

تأثیر محلول پاشی نانوسیلیکون بر صفات مورفولوژی و بیوشیمیایی ارقام برنج (*Oryza sativa* L.) در مرحله گلدهی در زمین شور

سکینه اسمعیلی کناری^۱، منیر حسین زاده نمین^{۱*}، خدیجه کیارستمی^۱ و الهیار فلاح^۲

^۱ایران، تهران، دانشگاه الزهرا (س)، دانشکده علوم زیستی، گروه زیست‌شناسی

^۲ایران، آمل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، معاونت مازندران، مؤسسه تحقیقات برنج کشور

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۷

چکیده

برنج (*Oryza sativa* L.) محصول غذایی اصلی از جمله در آسیا می‌باشد. تحقیق حاضر بمنظور بررسی تأثیر محلول نانوسیلیکون (شش گرم در لیتر) در تحمل به شوری سه رقم گیاه برنج طارم‌محلی، متحمل FL478 و برکت در زمین شور (با EC بین ۸-۵) در مرحله گلدهی جهت مطالعه صفات مورفولوژی و بیوشیمیایی آن‌ها طراحی شد. آزمایش در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در قالب طرح فاکتوریل بر پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار در استان مازندران در ایران صورت گرفت. نتایج نشان داد که محلول نانوسیلیکون موجب کاهش ارتفاع بوته (۱۳۸/۸۳ سانتی‌متر) و افزایش قطر طوقه ریشه (۱۰/۱۷ سانتی‌متر) طارم‌محلی رشد یافته در زمین شور، در مقایسه با سایر ارقام، نسبت به شاهد (طارم‌محلی در زمین غیر شور) و شوری (طارم‌محلی در زمین شور) شد. وزن‌های خشک اندام هوایی و ریشه (به ترتیب ۸۸/۰۴ و ۷/۰۷۵ گرم) نسبت به شاهد افزایش یافتند که همگی معنی‌دار شدند ($P \leq 0.05$). در طارم‌محلی تیمار شده میزان پرولین (۰/۵۸۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز (به ترتیب ۰/۵۳۶ درصد میلی‌لیتر در میلی‌گرم وزن تر، ۱/۱۸۴، ۱۸/۰۶ و ۳۸۸/۱۸ میکرومول در دقیقه در میلی‌گرم پروتئین) افزایش معنی‌دار و مقدار H_2O_2 (۰/۱۶۰ میکرومول در گرم وزن تر) و MDA (۰/۰۰۴ میکرومول بر گرم وزن تر) کاهش معنی‌داری یافتند. نتایج نشان داد محلول نانوسیلیکون با کاهش ارتفاع و قوی کردن برنج طارم‌محلی در برابر تنش شوری، سبب افزایش استحکام آن و در نهایت تسهیل برداشت برنج گردید.

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، اوریزا، پراکسید هیدروژن، پرولین، مالون‌دی‌آلدئید

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۱۳۴۹۷۲۶، پست الکترونیکی: m.namin@alzahra.ac.ir

مقدمه

تحت تأثیر عوامل غیرزیستی مختلف از جمله تنش شوری قرار می‌گیرد [۴۶].

رقم طارم‌محلی جزو ارقام محلی، با دانه‌های بلند و قلمی، معطر و حساس به پدیده ورس (خوابیدگی در برابر باد و باران) است. ارقام شیروودی و فجر جزو ارقام اصلاح شده (حاصل دورگه‌گیری) و پرمحصول، دارای دانه‌های بلند و قلمی و معطر و مقاوم به ورس هستند [۱]. رقم متحمل FL478 رقم اصلاح شده و متحمل به شوری خارجی است

برنج (*Oryza sativa* L.) یک محصول غذایی اصلی و مهم است که در بسیاری از مناطق جهان به ویژه آسیا، آمریکای لاتین و آفریقا رشد می‌کند [۳۶]. برنج دومین محصول مهم کشت شده در جهان است و کشورهای آسیایی تقریباً ۹۰ درصد برنج را تولید می‌کنند. ۲۰ درصد از انرژی غذایی جهان توسط برنج تامین می‌شود که نشان‌دهنده اهمیت محصول برنج است. با این حال، عملکرد و کیفیت برنج

سمی مانند سدیم (Na^+) و کلر (Cl^-) را افزایش می‌دهد که اثرات منفی روی رشد و بهره‌وری گیاه دارند. غلظت بالای Na^+ باعث ایجاد تنش اسمزی شده که منجر به مرگ سلولی می‌شود [۹]. دستگاه فتوسنتزی نیز تحت تأثیر تنش شوری قرار می‌گیرد که به دلیل کاهش سطح برگ، هدایت روزنه‌ای، سطوح کلروفیل و بمیزان کمتر به دلیل کاهش کارایی فتوسیستم II است [۲۹].

از آنجایی که نانوذرات (NPs) دارای ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی متمایز از ذرات حجیم مانند سیلیکون (Si) هستند توجه محققان را به خود جلب کردند [۳۹]. نانوسیلیکون (NPs-Si) بدلیل اندازه کوچک‌شان (در حد ۱-۱۰۰ نانومتر) خواص منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند و بدلیل افزایش سطح، حلالیت و واکنش‌پذیری سطحی آن‌ها بیشتر است [۲۶، ۱۷]. محلول‌پاشی نانوذرات با کاهش اثرات تنش غیرزیستی، نقش حیاتی را در تولید غذا در سراسر جهان نشان دادند [۴۴]. نانوکودها در واقع به عنوان کودهای کارآمد با افزایش در دسترس بودن عناصر ضروری برای گیاهان عمل می‌کنند که منجر به استفاده کارآمد از مواد مغذی می‌شوند که منجر به کاهش اثرات منفی تنش شوری می‌گردد [۱۲]. علاوه بر این، نانوذرات می‌توانند سریع‌تر و کامل‌تر از روش‌های مرسوم توسط گیاهان جذب شوند [۲۲]. بنابراین، نانوکودهای گیاهی را می‌توان بطور موثر در غلظت‌های بسیار کم برای افزایش تولید محصولات زراعی از جمله برنج استفاده کرد [۱۱، ۴۸].

نانوسیلیکون با کاهش اثرات شوری در گیاه نخود، سبب افزایش قابل توجه طول ساقه و ریشه و وزن خشک اندام هوایی و ریشه در مقایسه با سطح شوری مربوطه شد [۲۶]. استفاده از نانوسیلیکون، باعث افزایش کیفیت نمو در گیاهچه‌های *Larix* و بهره‌وری در گیاهان توت فرنگی تحت تنش خشکی شد [۲۶]. محلول‌پاشی نانوسیلیکون در گیاهان برنج با تعدیل فرآیندهای مهم فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی از جمله افزایش عملکرد فتوسنتز، تنظیم

[۱۸]. رقم جدید برکت (H5) رقم اصلاح‌شده و پرمحصول داخلی، متحمل به شوری و مقاوم به ورس می‌باشد [۵].

تنش شوری بر فرآیندهای مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان تأثیر می‌گذارد. شوری بالا نه تنها باعث کاهش رشد گیاه، زیست توده، عملکرد، فتوسنتز و راندمان مصرف آب می‌شود، بلکه منجر به خشکی فیزیولوژیکی و سمیت یونی در گیاهان شده و در نتیجه بهره‌وری و عملکرد کشاورزی را کاهش می‌دهد [۵۶]. تنش شوری همچنین باعث عدم تعادل یونی و اسمزی، کمبود مصرف آب و مواد مغذی شده که در نهایت منجر به تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌شود [۲۹، ۴۷]. در شرایط تنش، گیاه گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و سوپراکسید را تولید می‌کند [۱۹]. با این حال، تولید بیش از حد ROS منجر به آسیب اکسیداتیو به پروتئین‌ها، لیپیدها، اسیدهای نوکلئیک و غشای پلاسمایی سلول می‌شود. در طی متابولیسم سلولی طبیعی، گیاه چندین آنزیم آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (POD) [۲۹] و آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی مانند پرولین [۱۹] را برای سم‌زدایی ROS تولید می‌کند. SOD یک جاروب‌کننده قوی سوپراکسید است و برای از بین بردن سوپراکسید، پراکسید هیدروژن تشکیل می‌دهد که در مرحله بعد توسط CAT و POD از بین می‌رود. پلی‌فنل اکسیدازها (PPOs) آنزیم‌های اکسیداتیو و دفاعی گیاهی رایج هستند [۵۱]. پلی‌فنل اکسیدازها گروهی از آنزیم‌های حاوی مس هستند که هیدروکسیلاسیون مونوفنل‌ها به ۰-دیفنول‌ها و همچنین اکسیداسیون ۰-دیفنول‌ها را در حضور اکسیژن به کینون‌ها کاتالیز می‌کنند. بسیاری از ژن‌های PPO با تنش زیستی (پاتوژن) تنظیم می‌شوند و بهترین مشخصه برخی از آن‌ها، دفاع از گیاه در برابر حشرات و عوامل بیماری‌زاست [۱۴]. علاوه بر تولید ROS بالا، تنش شوری بطور قابل توجهی جذب فسفر (P) و پتاسیم (K^+) را کاهش می‌دهد، در حالی که جذب عناصر

شده از سال اول (رقم مد نظر این تحقیق) جهت انجام آزمایش‌های بعدی در مراحل مختلف انتخاب شدند.

طرح آزمایش: این تحقیق در مرحله گلدهی برنج، ارقام زراعی طارم‌محلی، برکت و متحمل FL478 در قالب طرح فاکتوریل در پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. در این پژوهش، نمونه‌های رشدیافته در زمین غیرشور بعنوان شاهد، نمونه‌های رشدیافته در زمین شور به عنوان شوری و نمونه‌های تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در زمین شور، بعنوان تیمار با نانوسیلیکون در زمین شور (شالیزار شور) می‌باشند. محلول نانوسیلیکون توسط شرکت پدیده شمس ایرانیان تهیه شد (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات محلول نانوسیلیکون

کد	پتانسیل زتا (mV)
PSI 1399 01 30	-۲۵

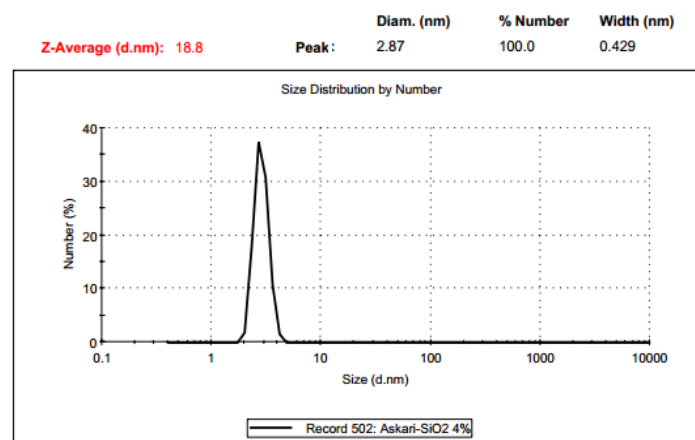
منحنی DLS توسط دستگاه آنالیز اندازه ذرات نانو (مدل Zetasizer Nano S، شرکت مالورن (Malvern) کشور انگلستان) رسم شد که براساس بازتابش نور، تعداد ذرات نانوسیلیکون (SiO_2) موجود در محلول نانوسیلیکون، ۴۰ درصد و قطر آن‌ها ۲/۸۷ نانومتر (~ 3 نانومتر) تعیین شد (منحنی ۱).

