

تأثیر سیلیکون و نانودی اکسید سیلیکون بر فاکتورهای رشدی، مقدار اسمولیت‌ها و محتوای یونی گیاه زعفران (*Crocus Sativus L.*) تحت تنش شوری

مریم عاصمه و لطیفه پوراکبر*

ایران، ارومیه، دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم پایه، گروه زیست‌شناسی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۷

چکیده

هدف از این مطالعه بررسی اثر تنش شوری بر گیاه زعفران و نقش محلول‌پاشی سیلیکون و نانودی اکسید سیلیکون در کاهش اثر شوری بود. در این راستا گیاهان زعفران به مدت ۱ ماه در وضعیت گلخانه‌ای و به روش هیدروپونیک کشت شدند و تیمار شوری در سه سطح (۰، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) بعد از مرحله ۴ برگگی (گیاهان ۱ ماهه) به مدت سه ماه به گیاهان زعفران اعمال شد. سیلیکون و نانودی اکسید سیلیکون نیز در دو سطح ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار به صورت افشانه بر برگ گیاه زعفران اعمال گردید. بعد از سه ماه اعمال تیمارها گیاهان برداشت گردیده و فاکتورهای رشدی و بیوشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شوری طول و وزن خشک اندام هوایی و زیرزمینی، مقدار پتاسیم (۲۶/۳۶ تا ۴۵/۸۴٪)، نسبت K^+/Na^+ (۴/۶۷ تا ۹/۵۲ برابر) و RWC (۵۷/۷۵٪) را کاهش داد. علاوه بر این، شوری مرگ سلولی (۱۴۲ تا ۱۶۷٪)، مقدار پرولین (۱۱۹/۷۴ تا ۱۳۱/۴۷٪) و گلاسیسین بتایین (۵۴/۱۸ تا ۶۵/۷۰٪)، محتوای یون‌های سدیم (۶/۵۳ تا ۸/۷۸ برابر) و کلر (۱/۹۳ تا ۴/۹۲ برابر) را در گیاهان تحت تیمار افزایش داد. اعمال سیلیکون و نانودی اکسید سیلیکون موجب بهبود فاکتورهای رشدی، مقدار پتاسیم، نسبت K^+/Na^+ و RWC شد. نتایج همچنین نشان داد که اعمال سیلیکون و نانودی اکسید سیلیکون موجب کاهش اسمولیت‌های سازگار و یون‌های سدیم و کلر شد. می‌توان نتیجه گرفت که سیلیکون و نانودی اکسید سیلیکون، به‌ویژه نانودی اکسید سیلیکون در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار، توانایی کاهش سمیت حاصل از تنش شوری را در زعفران دارند و می‌توانند در افزایش مقاومت گیاهان زعفران در برابر تنش شوری نقش مهمی داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: اسمولیت‌های سازگار، زعفران، شوری، محتوای یونی، نانوذرات سیلیکون.

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۴۴۳۱۹۴۲۱۰۰، پست الکترونیکی: l.pourakbar@urmia.ac.ir

مقدمه

روزنه می‌شود (۲۰). لذا ضروری است که مکانیسم‌های فیزیولوژیکی اثرات کمبود رطوبت و تنش اسمزی بر کاهش رشد گیاه مورد بررسی قرار گیرد (۴۶). عمده‌ترین اثر تنش شوری بر گیاهان جلوگیری از رشد است که ممکن است بدلیل کاهش تقسیم سلولی، عدم تعادل یونی، کاهش جذب آب، اختلال در جذب عناصر، اثرات یون-های سمی بویژه سدیم، اختلال در جذب، احیاء و متابولیسم ازت و پروتئین، بسته شدن جزئی یا کلی روزنه-ها و کاهش کارایی فتوسنتز باشد (۴۱).

شوری یکی از تنش‌های غیرزنده است که عملکرد کشاورزی را تحت تأثیر قرار داده و حداقل به ۲۰٪ از محصولات زراعی کشت شده در سراسر جهان آسیب می‌رساند (۲۴). درک چگونگی واکنش گیاه به شوری می‌تواند نقش عمده‌ای در ثبات عملکرد گیاهان زراعی داشته باشد (۱۳). میزان جذب آب در گیاهانی که تحت تنش شوری قرار می‌گیرند شدیداً کاهش می‌یابد که می‌تواند بر آب درون و برون سلولی اثر گذاشته و از گسترش سلول جلوگیری کند که نهایتاً این امر منجر به افت عملکرد

تعرق را کاهش می‌دهد که این امر ممکن است کاهش جذب سدیم تحت تاثیر شوری را به دنبال داشته باشد. از طرف دیگر مطالعات نشان داده است که حفظ یک‌پارچگی ساختار دیواره سلولی ریشه توسط Si در گیاهان تحت تنش شوری منجر به الفاء تارهای کشنده شده که جذب مواد مغذی از محیط هیدروپونیک را افزایش می‌دهد (۴۷). سمیت یونی یک عامل مهم دیگر برای محدودیت رشدی گیاه تحت تنش شوری می‌باشد که Si می‌تواند از طریق کاهش غلظت یون سدیم و افزایش غلظت یون پتاسیم در برگ‌ها به میزان زیادی از ایجاد سمیت جلوگیری کند (۱۴). در همین راستا مطالعات نشان داده است که اعمال Si در گیاه زعفران تحت تنش شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار موجب افزایش طول کلاله به ترتیب به مقدار ۲۹ تا ۴۲ درصد می‌شود. همچنین نتایج این تحقیق نشان داده است که اعمال Si از طریق بهبود پارامترهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی که شامل افزایش RWC، کاهش جذب ریشه-ای یون سدیم به عنوان یک یون سمی، کاهش انتقال یون سدیم به اندام هوایی و افزایش جذب یون پتاسیم می‌باشد، اثرات بد شوری را تا حدودی بهبود می‌بخشد (۲۷).

زمینه‌ی نانو تکنولوژی یکی از فعال‌ترین رشته‌های تحقیقاتی در علوم مادی مدرن می‌باشد که روز به روز در حال گسترش و ورود به تمام زمینه‌های زندگی بشر و تاثیرگذاری در آن است (۴۵). نانو ذرات به دلیل اثرات خاص و ویژگی‌های منحصر به فردشان، ورود گسترده‌ای به دنیای کشاورزی و زیست‌شناسی داشته‌اند (۴۰). با این-حال، تحقیقات در مورد رفتار نانوفلزات مانند نانوسیلیکون در گیاهان و مکانیسم تعامل و تاثیر آن در کاربرد کشاورزی هنوز در مراحل ابتدایی قرار دارند (۱۶). یافته‌ها نشان می‌دهد که نانوذرات سیلیکون موجب افزایش رشد در گونه‌های مختلف گیاهی مثل ذرت (۵۰) و برنج (۱۶) می‌شود. نتایج تحقیقات نشان داده است که اعمال نانوذرات دیگر مثل دی‌اکسید تیتانیوم در گیاه زعفران تحت

از میان رویکردها، بهبود وضع تغذیه‌ای گیاهان با استفاده از مکمل‌های خارجی برای جبران آسیب‌های ناشی از تنش-های غیرزیستی در گیاهان مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا بهبود رشد و عملکرد گیاه زعفران تحت شرایط تنش با اعمال اگزورنی (برون‌زاد) مواد معدنی مانند پتاسیم (۸) و نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (۳۷) گزارش شده است. به‌علاوه برخی مواد مغذی معدنی سودمند نیز مورد بررسی قرار گرفته است که می‌تواند در کاهش اثرات نامطلوب تنش شوری و افزایش مقاومت گیاهان در مقابل تنش موثر واقع شود (۵۱). سیلیسیم (Si) دومین عنصر فراوان در سطح کره زمین و یکی از عناصر غذایی مفید در رشد و سلامت گیاهان می‌باشد. با وجود اهمیت Si به عنوان ماده معدنی گیاهی، Si به عنوان یک عنصر ضروری برای گیاهان به‌غیر از اعضا دم اسبیان (Equisitaceae) محسوب نمی‌شود و بنابراین در فرمول‌بندی هیچیک از محلول‌های غذایی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد (۱۸). سیلیسیم نه تنها به عنوان یک مانع فیزیکی و مکانیکی در گیاهان عمل کرده و در دیواره سلولی ذخیره می‌شود بلکه بطور فعال در فعالیت‌های متابولیکی و یا فیزیولوژیکی مخصوصاً در گیاهان تحت تنش‌های محیطی دخالت می‌کند (۳۲). به‌عنوان اثر مفید سیلیسیم ثابت شده است که این عنصر می‌تواند عاملی برای افزایش تولید و کیفیت محصول و کاهش تبخیر و تعرق باشد (۱۴). تاثیر سیلیسیم بر عملکرد گیاه ممکن است به دلیل رسوب آن در پهنک برگ، افزایش استحکام برگ‌ها و افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ باشد که از این طریق توانایی گیاه برای استفاده موثرتر از نور را بالا می‌برد (۳۳). سیلیسیم تحمل به شوری در گیاه را به‌وسیله بهبود تعادل آبی و کاهش سمیت یونی افزایش می‌دهد (۳۰). احتمال داده می‌شود که سیلیسیم با ایجاد کمپلکس‌های پیچیده با ترکیبات دیواره، در استحکام و اندازه منافذ دیواره و نیز رشد قطری و طولی یاخته‌ها به ویژه، آوندهای چوبی گیاهان نقش اساسی داشته باشد. بنابر این تغذیه مناسب سیلیسیم مقدار

این منطقه رو به افزایش است و یافتن راه‌هایی برای بهبود بخشیدن رشد گیاهان تحت تنش شوری ضروری به نظر می‌رسد. لذا از اهداف این مطالعه بررسی اثرات سیلیکون و نانو ذرات دی‌اکسید سیلیکون بر برخی فاکتورهای رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه زعفران تحت تنش شوری بود.

مواد و روشها

ابتدا بنه‌های سالم و یک ساله‌ی گیاه زعفران در فصل پاییز از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی تهیه شدند. بنه‌ها به گلدان‌های پلاستیکی با قطر ۲۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر که حاوی پرلیت بودند در اواخر مهر ماه، انتقال داده شدند. بنه‌ها در عمق ۲۰ سانتی‌متری قرار گرفتند و تا قبل از جوانه‌زنی، گیاه در شرایط تاریکی قرار داشت و به محض دیدن اولین جوانه، گیاهان در اتاقک‌های کشت با شرایط نوری ۱۰ ساعت روشنایی و ۱۴ ساعت تاریکی با شدت نور $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$ و در دمای بیشینه ۲۹ درجه سانتی‌گراد و کمینه ۲۲ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

اعمال تیمار: گلدان‌ها به ۱۵ گروه (تیمار) تقسیم شدند. هر گروه حاوی ۴ گلدان که در هر کدام ۲ بنه گیاه زعفران به روش هیدروپونیک مبتنی بر بستر ثابت پرلیت کاشته شد. گروه‌های تیمار در جدول ۱ آمده است.

لازم به ذکر است که از کلرید سدیم برای شوری و از سیلیکات سدیم برای تیمار سیلیکون استفاده شد. اعمال تیمار در مرحله‌ی ۴ برگی آغاز شد. آبیاری گیاه به فاصله هر ۳ روز یک بار انجام گردید به این‌صورت که یک روز تنها آب مقطر و ۳ روز بعد محلول هوگلند همراه با شوری‌های ذکر شده به گیاه داده شد و سیلیکون (Si) و نانو دی‌اکسیدسیلیکون ($\text{SiO}_2 \text{ NPs}$) نیز روزانه روی برگ‌های گیاه زعفران اسپری گردید. اعمال تیمارها ۳ ماه به طول انجامید.

تنش اشعه فرابنفش B موجب بهبود فاکتورهای رشدی و افزایش خواص آنتی‌اکسیدانی کلاله زعفران می‌شود (۳۷).

