کلیدی گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر ناشی از تنش اکسیداتیو در گیاهان هستند. نتایج مطالعات نشان داده است که گیاهان با سطوح بالاتر فعالیت آنتی اکسیدانی، اعم از سازنده یا القا شده، تحمل بالاتری نسبت به تنش اکسیداتیو ناشی از تنش زیستی و غیرزیستی دارند (Rao et al., 2021).

سیلیسیم به‌عنوان یک عنصر غذایی پر مصرف مفید یا شبه ضروری و ضد تنش برای برخی از گیاهان به ویژه گرامینه‌ها و گیاهان C4 از جمله نیشکر شناخته شده است (Misra et al., 2023). سیلیسیم دارای نقش‌های مختلفی از جمله افزایش رشد، عملکرد و کیفیت محصول، فتوسنتز، تثبیت نیتروژن و ایجاد تحمل در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی مانند دمای شدید، اشعه ماوراء بنفش، سمیت فلزات سنگین، کمبود عناصر غذایی، خشکی، شوری و بیماری‌های ناشی از قارچ و باکتری می‌باشد (Epstein, 2009; Liang et al., 2015; Liang et al., 2007; Ma et al., 2004; Majeed Zargar et al., 2012; Richmond and Sussman, 2003). گزارش شده است که کاربرد کود سیلیسیم، محتوای کلروفیل، سرعت فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای نیشکر در شرایط تنش شوری را بهبود می‌دهد (Misra et al., 2023). همچنین سیلیسیم سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و کاهش تنش اکسیداتیو و پراکسیداسیون لیپیدها در نیشکر تحت شرایط تنش شوری شد (Abbasi et al., 2023).

باتوجه به تشدید کم‌آبی در استان خوزستان، استفاده از آب زهکش برای حفظ تولید و پایداری اقتصادی-اجتماعی صنعت نیشکر (*Saccharum officinarum* L.)، باوجود کاهش احتمالی عملکرد، ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. تحقیقات تنش شوری بر گیاه نیشکر عمدتاً به‌صورت آزمایشگاهی و با استفاده از نمک NaCl صورت گرفته است.

کیلوگرم در هکتار (Bezerra et al., 2019) بکار برده شده است. برای جلوگیری از شستشوی سیلیسیم و دسترسی بهتر ریشه گیاه به این کود، مقدار به کار رفته در هر زمان در دو قسط (دو نوبت آبیاری به فاصله ۳ روز) اعمال گردید. برای تهیه محلول‌های شوری از یک مخزن ۵ هزار لیتری برای نگهداری آب رودخانه و دو مخزن ۲ هزار لیتری برای زه‌آب استفاده شد. تهیه سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر با اختلاط نسبت‌های متفاوت از زه‌آب و آب رودخانه حاصل شدند. در تاریخ ۲۰ خردادماه زمانی که مرحله پنجه‌زنی پایان یافته و گیاه در مرحله اولیه رشد سریع بود (۷-۸ برگی)، تیمار شوری به صورت مرحله‌ای اجرا شد. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک زراعی، فیلترکیک، آب رودخانه (تیمار شاهد) و تیمار ۴/۲ دسی‌زیمنس بر متر و زه‌آب (تیمار S2) در جدول ۱ ارائه شده است.

عدم کاربرد (شاهد) و زمان موثرتر در آزمایش اول، یک ماه قبل از تنش (Si1) بود. واریته‌های مورد مطالعه ارقام تجاری بوده که بیشترین سطح زیر کشت شرکت‌های تابعه هلدینگ توسعه نیشکر (بیش از ۵۰ و ۲۵ درصد به ترتیب برای واریته CP69-1062 و CP73-21) را به خود اختصاص می‌دهند. از لوله هیدروفلوم از جنس پلی اتیلن نرم با قطر ۴۵ سانتی‌متر به طول ۷۵ سانتی‌متر به عنوان گلدان استفاده شد. گلدان‌ها با خاک زراعی و فیلترکیک نیشکر به نسبت ۳ به ۱ تا حدود ۸۵ کیلوگرم پر شدند. تک جوانه‌های ۳ تا ۴ سانتی‌متری در لیوان‌های یک‌بار مصرف جوانه‌دار شده، سپس به گلدان‌های اصلی منتقل شدند. کود سیلیسیم از نوع پودری (SiO_2) تولید شرکت آریا شیمی حاوی ۷۰ درصد عنصر سیلیسیم به مقدار توصیه شده ۴ کیلوگرم در هکتار به کار برده شد. (در تحقیقات انجام شده غلظت سیلیکون از ۱-۵ میلی مولار (Kafi et al., 2011) تا ۶۰ کیلوگرم در هکتار (Shen et al., 2019) و ۶۰۰

جدول ۱. نتایج آنالیز ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، فیلترکیک و زه‌آب

Table 1. Results of the analysis of the physicochemical properties of the soil, filter cake, and drainage water

پارامتر Parameter	خاک [§] Soil [§]	فیلترکیک نیشکر Sugarcane filter cake	آب رودخانه River water	تیمار ۴/۲ دسی‌زیمنس		زه‌آب Drainage water
				برمتر Treatment of 4.2 dS.m ⁻¹		
EC	dS.m ⁻¹	2.32	1.28	1.2	4.2	8.27
pH		7.6	7.8	7.50	7.29	7.85
OC	%	1.09	22.4	--	--	--
N	%	0.07	1.42	--	--	--
P	%	12.49	1.68	--	--	--
K	%	492	0.44	--	--	--
Na ⁺	meq l ⁻¹	14.5	0.22	2.00	30.00	66.5
Si	meq l ⁻¹	1.05	--	--	--	--
Cl ⁻	meq l ⁻¹	21.54	--	7.90	21.71	53.58
Ca ²⁺	meq l ⁻¹	19.2	--	5.20	14.00	25.60
Mg ²⁺	meq l ⁻¹	14.52	--	4.20	10.70	16.20

Soil Texture was Silty loam[§]

[§] بافت خاک لومی سیلتی بود.

گلدان‌های اصلی)، تعداد سه ساقه به طور تصادفی برداشت و پس از سرزنی و حذف پوشال، میانگین وزن آنها محاسبه شد. اندازه‌گیری سرعت فتوسنتز را با استفاده از دستگاه LCA4, TD Biosynthetic, Hoddesdon, UK) بعد از اعمال سطوح شوری و در شرایط تنش اندازه‌گیری شروع شد، سپس به طور ماهانه بعد از اجرای آبیاری ادامه داده شد. اندازه‌گیری حدود ساعت ۹ صبح تا نهایت ۱۲ ظهر از قسمت وسط برگ بالغ و در محدوده

به منظور اندازه‌گیری رشد ساقه گیاه نیشکر سه بوته از هر تیمار به عنوان نماینده مشخص و ارتفاع آن هر هفته اندازه‌گیری شد و در پایان دوره رشد میانگین رشد هفتگی محاسبه گردید. محتوای نسبی آب برگ با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید (Ritchie et al., 1990).

$$RWC (\%) = \frac{(FW-DW)}{(SW-DW)} \times 100 \quad [1]$$

که در این رابطه RWC درصد محتوای آب برگ، FW وزن تازه برگ، SW وزن اشباع شده برگ و DW وزن خشک برگ است. در انتهای فصل رشد (۲۸۸ روز بعد از کشت در

فواصل ۲۰ ثانیه‌ای توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۲۴۰ نانومتر قرائت گردید (Kar and Mishra, 1976). تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام گرفت و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. برازش معادلات و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم افزار Sigma Plot نسخه ۱۵/۰ انجام شد. داده‌های تغییرات مقدار ارتفاع تجمعی نیشکر طبق رابطه زیر با تابع سه پارامتره گاوس برازش داده شد. در این رابطه Y ، مقدار سرعت رشد هفتگی نیشکر در هر زمان (x) از فصل رشد می‌باشد، b ، شیب خط و x_0 زمانی است که گیاه به حداکثر مقدار رشد در هفته می‌رسد.

$$Y = ae^{[-0.5(b(x-x_0)^2)]} \quad [3]$$

نتایج و بحث

رشد هفتگی ساقه نیشکر

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات اصلی شوری و کاربرد کود سیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر میانگین رشد هفتگی نیشکر داشت (جدول ۲).