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و پرولین و کاهش ROSها از جمله H_2O_2 و نیز کاهش MDA اثرات تنش شوری را کاهش داد [۳۲]. علاوه بر این، کاربرد سیلیکون به عنوان نانوذرات می‌تواند سبب کاهش جذب Na^+ و افزایش انتقال K^+ گردد و در عین حال تنش اکسیداتیو را کاهش دهد [۱۱،۵۰].

نانوسیلیکون در گیاهان برنج سبب افزایش تحمل شوری می‌شود [۳۲]. هدف تحقیق حاضر تیمار با محلول نانوسیلیکون ۳ رقم گیاه برنج طارم‌محلی، برکت و متحمل-FL478 در مراحل پنجه‌زنی و گلدهی است تا صفات مورفولوژی و بیوشیمیایی آن‌ها در مراحل مختلف از جمله در مرحله گلدهی مطالعه شود و سپس با نمونه‌های تیمار نشده در مراحل مشابه مقایسه شوند و در نهایت متحمل‌ترین رقم برنج به تنش شوری گزینش شده و علت و دامنه افزایش به تحمل شوری در رقم برنج متحمل بررسی تا در آینده به کشت وسیع آن‌ها مبادرت نمود.

مواد و روشها

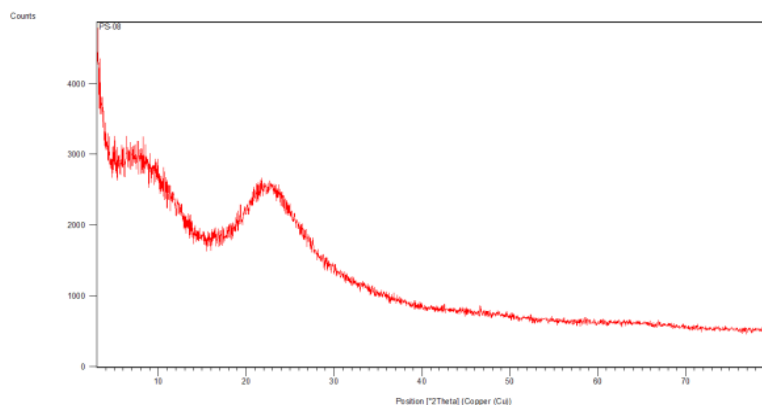
در سال اول تحقیق، آزمایش‌های مقدماتی بر روی چهار رقم برنج طارم‌محلی، شیرودی، فجر و متحمل FL478 در مراحل پنجه‌زنی، گلدهی و رسیدن دانه جهت غربالگری نمونه‌ها انجام شد. در سال دوم، دو رقم برکت و متحمل FL478 (به عنوان ارقام شاهد) و رقم طارم‌محلی گزینش-



منحنی ۱- منحنی DLS رسم شده برای ذرات نانوسیلیکون توسط دستگاه آنالیز اندازه ذرات نانو

شده به نمونه، پیک نانوسیلیکون، در موقعیت ۲۵ تعیین شد. این منحنی نشان می‌دهد که ذرات نانوسیلیکون هموزنیزه و کاملاً از هم جدا هستند (منحنی ۲).

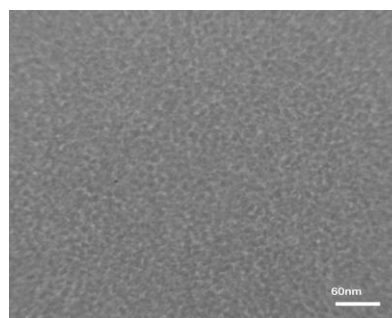
منحنی XRD توسط دستگاه طیف‌سنج پراش اشعه ایکس (مدل Xpert Pro MPD، شرکت مالورن (Malvern)، کشور انگلستان) رسم شد که بر اساس پراش اشعه‌های X تابیده



منحنی ۲- منحنی XRD رسم‌شده برای ذرات نانوسیلیکون توسط دستگاه طیف‌سنج پراش اشعه ایکس

(مدت زمان خزانه) به نشاهای چهار الی پنج برگی (مرحله گیاهچه‌ای) تبدیل شدند. در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ نشاهای سه رقم برنج مدنظر از موسسه تحقیقات برنج آمل به زمین‌های تحقیقاتی (شالیزار) غیرشور و شور شهرستان فریدونکنار (متوسط حداکثر دما ۲۱/۵+، متوسط حداقل دما ۱۳/۷+ و متوسط روزانه ۱۷/۶+ درجه سانتی‌گراد) در استان مازندران انتقال یافت و سه تا چهار نشا در هر نقطه با فاصله ۲۰ سانتی‌متر از نقطه مجاور در قطعات ۱ متر مربع (میکروپلات) کاشته شدند. زمین‌های غیرشور و شور با شخم‌زدن، مسطح‌کردن زمین، وجین‌کردن علف‌های هرز [مانند اویارسلام (*Cyperus difformis* L.) و سوروف (*Echinochola cruss-galli* L.)] و آب‌بستن زمین قبل از نشاکاری، آماده‌سازی شدند که در طول تحقیق تنظیم میزان آب زمین و وجین‌کردن آن ادامه داشت. وجین‌کاری در دو مرحله انجام شد مرحله اول ۱۵ روز بعد از نشاکاری (مرحله گیاهچه‌ای علف‌های هرز) و مرحله دوم، ۳۰ روز بعد از نشاکاری (مرحله پنجه‌زنی علف‌های هرز) انجام شد [۶،۲].

از محلول نانوسیلیکون با کمک میکروسکوپ TEM (مدل Zeiss-EM10C-100Kv، کشور آلمان) در مقیاس ۶۰ نانومتر عکس گرفته شد. دانه‌های سیاه، ذرات ۳ نانومتری نانوسیلیکون هستند که بصورت کلوئیدی در آب پخش شده‌اند و پراکندگی یکنواختی دارند (شکل ۱).



شکل ۱- تصویر میکروسکوپی ذرات نانوسیلیکون در مقیاس ۶۰ نانومتر توسط TEM

آماده‌سازی نمونه: در خزانه زمین‌های موسسه تحقیقات برنج مازندران- آمل بذرهای سه رقم برنج طارم‌محلی، متحمل FL478 و برکت کاشته شدند. پنج روز بعد از بذرپاشی، بذرها جوانه زده و با گذراندن ۳۰ تا ۳۷ روز

سنجش pH خاک‌ها با روش گل اشباع با دستگاه pH متر (مدل Metrohm 691، کشور سوئیس) و EC آن‌ها با روش عصاره گل اشباع با دستگاه ای‌سی‌متر و مولتی‌متر (مدل Inolab multi 9420 کمپانی WTW، کشور آلمان) انجام شد (جدول‌های ۲ و ۳). pH آب و EC (میزان هدایت یون ها و ذرات معلق در آب) آن با دستگاه‌های pH متر (مدل Sartorius PB-11، کشور آلمان) و ای‌سی‌متر (مدل Metrohm 712، کشور سوئیس) هر ۱۰ روز یکبار از اول خرداد به بعد کنترل شد که در زمین شور pH آب باید بین ۷/۵-۶/۵ و EC آن بین ۸-۵ باشد که با تعویض آب زمین صورت گرفت.

جهت سنجش ترکیبات خاک و ارزیابی دقیق از میزان کوددهی و تیماردهی به گیاه برنج، نمونه‌برداری از خاک‌های غیرشور و شور، بطور جداگانه از یک نقطه به مساحت ۱۰۰ سانتی‌متر مربع و از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر انجام شد که سیلیکون خاک با روش رنگ‌سنجی و فسفر با روش اولسون با دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل SECOMAM سری Uvline-R، کشور فرانسه)، پتاسیم با روش استات آمونیم و توسط دستگاه فلیم‌فتومتر (مدل Sherwood 410، کشور انگلیس)، نیتروژن با روش کج‌لدال با دستگاه کج‌لتیک (مدل Foss, Kjeltec 2100، کشور سوئیس) و کربن و آهک با روش تیتراسیون سنجیده شد.

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک غیرشور محل آزمایش

pH (گل اشباع)	EC (شوری)	SP (رطوبت اشباع)	OC (کربن آلی)	ماده آلی (آهک معادل)	T.N.V. (درصد)	نیترژن کل	رس	سیلت	شن	سیلیکون (پی‌پی‌ام)	فسفر قابل	پتاسیم قابل	بافت خاک
											جذب	جذب	
۷/۱۰	۱/۸	-	۲/۹۵	۵/۰۸	۴/۸	۰/۳۰	۲۳	۵۰	۲۷	۱۷۴	۴	۲۱۵	لومی

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شور محل آزمایش

pH (گل اشباع)	EC (شوری)	SP (رطوبت اشباع)	OC (کربن آلی)	ماده آلی (آهک معادل)	T.N.V. (درصد)	نیترژن کل	رس	سیلت	شن	سیلیکون (پی‌پی‌ام)	فسفر قابل	پتاسیم قابل	بافت خاک
											جذب	جذب	
۷/۳۶	۵/۷۵	۶۱	۴/۱	۷/۱	۳۴	۰/۱۵	۱۷	۴۵	۳۸	۱۵۴	۳۳/۱	۱۷۵	لومی

رقم سه تکرار و از هر تکرار سه کپه (۱۰ روز بعد از محلول‌پاشی دوم (۵۰ روز بعد از نشاکاری) انجام شد و سپس به آزمایشگاه دانشگاه الزهرا (س) در تهران جهت انجام آزمایش‌های لازم انتقال یافت. مقدار و غلظت نانو-سیلیکون، مراحل و زمان محلول‌پاشی و زمان برداشت نمونه‌ها بر اساس مطالعات و تجارب قبلی انتخاب شد.

