ژنتیک نوین
دوره بیستم، شماره۲، تابستان ۱٤۰٤
صفحه ۱٤۸ - ۱۳۷

ارزیابی اثر نانوذره دی اکسید سیلیسیوم (SiO_2-NP) بر الگوی بیانی ژن‌های دساچوراز اسیدهای چرب و برخی خصوصیات مورفو فیزیولوژیکی گیاه خرفه (*Portulaca oleracea*)

Evaluation of the effect of silicon dioxide nanoparticle (SiO_2-NP) on the expression pattern of fatty acid desaturase genes and some morphophysiological characteristics in purslane plant (*Portulaca oleracea*)

انیس دارم[۱]، هنگامه طاهری*[۲]، محمد گلباشی[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد بیوتکنولوژی کشاورزی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران

۲- به‌ترتیب دانشیار، استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران

Darem A[1], Taheri H*[2], Golbashy M[2]

1- MSc Student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

2- Associate Professor, Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

*نویسنده مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: taheri@asnrukh.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱٤۰٤/۰٤/۱۸ - تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۱۱/۱۱)

چکیده

سیلیسیوم (Si) به‌عنوان یک عنصر شبه ضروری، نقش مهمی در تقویت رشد و نمو گیاه دارد. به‌کارگیری ابزارهای نوآورانه جهت تولید انواع نانوکودها، یکی از راهکارهای مؤثر جهت افزایش تولیدات کشاورزی برای تأمین نیازهای آینده جمعیت رو به رشد می‌باشد. با این حال اطلاعات کمی در خصوص اثرات نانوذره Si در تنظیم متابولیسم و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی در دسترس است. از آن‌جا که دساچورازهای اسیدچرب (FAD) نقش کلیدی در بیوسنتز اسیدهای چرب غیراشباع و تقویت ارزش تغذیه‌ای گیاهان دارند، در این مطالعه اثرات کاربرد غلظت‌های مختلف (۱۰ تا ٤۰ پی‌پی‌ام) نانوذره دی اکسید سیلیسیوم (SiO_2-NP) بر تغییرات الگوی بیانی دساچوراز امگا ٦ (*FAD2*) و دساچوراز امگا ۳ (*FAD8*) در گیاه خرفه (*Portulaca oleracea*) به‌عنوان منبع غنی اسیدهای چرب اشباع نشده چندگانه (PUFA) مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین اثر غلظت‌های مختلف نانوذره SiO_2 بر پارامترهای رشدی، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و فعالیت ترکیبات آنتی اکسیدانی آنزیمی نظیر کاتالاز و پراکسیدازمورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد میزان رونویسی ژن‌های دساچوراز تحت تیمار غلظت‌های مختلف این نانوذره تغییر یافت. به‌خصوص میزان بیان ژن *FAD2* که در تمامی غلظت‌های اعمال شده نانوذره، افزایش معنی‌داری را نسبت به گیاهان شاهد نشان داد و در غلظت ۳۰ پی‌پی‌ام SiO_2 به بیشینه مقدار خود رسید. تغییرات میزان پارامترهای رشدی و محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی نیز در پاسخ به غلظت‌های متفاوت نانوذره SiO_2 نسبت به گیاهان شاهد مثبت گزارش شد. میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز نیز با افزایش غلظت نانوذره افزایش یافت و در غلظت ٤۰ پی‌پی‌ام SiO_2 به بیشینه مقدار خود رسید. این یافته‌ها نشان می‌دهد که نانوذره SiO_2 با تقویت بیان ژن‌های دساچوراز اسیدهای چرب می‌تواند بر متابولیسم لیپیدها تأثیر بگذارد و در نتیجه سبب افزایش میزان اسیدهای چرب اشباع نشده چندگانه و بهبود ارزش تغذیه‌ای و آنتی‌اکسیدانی گیاه خرفه شود. همچنین نانوذره SiO_2 با تأثیر بر فرآیندهای متابولیکی گیاه، باعث تقویت شاخص‌های رشدی و افزایش توان ظرفیت فتوسنتزی گیاه می‌شود و می‌تواند نقش کلیدی در افزایش تاب آوری گیاه نسبت به تنش‌های محیطی گیاه داشته باشد.

واژه‌های کلیدی

اسیدهای چرب غیراشباع
بیان ژن
ظرفیت آنتی‌اکسیدانی
نانوتکنولوژی
qRT-PCR

[Downloaded from mail.mg.genetics.ir on 2026-11-19]

مقدمه

در سال‌های اخیر اهمیت گیاهان در طب سنتی رو به افزایش است و افراد بیشتری در زندگی روزمره خود از داروهای گیاهی استفاده می‌کنند. خرفه (*Portulaca oleracea*) گیاهی دارویی با پراکندگی جهانی است (Zhou et al. 2015) و دارای سابقه طولانی استفاده برای غذای انسان، خوراک دام و اهداف دارویی بوده است. این گیاه که ابتدا از هند و ایران منشاء گرفته و سپس در سراسر جهان پراکنده شده است، گیاهی است یک ساله از خانواده Portulacaceae (Simopoulos et al. 1995; Ezekwe et al. 1999; Uddin et al. 2014) که علی‌رغم تنوع ژنتیکی، یکی از فراوان‌ترین منابع گیاهی اسیدهای چرب غیر اشباع چندگانه[1] (PUFA) نظیر امگا ٦ (لینولئیک اسید، $18:2^{\Delta 9,12}$) و امگا ٣ (آلفا لینولنیک اسید، $18:3^{\Delta 9, 12, 15}$) می‌باشد (Okafor et al. 2014). اسید لینولئیک و آلفالینونیک اسید به‌عنوان ترکیبات دارویی و غذایی ضروری در بافت‌های گیاهی می‌باشند که با اضافه شدن پیوندهای غیراشباع توسط آنزیم‌های غیراشباع‌کننده (دساچوراز‌ها) از اسید اولئیک منشاء می‌گیرند (Shanklin and Cahoon 1998; Napier et al. 1999). این اسیدهای چرب نمی‌توانند توسط بدن سنتز شوند و باید از طریق رژیم غذایی تأمین شوند، از این رو علاوه بر نقش مهم فیزیولوژیکی خود، برای سلامت و تغذیه انسان نیز ضروری می‌باشند. از آن‌جا که سطح غیراشباع‌سازی اسیدهای چرب، ارزش اقتصادی روغن را تعیین می‌کند، لذا اشباع زدایی از اسیدهای چرب به‌عنوان یک جنبه مهم در بیوشیمی روغن‌ها مطرح است (Knutzon et al. 1992; Mikkilineni and Rocheford 2003). در طی بیوسنتز لیپید، تشکیل اولین پیوند دوگانه در اسید استئاریک ($18:0$) برای تولید اسید اولئیک تک غیراشباع ($18:1^{\Delta 9}$) توسط دساچوراز Δ٩ استئاروئیل ACP پلاستیدی[2] کاتالیز می‌شود. متعاقباً، اسید اولئیک توسط دساچوراز‌های امگا ٦ (Δ١٢)، غیراشباع شده و تبدیل به اسید لینولئیک می‌شود. در آرابیدوپسیس دو ژن *FAD2* و *FAD6* به ترتیب دساچوراز‌های امگا ٦ (Δ١٢) میکروزومی (شبکه اندوپلاسمی) و پلاستیدی را کدگذاری می‌کنند (Falcone et al. 1994; Okuley et al. 1994). سنتز اسید لینولنیک به کمک دساچوراز‌های اسید چرب امگا ٣ با وارد کردن پیوند دوگانه سوم در پیش‌سازهای اسید لینولئیک کاتالیز می‌شود. سه دساچوراز متمایز تعیین خصوصیت شده‌اند که می‌توانند پیوند دوگانه سوم را در موقعیت Δ١٥ وارد کنند؛ بدین ترتیب که دو آنزیم دساچوراز امگا ٣ پلاستیدی که توسط ژن‌های *FAD7* و *FAD8* کدگذاری شده‌اند و یک دساچوراز اولئات خارج پلاستیدی که توسط ژن *FAD3* کدگذاری شده است، مسئول واردسازی پیوند دوگانه سوم در جایگاه ذکر شده هستند (Ohlrogge and Browse 1995).

