

اثر محلول پاشی بر گی سیلیکون بر عملکرد و کیفیت نیشکر (*Saccharum officinarum* L.) در شرایط کم آبیاری

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، حبیب اله روشنفکر^۴ و حسین نوروزی^۵

چکیده

حمدی شنگری، ع. ا. راهنما، ع. منصفی، ح. روشنفکر و ح. نوروزی. اثر محلول پاشی بر گی سیلیکون بر عملکرد و کیفیت نیشکر (*Saccharum officinarum* L.) در شرایط کم آبیاری. نشریه علوم زراعی ایران. ۲۷ (۱): ۳۸-۲۳.

به منظور ارزیابی اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول پاشی بر گی نانوذرات سیلیکا و سیلیکات سدیم بر عملکرد و ویژگی های کیفی نیشکر رقم CP69-1062، آزمایشی به صورت کرت های خرد شده در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۳ در مزرعه پلنت کشت و صنعت امام خمینی (ره) در شهرستان شوشتر استان خوزستان اجرا شد. سه دور آبیاری (۷، ۱۰ و ۱۳ روز) به عنوان کرت های اصلی و پنج سطح محلول پاشی بر گی (عدم محلول پاشی؛ شاهد، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سیلیکا و ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم) به عنوان کرت های فرعی در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که با افزایش دور آبیاری عملکرد نی، طول ساقه، تعداد ساقه های قابل آسیاب، طول میانگره مبانی، بهره وری آب و ویژگی های کیفی عصاره شامل محتوای ساکارز شربت (پل)، مواد جامد محلول در شربت (بریکس)، خلوص شربت، میزان قند قابل استحصال و عملکرد قند به طور معنی داری کاهش یافتند. محلول پاشی نانوذرات سیلیکا، به ویژه غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر، باعث کاهش معنی دار آثار منفی کم آبیاری شده و عملکرد نی، عملکرد قند و بهره وری آب از طریق بهبود صفات تعداد ساقه، طول ساقه و طول میانگره ها به طور قابل توجهی افزایش یافتند. بیشترین بهره وری آب در تیمار ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سیلیکا و ۶۰۰ میلی گرم 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 محلول پاشی، به ویژه نانوذرات سیلیکا، حفظ شد، اما عملکرد نی کاهش یافت. بیشترین عملکرد نی (۱۴۱ تن در هکتار) در تیمار محلول پاشی نانوذرات سیلیکا با غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر در دور آبیاری هفت روز و کمترین مقدار آن در تیمار عدم محلول پاشی در دور آبیاری ۱۳ روز (۷۰ تن در هکتار) مشاهده شد. نتایج این آزمایش نشان داد که محلول پاشی نانوذرات سیلیکا و سیلیکات سدیم می توانند به عنوان یک راهبرد موثر در شرایط کم آبیاری در زراعت نیشکر در نظر گرفته شوند. برای تأیید پایداری اثر محلول پاشی نانوذرات سیلیکا و سیلیکات سدیم و بهینه سازی مصرف آنها در مقیاس بزرگ در زراعت نیشکر، اجرای آزمایش های بلندمدت مزرعه ای با تمرکز بر عملکرد نی، عملکرد شکر و کارایی مصرف آب توصیه می شود.

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

این مقاله مستخرج از رساله دکتری نگارنده اول می باشد

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰

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

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): 23-38. (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

مقدمه

رشد و نمو گیاهان زراعی در مناطق خشک و نیمه خشک، عمدتاً 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، به شدت 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 عمدتاً به دلیل 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 مرحله 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 به دلیل 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، به راحتی در بافت‌های گیاهی نفوذ کرده و تاثیر چشمگیری بر شاخص‌های فیزیولوژیک و عملکرد گیاهان دارند (Ferreira et al., 2017). سازوکارهای

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 کم‌آبایی، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه اثر نانوذرات سیلیکا و سیلیکات سدیم بر ویژگی‌های مورفولوژیک و عملکرد و کیفیت نیشکر در شرایط کم‌آبایی 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 کم‌آبایی آزمایشی مزرعه‌ای به صورت 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 دوره‌های آبیاری ۷، ۱۰ و ۱۳ روز به عنوان کرت‌های اصلی و پنج سطح محلول پاشی برگ‌گی (عدم محلول پاشی؛ شاهد، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سیلیکا و ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3)) به عنوان کرت‌های فرعی بودند. نانوذرات سیلیکا از نوع سوسپانسیون نانوذرات سیلیکا کلئیدی (شرکت مرک،