زعفران با نام عمومی Saffron و نام علمی *Crocus sativus* L. دارای ۸۵ گونه است که به‌عنوان گران‌ترین محصول کشاورزی و دارویی جهان، جایگاه ویژه‌ای در بین محصولات صنعتی و صادراتی ایران دارد (۲۸). زعفران یک گیاه ژئوفیت (زمین‌رست) است که گلدهی آن در فصل پاییز صورت می‌گیرد (۳۵). مطالعات اخیر نشان داده است که این گیاه یک داروی پیشگیری‌کننده و درمانی مفید برای سرطان‌های مختلف است (۱۲). در رابطه با پاسخ گیاه زعفران به تنش شوری مطالعات کمی در دست است. مطالعه اثر متقابل تنش شوری با رژیم آبیاری بر عملکرد و رشد زعفران نشان داده است که گلدهی و عملکرد بنه به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین حساسیت را به تنش شوری و کاهش آب آبیاری دارد و با افزایش شوری کاهش وزن خشک در گل‌ها، بنه، ریشه و برگ‌های زعفران مشاهده می‌گردد (۱۹). تحقیقات نشان است که اعمال شوری تا غلظت ۲۰۰ میلی‌مولار بر گیاهان زعفران منجر به کاهش رشد، محتوای نسبی آب و افزایش محتوای پرولین و یون سدیم در قسمت‌های مختلف زعفران می‌شود (۴۴). نتایج تحقیقات در مراكش بر روی زعفران نشان داده است که شوری در غلظت ۱ تا ۵ میلی‌گرم بر لیتر موجب کاهش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و عملکرد کوانتومی فتوسیستم II شده و تجمع پرولین و قندها را در پی دارد (۳۸). همچنین مطالعه Dastranj and Sepaskhah (۱۵) روی زعفران نشان داده است که اعمال شوری بر زعفران موجب کاهش نسبت رشد محصول و کاهش تراکم بوته و رشد زعفران می‌شود.

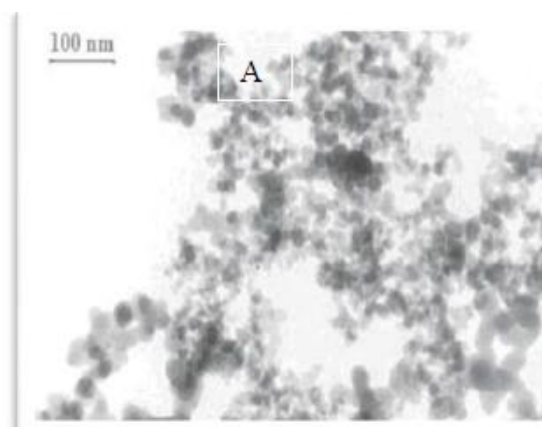
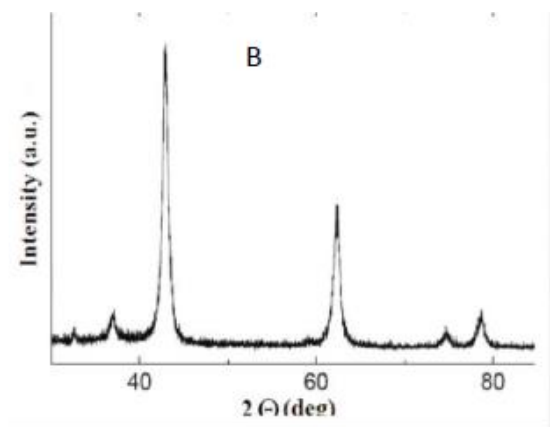
اخیراً کشت گیاه زعفران در سطح وسیع در بیشتر شهرهای آذربایجان غربی به ویژه ارومیه رو به افزایش است. با توجه به تغییرات اقلیم و کاهش بارندگی و همچنین خشک شدن تدریجی دریاچه ارومیه، شوری در خاک‌های کشاورزی

جدول ۱- تیمارهای انجام گرفته روی گیاه زعفران

| SiO ₂ NPs | Si | شوری |
|---|-----------------------|-------------|
| SiO ₂ NPs 0.5 mM | Si 0.5 mM | NaCl 0 |
| SiO ₂ NPs 1mM | Si 1mM | (شاهد) |
| NaCl 75 mM+SiO ₂ NPs 0.5 mM | NaCl 75 mM+Si 0.5 mM | NaCl 75 mM |
| NaCl 75 mM+SiO ₂ NPs 1 mM | NaCl 75 mM+Si 1 mM | |
| NaCl 150 mM+SiO ₂ NPs 0.5 mM | NaCl 150 mM+Si 0.5 mM | NaCl 150 mM |
| NaCl 150 mM+SiO ₂ NPs 1 mM | NaCl 150 mM+Si 1 mM | |

تهیه نانوذره سیلیکون: نانوذرات دی‌اکسید سیلیکون (SiO₂) از شرکت US Research Nanomaterials هوستون آمریکا خریداری گردید. اندازه نانوذرات خریداری شده ۲۰-۳۰ نانومتر با خلوص ۹۸ درصد و دارای چگالی ۵/۶ g/cm³ با رنگ سفید شیری و مورفولوژی بی‌شکل و غیر متبلور بود (شکل ۱). غلظت ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار از نانوذره دی‌اکسید سیلیکون تهیه شد و برای بدست آمدن محلول همگن، محلول‌های تهیه شده از نانوذرات به مدت ۳۰ دقیقه اولترا سونیک (۱۰۰ وات و ۴۰ کیلو هرتز) شدند.

بعد از پایان اعمال تیمار، برداشت گیاهان انجام شد. طول اندام هوایی و زیرزمینی، وزن تر و خشک اندام هوایی و زیرزمینی اندازه‌گیری شد. از کل نمونه‌ها، از هر گلدان یک پایه به‌عنوان نمونه تر و یک پایه به‌عنوان نمونه خشک جداسازی شد. برای تهیه نمونه‌های خشک، نمونه‌ها بعد از جداسازی اندام هوایی از ریشه‌ها در آون ۷۰ درجه به مدت ۷۲ ساعت قرار داده شدند. نمونه‌های تر نیز در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.



شکل ۱- A تصویر میکروسکوپ الکترونی و B گراف نانوذرات دی‌اکسید سیلیکون

عمل موجب آزاد شدن معرف به تله افتاده گردید. عصاره حاصل به مدت ۱۵ دقیقه در داخل بن ماری ۵۰°C قرار گرفته و سپس به مدت ۱۵ دقیقه توسط دستگاه سانتریفوژ Hermle مدل Z320 ساخت آلمان با نیروی ۱۴۰۰۰ g سانتریفوژ گردید. جذب توسط دستگاه اسپکتروفتومتر Dynamica مدل Halo DB-20 ساخت انگلیس در طول موج ۶۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد و در نهایت مقدار مرگ

اندازه‌گیری مرگ سلولی: مرگ سلولی به عنوان معیاری برای نشان دادن آسیب وارد شده به غشاء سلولی در گیاهان تیمار شده، با استفاده از جذب معرف آبی اوانس اندازه‌گیری گردید (۹). بعد از اعمال تیمار، سه قطعه ۱ سانتی متری از نوک ریشه‌ها در داخل معرف آبی اوانس ۰/۰۲۵ درصد در آب به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شدند و بعد به مدت ۱۵ دقیقه با آب شستشو داده شدند و سپس در ۱ میلی لیتر محلول متانول ۵۰ درصد له گردیدند که این

سلولی بر حسب درصد نسبت به شاهد با استفاده از فرمول زیر تعیین گردید:

$$100 \times (\text{مقدار جذب گیاهان شاهد} / \text{مقدار جذب در هر یک از تیمارها}) = \text{درصد مرگ سلولی}$$

گرم بوسيله يخ سرد شدند روی هر یک از نمونه‌ها ۴ میلی‌لیتر تولوئن اضافه شد و خوب به هم زده شد بعد از تشکیل دو فاز، جذب فاز روپی برای هر نمونه در طول موج ۵۲۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. مقدار پرولین با استفاده از منحنی استاندارد رسم شده پرولین با غلظت‌های معلوم (۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ $\mu\text{g/l}$) و معادله خط $Y = 0.018 X - 0.002$ بر حسب میکروگرم بر گرم وزن خشک محاسبه گردید.

اندازه‌گیری مقدار قندهای محلول: برای اندازه‌گیری قندهای محلول از روش Dubious و همکاران (۱۷) با اندکی تغییرات استفاده شد. بدین منظور، ۱۰ میلی‌لیتر از اتانول ۸۰ درصد روی ۰٫۰۵ گرم از ماده خشک برگ و ریشه اضافه شد. درب لوله‌ها بسته و به منظور آزاد شدن قندهای محلول، به مدت یک هفته در یخچال در دمای ۴ درجه نگهداری شدند. بعد از گذشت یک هفته ابتدا نمونه‌ها سانتریفیوژ شده و از محلول‌روپی برگ و ریشه بترتیب ۰٫۵ و ۱ میلی‌لیتر برداشته و روی آن‌ها ۱ میلی‌لیتر فنل ۵٪ اضافه شد و پس از هم زدن به وسیله دستگاه ورتکس، ۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ به هر لوله اضافه شد. محلول تیره رنگ بدست آمده به مدت نیم‌ساعت در دمای آزمایشگاه سرد شد سپس شدت رنگ حاصل، با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۸۵ نانومتر اندازه‌گیری گردید. مقدار قند محلول با استفاده از منحنی استاندارد گلوکز با غلظت‌های معلوم (۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ mg/l) و معادله خط $Y = 0.008 X - 0.051$ بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن خشک محاسبه گردید.

اندازه‌گیری مقدار گلايسين بتائين: مقدار گلايسين بتائين به روش Grieve و Grattan (۲۲) اندازه‌گیری شد. ۰٫۱ گرم از ماده خشک برگ‌ها در لوله‌های محتوی ۲ میلی‌لیتر آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت روی شیکر قرار گرفت.

اندازه‌گیری محتوای نسبی آب: برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب (RWC) از هر تیمار، ۰٫۲ گرم از یک برگ توسعه یافته جدا شد. سپس قطعات به پتری دیش‌های درب‌دار حاوی آب مقطر منتقل شد و به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۴°C و در تاریکی قرار داده شدند. پس از خارج کردن مقاطع از آب مقطر جهت حذف رطوبت اضافه، آن‌ها را در بین دو لایه کاغذ صافی خشک کرده و سپس وزن آماس آن‌ها اندازه‌گیری شد. پس از تعیین وزن در حالت آماس کامل، مقاطع برگ‌ها را به آون ۷۰°C منتقل کرده و پس از گذشت ۴۸ ساعت وزن خشک آن‌ها تعیین گردید. در نهایت RWC با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه شد (۵۳).

$$RWC = (FW - DW) * 100 / (TW - DW)$$

FW: وزن تر

DW: وزن خشک

TW: وزن آماس

اندازه‌گیری مقدار پرولین: مقدار پرولین آزاد به روش Bates و همکاران (۱۰) اندازه‌گیری شد. برای سنجش مقدار پرولین، ۴ گرم از بافت خشک ریشه و برگ نمونه‌ها به همراه ۱۵ میلی‌لیتر اسید سولفوسالیسیلیک ۳ درصد در هاون سائیده شد و به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۴°C قرار داده شد تا اسید آمینه پرولین آزاد شود. بعد از ۷۲ ساعت نمونه‌ها در دور ۳۰۰۰g به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند. سپس به ۲ میلی‌لیتر محلول روپی، ۲ میلی‌لیتر اسیداستیک گلاسیال و ۲ میلی‌لیتر معرف نین-هیدرین (شامل ۲۰ میلی‌لیتر اسید فسفریک ۶ مولار، ۳۰ میلی‌لیتر استیک اسید گلاسیال و ۱٫۲۵ گرم نین‌هیدرین) اضافه شده و نمونه‌ها به مدت یک ساعت در حمام آب گرم ۱۰۰°C قرار داده شدند و بلافاصله بعد از حمام آب

$Y=2.015$ بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن خشک محاسبه گردید. مقدار کلر با استفاده از دستگاه Chloride Analyzer (مدل Corning 926) اندازه‌گیری شد و مقدار کلر بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن خشک محاسبه گردید.

آنالیز آماری

برای کاهش خطا نمونه‌برداری و آزمایش‌ها به صورت ۴ تکرار انجام شد. آنالیز داده‌های آماری بر اساس مدل طرح پایه کاملاً تصادفی با استفاده از نرم افزار SPSS20 با تجزیه‌ی واریانس دو سویه (GLM) و برای گروه‌بندی از آزمون توکی در سطح احتمال آماری $p < 0.05$ انجام گرفت. نمودارها نیز با استفاده از نرم افزار EXCEL سری ۲۰۱۰ رسم شدند.

نتایج

طول اندام هوایی و زیرزمینی: بررسی نتایج طول اندام هوایی گیاه زعفران نشان داد که بیش‌ترین طول اندام هوایی در تیمار $\text{SiO}_2 \text{ NPs } 0.5 \text{ mM}$ و کم‌ترین آن در تیمار $\text{NaCl } 150 \text{ mM} + \text{Si } 1 \text{ mM}$ مشاهده شد. بررسی داده‌ها نشان داد که شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار طول اندام هوایی را به ترتیب ۱۴/۴۴ و ۵/۶۶٪ نسبت به شاهد کاهش داد (جدول ۲). طول اندام هوایی زعفران تحت تیمار سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار و نانوذره دی‌اکسید سیلیکون ۰/۵ میلی‌مولار به ترتیب ۲۶/۲۹، ۱۶/۳۰ و ۲۷/۵۲٪ نسبت به شاهد افزایش یافت.