اسیدهای چرب غیراشباع از اجزای ضروری مورد نیاز برای عملکرد طبیعی سلولی هستند و علاوه بر تأثیر بر سیالیت غشاء، می‌توانند عملکردهای متعددی را در گیاه به‌عنوان مولکول‌های پیام‌رسان داشته باشند (Los and Murata 1998; Mikami and Murata 2003; Zheng et al. 2005). اسیدهای ترینوئیک[3] همچنین به‌عنوان پیش‌ساز برای سنتز چندین ملکول پیام‌رسان مشتق از اسید چرب نظیر اسید تروماتیک[4] و اسید جاسمونیک عمل می‌کنند (Farmer 1994; Leon et al. 2001). افزایش اطلاعات در خصوص فرآیندهای غیراشباع‌سازی اسیدهای چرب و تنظیم آن‌ها نقش مهمی در توسعه سازوکارهای مؤثر جهت مدیریت تنش‌های زنده و غیرزنده دارد (Upchurch 2008). دساچوراز‌های اسیدهای چربی[5] (FAD) نظیر دساچوراز‌های اولئیک و لینولئیک، عملکردهای متعددی در گیاهان دارند. FADها با اثرگذاری بر درجه غیراشباع لیپیدهای غشاء می‌توانند سیالیت غشاء را برای پاسخ به تغییرات دما تنظیم کنند؛ به‌گونه‌ای که میزان آلفالینولنیک اسید و لینولئیک اسید در بافت دانه و برگ سویا و گندم به موازات کاهش دما بتدریج افزایش یافت (Heppard et al. 1996; Horiguchi et al. 2000).

امروزه استفاده از نانوذرات به‌عنوان یک راه‌حل جایگزین می‌تواند نقش عمده‌ای در کاهش استفاده از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها داشته باشد. از آن‌جا که نانوذرات، کشش سطحی بالایی دارند، پوشش‌دهی کودها و آفت‌کش‌ها با این ترکیبات،

[1] Polyunsaturated fatty acids (PUFA)
[2] Plastidial stearoyl-ACP Δ9 desaturase
[3] Trienoic acids
[4] Traumatic acid
[5] Fatty acid desaturases

[Downloaded from mail.mg.genetics.ir on 2026-11-19]

منجر به انتشار آهسته و کنترل شده چنین مواد شیمیایی می‌شوند و فراهمی زیستی یا مدت زمان مؤثر فعالیت مواد شیمیایی را طولانی‌تر می‌کنند (Liu and Lal 2015). همچنین نانوذرات به‌دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد نظیر جذب سریع و همچنین اثرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی می‌توانند به‌عنوان محرک‌های زیستی، نقش مهمی در بهبود کیفیت محصول، تقویت جوانه‌زنی بذر، افزایش رشد گیاه و بهبود خواص فیزیوشیمیایی خاک داشته باشند (Juárez-Maldonado et al. 2019; Romanovski et al. 2023). در میان نانوذرات مختلف، نانوذرات سیلیسیوم (Si-NP) به‌دلیل خواص شیمیایی و فیزیکی منحصربه‌فردشان از سایر نانوذرات متمایز هستند و به‌واسطه اهمیتی که در کاهش تنش‌های زیستی و غیرزیستی دارند، دارای پتانسیل گسترده‌ای در بخش کشاورزی هستند (Weisany et al. 2024). سیلیکون در ابتدا به‌عنوان یک عنصر غیرضروری برای رشد گیاه در نظر گرفته شده بود (Arnon and Stout 1939)، با این حال در سال‌های اخیر مطالعات متعدد، اثرات مفید آن بر محصولات مختلف را تأیید کرد و با توجه به عملکرد آن در تقویت رشد گیاه، به‌ویژه در شرایط تنش، امروزه به عنوان یک عنصر شبه ضروری معرفی شده است (Liang et al. 2015). یافته‌های اخیر نشان می‌دهد نانوذره دی اکسید سیلیسیوم (SiO_2) می‌توانند با سرعت بیشتری وارد بافت‌های گیاهی شوند و با پیوند محکمی که با غشاهای بیولوژیکی برقرار می‌کنند، یک لایه محافظ پایدارتر تشکیل دهند که به افزایش بیشتر تحمل گیاه در برابر تنش کمک می‌کنند و با تنظیم تعادل هورمونی، افزایش جذب و امکان استفاده از مواد مغذی، تاب‌آوری گیاه را نسبت به تنش افزایش می‌دهند (Alharbi et al. 2022; Larkunthod et al. 2022). همچنین اثربخشی این ترکیبات به‌دلیل بهبود فتوسنتز، انباشت ترکیبات محافظ اسمزی، تقویت دیواره سلولی گیاه و جلوگیری از نفوذ هیف‌های قارچ، کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء و در عین حال افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه، راه را برای افزایش عملکرد محصولات از طریق کاربرد SiNP هموار کرده است (Weisany et al. 2024). با این حال اطلاعات اندکی از نقش این ترکیبات در تغییر متابولیسم گیاه خرفه و اهمیت آن در تغییر الگوی بیانی ژن‌های غیراشباع کننده و ارتقای کیفی اسیدهای چرب خرفه به‌عنوان منبع غنی از اسیدهای چرب غیراشباع در دست است. از این رو در مطالعه اخیر، تغییرات بیانی ژن‌های غیراشباع کننده اسید چرب دساچورزا امگا ٦ در مسیر بیوسنتز اسید لینولئیک (*FAD2*) و دساچورزا امگا ۳ در مسیر بیونستزی اسید لینولنیک (*FAD8*) در پاسخ به کاربرد غلظت‌های متفاوت نانوذره دی اکسید سیلیسیوم با استفاده از تکنیک qRT-PCR مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این راستا اثر غلظت‌های مختلف این نانوذره بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیک و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه خرفه مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان نقش این ترکیبات در بهبود خواص کیفی و عملکرد گیاه را مورد ارزیابی قرار داد.