آلمان) با اندازه ذرات ۵ تا ۳۵ نانومتر و خلوص ۹۹/۹ درصد بودند. مقدار آب آبیاری طی دوره رشد گیاه در دوره‌های آبیاری ۷، ۱۰ و ۱۳ روز به ترتیب ۳۸، ۳۳ و ۳۰ هزار متر مکعب در هکتار بود. تیمارهای کم‌آبایی از زمان رشد سریع نیشکر تا انتهای دوره رشد اعمال شدند. تیمارهای محلول پاشی در دو نوبت و در مرحله رشد سریع گیاه (مرحله ۳ بر اساس مقیاس BBCH) از اوایل فروردین با فاصله زمانی ۱۵ روز اعمال شدند. محلول پاشی با استفاده از سم پاش پشت تراکتوری به صورت یکنواخت روی سطح برگ‌ها انجام شد. محلول پاشی در هر نوبت از ساعت ۸ تا ۱۰ صبح انجام شد. هر واحد آزمایشی شامل پنج ردیف کاشت به طول شش متر بود و نمونه برداری از دو ردیف کاشت وسط انجام شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه محل اجرای آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس گزارش‌های قبلی، حد بحرانی سیلیس قابل جذب خاک برای نیشکر ۴۹ تا ۵۶ میلی گرم 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 توصیه شده 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 (%)	منگنز Zn	آهن Mn	مس Fe	سدیم Cu	پتاسیم Na	فسفر K	سیلیکون P	سیلیکون Si	نیتروژن N (%)	هدایت الکتریکی pH	EC (dS.m ⁻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

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

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 عصاره گیری شربت، محتوای ساکارز شربت (پل) و مواد جامد محلول در شربت (بریکس) اندازه گیری شدند. پس از آن درجه خلوص شربت و میزان قند قابل استحصال محاسبه شدند. میزان قند شربت با استفاده از دستگاه پلاریومتر (ساکاریمتر) اندازه گیری و با استفاده از جدول پل فاکتور (ضریب اصلاح پل) اصلاح و مقدار پل واقعی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

برای اندازه گیری عملکرد نی در مرحله رسیدگی محصول، از هر واحد آزمایشی، بوته ها از مساحت سه متر مربع به طور کامل کف بر شده و پس از جداسازی برگ ها، ساقه ها توزین شد. طول میانگرمه میانی، طول ساقه، تعداد گره در ساقه، تعداد ساقه و قطر ساقه نیز اندازه گیری شدند. با محاسبه نسبت عملکرد نی به حجم آب مصرفی، بهره وری آب آبیاری بر حسب کیلوگرم نی بر متر مکعب آب محاسبه شد.

برای ارزیابی صفات کیفی شربت نیشکر و روند ذخیره سازی ساکارز در ساقه، پس از توقف رشد، از هر

$$\text{رابطه ۱)} \quad \text{پل فاکتور} \times \text{عدد قرائت شده در دستگاه پلاریومتر} = \text{ساکارز شربت (پل) (درصد)}$$

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول پاشی و برهمکنش آنها در سطح احتمال یک درصد اثر معنی داری بر طول ساقه داشتند. با افزایش دور آبیاری از ۷ به ۱۳ روز، کاهش قابل ملاحظه ای در طول ساقه مشاهده شد، به طوری که بیشترین کاهش در تیمار شاهد (بدون محلول پاشی) مشاهده شد. در مقابل، در تیمار ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا در فواصل آبیاری هفت روز، بیشترین طول ساقه (۲۶۰ سانتی متر) مشاهده شد که این نتایج، کارایی نانوذرات سیلیکا در کاهش آثار تنش خشکی را نشان می دهد (شکل ۱). این یافته ها نشان می دهد که عملکرد

بریکس شربت با استفاده از دستگاه رفاکتومتر اندازه گیری شد. درجه خلوص شربت (درصد) از نسبت پل به بریکس محاسبه شد. میزان قند قابل استحصال با استفاده از رابطه های ۲ و ۳ محاسبه شد.