مشخص از تابش فعال فتوسنتزی (۱۳۰۰ تا ۱۵۰۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه) انجام شد. درصد نشت الکترولیت (RP) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید (Zhao et al., 1992).

$$RP\% = \left(\frac{EC1-EC0}{EC2-EC0} \right) \times 100 \quad [2]$$

EC0 هدایت الکتریکی قرائت شده اولیه ۳ تا ۵ ثانیه بعد از قرار دادن قطعات ۱ تا ۲ سانتی‌متری برگ در آب مقطر، EC1 هدایت الکتریکی قرائت شده نمونه بعد از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای ۴ درجه و EC2 هدایت الکتریکی نمونه‌ها بعد از ۱۵ دقیقه اتوکلاو و خنک شدن در دمای اتاق می‌باشد.

به‌منظور اندازه‌گیری فعالیت آن‌تی‌اکسیدانت‌ها، ابتدا نمونه‌های تر در داخل هاون چینی به همراه ازت مایع سائیده شدند. سپس ۰/۲۵ گرم پودر به دست آمده به همراه ۲/۵ میلی‌لیتر بافر استخراج شده به مدت ۲ دقیقه ورتکس گردید. از عصاره حاصله برای قرائت مقدار پروتئین محلول و سنجش کمی فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات‌پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز استفاده شد. جهت سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز، ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه در

جدول ۲. میانگین مربعات برخی صفات رشدی و فیزیولوژیکی دو واریته نیشکر تحت شوری و کاربرد سیلیسیم

Table 2. Mean square for some growth and physiological traits of two sugarcane varieties under salinity and silicon application

منابع تغییرات	df	میانگین رشد هفتگی Weekly growth mean	وزن تک ساقه Single stem weight	سرعت فتوسنتز Photosynthesis rate	محتوای نسبی آب برگ leaf relative water content	نشت الکترولیت Electrolyte leakage
Block	2	0.09	0.0006	13.40	4.81	1.46
شوری (S)	2	210.45**	2.67**	3249**	506.2**	2689**
خطای (a)	4	0.02	0.002	12.08	0.55	0.18
Error (a)						
واریته (V)	1	0.08 ^{n.s}	0.062**	256.8**	18.80**	97.53**
Variety (V)						
S×V	2	0.009 ^{n.s}	0.020**	32.52**	2.73*	1.34 ^{n.s}
خطای (b)	6	0.010	0.001	4.03	0.45	0.65
Error (b)						
سیلیسیم (Si)	3	2.90**	0.006*	5.70*	18.15**	12.65**
Silicon (Si)						
S×Si	6	0.42**	0.001 ^{n.s}	0.29 ^{n.s}	2.76*	0.88 ^{n.s}
V×Si	3	0.006 ^{n.s}	0.002 ^{n.s}	0.69 ^{n.s}	0.02 ^{n.s}	0.50 ^{n.s}
S×V×Si	6	0.019 ^{n.s}	0.002 ^{n.s}	1.69 ^{n.s}	0.51 ^{n.s}	0.66 ^{n.s}
خطای (c)	36	0.029	0.0014	1.52	0.95	0.75
error (c)						
ضریب تغییرات CV (%)		2.99	5.55	2.95	1.22	2.38

ns, * و ** به ترتیب غیرمعنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns, * and ** are non-significant and significant at 5% and 1% probability, respectively

جدول ۳. برش‌دهی اثر متقابل میانگین مربعات سطوح سیلیسیم در هر سطح شوری

Table 3. Mean square interaction slicing of silicon levels at every salinity level

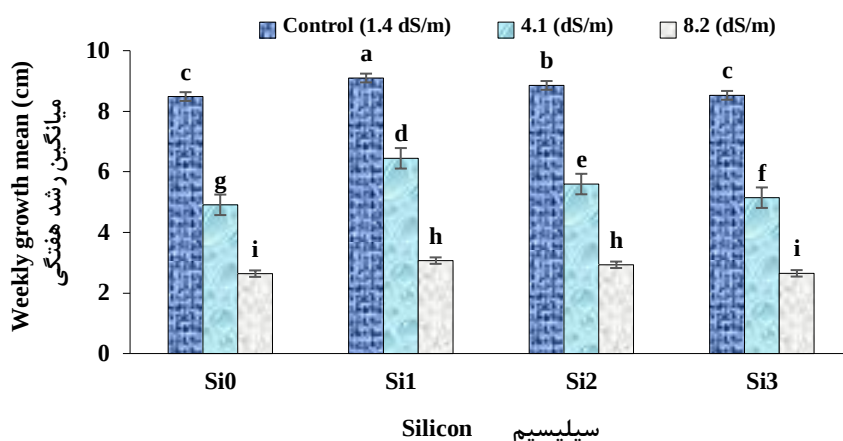
شوری Salinity	میانگین رشد هفتگی Weekly growth mean	محتوای نسبی آب برگ leaf relative water content
Control (1.4 dS.m ⁻¹)	0.50**	4.00**
S1 (4.1±0.2 dS.m ⁻¹)	2.97**	8.69**
S2 (8.2±0.2 dS.m ⁻¹)	0.27**	10.98**

ns, *, ** و *** به ترتیب غیرمعنی داری و معنی داری در سطح احتمال ۵

و ۱ درصد

ns, * and ** are non-significant and significant at 5% and 1% probability, respectively

اثر متقابل شوری × کاربرد سیلیسیم در سطح یک درصد اثر معنی‌داری بر میانگین رشد هفتگی نشان داد. برش‌دهی اثر متقابل نشان داد کاربرد کود سیلیسیم در نیشکر بسته به سطح شوری به طور معنی‌داری تأثیر متفاوتی بر میانگین رشد هفتگی داشته است (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین شوری × کاربرد سیلیسیم نشان داد بالاترین میانگین رشد هفتگی با میانگین ۹/۰۹ سانتی‌متر در هفته، در کاربرد زود هنگام کود سیلیسیم در مرحله ۵ برگی نیشکر (تیمار Si1) در سطح شوری ۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر حاصل شد که باعث افزایش ۷/۲ درصد رشد نسبت به تیمار عدم کاربرد سیلیسیم در همین سطح شوری شد (شکل ۱).



شکل ۱. اثر متقابل شوری × کاربرد سیلیسیم بر میانگین رشد هفتگی نیشکر. شاهد، بدون کاربرد سیلیسیم (Si₀), یک ماه قبل (Si₁), هم‌زمان (Si₂) و یک ماه بعد از اعمال شوری (Si₃)

Fig. 1. Interaction of salinity stress and silicon application on the weekly growth mean of sugarcane (Si₀ (no silicon application, control); Si₁ (one month before salinity stress); Si₂ (during salinity stress); and Si₃ (one month after salinity stress)).

CP73-21 شدیدتر بود. بررسی روند تغییرات رشد هفتگی نیشکر نشان داد که در واریته CP73-21 برای سطح شوری ۴/۱ دسی‌زیمنس بر متر حداکثر سرعت رشد در هفته ۹/۰۵ سانتی‌متر بوده و برای واریته CP69-1062 این مقدار ۹/۵۶ سانتی‌متر بود. اما افزایش شوری تا سطح ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر حداکثر رشد در هفته را به شدت کاهش داده که برای واریته‌های CP73-21 و CP69-1062 بترتیب ۵/۴۹ و ۵/۸۶ سانتی‌متر حاصل شد (جدول ۴).

در سطح شوری ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر رشد هفتگی در واریته CP73-21 کاهش چشمگیری داشته و از هفته ۱۸ نزدیک به صفر شد اما در واریته CP69-1062 مقدار

ضرایب مربوط به برازش معادله سه پارامتری گاوس به داده‌های رشد هفتگی نیشکر در سطوح مختلف شوری برای واریته‌های مورد مطالعه محاسبه گردید (جدول ۴). مقایسه ضرایب مربوط به نمونه‌گیری طی فصل رشد (به صورت هفتگی) نشان داد که بین سه سطح شوری بیشترین سرعت رشد هفتگی مربوط به شاهد بوده و حداکثر رشد حاصل شده برای واریته CP73-21 بعد از گذشت ۹۱/۷ روز مشاهده شد که این مقدار برای واریته CP69-1062 پس از ۹۹/۰ روز رخ داد (جدول ۴).