مواد و روش‌ها

کشت بذور و اعمال تیمار

بذور خرفه قبل از کشت با اتانول ۷۰٪ به مدت ۳-۲ دقیقه استریل و سپس با آب مقطر شستشو داده شد و جهت کشت به‌صورت به صورت نشاء در سینی کشت قرار داده شدند. سپس گیاهچه‌ها در مرحله چهاربرگی به گلدان انتقال داده شدند. هر گلدان به‌عنوان یک واحد آزمایشی درنظر گرفته شد و با خاک استریل پر شد. ۱۰ نشاء سالم در هر گلدان پلاستیکی با قطر دهانه ۱۰ سانتی‌متر در ۳ تکرار بیولوژیکی کشت شدند. سپس گلدان‌ها در شرایط ١٦ ساعت روشنایی، ۸ ساعت تاریکی، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در روز و در شب در دمای ۱۸ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. جهت اعمال تیمار از نانوذره SiO_2 که از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان (ایران) خریداری شده بود، در اندازه ۱۱-۱۳ نانومتر استفاده شد. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار انجام شد. یک هفته پس از انتقال گیاهچه‌ها به گلدان، گیاهچه‌ها با محلول آب مقطر حاوی نانوذره SiO_2 در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ و ٤٠ پی‌پی‌ام به مدت ٤ هفته، آبیاری شدند. در زمان اعمال تیمار حدود ۵۰ میلی‌لیتر از محلول حاوی نانوذره به هر گلدان اضافه شد و گلدان‌های شاهد به همان میزان، آب دریافت کردند. پس از پایان دوره آبیاری، نمونه‌برداری از بافت برگ انجام شد. نمونه‌ها پس از پیچیده شدن در فویل آلومینیومی، بلافاصله

[Downloaded from mail.mg.genetics.ir on 2026-11-19]

در ازت مایع قرار گرفتند و برای انجام مطالعات ملکولی به فریزر ۸۰- درجه‌ی سانتی‌گراد منتقل شدند.

بررسی الگوی بیانی ژن‌های غیراشباع‌کننده دساچوراز امگا ٦ (*FAD2*)و امگا ۳ (*FAD8*)

استخراج RNA کل از نمونه‌های برگی به‌وسیله کیت استخراج RNA گیاهی (سیناکلون، ایران) و طبق پروتکل شرکت سازنده انجام گرفت. جهت بررسی کمیت و خلوص RNAی استخراج شده و تعیین غلظت آن، از دستگاه نانودراپ THERMO SCIENTIFIC, NANODROP, 2000C (آمریکا) استفاده شد. نسبت جذب در ۲٦۰ به ۲۸۰ نانومتر، ۲٦۰ به ۲۳۰ نانومتر و غلظت RNA هر نمونه محاسبه شد. سنتز cDNA با استفاده از کیت First Strand cDNA Synthesis (سیناکلون، ایران) و طبق دستورالعمل شرکت سازنده صورت گرفت. طراحی آغازگر مناسب بر اساس توالی‌های ثبت شده در پایگاه اینترنتی NCBI با استفاده از برنامه PRIMER 3 PLUS انجام شد (جدول ۱). ژن گلیسرآلدئید-۳-فسفات دهیدروژناز (*GAPDH*) به‌عنوان ژن مرجع در سنجش بیان ژن، مورد استفاده قرار گرفت. آغازگرهای طراحی شده از نظر احتمال تشکیل دایمر، هترودایمر و تشکیل ساختارهای ساقه-حلقه توسط پایگاه‌های Primer Biosuft و IDT بررسی شدند. از سوی دیگر راندمان تکثیر و احتمال تشکیل ساختارهای ثانویه در ناحیه تکثیری با استفاده از سایت https://eu.idtdna.com/UNAFold بررسی شد. همچنین در بخش primer blast پایگاه اینترنتی NCBI، اختصاصیت آغازگرها برای گیاه خرفه بررسی و تأیید شد.

واکنش qRT-PCR بر روی دستگاه StepOnePlus Real-Time PCR System (ABI، آمریکا) و با استفاده از مسترمیکس Real-time PCR Master Mix (SYBR Green) (سیناکلون، ایران) انجام شد. بدین ترتیب که ۵ میکرولیتر از مسترمیکس با نیم میکرولیتر از هر کدام از آغازگرهای رو به جلو و برگشتی (۱۰ pmol/µl) و ۲ میکرو لیتر از cDNA (۳۰ نانوگرم) سنتز شده مخلوط شد و حجم آن با استفاده از آب دیونیزه به ۱۰ میکرولیتر رسید. در نمونه‌های کنترل آب جایگزین cDNA شد. دستورالعمل دمایی با واسرشت سازی اولیه در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. سپس ٤۰ چرخه دمایی شامل واسرشت سازی ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ ثانیه، اتصال (مطابق با دمای اتصال هر آغازگر) به مدت ۱۵ ثانیه و گسترش در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ ثانیه انجام شد. برای هر ژن دو تکرار بیولوژیکی (از دو گلدان متفاوت) و دو تکرار تکنیکی (دو تکرار برای هر cDNA) در نظر گرفته شد. مقایسه نسبی میزان بیان ژن‌های هدف با استفاده از روش اختلاف در تغییرات چرخه آستانه $\Delta\Delta C_T$ در نرم‌افزار REST® محاسبه شد (Pfaffl et al. 2002). همه‌ی داده‌ها با ژن گلیسرآلدئید-۳-فسفات دهیدروژناز به‌عنوان کنترل داخلی، نرمال شده و سپس میزان تغییرات سطح رونوشت‌ها در پاسخ به غلظت‌های متفاوت نانوذره مورد استفاده نسبت به شرایط کنترل سنجیده شد.