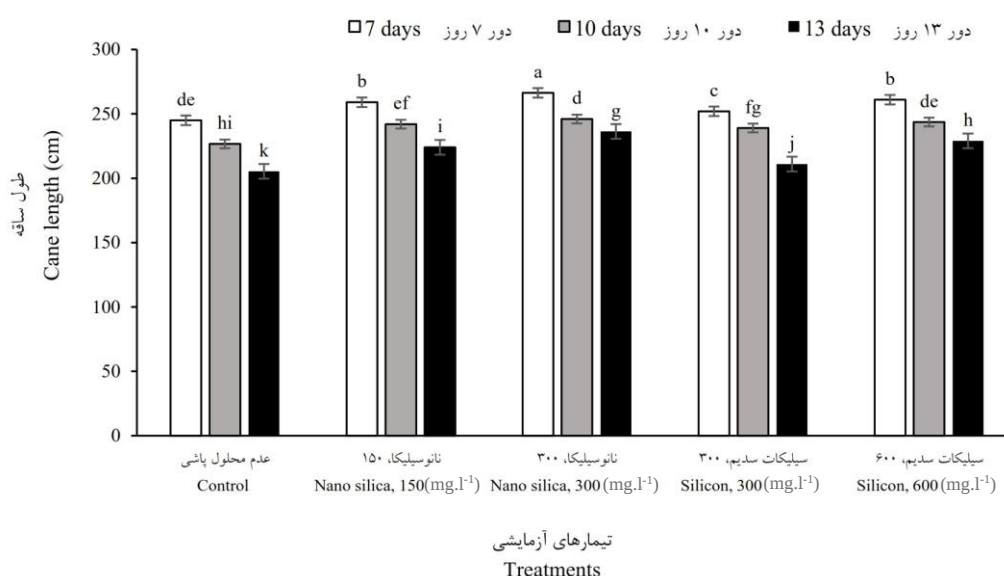
(رابطه ۲) کیفیت شربت / ۱۰۰ = قند ناخالص (درصد)

(رابطه ۳) قند ناخالص $\times 0.83 =$ قند قابل استحصال (درصد)

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

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 به عنوان شاخصی از اثر منفی تنش خشکی در نظر گرفته شده و شدت آن در ارقام مختلف متفاوت است (Reyes *et al.*, 2020).

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



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

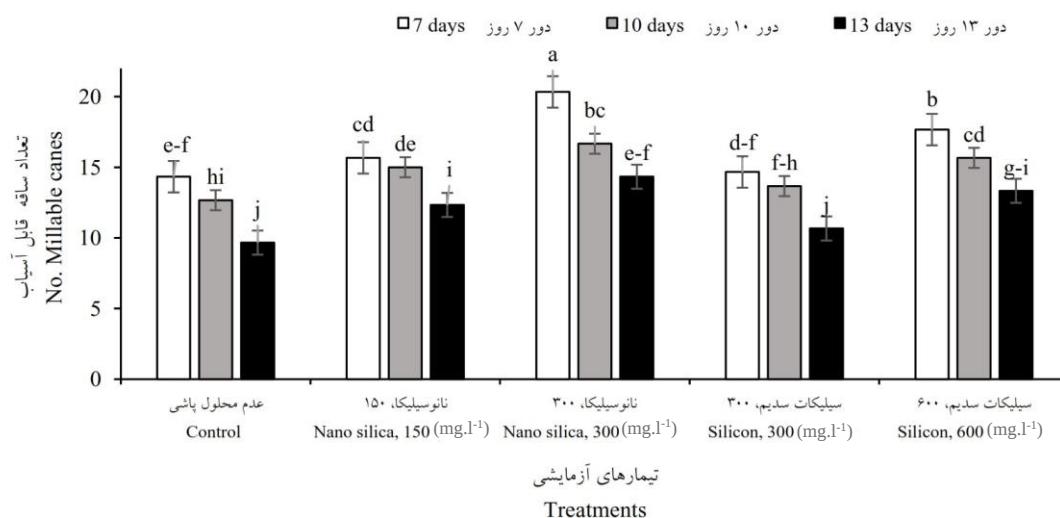
Fig. 1. Mean comparison of cane length of sugarcane in interaction of irrigation interval and foliar application of silicon treatments

بیشترین تعداد ساقه‌های قابل آسیاب (۲۰ ساقه در متر مربع) در تیمار ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا و دور آبیاری هفت روز و کمترین تعداد (۱۰ ساقه در متر مربع) در تیمار عدم محلول پاشی و دور آبیاری ۱۳ روز ثبت شدند (شکل ۲).

تیمار ۳۰۰ میلی گرم 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 میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول پاشی و برهمکنش آن‌ها در سطح یک درصد اثر معنی داری بر تعداد ساقه‌های قابل آسیاب نیشکر داشتند. با افزایش دور آبیاری از ۷ به ۱۳ روز، تعداد ساقه‌های قابل آسیاب به طور معنی داری کاهش یافت. این کاهش به اثر منفی کم‌آبی بر مراحل حساس رشد، به ویژه پنجه زنی 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، محلول پاشی نانوسیلیکا و سیلیکات سدیم در مقایسه با تیمار عدم محلول پاشی باعث افزایش تعداد ساقه‌ها شد.

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

به دلیل اندازه کوچک‌تر ذرات نانوسیلیکا و قابلیت نفوذ و جذب بهتر آن در گیاه است.