اندازه‌گیری صفات مورفولوژی: ارتفاع بوته (طول اندام هوایی)، طول ریشه و قطر طوقه ریشه (قاعده بالایی کل

مراحل محلول‌پاشی: مقدار ۱۳ لیتر محلول نانو سیلیکون ۶ در هزار (۶ گرم در لیتر) (۱۴۰۰ میلی‌لیتر به ازای هر میکروپلات) آماده شد و مرحله اول محلول‌پاشی نانو سیلیکون ۲۰ روز بعد از نشاکاری (مرحله متوسط پنجه زنی) بصورت اسپری بر روی اندام هوایی گیاه برنج انجام شد. مرحله دوم محلول‌پاشی ۱۵ تا ۲۰ روز بعد از محلول‌پاشی اول (۳۵ تا ۴۰ روز بعد از نشاکاری) (مرحله حداکثر پنجه‌زنی) انجام شد. برداشت کپه‌های سه رقم برنج (از هر

سنجش میزان مالون‌دی‌آلدئید (MDA): ارزیابی MDA با روش Heath and packer [۲۳] انجام شد. ابتدا ۰/۵ گرم برگ تر پرچمی در ۵ میلی‌لیتر محلول اسید تری‌کلرو-استیک (TCA) ۰/۱ درصد سائیده شد و عصاره حاصل به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰rpm توسط دستگاه Tixette II BHG سانتریفیوژ گردید. سپس به ۱ میلی‌لیتر از محلول روشن‌آور، ۴ میلی‌لیتر اسید تری‌کلرواستیک ۲۰ درصد (W/V) که حاوی ۰/۵ درصد اسید تیوباربیتوریک (TBA) بود اضافه شد. مخلوط حاصل به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد در بن ماری حرارت داده شد و بلافاصله در یخ سرد گردید. این مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه در دمای محیط و با سرعت ۱۰۰۰۰rpm سانتریفیوژ گردید. جذب محلول رویی حاصل از سانتریفیوژ توسط طیف‌سنج CECIL CE 1021 1000 SERIES در طول موج ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر خوانده شد و مقدار MDA بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر ($\mu\text{mol g}^{-1}$ (FW)) محاسبه گردید.

سنجش پرولین: ۰/۵ گرم برگ تر پرچمی با ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالیسیلیک ۳ درصد حدود ۵ دقیقه سائیده شده و با سانتریفیوژ Tixette II BHG در دور ۳۵۰۰rpm به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. به ۲ میلی‌لیتر از محلول روشن‌آور، ۲ میلی‌لیتر محلول نین‌هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال اضافه شد. به مدت یک ساعت لوله‌ها در بن ماری با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و بعد به حمام یخ انتقال تا به دمای محیط برسند. سپس به هر لوله ۴ میلی‌لیتر تولوئن اضافه شد و به مدت ۲۰ تا ۳۰ ثانیه ورتکس گردید. جذب فاز فوقانی حاوی محلول رنگی در طول موج ۵۲۰ نانومتر توسط طیف‌سنج مدل CECIL CE 1021 1000 SERIES خوانده شد. در نهایت مقدار پرولین بر اساس میلی‌گرم بر گرم وزن تر (mg g^{-1} (FW)) محاسبه گردید [۱۵].

ریشه)، با خط‌کش بر حسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی و ریشه، کپه‌های سه رقم برنج پس از بریدن از محل طوقه (حد فاصل ریشه و اندام هوایی) و جدا کردن اندام‌های هوایی از بخش ریشه، آن‌ها در انکوباتور ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت قرار داده شدند تا خشک شوند و وزن نمونه‌ها ثابت بمانند سپس توسط ترازوی حساس، وزن خشک نمونه‌ها بر حسب گرم اندازه‌گیری شد.

سنجش رنگیزه‌های فتوسنتزی: جهت سنجش محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها (شامل کاروتن و گزانتوفیل)، ابتدا ۰/۱ گرم برگ تر (برگ پرچمی) (اولین برگ از بالا و در کنار خوشه) با ۲ میلی‌لیتر استن ۸۰ درصد سائیده شد و پس از رسیدن به حجم ۴ میلی‌لیتر توسط استن ۸۰ درصد، به مدت ۵ دقیقه با دور ۳۰۰۰rpm توسط دستگاه Tixette II BHG سانتریفیوژ شد. سپس جذب روشن‌آورها در طول موج ۶۴۳/۲، ۶۴۶/۸ و ۴۷۰ نانومتر با استفاده از طیف‌سنج CECIL CE SERIES 1021 1000 خوانده شد. غلظت رنگیزه‌ها بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر (mg g^{-1} (FW)) محاسبه شد [۳۵].

سنجش H_2O_2 : محتوای H_2O_2 با استفاده از روش Velikova et al., [۵۴] سنجیده شد. ۰/۴ گرم برگ تر پرچمی در حمام یخ با ۴ میلی‌لیتر اسید تری‌کلرواستیک ۰/۱ درصد سائیده شد و با دور ۱۲۰۰۰rpm به مدت ۲۰ دقیقه توسط دستگاه Tixette II BHG سانتریفیوژ شد. سپس به ۱ میلی‌لیتر از محلول روشن‌آور ۱ میلی‌لیتر بافر سدیم فسفات ۰/۱ مولار (pH= ۷) و ۲ میلی‌لیتر پتاسیم یدید (KI) ۱ مولار اضافه گردید و جذب آن در طول موج ۳۹۰ نانومتر توسط دستگاه طیف‌سنج مدل CECIL CE 1021 1000 SERIES خوانده شد و مقدار H_2O_2 موجود در بافت‌ها بر اساس میکرومول در گرم وزن تر mol g^{-1} (μFW) محاسبه شد.

زیمایه‌ای و ۰/۲ میلی‌لیتر H_2O_2 ۳ درصد در حمام یخ مخلوط شدند و بلافاصله تغییرات جذب در برنامه Kinetic توسط طیف‌سنج مدل CECIL 9000 SERIES (CECIL INSTRUMENTS CAMBRIDGE ENGLAND) و در طول موج ۲۴۰ نانومتر رسم گردید. فعالیت زیمایه بر حسب میزان جذب در دقیقه در هر میلی‌گرم پروتئین ($\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1} \text{protein}$) و با استفاده از ضریب خاموشی $40 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ برای آب اکسیژنه [۴۹] محاسبه شد. یک واحد زیمایه عبارت از مقدار زیمایه‌ای است که یک میکرومول H_2O_2 را در دقیقه مصرف کند.

سنجش کمی فعالیت POD: ابتدا ۰/۹۵ میلی‌لیتر بافر سدیم سترات (۰/۱ مولار با $\text{pH} = 4/6$) و ۱ میلی‌لیتر گایاکول (۱۵ میلی‌مولار) و بلافاصله ۵۰ میکرولیتر عصاره زیمایه‌ای و ۱ میلی‌لیتر H_2O_2 (۳۲ میلی‌مولار) در حمام یخ مخلوط شدند و تغییرات جذب در برنامه Kinetic توسط دستگاه طیف‌سنج مدل CECIL 9000 SERIES (CECIL INSTRUMENTS CAMBRIDGE ENGLAND) و در طول موج ۴۷۰ نانومتر رسم گردید [۳۷]. فعالیت زیمایه بر حسب میزان جذب در دقیقه به ازای یک میلی‌گرم پروتئین ($\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1} \text{protein}$) و با استفاده از ضریب خاموشی گایاکول معادل $26/6 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ [۱۳] محاسبه شد. یک واحد POD عبارت است از مقدار زیمایه‌ای که نیاز به اکسیداسیون یک میکرومول سوبسترا در دقیقه دارد.

سنجش کمی فعالیت آنزیم PPO: دمای بافر در ضمن سنجش بایستی بین ۴۰-۲۸ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه - داشته شود، بدین منظور ۲/۵ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات (۰/۲ مولار با $\text{pH} = 7$) در بن‌ماری در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و ۲۰۰ میکرولیتر پیروگالول ۰/۰۲ مولار و ۲۰ میکرولیتر عصاره زیمایه‌ای به آن اضافه و منحنی تغییرات جذب در طول موج ۴۳۰ نانومتر در برنامه Kinetic توسط دستگاه طیف‌سنج مدل CECIL 9000 SERIES (CECIL INSTRUMENTS

سنجش پروتئین کل: برای استخراج پروتئین از بافت تر از روش Bradford [۱۶] استفاده شد. برای عصاره‌گیری و استخراج پروتئین ابتدا ۰/۵ گرم از برگ تر پرچمی با ۴ میلی‌لیتر بافر استخراج پروتئین (بافر پتاسیم فسفات با غلظت ۰/۰۵ مولار و $\text{pH} = 7$) بر روی یخ و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد ساییده شد تا محلول هموژنیزه بدست آید. سپس عصاره‌ها به مدت ۳۰ دقیقه با دستگاه میکرو-سانتریفیوژ (Spectrafuge 240 Labnet International, Inc. EDISON, NJ USA) با دور 15000 rpm سانتریفیوژ گردید. جهت سنجش غلظت پروتئین به ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره پروتئینی ۱ میلی‌لیتر معرف برادفورد اضافه شد. جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۹۵ نانومتر توسط دستگاه طیف‌سنج CECIL CE 1021 1000 SERIES خوانده شد [۳۰] و در نهایت مقدار پروتئین بر حسب میلی‌گرم پروتئین در گرم وزن تر نمونه ($\text{mg protein g}^{-1} \text{FW}$) به- دست آمد.

سنجش کمی فعالیت آنزیم SOD: ابتدا ۱۰۰ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات ۰/۰۵ مولار با $\text{pH} = 7$ ، ۰/۰۰۲۱ گرم نیترو بلو تترازولیوم (NBT)، ۰/۰۰۲۸ گرم ریبولوین و ۰/۱۹۴ گرم متیونین با هم مخلوط شدند و سپس به هر لوله ۱/۵ میلی‌لیتر از بافر مخلوط و ۵۰ میکرولیتر عصاره زیمایه‌ای اضافه و به اندازه ۱۰ دقیقه در زیر روشنائی قرار گرفت و سپس جذب آن‌ها توسط طیف‌سنج مدل CECIL 9000 SERIES (CECIL INSTRUMENTS CAMBRIDGE ENGLAND) در طول موج ۵۶۰ نانومتر خوانده شد. یک واحد زیمایه برابر است با مقدار زیمایه‌ای که احیای نوری NBT را بمیزان ۵۰ درصد بازدارندگی کند. فعالیت این زیمایه بر اساس واحد زیمایه در میلی‌گرم پروتئین ($\text{mg}^{-1} \text{ml}^{-1} \text{U mg}^{-1} \text{g (FW)}$) محاسبه شد [۲۱].

