

Effect of silicon and nano silicon application on wheat (C₃) and sorghum (C₄) under salinity stress

Mahboobeh Zarooshan¹ | Ahmad Abdolzadeh^{*2} | Hamid Reza Sadeghipour³ |
Pooyan Mehrabanjoubani⁴

1. Ph.D. Student, Dept. of Biology, Faculty of Science, Golestan University, Gorgan, Iran. E-mail: mzarooshan@yahoo.com
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Biology, Faculty of Science, Golestan University, Gorgan, Iran. E-mail: ahmad.abdolzadeh562@gmail.com
3. Associate Prof., Dept. of Biology, Faculty of Science, Golestan University, Gorgan, Iran. E-mail: h.r.sadeghipour@gmail.com
4. Assistant Prof., Dept. of Basic Science, Faculty of Animal Science and Fisheries, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: p.mehraban@sanru.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Full Length Research Paper</p> <p>Article history: Received: 04.17.2021 Revised: 05.24.2021 Accepted: 06.08.2021</p> <p>Keywords: Nanosilicon, Oxidative stress, Photosynthetic parameters, Salinity, Silicon</p>	<p>Background and Objectives: Salinity stress is one of the factors that reduced the growth and yield of crops. The response of C₃ and C₄ plants to salinity stress and possible mitigation of the effects of this stress with the application of silicon and nanosilicon may be different according to the photosynthetic pathway of these plants. Therefore, this study was conducted to compare the response of wheat as a C₃ plant and sorghum as a C₄ plant to the effect of silicon and nanosilicon application on salinity stress mitigation.</p> <p>Materials and Methods: Two experiments were conducted in a completely randomized design with factorial arrangement in pots filled with soil at Sari University of Agriculture and Natural Resources in 2019. The salinity factor was at two levels included 0 and 100 mM NaCl and the silicon factor was at three levels included 0 and 2 mM potassium silicate and 2 mM nanosilicon (SiO₂). Both forms of silicon were applied as foliar application. Plant photosynthesis-related traits were measured after 13 days of treatments the next day the plants were harvested for growth measurement and other biochemical assays.</p> <p>Results: The results of this study showed that salinity caused a significant reduction in fresh and dry weight of plants in both wheat and sorghum plants. Application of silicon in wheat and application of nanosilicon in sorghum caused a significant increase in fresh and dry weight of plants under salinity. Application of silicon and nanosilicon had no significant effect on stomatal conductance and transpiration of wheat and sorghum plants under salinity. In wheat plants, silicon foliar application significantly increased photosynthesis rate under salinity, but nanosilicon had no significant effect. On the contrary in sorghum, the use of silicon had no significant effect on the photosynthesis rate under salinity, but nanosilicon increased the photosynthesis rate of sorghum plants. In sorghum plant, under salinity conditions, the use of silicon and nanosilicon reduced the amount of hydrogen peroxide contents by 21 and 30%, respectively, and the amount of lipid peroxidation by about 13 and 23%, respectively. However, the use of silicon and nanosilicon did not indicated a significant effect on the content of hydrogen peroxide the amount of lipid peroxidation wheat plants grown under saline condition. The application of silicon in wheat plants increased 58% of the total fresh</p>

weight and 68% of the total dry weight of plants under salinity, although the application of nanosilicon had no significant effect. The use of silicon and nanosilicon increased the fresh and dry weight of sorghum plants under salinity, but the additive effect was greater by application nanosilicon, so that the total dry weight of sorghum plants under salinity in nanosilicon treatment were 75% higher than plants without this treatment.

Conclusion: This study showed that the use of silicon in wheat plants under salinity improved photosynthesis and thus reduced the effects of salinity on growth to some extent, but nanosilicon in this plant did not have such an effect. Conversely, in sorghum plants under salinity, the use of nanosilicon by reducing the amount of hydrogen peroxide and lipid peroxidation, reduced the oxidative stress caused by salinity and increased the photosynthesis rate of the plant, which led to more growth of plants under salinity stress. Such cases were not observed with the use of silicon.

Cite this article: Zarooshan, Mahboobeh, Abdolzadeh, Ahmad, Sadeghipour, Hamid Reza, Mehrabanjoubani, Pooyan. 2022. Effect of silicon and nano silicon application on wheat (C₃) and sorghum (C₄) under salinity stress. *Journal of Plant Production*, 29 (1), 173-190.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JOPP.2022.18995.2802

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

اثر کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون بر برخی صفات گندم (C₃) و سورگوم (C₄) تحت تنش شوری

محبوبه زراوشان^۱ | احمد عبدالزاده^{۲*} | حمیدرضا صادقی‌پور^۳ | پویان مهربان جوبنی^۴

۱. دانشجوی دکتری گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: mzarooshan@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، استاد گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: ahmad.abdolzadeh562@gmail.com
۳. دانشیار گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: h.r.sadeghipour@gmail.com
۴. استادیار گروه علوم پایه، دانشکده علوم دامی و شیلات، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: p.mehraban@sanru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: تنش شوری یکی از عواملی است که رشد و عملکرد گیاهان زراعی را تهدید می‌کند. پاسخ گیاهان C ₃ و C ₄ به تنش شوری و تخفیف احتمالی اثرات این تنش با کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون در این گیاهان ممکن است متفاوت باشد. از این‌رو این پژوهش با هدف مقایسه پاسخ گندم به عنوان یک گیاه C ₃ و سورگوم به عنوان یک گیاه C ₄ ، به تأثیر کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون بر تخفیف تنش شوری انجام شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۸ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۸	مواد و روش‌ها: دو آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی و به صورت فاکتوریل در گلدان در دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال ۱۳۹۸ انجام شد. عامل شوری شامل تیمارهای شوری شاهد (صفر میلی‌مولار) و ۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم و تیمارهای سیلیکون شامل سیلیکون صفر، ۲ میلی‌مولار سیلیکات پتاسیم و ۲ میلی‌مولار نانوسیلیکون بود. هر دو شکل سیلیکون به صورت برگ‌پاشی مورد استفاده قرار گرفت. اندازه‌گیری صفات مرتبط با فتوسنتز گیاهان پس از ۱۳ روز تیماردهی انجام شد و روز بعد گیاهان برای بررسی رشد و سایر صفات بیوشیمیایی برداشت شدند.
واژه‌های کلیدی: تنش اکسیداتیو، سیلیکون، شوری، صفات فتوسنتزی، نانوسیلیکون	یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان داد که شوری در هر دو گیاه گندم و سورگوم موجب کاهش معنی‌دار وزن تر و خشک گیاهان شد. کاربرد سیلیکون در گندم و کاربرد نانوسیلیکون در سورگوم موجب افزایش معنی‌دار وزن تر و خشک گیاهان تحت شوری شد. کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون اثر معنی‌داری در میزان هدایت روزنه‌ای و تعرق گیاهان گندم و سورگوم تحت شوری نداشت. در گیاهان گندم، محلول‌پاشی سیلیکون سبب افزایش معنی‌دار میزان فتوسنتز تحت شوری شد، ولی نانوسیلیکون اثر معنی‌داری نداشت. برعکس در سورگوم، کاربرد

سیلیکون اثر معنی داری در میزان فتوستتز گیاهان تحت شوری نداشت، ولی نانوسیلیکون سبب افزایش فتوستتز این گیاهان شد. در گیاه سورگوم در شرایط شوری استفاده از سیلیکون و نانوسیلیکون میزان پراکسید هیدروژن را به ترتیب به میزان ۲۱ و ۳۰ درصد و میزان پراکسیداسیون لیپید را به ترتیب در حدود ۱۳ و ۲۳ درصد کاهش دادند. هر چند کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون اثر معنی داری در میزان پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپید گیاهان گندم تحت شوری نداشت. کاربرد سیلیکون در گیاه گندم موجب افزایش ۵۸ درصد وزن تر کل و ۶۸ درصد خشک کل گیاهان تحت شوری شد، هر چند کاربرد نانوسیلیکون اثر معنی داری نداشت. استفاده از سیلیکون و نانوسیلیکون موجب افزایش وزن تر و خشک کل گیاهان سورگوم تحت شوری شد، ولی اثر افزایشی نانوسیلیکون بیش تر بود، به طوری که وزن خشک کل گیاهان سورگوم تحت شوری در تیمار نانوسیلیکون ۷۵ درصد بیش تر از گیاهان فاقد این تیمار بود.

