"نشریه علوم زراعی ایران"
جلد بیست و هفتم، شماره ۱، بهار ۱٤۰٤

مقاله پژوهشی

اثر محلول‌پاشی برگی سیلیکون بر عملکرد و کیفیت نیشکر (*Saccharum officinarum* L.) در شرایط کم‌آبیاری

Effect of foliar application of silicon on yield and quality of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under deficit irrigation conditions

علی حمدی شنگری[۱]، افراسیاب راهنما[۲]، علی منصفی[۳]، حبیب‌اله روشنفکر[۴] و حسین نوروزی[۵]

چکیده

حمدی شنگری، ع.، ا. راهنما، ع. منصفی، ح. روشنفکر و ح. نوروزی. ۱٤۰٤. اثر محلول‌پاشی برگی سیلیکون بر عملکرد و کیفیت نیشکر (*Saccharum officinarum* L.) در شرایط کم‌آبیاری. **نشریه علوم زراعی ایران. ۲۷ (۱): ۳۹ -۲۳.**

به‌منظور ارزیابی اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی برگی نانوذرات سیلیکا و سیلیکات سدیم بر عملکرد و ویژگی‌های کیفی نیشکر رقم CP69-1062، آزمایشی به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱٤۰۳ در مزرعه پلنت کشت و صنعت امام خمینی (ره) در شهرستان شوشتر استان خوزستان اجرا شد. سه دور آبیاری (۷، ۱۰ و ۱۳ روز) به‌عنوان کرت‌های اصلی و پنج سطح محلول‌پاشی برگی (عدم محلول‌پاشی؛ شاهد، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیکا و ۳۰۰ و ٦۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم) به‌عنوان کرت‌های فرعی در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که با افزایش دور آبیاری عملکرد نی، طول ساقه، تعداد ساقه‌های قابل آسیاب، طول میانگره میانی، بهره‌وری آب و ویژگی‌های کیفی عصاره شامل محتوای ساکارز شربت (پل)، مواد جامد محلول در شربت (بریکس)، خلوص شربت، میزان قند قابل استحصال و عملکرد قند به طور معنی‌داری کاهش یافتند. محلول‌پاشی نانوذرات سیلیکا، به‌ویژه غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، باعث کاهش معنی‌دار آثار منفی کم‌آبیاری شده و عملکرد نی، عملکرد قند و بهره‌وری آب از طریق بهبود صفات تعداد ساقه، طول ساقه و طول میانگره‌ها به طور قابل‌توجهی افزایش یافتند. بیشترین بهره‌وری آب در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیکا و ٦۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم در تیمار دور آبیاری ۱۰ روز (۳/۸ کیلوگرم بر متر مکعب) به دست آمد. با افزایش دور آبیاری، اثر مثبت محلول‌پاشی، به‌ویژه نانوذرات سیلیکا، حفظ شد، اما عملکرد نی کاهش یافت. بیشترین عملکرد نی (۱٤۱ تن در هکتار) در تیمار محلول‌پاشی نانوذرات سیلیکا با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر در دور آبیاری هفت روز و کمترین مقدار آن در تیمار عدم محلول‌پاشی در دور آبیاری ۱۳ روز (۷۰ تن در هکتار) مشاهده شد. نتایج این آزمایش نشان داد که محلول‌پاشی نانوذرات سیلیکا و سیلیکات سدیم می‌توانند به‌عنوان یک راهبرد موثر در شرایط کم‌آبیاری در زراعت نیشکر در نظر گرفته شوند. برای تأیید پایداری اثر محلول‌پاشی نانوذرات سیلیکا و سیلیکات سدیم و بهینه‌سازی مصرف آنها در مقیاس بزرگ در زراعت نیشکر، اجرای آزمایش‌های بلندمدت مزرعه‌ای با تمرکز بر عملکرد نی، عملکرد شکر و کارایی مصرف آب توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بریکس، پل، خلوص شربت، نانوذرات سیلیکا، عملکرد نی و نیشکر

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰ این مقاله مستخرج از رساله دکتری نگارنده اول می‌باشد

۱- دانشجوی دکتری دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز. اهواز، ایران
۲- استاد دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز. اهواز، ایران (مکاتبه کننده، a.rahnama@scu.ac.ir ✉)
۳- دانشیار دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز. اهواز، ایران
۴- دانشیار دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز. اهواز، ایران
۵- پژوهشگر موسسه تحقیقات و آموزش توسعه نیشکر و صنایع جانبی خوزستان، اهواز، ایران

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

Effect of foliar application of silicon on yield and quality of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under deficit irrigation conditions

Hamdi Shengri, A.[1], Rahnama, A.[2], Monsefi, A.[3], Roshanfekr, H.[4] and Noroozi, H.[5]

ABSTRACT

Hamdi Shengri, A., Rahnama, A., Monsefi, A., Roshanfekr, H. and Noroozi, H. 2025. Effect of foliar application of silicon on yield and quality of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under deficit irrigation conditions. **Iranian Journal of Crop Sciences. 27(1): 23-39. (In Persian).**

Introduction: Drought stress is one of the major environmental constraints affecting growth, yield, and sugar production of sugarcane. Due to its high-water demand, sugarcane is highly sensitive to water deficiency, leading to significant reduction in yield under deficit irrigation conditions. Silicon-based nanoparticles, particularly nanosilica, have gained attention for their effective role for enhancing plant tolerance to environmental stresses. This experiment aimed to investigate the effects of nanoparticles silica and sodium silicate on the yield and qualitative traits of sugarcane under irrigation interval treatments.

Materials and Methods: The experiment was conducted in split-plot arrangements in randomized complete block design with three replications using CP69-1062 cultivar during the 2024-2025 growing season. The main plots included three irrigation intervals (7, 10, and 13 days) and the sub-plots included five levels of foliar application: without application (control), nano silica at concentrations of 150 and 300 mg.l^{-1}, sodium silicate at concentrations of 300 and 600 mg.l^{-1}. Cane length, number of millable stem, intermode length, cane yield, water productivity, and juice quality characteristics such as sucrose content (Pol), dissolved particles (Brix), purity, white sugar content, and sugar yield were measured and recorded.

Results: Results showed that cane length, cane yield, number of millable stem, sugar yield and juice quality, white sugar content, Brix, Pol, and juice purity significantly decreased by increased irrigation interval. The sugar yield significantly decreased under irrigation after 10 and 13 days by 15.8% and 41.8%, respectively, compared to irrigation after 7 days. The highest cane yield (141 ton.ha^{-1}) obtained with 300 mg.l^{-1} nano silica under the 7 day irrigation interval, and the lowest cane yield (70 ton.ha^{-1}) belonged to the control treatment under the 13 day irrigation interval. Foliar application of nano silica, particularly at 300 mg.l^{-1}, alleviated the negative effects of deficit irrigation and effectively enhanced sugar yield by 20.7%, when compared to nano silica -deficient plants. The application of 300 mg.l^{-1} nano silica showed the highest cane and sugar yield, and water productivity through increases in the number of millable stem, cane height and intermode length. The highest water productivity (3.8 kg.m^{-3}) achieved at 300 mg.l^{-1} nano silica and 600 mg.l^{-1} sodium silicate under the 10 day irrigation interval. The positive effect of silicon, especially nano silica, was maintained by increased irrigation interval, but the cane yield decreased. However, foliar application of nano silica, especially at 300 mg.l^{-1}, effectively reduced the adverse effects of deficit irrigation.

Conclusions: Foliar application of silica nanoparticles, particularly at a concentration of 300 mg.l^{-1}, effectively reduced the negative effects of water deficit stress on sugarcane. The results of this experiment provides evidence that foliar application of exogenous silica nanoparticles (300 mg.l^{-1} nano silica) can be an effective strategy in improvement of sugarcane productivity and quality properties under deficit irrigation conditions. To confirm the sustainability of these effects and optimize their large-scale application, conducting long-term field experiments focusing on cane yield, sugar yield, and water use efficiency is recommended.