با افزایش سطح شوری، کاهش خطی در مقدار حداکثر رشد هفتگی مشاهده گردید که این کاهش رشد در واریته

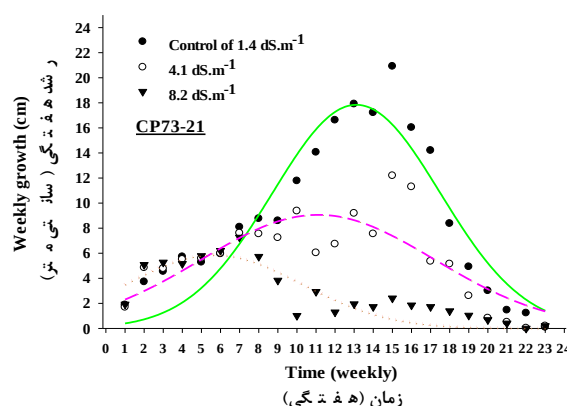
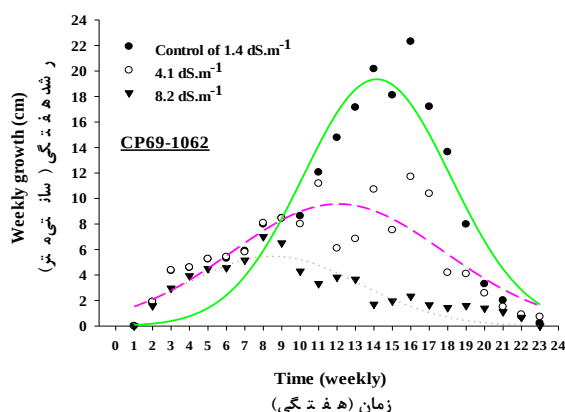
عملکرد نیشکر تحت شرایط تنش شوری از طریق ممانعت از ورود سدیم (Na^+) و افزایش جذب پتاسیم (K^+)، کلسیم (Ca^{+2}) و آهن (Fe^{+2}) توسط ریشه گیاه می‌گردد (Abbasi et al., 2023).

رشد تا هفته ۲۰ (هرچند کند) ادامه داشته و از هفته ۲۱ نزدیک به صفر گردید (شکل ۲). شوری با تعدیل غلظت یونی درون سلولی و تولید گونه‌های فعال اکسیژن بر رشد نیشکر تأثیر می‌گذارد. سیلیسیم سبب توانایی بهبود رشد و

جدول ۴. ضرایب حاصل از برازش معادله سه پارامتری گاوس به داده‌های سرعت رشد هفتگی واریته‌های CP73-21 و CP69-1062 نیشکر در طی فصل رشد تحت سطوح شوری

Table 4. Coefficients from fitting the three-parameter Gaussian equation to sugarcane growth rate data during the growing season under salinity levels of CP73-21 and CP69-1062 varieties.

شوری Salinity	a (حداکثر رشد) (maximum growth (cm))	b (شیب خط) (line slope)	x_0 (تعداد روز رسیدن به حداکثر رشد) x_0 (time to reach maximum growth)	R^2	سطح احتمال probability level
CP73-21					
Control (1.4 dS.m^{-1})	17.84 ± 1.022	4.38 ± 0.294	91.77 ± 0.289	0.871	0.0001
S1 ($4.1 \pm 0.2 \text{ dS.m}^{-1}$)	9.05 ± 0.788	6.10 ± 0.693	77.67 ± 0.618	0.669	0.0001
S2 ($8.2 \pm 0.2 \text{ dS.m}^{-1}$)	5.49 ± 0.388	4.71 ± 0.423	59.38 ± 0.392	0.803	0.0001
CP69-1062					
Control (1.4 dS.m^{-1})	19.35 ± 1.219	4.00 ± 0.294	99.05 ± 0.290	0.863	0.0001
S1 ($4.1 \pm 0.2 \text{ dS.m}^{-1}$)	9.56 ± 0.748	5.77 ± 0.567	84.38 ± 0.521	0.726	0.0001
S2 ($8.2 \pm 0.2 \text{ dS.m}^{-1}$)	5.86 ± 0.507	4.58 ± 0.625	39.53 ± 0.563	0.767	0.0001



شکل ۲. روند تغییرات رشد هفتگی نیشکر در طی فصل رشد تحت سطوح مختلف شوری در دو واریته تجاری نیشکر CP69-1062 و CP73-21. نقاط داده‌های اندازه‌گیری و خطوط حاصل از برازش تابع هستند.

Fig. 2. The weekly growth changes of sugarcane during the growing season under different levels of salinity in two commercial sugarcane varieties CP73-21 and CP69-1062. Points show the measured data and lines are function fits

قبل از اعمال شوری (0.70 kg/m^2) استفاده شده بود، وزن تک ساقه نسبت به شاهد (0.67 kg/m^2) افزایش ۹/۴ درصد نشان داد. برش‌دهی اثر متقابل شوری $\times$ واریته نشان داد که بین وزن تک ساقه دو واریته در تیمارهای شاهد ($1/4$ دسی‌زیمنس بر متر) و سطح شوری $4/1$ دسی‌زیمنس بر متر اختلاف معنی‌داری وجود دارد (جدول ۵).

وزن تک ساقه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس وزن تک ساقه نشان داد که شوری، واریته، کاربرد سیلیسیم و اثر متقابل شوری $\times$ واریته تأثیر معنی‌داری بر وزن تک ساقه نیشکر نسبت به شاهد داشتند (جدول ۲). با توجه به مقایسه میانگین‌ها، درمیان زمان‌های کاربرد سیلیسیم، تنها زمانی که سیلیسیم یک ماه

جدول ۵. برش‌دهی اثر متقابل میانگین مربعات سطوح واریته در هر سطح شوری

Table 5. Mean square interaction slicing of variety levels at every salinity level

شوری Salinity	وزن تک ساقه Single stem weight	سرعت فتوسنتز Photosynthesis rate	محتوای نسبی آب برگ leaf relative water content
Control (1.4 dS.m ⁻¹)	0.094**	205.33**	0.57 ^{n.s.}
S1 (4.1±0.2 dS.m ⁻¹)	0.005*	9.50 ^{n.s.}	16.33**
S2 (8.2±0.2 dS.m ⁻¹)	0.002 ^{n.s.}	107.10**	7.37**

ns, * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

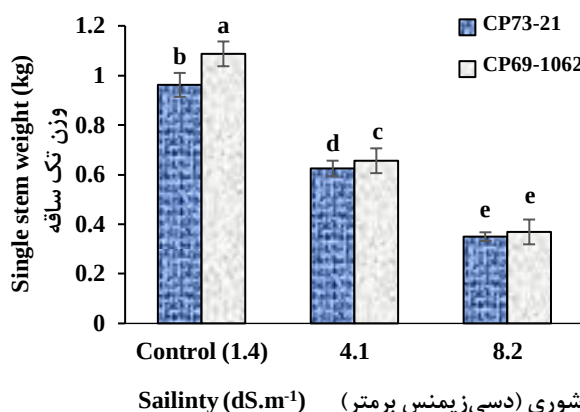
ns, * and ** are non-significant and significant at 5% and 1% probability, respectively

(al., 2002). نیشکر برای رسیدن به حداکثر عملکرد به آب و عناصر غذایی زیادی نیاز دارد، بنابراین کشت در خاک‌های شور می‌تواند منجر به کاهش شدید رشد در مقایسه با خاک‌های بدون شوری شود (Kumar et al., 2014). همچنین مشخص شده وزن تک ساقه و عملکرد گیاه نیشکر تحت تنش شوری کاهش می‌یابد (Brindha et al., 2019). هنگامی که گیاه نیشکر (۱۸۰ روز پس از کاشت) در معرض شرایط شور قرار گیرد، تعداد ساقه‌های قابل آسیاب، طول ساقه و وزن ساقه کاهش یافت (Hussain et al., 2004).