نتیجه گیری: این پژوهش نشان داد که استفاده از سیلیکون در گیاهان گندم تحت شوری موجب بهبود فتوستتز شده و از این طریق اثرات شوری در رشد را تا حدودی کاهش داد، اما نانوسیلیکون در این گیاه چنین اثری نداشت. برعکس در گیاهان سورگوم تحت شوری، استفاده از نانوسیلیکون با کاهش میزان پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپید، تنش اکسیداتیو ناشی از شوری را کم و میزان فتوستتز گیاه را زیاد کرد که موجب رشد بیش تر گیاهان تحت تنش شوری شد. چنین مواردی با کاربرد سیلیکون مشاهده نشد.

استناد: زراوشان، محبوبه، عبدالزاده، احمد، صادقی پور، حمیدرضا، مهربان جوبنی، پویان (۱۴۰۱). اثر کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون بر برخی صفات گندم (C₃) و سورگوم (C₄) تحت تنش شوری. نشریه پژوهش های تولید گیاهی، ۲۹ (۱)، ۱۹۰-۱۷۳.

DOI: 10.22069/JOPP.2022.18995.2802



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

شوری یکی از شایع‌ترین تنش‌هایی است که تولید گیاهان زراعی را در زمین‌های خشک و نیمه خشک تهدید می‌کند. تنش شوری در ابتدا، با کاهش جذب آب ناشی از منفی‌تر شدن پتانسیل اسمزی خاک موجب کاهش رشد می‌شود، اما پس از آن سمیت عناصر غالب می‌شود (۱۱). تنش اسمزی و انباشتگی یون‌های سمی موجب تغییرات فیزیولوژیک متنوعی مانند افزایش موقتی ABA، کاهش رشد، فتوستتوز و هدایت روزنه‌ای، اختلال در توانایی سم‌زدایی گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و تغییر در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌شود (۲۸، ۳۲). گیاهان مختلف آستانه تحمل شوری متفاوتی دارند و شیب کاهش رشد گیاهان با افزایش شوری پس از آستانه تحمل نیز در گیاهان با یکدیگر فرق دارد (۳۲). یکی از ویژگی‌هایی که ممکن است موجب تفاوت در پاسخ گیاهان به شوری شود، C₃ یا C₄ روش فتوستتزی گیاه است. در گیاهان C₃ با بسته شدن روزنه‌ها احتمال و کاهش ورود دی‌اکسید کربن داخل برگ انجام تنفس نوری بالا می‌رود که موجب هدررفت انرژی و کاهش تثبیت CO₂ و کارایی فتوستتوز می‌شود. به علاوه، اندامک‌های کلروپلاست، پراکسی‌زوم و میتوکندری که درگیر در تنفس نوری هستند، به کانون‌های اصلی تولید گونه‌های فعال اکسیژن در سلول تبدیل می‌شوند که در نتیجه آن میزان رادیکال‌های آزاد در گیاه افزایش می‌یابد (۵). برگ گیاهان C₄ ساختار تشریحی ویژه‌ای به نام کرانز دارد که در آن سلول‌های غلاف آوندی درشت دور دسته‌های آوندی را احاطه کرده و خود توسط سلول‌های مزوفیل برگ احاطه شده‌اند. تثبیت CO₂ در سلول‌های مزوفیل توسط آنزیم PEP کربوکسیلاز رخ می‌دهد و دی‌اکسید کربن حاصل از اسیدهای آلی چهارکربنه در سلول‌های غلاف آوندی تغلیظ شده و

با آنزیم روبیسکو واکنش کرده و به چرخه کالوین وارد می‌شود. در کلروپلاست سلول‌های غلاف آوندی فتولیز آب و به دنبال آن تولید اکسیژن صورت نمی‌گیرد که به کاهش عمل اکسیژناسیونی روبیسکو کمک می‌کند. بنابراین، گیاهان C₄ تنفس نوری بسیار پایینی دارند و میزان تولید رادیکال‌های آزاد تحت تنش کم‌تر است (۵). مطالعات زیادی اثرات شوری در گیاهان C₃ یا C₄ را به صورت جداگانه بررسی کرده است، هر چند در ارتباط با مقایسه هم‌زمان این دو پژوهش‌های اندکی وجود دارد. استپین و کولبوس (۲۰۰۵) گزارش کردند که تحت شوری در گیاه C₄ ذرت نسبت به گیاه گندم C₃ سرعت فتوستتوز و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند سوپراکسید دیسموتاز بیش‌تر و پراکسیداسیون لیپید کم‌تر است (۳۹). مقایسه دو گونه هالوفیت *Sesuvium portulacastrum* (Aizoaceae) با مسیر فتوستتزی C₃ و *Suaeda nudiflora* (Chenopodiaceae) دارای مسیر فتوستتزی C₄ نشان داد که پس از ۹۰ روز تیمار شوری، پراکسیداسیون لیپید در گونه C₃ کم‌تر و میزان کلروفیل بیش‌تر است (۱۶). گزارش شده است که در علفزارهای آرژانتین با افزایش شوری فراوانی گونه‌های C₄ زیاد می‌شود (۹).

سیلیکون یکی از بهبوددهنده‌هایی است که در تخفیف اثرات زیان‌بار تنش شوری استفاده می‌شود. این عنصر در پوسته فراوان زمین است و از عناصر غیرضروری برای گیاهان عالی محسوب می‌شود، با این وجود در رشد و نمو بهینه برخی از گونه‌ها نقش اساسی دارد. نحوه جذب سیلیکون، به گونه گیاهی و مقدار سیلیکون خاک بستگی دارد (۲۴). در دهه‌های اخیر به علت خواص ویژه نانوذرات در مقایسه با ذرات غیرنانو، بسیاری از کودهای نانو از جمله نانوسیلیکون (nano-SiO₂) مورد استفاده قرار گرفته

آکوپورین‌ها موجب بهبود توازن یونی و اسمزی در گیاهان سورگوم تحت شوری شده و عوارض ناشی از این تنش را بهبود می‌بخشد (۲۲، ۳۴).

شوری موجب کاهش صفات مرتبط با فتوسنتز و افزایش تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌شود و این تغییرات ممکن است بسته به مسیر فتوسنتزی گیاهان C_3 و C_4 متفاوت باشد. از طرف دیگر گزارش‌ها بیانگر اثرات مثبت سیلیکون و نانوسیلیکون در بهبود تبادلات گازی و کاهش تنش اکسیداتیو در گیاهان تحت شوری است. بنابراین، مقایسه هم‌زمان اثرات سیلیکون و نانوسیلیکون در گونه‌های C_3 و C_4 تحت شوری می‌تواند جالب باشد. این مطالعه با هدف مقایسه اثرات کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون بر تخفیف اثرات تنش شوری بر رشد و برخی صفات فیزیولوژیکی و زیست شیمیایی مرتبط با فتوسنتز در گیاه گندم به عنوان گیاه C_3 و سورگوم به عنوان گیاه C_4 انجام شد.

مواد و روش‌ها

بذر گیاهان سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) رقم اسپیدفید و گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم احسان، از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران تهیه شده و در سال ۱۳۹۸ در دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری کشت شدند. که ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. بذرها پس از یک روز آبنوشی درون پارچه مرطوب، درون گلدان‌هایی از جنس پلاستیک با دهانه ۱۴ سانتی‌متر که با خاک زراعی دارای زهکش مناسب پر شده بود (جدول ۲)، کاشته شدند. در ابتدا ۶ بذر در هر گلدان کاشته شد و پس از جوانه‌زنی به ۳ گیاهچه کاهش یافت. به‌علت نیاز بالای نوری و گرمایی

است. کودهای نانو نسبت کودهای متداول به آهستگی و به شکل کنترل شده‌ای انتشار می‌یابد و مانع اتلاف و هدررفت کود می‌شود (۱، ۳۷). پژوهش‌های زیادی نشان دادند که در گیاهان مختلف کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون سبب تخفیف تنش شوری هم در گیاهان C_3 و هم در گیاهان C_4 شده است. کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون در گیاهان C_3 برنج (۱)، کدو (۳۷)، گوجه‌فرنگی (۱۲)، کلزا (۱۳) و پوکسینلیا (۳۸) و در گیاهان C_4 ذرت (۴۴) و سورگوم (۱۴)، اثرات زیانبار شوری را بهبود بخشیدند.