Key words: Brix, Cane yield, Juice purity, Nano silica particles, Pol and Sugarcane

Received: April 15, 2025 **Accepted**: **July, 2025**

1. PhD Student, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2. Professor, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (Corresponding author, ✉ a.rahnama@scu.ac.ir)
3. Associate Prof., Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
4. Associate Prof., Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
5. Researcher, Khuzestan Sugarcane Research and Training Institute, Ahvaz, Iran

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

مقدمه

رشد و نمو گیاهان زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، عمدتا تحت تاثیر انواع تنش‌های غیر زیستی مانند دمای بالا و خشکی قرار می‌گیرد (Rahnama *et al*., 2024; Salehi *et al*., 2023). تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی است که باعث ایجاد چالش‌های اساسی در تامین امنیت غذایی و پایداری سامانه‌های زراعی شده است (De Camargo *et al*., 2017). نیشکر یک گیاه زراعی راهبردی در صنایع قند و تولید انرژی زیستی است که به دلیل نیاز آبی بالا، به‌شدت تحت تاثیر کمبود آب قرار می‌گیرد (Kumar *et al*., 2023). گزارش شده است که کمبود آب باعث بیش از ۵۰ درصد کاهش عملکرد نیشکر می‌شود (Silva *et al*., 2008; Hemaprabha *et al*., 2004). این کاهش عمدتا به‌دلیل اختلال در فرآیندهای کلیدی مانند فتوسنتز، انتقال مواد فتوسنتزی و توسعه ریشه است (Jangpromma *et al*., 2012). در واکنش به کمبود آب، علاوه بر این، بسته شدن روزنه‌ها، تبادلات گازی و فعالیت فتوسنتزی گیاه کاهش یافته که باعث کاهش عملکرد و کیفیت محصول نیشکر می‌شود (Moore and Botha, 2014). در شرایط تنش خشکی، کاهش در تخصیص منابع به بخش‌های مختلف گیاه، به‌ویژه توسعه ریشه برای جذب آب از خاک، باعث کاهش رشد اندام‌های هوایی و کاهش عملکرد گیاه می‌شود (Rahnama *et al*., 2024).

با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش شدت و فراوانی دوره‌های خشکی، حساسیت گیاه نیشکر به کمبود آب در مراحل مختلف رشد اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. نتایج تحقیقات نشان داده است که مراحل پنجه‌زنی و رشد رویشی بیشترین حساسیت را به تنش خشکی دارند، در حالی که تنش ملایم در مرحلهٔ رسیدگی می‌تواند باعث افزایش تجمع ساکارز شود (De Camargo *et al*., 2017). تنش اسمزی ناشی از کمبود آب باعث کاهش پتانسیل آب برگ، کاهش هدایت روزنه‌ای و کاهش سرعت فتوسنتز گیاه می‌شود (Rahnama *et al*., 2010) و در شرایط تنش شدید، این محدودیت‌ها می‌توانند باعث آسیب به آنزیم‌های فتوسنتزی و اختلال در تثبیت کربن شوند. از سوی دیگر آبیاری بیش از حد نیشکر، باعث کاهش کارایی مصرف آب و افزایش تلفات ناشی از تبخیر، رواناب و نفوذ عمقی می‌شود. با توجه به اینکه زراعت نیشکر معمولاً در خاک‌های شنی با ظرفیت نگهداری آب پایین انجام می‌شود، احتمال وقوع تنش خشکی و آسیب به گیاه بیشتر است. کمبود آب، به‌ویژه در مرحله شکل‌گیری ساقه، باعث کاهش زیست توده و تولید شکر در نیشکر می‌شود (De Camargo *et al*., 2017).

با توجه به اهمیت اقتصادی و صنعتی نیشکر، توسعه راهکارهای مدیریتی برای مقابله با تنش خشکی ضروری است. بهینه‌سازی مدیریت آبیاری و انتخاب ارقام متحمل همراه با روش‌های به‌زراعی و استفاده از مواد محرک رشد، نقش مهمی در افزایش تحمل به تنش و پایداری عملکرد نیشکر دارند (De Camargo *et al*., 2017). در این رابطه، استفاده از سیلیکات‌ها به‌ویژه نانوذرات سیلیکا به‌دلیل توانایی در کاهش آثار نامطلوب تنش‌های غیرزیستی از جمله تنش خشکی، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است (Luyckx *et al*., 2017). اگرچه سیلیکون عنصری ضروری برای رشد گیاهان به‌شمار نمی‌رود، شواهد فراوانی وجود دارد که نشان می‌دهد این عنصر با ایجاد موانع فیزیکی در دیواره سلولی، باعث کاهش تعرق، بهبود کارایی مصرف آب، و تعدیل تنش اکسیداتیو شده و در حفظ عملکرد گیاهان در شرایط خشکی مؤثر باشد (Mittal *et al*., 2020; Epstein, 2009).

نانوذرات از طریق محلول‌پاشی یا جذب توسط ریشه، به‌راحتی در بافت‌های گیاهی نفوذ کرده و تاثیر چشمگیری بر شاخص‌های فیزیولوژیک و عملکرد گیاهان دارند (Ferreira *et al*., 2017). سازوکارهای

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

حفاظتی نانوذرات سیلیکا شامل افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، کاهش خسارت اکسیداتیو، بهبود جذب عناصر غذایی و حفظ مؤثرتر آب در بافت‌های گیاهی است (Mittal *et al*., 2020).

با توجه به ضرورت مدیریت تنش خشکی در زراعت نیشکر و پتانسیل نانوذرات سیلیکا در بهبود رشد و عملکرد گیاه در شرایط کم‌آبیاری، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه اثر نانوذرات سیلیکا و سیلیکات سدیم بر ویژگی‌های مورفولوژیک و عملکرد و کیفیت نیشکر در شرایط کم‌آبیاری انجام شد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی کارایی نانو ذرات سیلیکا و سیلیکات سدیم بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک و عملکرد کمی و کیفی نیشکر در شرایط کم‌آبیاری آزمایشی مزرعه‌ای به‌صورت کرت‌های یک بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۳ در مزارع شرکت کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (ره) در شهرستان شوشتر استان خوزستان با مختصات جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل دورهای آبیاری ۷، ۱۰ و ۱۳ روز به‌عنوان کرت‌های اصلی و پنج سطح محلول‌پاشی برگی (عدم محلول‌پاشی؛ شاهد، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیکا و ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) به‌عنوان کرت‌های فرعی بودند. نانوذرات سیلیکا از نوع سوسپانسیون نانوذرات سیلیکا کلوئیدی (شرکت مرک، آلمان) با اندازه ذرات ۵ تا ۳۵ نانومتر و خلوص ۹۹/۹ درصد بودند. مقدار آب آبیاری طی دوره رشد گیاه در دورهای آبیاری ۷، ۱۰ و ۱۳ روز به‌ترتیب ۳۸، ۳۳ و ۳۰ هزار متر مکعب در هکتار بود. تیمارهای کم آبیاری از زمان رشد سریع نیشکر تا انتهای دوره رشد اعمال شدند. تیمارهای محلول‌پاشی در دو نوبت و در مرحله رشد سریع گیاه (مرحلهٔ ۳ بر اساس مقیاس BBCH) از اوایل فروردین با فاصله زمانی ۱۵ روز اعمال شدند. محلول‌پاشی با استفاده از سم‌پاش پشت‌تراکتوری به‌صورت یکنواخت روی سطح برگ‌ها انجام شد. محلول‌پاشی در هر نوبت از ساعت ۸ تا ۱۰ صبح انجام شد. هر واحد آزمایشی شامل پنج ردیف کاشت به طول شش متر بود و نمونه‌برداری از دو ردیف کاشت وسط انجام شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه محل اجرای آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس گزارش های قبلی، حد بحرانی سیلیس قابل جذب خاک برای نیشکر ۴۹ تا ۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (Liang *et al*., 2015). بر این اساس، محتوای سیلیس خاک محل اجرای آزمایش در وضعیت کمبود قرار داشته است. اطلاعات هواشناسی در محل اجرای آزمایش نیز در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج تجزیه خاک و دستورالعمل‌های توصیه‌شده مؤسسه تحقیقات نیشکر، مقدار ۴۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار (از منبع کود اوره) به مزرعه داده شد. آزمایش روی مزرعه پلنت رقم CP69-1062 اجرا شد. کاشت در تاریخ ۱۸ اردیبهشت سال ۱۴۰۲ با تراکم ۳۰ هزار قلمه در هکتار انجام شد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 1. Physical and chemical properties of the soil at the experiment site

عمق خاک Soil depth (cm)	مواد آلی O.C (%)	روی Zn	منگنز Mn	آهن Fe	مس Cu	سدیم Na	پتاسیم K	فسفر P	سیلیکون Si	نیتروژن N (%)	pH	هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)
		(mg kg^{-1})										
0-30	0.85	0.42	4.6	7.7	2.8	329	206.0	6.2	32	0.09	7.6	1.91
30-60	0.56	0.32	3.7	5.3	1.8	450	175.0	4.3	27	0.07	7.6	1.82