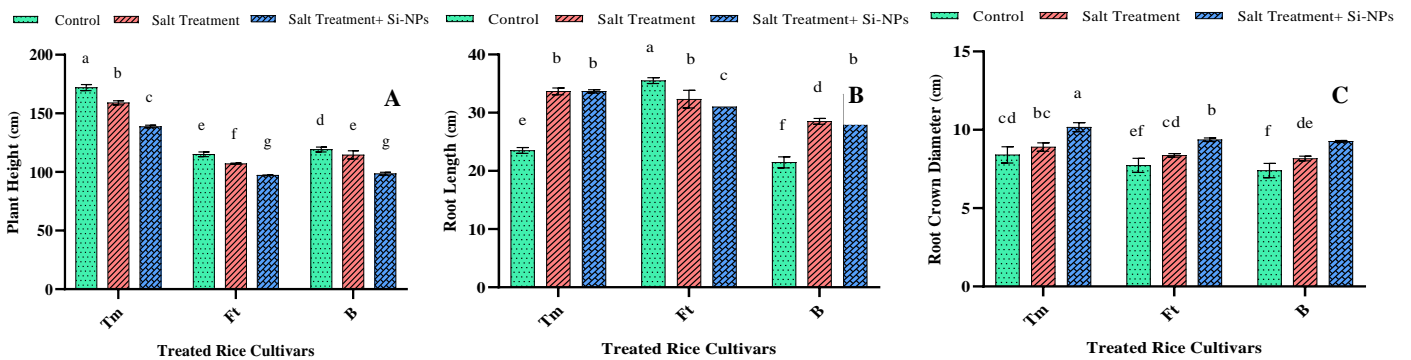
سنجش کمی فعالیت آنزیم CAT: با استفاده از روش Aebi [۸] سنجش CAT انجام شد. ۲/۷ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات ۰/۰۵ مولار با $\text{pH} = 7$ ، ۰/۱ میلی‌لیتر عصاره

نتایج

اثرات محلول نانوسیلیکون بر صفات مورفولوژی ارقام مختلف برنج: ارتفاع بوته در تمامی ارقام طارم‌محلی، متحمل FL478 و برکت تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در زمین شور (بترتیب ۱۳۸/۸۳، ۹۷/۱۷ و ۹۸/۵۰ سانتی-متر) نسبت به شاهد و شوری کاهش معنی‌داری داشت (نمودار ۱A). طول ریشه در طارم‌محلی تیمار شده با محلول نانوسیلیکون (۳۳/۶۷ سانتی‌متر) در مقایسه با شاهد بطور معنی‌داری افزایش یافت. ارتفاع ریشه در متحمل FL478 تیمار شده با محلول نانوسیلیکون (۳۱/۰۰ سانتی-متر) کاهش معنی‌دار و در برکت (۳۳/۱۷ سانتی‌متر) افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد و شوری داشت (نمودار ۱B). قطر طوقه ریشه در طارم‌محلی، متحمل FL478 و برکت تیمار شده با محلول نانوسیلیکون (بترتیب ۱۰/۱۷، ۹/۳۶۷ و ۹/۲۶۷ سانتی‌متر) در مقایسه با شاهد و شوری بطور معنی‌داری زیاد شد (نمودار ۱C).

(CAMBRIDGE ENGLAND) رسم گردید [۴۵]. فعالیت زیمايه بر حسب میزان جذب در دقیقه به ازای یک میلی-گرم پروتئین ($\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1} \text{protein}$) و با استفاده از ضریب خاموشی معادل $26/40 \text{ M}^{-1} \text{cm}^{-1}$ [۴۹] محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل آماری: با استفاده از نرم‌افزارهای SAS (نسخه ۹/۴) و MSTATC تجزیه و تحلیل واریانس (میانگین مربعات) صفات صورت گرفت و مقایسه میانگین‌ها براساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد انجام پذیرفت و جدول‌های مربوط به مرحله گلدهی رسم شد. نمودارهای لازم با کمک برنامه Graph Pad Prism (نسخه ۹) و با استفاده از داده‌های وارد شده در Excel 2013 (Microsoft Excel Worksheet) رسم گردید.



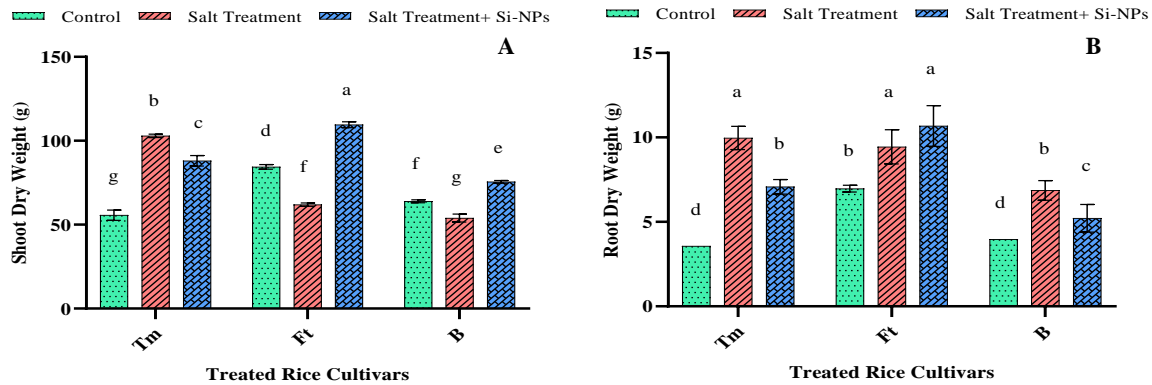
نمودار ۱- اثر محلول نانوسیلیکون بر ارتفاع بوته (A)، طول ریشه (B) و قطر طوقه ریشه (C) در مرحله گلدهی ارقام طارم‌محلی (Tm)، متحمل FL478 (Ft) و برکت (B). نتایج حاصل، میانگین سه تکرار است و حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

نانوسیلیکون (بترتیب ۱۰۹/۵۵ و ۷۵/۵۳ گرم) در مقایسه با شاهد و شوری افزایش معنی‌داری یافت. وزن خشک ریشه در طارم‌محلی و برکت تیمار شده با محلول نانوسیلیکون (بترتیب ۷/۰۷۵ و ۵/۲۱۳ گرم) در مقایسه با شاهد افزایش

در طارم‌محلی تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در زمین شور وزن خشک اندام هوایی (۸۸/۰۴ گرم) نسبت به شاهد زیاد و در مقایسه با شوری بطور معنی‌داری کم شد. این صفت در متحمل FL478 و برکت تیمار شده با محلول

و نسبت به شوری کاهش معنی‌داری را نشان داد. در متحمل FL478 تیمار شده با محلول نانوسیلیکون

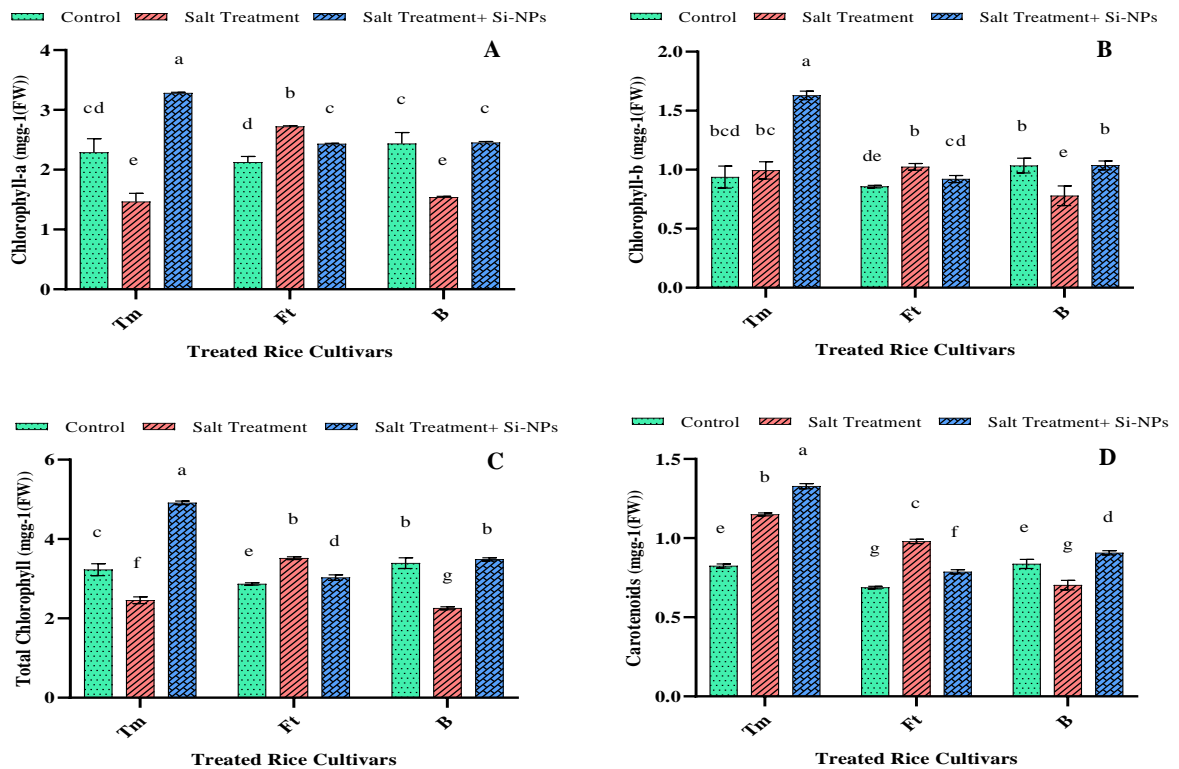
معنی‌داری زیاد شد (نمودار ۲A و ۲B).



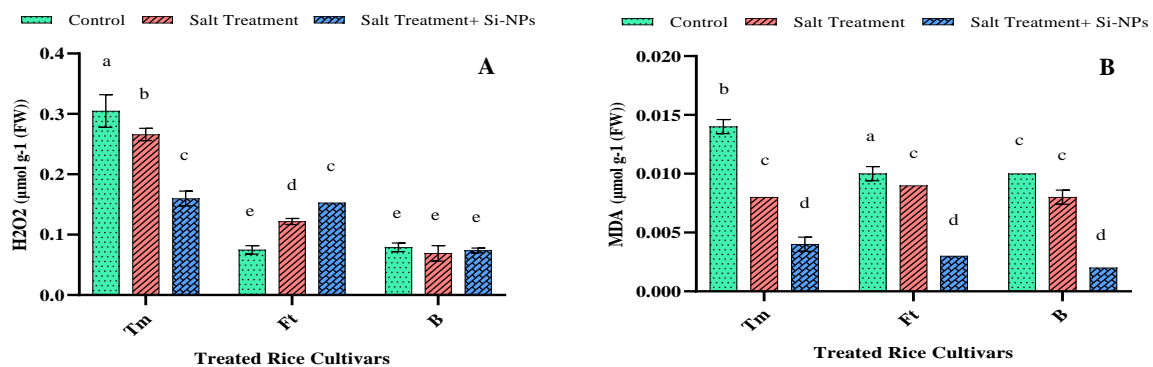
نمودار ۲- اثر محلول نانوسیلیکون بر وزن خشک اندام هوایی (A) و وزن خشک ریشه (B) در مرحله گلدهی ارقام طارم محلی (Tm)، متحمل FL478 (Ft) و برکت (B). نتایج حاصل، میانگین سه تکرار است و حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

اثرات محلول نانوسیلیکون بر صفات بیوشیمیایی ارقام مختلف برنج: مقدار H_2O_2 در طارم محلی تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در زمین شور (۰/۱۶۰ میکرومول در گرم وزن تر) کاهش و در متحمل FL478 تیمار شده با محلول نانوسیلیکون (۰/۱۵۳) نسبت به شاهد و شوری افزایش معنی‌داری نشان داد. این صفت در برکت تیمار شده با محلول نانوسیلیکون (۰/۰۷۴) در مقایسه با شاهد و شوری تقریباً برابر شد (نمودار ۴A). میزان MDA در طارم محلی، متحمل FL478 و برکت تیمار شده با محلول نانوسیلیکون (بترتیب ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۳ و ۰/۰۰۲ میکرومول بر گرم وزن تر) در مقایسه با شاهد و شوری کاهش معنی‌داری یافت (نمودار ۴B).