گندم (*Triticum aestivum* L.) از گیاهان زراعی و دارای مسیر فتوسنتزی C_3 است که در تغذیه انسان نقش مهمی دارد (۳۲). گزارش‌های متعددی از کاهش اثرات شوری با تغذیه سیلیکون در گیاه گندم وجود دارد. کاربرد سیلیکون در گندم تحت تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار، موجب افزایش وزن خشک و میزان کلروفیل شد (۴۲، ۲۹). در گیاهان گندم تحت شوری میزان جذب سدیم افزایش و میزان جذب پتاسیم کاهش یافت، در حالی که با افزودن سیلیکون، غلظت سدیم کاهش و غلظت پتاسیم افزایش پیدا کرد و نسبت پتاسیم/سدیم زیاد و میزان پراکسیداسیون لیپید و نشت الکترولیت‌های غشایی کم شد (۴۰). هم‌چنین گزارش شده است که تیمار با نانوسیلیکون در گیاهان گندم تحت تنش شوری، ازدیاد وزن بخش هوایی و ریشه و میزان کلروفیل را سبب شد (۲۹).

سورگوم (*Sorghum bicolor* L.) گیاه زراعی مهم و دارای مسیر فتوسنتزی C_4 است که در تغذیه دام و طیور نقش مهمی دارد (۳۲). استفاده از کود سیلیکون در گیاهان سورگوم تحت تنش شوری، موجب بالا رفتن میزان وزن خشک، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، شدت فتوسنتز، تعرق و بازده کوانتومی شد (۳۰). هم‌چنین سیلیکون با تاثیر بر

گیاهان C₄، گلدان‌های محتوی سورگوم در اواخر خرداد ماه و تحت تابش نور خورشید با میانگین حداکثر دمای روزانه ۳۹ درجه سانتی‌گراد و دمای حداقل شب ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی حدود ۴۰ درصد قرار گرفتند. با توجه به نیاز نوری و دمایی پایین‌تر رویش، گیاهان گندم در مهرماه با دمای میانگین حداکثر دمای روزانه ۲۰ و حداقل شب ۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی حدود ۷۳ درصد کاشته شدند. دو آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با ۵ تکرار اجرا شد. تیمارهای شوری شامل شاهد و ۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم (در حدود ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) و تیمارهای سیلیکون شامل شاهد (فاقد سیلیکون)، ۲ میلی‌مولار سیلیکات پتاسیم و ۲ میلی‌مولار دی‌اکسید سیلیسیوم (SiO₂) به شکل نانوسیلیکون (تهیه شده از شرکت پیشگامان نانومواد ایران، خراسان) بود که ویژگی‌های آن در جدول ۳ نشان داده شده است. تیمارهای شوری با آبیاری هر روزه با آب شور (۱۰۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) انجام شد. اولین تیمار شوری دو هفته پس از رشد گیاه در مرحله پنج برگی (کد ۱۴ زیداکس) به صورت تدریجی و در طی دو روز (روز اول با آب شور ۵۰ میلی‌مولار و از روز دوم با آب شور ۱۰۰ میلی‌مولار) انجام شد تا از شوک اسمزی جلوگیری شود. برای جلوگیری از تجمع نمک، بعد از هر دو روز آبیاری با آب شور، گلدان‌ها با آب معمولی آبیاری شسته شدند، به اندازه‌ای که آب از زیر گلدان خارج شود و سپس مجدداً با آب شور آبیاری می‌شدند. محلول ۲ میلی‌مولار سیلیکون و

نانوسیلیکون (به مدت ۵ دقیقه اولتراسوند شده)، با افزودن توئین ۲۰ (۰/۵ درصد حجمی) به عنوان مویان تهیه شد (۳۳). به علت خاصیت قلیایی سیلیکون، pH محلول با HCl ۰/۱ مولار در ۶/۲ تنظیم شد. تیمارهای سیلیکون و نانوسیلیکون به صورت محلول‌پاشی برگ، یک روز قبل از اعمال تنش شوری و به دنبال آن هر سه روز یک بار (کد ۱۴ کد زیداکس) انجام شد. اندازه‌گیری صفات مرتبط با فتوسنتز ۱۳ روز پس از اعمال تیمارها انجام شد (کد ۱۹ کد زیداکس) و روز بعد گیاهان برداشت شدند. پس از جدا نمودن دو بخش ریشه و بخش هوایی، وزن تر هر یک جداگانه اندازه‌گیری شد. وزن خشک نیز پس از ۴۸ ساعت قرارگیری این بخش‌ها در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در اون اندازه‌گیری شد. نمونه‌های تر اولین برگ گسترش‌یافته در فریزر -۷۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد و برای سنجش میزان پروتئین محلول، پراکسیداسیون لیپید، پراکسیددهیدروژن و سنجش میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز محلول استفاده گردید.

به منظور استخراج کلروفیل و کاروتنوئیدها مقدار ۰/۰۵ گرم برگ با ۲ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد (v/v) هموژن و سپس به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۱۰۰۰g سانتریفوژ و در نهایت محلول بالایی به حجم ۴ میلی‌لیتر رسانده و سپس جذب محلول در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۶ و ۴۷۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر BAUSH and LOMB مدل Milton Roy Company ثبت و مقادیر رنگیزه‌ها بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه شد (۲۱).

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های ارقام گندم و سورگوم مورد استفاده در این پژوهش.

Table 1. Some characteristics of sorghom and wheat varieties used in this experiment.

<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench، سورگوم علوفه ای رقم اسپید فید،	<i>Triticum aestivum</i> L.، گندم نان رقم احسان،
یک‌ساله، ارتفاع تا ۴ متر، ریشه افشان ولی گسترده با جذب آب وسیع Annual, height 4 m, roots are fibrous but widespread with extensive water absorption	یک‌ساله، ارتفاع ۹۰ تا ۱۱۰ سانتی‌متر، ریشه کوتاه و افشان Annual, height 90 to 110 cm, roots short and fibrous
C ₄ ، زمان کاشت در بهار، به شکل دیم و آبی کشت می‌شود C ₄ , Planting time in spring, it is planted in the form of rainfed and irrigated	C ₃ ، بهاره، ولی زمان کاشت در پاییز، به شکل آبی کشت می‌شود C ₃ , spring type, planting time is autumn, cultured in the form of irrigated cultivation
عملکرد دانه ۷ تا ۱۱ تن در هکتار، کشت در مناطق معتدل تا گرم و خشک مانند جنوب خراسان و مازندران، در تغذیه دام به شکل تر، علوفه و سیلو کاربرد دارد Seed yield 7 to 11 tons per hectare, cultivation in temperate to hot and dry areas such as South Khorasan, Mazandaran, It is used in animal feed in wet form, fodder and silage	عملکرد دانه ۵-۸ تن در هکتار، کشت در مناطق پست دریای خزر بیش‌تر در مازندران و گلستان، در تهیه نان استفاده می‌شود Grain yield of 5-8 tons per hectare, cultivation in the Caspian lowlands, mostly in Mazandaran and Golestan provinces, used in bread preparation

گردید. بعد از گذشت یک ساعت شدت رنگ در طول موج ۳۹۰ نانومتر خوانده شد و در مقایسه با استاندارد، میزان پراکسید هیدروژن به دست آمد. برای سنجش مالون دی‌آلدهید از معرف تیوباربیتریک ۰/۵ درصد تهیه شده در تری‌کلرواستیک اسید ۲۰ درصد استفاده شد. جذب مخلوط حاصل در ۴۴۰، ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر خوانده شد. ضریب خاموشی جهت اندازه‌گیری مالون دی‌آلدهید ۱۵۵ $\text{mM}^{-1} \text{cm}^{-1}$ بود و در نهایت مقدار آن برحسب نانومول بر گرم وزن تر محاسبه گردید.

سنجش پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدهید طبق روش سرگیو و همکاران (۱۹۹۷) انجام شد (۵). برای این منظور ۰/۰۵ گرم از بافت تر با ۲ میلی‌لیتر محلول تری کلرواستیک اسید ۰/۱ درصد ساییده و سپس عصاره حاصل به مدت ۲۰ دقیقه در ۱۳۰۰۰ دور سانتریفیوژ شد. برای سنجش پراکسید هیدروژن، ۵۰۰ میکرولیتر از محلول فوقانی با ۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰ میلی‌مولار مخلوط شده و سپس ۱ میلی‌لیتر مخلوط یدید پتاسیم ۱ مولار حل شده در بافر فسفات ۱۰ میلی‌مولار به آن اضافه

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های خاک مورد استفاده در این پژوهش.