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

جدول ۲- اطلاعات هواشناسی محل اجرای آزمایش (۱۴۰۳)

Table 2. Meteorological information of the experiment site (2024)

Month	ماه	تبخیر ماهانه Monthly evaporation (mm)	تبخیر روزانه Daily evaporation (mm)	ساعات آفتابی Sunny hours (hr)	رطوبت نسبی RH (%)	میانگین دما Mean temp. (˚C)	دمای حداکثر Max. temp. (˚C)	دمای حداقل Min. temp. (˚C)
Apr.	فروردین	194.2	6.2	290.6	53.0	22.2	29.8	14.7
May	اردیبهشت	253.4	8.1	292.1	46.0	26.8	34.7	18.9
Jun.	خرداد	331.8	10.7	377.5	38.5	33.6	44.1	23.1
Jul.	تیر	302.0	9.7	374.9	47.1	35.4	45.8	25.0
Aug.	مرداد	275.9	8.9	355.8	52.0	35.8	45.2	26.5
Sep.	شهریور	225.3	7.2	335.9	53.3	33.2	42.6	23.7

برای اندازه‌گیری عملکرد نی در مرحله رسیدگی محصول، از هر واحد آزمایشی، بوته‌ها از مساحت سه متر مربع به طور کامل کف‌بر شده و پس از جداسازی برگ‌ها، ساقه‌ها توزین شد. طول میانگره میانی، طول ساقه، تعداد گره در ساقه، تعداد ساقه و قطر ساقه نیز اندازه‌گیری شدند. با محاسبه نسبت عملکرد نی به حجم آب مصرفی، بهره‌وری آب آبیاری بر حسب کیلوگرم نی بر متر مکعب آب محاسبه شد.

برای ارزیابی 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 کنترل کیفیت کشت و صنعت نیشکر امام خمینی منتقل شده و پس از آسیاب و عصاره‌گیری شربت، محتوای ساکارز شربت (پل) و مواد جامد محلول در شربت (بریکس) اندازه‌گیری شدند. پس از آن درجه خلوص شربت و میزان قند قابل استحصال محاسبه شدند. میزان قند شربت با استفاده از دستگاه پلاریمتر (ساکاریمتر) اندازه‌گیری و با استفاده از جدول پل فاکتور (ضریب اصلاح پل) اصلاح و مقدار پل واقعی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

(رابطه ۱) پل فاکتور× عدد قرائت شده در دستگاه پلاریمتر = ساکارز شربت (پل) (درصد)

بریکس شربت با استفاده از دستگاه رفراکتومتر اندازه‌گیری شد. درجه خلوص شربت (درصد) از نسبت پل به بریکس محاسبه شد. میزان قند قابل استحصال با استفاده از رابطه‌های ۲ و ۳ محاسبه شد.

(رابطه ۲) کیفیت شربت/ ۱۰۰ = قند ناخالص (درصد)

(رابطه ۳) قند ناخالص × ۰/۸۳ = قند قابل استحصال (درصد)

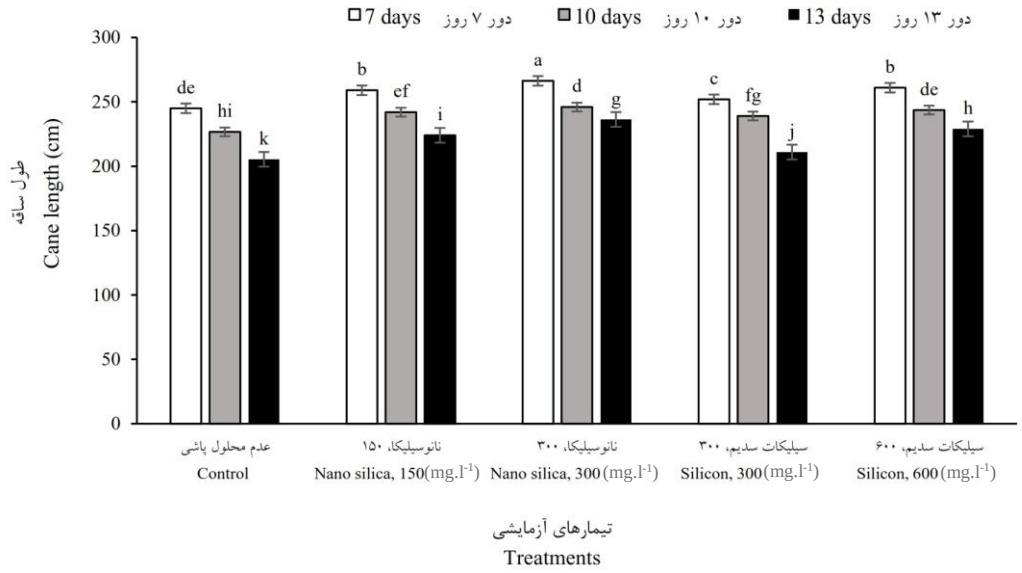
عملکرد قند از حاصلضرب عملکرد نی و میزان قند قابل استحصال محاسبه شد. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS 9.4 انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی و برهمکنش آنها در سطح احتمال یک درصد اثر معنی‌داری بر طول ساقه داشتند. با افزایش دور آبیاری از ۷ به ۱۳ روز، کاهش قابل ملاحظه‌ای در طول ساقه مشاهده شد، به‌طوری که بیشترین کاهش در تیمار شاهد (بدون محلول‌پاشی) مشاهده شد. در مقابل، در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا در فواصل آبیاری هفت روز، بیشترین طول ساقه (۲۶۰ سانتی‌متر) مشاهده شد که این نتایج، کارایی نانوذرات سیلیکا در کاهش آثار تنش خشکی را نشان می‌دهد (شکل ۱). این یافته‌ها نشان می‌دهد که عملکرد

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

نانوذرات سیلیکا به دلیل فراهمی زیستی و جذب بیشتر، نسبت به کاربرد سیلیکات سدیم در افزایش تحمل گیاه به کم‌آبی برتری داشت. سیلیکون با بهبود وضعیت آبی گیاه، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تقویت دیواره‌های سلولی، به حفظ آماس سلولی و افزایش اندازه سلول در شرایط کمبود آب کمک می‌کند. نتایج یک آزمایش در برنج نشان داد که مصرف سیلیکون در شرایط تنش خشکی بر ارتفاع بوته و وزن زیست توده اثر مثبت داشت (Zhang *et al*., 2024). کمبود آب از طریق تاثیر بر رشد گیاه، اثر مستقیمی بر طول ساقه نیشکر دارد. این اثر از طریق کاهش طول میانگره‌ها و ارتفاع بوته به‌عنوان شاخصی از اثر منفی تنش خشکی در نظر گرفته شده و شدت آن در ارقام مختلف متفاوت است (Reyes *et al*., 2020).



شکل ۱- مقایسه میانگین طول ساقه نیشکر در برهمکنش تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی سیلیکون

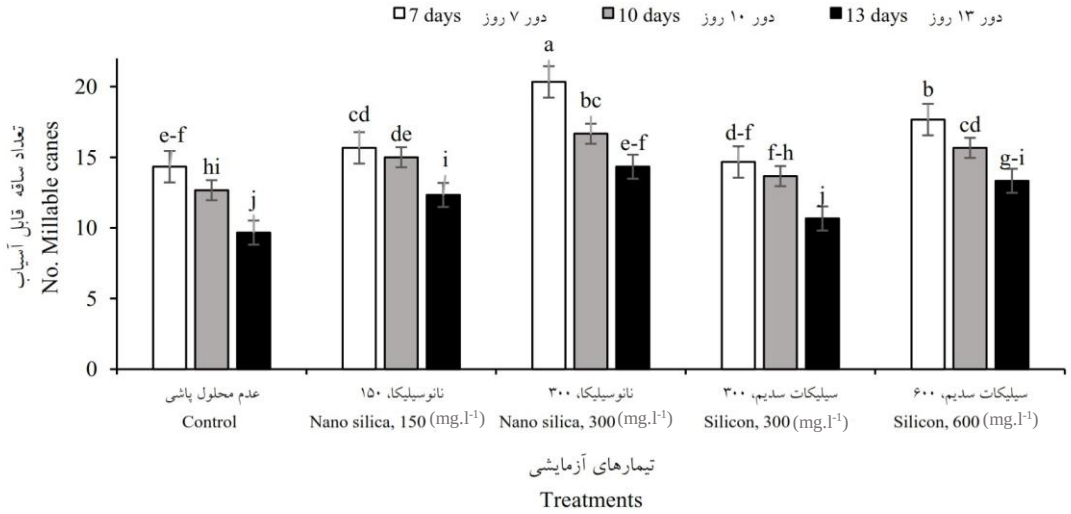
Fig. 1. Mean comparison of cane length of sugarcane in interaction of irrigation interval and foliar application of silicon treatments