محلول پاشی سیلیکون و نانوذره دی‌اکسید سیلیکون در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار به گیاهان تحت تیمار شوری ۷۵ میلی‌مولار موجب افزایش طول اندام هوایی شد در صورتی‌که در غلظت ۱۵۰ میلی‌مولار شوری موجب کاهش طول اندام هوایی نسبت به تیمار شوری در همان غلظت گردید (جدول ۲).

بررسی طول اندام زیرزمینی در گیاهان زعفران تحت تیمار نشان داد که بیش‌ترین طول اندام زیرزمینی در تیمار SiO_2

سپس به مدت ۲۰ دقیقه در 4000 g سانتریفیوژ شد. ۲۰۰ میکرولیتر از اسید سولفوریک ۲ نرمال روی ۲۰۰ میکرولیتر از عصاره‌رویی ریخته شد. یک ساعت در آب یخ گذاشته شد و پس از گذشت زمان تعیین شده مقدار ۲۰۰ میکرولیتر از ترکیب KI-I_2 به آن‌ها اضافه گردید و پس از هم‌زدن با دستگاه ورتکس، در دمای 4°C قرار داده شدند. بعد از گذشت ۱۶ ساعت، نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه با 4000 سانتریفیوژ شدند. سپس محلول رویی دور ریخته شد و ۶ میلی‌لیتر دی‌کلرو اتان روی رسوبات ته لوله ریخته و با ورتکس هم‌زده شد. بعد از ۲ ساعت و چند بار هم‌زدن توسط ورتکس، مقدار جذب در طول موج ۵۲۰ نانومتر خوانده شد. مقدار گلاسیسین بتائین با استفاده از منحنی استاندارد بتائین با غلظت‌های معلوم (۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و $250 \mu\text{g/l}$) و معادله خط $Y = 0.0044X - 0.009$ بر حسب میکروگرم بر گرم وزن خشک محاسبه گردید.

تهیه عصاره برای اندازه‌گیری عناصر سدیم، پتاسیم و کلر: برای این منظور، ۱۰۰ میلی‌گرم از ماده خشک پودر شده ریشه و برگ به طور جداگانه از کلیه تیمارها توزین گردید و در لوله‌های آزمایش ریخته شد. سپس به هر یک از لوله‌ها ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد. این لوله‌ها به مدت ۱ ساعت در بن‌ماری جوشان حرارت داده شدند. پس از خنک شدن در هوای اتاق، به مدت ۲۰ دقیقه در 5000 g سانتریفیوژ شدند، محلول‌رویی به لوله آزمایش جدید منتقل و دوباره با آب مقطر به حجم ۱۰ میلی‌لیتر رسانیده شد. در نهایت این محلول به عنوان عصاره‌ی خام برای اندازه‌گیری مقدار عناصر مورد استفاده قرار گرفت (۴). مقدار سدیم و پتاسیم با استفاده از دستگاه Flame photometer شرکت فاطر الکترونیک ساخت ایران اندازه‌گیری شد و سپس مقدار این عناصر با استفاده از منحنی استاندارد سدیم با غلظت‌های معلوم کلرید سدیم (۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و 100 mg/l) و معادله خط $X + 4.42$ و پتاسیم با غلظت‌های معلوم کلرید پتاسیم (۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و 100 mg/l) و معادله خط $X + 3.12$

وزن خشک اندام هوایی: بررسی وزن خشک اندام هوایی گیاه زعفران نشان داد که بیش‌ترین وزن خشک اندام هوایی در تیمار Si 0.5 mM و کم‌ترین آن در تیمار NaCl 150 mM مشاهده شد. اعمال شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار وزن خشک اندام هوایی را بترتیب ۲۰/۶۸ و ۲۹/۸۸٪ کاهش داد. اعمال سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار بترتیب وزن خشک اندام هوایی را ۴/۵۹ و ۲۹/۲٪ و نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار بترتیب ۳/۴۴ و ۱/۱۴٪ را نسبت به شاهد افزایش داد (جدول ۲).

محلول پاشی سیلیکون و نانوذره دی‌اکسیدسیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار در گیاهان تحت شوری وزن خشک اندام هوایی را نسبت به گیاهان تحت تیمار فقط شوری افزایش داد که بیش‌ترین افزایش در تیمار NaCl 75 mM+ SiO₂ NPs 0.5 mM به مقدار ۲۷/۸۶٪ نسبت به گیاهان تحت شوری ۷۵ میلی‌مولار مشاهده شد (جدول ۲).

جدول ۲- تغییرات فاکتورهای رشدی اندام هوایی و زیرزمینی در گیاهان زعفران تحت تیمار شوری کلرید سدیم (۰، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار) و محلول-پاشی سیلیکون و نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار).

| تیمار (میلی‌مولار) | طول اندام هوایی (سانتی‌متر) | طول اندام زیرزمینی (سانتی‌متر) | وزن اندام هوایی (گرم) | وزن اندام زیرزمینی (گرم) |
|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| شاهد | ۳۲٫۱±۳۳٫۲۲ b | ۱۳٫۰۹±۰٫۶۴ de | ۰٫۸۷±۰٫۰۲۱ a | ۱٫۸۰±۰٫۰۴۱ b |
| NaCl 75 | ۲۷٫۶۶±۰٫۹۶ d | ۱۲٫۶۰±۰٫۳۴ e | ۰٫۶۹±۰٫۰۱۵ d | ۱٫۵۲±۰٫۰۵۷ e |
| NaCl 150 | ۳۰٫۵۰±۰٫۷۵ c | ۱۱٫۶۰±۰٫۴۰ g | ۰٫۶۱±۰٫۰۲۳ e | ۱٫۶۱±۰٫۰۲۹ d |
| Si 0.5 | ۴۰٫۸۳±۱٫۴۶ a | ۱۴٫۷۵±۰٫۲۱ b | ۰٫۹۱±۰٫۰۱۸ a | ۱٫۸۴±۰٫۰۲۵ ab |
| Si 1 | ۳۷٫۶۰±۰٫۷۲ d | ۱۴٫۰۸±۰٫۳۱ c | ۰٫۸۹±۰٫۰۳۱ a | ۱٫۹۷±۰٫۰۲۱ a |
| SiO ₂ NPs 0.5 | ۴۱٫۲۳±۱٫۷۱ a | ۱۵٫۸۳±۰٫۴۶ a | ۰٫۹۰±۰٫۰۱۸ a | ۱٫۹۱±۰٫۰۳۹ a |
| SiO ₂ NPs 1 | ۳۳٫۰۰±۰٫۹۴ b | ۱۴٫۲۵±۰٫۲۴ bc | ۰٫۸۸±۰٫۰۱۳ a | ۱٫۸۷±۰٫۰۴۳ ab |
| NaCl 75+Si 0.5 | ۲۲٫۵۵±۱٫۱۱ cd | ۱۳٫۷۴±۰٫۳۷ cd | ۰٫۷۳±۰٫۰۱۵ b | ۱٫۷۱±۰٫۰۴۳ bc |
| NaCl 150+Si 0.5 | ۲۷٫۹۷±۰٫۸۵ d | ۱۲٫۱۶±۰٫۱۹ f | ۰٫۶۶±۰٫۰۱۹ d | ۱٫۶۵±۰٫۰۳۱ cd |
| NaCl 75+Si 1 | ۲۹٫۸۵±۱٫۰۸ cd | ۱۳٫۵۱±۰٫۲۶ cd | ۰٫۷۴±۰٫۰۳۲ bc | ۱٫۶۱±۰٫۰۱۷ d |
| NaCl 150+Si 1 | ۲۴٫۲۵±۰٫۹۶ e | ۱۲٫۳۰±۰٫۳۷ ef | ۰٫۶۶±۰٫۰۱۱ d | ۱٫۷۰±۰٫۰۲۵ c |
| NaCl 75+ SiO ₂ NPs 0.5 | ۲۹٫۲۵±۱٫۳۴ cd | ۱۳٫۹۵±۰٫۳۵ c | ۰٫۷۸±۰٫۰۱۴ c | ۱٫۷۸±۰٫۰۳۶ c |
| NaCl 150+ SiO ₂ NPs 0.5 | ۲۷٫۱۶±۰٫۶۵ d | ۱۲٫۷۰±۰٫۲۹ e | ۰٫۶۸±۰٫۰۲۵ d | ۱٫۷۷±۰٫۰۲۴ bc |
| NaCl 75+ SiO ₂ NPs 1 | ۳۳٫۶۶±۰٫۸۷ b | ۱۳٫۶۶±۰٫۴۸ cd | ۰٫۷۵±۰٫۰۲۲ bc | ۱٫۷۴±۰٫۰۲۷ bc |
| NaCl 150+ SiO ₂ NPs 1 | ۲۹٫۹۱±۱٫۳۱ cd | ۱۳٫۲۵±۰٫۲۳ d | ۰٫۶۹±۰٫۰۳۱ d | ۱٫۸۱±۰٫۰۳۲ b |

اعداد میانگین ۴ تکرار ± انحراف معیار بوده و حروف متفاوت نشان دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ طبق آزمون توکی می‌باشد.

۰/۵ میلی‌مولار به‌همراه شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهده شد (شکل ۲A).

طبق شکل ۲B بیش‌ترین و کم‌ترین محتوای آب نسبی بترتیب در تیمارهای $\text{NaCl } 75 \text{ mM} + \text{Si NPs } 0.5 \text{ mM}$ و $\text{NaCl } 150 \text{ mM}$ بود. شوری در غلظت ۱۵۰ میلی‌مولار RWC را به مقدار ۵/۷۵٪ نسبت به شاهد کاهش داد. اعمال سیلیکون و نانو دی‌اکسید سیلیکون در هر دو غلظت مقدار RWC را نسبت به گیاهان شاهد افزایش داد که بیش‌ترین افزایش در تیمار نانو دی‌اکسید سیلیکون ۰/۵ میلی‌مولار مشاهده گردید. محلول‌پاشی سیلیکون و نانو دی‌اکسید سیلیکون در هر دو غلظت به گیاهان تحت تیمار شوری موجب افزایش مقدار RWC نسبت به گیاهان تحت تیمار شوری در همان غلظت گردید که بیش‌ترین افزایش در گیاهان تحت تیمار $\text{NaCl } 75 \text{ mM} + \text{SiO}_2 \text{ NPs } 0.5 \text{ mM}$ مشاهده شد (شکل ۲B).

اسمولیت‌های سازگار

قندهای محلول: طبق نتایج بدست آمده بیش‌ترین مقدار قندهای محلول اندام هوایی در تیمار $\text{SiO}_2 \text{ NPs } 0.5 \text{ mM}$ $\text{NaCl } 150 \text{ mM} +$ کم‌ترین آن در تیمار $\text{NaCl } 150 \text{ mM} + \text{Si } 0.5 \text{ mM}$ مشاهده گردید. مقدار قندهای محلول در غلظت ۷۵ میلی‌مولار کاهش (۱۵/۹۰٪) یافت. مقدار قندهای محلول در تیمار سیلیکون و نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار بترتیب ۲/۵۵، ۱۰/۶۲، ۴/۵۶ و ۵/۵۱٪ نسبت به شاهد افزایش یافت (جدول ۳).

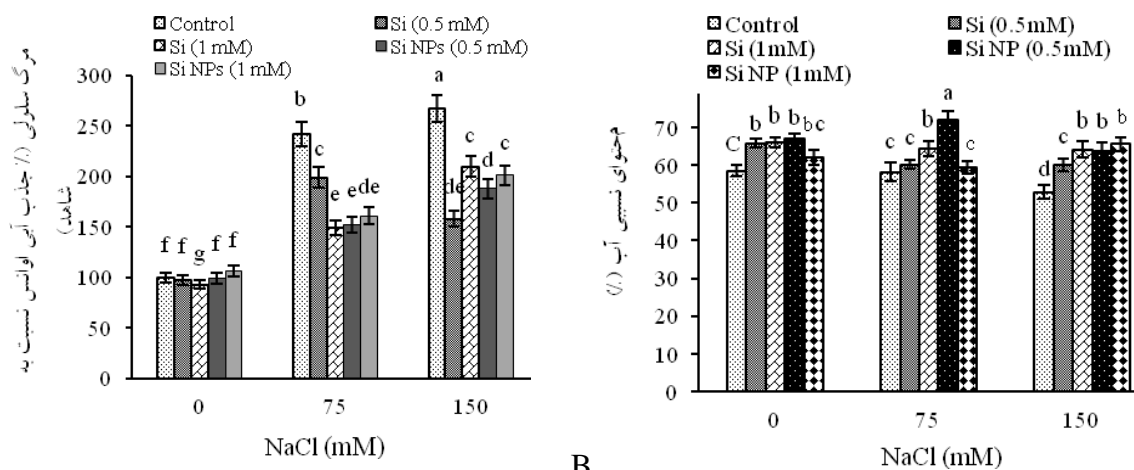
مقدار قندهای محلول اندام هوایی در تیمارهای توام شوری و سیلیکون و نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون به‌غیر از تیمار $\text{NaCl } 150 \text{ mM} + \text{Si } 1 \text{ mM}$ و $\text{NaCl } 150 \text{ mM} + \text{SiO}_2 \text{ NPs}$ ۱ mM نسبت به شوری در همان غلظت افزایش نشان داد (جدول ۳).