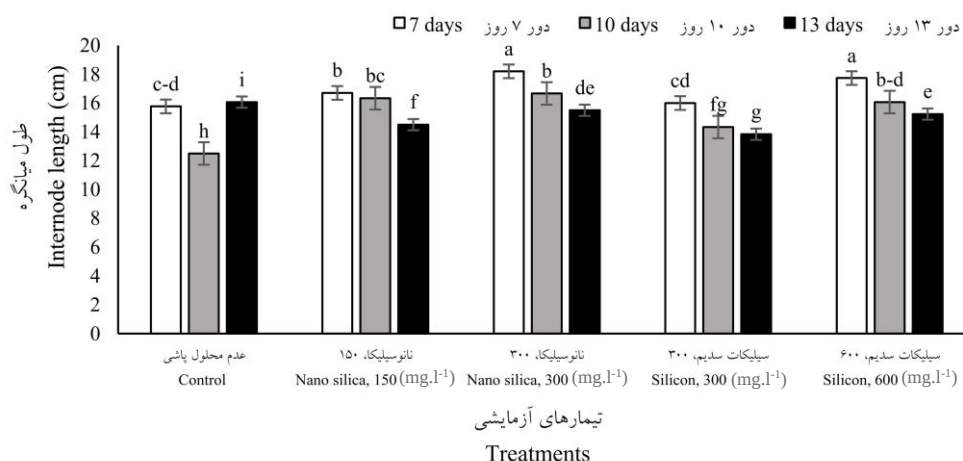
نتایج تجزیه و اریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و برهم‌کنش دور آبیاری و محلول‌پاشی در سطح احتمال یک درصد اثر معنی‌داری بر طول میانگرمه میانی نیشکر داشتند. افزایش دور آبیاری از ۷ به ۱۳ روز باعث کاهش طول میانگرمه شد که این موضوع احتمالاً به محدودیت دسترسی به آب و کاهش فشار آماس سلول‌ها در شرایط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

در تیمار ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا در کیله تیمارهای دور آبیاری، بیشترین طول میانگرمه مشاهده

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 دیواره سلولی، باعث کاهش آثار منفی تنش آبی می‌شود (Muhtadi *et al.*, 2024). در آزمایش حاضر، نانوسیلیکا در غلظت ۳۰۰ میلی گرم 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

مصرف آب، باعث بهبود روابط آبی گیاه در شرایط تنش خشکی می شود (Johnson *et al.*, 2022). علاوه بر این، سیلیکون با تقویت دیواره های سلولی، حفظ یکپارچگی غشاها و افزایش فعالیت آنزیم های

شد، در حالی که در تیمار ۶۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم اثر بخشی کمتری دیده شد (شکل ۳). این نتایج حاکی از برتری نانوسیلیکا نسبت به سیلیکات سدیم است. سیلیکون با کاهش تعرق و بهبود کارایی



شکل ۳- مقایسه میانگین طول میانگرنه نیشکر در برهمکنش تیمارهای دور آبیاری و محلول پاشی سیلیکون

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

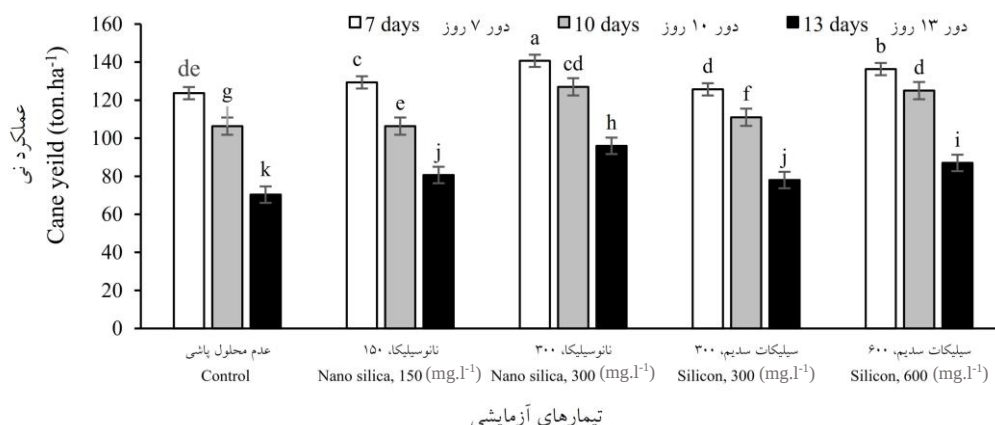
نامطلوب کم آبی بر طول میانگرنه را تعدیل کند. این تأثیر با بهبود روابط آبی و تقویت فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه مرتبط است.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول پاشی و برهمکنش آنها در سطح احتمال یک درصد اثر معنی داری بر عملکرد نی داشتند. نتایج مقایسه میانگین ها 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 میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا به ترتیب ۵ و ۲۱ درصد و در تیمارهای ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم به ترتیب ۵ و ۱۶ درصد نسبت به تیمار عدم محلول پاشی برتری داشت. بیشترین مقدار عملکرد نی (۱۴۱ تن در هکتار) در تیمار ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا و دور آبیاری هفت روز و کمترین مقدار آن (۷۰ تن در هکتار) در تیمار عدم محلول پاشی و دور آبیاری ۱۳ روز به دست آمد (شکل