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی و برهمکنش آن‌ها در سطح یک درصد اثر معنی‌داری بر تعداد ساقه‌های قابل آسیاب نیشکر داشتند. با افزایش دور آبیاری از ۷ به ۱۳ روز، تعداد ساقه‌های قابل آسیاب به طور معنی‌داری کاهش یافت. این کاهش به اثر منفی کم‌آبی بر مراحل حساس رشد، به‌ویژه پنجه‌زنی و دوره رشد سریع اولیه گیاه نسبت داده می‌شود که تشکیل پنجه و توسعه ساقه را مختل می‌کند (De Camargo *et al*., 2017). در مقابل، محلول‌پاشی نانوسیلیکا و سیلیکات سدیم در مقایسه با تیمار عدم محلول‌پاشی باعث افزایش تعداد ساقه‌ها شد. بیشترین تعداد ساقه‌های قابل آسیاب (۲۰ ساقه در متر مربع) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا و دور آبیاری هفت روز و کمترین تعداد (۱۰ ساقه در متر مربع) در تیمار عدم محلول‌پاشی و دور آبیاری ۱۳ روز ثبت شدند (شکل ۲).

تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا در کلیه تیمارهای دور آبیاری برتری داشت و باعث افزایش تعداد ساقه‌های قابل آسیاب شد. این موضوع می‌تواند به توانایی نانوسیلیکا در بهبود جذب عناصر غذایی و بهبود فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه در شرایط تنش آبی مرتبط باشد. تیمارهای ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم نیز تعداد ساقه‌ها را به طور معنی‌داری نسبت به شاهد بهبود بخشیدند، اما تیمار ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم اثری کمتر در مقایسه با ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر



شکل ۲- مقایسه میانگین تعداد ساقه‌های قابل آسیاب نیشکر در برهمکنش تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی سیلیکون

Fig. 2. Mean comparison of number of millable canes of sugarcane in in interaction of irrigation interval and foliar application of silicon treatments

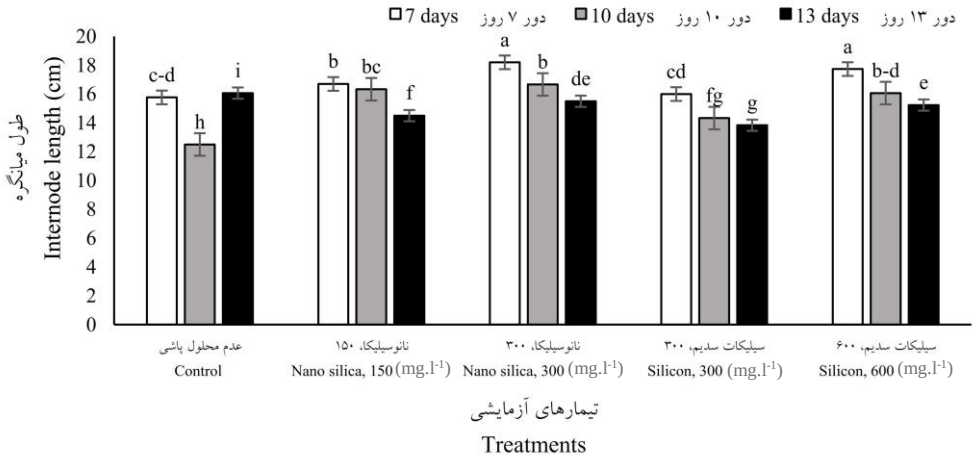
نانوسیلیکا داشت (شکل ۲). این تفاوت ممکن است به دلیل محدودیت‌های جذب و انتقال سیلیکون در غلظت‌های بالاتر و یا فرم‌های معمولی آن باشد. تنش آبی یک عامل محدودکننده شناخته شده است که با کاهش تشکیل پنجه و توسعه ساقه، باعث کاهش رشد و عملکرد نیشکر می‌شود (Bamrungrai *et al.*, 2021). این آثار به‌ویژه در مراحل اولیه رشد مشهودتر است و می‌تواند باعث کاهش عملکرد ساقه و تولید شکر شود (De Camargo *et al.*, 2017). گزارش شده است مصرف سیلیکون، به‌ویژه در فرم نانو، با بهبود کارایی مصرف آب، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تقویت ساختار دیوارهٔ سلولی، باعث کاهش آثار منفی تنش آبی می‌شود (Muhtadi *et al.*, 2024). در آزمایش حاضر، نانوسیلیکا در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر باعث تعدیل آثار نامطلوب افزایش دور آبیاری شده و تعداد ساقه‌های قابل آسیاب را در مقایسه با سیلیکات سدیم به شکل مؤثرتری حفظ شدند. این برتری احتمالاً به دلیل اندازهٔ کوچک‌تر ذرات نانوسیلیکا و قابلیت نفوذ و جذب بهتر آن در گیاه است.

نتایج تجزیه و اریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و برهم‌کنش دور آبیاری و محلول‌پاشی در سطح احتمال یک درصد اثر معنی‌داری بر طول میانگره میانی نیشکر داشتند. افزایش دور آبیاری از ۷ به ۱۳ روز باعث کاهش طول میانگره شد که این موضوع احتمالا به محدودیت دسترسی به آب و کاهش فشار آماس سلول‌ها در شرایط کم‌آبی مربوط است. در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا با دور آبیاری هفت روز، بیشترین طول میانگره (۱۸/۲ سانتی‌متر) و کمترین مقدار (۱۲/۵ سانتی‌متر) در تیمار عدم محلول‌پاشی با دور آبیاری ۱۰ روز ثبت شدند (شکل ۳). این تفاوت نشان‌دهندهٔ اثر مثبت نانوسیلیکا در رشد میانگره‌ها در شرایط آبیاری بهینه و حتی شرایط کم‌آبی است.

در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا در کیله تیمارهای دور آبیاری، بیشترین طول میانگره مشاهده

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

شد، در حالی که در تیمار ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم اثربخشی کمتری دیده شد (شکل ۳). این نتایج حاکی از برتری نانوسیلیکا نسبت به سیلیکات سدیم است. سیلیکون با کاهش تعرق و بهبود کارایی مصرف آب، باعث بهبود روابط آبی گیاه در شرایط تنش خشکی می‌شود (Johnson *et al*., 2022). علاوه بر این، سیلیکون با تقویت دیواره‌های سلولی، حفظ یکپارچگی غشاها و افزایش فعالیت آنزیم‌های



شکل ۳- مقایسه میانگین طول میانگره نیشکر در برهمکنش تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی سیلیکون

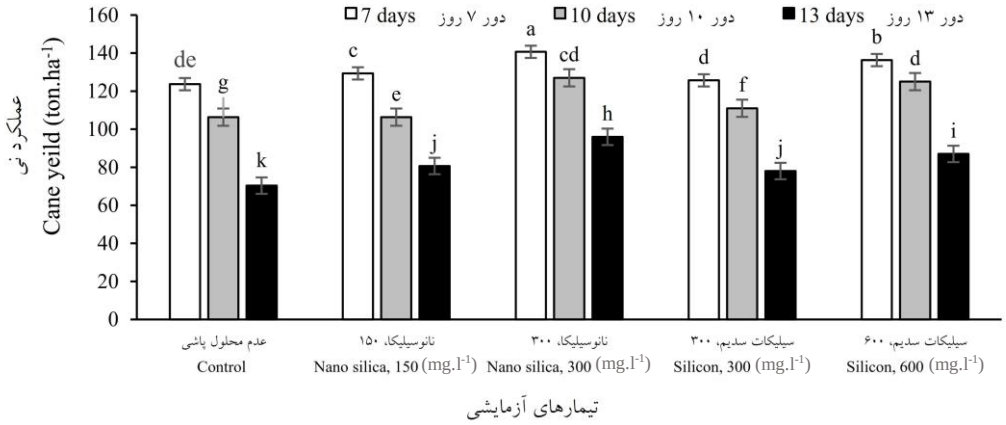
Fig. 3. Mean comparison of internode length of sugarcane in in interaction of irrigation interval and foliar application of silicon treatments