سرعت فتوسنتز

باتوجه به نتایج تجزیه واریانس، شوری، واریته، کاربرد سیلیسیم و اثر متقابل شوری × واریته تأثیر معنی‌داری بر سرعت فتوسنتز برگ نیشکر داشتند (جدول ۲). باتوجه به مقایسه میانگین‌ها، هر سه زمان کاربرد سیلیسیم، به طور معنی‌داری سرعت فتوسنتز بیشتری نسبت به شاهد داشتند. بیشترین سرعت فتوسنتز در تیمار کاربرد سیلیسیم یک ماه قبل از اعمال شوری به میزان ۴۲/۳ میکرومول دی اکسید کربن در مترمربع در ثانیه مشاهده شد که ۳/۲ درصد نسبت به شاهد عدم کاربرد سیلیسیم افزایش نشان داد (جدول ۶). باتوجه به معنی‌دار شدن اثر متقابل شوری × واریته، برش‌دهی واریته‌ها در هر سطح شوری انجام شد (جدول ۵). با توجه به نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها، در سطح شاهد (شوری ۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر)، اختلاف معنی‌داری در سرعت فتوسنتز واریته‌های CP69-1062 و CP73-21 به ترتیب معادل ۵۱/۷ و ۵۷/۴ میکرومول دی اکسید کربن در مترمربع در ثانیه مشاهده شد. واریته CP69-1062 به میزان ۱۲ درصد، سرعت فتوسنتز بیشتری نسبت به واریته CP73-21 در تیمار شاهد نشان داد. با افزایش شوری تا ۴/۱ دسی‌زیمنس بر متر سرعت فتوسنتز هر دو واریته کاهش ۳۴ و ۳۶ درصدی

با افزایش شوری به سطح ۸/۲، وزن تک ساقه هر دو واریته بدون اختلاف معنی‌دار نسبت به هم‌دیگر کاسته شد. مقایسه میانگین اثر متقابل شوری × واریته نشان داد بیشترین ارتفاع ساقه دو واریته CP73-21 و CP69-1062 در تیمار شاهد (۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر) حاصل شد. اعمال تیمار شوری ۴/۱ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش ۳۵ و ۳۹/۵ درصد وزن تک ساقه به ترتیب در واریته‌های CP73-21 و CP69-1062 نسبت به تیمار آبیاری شاهد گردید. نتایج نشان داد سطح شوری ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر وزن تک ساقه واریته CP73-21 را به مقدار ۶۳ درصد و واریته CP69-1062 را به مقدار ۶۶ درصد نسبت به تیمار شاهد شوری (۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر) کاهش داد. برتری وزن تک ساقه واریته CP69-1062 نسبت به واریته CP73-21 در همه سطوح شوری مشاهده شد (شکل ۳).



شکل ۳. اثر متقابل شوری × واریته بر وزن تک ساقه نیشکر
Fig. 3. Interaction of salinity and varieties on a stem weight of sugarcane

تأثیر شوری بر گیاهان باعث کاهش عملکرد می‌شود و بر رشد گیاه از طریق تنش اسمزی و سمیت ناشی از تجمع بیش از حد نمک در برگ تأثیر می‌گذارد (Siripornadulsil et

را نشان دادند که بین دو واریته اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. اما با افزایش سطح شوری تا ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر، سرعت فتوسنتز هر دو واریته به پایین‌ترین حد خود رسید.

اما مقدار آن در واریته CP69-1062 به طور معنی‌داری بالاتر از واریته CP73-21 (به ترتیب ۳۳/۸ و ۲۹/۶ میکرومول دی اکسید کربن در مترمربع در ثانیه) بود (شکل ۴).

جدول ۶. نتایج میانگین اثرات ساده سال اول صفات فیزیولوژیکی دو واریته نیشکر تحت شوری و کاربرد سیلیسیم

Table 6. Results of the average simple effects of the first year of physiological traits of two sugarcane varieties under salinity and silicon application

نشت الکترولیت Electrolyte leakage	محتوای نسبی آب برگ leaf relative water content	سرعت فتوسنتز Photosynthesis rate	وزن تک ساقه Single stem weight	رشد هفتگی Weekly growth	تیمارها Treatment
%	%	$\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{M}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$	kg	cm	
34.3 ^c	84.8 ^a	54.5 ^a	1.02 ^a	8.74 ^a	شوری (Salinity)
40.2 ^b	79.4 ^b	39.1 ^b	0.64 ^b	5.60 ^b	Control (1.4 dS.m ⁻¹)
44.4 ^a	75.6 ^c	31.7 ^c	0.35 ^c	2.82 ^c	4.1 dS.m ⁻¹
					8.2 dS.m ⁻¹
37.47 ^a	79.4 ^b	39.9 ^a	0.64 ^b	5.68 ^a	واریته‌ها (Varieties)
35.14 ^b	80.4 ^a	43.6 ^b	0.70 ^a	5.75 ^a	CP73-21
					CP69-1062
37.2 ^a	79.3 ^c	41.05 ^b	0.67 ^b	5.34 ^c	سیلیکون [§] (Silicon [§])
35.5 ^b	81.3 ^a	42.3 ^a	0.70 ^a	6.20 ^a	Si0
35.6 ^b	80.1 ^b	42.0 ^a	0.66 ^b	5.89 ^b	Si1
36.7 ^a	79.1 ^c	41.7 ^{ab}	0.65 ^b	5.44 ^c	Si2
					Si3

§ عدم کاربرد سیلیکون (Si0)، کاربرد سیلیکون یک ماه قبل (Si1)، هم‌زمان (Si2) و یک ماه بعد از اعمال شوری (Si3).

در هر ستون، میانگین‌هایی که حروف مشترک دارند در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

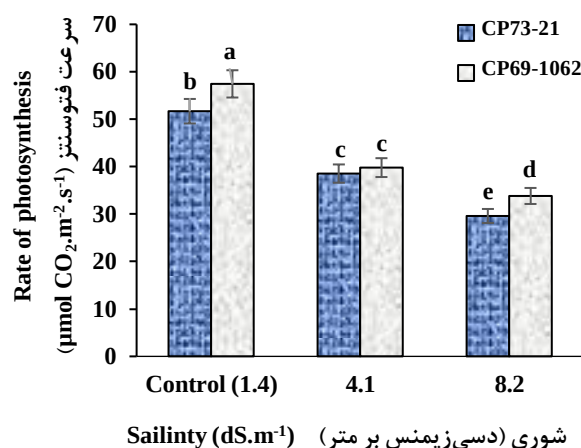
§ No application of silicon (Si0), application of silicon one month before (Si1), during (Si2), and one month after salinity treatment (Si3).

The means with the same letter in the column have no differences ($P < 0.05$)

شوری‌های ۲ تا ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر نیز گزارش شده است (Dhansu et al., 2022). همچنین برخی محقق اظهار کردند تنش شوری به‌طور مستقیم و غیر مستقیم بر شاخص سطح برگ و فتوسنتز خالص نیز تأثیر منفی دارد (Sharwood et al., 2014; Tahjib-UI-Arif et al., 2019). گزارش شده است که کاربرد سیلیسیم باعث افزایش زیست توده، سرعت فتوسنتز، راندمان کربوکسیلاسیون و افزایش تجمع نیتروژن و فسفر در نیشکر می‌شود (Frazao et al., 2020). کود سیلیسیم از طریق افزایش محتوای کلروفیل برگ نیشکر سبب افزایش سرعت فتوسنتز می‌شود (Abbasi et al., 2023).

محتوای نسبی آب برگ

براساس نتایج تجزیه واریانس، شوری، واریته، کاربرد سیلیسیم و اثر متقابل شوری × واریته و شوری × کاربرد سیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر محتوای نسبی آب برگ نیشکر داشتند (جدول ۲). در سطح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس



شکل ۴. اثر متقابل شوری × واریته بر سرعت فتوسنتز برگ نیشکر
Fig. 4. Interaction of salinity and variety on photosynthesis rate in sugarcane leaves

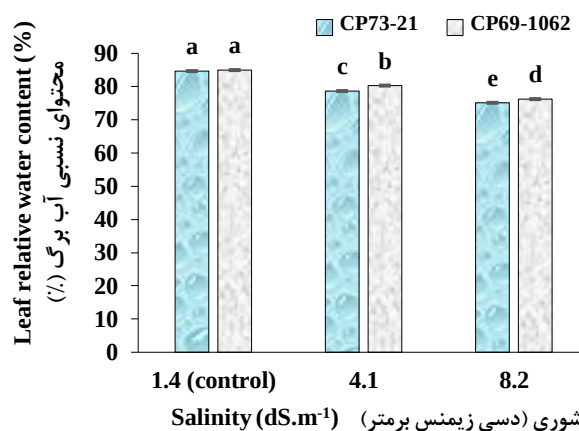
کاهش فتوسنتز فعال برگ نیشکر تحت تنش شوری می‌تواند ناشی از کاهش هدایت روزنه‌ای و عوامل فتوسنتزی برگ باشد (Zhao, 2020). سرعت فتوسنتز برگ نیشکر تحت تنش شوری بین ۱۶/۸ تا ۹۱/۴ درصد کاهش در سطوح