اندازه‌گیری صفات مورفوفیزیولوژیک

به‌منظور اندازه‌گیری وزن خشک گیاهچه، نمونه‌های تحت تیمار و شاهد به‌طور جداگانه در پاکت‌های کاغذی قرار داده شد و به مدت ٤۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفتند و سپس توزین صورت گرفت. طول گیاهچه‌ها با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری و مقادیر بر اساس سانتی‌متر گزارش شدند. در خصوص تعداد برگ هر گیاهچه نیز تعداد برگ‌های هر گیاهچه شمارش شدند.

برای اندازه‌گیری میزان کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کارتنوئیدها در نمونه‌های برگی، از استون ۸۰ درصد به‌عنوان حلال برای استخراج عصاره سلولی استفاده شد. بدین ترتیب که پس از اضافه کردن استون به نمونه‌های پودر شده، سانتریفیوژ نمونه‌ها با سرعت ٦۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد و عصاره فوقانی جهت اندازه‌گیری میزان جذب در طول موج‌های ٦٦۳، ٦٤٥ و ٤۷۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر (مدل spekol 2000، شرکت analytikjema، کشور آلمان) جداسازی شد. سپس محتوای رنگیزه‌ها مطابق با روش Arnon (۱۹٦۷) بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر اندازه‌گیری شدند.

جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز، ابتدا عصاره آنزیمی با استفاده از بافر استخراج فسفات پتاسیم (۷= pH) آماده شد. بدین ترتیب که برای به‌دست آوردن یک نمونه همگن و یکنواخت، نمونه برگی پودر شده با بافر استخراج به‌خوبی مخلوط و ساییده شد. سپس نمونه‌ها در ۱۵۰۰۰ دور در

[Downloaded from mail.mg.genetics.ir on 2026-11-19]

دقیقه در دمای ٤ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۵ دقیقه سانتریفوژ شدند و فاز شفاف بالایی برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیمی جدا و در دمای ٤ درجه‌ی سانتی‌گراد نگه‌داری شد. مخلوط واکنش برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز مطابق با روش ارائه شده توسط Cakmak and Horst (1991) آماده شد. واکنش با افزودن عصاره آنزیمی آغاز شد و فعالیت آنزیمی با ارزیابی سرعت اولیه کاتالیز H_2O_2 در طول موج ۲٤۰ نانومتر (ضریب خاموشی $E = 39.4\ mM^{-1}\ cm^{-1}$) به صورت ۱ واحد آنزیم در هر میلی لیتر عصاره آنزیمی تعیین شد. محیط واکنش برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پراکسیداز حاوی شامل عصاره آنزیمی، بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰میلی‌مولار با pH=۷، آب مقطر دو بار تقطیر، پراکسید هیدروژن ۷۰ میلی‌مولار محلول در فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار و گوئیکول ۱۰ میلی‌مولار در آب دو بار تقطیر بود. افزایش جذب ناشی از اکسیداسیون گوئیکول در طول موج ٤۷۰ نانومتر (ضریب خاموشی $E = 26.6\ mM^{-1}\ cm^{-1}$) ثبت شد (Chance and Maehly 1955).

تجزیه و تحلیل داده‌های آماری

تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش بر پایه طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد و جهت مقایسه‌ی میانگین داده‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح معنی‌داری پنج درصد استفاده شد.

جدول ۱- آغازگرهای مورد استفاده در آزمایش

نام ژن	شماره دسترسی	توالی آغازگرها (´۳-´۵)	دمای ذوب (°C)	طول قطعه تکثیری (bp)
GAPDH گلیسرآلدئید-۳-فسفات دهیدروژناز	MF281051.1	F: ATCCCTAGCAGCACTGGAGC R:ACAACCCTCTTATCAGCAAGCCT	53.5	159
FAD2 دساچوراز امگا ٦	EU872254.1	F: AACCACCCTTCACACTTAGC R: CCTTGGATGTAGCCGTAGAT	56	199
FAD8 دساچوراز امگا ۳	EU872255.1	F: TCCACCACGACATCGGAACT R: AAGACACACTGCGGGAAAGC	58.6	97

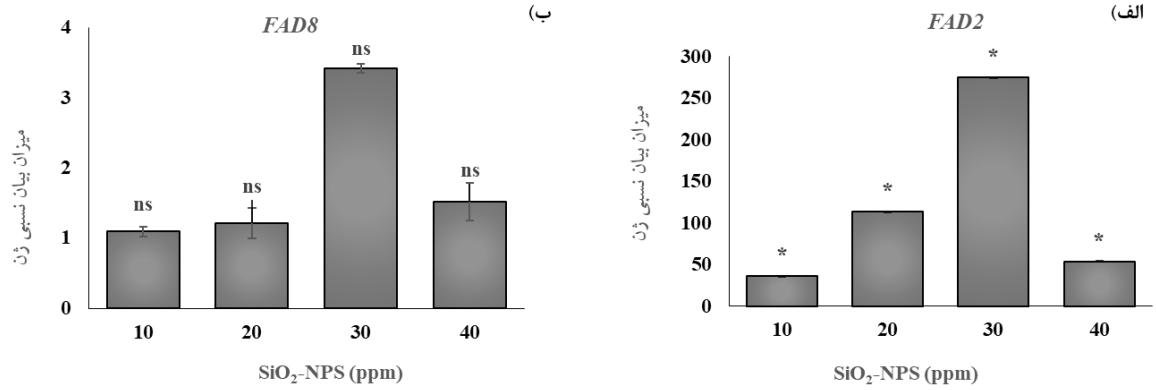
نتایج و بحث

بررسی بیان ژن‌های دساچوراز اسید چرب امگا٦ و امگا۳ تحت غلظت‌های متفاوت SiO_2 در خرفه