آنتی‌اکسیدانی، باعث کمک به رشد سلول‌ها و در نتیجه افزایش طول میانگره‌ها در شرایط محدودیت آب می‌شود (Epstein, 2009). برتری نانوسیلیکا در مقایسه با سیلیکات سدیم به سطح تماس بالاتر و حلالیت بیشتر آن نسبت داده می‌شود که باعث تسهیل جذب و انتقال سیلیکون در گیاه تسهیل می‌شود (Siddiqui *et al*., 2014). این ویژگی نانوسیلیکا در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر به طور خاص، امکان دسترسی مؤثرتر بافت‌های گیاهی به سیلیکون را فراهم کرده و باعث حفظ رشد میانگره‌ها حتی در دورهای آبیاری طولانی‌تر می‌شود. کاهش اثرگذاری سیلیکات سدیم در غلظت ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر ممکن است به محدودیت‌های جذب یا تجمع بیش از حد سیلیکون در فرم غیرنانو مربوط باشد که باعث کاهش کارایی آن می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که محلول‌پاشی نانوسیلیکا، به‌ویژه در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، می‌تواند آثار نامطلوب کم‌آبی بر طول میانگره را تعدیل کند. این تأثیر با بهبود روابط آبی و تقویت فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه مرتبط است.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی و برهمکنش آنها در سطح احتمال یک درصد اثر معنی‌داری بر عملکرد نی داشتند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش دور آبیاری از ۷ به ۱۳ روز، عملکرد نی ۳۷ درصد کاهش یافت. عملکرد نی در تیمارهای ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا به‌ترتیب ۵ و ۲۱ درصد و در تیمارهای ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم به‌ترتیب ۵ و ۱۶ درصد نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی برتری داشت. بیشترین مقدار عملکرد نی (۱۴۱ تن در هکتار) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا و دور آبیاری هفت روز و کمترین مقدار آن (۷۰ تن در هکتار) در تیمار عدم محلول‌پاشی و دور آبیاری ۱۳ روز به‌دست آمد (شکل

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

۴). تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا در کلیه تیمارهای دور آبیاری، موثرترین تیمار در کاهش آثار منفی کم‌آبی شناخته شد. عملکرد نی در تیمارهای ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم نیز نسبتا مشابهی بود، اما در مقایسه با تیمار تیمار عدم محلول‌پاشی، برتر بودند. هر چند تیمار ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم نیز در مقایسه با تیمار عدم محلول‌پاشی، باعث افزایش عملکرد شد، اما این افزایش در مقایسه با تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا به مراتب کمتر بود (شکل ۴).



شکل ۴- مقایسه میانگین عملکرد نی نیشکر در برهمکنش تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی سیلیکون

Fig. 4. Mean comparison of cane yield of sugarcane in interaction of irrigation interval and foliar application of silicon treatments

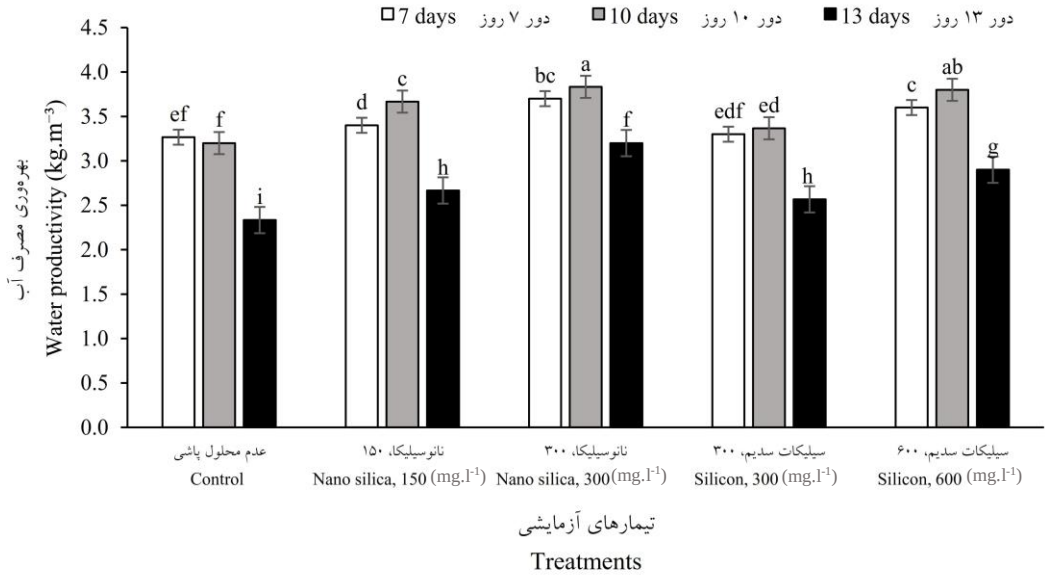
میزان کاهش عملکرد ناشی از افزایش دور آبیاری در تیمارهای نانوسیلیکا (به ویژه در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) به طور قابل توجهی کمتر از تیمار عدم محلول‌پاشی بود که این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش محتوای آب نسبی، بهبود فتوسنتز و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی توسط نانوسیلیکا باشد (Ning *et al.*, 2023). گزارش شده است که عدم استفاده از سیلیکون باعث ۲۸ تا ۳۶ درصد کاهش عملکرد ساقه در نیشکر می‌شود (De Camargo *et al.*, 2017)، که این موضوع اهمیت مصرف سیلیکون، به‌ویژه در فرم نانو را در شرایط کم‌آبی نشان می‌دهد.

نتایج نشان داد که محلول‌پاشی نانوسیلیکا به‌ویژه در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، باعث بهبود تحمل به کم‌آبی و حفظ عملکرد نیشکر شد. اگرچه سیلیکات سدیم نیز اثر مثبتی داشت، اما کارایی آن در مقایسه با نانوسیلیکا به مراتب کمتر بود (شکل ۱). این موضع به جذب و انتقال مؤثرتر نانوسیلیکا در مقایسه با سیلیکات سدیم نسبت داده شده است (Fellet *et al.*, 2021). برتری نانوذرات سیلیکا را می‌توان به ویژگی‌های نانومقیاس آن‌ها، شامل اندازه کوچک‌تر ذرات (افزایش نفوذپذیری)، سطح ویژه بالاتر (بهبود جذب)، و تعامل موثرتر با بافت‌های گیاهی نسبت داد.

نتایج تجزیه و اریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی و برهمکنش آنها بر بهره‌وری مصرف آب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین مقدار بهره‌وری مصرف آب (۳/۸ کیلوگرم بر متر مکعب) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا و ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم در تیمارهای دور آبیاری ۱۰ روز به‌دست آمد. با افزایش دور آبیاری، اثر مثبت تیمارهای سیلیکون به‌ویژه نانوسیلیکا قابل توجه

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

بود، اما بهره‌وری کلی آب کاهش یافت. تیمار ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم نیز در بهبود بهره‌وری مصرف آب موثر بود، اما کارایی آن به ویژه در دورهای آبیاری کمتر، تا حدودی کمتر از تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا بود. به‌نظر می‌رسد که در شرایط کمبود آب، محلول‌پاشی ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا می‌تواند راهکار مناسبی برای افزایش بهره‌وری مصرف آب باشد (شکل ۵).



شکل ۵- مقایسه میانگین بهره‌وری آب نیشکر در برهمکنش تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی سیلیکون

Fig. 5. Mean comparison of water productivity of sugarcane in interaction of irrigation interval and foliar application of silicon treatments

رابطه بین دور آبیاری و بهره‌وری آب تحت تأثیر عوامل محیطی و ویژگی‌های گیاه قرار دارد. نتایج تحقیقات نشان داده است که در برخی از گیاهان، کاهش دفعات آبیاری با محدود کردن هدررفت آب، بهره‌وری آب را افزایش می‌دهد (Zayed *et al*., 2017). در آزمایش حاضر، منطبق با نتایج سایر تحقیقات (Nobre Cunha *et al*., 2020) محلول‌پاشی سیلیکون با بهبود فتوسنتز، افزایش هدایت روزنه‌ای و کاهش تعرق، به حفظ آب در گیاه کمک کرد. گزارش شده است مصرف سیلیکون یک راهکار پایدار، با تقویت تحمل به خشکی و بهبود روابط آبی، باعث بهبود بهره‌وری آب در نیشکر می‌شود (Verma *et al*., 2021). نانوسیلیکا، از طریق تقویت پایداری غشای سلولی و فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، باعث حفاظت از گیاه در شرایط کم‌آبی می‌شود (Hafez *et al*., 2021). به‌علاوه، مصرف نانوسیلیکا با افزایش جذب دی‌اکسید کربن و محتوای کلروفیل، باعث افزایش کارایی فتوسنتزی گیاه شده و تثبیت کربن به ازای هر واحد آب مصرفی را بهبود می‌دهد (Kaya *et al*., 2006). این سازوکارها نشان‌دهنده برتری نانوسیلیکا نسبت به سیلیکات سدیم در شرایط کم‌آبی است.