باتوجه به معنی‌دار شدن اثر متقابل شوری $\times$ کاربرد سیلیسیم، برش‌دهی سیلیسیم در هر سطح شوری انجام شد. نتایج حاصل از برش‌دهی نشان داد کاربرد سیلیسیم در همه سطوح شوری معنی‌دار بود (جدول ۳). به عبارت دیگر زمان کاربرد سیلیسیم در سطوح مختلف شوری تأثیر معنی‌داری بر محتوای نسبی آب برگ داشت. نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد کاربرد سیلیسیم سبب بهبود درصد محتوای نسبی آب برگ نیشکر نسبت به تیمار شاهد شد. در همه سطوح شوری محتوای نسبی آب برگ بیشتر در تیمار سیلیسیم یک ماه قبل از اعمال شوری حاصل شد. بیشترین محتوای نسبی آب برگ مربوط به تیمار کاربرد سیلیسیم یک ماه قبل از اعمال شوری با افزایش ۲ درصد نسبت به تیمار عدم کاربرد سیلیسیم (شاهد) در شرایط عدم تنش شوری (۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر) بود. تأخیر در کاربرد سیلیسیم، سبب شد که از تأثیر این بهبود دهنده در حفظ محتوای نسبی آب برگ به‌ویژه در سطوح شوری بالاتر کاسته شود (شکل ۶). برخی مطالعات نشان دادند که سیلیسیم به‌عنوان یک سد مکانیکی، مانع از جذب Na^+ توسط ریشه‌ها شده و از کاهش پتانسیل اسمزی جلوگیری می‌نماید، لذا سبب بهبود روابط آبی گیاه می‌شود. کاربرد سیلیسیم، جذب سدیم و انتقال از ریشه به اندام هوایی را تحت تنش شوری در نیشکر تا حد زیادی مهار کرد (Ashraf et al., 2009). سیلیسیم اثرات مضر تنش شوری را بر ارقام گندم دوروم و نان کاهش داده و سبب بهبود محتوای کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ در گیاهان تیمار شده گردید (Tuna et al., 2008). در برنج، رسوب سیلیسیم در بافت‌های ریشه باعث کاهش جریان ورود یون‌های سدیم شد (Gong et al., 2006). تحقیقات نشان دادند نیشکر تیمار شده با سیلیکات کلسیم، سیلیس بیشتری در لایه‌های اپیدرمی برگ خود نسبت به گیاهان تیمار نشده هستند که سبب کاهش تعرق از کوتیکول شده و حفظ محتوای آب نسبی برگ می‌گردد (Bokhtiar et al., 2012).

نشت الکترولیت

شوری، واریته و کاربرد سیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر نشت الکترولیت داشتند (جدول ۲). در سطح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر نشت الکترولیت به ترتیب ۱۰/۵ و ۱۷/۲ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. نشت الکترولیت با تفاوت معنی‌دار در واریته‌های CP69-1062 و CP73-21 به ترتیب ۳۵/۱۴ و ۳۷/۴۷ درصد بود. با توجه به مقایسه

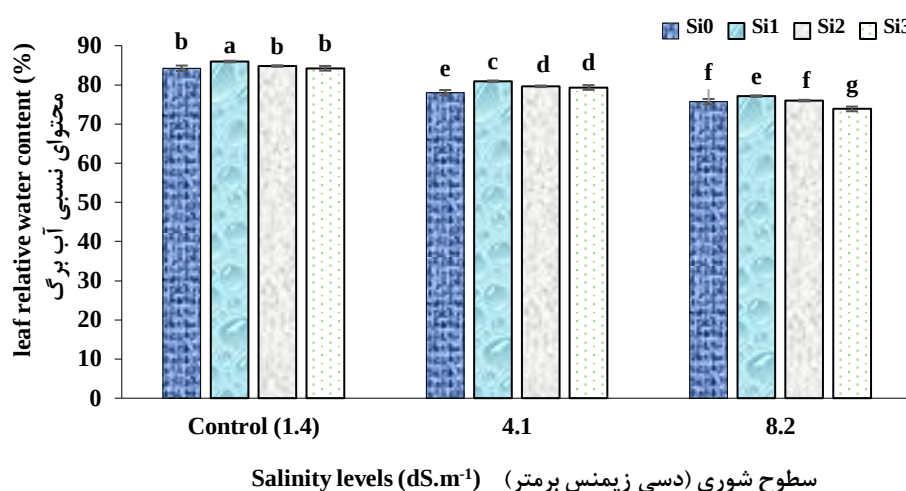
بر متر محتوای نسبی آب برگ به ترتیب ۶/۴ و ۱۱/۸ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت (جدول ۶). نتایج حاصل از برش‌دهی اثر متقابل واریته‌ها در هر سطح شوری نشان داد در تیمار عدم شوری بین واریته‌ها اختلاف معنی‌داری در محتوای نسبی آب برگ مشاهده نشد (جدول ۵). اما در سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر بین واریته‌های مورد مطالعه از لحاظ محتوای نسبی آب برگ اختلاف معنی‌دار وجود دارد. مقایسه میانگین تیمارها نشان داد در سطح شوری ۴/۱ دسی‌زیمنس بر متر محتوای نسبی آب برگ واریته CP69-1062 به مقدار ۲/۱ درصد نسبت به واریته CP73-21 بیشتر بود (شکل ۵). با افزایش شوری به ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر واریته CP69-1062 توانست ۱/۵ درصد محتوای نسبی آب برگ بیشتری نسبت به واریته CP73-21 داشته باشد. محتوای نسبی آب برگ معیار مهمی برای ارزیابی توانایی مقابله با تنش شوری است (Abdelaal et al., 2019). کاهش پتانسیل آبی ریزوسفر بدلیل تجمع بیش از حد نمک، موجب کاهش RWC می‌شود و توانایی جذب آب از خاک توسط گیاه کاهش می‌یابد (Ashraf et al., 2017). برخی محققان اظهار نمودند در گیاه ذرت رشد یافته در سطوح بالای تنش شوری، کاهش قابل توجهی در محتوای نسبی آب برگ دیده می‌شود (Ali et al., 2021; Shah et al., 2021). همچنین گزارش شده، تنش شوری در مراحل اولیه رشد نیشکر موجب کاهش محتوای نسبی آب برگ خواهد شد اما در مراحل رشد سریع نیشکر تأثیر معنی‌داری ندارد (Brindha et al., 2019).



شکل ۵. اثر متقابل شوری $\times$ واریته‌ها بر محتوای نسبی آب برگ
 Fig. 5. Interaction of salinity stress and varieties on leaf relative water content

افزودن کود سیلیسیم در خاک‌های شور سبب کاهش نشت الکترولیتی شده و از نشت یونی غشای پلاسمای و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی جلوگیری می‌کند (Heile et al., 2021). این نشان دهنده اینست که سیلیسیم به طور بالقوه دارای اثر ضد تنش شوری بواسطه تثبیت غشای پلاسمایی است (Yan et al., 2021).

میانگین‌ها، دو زمان کاربرد سیلیسیم یک ماه قبل و هم‌زمان با اعمال سطوح شوری، به طور معنی‌داری نشت الکترولیت کمتری نسبت به شاهد داشتند. نشت الکترولیت در تیمار کاربرد سیلیسیم یک ماه بعد از اعمال سطوح شوری تفاوت معنی‌داری نسبت به شاهد نشان نداد (جدول ۶). کود سیلیسیم با استحکام غشای سلولی تحت تنش شوری، گیاهان را در برابر آسیب غشایی ناشی از شوری محافظت می‌کند (Aras et al., 2020; Zhang et al., 2018).



شکل ۶. اثر متقابل شوری × کاربرد سیلیسیم بر محتوای نسبی آب برگ (شاهد، بدون کاربرد سیلیسیم (Si₀), یک ماه قبل (Si₁), هم‌زمان (Si₂) و یک ماه بعد از اعمال سطوح شوری (Si₃)).

Fig. 6. Interaction of salinity and silicon application on leaf relative water content (Si₀ (no silicon application, control); Si₁ (one month before salinity stress); Si₂ (during salinity stress); and Si₃ (30 days after salinity stress)).

دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب به میزان ۱۵/۲، ۱۳/۱ و ۲۳/۱ درصد گردید (شکل ۷a). این افزایش نشان دهنده نقش کاربرد سیلیسیم در بهبود فعالیت آنزیمی کاهش کننده تنش اکسیداتیو می‌باشد.

گیاهان متحمل به شوری علاوه بر اینکه قادر به کنترل ورود و خروج یون‌ها هستند، دارای یک سیستم آنتی‌اکسیدانی کارآمد برای حذف موثر گونه‌های اکسیژن واکنش گر هستند. گیاهان از سلول‌ها و اندام‌های سلولی در برابر اثرات گونه‌های اکسیژن واکنش گر توسط آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز، گلوتاتیون ردوکتاز، محافظت می‌کنند (Agarwal and Pandey, 2004; Ashraf and Harris, 2004).