وزن خشک اندام زیرزمینی: بررسی وزن خشک اندام زیرزمینی (کلیه اندام‌های زیر خاک شامل بنه‌ها و ریشه‌ها) گیاه زعفران تحت تیمارهای اعمال شده نشان داد که بیش‌ترین وزن خشک اندام زیرزمینی در تیمار $\text{Si } 1 \text{ mM}$ و کم‌ترین آن در تیمار $\text{NaCl } 75 \text{ mM}$ مشاهده شد. بررسی نتایج نشان داد که اعمال شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار وزن خشک اندام زیرزمینی را بترتیب ۱۵/۵۵ و ۱۰/۵۵٪ نسبت به شاهد کاهش داد. اعمال سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار وزن خشک اندام زیرزمینی را بترتیب ۲/۲۲ و ۹/۴۴٪ و نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار نیز وزن خشک اندام زیرزمینی را بترتیب ۶/۱۸ و ۳/۸٪ نسبت به شاهد افزایش داد.

محلول‌پاشی سیلیکون و نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون در هر دو غلظت به گیاهان تحت تیمار شوری وزن خشک اندام زیرزمینی را نسبت به همان غلظت شوری افزایش داد که بیش‌ترین افزایش در تیمار $\text{NaCl } 75 \text{ mM} + \text{SiO}_2 \text{ NPs } 0.5 \text{ mM}$ به مقدار ۱۷/۱۰٪ نسبت به شور ۷۵ میلی‌مولار مشاهده شد (جدول ۲).

مرگ سلولی و محتوای نسبی آب: طبق شکل ۲A بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار مرگ سلولی بترتیب در گیاهان زعفران تحت تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار و سیلیکون ۱ میلی‌مولار بدست آمد. شوری در غلظت ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار مقدار مرگ سلولی را بترتیب ۱۴۲ و ۱۶۷ درصد، در مقایسه با شاهد افزایش داد. محلول‌پاشی سیلیکون و نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون در تمام تیمارها به‌جز تیمار نانو دی‌اکسید سیلیکون ۱ میلی‌مولار مقدار مرگ سلولی را نسبت به شاهد کاهش داد که بیش‌ترین کاهش در تیمار سیلیکون ۱ میلی‌مولار مشاهده شد (شکل ۲A).

مقدار مرگ سلولی در تیمارهای توام محلول‌پاشی سیلیکون و نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون در هر دو غلظت با شوری در مقایسه با گیاهان تحت تیمار شوری در همان غلظت کاهش یافت که بیش‌ترین کاهش در محلول‌پاشی سیلیکون



شکل ۱- تغییرات مرگ سلولی (A) و محتوای نسبی آب (RWC) (B) در گیاهان زعفران تحت تیمار شوری کلرید سدیم (۰، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار) و محلول‌پاشی سیلیکون و نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار). اعداد میانگین ۴ تکرار \pm انحراف معیار بوده و حروف متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ طبق آزمون توکی می‌باشد.

شد. اعمال شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار مقدار پرولین اندام هوایی را بترتیب ۱۱۹/۷۴ و ۱۳۱/۴۷ درصد افزایش داد. مقدار پرولین اندام هوایی در تیمار سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار و نانوذره دی‌اکسید سیلیکون ۱ میلی‌مولار بترتیب به-مقدار ۴/۸۹، ۷/۹۵ و ۶۲/۲۵٪ در مقایسه با شاهد افزایش یافت (جدول ۳).

بررسی اثر توأم شوری با سیلیکون و نانوذره دی‌اکسید سیلیکون بر مقدار پرولین اندام هوایی نشان داد که همه غلظت‌های در تیمارهای توأم منجر به کاهش مقدار آن در مقایسه با تیمارهای شوری در آن غلظت شد (جدول ۳).

بیش‌ترین مقدار پرولین اندام ریشه در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار و کم‌ترین آن در تیمار SiO₂ NPs 0.5 mM مشاهده شد. مقدار پرولین ریشه تحت شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار بترتیب به‌مقدار ۱۶/۲۴ و ۸۸/۵۰٪ افزایش یافت. سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار مقدار پرولین ریشه را بترتیب ۲/۰۹ و ۵/۹۲٪ افزایش داد این درحالی است که اعمال نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون ۰/۵ مقدار این فاکتور را ۱۵/۵۹ نسبت به شاهد کاهش داد (جدول ۳).

طبق جدول ۳ بیش‌ترین مقدار قندهای محلول ریشه در تیمار NaCl 75 mM+ Si 0.5mm و کم‌ترین آن در تیمار SiO₂ NPs 0.5 mM بدست آمد. شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار مقدار این فاکتور را بترتیب ۲۲/۰۷ و ۲۰/۷۸٪ نسبت به گیاهان شاهد کاهش داد. در بین تیمارهای محلول‌پاشی سیلیکون و نانوذره دی‌اکسید سیلیکون فقط تیمار SiO₂ NPs 1 mM موجب افزایش قندهای محلول ریشه به مقدار ۵/۳۱٪ نسبت به شاهد شد و بقیه غلظت‌های سیلیکون و نانو دی‌اکسید سیلیکون مقدار قندهای محلول را نسبت به شاهد کاهش دادند که بیش‌ترین کاهش در این تیمارها در تیمار SiO₂ NPs 0.5 mM به مقدار ۲۷/۴۸٪ نسبت به شاهد مشاهده گردید. مقدار قندهای محلول ریشه در تیمارهای توأم سیلیکون و نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون در هر دو غلظت با شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار نسبت به شوری در همان غلظت‌ها افزایش یافت که بیش‌ترین افزایش در تیمار NaCl 75 mM+ Si 0.5 mM به مقدار ۴۶/۲۹٪ نسبت به گیاهان زعفران تحت شوری ۷۵ میلی‌مولار مشاهده گردید (جدول ۳).

پرولین: بررسی نتایج مقدار پرولین اندام هوایی نشان داد که بیش‌ترین مقدار آن در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار و کم‌ترین آن در تیمار NaCl 75 mM+Si 0.5 mM مشاهده

در تمام تیمارهای توام شوری با سیلیکون و نانودی اکسید سیلیکون مقدار پرولین ریشه در مقایسه با تیمار شوری در همان غلظت کاهش یافت.

جدول ۳- تغییرات اسمولیت‌های سازگار (قندهای محلول، پرولین و بتائین گلايسين) در اندام هوایی و زیرزمینی گیاهان زعفران تحت تیمار شوری کلرید سدیم (۰، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار) و محلول‌پاشی سیلیکون و نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار).

| تیمار (mM) | قندهای محلول اندام هوایی (mg g ⁻¹ DW) | قندهای محلول اندام زیرزمینی (mg g ⁻¹ DW) | پرولین اندام هوایی (μg g ⁻¹ DW) | پرولین اندام زیرزمینی (μg g ⁻¹ DW) | گلايسين بتائين اندام هوایی (μg اندام هوایی g ⁻¹ DW) | گلايسين بتائين اندام زیرزمینی (μg g ⁻¹ DW) |
|------------------------------------|--|---|--|---|--|---|
| شاهد | ۵۰±۰۵/۰۷۲ c | ۳۸۷±۰/۰۱۵ bc | ۴۰۸±۰/۲۱ f | ۷۷۵±۰/۷۱ e | ۱۰۹۹±۰/۳۲ e | ۱۱۰۲±۰/۶۱ h |
| NaCl 75 | ۴۲۵±۰/۰۸۳ e | ۳۰۳±۰/۰۲۱ e | ۸۹۷±۰/۳۴ b | ۹۰۱±۰/۳۵ de | ۱۶۹۴±۰/۴۵ b | ۱۹۴۱±۰/۴۹ b |
| NaCl 150 | ۵۰۹±۰/۰۵۸ c | ۳۰۸±۰/۰۱۹ e | ۹۴۵±۰/۱۵ a | ۱۴۶۱±۰/۲۶ a | ۱۸۲۱±۰/۲۹ a | ۲۳۹۸±۰/۵۲۱ a |
| Si 0.5 | ۵۱۸±۰/۰۳۴ b | ۳۷۱±۰/۰۱۸ bc | ۴۰۲±۰/۱۵ ef | ۷۹۸±۰/۴۵ e | ۱۲۱۵±۰/۳۷ d | ۱۴۹۹±۰/۴۶ e |
| Si 1 | ۵۵۹±۰/۰۵ ab | ۳۸۲±۰/۰۴۰ bc | ۴۵۱±۰/۰۳۰ e | ۸۲۱±۰/۲۸ e | ۱۱۹۲±۰/۴۱ de | ۱۲۶۵±۰/۴۹ gh |
| SiO ₂ NPs 0.5 | ۵۲۸±۰/۰۵۲ b | ۲۸۲±۰/۰۱۲ f | ۳۹۲±۰/۲۳ f | ۶۵۴±۰/۵۷ f | ۹۸۹±۰/۵۷ f | ۱۱۶۷±۰/۵۲ h |
| SiO ₂ NPs 1 | ۵۳۳±۰/۰۶۷ b | ۴۱۰±۰/۰۳۵ b | ۶۶۲±۰/۳۳ d | ۷۷۲±۰/۲۹ e | ۱۲۲۱±۰/۵۴ d | ۱۳۲۱±۰/۴۶ f |
| NaCl 75+Si 0.5 | ۴۸۵±۰/۰۶۳ c | ۴۴۴±۰/۰۲۹ a | ۶۲۹±۰/۲۴ d | ۷۸۷±۰/۳۴ e | ۱۲۷۲±۰/۵۰ d | ۱۵۴۳±۰/۵۷ de |
| NaCl 150+Si 0.5 | ۳۵۱±۰/۰۴۵ f | ۳۵۰±۰/۰۱۲ c | ۴۴۷±۰/۱۹ e | ۸۱۸±۰/۳۱ e | ۱۶۷۴±۰/۴۸ b | ۲۲۸۹±۰/۳۵ ab |
| NaCl 75+Si 1 | ۴۸۵±۰/۰۵۷ c | ۳۲۴±۰/۰۱۵ de | ۳۸۵±۰/۲۹ f | ۷۹۵±۰/۳۲ e | ۱۴۸۷±۰/۳۲ c | ۱۷۴۶±۰/۷۱ c |
| NaCl 150+Si 1 | ۴۹۸±۰/۰۶۴ c | ۳۲۷±۰/۰۲۴ d | ۷۰۴±۰/۲۷ cd | ۹۶۸±۰/۲۴ d | ۹۲۹±۰/۲۴ f | ۱۱۶۷±۰/۵۲ h |
| NaCl 75+ SiO ₂ NPs 0.5 | ۵۱۴±۰/۰۳۸ b | ۳۳۸±۰/۰۳۱ cd | ۷۳۵±۰/۳۶ c | ۷۲۲±۰/۴۱ ef | ۱۱۵۶±۰/۵۳ de | ۱۴۳۱±۰/۴۱ e |
| NaCl 150+ SiO ₂ NPs 0.5 | ۵۹۵±۰/۰۲۷ a | ۳۰۷±۰/۰۴۳ e | ۶۳۵±۰/۳۱ d | ۱۱۲۷±۰/۴۸ c | ۱۲۲۴±۰/۳۶ d | ۱۷۷۴±۰/۷۲ c |
| NaCl 75+ SiO ₂ NPs 1 | ۵۲۵±۰/۰۴۱ b | ۳۳۴±۰/۰۱۷ cd | ۷۰۵±۰/۲۸ cd | ۷۲۲±۰/۳۶ ef | ۱۲۷۴±۰/۴۸ d | ۱۶۲۱±۰/۳۲ d |
| NaCl 150+ SiO ₂ NPs 1 | ۴۷۷±۰/۰۷۲ d | ۳۴۱±۰/۰۲۷ c | ۶۰۳±۰/۱۸ d | ۱۳۳۱±۰/۲۱ b | ۱۲۳۱±۰/۵۸ d | ۱۸۰۱±۰/۶۳ c |

اعداد میانگین ۴ تکرار ± انحراف معیار بوده و حروف متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ طبق آزمون توکی می‌باشد.