اثرات محلول نانوسیلیکون بر صفات فیزیولوژی ارقام مختلف برنج: میزان کلروفیل a و کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها در طارم محلی تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در زمین شور (بترتیب ۳/۲۸۳، ۱/۶۳۰، ۴/۹۱۳ و ۱/۳۲۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) نسبت به شاهد و شوری افزایش معنی‌داری یافتند. این صفات در متحمل - FL478 تیمار شده با محلول نانوسیلیکون (بترتیب ۲/۴۳۳، ۰/۹۲۱، ۳/۰۲۷ و ۰/۷۸۷) در مقایسه با شاهد زیاد و نسبت به شوری بطور معنی‌داری کم شدند. میزان کلروفیل a و b و کلروفیل کل در برکت تیمار شده با محلول نانوسیلیکون (بترتیب ۲/۴۵۰، ۱/۰۳۷ و ۳/۴۸۷) نسبت به شوری افزایش معنی‌داری یافتند و میزان کاروتنوئیدهای آن (۰/۹۰۷) در مقایسه با شاهد و شوری بطور معنی‌داری زیاد شد (نمودار ۳A، ۳B، ۳C و ۳D).



نمودار ۳- اثر محلول نانوسیلیکون بر محتوای کلروفیل a (A)، کلروفیل b (B)، کلروفیل کل (C) و کاروتنوئیدها (شامل کاروتن و گزانتوفیل) (D) در مرحله گلدهی ارقام طارم‌محلی (Tm)، متحمل FL478 (Ft) و برکت (B). نتایج حاصل، میانگین سه تکرار است و حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.



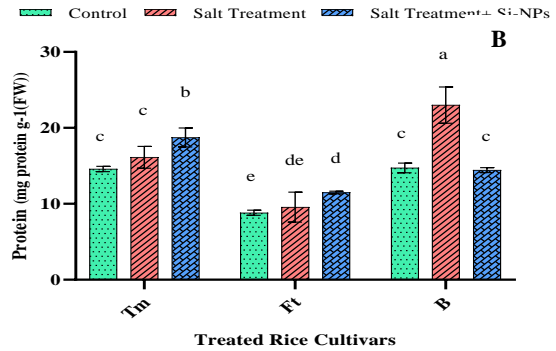
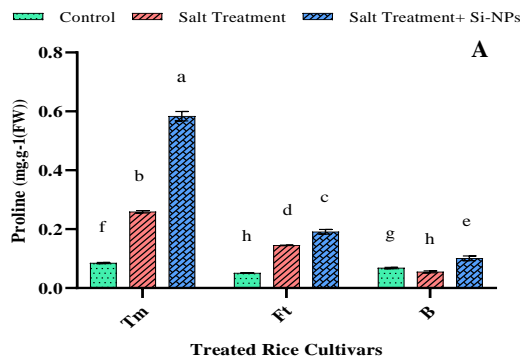
نمودار ۴- اثر محلول نانوسیلیکون بر مقدار H₂O₂ (A) و MDA (B) در مرحله گلدهی ارقام طارم‌محلی (Tm)، متحمل FL478 (Ft) و برکت (B). نتایج حاصل، میانگین سه تکرار است و حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

۰/۵۸۴، ۰/۱۹۱ و ۰/۱۰۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) نسبت به شاهد و شوری افزایش معنی‌داری یافت (نمودار ۵A).

محتوای پرولین در طارم‌محلی، متحمل FL478 و برکت تیمارشده با محلول نانوسیلیکون در زمین شور (بترتیب

شوری اثر افزایشی معنی‌دار و در برکت تیمار شده با محلول نانوسیلیکون (۱۴/۴۳) نسبت به شوری اثر کاهشی معنی‌داری داشت (نمودار ۵B).

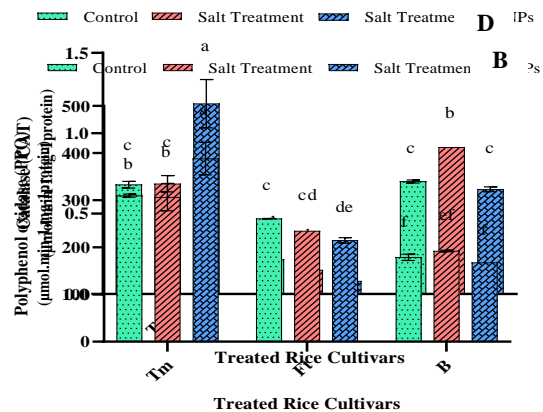
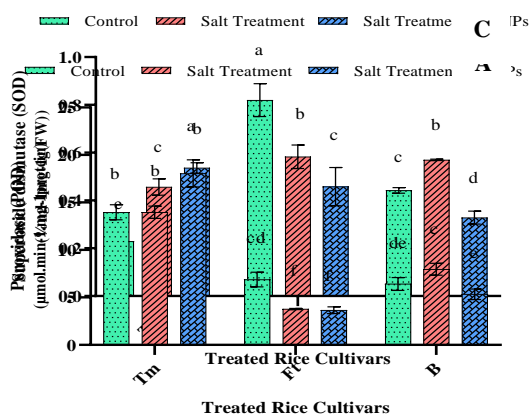
محلول نانوسیلیکون بر مقدار پروتئین طارم‌محلی و متحمل FL478 تیمار شده (بترتیب ۱۸/۷۳ و ۱۱/۴۸ میلی‌گرم پروتئین در گرم وزن تر نمونه) در مقایسه با شاهد و



نمودار ۵- اثر محلول نانوسیلیکون بر مقدار پرولین (A) و پروتئین (B) در مرحله گلدهی ارقام طارم‌محلی (Tm)، متحمل FL478 (Ft) و برکت (B). نتایج حاصل، میانگین سه تکرار است و حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

محلول نانوسیلیکون (بترتیب ۰/۴۵۸، ۰/۰۸۰، ۳/۶۵۲ و ۲۱۴/۸۵) و در برکت تیمار شده با محلول نانوسیلیکون (بترتیب ۰/۳۲۸، ۰/۶۵۲، ۵/۳۳۹ و ۱۶۷/۷۵) نسبت به شاهد و شوری کاهش یافتند که بیشتر آن‌ها معنی‌دار شدند (نمودار ۶A، ۶B، ۶C و ۶D).

مقدار SOD، CAT، POD و PPO در طارم‌محلی تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در زمین شور (بترتیب ۰/۵۳۶، ۱/۱۸۴، ۱۸/۰۶ و ۳۸۸/۱۸ واحد زیمایه در میلی‌گرم پروتئین) در مقایسه با شاهد و شوری افزایش معنی‌داری را نشان دادند. این صفات در متحمل FL478 تیمار شده با



نمودار ۶- اثر محلول نانوسیلیکون بر مقدار آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی SOD (A)، CAT (B)، POD (C) و PPO (D) در مرحله گلدهی ارقام طارم‌محلی (Tm)، متحمل FL478 (Ft) و برکت (B). نتایج حاصل، میانگین سه تکرار است و حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

بحث

اثرات محلول نانوسیلیکون بر صفات مورفولوژی مرحله گلدهی ارقام برنج: ارتفاع بوته در تمامی ارقام تیمار شده از جمله در طارم محلی نسبت به شاهد و شوری کاهش یافت. طول ریشه در طارم محلی تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در زمین شور نسبت به شاهد و در برکت نسبت به شاهد و شوری افزایش یافت ولی در متحمل FL478 در مقایسه با شاهد و شوری کاهش یافت. کاربرد نانوسیلیکون قطر طوقه ریشه را در ارقام تیمار شده با محلول نانوسیلیکون از جمله طارم محلی نسبت به شاهد و شوری زیاد کرد (نمودار ۱).

محلول نانوسیلیکون وزن خشک اندام هوایی را در طارم- محلی تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در زمین شور، نسبت به شاهد و در متحمل FL478 و برکت تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در مقایسه با شاهد و شوری افزایش داد. وزن خشک ریشه در طارم محلی و برکت تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در مقایسه با شاهد و در متحمل FL478 تیمار شده با محلول نانوسیلیکون نسبت به شاهد و شوری افزایش نشان داد (نمودار ۲).

نانوسیلیکون توسط *Larkunthod et al.* [۳۲] از پوسته برنج استخراج و اثرات آن بر فیزیولوژی برنج تحت تنش شوری بررسی شد. مشخص شد که سیلیکون و نانو-سیلیکون، باعث رشد گیاه و کاهش اثرات نامطلوب تنش می‌شوند [۳۲، ۵۳]. آن‌ها دریافتند که تمام پارامترهای رشد در گیاهان برنج تحت تنش شوری مانند طول ساقه و ریشه، بطور قابل توجهی نسبت به گروه شاهد کاهش یافت و با استفاده از نانوسیلیکون در شرایط تنش شوری، طول آن‌ها در بیشتر ارقام برنج، افزایش یافت. تنش شوری وزن خشک اندام هوایی و ریشه را در ارقام برنج کاهش داد و محلول پاشی نانوسیلیکون، سبب افزایش آن‌ها در بیشتر ارقام گردید [۳۲]. در گیاه زعفران (*Crocus sativus* L.)، اعمال شوری، فاکتورهای رشدی را کاهش و مرگ

سلولی و اسمولیت‌های سازگار را افزایش داد. نتایج نشان داد که محلول پاشی سیلیکون و نانو دی‌اکسید سیلیکون در گیاه زعفران تحت تنش شوری، توانستند با بهبود فاکتورهای رشدی، فیزیولوژیکی و نسبت K^+/Na^+ در کاهش اثرات منفی شوری در این گیاه موثر واقع شوند [۳].

تأثیر یون‌های سیلیکون و نانوسیلیکون توسط *Ismail et al.* [۲۶] بر رشد و بهره‌وری گیاهان نخود در شرایط تنش شوری بررسی شد که شوری بر پارامترهای رشد اندازه-گیری شده از جمله طول اندام هوایی و وزن خشک اندام هوایی و ریشه تأثیر منفی داشت. کاهش رشد گیاه در شرایط شوری بدلیل دسترسی محدود به آب و یا سمیت کلرید سدیم است [۴۱]. کاهش وزن خشک تحت تنش شوری، به ممانعت از تشکیل و جابجایی غذا، مهار فرآیندهای متابولیکی خاص و مهار تشکیل کلروپلاست، تولید اتیلن و اسید آسبزیک و کاهش جذب مواد مغذی نسبت داده شد [۲۰]. کاهش رشد بدلیل اثر اسمزی ناشی از شوری در تعدادی از گیاهان مانند گندم [۲۷] گزارش شده است. کاربرد خارجی سیلیکون می‌تواند رشد بیشتر گونه‌های گیاهی را تحریک کند. این افزایش در رشد گیاه در نتیجه کاربرد سیلیکون نه تنها در شرایط رشد نرمال، بلکه در شرایط تنش‌زا نیز صورت می‌گیرد [۲۶]. سیلیکون با تأثیر بر تعدادی از فرآیندها، از جمله بهبود وضعیت آب گیاه، تغییر در ساختار اندامک‌های برگ، تنظیم مثبت سیستم‌های دفاعی گیاه و کاهش اثرات یونی شوری، بر رشد گیاه در شرایط تنش، تأثیر می‌گذارد [۲۶].