نتایج تجزیه و اریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی بر محتوای ساکارز شربت (پل) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. بیشترین میزان ساکارز (۱۷/۴ درصد) در دور آبیاری هفت روز و کمترین مقدار آن (۱۶/۳ درصد) در دور آبیاری

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

۱۳ روز مشاهده شد. این تفاوت به دسترسی بیشتر آب در دورهای کوتاه‌تر آبیاری نسبت داده می‌شود که باعث بهبود تعرق گیاه و بهبود فرآیندهای متابولیکی مرتبط با تولید و انباشت ساکارز می‌شوند (Mehareb and Gadallah, 2020; Franco *et al.*, 2015). کاهش دفعات آبیاری احتمالا بر اثر ایجاد تنش آبی، ساخت و ذخیره‌سازی قندها را محدود کرده و باعث کاهش محتوای ساکارز شده است.

بیشترین میزان ساکارز (۱۷/۳ درصد) در تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا و کمترین مقدار آن (۱۶/۴ درصد) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم ثبت شد (جدول ۳). این نتایج نشان می‌دهد که تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا نسبت به سایر تیمارها، از جمله سیلیکات سدیم، تاثیر بیشتری بر افزایش محتوای ساکارز داشته است. سیلیکون با به تاخیر انداختن واکنش‌های معکوس و اکسیداسیون نهایی قندها، باعث حفظ و افزایش تولید ساکارز شده و از تجزیه آن به قندهای ساده جلوگیری می‌کند. به‌علاوه، سیلیکون در تنظیم انتقال قند از طریق سیستم آوندی نقش دارد، هرچند سازوکارهای دقیق این فرآیند هنوز به طور کامل شناخته نشده و نیازمند تحقیقات بیشتری است (Albiasetti *et al.*, 2021). این آثار به‌ویژه در شرایط تنش مانند کمبود آب یا شوری برجسته‌تر می‌شوند، زیرا سیلیکون با بهبود روابط آبی و کاهش تنش اکسیداتیو، متابولیسم قند را بهینه می‌کند (De Camargo *et al.*, 2017; Hemaprabha *et al.*, 2004).

نتایج نشان داد که دور آبیاری هفت روز همراه با محلول‌پاشی ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا، باعث افزایش محتوای ساکارز شد. برتری نانوسیلیکا در مقایسه با سیلیکات سدیم، می‌تواند به اندازهٔ کوچک‌تر ذرات و جذب موثرتر آن توسط گیاه مرتبط باشد که باعث بهبود فرآیندهای فیزیولوژیک مرتبط با تولید قند می‌شود. با این حال، کاهش کارایی تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم ممکن است به محدودیت‌های جذب یا اشباع شدگی آن در غلظت‌های بالاتر آن نسبت داده شود. این نتایج نشان دهنده اهمیت انتخاب غلظت و نوع مناسب سیلیکون در افزایش محتوای ساکارز بوده و نشان می‌دهند که مصرف نانوسیلیکا در شرایط مختلف آبیاری باعث بهبود عملکرد قند نیشکر می‌شود.

جدول ۳- مقایسه میانگین عملکرد قند و صفات کیفی نیشکر در تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی سیلیکون

Table 3. Mean comparison for sugar yield and quality traits of sugarcane in irrigation interval and foliar application of silicon treatments

Treatments	تیمارهای آزمایشی	پل Pol (%)	بریکس Brix (%)	قند قابل استحصال White sugar content (%)	عملکرد قند Sugar yield (ton.ha^{-1})
Irrigation intervals	دور آبیاری				
7 day	هفت روز	17.4a	19.5a	10.8a	14.2a
10 day	۱۰ روز	16.5ab	18.5b	10.3ab	12.0b
13 day	۱۳ روز	16.3b	18.5b	10.0b	8.3c
Silicon application	محلول‌پاشی سیلیکون				
Control	عدم محلول‌پاشی (شاهد)	15.7b	17.9b	9.7b	9.8c
Nano silica (150 mg.l^{-1})	نانوسیلیکا	17.3a	19.4a	10.8a	12.0b
Nano silica (300 mg.l^{-1})	نانوسیلیکا	17.2a	19.3a	10.7a	13.1a
Sodium silicate (300 mg.l^{-1})	سیلیکات سدیم	16.4ab	18.5ab	10.0ab	10.4c
Sodium silicate (600 mg.l^{-1})	سیلیکات سدیم	16.9ab	19.0ab	10.6a	12.4ab

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using Tukey's test

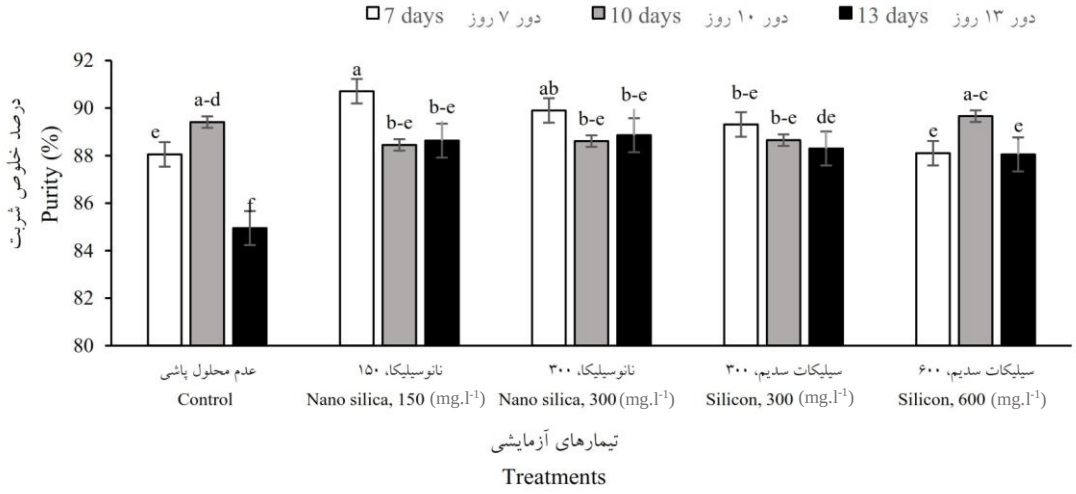
[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