Table 2. Some physical and chemical characteristics of soil used in this experiment.

نیترژن N (%)	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (m.eq.100 ⁻¹ g)	کربن آلی OC (%)	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	pH
0.14	13.00	44.00	42.00	22.21	1.49	0.99	7.51
فسفر قابل جذب P (mg kg ⁻¹)	پتاسیم قابل جذب K (mg kg ⁻¹)	آهن Fe (mg kg ⁻¹)	منگنز Mn (mg kg ⁻¹)	روی Zn (mg kg ⁻¹)	مس Cu (mg kg ⁻¹)		
12.64	184.30	56.78	42.83	0.88	2.89		

جدول ۳- ویژگی‌های نانوسیلیکون استفاده شده در این پژوهش.

Table 3. Properties of Nano-Silicon particles used in this experiment.

چگالی Density	درصد خلوص Purity	مساحت سطح ویژه Special Surface area	متوسط اندازه ذرات Average Particles Size	رنگ Color	ریخت‌شناسی Morphology
0/10 (g cm ⁻³)	%99/98	180-600 (m ² g ⁻¹)	20-30 nm	سفید white	آمورف Amorphous

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel و SAS استفاده شد. برای بررسی معنی دار بودن اختلاف میانگین داده‌ها از آزمون LSD استفاده شد.

نتایج و بحث

تغییرات رشد: نتایج مقایسه میانگین صفات رشد در گیاهان مورد مطالعه نشان داد که در گیاه گندم، کاربرد سیلیکون در گیاهان بدون تنش شوری موجب افزایش وزن تر و خشک گیاهان شد، اما نانوسیلیکون اثر معنی دار نداشت. برعکس در سورگوم بدون تیمار شوری، وزن تر و خشک گیاهان تیمار شده با نانوسیلیکون نسبت به گیاهان بدون تیمار سیلیکون بیشتر بود (شکل ۱، جدول ۴). با وجود این که سیلیکون عنصری ضروری برای گیاه به شمار نمی‌آید، اما در ساختار دیواره سلولی ساقه و برگ‌های گیاهان تیره گندم وارد می‌شود و موجب استحکام فیزیکی آن‌ها می‌گردد (۱۹، ۲۰). مالی و همکاران بهبود رشد و افزایش غلظت سیلیکون و پتاسیم را در گیاه گندم با استفاده از تغذیه سیلیکون نشان دادند (۲۵). یاواکومار و همکاران (۲۰۱۱) بیان کردند که نانوسیلیکون باعث افزایش ارتفاع و عرض ساقه، تعداد برگ و مقدار سیلیسیم در گیاه ذرت شد (۴۴).

شوری در هر دو گیاه گندم و سورگوم موجب کاهش معنی دار وزن تر و خشک گیاهان شد. درصد کاهش وزن خشک گندم ۳۶ درصد و ذرت ۳۸ درصد

برای سنجش مقدار پروتئین و فعالیت آنزیم پراکسیداز محلول ۰/۱ گرم از بافت تر برگ، با استفاده از بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار با اسیدیته ۶/۸، ساییده و سپس در ۱۲۰۰۰ دور به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. از محلول رویی برای سنجش مقدار پروتئین و فعالیت آنزیم استفاده شد (۲۳). اندازه‌گیری پروتئین محلول به روش برادفورد در ۵۹۵ نانومتر و برای نمودار استاندارد از آلبومین استفاده شد (۴)

فعالیت آنزیم پراکسیداز محلول با استفاده از روش کار و میسرا (۱۹۷۶) صورت گرفت (۱۷). مخلوط واکنش شامل بافر فسفات ۲۵ میلی‌مولار، گایاکول ۲۰ میلی‌مولار، آب اکسیژنه ۴۰ میلی‌مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. مقدار فعالیت آنزیم پراکسیداز محلول بر اساس تغییرات جذب تبدیل گایاکول به تتراگایاکول در ۴۷۰ نانومتر با ضریب خاموشی ۲۶/۶ $\text{mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$ در دقیقه اندازه‌گیری شد.

میزان فتوسنتز و تبادلات گازی با استفاده از دستگاه پرتابل فتوسنتز متر (WALZ) GFS3000 (آلمان) انجام گرفت. خوانش صفات، در روز آفتابی و ساعت ۱۱ صبح انجام شد. به این شکل که برگ زنده درون محفظه دستگاه قرار گرفت و پس از گذشت چند دقیقه برای رسیدن به تعادل، پارامترهای مربوطه ثبت شد. شدت فتوسنتز، میزان تعرق و هدایت روزنه‌ای به شکل مستقیم و میزان کارایی مصرف آب از تقسیم شدت فتوسنتز بر میزان تعرق به دست آمد.

و کلر و اختلال در جذب عناصر معدنی مانند پتاسیم، منیزیم و کلسیم، سبب تجمع یون‌های سمی و کاهش رشد می‌شود (۳۰، ۴۰، ۴۲ و ۴۳).

بود (شکل ۱، جدول ۴). شوری با کاهش پتانسیل آب و ایجاد شوک اسمزی مانع جذب آب توسط ریشه گیاه می‌شود و از طرف دیگر با ورود یون‌های سدیم



شکل ۱- اثر شوری بر الف- گیاه گندم و ب- سورگوم در حضور و فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون.

Fig. 1. Effect of salinity, on Wheat (right) and sorghum (left) in the presence or absence of Silicon and Nanosilicon.

گیاهان C_3 دیگر مانند خیار و جو نیز تیمار سیلیکون موجب کاهش اثرات شوری در کاهش رشد گیاهان شد (۲۰، ۱۳، ۳۸). هم‌چنین گزارش شده است که تیمار با نانوسیلیکون در گیاهان گندم تحت تنش شوری، ازدیاد وزن بخش هوایی و ریشه را سبب شد (۲۹). علی‌رغم نتیجه مشابه تخفیف اثرات شوری در رشد با کاربرد سیلیکون در گیاهان گندم و نانوسیلیکون در گیاهان سورگوم، به نظر می‌رسد این دو ماده در این گیاهان به شکل متفاوتی عمل می‌کند.

تغییرات صفات فتوسنتزی: میزان کلروفیل a در گندم کم‌تر از سورگوم بود، اما این دو گیاه در کلروفیل b و مجموع کاروتنوئیدها و گزانتوفیل‌ها تفاوت معنی‌داری نداشتند. در گیاهان گندم رشد یافته در شرایط بدون شوری استفاده از نانوسیلیکون و به‌میزان کم‌تر سیلیکون میزان کلروفیل a، کل و مجموع کاروتنوئیدها و گزانتوفیل‌ها را کاهش داد (جدول ۵). برعکس در

در گندم، تیمار سیلیکون موجب افزایش ۵۸ درصد وزن تر و ۶۸ درصد وزن خشک گیاهان تحت شوری شد، ولی نانوسیلیکون اثر معنی‌دار نداشت (جدول ۴). در سورگوم هر دو تیمار سیلیکون و نانوسیلیکون موجب افزایش وزن تر و خشک اندام هوایی گیاهان تحت شوری شد، اما اثر افزایشی نانوسیلیکون بیش‌تر بود به طوری که وزن خشک کل گیاهان تحت شوری با تیمار نانوسیلیکون ۷۵ درصد بیش‌تر از گیاهان فاقد این تیمار بود. تیمارهای سیلیکون و نانوسیلیکون در وزن تر و خشک ریشه گیاهان سورگوم تحت شوری اثر معنی‌دار نداشتند. به نظر می‌رسد اثرات زیانبار ناشی از شوری در سورگوم با محلول‌پاشی نانوسیلیکون و در گندم با محلول‌پاشی سیلیکون تخفیف می‌یابد. تخفیف صدمات شوری با کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون در گیاهان ذرت، سورگوم و برنج گزارش شده است (۱، ۱۴، ۴۴). در

معنی‌داری در میزان هدایت روزنه‌ای، تعرق و فتوستتزر نداشت، در حالی که در گیاهان سورگوم بدون شوری، سیلیکون میزان هدایت روزنه‌ای و تعرق را نسبت به گیاهان شاهد کاهش داد، ولی کاهش آن‌ها با نانوسیلیکون معنی‌دار نبود (جدول ۶). هم‌چنین، در گیاهان سورگوم بدون تنش کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون میزان فتوستتزر را نسبت به گیاهان شاهد به صورت معنی‌داری کاهش داد. تجمع سیلیکون در برگ موجب ضخیم‌شدن کوتیکول و دیواره سلول‌های نگهبان روزنه و در نهایت سبب کاهش میزان تبخیر و تعرق در گیاه می‌گردد (۲۶). در پژوهش مشابهی، برگ‌پاشی سیلیکون و نیز نانوسیلیکون در گیاه سورگوم، سبب کاهش تعرق و هدررفت آب و افزایش تبادلات گازی شد (۶).