در خصوص تیمارهای اعمال شده مربوط به غلظت‌های ۱۰ تا ٤۰ پی‌پی‌ام نانوذره SiO_2، سطح رونوشت ژن دساچوراز امگا ٦ (*FAD2*) در تمامی غلظت‌های اعمال شده، افزایش بیان معنی‌داری در سطح ۵ درصد را نشان داد. با این حال بیشترین میزان بیان *FAD2* در غلظت ۳۰ پی‌پی‌ام این نانوذره حاصل شد و کمترین میزان بیان نسبت به گیاهان شاهد در غلظت ۱۰ پی‌پی‌ام مشاهده شد (شکل ۱ الف). در رابطه با بیان نسبی ژن دساچوراز امگا ۳ (*FAD8*)، هر چند که میزان بیان مشاهده شده در غلظت های ٤۰-۱۰ پی‌پی‌ام نانوذره، نسبت به شاهد مثبت مشاهده شد، اما این تغییرات بیانی معنی‌دار نبود. با این حال بیشترین سطح تجمع mRNA در غلظت ۳۰ پی‌پی‌ام نانوذره SiO_2 مشاهده شد (۳/٤ برابر افزایش بیان نسبت به گیاهان شاهد) (شکل۱ ب). مطالعات نشان داده است نانوذره SiO_2 با افزایش رسوب اجزای دیواره سلولی مانند لیگنین و سلولز به تقویت و تثبیت غشای سلولی کمک می‌کنند. با بهبود وضعیت یکپارچگی غشاء، SiO_2 به جلوگیری از پراکسیداسیون لیپیدی و کاهش تشکیل مالون دی آلدهید (MDA) و کاهش تخریب UFAها کمک می‌کند (Al-Mokadem et al. 2023). از سوی دیگر مشخص شده است که محلول‌پاشی SiO_2 می‌تواند مسیرهای پیام‌رسان خاص، نظیر مسیرهای سنتز اسید جاسمونیک (JA) یا اسید آبسزیک (ABA) را فعال کند که به نوبه خود می‌تواند بر متابولیسم لیپید و سنتز اسیدهای چرب اثر بگذارد. این مسیرهای پیام‌رسان می‌توانند بیان ژن‌های کدکننده آنزیم‌های دخیل در اشباع‌زدایی اسیدهای چرب، ازدیاد طول و بازسازی لیپید را تنظیم کنند و در نهایت بر سطح اسیدهای چرب گیاهان به‌خصوص در شرایط تنش اثر بگذارند

[Downloaded from mail.mg.genetics.ir on 2026-11-19]

(Chen and Kattab 2024). در توت‌فرنگی، کاربرد Si، نسبت اسیدهای چرب ۱۸:۲ و ۱۸:۳ به ۱۸:۱را در فسفولیپیدها و گلیکولیپیدها افزایش داد که منجر به افزایش لیپیدهای غشاء شد (Wang and Galletta 1998). در گندم نیز کاربرد Si، میزان اسید چرب ۱۸:۳ را تحت تنش خشکی افزایش داد (Gong et al. 2005). در مطالعه‌ای که اخیراً نیز در گیاه زیره سیاه انجام شد، تیمار نانوذره SiO_2، میزان اسیدهای چرب غیراشباع MUFA را در این گیاه افزایش داد (Chen and Kattab 2024). با این حال در شرایط تنش علی‌رغم افزایش اسیدهای چرب MUFA، میزان اسیدهای چرب غیر اشباع PUFA در گیاه زیره سیاه و چشم بلبلی کاهش یافت (Zadegan et al. 2023; Chen and Kattab 2024). هر چند که اهمیت نانوذره Si در بهبود کمی و کیفی اسیدهای چرب در گیاهان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است اما تا قبل از آزمایش ما، مطالعه‌ای در خصوص الگوهای بیانی ژن‌های مؤثر در متابولیسم لیپیدها به‌خصوص دساچورازهای امگا ٦ و امگا ٣ انجام نشده بود.



شکل۱- تغییرات بیان ژن‌های غیراشباع کننده (دساچوراز) اسیدهای چرب الف) امگا ٦ (*FAD2*) و ب) امگا ٣ (*FAD8*) در غلظت‌های متفاوت نانوذره SiO_2 نسبت به گیاهان شاهد (بدون کاربرد نانوذره SiO_2) در گیاه خرفه

با این حال نقش سایر نانوذرات خصوصا سلنیوم (Se) در بیان ژن‌های غیر اشباع کننده اسیدهای چرب به طور گسترده‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال در سویا بیان ژن‌های مؤثر در فرایند غیراشباع‌سازی اسیدهای چرب نظیر *FAD2-1A*،*FAD2-1B* و *FAD3B* با اسپری‌پاشی نانو ذره Se (۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر) نسبت به گیاهان شاهد افزایش یافت و محتوای اسید لینولئیک و اسید لینولنیک نیز افزایش یافت. همچنین در این مطالعه بیان ژن و فعالیت آنزیم استیل CoA کربوکسیلاز[1] (ACC) در گیاهان تحت تیمار نانوذره Se افزایش یافت (Zhang et al. 2024). ACC یک آنزیم محوری درکربوکسیلاسیون استیل کوآنزیم A و تبدیل آن به مالونیل کوآنزیم است، واکنشی که به‌عنوان یک مرحله کنترل کننده سرعت در مسیر بیوسنتزی اسیدهای چرب عمل می‌کند (Sasaki and Nagano 2004). در همین راستا، نقش نانوذرات در تغییر محتوای نسبی اسیدهای چرب پالمتیک، استئاریک، اولئیک و لینولئیک در بادام‌زمینی تأیید شد (Rui et al. 2018). همچنین مشخص شد که بیان ژن‌های مؤثر در بیوسنتز استیل کوآنزیم A سینتتاز تحت تیمار نانوذرات Se افزایش یافت (Cheng et al. 2022). استیل کوآنزیم A یک ترکیب بسیار مهم در متابولیسم اسیدهای چرب می‌باشد (Hyeon et al. 2020). از سوی دیگر تقویت بیان ژن‌های مؤثر در چرخه TCA مرتبط با سنتز اسیدهای چرب در گیاهانی که تحت تیمار نانوذره Se قرار گرفته بودند، افزایش یافت که به تقویت سنتز اسیدهای چرب منجر شد (Cheng et al. 2022). در مطالعه‌ی Li et al. (2020)، نیز در گیاه کرفس اسپری نانوذره Se سبب افزایش محتوای آلفالینولنیک اسید شد.