آنتی اکسیدانی، باعث کمک به رشد سلول ها و در نتیجه افزایش طول میانگرنه ها در شرایط محدودیت آب می شود (Epstein, 2009). برتری نانوسیلیکا در مقایسه با سیلیکات سدیم به سطح تماس بالاتر و حلالیت بیشتر آن نسبت داده می شود که باعث تسهیل جذب و انتقال سیلیکون در گیاه تسهیل می شود (Siddiqui *et al.*, 2014). این ویژگی نانوسیلیکا در غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر به طور خاص، امکان دسترسی مؤثرتر بافت های گیاهی به سیلیکون را فراهم کرده و باعث حفظ رشد میانگرنه ها حتی در دوره های آبیاری طولانی تر می شود. کاهش اثر گذاری سیلیکات سدیم در غلظت ۶۰۰ میلی گرم در لیتر ممکن است به محدودیت های جذب یا تجمع بیش از حد سیلیکون در فرم غیر نانو مربوط باشد که باعث کاهش کارایی آن می شود. نتایج نشان می دهند که محلول پاشی نانوسیلیکا، به ویژه در غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر، می تواند آثار

تیمار تیمار عدم محلول پاشی، برتر بودند. هر چند تیمار ۶۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم نیز در مقایسه با تیمار عدم محلول پاشی، باعث افزایش عملکرد شد، اما این افزایش در مقایسه با تیمار ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا به مراتب کمتر بود (شکل ۴).

۴). تیمار ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا در کلیه تیمارهای دور آبیاری، موثرترین تیمار در کاهش آثار منفی کم آبی شناخته شد. عملکرد نی در تیمارهای ۱۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا و ۳۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم نیز نسبتاً مشابهی بود، اما در مقایسه با



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

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

جذب و انتقال مؤثرتر نانوسیلیکا در مقایسه با سیلیکات سدیم نسبت داده شده است (Fellet et al., 2021). برتری نانوذرات سیلیکا را می توان به ویژگی های نانومقیاس آن ها، شامل اندازه کوچک تر ذرات (افزایش نفوذپذیری)، سطح ویژه بالاتر (بهبود جذب)، و تعامل موثرتر با بافت های گیاهی نسبت داد.

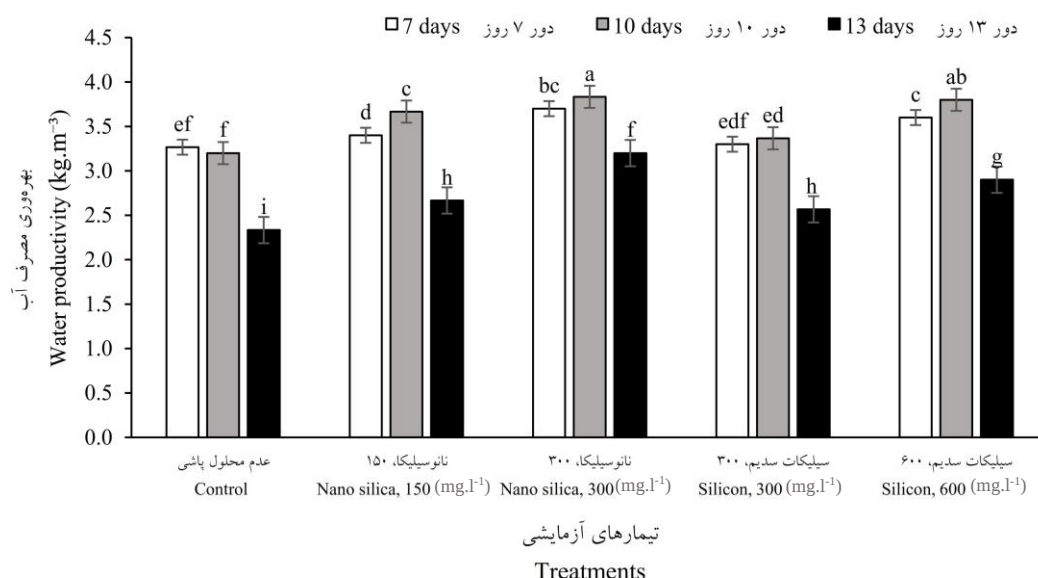
نتایج تجزیه و اریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول پاشی و برهمکنش آنها بر بهره وری مصرف آب در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. نتایج مقایسه میانگین ها نشان داد که بیشترین مقدار بهره وری مصرف آب (۳/۸ کیلوگرم بر متر مکعب) در تیمار ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا و ۶۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم در تیمارهای دور آبیاری ۱۰ روز به دست آمد. با افزایش دور آبیاری، اثر مثبت تیمارهای سیلیکون به ویژه نانوسیلیکا قابل توجه