در فقدان سیلیکون، شوری سبب کاهش معنی‌دار میزان هدایت روزنه‌ای، تعرق و فتوستتزر در هر دو گیاه گندم و سورگوم شد (جدول ۶). از این سه عامل تنها اثر شوری در درصد کاهش فتوستتزر در گندم بیش‌تر از سورگوم (۷۳ درصد نسبت به گیاهان فاقد شوری در گندم در مقابل ۲۰ درصد در سورگوم) بود در کاهش فتوستتزر در گیاهان تحت شوری احتمالاً به‌دلیل کاهش هدایت روزنه‌ای و به‌دنبال آن کاهش فرآیندهای متابولیکی مرتبط با جذب کربن، بازدارندگی ظرفیت فتوستتزی و هم‌چنین ممکن است به دلیل تغییر در ساختار کلروپلاست باشد (۱۵).

در هر دو گیاه گندم و سورگوم تحت شوری، کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون اثر معنی‌داری در میزان هدایت روزنه‌ای و تعرق نداشت. کاربرد سیلیکون سبب افزایش معنی‌دار میزان فتوستتزر در گیاهان گندم تحت شوری شد، اما نانوسیلیکون اثر معنی‌داری نداشت. برعکس در سورگوم، کاربرد سیلیکون اثر معنی‌داری در میزان فتوستتزر گیاهان تحت شوری نداشت، ولی نانوسیلیکون سبب افزایش

سورگوم کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون در فقدان شوری میزان کلروفیل a، کل و مجموع کاروتنوئیدها و گزانتوفیل‌ها را افزایش داد و این افزایش در تیمار نانوسیلیکون بیش‌تر بود (جدول ۴). کاهش میزان کلروفیل a و کاروتنوئیدها در اثر کاربرد نانوسیلیکون بالای ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر در گیاه گندم گزارش شده است (۱۸).

در گندم، تنش شوری تغییر معنی‌داری در میزان کلروفیل‌ها ایجاد نکرد، ولی مجموع کاروتنوئیدها و گزانتوفیل‌ها را به شکل معنی‌داری افزایش داد. اما در سورگوم، تنش شوری موجب افزایش میزان تمام رنگدانه‌های شامل کلروفیل a به مقدار ۱۰۰ درصد، کلروفیل b به مقدار ۸۰ درصد و مجموع کاروتنوئیدها و گزانتوفیل‌ها ۷۵ درصد شد. افزایش معنی‌دار میزان کاروتنوئیدها در هر دو گیاه تحت تنش شوری مربوط به نقش آنتی‌اکسیدانی کاروتنوئیدها است. این رنگیزه‌ها به‌عنوان گیرنده کمکی نور در فتوستتزر فعالیت دارند و کلروفیل را در برابر اکسیداسیون نوری محافظت می‌کنند. علاوه‌بر این کاروتنوئیدها در چرخه گزانتوفیل با جلوگیری از اثرات زیان‌بار الکترون‌های ناشی از رادیکال‌های آزاد اکسیژن از تخریب کلروفیل جلوگیری می‌کنند (۳۶). استفاده از سیلیکون و نانوسیلیکون در گیاهان گندم تحت تنش شوری اثر معنی‌داری در میزان کلروفیل a و b و مجموع کاروتنوئیدها و گزانتوفیل ایجاد نکرد (جدول ۴)، در حالی که در گیاهان سورگوم تحت تنش شوری، کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون میزان رنگدانه‌های فتوستتزی را به صورت معنی‌داری کاهش داد (جدول ۵).

در گیاهان بدون تیمار شوری، میزان هدایت روزنه‌ای، تعرق و فتوستتزر گیاه سورگوم بسیار بیش‌تر از گندم بود. در گیاه سورگوم در گیاهان گندم بدون تیمار شوری، کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون اثر

آب نسبی گیاهان فاقد تیمار شوری نداشتند، تنها در سورگوم کاربرد نانوسیلیکون سبب کاهش درصد آب نسبی گیاهان فاقد تیمار شوری شد. شوری اثر معنی‌داری در راندمان مصرف آب و درصد آب نسبی گیاهان گندم نداشت. در سورگوم، تنش شوری در درصد آب نسبی اثر معنی‌دار نداشت، اما سبب افزایش معنی‌دار راندمان مصرف آب شد. کاربرد سیلیکون چه به شکل معدنی چه به شکل نانوسیلیکون اثر معنی‌داری بر راندمان مصرف آب و درصد آب نسبی گیاهان سورگوم و گندم تحت شوری نداشتند، فقط در سورگوم کاربرد نانوسیلیکون سبب کاهش درصد آب نسبی گیاهان تحت شوری شد (جدول ۶).

فتوستتز گیاهان تحت شوری شد (جدول ۶). استفاده از کود سیلیکون در گیاهان سورگوم تحت تنش شوری، موجب بالا رفتن میزان وزن خشک، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، شدت فتوستتز، تعرق و بازده کوانتومی شد (۱۰، ۳۰). هم‌چنین موامری و همکاران (۲۰۲۰) بیان داشتند که افزودن نانوذرات مختلف مانند نانوسیلیکات پتاسیم به محلول غذایی گیاه *Onobrychis sativa* به‌عنوان کود باعث نفوذ سریع‌تر و راحت‌تر به درون غشای سلولی، افزایش مقاومت بذور گیاهان در مقابل تنش‌های محیطی، افزایش جوانه‌زنی، افزایش فتوستتز و عملکرد می‌شود (۲۷). کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون در گندم و سورگوم اثر معنی‌داری راندمان مصرف آب و درصد

جدول ۴- اثر سیلیکون و نانوسیلیکون بر وزن تر و خشک گیاهان گندم و سورگوم تحت تنش شوری.

Table 4. Effect of silicon and nanosilicon on fresh and dry weight of wheat and sorghum under salinity stress.

تیمارها Treatments	وزن تر (گرم بونه) Fresh weight (g)						وزن خشک (گرم در بونه) Dry weight (g)					
	گندم Wheat			سورگوم Sorghum			گندم Wheat			سورگوم Sorghum		
	بخش هوایی Shoot	ریشه Root	کل Total	بخش هوایی Shoot	ریشه Root	کل Total	بخش هوایی Shoot	ریشه Root	کل Total	بخش هوایی Shoot	ریشه Root	کل Total
شوری صفر میلی‌مولار 0 mM Salinity												
شاهد Control	3.30 ^b	3.83 ^b	7.13 ^b	6.67 ^b	4.83 ^a	11.50 ^b	0.49 ^b	0.44 ^b	0.93 ^b	1.11 ^b	0.38 ^a	1.49 ^b
سیلیکون Si	6.16 ^a	5.32 ^a	11.48 ^a	7.90 ^a	4.23 ^a	12.14 ^b	1.05 ^a	0.57 ^a	1.63 ^a	1.00 ^b	0.29 ^b	1.30 ^b
نانو سیلیکون NanoSi	3.63 ^b	3.19 ^{bc}	6.83 ^b	8.76 ^a	4.95 ^a	13.72 ^a	0.50 ^b	0.30 ^c	0.81 ^b	1.89 ^a	0.35 ^a	2.25 ^a
شوری ۱۰۰ میلی‌مولار 100 mM Salinity												
شاهد Control	1.92 ^c	2.41 ^c	4.34 ^c	3.38 ^d	3.22 ^b	6.60 ^d	0.34 ^c	0.25 ^c	0.60 ^c	0.58 ^c	0.34 ^{ab}	0.93 ^c
سیلیکون Si	3.09 ^b	3.81 ^b	6.90 ^b	4.44 ^c	4.32 ^a	8.77 ^c	0.63 ^b	0.38 ^b	1.01 ^b	0.71 ^c	0.31 ^{ab}	1.02 ^c
نانو سیلیکون NanoSi	1.88 ^c	2.43 ^c	4.31 ^c	4.60 ^c	4.46 ^a	9.07 ^c	0.34 ^c	0.28 ^c	0.62 ^c	1.28 ^b	0.34 ^a	1.63 ^b

داده‌های هر ستون که حداقل در یک حرف با هم مشترک هستند، با آزمون LSD در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار نیستند

Means followed by the same letter within each column are not significantly different according to a least significant difference (LSD) test (P<0.05)

اثر کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون بر برخی ... / محبویه زراوشان و همکاران

جدول ۵- مقایسه میانگین میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی در واکنش به شوری و در حضور سیلیکون و نانوسیلیکون در برگ گیاهان گندم و سورگوم.