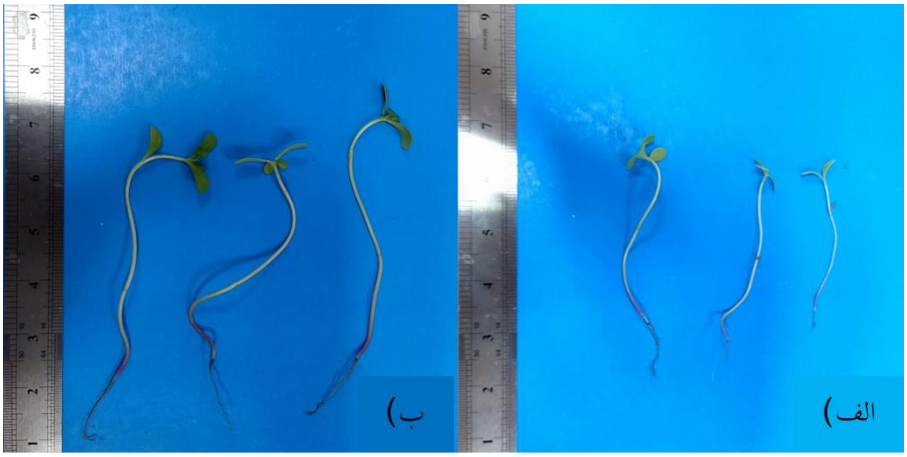
بررسی اثر غلظت‌های مختلف نانوذره SiO_2 بر شاخص‌های مورفوفیزیولوژیک در خرفه

با وجود اینکه پیشرفت‌های جالب توجه‌ای در خصوص شناخت کاربرد Si و نانوساختارهای آن در کشاورزی صورت گرفته است

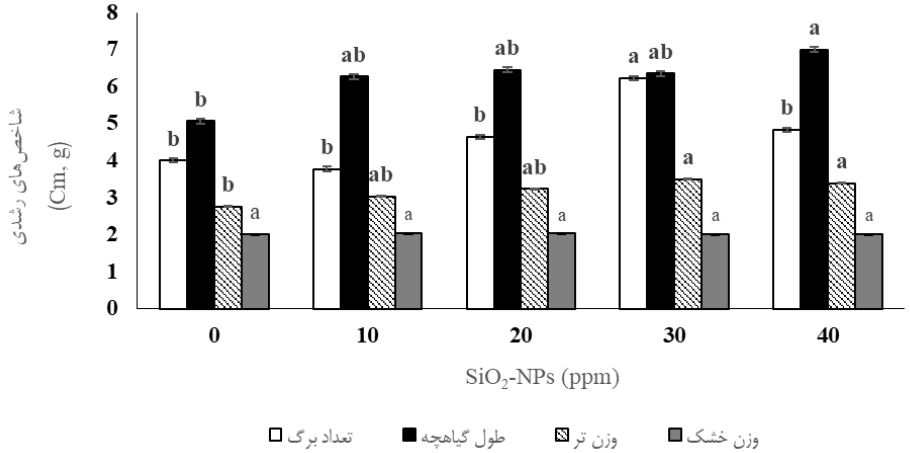
[1] Acetyl CoA carboxylase

[Downloaded from mail.mg.genetics.ir on 2026-11-19]

(Pavlovic et al. 2021)، اما استفاده‌ی عملی از این ترکیبات در سیستم‌های کشاورزی در جهت افزایش عملکرد محصولات، هنوز در مراحل ابتدایی خود است. با این حال تأثیر مثبت سیلیکون بر رشد و عملکرد محصولات کشاورزی، به‌ویژه در مواجهه با تنش‌های زنده و غیرزنده به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است (Weisany et al. 2024). شکل ۲ به‌ترتیب وضعیت رشدی در گیاهان شاهد و گیاهان تحت تیمار نانوذره SiO_2 را در گیاه خرفه نشان می‌دهد. بر اساس آزمایش انجام شده بر خصوصیات رشدی گیاه خرفه تحت تیمار غلظت‌های مختلف نانوذره SiO_2 (شکل ۳)، مشخص شد که صفت تعداد برگ در غلظت ۳۰ پی‌پی‌ام نانوذره به بیشینه مقدار خود رسید. طول گیاهچه در غلظت ۴۰ پی‌پی‌ام نانوذره نسبت به گیاهان شاهد (بدون اعمال تیمار SiO_2) افزایش معنی‌داری را نشان داد. وزن تر نیز در غلظت‌های ۳۰ و ۴۰ پی‌پی‌ام نانوذره نسبت به گیاهان شاهد افزایش معنی‌داری را نشان داد.



شکل۲- مقایسه پارامترهای رشدی نظیر طول گیاهچه و تعداد برگ در الف)گیاهان شاهد (بدون کاربرد نانوذره SiO_2) و ب) گیاهان تحت تیمار نانوذره SiO_2



شکل۳- نمودار تغییرات پارامترهای رشدی تحت غلظت‌های متفاوت نانوذره SiO_2 در گیاه خرفه

مطالعات قبلی نشان داده است که Si با تشکیل لایه‌های کوتیکولی دوگانه منجر به افزایش سرعت فتوسنتز و کاهش تبخیر و تعرق و در نهایت تقویت عملکرد گیاه می‌شود و با حفظ ایستایی و بهبود ساختار بهینه برگ، امکان جذب و استفاده مؤثر از نور را فراهم می‌کند و بدین ترتیب باعث افزایش کارایی فتوسنتز می‌شود (Verma et al. 2020). همچنین این عنصر با حفظ یکپارچگی رنگدانه‌های فتوسنتزی و جلوگیری از تجزیه آن‌ها، فعالیت فتوسنتزی پایداری را حتی در شرایط تنش فراهم می‌آورد. این

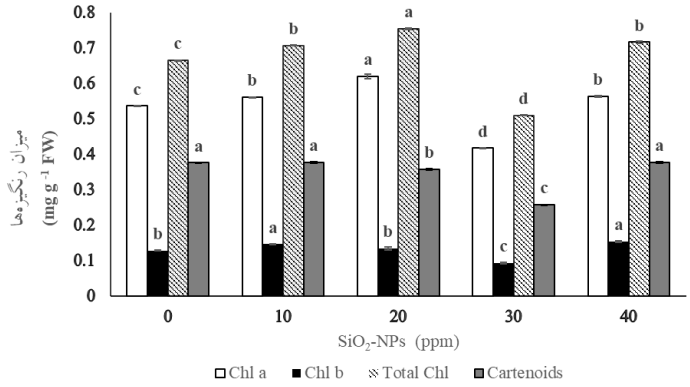
[Downloaded from mail.mg.genetics.ir on 2026-11-19]