بیش‌ترین مقدار گلايسين بتائين ریشه زعفران در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار و کم‌ترین مقدار آن در گیاهان شاهد مشاهده شد. شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار مقدار گلايسين بتائين را بترتیب ۷۶/۱۱ و ۱۱۷/۶۰٪ نسبت به شاهد افزایش داد. مقدار این فاکتور با اعمال سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار بترتیب ۲۹/۶۴، ۱۴/۷۹٪ و نانودی-اکسیدسیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار بترتیب ۵/۹۰ و ۱۹/۸۷٪ افزایش یافت (جدول ۳).

اعمال شوری در هر دو غلظت با سیلیکون و نانودی-اکسیدسیلیکون مقدار بتائين گلايسين ریشه زعفران را در مقایسه با تیمارهای شوری در همان غلظت کاهش داد (جدول ۳).

گلايسين بتائين: بیش‌ترین مقدار گلايسين بتائين اندام هوایی زعفران در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار و کم‌ترین مقدار آن در تیمار NaCl 150 mm+ Si 1 mM مشاهده شد. شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار مقدار گلايسين بتائين را بترتیب ۵۴/۱۸ و ۶۵/۷۰٪ افزایش داد. مقدار این فاکتور با اعمال سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار و نانودی-اکسیدسیلیکون ۱ میلی‌مولار بترتیب ۱۰/۵۶، ۸/۴۴ و ۱۱٪/۱۳ افزایش یافت (جدول ۳). اعمال شوری در هر دو غلظت با سیلیکون و نانودی‌اکسیدسیلیکون مقدار گلايسين بتائين را در مقایسه با تیمارهای شوری در همان غلظت کاهش داد (جدول ۳).

عناصر سدیم، پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم

و ۱ میلی‌مولار و نانودی‌اکسید سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی-مولار مقدار پتاسیم اندام هوایی را بترتیب ۲/۹۵، ۱۴/۰۹ و ۱۲/۹۶ و ۸/۶۷٪ نسبت به شاهد افزایش داد. در تمامی تیمارهای توأم شوری با سیلیکون و نانودی‌اکسید سیلیکون مقدار پتاسیم اندام هوایی در مقایسه با تیمار شوری در همان غلظت افزایش یافت که بیش‌ترین افزایش در تیمار NaCl 150 mM+ SiO₂ NPs 0.5 mM به مقدار ۶۳٪ نسبت به شوری ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهده شد.

طبق جدول ۴ بیش‌ترین مقدار پتاسیم ریشه در تیمار NaCl 150 mM و کم‌ترین آن در NaCl 75 Si 1 mM + mM مشاهده شد. شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار مقدار پتاسیم ریشه را بترتیب ۱۳/۹ و ۲۱/۴۰٪ نسبت به شاهد افزایش داد. اعمال سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار مقدار پتاسیم ریشه را نسبت به شاهد بترتیب ۷/۱۷ و ۴/۵٪ کاهش و تیمارهای نانودی‌اکسید سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی-مولار به‌ترتیب مقدار آن را ۱۵/۰۹ و ۱۹/۹۵٪ نسبت به شاهد کاهش داد. اعمال توأم شوری با سیلیکون و نانودی-اکسیدسیلیکون در تمامی غلظت‌ها مقدار پتاسیم ریشه را نسبت به تیمار شوری در همان غلظت کاهش داد که بیش-ترین کاهش در تیمار NaCl 150+SiO₂ NPs 0.5mM به-مقدار ۴۴/۹۵٪ نسبت به گیاهان تحت تیمار NaCl 150 mM مشاهده گردید.

مقدار کلر: بیش‌ترین مقدار یون کلر اندام هوایی در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار و کم‌ترین آن در تیمار نانوذره دی-اکسید سیلیکون ۰/۵ میلی‌مولار مشاهده شد. اعمال شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار مقدار یون کلر اندام هوایی را بترتیب ۱/۹۳ و ۴/۹۲ برابر نسبت به شاهد افزایش داد. محلول-پاشی سیلیکون و نانودی‌اکسید سیلیکون در هر دو غلظت موجب کاهش انباشت کلر اندام هوایی زعفران نسبت به گیاهان شاهد شد که بیش‌ترین کاهش در تیمار نانوذره سیلیکون ۰/۵ میلی‌مولار به مقدار ۵۱٪ مشاهده گردید. اعمال توأم شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار با سیلیکون و

مقدار سدیم: بیش‌ترین مقدار سدیم اندام هوایی در تیمار NaCl 150 mM و کم‌ترین آن در تیمار SiO₂ NPs 0.5 mM مشاهده شد. اعمال شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار مقدار سدیم اندام هوایی گیاه زعفران را بترتیب ۶/۵۳ و ۸/۷۸ برابر نسبت به شاهد افزایش داد. مقدار سدیم اندام هوایی در تیمارهای سیلیکون و نانودی‌اکسید سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار بترتیب ۹/۶۰، ۱۵/۴۱، ۲۷/۳۲ و ۶/۶۹٪ نسبت به شاهد کاهش یافت (جدول ۴).

محلول‌پاشی سیلیکون و نانوسیلیکون در هر دو غلظت در گیاهان تحت تیمار شوری مقدار سدیم اندام هوایی را نسبت به گیاهان فقط تحت تیمار شوری کاهش داد. بیش-ترین کاهش در تیمار NaCl 150 mM+ SiO₂ NPs 1 mM به‌مقدار ۳۷/۹۱٪ نسبت به شوری ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهده شد (جدول ۴).

طبق جدول ۴ بیش‌ترین مقدار سدیم ریشه در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار و کم‌ترین آن در تیمار شاهد مشاهده شد. مقدار سدیم ریشه در تیمار شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار بترتیب ۳/۰۴۶ و ۴/۵۹ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. اعمال سیلیکون و نانودی‌اکسید سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی-مولار مقدار سدیم ریشه را بترتیب ۱۴/۳۷، ۱۷/۴۲، ۲۵/۸۹ و ۲۷/۶۳٪ نسبت به شاهد افزایش داد. مقدار سدیم ریشه در تمام تیمارهای توأم شوری با سیلیکون و نانودی-اکسیدسیلیکون نسبت به تیمار شوری در همان غلظت کاهش نشان داد که بیش‌ترین کاهش در تیمار NaCl 75 mM+ Si 1 mM به‌مقدار ۴۶/۷۶٪ نسبت به شوری ۷۵ میلی‌مولار مشاهده شد.

مقدار پتاسیم: طبق جدول ۴ بیش‌ترین مقدار پتاسیم اندام هوایی زعفران در تیمار Si 1 mM و کم‌ترین آن در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهده شد. اعمال شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار مقدار پتاسیم اندام هوایی را بترتیب ۲۶/۳۶ و ۴۵/۸۴٪ نسبت به شاهد کاهش داد. اعمال سیلیکون ۰/۵

مقدار ۲۰ و ۱۴/۳۵٪ نسبت به گیاهان شاهد شد در صورتی که محلول پاشی سیلیکون و نانودی‌اکسید سیلیکون در غلظت ۱ میلی‌مولار موجب افزایش انباشت کلر در اندام زیرزمینی زعفران به ترتیب به مقدار ۱۹/۰۹ و ۳۴/۵۴٪ نسبت به گیاهان شاهد شد. اعمال توأم شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار با محلول پاشی سیلیکون و نانودی‌اکسید سیلیکون در هر دو غلظت مقدار انباشت یون کلر اندام زیرزمینی را در مقایسه با گیاهان تحت تیمار همان غلظت شوری کاهش داد که بیشترین کاهش در تیمار محلول پاشی NaCl 150 mM+ Si 1 mM به مقدار ۲۹/۲۶٪ نسبت به شوری ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهده شد (جدول ۴).

نانودی‌اکسید سیلیکون در هر دو غلظت مقدار یون کلر اندام هوایی را در مقایسه با همان غلظت شوری کاهش داد که بیشترین کاهش در تیمار NaCl 75+ SiO₂ NPs 0.5 mM به ترتیب به مقدار ۳۵/۳۶٪ نسبت به گیاهان تحت شوری ۷۵ میلی‌مولار مشاهده شد (جدول ۴).

بیشترین مقدار یون کلر اندام زیرزمینی در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار و کم‌ترین آن در تیمار سیلیکون ۰/۵ میلی‌مولار مشاهده شد. اعمال شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار مقدار یون کلر اندام هوایی را به ترتیب ۳/۳۵ و ۷/۳۵ برابر نسبت به شاهد افزایش داد. محلول پاشی سیلیکون و نانودی‌اکسید سیلیکون در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار موجب کاهش انباشت کلر در اندام زیرزمینی زعفران به ترتیب به-

جدول ۴- تغییرات انباشت یون‌های سدیم، پتاسیم و کلر در اندام هوایی و زیرزمینی گیاهان زعفران تحت تیمار شوری کلرید سدیم (۰، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار) و محلول پاشی سیلیکون و نانودی‌اکسید سیلیکون (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار).