Table 5. Comparison of means of photosynthetic pigments in response to salinity in present or absent of silicon and nanosilicon in wheat and sorghum.

تیمارها Treatments	کلروفیل a Chlorophyll a ($\mu\text{g g}^{-1}$ FW)		کلروفیل b Chlorophyll b ($\mu\text{g g}^{-1}$ FW)		کلروفیل کل Total chlorophylls		کاروتنوئیدها Carotenoids ($\mu\text{g g}^{-1}$ FW)	
	گندم Wheat	سورگوم Sorghum	گندم Wheat	سورگوم Sorghum	گندم Wheat	سورگوم Sorghum	گندم Wheat	سورگوم Sorghum
شوری صفر میلی‌مولار 0 mM Salinity								
شاهد Control	1.32 ^a	0.65 ^c	0.25 ^a	0.20 ^c	1.57 ^a	0.85 ^c	3.82 ^b	3.39 ^c
سیلیکون Si	1.00 ^b	0.86 ^b	0.33 ^a	0.26 ^b	1.33 ^a	1.13 ^b	3.13 ^b	4.18 ^b
نانو سیلیکون NanoSi	0.57 ^b	0.88 ^b	0.18 ^a	0.26 ^b	0.76 ^b	1.14 ^b	2.52 ^c	4.29 ^b
شوری ۱۰۰ میلی‌مولار 100 mM Salinity								
شاهد Control	1.36 ^a	1.21 ^a	0.24 ^a	0.38 ^a	1.61 ^a	1.60 ^a	4.84 ^a	5.96 ^a
سیلیکون Si	1.22 ^a	0.91 ^b	0.27 ^a	0.30 ^b	1.49 ^a	1.22 ^b	4.52 ^a	4.73 ^b
نانو سیلیکون NanoSi	1.17 ^a	0.93 ^b	0.24 ^a	0.30 ^b	1.41 ^a	1.23 ^b	4.43 ^a	4.36 ^b

داده‌های هر ستون که حداقل در یک حرف با هم مشترک هستند، با آزمون LSD در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار نیستند
Means followed by the same letter within each column are not significantly different according to a least significant difference (LSD) test (P<0.05)

جدول ۶- مقایسه میانگین صفات فتوسنتزی گیاهان گندم و سورگوم در پاسخ به شوری و فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون در گیاهان گندم و سورگوم.

Table 6. Comparison of means of photosynthetic parameters in response to salinity in present or absent of silicon and nanosilicon in wheat and sorghum.

تیمار Treatments	تعرق Transpiration ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		فتوسنتز Photosynthesis rate ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		کارایی مصرف آب Water use efficiency ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ Mmol CO ₂)		محتوی آب نسبی Relative water content (%)	
	سورگوم Sorghum	گندم Wheat	سورگوم Sorghum	گندم Wheat	سورگوم Sorghum	گندم Wheat	سورگوم Sorghum	گندم Wheat	سورگوم Sorghum	گندم Wheat
شوری صفر میلی‌مولار 0 mM Salinity										
شاهد Control	4.70 ^a	2.54 ^a	298.26 ^a	46.38 ^a	16.84 ^a	3.42 ^a	0.003 ^c	0.0013 ^a	88.26 ^a	86.75 ^{ab}
سیلیکون Si	2.66 ^b	2.31 ^a	182.29 ^b	39.93 ^a	11.98 ^c	2.42 ^{ab}	0.004 ^{bc}	0.0010 ^{ab}	90.19 ^a	85.80 ^b
نانو سیلیکون NanoSi	3.18 ^{ab}	2.21 ^{ab}	232.42 ^{ab}	42.16 ^a	13.70 ^{abc}	2.82 ^{ab}	0.004 ^{bc}	0.0012 ^a	84.15 ^b	88.00 ^a
شوری ۱۰۰ میلی‌مولار 100 mM Salinity										
شاهد Control	2.30 ^b	1.29 ^c	112.58 ^c	26.12 ^b	13.54 ^{bc}	0.94 ^c	0.006 ^{ab}	0.0008 ^{ab}	87.88 ^a	85.81 ^b
سیلیکون Si	1.90 ^b	1.84 ^{bc}	81.97 ^c	34.96 ^{ab}	14.20 ^{abc}	2.05 ^b	0.007 ^a	0.0010 ^{ab}	89.59 ^a	85.24 ^b
نانو سیلیکون NanoSi	2.31 ^b	1.52 ^c	99.01 ^c	27.38 ^b	15.61 ^{ab}	1.14 ^c	0.006 ^{ab}	0.0007 ^b	82.25 ^b	85.44 ^b

داده‌های هر ستون که حداقل در یک حرف با هم مشترک هستند، با آزمون LSD در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار نیستند
Means followed by the same letter within each column are not significantly different according to a least significant difference (LSD) test (P<0.05)

کم‌تر بود (۳۹). در گیاهان گندم تیمار شده با تنش شوری، کاربرد سیلیکون اثری معنی‌داری بر فعالیت آنزیم پراکسیداز نداشت، اما نانوسیلیکون در حدود ۳۰ درصد سبب افزایش فعالیت پراکسیداز محلول شد (شکل ۲ ب). در گیاهان سورگوم تحت تنش شوری، سیلیکون و نانوسیلیکون اثر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم نداشتند (شکل ۲ ب).

در گندم نه سیلیکون و نه نانوسیلیکون در فقدان شوری اثر معنی‌داری در میزان پراکسید هیدروژن نداشتند، در حالی که در گیاهان سورگوم، سیلیکون و با شدت بیشتر نانوسیلیکون در فقدان شوری سبب کاهش معنی‌دار میزان پراکسید هیدروژن شد.

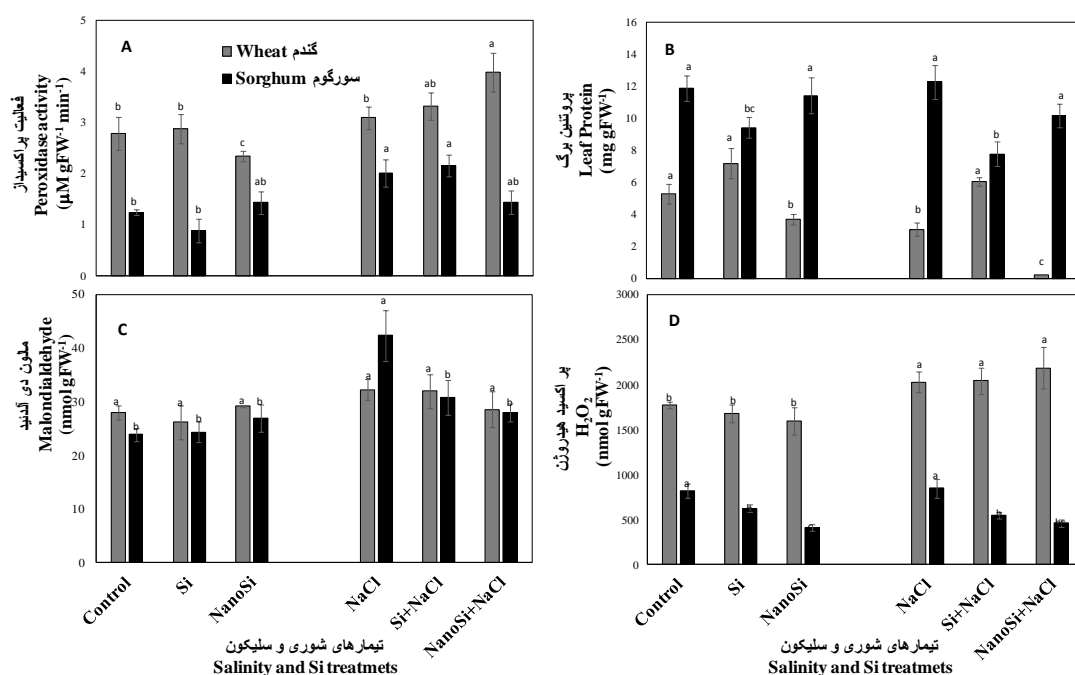
شوری سبب افزایش معنی‌دار میزان پراکسید هیدروژن در گیاهان گندم در هر سه تیمار سیلیکون نسبت به گیاهان شاهد شد. در فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون، تنش شوری اثر معنی‌داری بر میزان پراکسید هیدروژن گیاه سورگوم نداشت (شکل ۲ ج). در گندم سیلیکون و نانوسیلیکون اثر معنی‌داری در میزان پراکسید هیدروژن گیاهان تحت شوری نداشتند، در حالی که در گیاهان سورگوم، سیلیکون و با شدت بیشتر نانوسیلیکون در فقدان و حضور شوری سبب کاهش معنی‌دار میزان پراکسید هیدروژن شدند، به طوری که در گیاه سورگوم در شرایط شوری استفاده از سیلیکون به اندازه ۲۱ درصد و نانوسیلیکون به اندازه ۳۰ درصد میزان پراکسید هیدروژن را کاهش دادند (شکل ۲ ج). پراکسید هیدروژن نقش دوگانه‌ای در گیاهان تحت تنش بازی می‌کند. اول اینکه شاخصی از تولید رادیکال آزاد در گیاه است که میزان آن در گیاهان تحت تنش بالا می‌رود. دوم این که یکی از مولکول‌هایی است که در مسیر مخابره دفاع سلولی فعال است و عملاً با افزایش پراکسید هیدروژن، فرآیند مرگ برنامه‌ریزی شده سلولی آغاز می‌شود (۹).