عنصر با اثرات تنظیمی که بر پروتئین‌های مختلف مرتبط با فتوسنتز، از جمله فتوسیستم I، II، RubisCO و سایر پروتئین‌های مرتبط با کلروپلاست وارد می‌کند، به حفظ عملکرد دستگاه فتوسنتزی به‌ویژه در رویارویی با شرایط تنش کمک می‌کند (Muneer et al. 2014). در مطالعه ما بررسی اثر غلظت‌های مختلف نانوذره SiO_2 بر میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی نشان داد که میزان کلروفیل a در غلظت ۲۰ پی‌پی‌ام نانوذره نسبت به گیاهان شاهد و سایر غلظت‌ها افزایش چشمگیری نشان داد. میزان کلروفیل b در غلظت‌های ۱۰ و ٤٠ پی‌پی‌ام نانوذره نسبت به شاهد مثبت و معنی‌دار گزارش شد. محتوای کلروفیل کل در غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ٤٠ نانوذره نسبت به گیاهان شاهد افزایش معنی‌داری را نشان داد (شکل ٤). بر اساس گزارشات به‌دست آمده نیز مشخص شد که کاربرد غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذره SiO_2 در شرایط آزمایشگاهی در دو ژنوتیپ *Rosa damascena*، اثر مثبتی بر میزان کلروفیل a، کلروفیل b، میزان کلروفیل کل و کارتنوئیدها داشته است (Hajizadeh et al. 2022). مشخص شده است که SiO_2 با افزایش فعالیت آنزیمی مؤثر در بیوسنتز کلروفیل، محتوای کلروفیل گیاه را افزایش می‌دهد. این نانوذره همچنین می‌تواند با تقویت سیستم آنتی اکسیدانی، میزان ترکیبات ROS را کاهش دهد و از کلروفیل در برابر آسیب اکسیداتیو محافظت کند. همچنین وجود SiO_2 جذب مواد مغذی را تسهیل می‌کند و مواد مغذی ضروری برای سنتز کلروفیل فراهم می‌کند (Kiany et al. 2022; Weisany and Khosropour 2023). مشخص شده است که Si با تأثیر بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ضروری مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، گایاکول پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز، به بازیابی تعادل اکسیداسیون/احیاء سلولی کمک کرده و سلول‌های گیاهی را از آسیب اکسیداتیو ناشی از عوامل تنش محافظت می‌کند (Soundararajan et al. 2015; Manivannan et al. 2015). سازوکار Si در افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌تواند به عملکرد این عنصر در حفاظت از غشاهای سلولی از طریق جلوگیری از دسترسی پروتئازها به پروتئین‌های داخلی غشاء و جلوگیری از تجزیه غشاء و از بین رفتن یکپارچگی آن مربوط باشد (Gong et al. 2005). در مطالعه ما، اثر غلظت‌های متفاوت نانوذره SiO_2 بر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نشان داد که فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز به موازات افزایش غلظت نانوذره، افزایش یافت. به گونه‌ای که کمترین میزان فعالیت آنزیمی در نمونه‌های شاهد و بیشترین میزان فعالیت در غلظت ٤٠ پی‌پی‌ام نانوذره مشاهده شد (شکل ۵). مطابق با یافته‌های ما، نقش نانوذرات Si در تقویت بیان و فعالیت سیستم‌های آنتی اکسیدانی در گیاه نخودفرنگی نیز تأیید شد (Tripathi et al. 2015). همچنین در گیاه *Cucurbita pepo* مشخص شد که نانوذرات SiO_2 به موازات افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز، آسیب ناشی از تنش اکسیداتیو را کاهش می‌دهند (Siddiqui et al. 2014). همچنین کاربرد این نانوذره در گیاه *Rosa damascena*، ضمن کاهش میزان H_2O_2 و MDA، باعث تقویت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و پراکسیداز شد (Hajizadeh et al. 2022). از سوی دیگر در زیره سیاه (*Nigella sativa* L.) نیز نانوذره SiO_2، فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی را نسبت به گیاهان شاهد افزایش داد (Chen and Kattab 2024). مطالعات پیشین نشان می‌دهد که نانوذره SiO_2 می‌تواند ژن‌های دخیل در سنتز آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید را تحریک کند. این افزایش بیان ژن منجر به تقویت فعالیت آنزیم‌ها و بهبود دفاع آنتی‌اکسیدانی می‌شود (Mukarram et al. 2022). از سوی دیگر مشخص شده است که PUFAها از طریق تأثیری که بر سمیت‌زدایی ترکیبات ROS در طول شرایط تنش دارند، می‌توانند سبب بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه شوند (Sánchez-Martín et al. 2018).

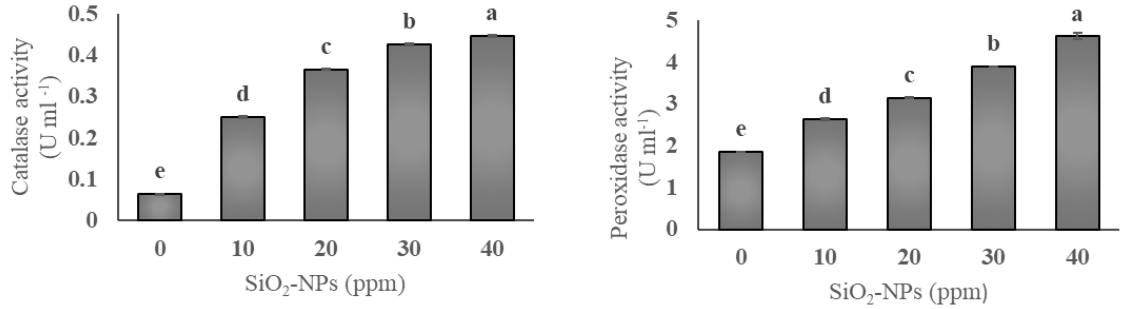
همچنین گزارش شده است که برخی نانوذرات نظیر Se از طریق تأثیری که بر میزان آلفالینولنیک و افزایش محتوای جاسمونات دارند، محتوای فلاونوئیدها و بالتبع آن ظرفیت آنتی‌اکسیدانی را افزایش می‌دهند (Li et al. 2020). در مطالعات پیشین نیز نقش جاسمونات در تقویت ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه از طریق تأثیر آن بر بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه نظیر فلاونوئیدها و ترپن‌ها تأیید شده بود (Qiu et al. 2014; Bali et al. 2019; Pan et al. 2020). همچنین کاربرد مستقیم نانوذرات SiO_2 به ریشه گیاهان *Hyoscyamus reticulatus* و*H. pusillus*، محتویات فنل و ترکیبات فلاونوئیدی را افزایش داد (Hedayati et al. 2020). در