فعالیت آنزیم کاتالاز

نتایج تجزیه واریانس نشان داد شوری، کاربرد سیلیسیم و اثر متقابل شوری × کاربرد سیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر فعالیت کاتالاز برگ نیشکر داشتند (جدول ۷). بر اساس نتایج برش‌دهی اثرات متقابل، کاربرد سیلیسیم در همه سطوح شوری بر فعالیت کاتالاز تأثیر معنی‌داری داشت (جدول ۸). مقایسه میانگین‌ها نشان داد واکنش گیاه به افزایش سطح شوری در صورت عدم کاربرد کود سیلیسیم، افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز برگ بود که این افزایش به ترتیب ۳۸/۳ و ۵۳/۴ درصد در سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر نسبت به شاهد عدم تنش شوری بود. این در حالی بود که کاربرد سیلیسیم سبب فعالیت بیشتر آنزیم کاتالاز نسبت به تیمار عدم کاربرد سیلیسیم در هر سه سطح شاهد (۱/۴)، ۴/۱ و ۸/۲

می‌دهد، در نتیجه آسیب ناشی از تنش اکسیداتیو را کاهش داده و سلامت کلی گیاهان را بهبود می‌بخشد (Hussain et al., 2023). نتایج این آزمایش مطابق با گزارش کاورزان و همکاران (Caverzan et al. 2016) مبنی بر افزایش فعالیت کاتالاز تحت تنش‌های محیطی بود.

مطالعات نشان دادند کاربرد سیلیسیم به طور قابل توجهی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مختلف نیشکر از جمله کاتالاز را در شرایط تنش کم‌آبی افزایش می‌دهد (Teixeira et al., 2022). همچنین بیان شده سیلیسیم توانایی گیاه نیشکر را در پاکسازی گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر افزایش

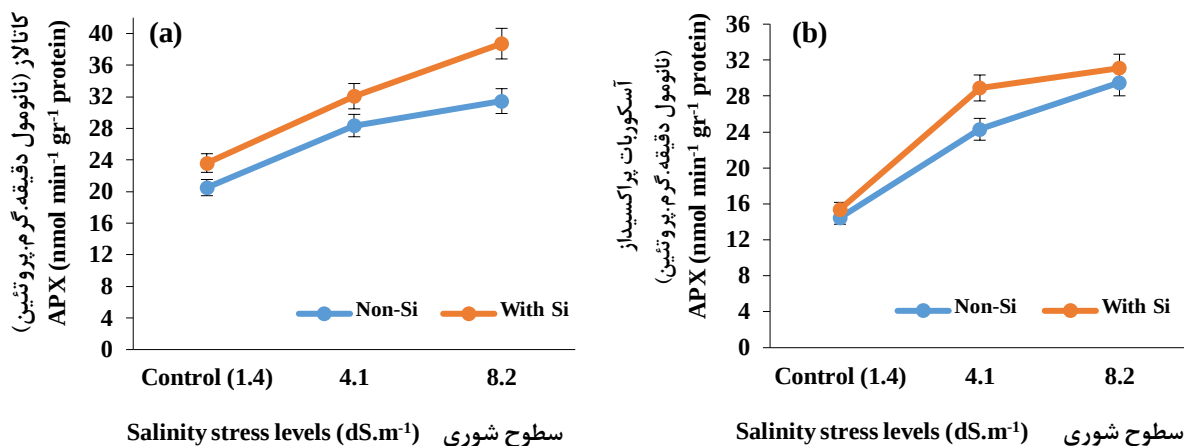
جدول ۷. میانگین مربعات شوری و کاربرد سیلیسیم بر فعالیت آنتی اکسیدانی نیشکر

Table 7. Mean square of salinity and silicon application on antioxidant activities of sugarcane

S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	فعالیت کاتالاز Catalase activity	فعالیت آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase activity	فعالیت سوپراکسید دیسموتاز Superoxide dismutase activity
Block	بلوک	2	0.27	3.43	4.34
Salinity (S)	شوری	2	259.9**	385.9**	17.15*
Error a	خطای a	4	0.76	3.18	4.24
Silicon (Si)	سیلیسیم	1	99.50**	25.44**	21.92*
S×Si	شوری × سیلیسیم	2	7.5**	5.72**	2.09 ^{n.s.}
Error b	خطای b	6	0.38	0.15	3.13
CV (%)	ضریب تغییرات (%)		2.14	1.65	9.10

ns, *, ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns, * and ** are non-significant and significant at 5% and 1% probability, respectively



شکل ۷. اثر متقابل شوری × کاربرد سیلیسیم بر فعالیت کاتالاز (a) و فعالیت آسکوربات پراکسیداز (b)

Fig. 7. Interaction of salinity and silicon application on catalase activity (a) and ascorbate peroxidase activity (b)

(جدول ۸). مقایسه میانگین اثر متقابل شوری × کاربرد سیلیسیم نشان داد در تیمار شاهد (۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر) کاربرد سیلیسیم سبب افزایش معنی‌داری (۶/۵ درصد) در فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز نسبت به تیمار عدم کاربرد سیلیسیم شد (شکل ۷b). در سطوح شوری ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در پی

فعالیت آسکوربات پراکسیداز

شوری، کاربرد سیلیسیم و اثر متقابل شوری × کاربرد سیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز را نشان دادند (جدول ۷). نتایج حاصل از برش‌دهی اثرات متقابل نشان داد کاربرد سیلیسیم در همه سطوح شوری تأثیر معنی‌داری بر فعالیت آسکوربات پراکسیداز داشت

تحمل نیشکر به تنش شوری را بهبود می دهد (Thorne et al., 2020).

فعالیت سوپراکسید دیسموتاز

نتایج حاصل از تجزیه واریانس این صفت نشان داد که شوری و کاربرد سیلیسیم تأثیر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز داشتند (جدول ۷). در میان سطوح شوری، بیشترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در تیمار شاهد (۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر) بدست آمد. افزایش سطح شوری تا سطح ۴/۱ و ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را به ترتیب ۱۰/۵ و ۱۸/۸ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد (شکل ۸a). کاربرد سیلیسیم سبب افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نسبت به تیمار عدم کاربرد سیلیسیم شد. این تحقیق نشان داد که کاربرد کود سیلیسیم در نیشکر موجب افزایش ۱۲ درصد فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز گردید (شکل ۸b). افزایش در فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز توانایی گیاه را در تحمل تنش شوری بهبود و سبب حفظ و پایداری فعالیت سلولی گیاه می‌گردد. تنش شوری از مهم‌ترین عوامل تنش غیرزیستی بوده که گیاهان را از جوانه‌زنی تا مرحله برداشت با مشکل مواجه می‌نماید (Bhat et al., 2020). گزارشات نشان دادند کاربرد سیلیسیم سبب افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز بین ۳۳ تا ۹۶ درصد در شرایط کم‌آبی نیشکر می‌گردد (Verma et al., 2019).

کاربرد سیلیسیم به ترتیب افزایش ۱۸/۹ و ۵/۴ درصد نسبت به شرایط عدم کاربرد سیلیسیم نشان داد.