در مطالعه حاضر، محلول نانوسیلیکون، منجر به کاهش ارتفاع اندام هوایی طارم محلی در شرایط تنش شوری و افزایش طول و قطر ریشه آن و نیز افزایش وزن خشک اندام هوایی و ریشه طارم محلی گردید که کاهش ارتفاع اندام هوایی با نتایج سایر محققان از جمله *Mukarram et al.* [۴۰] مغایر است ولی افزایش سایر صفات با این نتایج همخوانی دارد. این محققان گزارش دادند که تحت تنش

شوری، ارتفاع و وزن خشک گیاه بادرنجبویه کاهش یافت و نانوسیلیکون سبب افزایش این صفات بترتیب ۳۰ تا ۶۴ درصد و ۳۰ تا ۵۰ درصد گردید.

اثرات محلول نانوسیلیکون بر صفات فیزیولوژی مرحله گلدهی ارقام برنج: استفاده از محلول نانوسیلیکون میزان کلروفیل a و b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها را در طارم-محلی تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در زمین شور نسبت به شاهد و شوری و در متحمل FL478 تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در مقایسه با شاهد زیاد کرد. در برکت تیمار شده با محلول نانوسیلیکون محتوای کلروفیل a و b و کلروفیل کل نسبت به شوری و میزان کاروتنوئیدها در مقایسه با شاهد و شوری افزایش یافت (نمودار ۳).

تحریک رشد، آنابولسم و عملکرد گیاهان برنج کشت شده تحت تنش شوری با استفاده از نانوسیلیکون توسط Alharbi *et al.* [۱۱] بررسی شدند. کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی و ویژگی‌های فیزیولوژیکی تحت تنش شوری خاک عمدتاً به دلیل تنش‌های کلروپلاست است که منجر به کاهش رشد گیاه و بهره‌وری محصول می‌شود [۴۲]. نشان داده شد که نانوسیلیکون بعد از محلول‌پاشی، بسرعت توسط واکوئل‌ها جذب می‌شود و بیشتر در سیتوزول جمع می‌شود. بهمین دلیل، کاربرد نانوسیلیکون با یکپارچگی غشا، رشد گیاه را در شرایط شوری خاک افزایش می‌دهد [۲۵]. علاوه بر این، محلول‌پاشی با نانوسیلیکون، پتانسیل قابل توجهی برای افزایش بیوسنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی مانند کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها و دیگر ویژگی‌های فیزیولوژیکی، در گیاهان برنج تحت تنش شوری نشان داد [۱۲]. کاربرد نانوسیلیکون تاثیر مثبتی بر فسفریلاسیون اکسیداتیو، پلی‌مریزاسیون پروتئین و فعالیت‌های آنزیمی دارد [۱۱، ۱۲].

در این تحقیق، افزایش میزان کلروفیل a و b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها در طارم‌محلی تیمار شده با محلول نانوسیلیکون با نتایج سایر محققان مانند Mukarram *et al.*

[۴۰] مطابقت دارد که نانوسیلیکون، در گیاهان بادرنجبویه رشدیافته تحت تنش شوری، محتوای کلروفیل را تا ۵۵ درصد افزایش داد.

اثرات محلول نانوسیلیکون بر صفات بیوشیمیایی مرحله گلدهی ارقام برنج: میزان H_2O_2 در طارم‌محلی تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در زمین شور کاهش و در متحمل FL478 تیمار شده با محلول نانوسیلیکون نسبت به شاهد و شوری افزایش نشان داد و در برکت تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در مقایسه با شاهد و شوری تقریباً برابر شد. مقدار MDA در تمامی ارقام تیمار شده با محلول نانوسیلیکون از جمله طارم‌محلی در مقایسه با شاهد و شوری کاهش یافت (نمودار ۴).

در یک مطالعه، Larkunthod *et al.* [۳۲] دریافتند که تنش شوری باعث تجمع بیش از حد ROSها مانند H_2O_2 می‌شود که بطور فعال ماکرومولکول‌های ضروری از جمله لیپیدها و پروتئین‌های غشایی را اکسید می‌کنند که منجر به آسیب غشا، تخریب پروتئین، تغییر در متابولیسم و در نهایت مرگ سلولی می‌شود [۳۸]. شوری سطوح بالای از تنش را به گیاهان برنج تحمیل کرد که با افزایش دو تا سه برابری H_2O_2 در مقایسه با شاهد همراه بود و نانوسیلیکون بطور قابل توجهی میزان H_2O_2 را کاهش داد. اثرات کاهش‌دهنده نانوسیلیکون بر کاهش تولید H_2O_2 در گیاهان برنج تحت تنش شوری قبلاً توسط Abdel-Haliem *et al.* [۷] گزارش شده بود. پراکسیداسیون لیپیدی، چندین محصول جانبی از جمله MDA تولید می‌کند که بطور گسترده بعنوان شاخصی برای سطح پراکسیداسیون لیپید استفاده می‌شود. در گیاهان برنج تحت تنش شوری MDA دو تا چهار برابر افزایش یافت اما نانوسیلیکون بطور قابل توجهی محتوای MDA را کاهش نداد. نتایج مشابهی توسط Abdel-Haliem *et al.* [۷] گزارش شد که نانوسیلیکون منجر به کاهش حداقل MDA در گیاهان برنج تحت تنش شوری شد. در مقابل، Siddiqui *et al.* [۵۲]

علامت‌دهی و یک مولکول محافظت‌کننده از فعالیت آنزیم تحت شرایط تنش است [۳۲]. پرولین نقش عمده‌ای در از بین بردن رادیکال‌های آزاد تولیدشده در شرایط تنش کمبود آب دارد [۴۳]. کاربرد نانوسیلیکون با القای فعالیت پرولین باعث کاهش تولید ROS شد [۴۳].

پروتئین محلول برای القای فعالیت آنزیم روبیسکو و همچنین حفظ محتوای اسمولیت در گیاهان، در شرایط کمبود آب مهم است. کاربرد سیلیکون باعث افزایش سطح پروتئین محلول می‌شود [۲۸]. همچنین Liang *et al.* [۳۴] گزارش کردند که سیلیکون بطور مستقیم یا غیرمستقیم در پایداری غشا تحت شرایط تنش غیرزیستی نقش دارد. شرایط کمبود آب، محتوای پروتئین محلول را از طریق کاهش فعالیت آنزیم روبیسکو در گیاهان کاهش می‌دهد [۳۳]. استفاده از نانوسیلیکون باعث افزایش محتوای پروتئین محلول در شرایط تنش خشکی می‌شود. سیلیکون بطور غیرمستقیم در پایداری غشاهای لپیدی با کاهش تولید ROS و افزایش سطح پروتئین محلول در شرایط کمبود آب نقش دارد [۴۳].

در مطالعه ما، محلول نانوسیلیکون محتوای پرولین و مقدار پروتئین را در طارم محلی افزایش داد که با نتایج دیگر محققان از جمله Alam *et al.* [۱۰] مطابقت دارد که نانوسیلیکون، پیامدهای مضر شوری را در گیاهان گوجه-فرنگی کاهش داد و مقدار پرولین را تا ۲۸ درصد و غلظت پروتئین را ۴۶ تا ۶۹ درصد افزایش داد.

مقدار آنزیم‌های SOD، CAT، POD و PPO در طارم محلی تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در زمین شور در مقایسه با شاهد و شوری افزایش و در متحمل FL478 و در برکت تیمار شده با محلول نانوسیلیکون نسبت به شاهد و شوری کاهش یافتند (نمودار ۶).

اثر نانوسیلیکون بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی توسط Larkunthod *et al.* [۳۲] بررسی شد. یکی از مهم‌ترین استراتژی‌های گیاهان برای کاهش اثرات نامطلوب

دریافتند که نانوسیلیکون در گیاهچه کدو حلواپی (*Cucurbita pepo* L.) بطور موثری مقدار MDA را کاهش داد. بنابراین، اثربخشی نانوسیلیکون در اصلاح یا کاهش پارامترهای فیزیولوژیکی گیاهان تحت تنش شوری به گونه‌های گیاهی، مرحله نمو و غلظت شوری بستگی دارد و روش کاربرد و غلظت نانوسیلیکون بطور موثری باعث کاهش مقدار MDA می‌شود [۳۲].

در این تحقیق، محلول نانوسیلیکون موجب کاهش H_2O_2 و MDA در طارم محلی تیمار شده با محلول نانوسیلیکون گردید که با نتایج محققان دیگر مانند Alharbi *et al.* [۱۱] همخوانی دارد که نانوسیلیکون باعث کاهش H_2O_2 و MDA در گیاه برنج تحت تنش شوری خاک نسبت به سایر تیمارها شد.

محتوای پرولین در تمامی ارقام تیمار شده با محلول نانوسیلیکون در زمین شور نسبت به شاهد و شوری افزایش یافت. محلول نانوسیلیکون مقدار پروتئین طارم-محلی و متحمل FL478 تیمار شده با محلول نانوسیلیکون را در مقایسه با شاهد و شوری افزایش و در برکت تیمار-شده با محلول نانوسیلیکون نسبت به شوری کاهش داد. (نمودار ۵).

تأثیر نانوسیلیکون بر آنزیم‌های فیزیو-بیوشیمیایی و آنتی-اکسیدانی برنج در شرایط خشکی توسط Raja *et al.* [۴۳] بررسی شد که در برنج‌های تحت تنش خشکی، تیمار با نانوسیلیکون سبب افزایش پرولین و پروتئین‌های محلول گردید.