میزان کاهش عملکرد ناشی از افزایش دور آبیاری در تیمارهای نانوسیلیکا (به ویژه در غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر) به طور قابل توجهی کمتر از تیمار عدم محلول پاشی بود که این موضوع می تواند به دلیل افزایش محتوای آب نسبی، بهبود فتوسنتز و فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی 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 می شود (De Camargo et al., 2017)، که این موضوع اهمیت مصرف سیلیکون، به ویژه در فرم نانو را در شرایط کم آبی نشان می دهد.

نتایج نشان داد که محلول پاشی نانوسیلیکا به ویژه در غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر، باعث بهبود تحمل به کم آبی 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

میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا بود. به نظر می‌رسد که در شرایط کمبود آب، محلول پاشی ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا می‌تواند راهکار مناسبی برای افزایش بهره‌وری مصرف آب باشد (شکل ۵).

بود، اما بهره‌وری کلی آب کاهش یافت. تیمار ۶۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم نیز در بهبود بهره‌وری مصرف آب موثر بود، اما کارایی آن به ویژه در دوره‌های آبیاری کمتر، تا حدودی کمتر از تیمار ۳۰۰



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

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

فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، باعث حفاظت از گیاه در شرایط کم آبی می‌شود (Hafez et al., 2021). به علاوه، 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 کم آبی است.

نتایج تجزیه و اریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول پاشی 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

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) محلول پاشی 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

به طور کامل شناخته نشده و نیازمند تحقیقات بیشتری است (Albiasetti et al., 2021). این آثار به ویژه در شرایط تنش مانند کمبود آب یا شوری برجسته تر می شوند، زیرا سیلیکون با بهبود روابط آبی و کاهش تنش اکسیداتیو، متابولیسم قند را بهینه می کند (De Camargo et al., 2017; Hemaprabha et al., 2004).

نتایج نشان داد که دور آبیاری هفت روز همراه با محلول پاشی ۱۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا، باعث افزایش محتوای ساکارز شد. برتری نانوسیلیکا در مقایسه با سیلیکات سدیم، می تواند به اندازه کوچک تر ذرات و جذب موثرتر آن توسط گیاه مرتبط باشد که باعث بهبود فرآیندهای فیزیولوژیک مرتبط با تولید قند می شود. با این حال، کاهش کارایی تیمار ۳۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم ممکن است به محدودیت های جذب یا اشباع شدگی آن در غلظت های بالاتر آن نسبت داده شود. این نتایج نشان دهنده اهمیت انتخاب غلظت و نوع مناسب سیلیکون در افزایش محتوای ساکارز بوده و نشان می دهند که مصرف نانوسیلیکا در شرایط مختلف آبیاری باعث بهبود عملکرد قند نیشکر می شود.

۱۳ روز مشاهده شد. این تفاوت به دسترسی بیشتر آب در دوره های کوتاه تر آبیاری نسبت داده می شود که باعث بهبود تعرق گیاه و بهبود فرآیندهای متابولیکی مرتبط با تولید و انباشت ساکارز می شوند (Mehareb and Gadallah, 2020; Franco et al., 2015). کاهش دفعات آبیاری احتمالاً بر اثر ایجاد تنش آبی، ساخت و ذخیره سازی قندها را محدود کرده و باعث کاهش محتوای ساکارز شده است.