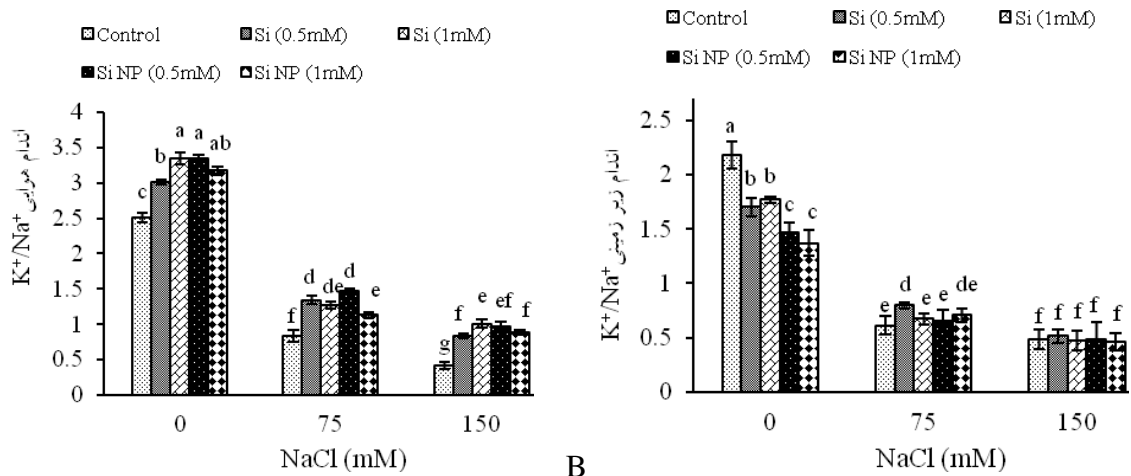
| محتوای Cl ⁻ اندام زیرزمینی (mg g ⁻¹ DW) | محتوای Cl ⁻ اندام هوایی (mg g ⁻¹ DW) | محتوای K ⁺ اندام زیرزمینی (mg g ⁻¹ DW) | محتوای K ⁺ اندام هوایی (mg g ⁻¹ DW) | محتوای Na ⁺ اندام زیرزمینی (mg g ⁻¹ DW) | محتوای Na ⁺ اندام هوایی (mg g ⁻¹ DW) | تیمار (mM) |
|---|--|--|---|---|--|------------------------------------|
| ۵,۷۹±۰,۷۱ g | ۶,۸۹±۰,۱۰ g | ۲۲,۹۲±۰,۹۱ c | ۱۸,۴۸±۰,۴۳ b | ۱۰,۵۰±۰,۶۵ h | ۷,۳۴±۰,۵۴ f | شاهد |
| ۲۵,۱۶±۱,۰۱ d | ۲۰,۲۱±۰,۱۵ d | ۲۶,۱۱±۰,۷۵ b | ۱۳,۶۱±۰,۳۷ d | ۴۲,۵۰±۱,۲۱ b | ۱۶,۲۵±۰,۸۷ b | NaCl 75 |
| ۴۸,۳۷±۲,۱۳ a | ۴۰,۸۴±۰,۲۹ a | ۲۸,۶۹±۰,۶۱ a | ۱۰,۰۱±۰,۵۶ e | ۵۸,۸۰±۲,۳۳ a | ۲۴,۰۲±۰,۹۱ a | NaCl 150 |
| ۴,۶۳±۰,۹۵ gh | ۳,۶۸±۰,۱۴ i | ۲۱,۲۸±۰,۵۲ cd | ۱۹,۰۳±۰,۶۰ b | ۱۲,۰۱±۰,۹۱ gh | ۶,۳۱±۰,۳۲ g | Si 0.5 |
| ۶,۸۹±۰,۸۳ fg | ۵,۷۹±۰,۲۱ h | ۲۱,۸۸±۰,۹۴ cd | ۲۱,۰۹±۰,۳۶ a | ۱۲,۳۳±۱,۲۳ gh | ۶,۲۹±۰,۴۵ g | Si 1 |
| ۴,۹۶±۰,۹۲ gh | ۳,۳۶±۰,۱۷ i | ۱۹,۴۶±۰,۴۶ d | ۲۰,۸۸±۰,۵۱ a | ۱۳,۲۲±۱,۵۶ g | ۶,۲۵±۰,۳۷ g | SiO ₂ NPs 0.5 |
| ۷,۷۹±۱,۱۰ f | ۶,۱۱±۰,۲۶ gh | ۱۸,۳۴±۰,۵۱ de | ۲۰,۰۸±۰,۵۷ ab | ۱۳,۴۰±۰,۸۹ g | ۶,۳۲±۰,۳۳ g | SiO ₂ NPs 1 |
| ۲۰,۰۰±۱,۷۸ e | ۱۳,۲۶±۰,۲۳ f | ۲۰,۱۲±۰,۹۷ d | ۱۶,۱۰±۰,۲۹ c | ۲۵,۲۰±۰,۸۷ e | ۱۲,۰۱±۰,۴۲ e | NaCl 75+Si 0.5 |
| ۳۹,۹۵±۱,۴۶ b | ۲۷,۵۸±۰,۲۷ c | ۱۹,۸۰±۰,۷۶ d | ۱۴,۱۱±۰,۶۴ d | ۳۸,۴۷±۰,۹۸ bc | ۱۶,۹۲±۰,۳۳ b | NaCl 150+Si 0.5 |
| ۱۹,۰۱±۱,۸۱ e | ۱۵,۱۱±۰,۱۴ e | ۱۵,۲۵±۰,۶۱ f | ۱۷,۰۸±۰,۴۰ bc | ۲۲,۶۳±۱,۰۱ f | ۱۳,۴۲±۰,۵۴ d | NaCl 75+Si 1 |
| ۳۴,۲۱±۱,۳۳ c | ۲۸,۷۳±۰,۲۱ bc | ۱۵,۸۵±۰,۸۶ f | ۱۵,۲۱±۰,۳۲ cd | ۳۳,۲۵±۰,۹۲ d | ۱۶,۷۲±۰,۳۹ c | NaCl 150+Si 1 |
| ۲۲,۰۱±۱,۱۵ de | ۱۳,۰۶±۰,۲۶ f | ۱۵,۴۹±۰,۵۴ f | ۱۷,۲۱±۰,۳۸ bc | ۲۳,۵۱±۰,۹۳ f | ۱۶,۶۸±۰,۵۱ e | NaCl 75+ SiO ₂ NPs 0.5 |
| ۴۰,۷۴±۱,۱۷ b | ۲۷,۷۴±۰,۲۳ c | ۱۵,۷۹±۰,۷۳ f | ۱۶,۳۲±۰,۴۶ c | ۳۶,۰۳±۰,۹۹ c | ۱۵,۰۹±۰,۲۹ b | NaCl 150+ SiO ₂ NPs 0.5 |
| ۲۰,۱۶±۱,۳۷ e | ۱۴,۱۱±۰,۱۹ ef | ۱۶,۳۲±۰,۸۹ ef | ۱۶,۴۴±۰,۴۹ c | ۲۳,۰۳±۱,۰۸ f | ۱۴,۵۳±۰,۲۸ cd | NaCl 75+ SiO ₂ NPs 1 |
| ۳۷,۱۶±۱,۱۴ bc | ۲۹,۸۴±۰,۱۳ b | ۱۷,۱۸±۰,۸۰ f | ۱۴,۰۱±۰,۳۶ d | ۳۷,۳۴±۱,۱۵ c | ۱۵,۸۲±۰,۴۲ c | NaCl 150+ SiO ₂ NPs 1 |

اعداد میانگین ۴ تکرار ± انحراف معیار بوده و حروف متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ طبق آزمون توکی می‌باشد.

نسبت را در ریشه در مقایسه با شاهد کاهش داد که بیش-ترین کاهش در تیمار نانو ذره سیلیکون ۱ میلی-مولار به-مقدار ۳۷/۲۴٪ مشاهده شد. محلول‌پاشی سیلیکون و نانو ذرات دی‌اکسید سیلیکون در هر دو غلظت در گیاهان تحت تیمار شوری ۷۵ میلی‌مولار این نسبت را در ریشه در مقایسه با گیاهان زعفران تحت تیمار ۷۵ میلی‌مولار افزایش داد که بیش‌ترین افزایش در گیاهان تحت تیمار $\text{NaCl } 75 \text{ mM} + \text{Si } 0.5 \text{ mM}$ به مقدار ۲۹/۹۶٪ مشاهده گردید در صورتی‌که محلول‌پاشی سیلیکون در غلظت ۱ میلی‌مولار و نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون در هر دو غلظت این نسبت را در ریشه در مقایسه با گیاهان تحت تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار کاهش داد که بیش‌ترین کاهش در تیمار $\text{NaCl } 150 \text{ mM} + \text{SiO}_2 \text{ NPs } 1 \text{ mM}$ به مقدار ۵/۵۴٪ مشاهده شد (شکل B ۳).

نسبت پتاسیم به سدیم: طبق شکل ۳A بیش‌ترین نسبت پتاسیم به سدیم اندام هوایی در تیمار نانودی‌اکسید سیلیکون ۱ میلی‌مولار و کم‌ترین آن در تیمار شوری ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهده شد. شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار این نسبت را بترتیب ۴/۶۷ و ۹/۵۲ برابر نسبت به شاهد کاهش داد. اعمال سیلیکون و نانودی‌اکسید سیلیکون ۰/۵ و ۱ میلی-مولار بترتیب این نسبت را ۲/۲۹، ۱/۹۲، ۲/۷۹ و ۲/۴۸ برابر نسبت به شاهد افزایش داد. اعمال توأم شوری با سیلیکون و نانودی‌اکسید سیلیکون در تمام غلظت‌ها این نسبت را در مقایسه با تیمار شوری در همان غلظت افزایش داد.

بررسی نتایج نشان داد که بیش‌ترین نسبت پتاسیم به سدیم ریشه در گیاهان زعفران شاهد و کم‌ترین آن در گیاهان تحت تیمار $\text{NaCl } 150 \text{ mM} + \text{SiO}_2 \text{ NPs } 0.5 \text{ mM}$ بود. شوری ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌مولار این نسبت را بترتیب به مقدار ۷۱/۸۳ و ۷۷/۶۶ نسبت به شاهد کاهش داد. اعمال سیلیکون و نانودی‌اکسید سیلیکون در هر دو غلظت این



شکل ۳- تغییرات نسبت پتاسیم به سدیم اندام هوایی (A) و زیرزمینی (B) در گیاهان زعفران تحت تیمار شوری کلرید سدیم (۰، ۷۵ و ۱۵۰ میلی-مولار) و محلول‌پاشی سیلیکون و نانو ذره دی‌اکسید سیلیکون (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار). اعداد میانگین ۴ تکرار \pm انحراف معیار بوده و حروف متفاوت نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ طبق آزمون توکی می‌باشد.

مرگ سلولی برنامه‌ریزی‌شده یا آپوپتوزیس بعنوان یک فرآیند مهم دخیل در رشد و نمو گیاهان در نظر گرفته می-شود که ممکن است توسط تنش‌های زیستی و غیرزیستی

بحث

نتایج بررسی مرگ سلولی در این مطالعه نشان‌دهنده اثر منفی شوری بر افزایش این فاکتور در گیاه زعفران بود.

ریخت‌شناسی در گیاه زعفران تحت تنش شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار می‌گردد. سیلیکون با رسوب و انباشت در کوتیکول برگ موجب کاهش تلفات آب از طریق تعرق می‌گردد (۳۳). از طرف دیگر Ma و همکاران (۳۴) گزارش کرده‌اند که اعمال سیلیکون می‌تواند منجر به استحکام آوندهای گزیم که ساختارهای مسئول انتقال آب به گیاه می‌باشند، گردد. بنابراین آوندهای گزیم می‌تواند در گیاه موجب بردباری در برابر تنش‌های محیطی به واسطه افزایش جذب آب توسط گیاه گردد (۵۰) که آن هم افزایش RWC را در پی خواهد داشت که نتایج این تحقیق هم تایید کننده این امر بوده و با اعمال سیلیکون و نانودی-اکسیدسیلیکون درصد RWC در برگ‌های زعفران تحت تیمار شوری افزایش نشان داد. افزایش RWC با اعمال سیلیکون در غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در گیاه بامیه تحت تنش شوری 6 ds m^{-1} نیز قبلاً گزارش شده است (۳) که با نتایج ما هم‌سوئی نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که با افزایش تنش شوری به‌علت منفی‌تر شدن پتانسیل اسمزی و کاهش آب در دسترس گیاه دچار تنش خشکی فیزیولوژیک شده و در این شرایط کاهش RWC یکی از بارزترین واکنش‌های قابل مشاهده در گیاهان تحت تنش شوری است (۴۲).

نقش محلول‌های آلی در کاهش تنش شوری بخوبی شناخته شده است. این محلول‌های سازگار پتانسیل اسمزی در سیتوپلاسم را کاهش داده و باعث حفظ هموستازی آب در بین قسمت‌های مختلف سلول می‌گردد. همبستگی مثبتی بین این حلال‌ها با تحمل به تنش شوری گزارش شده است. از بین تمام محلول‌ها آلی قندهای محلول و پرولین بارزترین محلول‌های آلی با فعالیت اسموتیکی هستند (۵۴). بررسی نتایج قندهای محلول نشان داد که با افزایش شوری مقدار قندهای محلول افزایش معنی‌داری نمی‌یابد بلکه در شوری ۷۵ میلی‌مولار نیز کاهش در مقادیر این فاکتور بیوشیمیایی مشاهده می‌گردد. نتایج مشابه این یافته توسط Abdul Qados (۵) در گیاهان تحت تنش

از جمله تنش شوری القاء شود. تجمع سدیم و تغییر نسبت K^+/Na^+ در سیتوپلاسم تحت تنش شوری می‌تواند روی فرآیندهای بیوانرژی‌تیک تاثیر گذاشته و جایگزینی سدیم به جای پتاسیم نیز منجر به غیر فعال شدن آنزیم‌ها شده و کاهش رشد و یا حتی مرگ سلول یا گیاه را در پی داشته باشد (۲۵ و ۵۵). نتایج نشان داد که اعمال سیلیکون و نانودی اکسید سیلیکون در گیاه زعفران تحت تنش شوری درصد مرگ سلولی را کاهش داد. تحقیقات نشان داده است که اعمال سیلیکون در گیاهان تحت تنش شوری *Cicer arietinum L.* منجر به افزایش جذب و انتقال K^+ و کاهش جذب و انتقال Na^+ از ریشه به اندام‌های هوایی از طریق تحریک $H^+-ATPase$ غشا پلاسمایی شده و موجب افزایش نسبت K^+/Na^+ می‌گردد (۲۱) که با نتایج این تحقیق هم‌سوئی نشان می‌دهد.