طی یک پژوهش، Larkunthod *et al.* [۳۲] دریافتند که میزان پرولین در گیاهان برنج تحت تنش شوری، ۱۲ تا ۱۶ برابر گیاهان شاهد گردید. در پاسخ به تنش شوری، گیاهان غلظت‌های بالایی از پرولین را سنتز و انباشته می‌کنند که بعنوان یک اسمولیت عالی در تنظیم اسمزی و حفظ وضعیت آب گیاه عمل می‌کند. پرولین همچنین بعنوان یک مولکول آنتی‌اکسیدانی، یک کلاتور فلزی، یک مولکول

در این پژوهش، محلول نانوسیلیکون مقدار SOD، CAT، POD و PPO را در طارم‌محللی زیاد کرد که توسط نتایج سایر محققان مانند Mukarram *et al.* [۴۰] تایید شد که نانوسیلیکون فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی SOD، CAT و POD را برای محدود کردن تجمع ROS و آسیب‌های مرتبط در گیاهان بادرنجبویه رشدیافته تحت تنش شوری، افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش نشان داد که محلول نانوسیلیکون باعث کاهش ارتفاع بوته برنج طارم‌محللی و افزایش طول و قطر طوقه ریشه، وزن‌های خشک اندام هوایی و ریشه و نیز افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a و b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها) طارم‌محللی رشدیافته در زمین‌شور، نسبت به سایر ارقام، گردید. از طرفی محلول نانوسیلیکون موجب افزایش مقدار پروتئین شد که سبب تجمع پرولین و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی SOD، CAT، POD و PPO گردید و با کاهش ROSها از جمله H₂O₂ و کاهش مقدار MDA، آثار منفی شوری را بر برنج طارم-محللی کاهش داده و باعث افزایش مقاومت به شوری در گیاه برنج گردد. این نتایج حاکی از آن است که محلول نانوسیلیکون با کاهش ارتفاع و قوی‌کردن گیاه در برابر تنش شوری و صرفه‌جویی در مصرف انرژی گیاه، سبب افزایش استحکام برنج طارم‌محللی گردید تا برداشت آن آسان شود.

سپاسگزاری

نگارندگان از کارکنان موسسه تحقیقات برنج کشور در استان مازندران (آمل) و شرکت پدیده شمس ایرانیان، به خاطر همکاری با اجرای این طرح، سپاسگزاری می‌کنند.

تنش شوری، توسعه سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی آنزیمی برای از بین بردن ROS است [۳۸]. نانوسیلیکون الگوهای متفاوتی از پاسخ‌ها را در رابطه با فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در ارقام مختلف برنج تحت تنش شوری نشان داد. در برنج، محتوای کمتر H₂O₂ در گیاهان تحت تنش شوری تیمار شده با نانوسیلیکون در مقایسه با گیاهانی که فقط تحت تنش شوری بودند، بدلیل فعالیت بالای CAT و POD بود. همچنین Kim *et al.* [۳۱] گزارش کردند که گیاهان تیمار شده با سیلیکون از طریق کاهش تولید ROS با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (بویژه CAT) H₂O₂ را به H₂O تبدیل کردند، مقاومت بیشتری در برابر تنش غیرزیستی نشان دادند و در نتیجه MDA و آسیب‌های اکسیداتیو را کاهش دادند [۳۲]. در گیاه جو دوسر (*Avena sativa* L.) فعالیت آنزیم SOD در حضور نانوسیلیکون افزایش یافت [۴].

در یک پژوهش توسط Yan *et al.* [۵۵] سیلیکون با کاهش سمیت یونی و محدودیت اسمزی، سبب بهبود مقاومت در برابر شوری برنج گردید که کاربرد سیلیکون فعالیت آنزیم PPO را در اندام هوایی و ریشه تحت تنش شوری، بطور قابل توجهی افزایش داد. سیلیکون در کاهش آسیب‌های اکسیداتیو از طریق تنظیم آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی مانند PPO در شرایط شوری موثر بود. سیلیکون خارجی می‌تواند آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را بطور مشخص در پاسخ به اجزای یونی و اسمزی تعدیل کند. اثر سودمند سیلیکون بر روی آسیب‌های اکسیداتیو به سم‌زدایی یونی و حفظ وضعیت آب در ساقه و ریشه کمک می‌کند. در ریشه، تثبیت غشایی ناشی از سیلیکون می‌تواند جذب آب را تقویت کرده و انتقال Na⁺ را تنظیم کند. با این حال، در اندام هوایی برنج، سیلیکون می‌تواند فتوسنتز و متابولیسم را برای بهبود رشد گیاه با تنظیم آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو حفظ کند [۵۵].

منابع

۱. اله قلیپور م، حسینی چالشری م، اقلیدی ا، صیادی م، صیادی م (۱۴۰۱). خصوصیات مهم برخی از ارقام محلی، اصلاح‌شده و خارجی برنج. انتشارات نارون دانش.
۲. صداقت ن، بیابانی ع، نصیری م، فلاح ا، فتحی ن (۱۴۰۱). اثر روش‌های آبیاری و محلول‌پاشی عناصر غذایی بر عملکرد، اجزای عملکرد و صفات کیفی برنج. مجله به‌زراعی کشاورزی. انتشارات دانشگاه تهران، ۲۴(۴): ۱۰۵۱-۱۰۶۷. DOI: [10.22059/jci.2022.326144.2572](https://doi.org/10.22059/jci.2022.326144.2572)
۳. عاصمه م، پوراکیب ل (۱۴۰۱). تاثیر سیلیکون و نانو دی‌اکسید سیلیکون بر فاکتورهای رشدی، میزان اسمولیت‌ها و محتوای یونی گیاه زعفران (*Crocus Sativus L.*) تحت تنش شوری. مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)، ۳۵(۱): ۳۱-۴۱. DOR: 20.1001.1.23832592. [1401.35.1.1.5](https://doi.org/10.22034/JPR.2024.2353)
۴. عسگری ف، مجد ا، جنوبی پ، نجفی ف (۱۳۹۹). اثر کوتاه مدت ذرات نانوسیلیکون بر برخی ویژگی‌های بافت شناختی و فیزیولوژیکی گیاه جودوسر (*Avean sativa L.*) و مقایسه آن با اثر سیلیکات سدیم. مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)، ۳۳(۲): ۴۱۸-۴۳۱.
۵. کیانی غ (۱۴۰۰). اصلاح و تولید برنج رقم برکت. پنجمین کنگره بین‌المللی توسعه کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست و گردشگری ایران. <https://civilica.com/doc/1275708>
۶. نصیری م، خسروی و، عمواقلی طبری م، محمدیان م، رستمی م، عمرانی م (۱۴۰۰). مدیریت فنی تولید محصول برنج. موسسه تحقیقات برنج کشور (معاونت مازندران). نشریه ۶۰.
7. Abdel-Haliem ME, Hegazy HS, Hassan NS, Naguib DM (2017). Effect of silica ions and nano silica on rice plants under salinity stress. *Ecological Engineering*, 99: 282-289. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2016.11.060](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.060)
8. Aebi H (1974). Catalase. In: Bergmeyer, H.U., Ed., *Methods of Enzymatic Analysis*, Verlag Chemie/Academic Press Inc., Weinheim/NewYork, 673-680. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-091302-2.50032-3>
9. Ahanger MA, Tomar NS, Tittal M, Argal S, Agarwal R (2017). Plant growth under water/salt stress: ROS production; antioxidants and significance of added potassium under such conditions. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 23: 731-744. doi: [10.1007/s12298-017-0462-7](https://doi.org/10.1007/s12298-017-0462-7)
10. Alam P, Arshad M, Al-Kheraif AA, Azzam MA, Al Balawi T (2022). Silicon nanoparticle-induced regulation of carbohydrate metabolism, photosynthesis, and ROS homeostasis in *Solanum lycopersicum* subjected to salinity stress. *ACS omega*, 7(36): 31834-31844. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02586>
11. Alharbi K, Osman HS, Rashwan E, Hafez EM, Omara AED (2022). Stimulating the growth, anabolism, antioxidants, and yield of rice plants grown under salt stress by combined application of bacterial inoculants and nano-silicon. *Plants*, 11(24): 3431. <https://doi.org/10.3390/plants11243431>
12. Alharbi K, Rashwan E, Mohamed HH, Awadalla A, Omara AED, Hafez EM, Alshaal T (2022). Application of silica nanoparticles in combination with two bacterial strains improves the growth, antioxidant capacity and production of barley irrigated with saline water in salt-affected soil. *Plants*, 11(15): 2026. <https://doi.org/10.3390/plants11152026>
13. Almeida SLD, Morais MADS, Albuquerque JRTD, Barros Júnior AP, Simões A, Nascimento D, Fonseca KS (2019). Polyphenol oxidase and peroxidase enzyme assays in sweet potato cultivars harvested at different times. *Revista Caatinga*, 32(2): 537-542. DOI: [10.1590/1983-21252019v32n226rc](https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n226rc)
14. Araj S, Grammer TA, Gertzen R, Anderson SD, Mikulic-Petkovsek M, Veberic R, Phu ML, Solar A, Leslie CA, Dandekar AM, Escobar MA (2014). Novel roles for the polyphenol oxidase enzyme in secondary metabolism and the regulation of cell death in walnut. *Plant physiology*, 164(3): 1191-1203. doi: [10.1104/pp.113.228593](https://doi.org/10.1104/pp.113.228593)
15. Bates LE, Waldern RP, Teare ID (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39: 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
16. Bradford MM (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical*