بیشترین میزان ساکارز (۱۷/۳ درصد) در تیمار ۱۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا و کمترین مقدار آن (۱۶/۴ درصد) در تیمار ۳۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم ثبت شد (جدول ۳). این نتایج نشان می دهد که تیمار ۱۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا نسبت به سایر تیمارها، از جمله سیلیکات سدیم، تاثیر بیشتری بر افزایش محتوای ساکارز داشته است. سیلیکون با به تاخیر انداختن واکنش های معکوس و اکسیداسیون نهایی قندها، باعث حفظ و افزایش تولید ساکارز شده و از تجزیه آن به قندهای ساده جلوگیری می کند. به علاوه، سیلیکون در تنظیم انتقال قند از طریق سیستم آوندی نقش دارد، هرچند سازوکارهای دقیق این فرآیند هنوز

جدول ۳- مقایسه میانگین عملکرد قند و صفات کیفی نیشکر در تیمارهای دور آبیاری و محلول پاشی 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	بریکس	قند قابل استحصال	عملکرد قند
		Pol	Brix	White sugar content	Sugar yield
Irrigation intervals	دور آبیاری	(%)	(%)	(%)	(ton.ha ⁻¹)
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	محلول پاشی سیلیکون				
Control	عدم محلول پاشی (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 میانگین هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی داری ندارند

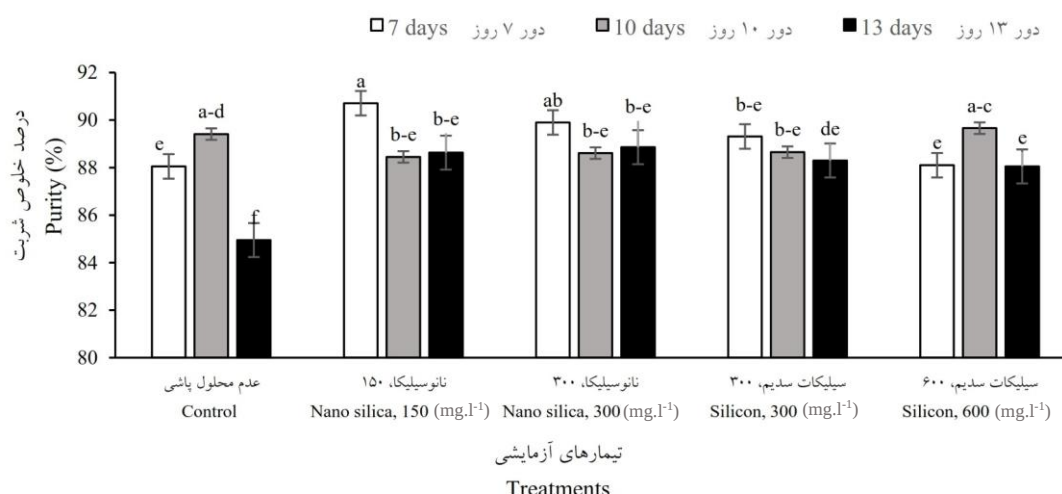
Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using Tukey's test

نتایج نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول پاشی بر مواد جامد محلول در شربت (بریکس) معنی دار 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 می شوند (Mehareb and Gadallah, 2020). کاهش محتوای رطوبت ساقه، باعث کاهش میزان بریکس می شود (Franco et al., 2015). در بین تیمارهای محلول پاشی، ۱۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا بیشترین مقدار بریکس (۱۹/۴ درصد) را داشت و ۳۰۰ میلی گرم 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 احیا کننده نامطلوب می شوند (Albiasetti et al., 2021). این اثر از طریق افزایش تولید قند در برگ ها، انتقال به ساقه ها و تنظیم فعالیت آنزیم های مرتبط با حفظ محتوای ساکارز مانند اینورتازها اعمال می شود (Albiasetti et al., 2021).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول پاشی و برهمکنش آن ها، اثر معنی داری بر درجه خلوص شربت داشتند. تیمار ۱۵۰ میلی گرم 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 محلول پاشی 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 میلی گرم در لیتر) و دور آبیاری ۱۰ روز، درجه خلوص شربت نسبتاً مطلوبی (۸۹/۶ درصد) داشت، اما این اثر در شرایط کم آبی پایدار نبود. به نظر می رسد که