جدول ۸. برش‌دهی میانگین مربعات اثر متقابل شوری × کاربرد سیلیسیم

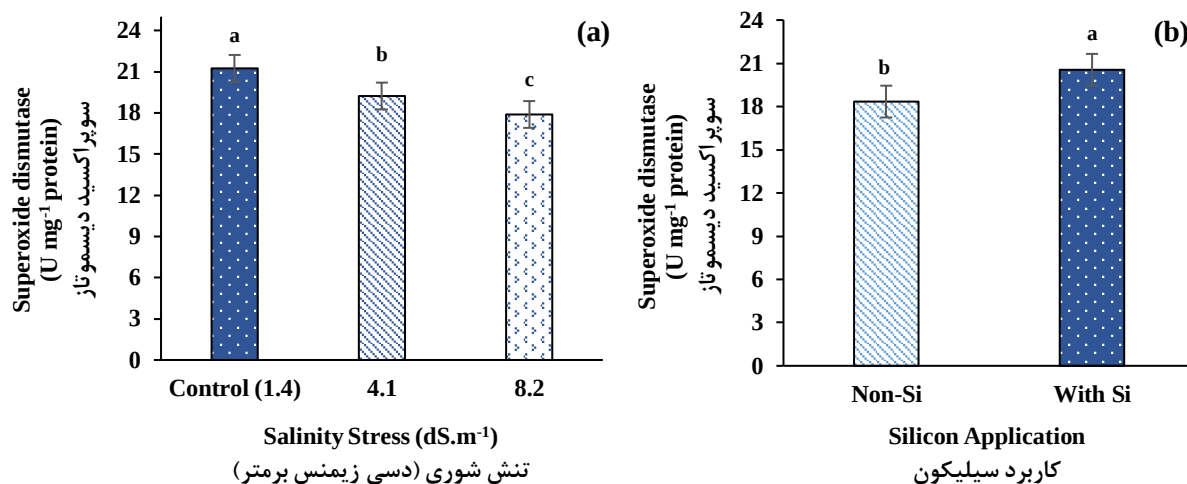
Table 8. Slicing the interaction (mean square) of silicon application at each level of salinity

فعالیت	فعالیت	فعالیت
سقوط شوری	کاتالاز	پراکسیداز
Salinity levels	Catalase activity	Ascorbate peroxidase activity
1.4±0.2 dS.m ⁻¹	14.57**	1.30*
4.1±0.2 dS.m ⁻¹	20.83**	31.74**
8.2±0.2 dS.m ⁻¹	79.20**	3.84**

ns، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns, * and ** are non-significant and significant at 5% and 1% probability, respectively

تحقیقات نشان داده است که آسکوربات پراکسیداز ناشی از تنش‌ها می‌تواند محتوای H₂O₂ در سلول و سیگنال‌دهی ردوکس را تنظیم کند، سپس تحمل گیاه به تنش اسمزی را افزایش دهد (Saxena et al., 2020). سیلیسیم نقش مهمی در افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در نیشکر تحت تنش شوری دارد (Misra et al., 2023). سیلیسیم از طریق بهبود ظرفیت آنتی اکسیدانی، تنظیم بیان ژن و افزایش جذب مواد مغذی (مانند پتاسیم) افزایش می‌دهد. این مکانیسم‌ها



شکل ۸. تأثیر شوری (a) و کاربرد سیلیسیم (b) بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز

Fig.8. Effect of salinity (a) and silicon application (b) on Superoxide dismutase enzyme activity

نتیجه‌گیری نهایی

باتوجه به نتایج این تحقیق می‌توان بیان نمود که در شرایط بروز تنش کم‌آبی جهت آبیاری گیاه نیشکر در فصل رشد، با استفاده از زه‌آب‌ها حاصل از کشت و کار این گیاه که شوری متوسط (حدود ۴ دسی‌زیمنس بر متر) داشته باشند، به روند تولید نیشکر ادامه داد. همچنین به‌منظور بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و بهبود تحمل گیاه نیشکر به تنش

شوری کاربرد کود سیلیسیم در برنامه تغذیه‌ای گیاه پیشنهاد داده می‌شود.

سیاسگزاری

بدین‌وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز به‌خاطر تقبل هزینه‌های این تحقیق قدردانی می‌گردد (شماره پژوهانه SCU.AA1401.336).

منابع

- Abbasi, R.P., Rafiq, K., Fatima, S., Javed, M.T., Azeem, M., Akram, M.S., 2023. In vitro silicon supplementation enhanced acclimatisation and growth of sugarcane (*Saccharum officinarum*) via improved antioxidant and nutrient acquisition patterns in saline soil. *Functional Plant Biology*. 51. <https://doi.org/10.1071/FP22275>
- Abdelaal, K.A., EL-Maghraby, L.M., Elansary, H., Hafez, Y.M., Ibrahim, E.I., El-Banna, M., El-Esawi, M., Elkelish, A., 2019. Treatment of sweet pepper with stress tolerance-inducing compounds alleviates salinity stress oxidative damage by mediating the physio-biochemical activities and antioxidant systems. *Agronomy*. 10, 26. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010026>
- Agarwal, S., Pandey, V., 2004. Antioxidant enzyme responses to NaCl stress in *Cassia angustifolia*. *Biologia Plantarum*. 48, 555-560. <https://doi.org/10.1023/B:BIOP.0000047152.07878.e7>
- Ali, M., Afzal, S., Parveen, A., Kamran, M., Javed, M.R., Abbasi, G.H., Malik, Z., Riaz, M., Ahmad, S., Chattha, M.S., Ali, M., Ali, Q., Uddin, M.Z., Rizwan, M., Ali, S., 2021. Silicon mediated improvement in the growth and ion homeostasis by decreasing Na⁺ uptake in maize (*Zea mays* L.) cultivars exposed to salinity stress. *Plant Physiology and Biochemistry*. 158, 208-218. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.10.040>
- Aras, S., Keles, H., Eşitken, A., 2020. Silicon nutrition counteracts salt-induced damage associated with changes in biochemical responses in apple. *Bragantia*. 79, 1-7. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20190153>
- Ashraf, M., Harris, P.J., 2004. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. *Plant Science*. 166, 3-16. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.10.024>
- Ashraf, M., Rahmatullah, Afzal, M., Ahmed, R., Mujeeb, F., Sarwar, A., Ali, L., 2009. Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt-sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Plant and Soil*. 326, 381-391. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0019-9>
- Ashraf, M., Shahzad, S.M., Imtiaz, M., Rizwan, M.S., Iqbal, M.M., 2017. Ameliorative effects of potassium nutrition on yield and fiber quality characteristics of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under NaCl stress. *Soil and Environment*. 36, 51-58. <http://doi.org/10.25252/SE/17/31054>
- Bezerra, B.K.L., Lima, G.P.P., dos Reis, A.R., Silva, M.D.A., de Camargo, M.S., 2019. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. *Acta Physiologiae Plantarum*. 41, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>
- Bhat, J. A., Deshmukh, R., Zhao, T., Patil, G., Deokar, A., Shinde, S., Chaudhary, J., 2020. Harnessing High-throughput phenotyping and genotyping for enhanced drought tolerance in crop plants. *Journal of Biotechnology*. 324, 248-260. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.11.010>
- Bokhtiar, S., Huang, H.-R., Li, Y.-R., 2012. Response of sugarcane to calcium silicate on yield, gas exchange characteristics, leaf nutrient concentrations, and soil properties in two different soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 43, 1363-1381. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.670516>
- Brenes, M., Pérez, J., González-Orenga, S., Solana, A., Boscaiu, M., Prohens, J., Plazas,