نتایج نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی بر مواد جامد محلول در شربت (بریکس) معنی‌دار بود. بیشترین مقدار بریکس (۱۹/۵ درصد) در دور آبیاری هفت روز و کمترین مقدار آن (۱۸/۵ درصد) در دور آبیاری ۱۳ روز ثبت شد (جدول ۳). گزارش شده است که مدیریت آبیاری نقش مهمی در حفظ بریکس دارد و دفعات مطلوب آبیاری (۱۶ تا ۲۰ نوبت) باعث بهبود میزان بریکس می‌شوند (Mehareb and Gadallah, 2020). کاهش محتوای رطوبت ساقه، باعث کاهش میزان بریکس می‌شود (Franco *et al.*, 2015). در بین تیمارهای محلول‌پاشی، ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا بیشترین مقدار بریکس (۱۹/۴ درصد) را داشت و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم با ۱۸/۵ درصد، کمترین مقدار را پس از تیمار شاهد داشت (جدول ۳). گزارش شده است که مصرف سیلیکون باعث افزایش مقدار بریکس و ساکارز نیشکر شده و کاهش ل قندهای احیاکننده نامطلوب می‌شوند (Albiasetti *et al.*, 2021). این اثر از طریق افزایش تولید قند در برگ‌ها، انتقال به ساقه‌ها و تنظیم فعالیت آنزیم های مرتبط با حفظ محتوای ساکارز مانند اینورتازها اعمال می‌شود (Albiasetti *et al.*, 2021).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی و برهمکنش آن‌ها، اثر معنی‌داری بر درجه خلوص شربت داشتند. تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا بیشترین (۹۰/۷ درصد) مقدار خلوص را در تیمار آبیاری هفت روز داشت و در تیمار ۱۳ روز نیز پایداری بیشتری (۸۸/۶ درصد) نسبت به سایر تیمارهای محلول‌پاشی داشت. در هر دو غلظت نانوسیلیکا، درجه خلوص شربت نسبت به تیمارهای سیلیکات سدیم برتر بود. در مقابل، سیلیکات سدیم تنها در غلظت بالاتر (۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و دور آبیاری ۱۰ روز، درجه خلوص شربت نسبتا مطلوبی (۸۹/۶ درصد) داشت، اما این اثر در شرایط کم‌آبی پایدار نبود. به‌نظر می‌رسد که تیمارهای نانوسیلیکا به دلیل اندازه ذرات کوچک‌تر، جذب بهتر آب و عناصر غذایی و افزایش تحمل گیاه در برابر تنش‌های محیطی، به‌ویژه کم‌آبی، برتری قابل‌توجهی نسبت به سایر تیمارهای محلول‌پاشی داشته باشد (شکل ۶). در تیمار عدم محلول‌پاشی، بیشترین درجه خلوص در دور آبیاری ۱۰ روز مشاهده شد. گزارش شده است که اعمال تنش ملایم آبی به‌ویژه در مرحله رسیدگی، باعث افزایش تجمع ساکارز و به دنبال آن درجه خلوص شکر می‌شود. این موضوع به‌دلیل کاهش رشد رویشی و هدایت منابع فتوسنتزی به سمت ذخیره‌سازی قند در ساقه اتفاق می‌افتد. به‌علاوه تنش ملایم آبی ممکن است باعث کاهش تولید قندهای احیاکننده و افزایش سنتز ساکارز شود. روند مشابه در تیمار ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم و دور آبیاری ۱۰ روز، تقویت‌کننده این فرضیه است که در شرایط کم‌آبی، سیلیکون با بهبود روابط آبی گیاه، کاهش تعرق و تقویت دیواره‌های سلولی، باعث حفظ یکپارچگی دیواره‌های سلولی و کاهش آسیب‌های ناشی از کم‌آبی و کمک به تجمع قندها می‌شود.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی بر میزان قند قابل استحصال معنی‌دار بودند. با افزایش دور آبیاری از ۷ به ۱۳ روز، میزان قند قابل استحصال کاهش یافت. بیشترین مقدار قند قابل استحصال (۱۰/۸ درصد) در دور آبیاری هفت روز ثبت شد و با افزایش دور آبیاری به ۱۰ و ۱۳ روز، این مقدار به‌ترتیب به مقادیر ۱۰/۳ درصد و ۱۰ درصد کاهش یافت (جدول ۳). این کاهش می‌تواند به آثار منفی کم‌آبی نسبت داده شود که با محدود شدن رشد، کاهش فعالیت فتوسنتزی و اختلال در انتقال قندها به ساقه، تجمع ساکارز در عصاره کاهش می‌یابد (Hemaprabha *et al.*, 2004). دور آبیاری هفت روز با فراهم شدن شرایط مطلوب آبی، فرآیندهای متابولیکی مرتبط با تولید قند حفظ شده و بیشترین مقدار قند قابل استحصال به‌دست آمد.

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]



شکل ۶- مقایسه میانگین درجه خلوص شربت نیشکر در برهمکنش تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی سیلیکون

Fig. 6. Mean comparison of purity of sugarcane in interaction of irrigation interval and foliar application of silicon treatments

در تیمار ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا بیشترین مقدار قند قابل استحصال (به‌ترتیب ۱۰/۸۵ و ۱۰/۸۷ درصد) به‌دست آمد (جدول ۳). در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم با ۹/۷ درصد، کمترین میزان قند قابل استحصال ثبت شد. تیمار ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم با ۱۰/۶ درصد، نسبت به تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر برتری داشت، اما همچنان از هر دو تیمار نانوسیلیکا پایین‌تر بود که این موضوع نشان دهنده برتری نانوسیلیکا نسبت به سیلیکات سدیم است. این برتری می‌تواند به ویژگی‌های نانوسیلیکا، از جمله اندازه کوچک‌تر ذرات و جذب موثرتر توسط گیاه، نسبت داده شود که باعث بهبود فرآیندهای فیزیولوژیک مرتبط با سنتز و ذخیره‌سازی قند می‌شود. گزارش شده است که سیلیکون با افزایش تجمع ساکارز و کاهش آسیب‌های ناشی از تنش خشکی، باعث افزایش کیفیت عصاره نیشکر می‌شود. به‌علاوه، ترکیب سیلیکون با عناصری مانند پتاسیم از طریق بهبود هدایت روزنه‌ای و تجمع مواد جامد محلول، باعث افزایش قند قابل استحصال می‌شود (Al-Sayed *et al.*, 2012). در آزمایش حاضر، هر دو غلظت نانوسیلیکا، با کاهش آثار منفی کم‌آبی و بهبود متابولیسم قند، کارایی بالاتری داشتند. کمتر بودن کارایی تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سیلیکات سدیم ممکن است به محدودیت‌های جذب یا اثر کمتر بودن غلظت‌های پایین‌تر آن مرتبط باشد.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول‌پاشی بر عملکرد شکر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. بیشترین عملکرد شکر در دور آبیاری هفت روز (۱۴/۲ تن در هکتار) مشاهده شد که به‌طور قابل توجهی بالاتر از دورهای ۱۰ و ۱۳ روز (به‌ترتیب ۱۲ و ۸/۳ تن در هکتار) بود. تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا با ۱۳/۱ تن در هکتار بیشترین عملکرد شکر را داشت. دور آبیاری عامل اصلی تعیین‌کننده عملکرد شکر است، اما ترکیب یک برنامه مناسب آبیاری با محلول‌پاشی نانوسیلیکا (به‌ویژه غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) می‌تواند باعث بهبود عملکرد شکر شود (جدول ۳). با توجه به نتایج عملکرد نی به‌نظر میرسد که افزایش عملکرد شکر در تیمار ۳۰۰

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکا بیشتر تحت تاثیر عملکرد نی بوده است (شکل ۱). گزارش شده است که کاهش دور آبیاری، باعث بهبود رشد و عملکرد نیشکر می‌شود (Mehareb and Gadallah, 2020). مصرف سیلیکون با افزایش محتوای آن در محلول خاک و بهبود جذب آن توسط گیاه، باعث افزایش وزن زیست‌توده و عملکرد شکر و ساقه شده و افزایش عملکرد شکر در شرایط کمبود آب می‌شود (De Camargo *et al.*, 2017).

نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش حاضر نشان داد که با افزایش فواصل آبیاری از ۷ به ۱۳ روز، عملکرد و شاخص‌های کیفی عصاره نیشکر به طور معنی‌داری کاهش یافتند. محلول‌پاشی نانوذرات سیلیکا، به‌ویژه غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، موثرترین تیمار در افزایش عملکرد نیشکر شناخته شد. محلول‌پاشی نانوذرات سیلیکا ضمن بهبود رشد رویشی گیاه، باعث بهبود کیفیت عصاره (بریکس و خلوص شربت) شد، اما سیلیکات سدیم کارایی کمتری نسبت به نانوسیلیکا داشت. نتایج این آزمایش نشان داد که محلول‌پاشی ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیکا، به‌ویژه در دور آبیاری بهینه (هفت روز)، یک راهبرد کارآمد برای بهینه‌سازی زراعت نیشکر است. این رویکرد می‌تواند علاوه بر بهبود عملکرد و کیفیت و افزایش بهره‌وری آب، به پایداری تولید نیشکر در مناطق با محدودیت منابع آبی کمک کند.

سپاسگزاری

نگارندگان از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز برای تامین بخشی از هزینه‌های اجرای این تحقیق و از همکاری مدیریت و کارکنان محترم شرکت کشت و صنعت امام خمینی (ره) سپاسگزاری می‌نمایند.