تغییرات صفات زیست شیمیایی: کاربرد نانوسیلیکون سبب کاهش میزان پروتئین محلول در گیاهان گندم فاقد تنش شوری شد، اما سیلیکون اثر معنی‌دار نداشت. میزان پروتئین محلول در گیاهان گندم تحت تنش شوری و فاقد سیلیکون و نانوسیلیکون نسبت به گیاهان شاهد در حدود ۴۰ درصد کاهش یافت (شکل ۲ الف). در گیاهان سورگوم، کاربرد سیلیکون سبب کاهش میزان پروتئین محلول در گیاهان فاقد تنش شوری شد، اما نانوسیلیکون در این شرایط اثر معنی‌دار نداشت. در گیاهان گندم تحت تنش شوری، کاربرد سیلیکون سبب افزایش در حدود دو برابری مقدار پروتئین‌های محلول شد، اما کاربرد نانوسیلیکون باعث کاهش معنی‌دار میزان پروتئین محلول این گیاهان شد (شکل ۲ الف). شوری اثر معنی‌داری بر میزان پروتئین محلول در گیاه سورگوم در فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون نداشت. کاهش پروتئین محلول در رقم‌های ذرت حساس به شوری، تحت تنش شوری گزارش شده است (۳). در گیاهان سورگوم تحت تنش شوری، کاربرد سیلیکون میزان پروتئین‌های محلول را در حدود ۴۱ درصد کاهش داد، اما نانوسیلیکون اثر معنی‌دار نداشت (شکل ۲ الف).

در گیاهان گندم فاقد شوری، کاربرد نانوسیلیکون سبب کاهش فعالیت پراکسیداز محلول بخش هوایی شد، اما در سورگوم نه سیلیکون و نه نانوسیلیکون اثر معنی‌داری نداشتند. تنش شوری در فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون اثر معنی‌داری در فعالیت پراکسیداز محلول بخش هوایی در گندم نداشت. در سورگوم در فقدان سیلیکون و نانوسیلیکون، تنش شوری موجب افزایش معنی‌دار و در حدود ۵۰ درصد فعالیت پراکسیداز محلول بخش هوایی شد (شکل ۲ ب). این امر به ممکن است به توان پالایش بیشتر تنش اکسیداتیو در گیاه سورگوم مربوط باشد. مشابه این نتایج، در گیاه C_3 گندم نسبت به گیاه C_4 ذرت، میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان تحت شوری بسیار

میزان پراکسیداسیون لیپید را در گیاه سورگوم کاهش داد (شکل ۲ د). در گندم استفاده از سیلیکون و نانوسیلیکون موجب افزایش محتوی آب نسبی و محتوی پتاسیم و کاهش نشت الکترولیت‌ها از غشاهای زیستی، سدیم درونی و میزان مالون دی‌آلدئید شده و بهبود رشد گیاه را سبب می‌شود (۲، ۲۵). استفاده از نانوسیلیکون در گیاه سویا و باقلا تحت تنش شوری، با افزایش سیستم آنتی‌اکسیدانتی موجب کاهش اثرات نامطلوب شوری شد (۷). در گیاه فلفل شیرین طی تنش شوری و در گیاه ذرت در تنش ناشی از آرسنیک استفاده از نانوسیلیکون نسبت به سیلیکون در کاهش تنش مؤثرتر بود (۴۱).

سیلیکون و نانوسیلیکون در شرایط بدون تنش، تغییر معنی‌داری در میزان پراکسیداسیون لیپید گندم و سورگوم ایجاد نکرد. در گیاهان گندم، شوری تنها سبب افزایش اندک مقدار مالون دی‌آلدئید به عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپید شد، در حالی‌که در سورگوم، تنش شوری در گیاهان فاقد سیلیکون و نانوسیلیکون، موجب افزایش معنی‌دار و در حدود ۵۰ درصد میزان پراکسیداسیون لیپید اندام هوایی شد (شکل ۲ د). سیلیکون و نانوسیلیکون در گیاهان گندم تحت شوری، تغییر معنی‌داری در میزان پراکسیداسیون لیپید ایجاد نکردند، در حالی‌که کاربرد سیلیکون و نانوسیلیکون به ترتیب در حدود ۱۳ و ۲۳ درصد



شکل ۲- اثرات تنش شوری، سیلیکون و نانوسیلیکون بر میزان الف- فعالیت پراکسیداز محلول، ب- پروتئین محلول، ج- مالون دی‌آلدئید و د- پراکسید هیدروژن بخش هوایی گیاهان گندم و سورگوم. میله‌های روی هر یک از ستون‌ها نشان‌دهنده خطای استاندارد است. داده‌های هر گیاه به صورت مستقل که حداقل در یک حرف با هم مشترک هستند، با آزمون LSD در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار نیستند.

Fig. 2. Effect of salinity on A- soluble peroxidase activity, B-soluble protein, C-malon dialdehyde and D-peroxide hydrogen in wheat and sorghum in present or absent of silicon and nanosilicon. bar=standard error. Means followed by the same letter are not significantly different according to a least significant difference (LSD) test (P<0.05).

در سورگوم، کاربرد نانوسیلیکون در گیاهان تحت شوری میزان پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپید را کاهش داد که بیانگر کاهش تنش اکسیداتیو است و بنابراین میزان فتوسنتز گیاه افزایش یافت که موجب رشد بیش‌تر گیاهان تحت تنش شوری شد. چنین مواردی با کاربرد سیلیکون مشاهده نشد. این نتایج آشکار می‌سازد که سیلیکون و نانو سیلیکون در این دو گیاه اثرات متفاوت دارند که ممکن است به جذب و یا نحوه اثر این دو شکل سیلیکون مربوط باشد و نیاز به بررسی بیش‌تر دارد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تنش شوری میزان فتوسنتز و رشد را در هر دو تیپ فتوسنتزی کاهش داد. در گندم، با کاربرد سیلیکون در گیاهان تحت تنش شوری، در میزان رنگیزه‌ها تغییر معنی‌داری مشاهده نشد، اما میزان فتوسنتز و پروتئین‌های محلول افزایش و میزان تعرق و هدایت روزنه‌ای کاهش یافت که رشد بیش‌تر را به دنبال داشت. بنابراین کاربرد سیلیکون در گندم با بهبود فتوسنتز اثرات زیانبار ناشی از شوری در رشد را تا حدودی کاهش داد، اما نانوسیلیکون در این گیاه چنین اثری نداشت. برعکس