- biochemistry, 72(1-2): 248-254. doi: [10.1006/abio.1976.9999](https://doi.org/10.1006/abio.1976.9999)
17. Cheng G, Chang TH, Qin Q, Huang H, Zhu Y (2014). Mechanical properties of silicon carbide nanowires: effect of size-dependent defect density. *Nano letters*, 14(2): 754-758. <https://doi.org/10.1021/nl404058r>
 18. Cotsaftis O, Plett D, Johnson AA, Walia H, Wilson C, Ismail AM, Close TJ, Tester M, Baumann U (2011). Root-specific transcript profiling of contrasting rice genotypes in response to salinity stress. *Molecular Plant*, 4(1): 25-41. doi: [10.1093/mp/ssq056](https://doi.org/10.1093/mp/ssq056)
 19. Fatikhasari Z, Rachmawati D (2020). Growth and oxidative defense response to silicon application on rice (*Oryza sativa* L. 'Sembada Merah') under salinity stress. In AIP Conference Proceedings, 2260(1): 030021. AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0015863>
 20. Ghassemi-Golezani K, Nikpour-Rashidabad N, Zehtab-Salmasi S (2012). Physiological performance of pinto bean cultivars under salinity. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, 2: 223-228.
 21. Giannopolitis CN, Ries SK (1977). Superoxide dismutases: II. Purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings. *Plant physiology*, 59(2): 315-318. doi: [10.1104/pp.59.2.315](https://doi.org/10.1104/pp.59.2.315)
 22. Hafez EM, Osman HS, Gawayed SM, Okasha SA, Omara AED, Sami R, Abd El-Monem AM, Abd El-Razek UA (2021). Minimizing the adversely impacts of water deficit and soil salinity on maize growth and productivity in response to the application of plant growth-promoting rhizobacteria and silica nanoparticles. *Agronomy*, 11(4): 676. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040676>
 23. Heat RL, Packer L (1968) Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125:189-198. doi: [10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)
 24. Hiscox JD, Israelstam GF (1979). A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian journal of botany*, 57(12): 1332-1334. <https://doi.org/10.1139/b79-163>
 25. Ibrahim MA, Merwad ARM, Elnaka EA (2018). Rice (*Oryza Sativa* L.) tolerance to drought can be improved by silicon application. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(8): 945-957. <http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2018.1448856>
 26. Ismail LM, Soliman MI, Abd El-Aziz MH, Abdel-Aziz HM (2022). Impact of silica ions and nano silica on growth and productivity of pea plants under salinity stress. *Plants*, 11(4): 494. doi: [10.3390/plants11040494](https://doi.org/10.3390/plants11040494)
 27. Kanwal H, Ashraf M, Hameed M (2013). Water relations and ionic composition in the seedlings of some newly developed and candidate cultivars of wheat (*Triticum aestivum* L.) under saline conditions. *Pakistan Journal of Botany*, 45(4): 1221-1227. <http://142.54.178.187:9060/xmlui/handle/123456789/15878>
 28. Karunakaran G, Suriyaprabha R, Manivasakan P, Yuvakkumar R, Rajendran V, Prabu P, Kannan N (2013). Effect of nanosilica and silicon sources on plant growth promoting rhizobacteria, soil nutrients and maize seed germination. *IET nanobiotechnology*, 7(3): 70-77. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2012.0048>
 29. Khan A, Khan AL, Muneer S, Kim YH, Al-Rawahi A, Al-Harrasi A (2019). Silicon and salinity: Crosstalk in crop-mediated stress tolerance mechanisms. *Frontiers in plant science*, 10: 1429. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01429>
 30. Kielkopf CL, Bauer W, Urbatsch IL (2020). Bradford assay for determining protein concentration. *Cold Spring Harbor Protocols*, 2020(4): pdb-prot102269. doi: [10.1101/pdb.prot102269](https://doi.org/10.1101/pdb.prot102269)
 31. Kim YH, Khan AL, Waqas M, Lee IJ (2017). Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. *Frontiers in Plant Science*, 8: 510. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00510>
 32. Larkunthod P, Boonlakhorn J, Pansarakham P, Pongdontri P, Thongbai P, Theerakulpisut P (2022). Synthesis and characterization of silica nanoparticles from rice husk and their effects on physiology of rice under salt stress. *Chilean journal of agricultural research*, 82(3): 412-425. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392022000300412>
 33. Li D, Li C, Sun H, Wang W, Liu L, Zhang Y (2010). Effects of drought on soluble protein content and protective enzyme system in cotton leaves. *Frontiers of Agriculture in China*, 4: 56-62. DOI:[10.1007/s11703-010-0102-2](https://doi.org/10.1007/s11703-010-0102-2)

34. Liang Y, Chen QIN, Liu Q, Zhang W, Ding R (2003). Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of plant physiology*, 160(10): 1157-1164. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-01065>
35. Lichtenthaler FW, Immel S (1994). Cyclodextrins, cyclomannins, and cycloalactins with five and six (1→4)-linked sugar units: A comparative assessment of their conformations and hydrophobicity potential profiles 1. *Tetrahedron: Asymmetry*, 5: 2045-2060. [https://doi.org/10.1016/S0957-4166\(00\)86283-7](https://doi.org/10.1016/S0957-4166(00)86283-7)
36. Lou W, Wu L, Chen H, Ji Z, Sun Y (2012). Assessment of rice yield loss due to torrential rain: a case study of Yuhang County, Zhejiang Province, China. *Natural Hazards*, 60(2): 311-320. DOI: [10.1007/s11069-011-0013-4](https://doi.org/10.1007/s11069-011-0013-4)
37. Maehly A, Chance B (1954). The assay of Catalases and peroxidases. *Methods Biochemical Analysis*, 1: 357-424. DOI: [10.1002/9780470110171.ch14](https://doi.org/10.1002/9780470110171.ch14)
38. Miller GAD, Suzuki N, Ciftci-Yilmaz SULTAN, Mittler RON (2010). Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. *Plant, cell & environment*, 33(4): 453-467. doi: [10.1111/j.1365-3040.2009.02041.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02041.x)
39. Monica R C, Cremonini R (2009). Nanoparticles and higher plants. *Caryologia*, 62(2): 161-165. <https://doi.org/10.1080/00087114.2004.10589681>
40. Mukarram M, Khan MMA, Kurjak D, Lux A, Corpas FJ (2023). Silicon nanoparticles (SiNPs) restore photosynthesis and essential oil content by upgrading enzymatic antioxidant metabolism in lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*) under salt stress. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1116769. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1116769>
41. Munns R, Tester M (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59: 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.0326.07.092911>
42. Osman HS, Rady AM, Awadalla A, Omara AED, Hafez EM (2022). Improving the antioxidants system, growth, and sugar beet quality subjected to long-term osmotic stress by phosphate solubilizing bacteria and compost tea. *International Journal of Plant Production*, 1-17. DOI:[10.1007/s42106-021-00176-y](https://doi.org/10.1007/s42106-021-00176-y)
43. Raja RK, Surendar KK, Ravichandran V, Kannan M, Pushpam R (2021). Influence of Nanosilica on Physio-biochemical and antioxidative enzymes in rice under drought. *The Pharma Innovation Journal*, 10(11): 1318-1323.
44. Rastogi A, Tripathi DK, Yadav S, Chauhan DK, Živčák M, Ghorbanpour M, El-Sheery NI, Brestic M (2019). Application of silicon nanoparticles in agriculture. *Biotech*, 9(3): 90. doi: [10.1007/s13205-019-1626-7](https://doi.org/10.1007/s13205-019-1626-7)
45. Raymond J, Rakariyatham N, Azanza JL (1993) Purification and some properties of polyphenol oxidase from sunflower seeds. *Phytochemistry*, 34: 927-931. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)90689-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)90689-7)
46. Razzaq A, Ali A, Safdar LB, Zafar MM, Rui Y, Shakeel A, Shaukat A, Ashraf M, Gong W, Yuan Y (2020). Salt stress induces physiochemical alterations in rice grain composition and quality. *Journal of food science*, 85(1): 14-20. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14983>
47. Rehman S, Abbas G, Shahid M, Saqib M, Farooq ABU, Hussain M, Murtaza B, Amjad M, Naeem MA, Farooq A (2019). Effect of salinity on cadmium tolerance, ionic homeostasis and oxidative stress responses in conocarpus exposed to cadmium stress: Implications for phytoremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 171: 146-153. doi: [10.1016/j.ecoenv.2018.12.077](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.077)
48. Rizwan M, Ali S, Ibrahim M, Farid M, Adrees M, Bharwana SA, Zia-ur-Rehman M, Qayyum MF, Abbas F (2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22: 15416-15431. doi: [10.1007/s11356-015-5305-x](https://doi.org/10.1007/s11356-015-5305-x)
49. Saad-Allah KM, Ragab GA (2020). Sulfur nanoparticles mediated improvement of salt tolerance in wheat relates to decreasing oxidative stress and regulating metabolic activity. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26(11): 2209-2223. doi: [10.1007/s12298-020-00899-8](https://doi.org/10.1007/s12298-020-00899-8)
50. Salim BBM, Abou El-Yazied A, Salama YAM, Raza A, Osman HS (2021). Impact of silicon foliar application in enhancing antioxidants, growth, flowering and yield of squash plants under deficit irrigation condition. *Annals of*

- Agricultural Sciences, 66(2): 176-183. <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2021.12.003>
51. Sarkar A, Ghosh PK, Pramanik K, Mitra S, Soren T, Pandey S, Mondal MH, Maiti TK (2018). A halotolerant *Enterobacter* sp. displaying ACC deaminase activity promotes rice seedling growth under salt stress. *Research in microbiology*, 169(1): 20-32. doi: [10.1016/j.resmic.2017.08.005](https://doi.org/10.1016/j.resmic.2017.08.005)
52. Siddiqui MH, Al-Wahaibi MH, Faisal M, Al Sahli AA (2014). Nano-silicon dioxide mitigates the adverse effects of salt stress on *Cucurbita pepo* L. *Environmental toxicology and chemistry*, 33(11): 2429-2437. doi: [10.1002/etc.2697](https://doi.org/10.1002/etc.2697)
53. Siddiqui H, Ahmed KBM, Sami F, Hayat S (2020). Silicon nanoparticles and plants: Current knowledge and future perspectives. *Sustainable Agriculture Reviews* 41: Nanotechnology for Plant Growth and Development, 129-142. DOI: [10.1007/978-3-030-33996-8_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33996-8_7)
54. Velikova V, Yordanov I, Edreva A (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines. *Plant science*, 151(1): 59-66. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(99\)00197-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00197-1)
55. Yan G, Fan X, Peng M, Yin C, Xiao Z, Liang Y (2020). Silicon improves rice salinity resistance by alleviating ionic toxicity and osmotic constraint in an organ-specific pattern. *Frontiers in plant science*, 11: 260. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00260>
56. Zaman M, Shahid SA, Heng L, Shahid SA, Zaman M, Heng L (2018). Soil salinity: Historical perspectives and a world overview of the problem. *Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques*, 43-53. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3>

The effect of nanosilicon spraying on the morphological and biochemical characteristics of rice cultivars (*Oryza sativa* L.) at the flowering stage in saline soil

Esmaily Kenary S.¹, Hosseinzadeh Namin M.^{1*}, Kiarostami Kh.¹ and Fallah A.²

¹ Dept. of biology, Faculty of Biological Sciences, Alzahra University, Tehran, I.R. of Iran

² Research assistant professor, The Rice research institute of Iran, Mazandaran Branch, Agricultural research, Education and Extension Organization (AREEO), Amol, I.R. of Iran

Abstract

Rice (*Oryza sativa* L.) is important staple food of Asia. The present study was designed to investigate the effect of nanosilicon solution (6 g L⁻¹) on salinity tolerance of three varieties of Tarommahalli, Tolerant FL478 and Barekat rice in saline paddy (EC=5-8) at flowering stage in order to study their morphological and biochemical traits. The experiment was conducted in 2020 and 2021 in the form of factorial design on a completely random basis with three replications in Mazandaran province in Iran. The results showed that nanosilicon solution caused height of plant to be decreased (138.83 cm) and increased diameter of the root crown (10.17 cm) of the Tarommahalli grown in saline paddy compared to other varieties, compared to control (Tarommahalli grown in non-saline paddy) and to salinity (Tarommahalli grown in saline paddy). The dry weight of shoot and root (88.04 and 7.075 g respectively) were increased compared to the control (P≤0.05). In treated Tarommahalli, the amount of proline (0.584 mg g⁻¹ (FW)) and SOD, CAT, POD, and PPO (0.536 % ml⁻¹ mg⁻¹ g (FW), 1.184, 18.06 and 388.18 μmol min⁻¹ mg⁻¹ protein respectively) significantly increased but the amount of H₂O₂ (0.160 μmol g⁻¹ (FW)) and MDA (0.004 μmol g⁻¹ (FW)) significantly decreased. The results showed that the application of nanosilicon solution effected on height of plant to be reduced and also increased strengthen of Tarommahalli rice against salinity which was facilitated rice harvesting.

Key words: Antioxidant enzymes, H₂O₂, MDA, *Oryza*, Proline