نتایج نشان داد که با افزایش شوری فاکتورهای رشدی تحت تاثیر قرار گرفته و طول و وزن خشک اندام هوایی و زیرزمینی در زعفران کاهش یافت. کاهش فاکتورهای رشدی گیاه زعفران در اثر شوری تا غلظت $12/4 \text{ ds m}^{-1}$ توسط Avarseji و همکاران (۸)، تا غلظت ۱۰۰ میلی‌مولار توسط Jamila و همکاران (۲۷) و تحت شوری ۱ تا ۵ گرم در لیتر توسط Mzrabri و همکاران (۳۵) نیز گزارش گردیده است. مطالعات نشان داده است که کلرید سدیم با اثر بر رشد و تقسیم یاخته‌ای منجر به کاهش رشد می‌شود. شوری از طریق افزایش فشار اسمزی محلول خاک باعث کاهش جذب آب توسط گیاه (آماس سلول‌ها) و در نهایت کاهش تقسیم، تطویل و تمایز سلولی می‌شود (۲۰). طبق نتایج حاصله محلول‌پاشی سیلیکون و نانودی‌اکسید سیلیکون هم به تنهایی و هم همراه با شوری اثر مثبت بر فاکتورهای رشدی داشت. اثر مثبت سیلیکون بر گیاه زعفران تحت تنش شوری قبلاً توسط Jamila و همکاران (۲۷) گزارش شده است. آنها نشان داده‌اند که اعمال سیلیکون در غلظت ۱ میلی‌مولار منجر به افزایش طول، و وزن کلاله و همچنین بهبود فاکتورهای فیزیولوژیکی و

است (۴۳). در این راستا، تجمع پرولین می‌تواند یک پاسخ محافظتی باشد زیرا نقش تنظیم اسمزی پرولین مانع تنش کمبود آب تحت تنش شوری بالا می‌گردد و همچنین به دلیل توانایی آن در جاروب کردن رادیکال‌های فعال در شرایط تنش شوری موجب پایداری پروتئین‌ها می‌گردد (۱۱). به‌علاوه انباشت پرولین، به‌عنوان یک ترکیب ذخیره نیتروژن، از ساختارهای سلولی محافظت می‌کند (۴۳). طبق نتایج حاصله محلول‌پاشی سیلیکون و نانودی-اکسیدسیلیکون در گیاهان تحت تنش شوری زعفران موجب کاهش مقدار پرولین نسبت به گیاهان زعفران تحت شوری شد. نتایج ما نشان داد که محلول‌پاشی سیلیکون و نانودی‌اکسید سیلیکون اثر مؤثری بر کاهش اثرات نامطلوب تنش شوری در گیاه زعفران داشت پس می‌توان نتیجه گرفت که افزودن سیلیکون و نانودی‌اکسیدسیلیکون اثرات نامطلوب تنش شوری را در زعفران تعدیل می‌کند و به‌علت این تعدیل، اسمولیت‌های سازگار نیز در گیاه زعفران تحت تنش شوری کاهش می‌یابد. اثر سیلیکون در غلظت ۲٫۵ میلی‌مولار در کاهش مقدار پرولین در گیاهان سویا تحت تنش کلرید سدیم در غلظت ۸۰ میلی‌مولار قبلاً نیز گزارش شده است (۳۱).

گلاسیسین بتائین نیز طی تنش شوری بالا با تنظیم تعادل اسمزی بین گیاه و محیط، حفاظت در برابر تنش اسمزی را فراهم می‌کند (۲۲). گلاسیسین بتائین با بحران تنش در گیاه ظاهر و به‌عنوان یک محلول تنظیم اسمزی مؤثر در گیاهان محسوب می‌شود و با رشد گیاهان در محیط‌های خشک و شور همبستگی بالایی دارد (۲۳). Khan و همکاران (۳۰) گزارش کرده‌اند که با افزایش غلظت شوری غلظت گلاسیسین بتائین در *Atriplex griffithii* نیز افزایش می‌یابد که با نتایج این تحقیق هم‌سویی دارد. با توجه به این نقش محافظتی گلاسیسین بتائین و رابطه مستقیمی که بین مصرف سیلیکون و غلظت این ترکیب در گیاهان مشاهده شد، می‌توان تاثیر سیلیکون بر افزایش تحمل گیاه به تنش شوری را نشان داد.

شوری ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار *Vicia faba* L. نیز گزارش شده است. آنها گزارش کرده‌اند که شوری ۲۰۰ میلی‌مولار در گیاه *Vicia faba* L. منجر به کاهش قندهای محلول به میزان ۳۶٪ می‌گردد که در مقایسه با نتایج این تحقیق (۲۲٪) کاهش میزان قندهای محلول تحت تنش شوری بیشتر بود. از طرف دیگر اعمال سیلیکون و نانوسیلیکون ۲ میلی‌مولار در گیاه *Vicia faba* L. تحت شوری ۱۰۰ میلی‌مولار قندهای محلول را ۸۶٪ نسبت به گیاهان تحت تنش شوری افزایش می‌دهد در حالیکه نتایج این تحقیق نشان داد که اعمال سیلیکون ۰/۵ میلی‌مولار در زعفران تحت شوری ۷۵ میلی‌مولار میزان قندهای محلول را ۴۶٪ افزایش داد. کاهش قندهای محلول تحت تنش شوری می‌تواند بعلت کاهش فعالیت فتوسنتزی در اثر شوری و یا افزایش مصرف قند در مسیرهای متابولیکی دیگر باشد. اعمال سیلیکون و نانودی‌اکسیدسیلیکون در گیاهان تحت تنش شوری زعفران منجر به افزایش قندهای محلول گردید که نشان‌دهنده کاهش اثرات منفی شوری توسط این مواد است. نتایج این تحقیق با نتایج Al-Huqail و همکاران (۶) در گیاه آکاسیا و شمس و همکاران (۲) در گیاه آرابیدوپسیس تالیانا هم‌سویی نشان می‌دهد. آنها نشان داده‌اند که اعمال سیلیکون موجب افزایش قندهای محلول در گیاهان ذکر شده تحت تنش شوری می‌گردد.

بررسی پرولین و گلاسیسین بتائین در اندام هوایی و زیر-زمینی زعفران تحت تنش شوری افزایش نشان داد در صورتی که اعمال سیلیکون و نانودی‌اکسیدسیلیکون مقدار این اسمولیت‌ها را در گیاهان تحت تنش شوری زعفران کاهش داد. این نتایج با نتایج Almutairi (۷) در گیاه گوجه فرنگی و رستمی و همکاران (۱) در گیاه گندم تحت تنش شوری هم‌سویی نشان می‌دهد. افزایش اسمولیت‌های سازگار در پاسخ به تنش‌های محیطی مثل تنش شوری و آب در سلول‌های گیاهی جهت متعادل کردن فشار اسمزی سیتوزول با واکوئل و محیط بیرونی که منجر به تنظیم اسموتیکی و محافظت از سلول می‌شود نشان داده شده

یا ۵ cm^3/l در گیاه فلفل شیرین تحت تنش شوری dS/m ۵/۴۷ انباشت یون‌های سمی سدیم در اندام هوایی را کاهش و محتوای پتاسیم را افزایش می‌دهد. در گیاه فلفل شیرین نانوذرات سیلیکون نسبت به سیلیکون در بهبود اثرات سوء شوری موثرتر بود. مطالعات دیگر نیز تاثیر مثبت سیلیکون در کاهش یون سدیم و افزایش پتاسیم در گیاهان تحت تنش شوری را نشان داده است (۲۱).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این مطالعه نشان داد که اعمال شوری در گیاه زعفران فاکتورهای رشدی را کاهش و مرگ سلولی و اسمولیت-های سازگار در این گیاه را افزایش داد. نتایج حاضر نشان داد که محلول‌پاشی سیلیکون و نانودی‌اکسیدسیلیکون در گیاهان زعفران تحت تنش شوری با بهبود فاکتورهای رشدی، فیزیولوژیکی و همچنین نسبت K^+/Na^+ توانسته در کاهش اثرات منفی شوری در این گیاه موثر واقع شود. در مقایسه بین سیلیکون به‌حالت استاندارد و نانو سیلیکون، نانو سیلیکون به ویژه در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار در اکثر فاکتورهای مورد بررسی در کاهش اثرات مضر شوری موثرتر از سیلیکون عمل کرده و می‌تواند به عنوان افزایش دهنده عملکرد زعفران در شرایط تحت تنش شوری مورد استفاده قرار گیرد اما به‌هر حال برای فهم مکانیسم اثر سیلیکون و نانودی‌اکسیدسیلیکون در گیاهان نیاز به مطالعات بیشتر است. لذا برای توصیه استفاده از مکمل-های سیلیکونی برای بهبود اثرات نامطلوب شوری در این گیاه نیاز بررسی‌های بیشتر بالاحص در کشت‌های مزرعه‌ای می‌باشد.

نتایج نشان داد که با افزایش شوری انباشت سدیم و کلر در اندام هوایی و زیرزمینی افزایش و انباشت پتاسیم کاهش می‌یابد. در شرایط تنش شوری سطوح بالای سدیم، یا نسبت بالای سدیم به پتاسیم می‌تواند باعث تخریب واکنش‌های مختلف آنزیمی در سیتوپلاسم گردد (۴۸). از طرف دیگر، کلر یکی از آنیون‌های غالب در خاک‌های شور می‌باشد و حضور آن به مقدار فراوان نه تنها بطور مستقیم موجب سمیت گیاه می‌گردد، بلکه باعث بر هم خوردن تعادل میان عناصر غذایی موجود در محلول خاک و گیاه می‌شود (۳۹). مقاومت در برابر تنش شوری در کاهش جذب و انتقال هر دو یون سدیم و کلر به منظور جلوگیری از مسمومیت نقش عمده‌ای در رشد گیاه دارد (۵۲). مقادیر بالای یون سدیم در خاک باعث اختلال در جذب پتاسیم شده و زمانی که در سیتوپلاسم تجمع پیدا می‌کند از فعالیت بسیاری از آنزیم‌ها بازداری می‌کند (۲۶). طبق نتایج حاصله از این مطالعه محلول پاشی سیلیکون و نانودی-اکسیدسیلیکون در گیاه زعفران تحت تنش شوری انباشت یون سدیم و کلر را کاهش و انباشت پتاسیم و متعاقباً نسبت پتاسیم به سدیم به‌عنوان شاخص بردباری را در هر دو اندام مورد بررسی افزایش داد. افزایش محتوای پتاسیم و کاهش سدیم و کلر به‌ویژه در اندام هوایی می‌تواند به‌عنوان یک مکانیسم احتمالی در افزایش به تنش شوری به‌وسیله اعمال سیلیکون و نانودی‌اکسیدسیلیکون در گیاه زعفران باشد. نتایج حاصل از این مطالعه با تحقیقات انجام گرفته توسط Tantawy و همکاران (۵۱) هم‌خوانی نشان می‌دهد. آنها نشان داده‌اند که اعمال نانوذرات سیلیکون در غلظت ۲۵٪ (۱ یا ۲ cm^3/l) و سیلیکون در غلظت ۲۵٪ (۴

منابع

- ۱-رستمی، ق.، مقدم، ح.، قاسمی‌پیریلوقی، ع. و تهرانی‌فر، ع. ۱۳۹۹. اثرات سولفات و نانو ذرات آهن و روی بر زیست توده، مقدار و ترکیبات روغن‌های اسانسی نعنای فلفلی (*Mentha piperita* L.) تحت تنش شوری. نشریه پژوهش‌های گیاهی. ۳۳ (۳): ۵۰۵-۵۱۵.
- ۲-شمس، ه.، عبدالزاده، ا.، صادقی‌پور، ح. ر. و مهربان جویینی، پ. ۱۳۹۸. اثرات تغذیه‌ای سیلیکون بر کاهش تنش اکسیداتیو ناشی از شوری در گیاه آراییدوپسیس‌تالیانا (*Arabidopsis thaliana*). نشریه پژوهش‌های گیاهی. ۳۲ (۱): ۱۳۳-۱۴۳.