منابع

1. Abdel-Haliem, M.E., Hegazy, H.S., Hassan, N.S. and Naguib, D.M. 2017. Effect of silica ions and nano silica on rice plants under salinity stress. *Ecol. Eng.* 99: 282-289.
2. Alzahrani, Y., Kuşvuran, A., Alharby, H.F., Kuşvuran, S. and Rady, M.M., 2018. The defensive role of silicon in wheat against stress conditions induced by drought, salinity or cadmium. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 154: 187-196.
3. Azevedo Neto, A.D., Prisco, J.T. and Gomes-Filho, E. 2009. Changes in soluble amino-N, soluble proteins and free amino acids in leaves and roots of salt-stressed maize genotypes. *J. Plant Interac.* 4: 137-144.
4. Bradford, M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.* 72: 248-254.
5. Bräutigam, A. and Gowik, U. 2016. Photorespiration connects C₃ and C₄ photosynthesis. *J. Exp. Bot.* 67: 2953-2962.
6. De Oliveira, R.L.L., de Mello Prado, R., Felisberto, G. and Cruz, F.J.R. 2019. Different sources of silicon by foliar spraying on the growth and gas exchange in sorghum. *Soil Sci. Plant Nutr.* 19: 4. 948-953.
7. Farhangi-Abriz, S. and Torabian, S. 2018. Nano-silicon alters antioxidant activities of soybean seedlings under salt toxicity. *Protoplasma.* 255: 3. 953-962.
8. Farouk, S. 2011. Ascorbic acid and α -Tocopherol minimize salt-induced wheat leaf senescence. *J. Stress Physiol. Biochem.* 7: 58-79.
9. Feldman, S.R., Bisaro, V., Biani, N.B. and Prado, D.E. 2008. Soil salinity determines the relative abundance of C₃/C₄ species in Argentinean grasslands. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 17: 6. 708-714.
10. Gowayed, M.H., Al-Zahrani, H.S. and Metwali, E.M. 2017. Improving the salinity tolerance in potato (*Solanum tuberosum*) by exogenous application of silicon dioxide nanoparticles. *Int. J. Agric. Biol.* 19: 183-194.
11. Gupta, B. and Huang B. 2014. Review Article Mechanism of Salinity Tolerance in Plants: Physiological, Biochemical, and Molecular Characterization. *Orporation. Int. J. Genom.* 14: 1-19.
12. Haghghi, M. and Pessarakli, M. 2013. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Sci. Hort.* 61: 111-117.
13. Hashemi, A., Abdolzadeh, A. and Sadeghipour, H.R. 2010. Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating

- salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. *Soil Sci. Plant Nutr.* 56: 2. 244-253.
14. Hurtado, A.C., Chiconato, D.A., de Mello Prado, R., Junior, G.D.S.S. and Felisberto, G. 2019. Silicon attenuates sodium toxicity by improving nutritional efficiency in sorghum and sunflower plants. *Plant Physiol. Biochem.* 142: 224-233.
 15. Jamil, M., Lee, K.J., Kim, J.M., Kim, H.S. and Rha, E.S. 2007. Salinity reduced growth PSII photochemistry and chlorophyll content in radish. *Sci. Agric.* 64: 2. 111-118.
 16. Jothiramshekar, S., Benjamin, J.J., Krishnasamy, R., Pal, A.K., George, S., Swaminathan, R. and Parida, A.K. 2018. Responses of selected C₃ and C₄ halophytes to elevated CO₂ concentration under salinity. *Curr. Sci.* 115: 1. 129-135.
 17. Kar, M. and Mishra, D. 1976. Catalase, Peroxidase and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. *Plant Physiol.* 57: 315-319.
 18. Karimi, J. and Mohsenzadeh, S. 2016. Effects of silicon oxide nanoparticles on growth and physiology of wheat seedlings. *Russ. J. Plant Physiol.* 3: 1. 119-123.
 19. Liang, Y.C. 1998. Effects of silicon on leaf ultrastructure, chlorophyll content and photosynthetic activity in barley under salt stress. *Pedosphere.* 8: 289-296.
 20. Liang, Y., Chen, Q.I.N., Liu, Q., Zhang, W. and Ding, R. 2003. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *J. Plant Physiol.* 160: 1157-1164.
 21. Lichtenthaler, H.K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods Enzymol.* 148: 350-382.
 22. Liu, P., Yin, L., Wang, S., Zhang, M., Deng, X., Zhang, S. and Tanaka, K. 2015. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon alleviated salt-induced osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. *Environ. Exp. Bot.* 111: 42-51.
 23. Liu, X. and Huang, B. 2000. Heat stress injury in relation to membrane lipid peroxidation in creeping. *Crop Sci.* 40: 503-510.
 24. Ma, J.F. and Yamaji, N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends Plant Sci.* 11: 8. 392-397.
 25. Mali, M. and Aery, N.C. 2008. Influence of silicon on growth, relative water contents and uptake of silicon, calcium and potassium in wheat grown in nutrient solution. *J. Plant Nutr.* 31: 11. 1867-1876.
 26. Matoh, T., Kairusmee, P. and Takahashi, E. 1986. Salt-Induced Damage to Rice Plants and Alleviation Effect of Silicate. *Soil Sci. Plant Nutr.* 32: 295-304.
 27. Moameri, M., Alijafari, E. and Ghorbani, A. 2020. Effect of some growth facilitators on the growth parameters *Onobrychis sativa* Lam. in greenhouse. *J. Plant Res.* 32: 4. 886-895.
 28. Munns, R. and Tester, M. 2008. Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59: 651-681.
 29. Mushtaq, A., Jamil, N., Riaz, M., Hornyak, G.L., Ahmed, N., Ahmed, S.S., Shahwani, M.N. and Malghani, M.N.K. 2017. Synthesis of Silica Nanoparticles and their effect on priming of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Biol. Forum.* 1: 150-157.
 30. Nabati, J., Kafi, M., Masoumi, A. and Zare Mehrjerdi, M. 2013. Effect of salinity and silicon application on photosynthetic characteristics of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) *Int. J. Agric. Sci.* 3: 483-492.
 31. Negrão, S., Schmöckel, S.M. and Tester, M. 2017. Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. *Ann. Bot.* 119: 1. 1-11.
 32. Orhun, G.E. 2016. Biotechnological Methods for the Improvement Cereals. *Inter. J. Food Eng.* 2: 2. 128-131.
 33. Qados, A. and Moftah, A.E. 2015. Influence of silicon and nano-silicon on germination, Growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.) under salt stress conditions. *Am. J. Exp. Agric.* 5: 509-524.

34. Rios, J.J., Martínez-Ballesta, M.C., Ruiz, J.M., Blasco, B. and Carvajal, M. 2017. Silicon-mediated improvement in plant salinity tolerance: the role of aquaporins. *Front. Plant Sci.* 8: 948.
35. Sergive, I., Alexieva, V. and Karanov, E. 1997. Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective systems and stress markers in plants. *Comptes Rendus de Academie Bulg. Des.* 51: 121-124.
36. Shakeri, E., Emam, Y., Pessarakli, M. and Tabatabaei, S.A. 2020. Biochemical traits associated with growing sorghum genotypes with saline water in the field. *J. Plant Nutr.* 43: 8. 1136-1153.
37. 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. *Environ. Toxicol. Chem.* 33: 2429-2437.
38. Soleimannejad, Z., Abdolzadeh, A. and Sadeghipour, H.R. 2019. Beneficial effects of silicon application in alleviating salinity stress in halophytic *Puccinellia distans* plants. *Silicon.* 11: 2. 1001-1010.
39. Stepien, P. and Klobus, G. 2005. Antioxidant defense in the leaves of C₃ and C₄ plants under salinity stress. *Physiol. Plant.* 125: 1. 31-40.
40. Tahir, M.A., Rahmatullah, T., Aziz, M., Ashraf, S., Kanwal, S. and Maqsood, M.A. 2006. Beneficial effects of silicon in wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Pak. J. Bot.* 38: 5. 1715-1722.
41. Tripathi, D.K., Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D.K. and Dubey, N.K. 2016. Silicon nanoparticles more efficiently alleviate arsenate toxicity than silicon in maize cultivar and hybrid differing in arsenate tolerance. *Front. Environ. Sci.* 4: 46-5.
42. Tuna, A.L., Kaya, C., Higgs, D., Murillo-Amador, B., Aydemir, S. and Girgin, A.R. 2008. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. *Environ. Exp. Bot.* 62: 1. 10-16.
43. Yin, L., Wang, S., Li, J., Tanaka, K. and Oka, M. 2013. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. *Acta Physiol Plant.* 35: 11. 3099-3107.
44. Yuvakkumar, R., Elango, V., Rajendran, V., Kannan, N.S. and Prabu, P. 2011. Influence of nanosilica powder on the growth of maize crop (*Zea mays* L.). *Int. J. Green Nanotechnol.* 3: 180-190.