- M., Fita, A., Vicente, O., 2020. Comparative studies on the physiological and biochemical responses to salt stress of eggplant (*Solanum melongena*) and its rootstock *S. torvum*. Agriculture. 10, 328. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080328>
- Brindha, C., Vasantha, S., Arunkumar, R., 2019. The response of sugarcane genotypes subjected to salinity stress at different growth phases. Journal of Plant Stress Physiology. 5, 28-33. <https://doi.org/10.25081/jpsp.2019.v5.5643>
- Caverzan, A., Casassola, A., Brammer, S.P., 2016. Antioxidant responses of wheat plants under stress. Genetics and molecular Biology. 39, 1-6. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-GMB-2015-0109>
- Dhansu, P., Kumar, R., Kumar, A., Vengavasi, K., Raja, A.K., Vasantha, S., Meena, M.R., Kulshreshtha, N., Pandey, S.K., 2022. Differential physiological traits, ion homeostasis and cane yield of sub-tropical sugarcane varieties in response to long-term salinity stress. Sustainability. 14, 13246. <https://doi.org/10.3390/su142013246>
- Epstein, E., 2009. Silicon: its manifold roles in plants. Annals of Applied Biology. 155, 155-160. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x>
- Fahad, S., Hussain, S., Matloob, A., Khan, F.A., Khaliq, A., Saud, S., Hassan, S., Shan, D., Khan, F., Ullah, N., 2015. Phytohormones and plant responses to salinity stress: a review. Plant Growth Regulation. 75, 391-404. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-0013-y>
- FAO., 2020. Soils Portal, Management, Salt-Affected Soils <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/salt-affected-soils/more-information-on-salt-affected-soils/en/>
- Frazao, J.J., Prado, R.M., de Souza Junior, J.P., Rossatto, D.R., 2020. Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. Scientific Reports. 10, 12492. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69310-6>
- Gong, H.J., Randall, D.P., Flowers, T.J., 2006. Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow. Plant, Cell & Environment. 29, 1970-1979. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01572.x>
- Heile, A.O., Aslam, Z., Hussain, A., Aslam, M., Saleem, M.H., Abualreesh, M.H., Alatawi, A., Ali, S., 2021. Alleviation of cadmium phytotoxicity using silicon fertilization in wheat by altering antioxidant metabolism and osmotic adjustment. Sustainability. 13, 11317. <https://doi.org/10.3390/su132011317>
- Hussain, A., Khan, Z.I., Ashraf, M., Rashid, M.H., Akhtar, M.S., 2004. Effect of salt stress on some growth attributes of sugarcane cultivars CP-77-400 and COJ-84. International Journal of Agriculture and Biology. 6, 188-191. <http://doi:1560-8530/2004/06-1-188-191>
- Hussain, B., Riaz, L., Li, K., Hayat, K., Akbar, N., Hadeed, M.Z., Zhu, B., Pu, S., 2023. Abiogenic silicon: Interaction with potentially toxic elements and its ecological significance in soil and plant systems. Environmental Pollution. 122689. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122689>
- Kafi, M., Nabati, J., Masoumi, A., Mehrgerdi, M. Z., 2011. Effect of salinity and silicon application on oxidative damage of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.]. Pakistan Journal of Botany. 43, 2457-2462.
- Kar, M., Mishra, D., 1976. Catalase, Peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. Plant Physiology. 57, 315-319. <https://doi.org/10.1104/pp.57.2.315>
- Kumar, T., Khan, M.R., Jan, S.A., Ahmad, N., Ali, N.N., Zia, M.A., Roomi, S., Iqbal, A., Ali, G.M., 2014. Efficient regeneration and genetic transformation of sugarcane with AVP1 gene. American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences. 14, 165-171. <https://doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2014.14.02.12304>
- Liang, X., Wang, H., Hu, Y., Mao, L., Sun, L., Dong, T., Nan, W., Bi, Y., 2015. Silicon does not mitigate cell death in cultured tobacco BY-2 cells subjected to salinity without ethylene emission. Plant Cell Reports. 34, 331-343. <https://doi.org/10.1007/s00299-014-1712-6>
- Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y.G., Christie, P., 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. Environmental Pollution. 147, 422-428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>
- Liu, P., Yin, L., Wang, S., Zhang, M., Deng, X., Zhang, S., Tanaka, K., 2015. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in *Sorghum bicolor* L.

- Environmental and Experimental Botany. 111, 42-51.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.10.006>
- Ma, J.F., Mitani, N., Nagao, S., Konishi, S., Tamai, K., Iwashita, T., Yano, M., 2004. Characterization of the silicon uptake system and molecular mapping of the silicon transporter gene in rice. *Plant Physiology*. 136, 3284-3289.
<https://doi.org/10.1104/pp.104.047365>
- Majeed Zargar, S., Ahmad Macha, M., Nazir, M., Kumar Agrawal, G., Rakwal, R., 2012. Silicon: A multitasked micronutrient in OMICS perspective—an update. *Current Proteomics*. 9, 245-254.
<https://doi.org/10.2174/157016412805219152>
- Misra, V., Mall, A., Ansari, S.A., Raheem, A., Tripathi, M., Ansari, M.I., 2023. Silicon as a beneficial nutrient for productivity augmentation and abiotic/biotic stress tolerance in sugarcane. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 102944.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102944>
- Rao, V.P., Sengar, R., Singh, R., 2021. Identification of salt tolerant sugarcane cultivars through phenotypic, physiological and biochemical studies under abiotic stress. *Plant Physiology Reports*. 26, 256-283.
<https://doi.org/10.1007/s40502-021-00581-5>
- Richmond, K.E., Sussman, M., 2003. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. *Current Opinion in Plant Biology*. 6, 268-272.
[https://doi.org/10.1016/s1369-5266\(03\)00041-4](https://doi.org/10.1016/s1369-5266(03)00041-4)
- Ritchie, S.W., Nguyen, H.T., Holaday, A.S., 1990. Leaf water content and gas-exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science*. 30, 105-111.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x>
- Saxena, S.C., Salvi, P., Kamble, N.U., Joshi, P.K., Majee, M., Arora, S., 2020. Ectopic overexpression of cytosolic ascorbate peroxidase gene (Apx1) improves salinity stress tolerance in *Brassica juncea* by strengthening antioxidative defense mechanism. *Acta Physiologiae Plantarum*. 42, 1-14.
<https://doi.org/10.1007/s11738-020-3032-5>
- Serrano, R., Mulet, J.M., Rios, G., Marquez, J.A., De Larinoa, I.F., Leube, M.P., Mendizabal, I., Pascual-Ahuir, A., Proft, M., Ros, R., 1999. A glimpse of the mechanisms of ion homeostasis during salt stress. *Journal of Experimental Botany*. 1023-1036.
<https://www.jstor.org/stable/23696207>
- Shah, T., Latif, S., Saeed, F., Ali, I., Ullah, S., Alsahli, A.A., Jan, S., Ahmad, P., 2021. Seed priming with titanium dioxide nanoparticles enhances seed vigor, leaf water status, and antioxidant enzyme activities in maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. *Journal of King Saud University-Science*. 33, 101207.
<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.10.004>
- Sharwood, R.E., Sonawane, B.V., Ghannoum, O., 2014. Photosynthetic flexibility in maize exposed to salinity and shade. *Journal of Experimental Botany*. 65, 3715-3724.
<https://doi.org/10.1093/jxb/eru130>
- Shen, X.-F., Zhao, Z.-H., Chen, Y., 2019. Effects of intercropping with peanut and silicon application on sugarcane growth, yield and quality. *Sugar Technology*. 21, 437-443.
<https://doi.org/10.1007/s12355-018-0667-2>
- Silva, J.L.F.D., Prado, R.D.M., Alves, T.L., Lata-Tenesaca, L.F., Soares, M.B., 2023. New strategy for silicon supply through fertigation in sugarcane integrating the pre-sprouted seedling phase and field cultivation. *Scientific Reports*. 13, 1230.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-27323-3>
- Siripornadulsil, S., Traina, S., Verma, D.P., Sayre, R.T., 2002. Molecular mechanisms of proline-mediated tolerance to toxic heavy metals in transgenic microalgae. *Plant Cell*. 14, 2837-2847.
<https://doi.org/10.1105/tpc.004853>
- Tahjib-UI-Arif, M., Sohag, A.A.M., Afrin, S., Bashar, K.K., Afrin, T., Mahamud, A.S.U., Polash, M.A.S., Hossain, M.T., Sohel, M.A.T., Brestic, M., 2019. Differential response of sugar beet to long-term mild to severe salinity in a soil-pot culture. *Agriculture*. 9, 223.
<https://doi.org/10.3390/agriculture9100223>
- Teixeira, G.C.M., de Prado, R.M., Rocha, A.M.S., de Oliveira Filho, A.S.B., da Sousa Junior, G.S., Gratão, 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, 17487.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9>
- Thorne, 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, 1221.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01221>
- Tuna, A.L., Kaya, C., Higgs, D., Murillo-Amador, B., Aydemir, S., Girgin, A.R., 2008. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. *Environmental and Experimental Botany*. 62, 10-16.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.06.006>
- 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, 1-7.
<http://dx.doi.org/10.26717/BJSTR.2019.15.002685>
- Xie, Z., Song, R., Shao, H., Song, F., Xu, H., Lu, Y., 2015. Silicon improves maize photosynthesis in saline-alkaline soils. *Scientific World Journal*. 245072.
<https://doi.org/10.1155/2015/245072>
- Yan, G., Fan, X., Zheng, W., Gao, Z., Yin, C., Li, T., Liang, Y., 2021. Silicon alleviates salt stress-induced potassium deficiency by promoting potassium uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Physiology*. 258-259, 153379.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153379>
- Zhang, W., Yu, X., Li, M., Lang, D., Zhang, X., Xie, Z., 2018. Silicon promotes growth and root yield of *Glycyrrhiza uralensis* under salt and drought stresses through enhancing osmotic adjustment and regulating antioxidant metabolism. *Crop protection*. 107, 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.01.005>
- Zhao, D., 2020. The USDA-ARS sugarcane field station in canal point, Florida: 100 years of scientific research and sugarcane cultivar development. *Sugar Journal*. 82, 13-21.
- Zhao, Y., Aspinall, D., Paleg, L., 1992. Protection of membrane integrity in *Medicago sativa* L. by glycinebetaine against the effects of freezing. *Journal of Plant Physiology*. 140, 541-543.
[https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)80785-6](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)80785-6)