تیمارهای نانوسیلیکا به دلیل اندازه ذرات کوچک تر، جذب بهتر آب و عناصر غذایی و افزایش تحمل گیاه در برابر تنش های محیطی، به ویژه کم آبی، برتری قابل توجهی نسبت به سایر تیمارهای محلول پاشی داشته باشد (شکل ۶). در تیمار عدم محلول پاشی، بیشترین درجه خلوص در دور آبیاری ۱۰ روز مشاهده شد. گزارش شده است که اعمال تنش ملایم آبی به ویژه در مرحله رسیدگی، باعث افزایش تجمع ساکارز و به دنبال آن درجه خلوص شکر می شود. این موضوع به دلیل کاهش رشد رویشی و هدایت منابع فتوسنتزی به سمت ذخیره سازی قند در ساقه اتفاق می افتد. به علاوه تنش ملایم آبی ممکن است باعث کاهش تولید قندهای احیا کننده و افزایش سنتز ساکارز شود. روند مشابه در تیمار ۶۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم و دور آبیاری ۱۰ روز، تقویت کننده این فرضیه است که در شرایط کم آبی، سیلیکون با بهبود روابط آبی گیاه، کاهش ترق و تقویت دیواره های سلولی، باعث حفظ یکپارچگی دیواره های سلولی و کاهش آسیب های ناشی از کم آبی و کمک به تجمع قندها می شود.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول پاشی بر میزان قند قابل استحصال معنی دار 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 به ترتیب به مقادیر ۱۰/۳ درصد و ۱۰ درصد کاهش یافت (جدول ۳). این کاهش می تواند به آثار منفی کم آبی نسبت داده شود که با محدود شدن رشد، کاهش فعالیت فتوسنتزی و اختلال در انتقال قندها به ساقه، تجمع ساکارز در عصاره کاهش می یابد (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 به دست آمد.



شکل ۶- مقایسه میانگین درجه خلوص شربت نیشکر در برهمکنش تیمارهای دور آبیاری و محلول پاشی 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 میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا بیشترین مقدار قند قابل استحصال (به ترتیب ۱۰/۸۵ و ۱۰/۸۷ درصد) به دست آمد (جدول ۳). در تیمار ۳۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم با ۹/۷ درصد، کمترین میزان قند قابل استحصال ثبت شد. تیمار ۶۰۰ میلی گرم در لیتر سیلیکات سدیم با ۱۰/۶ درصد، نسبت به تیمار ۳۰۰ میلی گرم در لیتر برتری داشت، اما همچنان از هر دو تیمار نانوسیلیکا پایین تر بود که این موضوع نشان دهنده برتری نانوسیلیکا نسبت به سیلیکات سدیم است. این برتری می تواند به ویژگی های نانوسیلیکا، از جمله اندازه کوچک تر ذرات و جذب موثرتر توسط گیاه، نسبت داده شود که باعث بهبود فرآیندهای فیزیولوژیک مرتبط با سنتز و ذخیره سازی قند می شود. گزارش شده است که سیلیکون با افزایش تجمع ساکارز و کاهش آسیب های ناشی از تنش خشکی، باعث افزایش کیفیت عصاره نیشکر می شود. به علاوه، ترکیب سیلیکون با عناصری مانند پتاسیم از طریق بهبود هدایت روزنه ای و تجمع مواد جامد محلول، باعث افزایش قند قابل استحصال می شود

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای دور آبیاری و محلول پاشی بر عملکرد شکر در سطح احتمال یک درصد معنی دار بودند. بیشترین عملکرد شکر در دور آبیاری هفت روز (۱۴/۲ تن در هکتار) مشاهده شد که به طور قابل توجهی بالاتر از دورهای ۱۰ و ۱۳ روز (به ترتیب ۱۲ و ۸/۳ تن در هکتار) بود. تیمار ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسیلیکا با ۱۳/۱ تن در هکتار بیشترین عملکرد شکر را داشت. دور آبیاری عامل اصلی تعیین کننده عملکرد شکر است، اما ترکیب یک برنامه مناسب آبیاری با محلول پاشی نانوسیلیکا (به ویژه غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر) می تواند باعث بهبود عملکرد شکر شود (جدول ۳). با توجه به نتایج عملکرد نی به نظر میرسد که افزایش عملکرد شکر در تیمار ۳۰۰

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

نتیجه گیری

نتایج آزمایش حاضر نشان داد که با افزایش فواصل آبیاری از ۷ به ۱۳ روز، عملکرد و شاخص های کیفی عصاره نیشکر به طور معنی داری کاهش یافتند. محلول پاشی نانوذرات سیلیکا، به ویژه غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر، موثرترین تیمار در افزایش عملکرد نیشکر شناخته شد. محلول پاشی نانوذرات سیلیکا ضمن

بهبود رشد رویشی گیاه، باعث بهبود کیفیت عصاره (بریکس و خلوص شربت) شد، اما سیلیکات سدیم کارایی کمتری نسبت به نانو سیلیکا داشت. نتایج این آزمایش نشان داد که محلول پاشی ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات سیلیکا، به ویژه در دور آبیاری بهینه (هفت روز)، یک راهبرد کارآمد برای بهینه سازی زراعت نیشکر است. این رویکرد می تواند علاوه بر بهبود عملکرد و کیفیت و افزایش بهره وری 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 هزینه های اجرای این تحقیق و از همکاری مدیریت و کارکنان محترم شرکت کشت و صنعت امام خمینی (ره) سپاسگزاری می نمایند.

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. <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 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 advances 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 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>