منابع مورد استفاده

References

Albiasetti, T., Júnior, J.P.S., Prado, R. M., Frazão, J.J., and de Cássia Piccolo, M. 2021. Silicon changes C:N:P stoichiometry and favors pre-sprouted seedling growth, yield, and the technological quality of sugarcane. *Frontiers in Plant Science*, 12, 949909. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.949909

Al-Sayed, H., Fateh, H.S., Fares, W.M., and Attaya, A. 2012. Multivariate analysis of sugar yield factors in sugar cane. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 6, pp.44-50. https://doi.org/10.4236/ajps.2016.710139

Bamrungrai, J., Tubana, B., Tre-Loges, V., Promkhambut, A., and Polthanee, A. 2021. Effects of water stress and auxin application on growth and yield of two sugarcane cultivars under greenhouse conditions. *Agriculture*, 11(7), 613. https://doi.org/10.3390/agriculture11070613

De Camargo, M.S., Bezerra, B.K.L., Vitti, A.C., Silva, M.A., and Oliveira, A.L. 2017. Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(1), pp.99-111. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000008

Epstein, E. 2009. Silicon: its manifold roles in plants. *Annals of Applied Biology*, 155(2), pp.155-160. https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x

Fellet, G., Pilotto, L., Marchiol, L., and Braidot, E. 2021. Tools for nano-enabled agriculture: Fertilizers based on calcium phosphate, silicon, and chitosan nanostructures. *Agronomy*, 11(6), 1239.

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

https://doi.org/10.3390/agronomy11061239

Ferreira, T.H., Tsunada, M.S., Bassi, D., Araújo, P., Mattiello, L., Guidelli, G.V., Righetto, G.L., Gonçalves, V.R., Lakshmanan, P., and Menossi, M. 2017. Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1077. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01077

Franco, H.C., Otto, R., Vitti, A.C., Faroni, C.E., Oliveira, E.C., Fortes, C.A., Ferreira, D.A., Kölln, O.T., Garside, A.L., and Trivelin, P.C. 2015. Residual recovery and yield performance of nitrogen fertilizer applied at sugarcane planting. *Scientia Agricola*, 72, pp.528-534. https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0170

Hafez, E.M., Osman, H.S., Gowayed, S.M., Okasha, S.A., Omara, A.E.D., Sami, R., Abd El-Monem, A.M., and Abd El-Razek, U.A. 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(4), 676. https://doi.org/10.3390/agronomy11040676

Hemaprabha, G., Nagarajan, R., and Alarmelu, S. 2004. Response of sugarcane genotypes to water deficit stress. *Sugar Tech*, 6, pp.165-168. https://doi.org/10.1007/BF02942718

Jangpromma, N., Thammasirirak, S., Jaisil, P., and Songsri, P. 2012. Effects of drought and recovery from drought stress on above ground and root growth, and water use efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Australian Journal of Crop Science*, 6(8), pp.1298-1304. https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.732153581387801

Johnson, S.N., Chen, Z.H., Rowe, R.C., and Tissue, D.T. 2022. Field application of silicon alleviates drought stress and improves water use efficiency in wheat. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1030620. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1030620

Kaya, C., Tuna, L., and Higgs, D. 2006. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 29(8), pp.1469-1480. https://doi.org/10.1080/01904160600837238

Kumar, R., Sagar, V., Verma, V.C., Kumari, M., Gujjar, R.S., Goswami, S. K., Kumar Jha, S., Pandey, H., Dubey, A.K., Srivastava, S., Singh, S.P., Mall, A.K., Pathak, A.D., Singh, H., Jha, P.K., and 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. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1225234

Liang, Y.C., Nikolic, M., Belanger, R., Gong, H.J., and Song, A.L. 2015. Silicon in Agriculture: From Theory to Practice. Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2

Luyckx, M., Hausman, J.F., Lutts, S., and Guerriero, G. 2017. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 8, 411. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00411

Mehareb, E., and Gadallah, A. 2020. Yield and quality of some sugarcane varieties as affected by

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

irrigation number. *SVU-International Journal of Agricultural Sciences*, 2(2), pp.144-165. https://doi.org/10.21608/svuijas.2020.38830.1023

Mittal, D., Kaur, G., Singh, P., Yadav, K., and Ali, S.A. 2020. Nanoparticle-based sustainable agriculture and food science: Recent advance s and future outlook. *Frontiers in Nanotechnology*, 2, 579954. https://doi.org/10.3389/fnano.2020.579954

Moore, P.H., and Botha, F.C. 2014. Sugarcane physiology, biochemistry, and functional biology. *In:* Moore, P.H. and Botha, F.C (Eds.), Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology (pp.1-20). Wiley-Blackwell. https://doi.org/10.1002/9781118771280

Muhtadi, M. M., Sitawati, S., and Suryanto, A. 2024. Effect of sugarcane varieties and milling delay time on cane sugar yield. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung* (*Journal of Agricultural Engineering*), 13(2), pp. 506-511. https://doi.org/10.23960/jtep-l.v13i2.506-511

Ning, D., Zhang, Y., Li, X., Qin, A., Huang, C., Fu, Y., Gao, Y., and Duan, A. 2023. The effects of foliar supplementation of silicon on physiological and biochemical responses of winter wheat to drought stress during different growth stages. *Plants*, 12(12), 2386. https://doi.org/10.3390/plants12122386

Nobre Cunha, F., Batista Teixeira, M., Cabral da Silva, E., Furtado da Silva, N., Teixeira Silva Costa, C., Marques Vidal, V., Alves Morais, W., Nazário Silva dos Santos, L., Rodrigues Cabral Filho, F., Karen Matias Alves, D., Aparecida Batista Soares, J., and Fernando Gomes, L. 2020. Productive potential of nitrogen and zinc fertigated sugarcane. *Agronomy*, 10(8), 1096. https://doi.org/10.3390/agronomy10081096

Rahnama, A., James, R.A., Poustini, K., and Munns, R. 2010. Stomatal conductance as a screen for osmotic stress tolerance in durum wheat growing in saline soil. *Functional Plant Biology*, 37, pp.255-263. https://doi.org/10/1071/FP09148

Rahnama, A., Hosseinalipour, B., Farrokhian Firouzi, A., Harrison, M.T., and Ghorbanpour, M. 2024. Root architecture traits and genotypic responses of wheat at seedling stage to water-deficit stress. *Cereal Research Communications*, 52, pp.1499–1510. https://doi.org/10.1007/s42976-023-00481-4

Reyes, J.A.O., Carpentero, A.S., Santos, P.J.A., and Delfin, E.F. 2020. Effects of water regime, genotype, and formative stages on the agro-physiological response of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) to drought. *Plants*, 9(5), 661. https://doi.org/10.3390/plants9050661

Salehi, F., Rahnama, A., Meskarbashee, M., Mehdi Khanlou, K., and Ghorbanpour, M. 2023. Physiological and metabolic changes of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars in response to terminal heat stress. *Journal of Plant Growth Regulations*, 42(5), pp.6585–600. https://doi.org/10.1007/s00344-023-10911-6

Siddiqui, M.H., Al-Whaibi, M.H., Faisal, M., and Al Sahli, A.A. 2014. Nano-silicon dioxide mitigates the adverse effects of salt stress on *Cucurbita pepo* L. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33(11), pp. 2429–2437. https://doi.org/10.1002/etc.2697

Silva, M.D.A., Silva, J.A.G.D., Enciso, J., Sharma, V., and Jifon, J. 2008. Yield components as indicators of

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]

drought tolerance of sugarcane. *Scientia Agricola*, 65, pp.620-627. https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000600008

Verma, K.K., Song, X.P., Tian, D.D., Singh, M., Verma, C.L., Rajput, V.D., Singh, R.K., Sharma, A., Singh, P., Malviya, M.K., and Li, Y.R. 2021. Investigation of defensive role of silicon during drought stress induced by irrigation capacity in sugarcane: physiological and biochemical characteristics. *ACS Omega*, 6(30), pp. 19811-19821. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02519

Zayed, B.A., El-Kellawy, W.H., Okasha, A.M., and Abd El-Hamed, M.M. 2017. Improvement of salinity soil properties and rice productivity under different irrigation intervals and gypsum rates. *Journal of Plant Production*, 8(3), pp. 361-368. https://doi.org/10.21608/jpp.2017.39968

Zhang, W., Shi, H., Cai, S., Guo, Q., Dai, Y., Wang, H., Wan, S., and Yuan, Y. 2024. Rice growth and leaf physiology in response to four levels of continuous drought stress in southern China. *Agronomy*, 14(7), 1579. https://doi.org/10.20944/preprints202406.1628.v1

[Downloaded from agrobreedjournal.ir on 2026-02-02]