- 3- Abbas, T., Balal, R. M., Shahid, M. A., Pervez, M. A., Ayyub, C. M., Aqueel, M. A. and Javaid, M. M. 2015. Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. *Acta Physiologiae Plantarum*. 37 (2): 1-15.
- 4- Abbaspour, N. 2008. A comparative study of Cl-transport across the roots of two grapevine root stocks, K 51-40 and Paulsen, differing in salt tolerance. PhD thesis, University of Adelaide, Australia.
- 5- Abdul Qados, A. M. S. 2015. Mechanism of nanosilicon mediated alleviation of salinity stress in faba bean (*Vicia faba* L.) plants. *American Journal of Experimental Agriculture*. 7 (2): 78-95.
- 6- Al-Huqail, A. A., Alqarawi, A. A., Hashem, A., Malik, J. A. and Abd-Allah, E. F. 2017. Silicon supplementation modulates antioxidant system and osmolyte accumulation to balance salt stress in *Acacia gerrardii* Benth. *Saudi Journal of Biological Science*. 26 (7): 1856-1864.
- 7- Almutairi, Z. M. 2016. Effect of nano-silicon application on the expression of salt tolerance genes in germinating tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings under salt stress. *Plant Omics Journal*. 9 (1):106-114.
- 8- Avarseji, Z., Kafi, M., Sabet Teimouri, M. and Orooji, K. 2013 Investigation of salinity stress and potassium levels on morphophysiological characteristics of saffron. *Journal of Plant Nutrition*. 36: 299-310.
- 9- Baker, C. J. and Monck, N. M. 1994. An improved method for monitoring cell death in a cell suspension and leaf disk assays using Evans blue. *Plant cell*. 39: 7-12.
- 10- Bates, L.S., Waldern, R.P., and Tear, I.D. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*. 39: 207-207.
- 11- Ben Ahmed, C., Ben Rouina, B., Sensoy, S., Boukhriss, S and Abdullah, F. 2010. Exogenous proline effects on photosynthetic performance and antioxidant defense system of young olive tree. *Agricultural Food Chemistry*. 58: 416-422.
- 12- Bhargava, V. K. 2011. Medicinal uses and pharmacological properties of *Crocus sativus* Linn (saffron) *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*. 3: 21-26.
- 13- Chaves, M.M., Flexas, J. and Pinheiro, C. 2009. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annal Botany*. 103: 551-560.
- 14- Chen, D., Yin, L., Deng, X. and Wang, S. 2014. Silicon increases salt tolerance by influencing the two-phase growth response to salinity in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*. 36: 2531-2535.
- 15- Dastranj, M. and Sepaskhah, A. R. 2019. Response of saffron (*Crocus sativus* L.) to irrigation water salinity, irrigation regime and planting method: Physiological growth and gas exchange. *Scientia Horticulturae* 257: 1018714
- 16- Debnath, N., Das, S., Seth, D., Chandra, R., Bhattacharya, S. C. and Goswami, A. 2011. Entomotoxic effect of silica nanoparticles against *Sitophilus oryzae* (L.). *Journal of Pest Science*. 84: 99-105.
- 17- Dubious, M. K., Gilles, A., Hamilton, J. K., Roberts, P. A. and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related. *Annal Chemistry*. 28: 350-356.
- 18- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 91: 11-17.
- 19- Eskandari Torbaghan, M., Eskandari Torbaghan, M. and Ahmadi, M. M. 2011. The effect of salt stress on flower yield and growth parameters of saffron (*Crocus sativus* L.) in greenhouse condition. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*. 1 (10): 421-427.
- 20- Ferchichi, S.; Hessini, K.; Dell'Aversana, E.; D'Amelia, L.; Woodrow, P.; Ciarmiello, L.F.; Fuggi, A. and Carillo, P. 2018. *Hordeum vulgare* and *Hordeum maritimum* respond to extended salinity stress displaying different temporal accumulation pattern of metabolites. *Functional Plant Biology*. 45, 1096-1109.
- 21- Garg, N. and Bhandari, P. 2016. Interactive effects of silicon and arbuscular mycorrhiza in modulating ascorbate-glutathione cycle and antioxidant scavenging capacity in differentially salt-tolerant *Cicer arietinum* L. genotypes subjected to long-term salinity. *Protoplasma*. 253 (5): 1325-1345.
- 22- Grattan S. R. and Grieve C. M. 1999. Mineral nutrient acquisition and response by plants grown in saline environments. In: Pessaraki M. (ed.): *Handbook of Plant and Crop Stress*. Marcel Dekker, New York: 203-229.
- 23- Hanson, A. D., May, A. M., Grumet, R., Bode, J., Jamieson, G. C. and Rhodes, D. 2007. Betaine synthesis in chenopods: Localization in

- chloroplasts Proceedings of the National Academy of Science, USA. 82: 3678-3682.
- 24- Hussain, M.; Ahmad, S.; Hussain, S.; Lal, R.; Ul-Allah, S. and Nawaz, A. 2018. Rice in Saline Soils: Physiology, Biochemistry, Genetics, and Management. In *Advances in Agronomy*; Sparks, D.L., Ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, (148): 231–287.
 - 25- Ivania, R., Sanaei Nejad, S. H., Ghahraman, B., Astaraei, A. R. and Feizid, H. 2018. Role of bulk and Nanosized SiO₂ to overcome salt stress during Fenugreek germination (*Trigonella foenum-graceum* L.). *Plant Signaling and Behavior*. 13 (7): 190-197.
 - 26- Jaleel, C. A., Lakshmanan, G. M. A., Gomathinayagam, M. and Panneerselvam, R. 2008. Triadimefon induced salt stress tolerance in *Withania somnifera* and its relationship to antioxidant defense system. *South African Journal of Botany*. 74 (1): 126-132.
 - 27- Jamila, F., Zakia, B., Fouad, A., Nabil, S. and Rachid, M. 2018. Effect of silicon application on *Crocus sativus* (L) cultivation under salt stress. *International journal of Research-Granthaalayah*. 6 (9): 291-300.
 - 28- Kafi, M. Koocheki, A., Rashed, M. H., and Nassiri, M. 2006. *Saffron (Crocus sativus L.)*, Production and Processing. Science Publishers, USA.
 - 29- Khan, A. Khan, A. L., Muneer, S., Kim, Y. H., Al-Rawahi, a. and Al-Harrasi, A. 2019. Silicon and salinity: crosstalk in crop-mediated stress tolerance mechanisms. *Frontiers in Plant Science*. 10: 1-29.
 - 30- Khan, M. A., Ungar, I. A. and Showalters, A. M. 2000. Effects of salinity on growth, water relations and ion accumulation of the subtropical perennial halophyte, *Atriplex griffithii* Var. Stocksii. *Annals of Botany*. 85: 225-232.
 - 31- Lee, S. K., Sohn, E. Y., Hamayun, M., Yoon, J. Y. and Lee, I. J. 2010. Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. *Agroforestry System*. 80: 333–340.
 - 32- Liang, Y., Zhang, W., Qin, C., Youliang, L. and Ruixing, D. 2006. Effect of exogenous silicon (Si) on H⁺-ATPase activity, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Environmental Experimental Botany*. 57: 212–219.
 - 33- Liu, B., Soundararajan, P. and Manivannan, A. 2019. Mechanisms of silicon-mediated amelioration of salt stress in plants. *Plants*. 8 (307): 1-13.
 - 34- Ma, J. F. 2004. Characterization of the silicon uptake system and molecular mapping of the silicon transporter gene in rice. *Plant Physiology*. 136 (2): 3284–3289.
 - 35- Mzabri, I., Legsayer, m., Kouddane, N., Boukroute, A. and Berrichi, A. 2017. Salt stress effects on some morphological, physiological and biochemical parameters of saffron plant (*Crocus sativus* L.) in Eastern Morocco. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 8: 4894-4901.
 - 36- Molassiotis, A., Sotiropoulos, T., Tanou, G., Diamantidis, G. and Therios, I. 2006. Boron induced oxidative damage and antioxidant and nucleolytic responses in shoot tips culture of the apple rootstock EM9 (*Malus domestica* Borkh). *Environmental and Experimental Botany*. 56: 54 – 62.
 - 37- Moradi rikabadi, M., Pourakbar, L., Siavash Moghaddam, S., Popović-Djordjević, J. 2019. Agrobiological, chemical and antioxidant properties of saffron (*Crocus sativus* L.) exposed to TiO₂ nanoparticles and ultraviolet-B stress. *Industrial Crops and Products*. 137: 137-143.
 - 38- Moraru, I., Panchapakesan, P., Qingrong, H., Takhistov, P., Liu, S. and Jozef, K. 2003. Nanotechnology: A new frontier in food science. *Food Technology*. 57: 24-29.
 - 39- Munns, R., James, R. A. and Lauchli, A. 2006. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany*. 57: 1025–1043.
 - 40- Oberdorster, G., Maynard, A., Donaldson, K., Castranova, V., Fitzpatrick, J., Ausman, K., Carter, J., Karn, B., Kreyling, W. and Lai, D. 2005. Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy. *Particle and Fibre Toxicology*. 28-38.
 - 41- Parvaiz, A. and Satyawati, S. 2008. Salt stress and phyto-biochemical responses of plants: a review. *Plant Soil and Environment*. 54 (3): 89-99.
 - 42- Polash, M. A. S., Sakil, A. and Hossain, A. 2019. Plants responses and their physiological and biochemical defense mechanisms against salinity: A review. *Tropical Plant Research*. 6(2): 250–274.

- 43- Rahimi, R., Mohammakhani, A., Roohi, V. and Armand, N. 2012. Effects of salt stress and silicon nutrition on chlorophyll content, yield and yield components in fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.). The international Journal of Agriculture Crop Science. 4: 1591-1595.
- 44- Rajaei, S. M., Niknam, V., Seyedi, S. M., Ebrahimzadeh, H. and Razavi, K. 2009. Contractile roots are the most sensitive organ in *Crocus sativus* to salt stress. Biomedical and Life Sciences. 53 (3): 523-529.
- 45- Senapati, S., Mandal, D., Ahmad, A., Khan, M. I., Sastry, M. and Kumar, R. 2004. Fungus mediated synthesis of silver nanoparticles: a novel biological approach. Indian Journal of Physics and Proceedings of the Indian Association for the Cultivation of Science-Part A. 78A: 101-105.
- 46- Setter, T. L., Waters, I., Stefanova, K. and Munns, R. 2016. Salt tolerance, date of flowering and rain affect the productivity of wheat and barley on rainfed saline land. Field Crops Research. 194: 31-42.
- 47- Soundararajan, P.; Manivannan, A.; Ko, C.H. and Jeong, B.R. 2018. Silicon enhanced redox homeostasis and protein expression to mitigate the salinity stress in *Rosa hybrida* 'Rock Fire'. Plant Growth Regulation. 37: 16-34.
- 48- Spahn, C., Blaha, G., Stelzel, U., Agrawal, R. K., Frank, J. and Nierhaus, KH. 2000. Preparation of functional ribosomal complexes and effect of buffer conditions on tRNA positions observed by cry electron microscopy. Methods in Enzymology Journal. 317: 292-309.
- 49- Sperry, J. S., Hacke, U. G., Oren, R. and Comstock, J. P. 2002. Water deficits and hydraulic limits to leaf water supply. Plant, Cell and Environment. 25 (2): 251-263.
- 50- Suriyaprabha, R., Karunakaran, G., Yuvakkumar, R., Rajendran, V., Kannan, N. 2012. Silica nanoparticles for increased silica availability in maize (*Zea mays* L) seeds under hydroponic conditions. Current NanoScience. 8: 1-7.
- 51- Tantawy, A. S., Salama, Y. A. M., El-Nemr, M. A. and Abdel-Mawgoud. A. M. R. 2015. Nano silicon application improves salinity tolerance of sweet pepper plants. International Journal of Chemistry Technology Research. 8 (10): 11-17.
- 52- Tuna, A. L., Kaya, C., Higgs, D., Murillo-Amador, B., Aydemir, S. and Girgin, A. R. 2008. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. Environmental and Experimental Botany. 62: 10-16.
- 53- Turner, N.C. 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. Plant Soil. 58: 339-366.
- 54- Vyrides, I., and Stuckey, D. C. 2017. Compatible solute addition to biological systems treating waste/wastewater to counteract osmotic and other environmental stresses: a review. Critical Reviews in Biotechnology. 37, 865-879.
- 55- Wu, Y., Hu, Y. and Xu, G. 2008. Interactive effects of potassium and sodium on root growth and expression of K/Na transporter genes in rice. Plant Growth Regulation. 57 (3): 271-280.

The effect of silicon and silicon dioxide nanoparticle on growth factors, osmolytes and ionic content of saffron (*Crocus Sativus L.*) under salinity stress

Asemeh M. and Pourakbar L.

Dept. of Biology, Faculty of Science, Urmia University, Urmia, I.R. of Iran.

Abstract

The aim of this study was to examine the effect of salinity stress on saffron plants and the role of foliar application of silicon and silicon nanoparticles in alleviating the impact of salinity. In this way, saffron plants were grown in the hydroponic system in a greenhouse for 1 month. After the four-leaf stage, they were treated with salinity in 3 levels (0, 75 and 150 mM NaCl) for three months. Silicon and silicon dioxide NPs were used at two concentrations of 0.5 and 1 mM as the foliar application every day. The plants were harvested four months later and their growth and chemical parameters were measured. The results showed that salinity reduced length of shoots and roots, fresh and dry weight of the aerial and underground organs, K⁺ content (26.36 to 45.84%), K⁺/Na⁺ ratio (4.67 to 9.52 folds) and RWC (5.75%). Furthermore, salinity increased the cell death (146 to 167%), amount of proline (119.74 to 131.47%), glycine betain (54.18 and 65.70%) and Na⁺ (6.53 to 8.78 folds) and Cl⁻ (1.93 to 4.92 folds) content in the treated plants. Foliar application of silicon and silicon dioxide nanoparticles improved growth factors, RWC, K⁺ content and K⁺/Na⁺ ratio. The results also showed applying silicon and nanosilicon decreased compatible osmolytes and Na⁺ and Cl⁻ content. It can be concluded that Si and SiO₂ NPs, especially SiO₂ NPs, had the ability to reduce the toxicity created under salinity stress in saffron and could play an important role in increasing the resistance of saffron plants to salinity stress.

Key words: Compatible osmolytes, Saffron, Salinity, Ionic content, Silicon nanoparticles.