[Downloaded from mail.mg.genetics.ir on 2026-11-19]

مطالعه دیگری استفاده از ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذره Se منجر به افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه، هورمون‌های گیاهی و آنتی‌اکسیدان‌ها در گیاهان خیار شد. این اثرات با فعال کردن هر دو مسیر بیوسنتز فنیل پروپان و مسیرهای اسید چرب منشعب به‌دست آمد (Jia et al. 2024).



شکل٤- تغییرات میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و میزان کارتنوئید تحت غلظت‌های متفاوت نانوذره SiO_2 در گیاه خرفه



شکل ۵- تغییرات میزان فعالیت آنزیم کاتالاز و پراکسیدازو تحت غلظت‌های متفاوت نانوذره SiO_2 در گیاه خرفه

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد که میزان رونویسی ژن‌های اسیدهای چرب دساچوراز خصوصا ژن *FAD2* در تمام غلظت‌های اعمال شده نانوذره به‌طور چشمگیری نسبت به گیاهان شاهد افزایش یافت و به بیشترین میزان خود در غلظت ۳۰ پی‌پی‌ام نانوذره رسید. به‌نظر می‌رسد این نانوذره به‌عنوان یک الیسیتور غیرزیستی می‌تواند نقش مهمی در فعال‌سازی مسیرهای پیام‌رسان مؤثر بر بیوسنتز لیپید داشته باشد و با ممانعت از تخریب و پراکسیداسیون لیپیدهای غشا سبب حفظ یکپارچگی غشاء سلولی شود. از سوی دیگر به‌نظر می‌رسد افزایش بیان ژن‌های دساچوراز اسیدهای چرب سبب فعال شدن مسیر متابولیکی پائین دست آن یعنی جاسمونات شده که آن نیز به نوبه خود سبب تقویت سنتز اسیدهای چرب و افزایش توان آنتی‌اکسیدانی گیاه شده است. افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به موازات افزایش غلظت نانوذره SiO_2، اهمیت کاربرد این نانوذره در تقویت ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه را تأیید کرد که به نوبه خود حفاظت از کلروفیل در برابر تنش اکسیداتیو و افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی را به‌همراه داشت. این آزمایش اولین مطالعه‌ای است که به اثرات مثبت نانوذره SiO_2 بر تقویت شاخص‌های رشدی، توان آنتی‌اکسیدانی و تقویت بیان ژن‌های دساچوراز اسیدهای چرب گیاه خرفه پرداخته است. از این رو می‌توان استفاده از این نانوذرات را به‌عنوان یک رویکرد اکولوژیکی همگام با کشاورزی پایدار جهت افزایش کیفیت محصول، تقویت تاب‌آوری گیاه در شرایط محیطی تنش‌زا و ارتقاء امنیت غذایی توصیه کرد.

[Downloaded from mail.mg.genetics.ir on 2026-11-19]

منابع

Alharbi K, Osman HS, Rashwan E, Hafez EM, Omara AE (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 11:3431.

Al-Mokadem AZ, Sheta MH, Mancy AG, Hussein HA, Kenawy SK, Sofy AR, Abu-Shahba MS, Mahdy HM, Sofy MR, Al Bakry AF, Agha MS (2023) Synergistic effects of kaolin and silicon nanoparticles for ameliorating deficit irrigation stress in maize plants by upregulating antioxidant defense systems. Plants 12(11):2221.

Arnon A. N (1967) Method of extraction of chlorophyll in the plants. Agronomy Journal 23:112-121.

Arnon DI, Stout PR (1939) The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. Plant Physiology 14:371-375

Bali S, Jamwal VL, Kohli SK, Kaur P, Tejpal R, Bhalla V, Ohri P, Gandhi SG, Bhardwaj R, Al-Huqail AA, Siddiqui MH (2019) Jasmonic acid application triggers detoxification of lead (Pb) toxicity in tomato through the modifications of secondary metabolites and gene expression. Chemosphere 235:734-748.

Cakmak I. and Horst W J (1991) Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). Physiologia Plantarum 83:463-468.

Chance B and Maehly AC (1955) Assay of catalases and proxidase. Methods in Enzymology 2: 764–775.

Chen Z, Kattab NO (2024) Silicon and titanium nanoparticles modulated drought and chromium toxicity by adjusting physio-biochemical attributes and fatty acid profiles of black cumin (*Nigella sativa* L.). Environmental Science and Pollution Research 31:13563-13574.

Cheng B, Wang C, Chen F, Yue L, Cao X, Liu X, Yao Y, Wang Z, Xing B (2022) Multiomics understanding of improved quality in cherry radish (*Raphanus sativus* L. var. radculus pers) after foliar application of selenium nanomaterials. Science of The Total Environment 824:153712.

Ezekwe MO, Omara-Alwala TR, Membrahtu T (1999) Nutritive characterization of purslane accessions as influenced by planting date. Plant Foods for Human Nutrition 54:183-91.

Falcone DL, Gibson S, Lemieux B, Somerville C (1994) Identification of a gene that complements an *Arabidopsis* mutant deficient in chloroplast [omega] 6 desaturase activity. Plant Physiology 106:1453-1459.

Farmer EE (1994) Fatty acid signalling in plants and their associated microorganisms. Plant Molecular Biology 26:1423-1437.

Gong H, Zhu X, Chen K, Wang S, Zhang C (2005) Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. Plant Science 169:313-321.

Hajizadeh HS, Azizi S, Rasouli F, Okatan V (2022) Modulation of physiological and biochemical traits of two genotypes of *Rosa damascena* Mill. by SiO_2-NPs under In vitro drought stress. BMC Plant Biology 22:538.

Hedayati A, Hosseini B, Palazon J, Maleki R (2020) Improved tropane alkaloid production and changes in gene expression in hairy root cultures of two *Hyoscyamus* species elicited by silicon dioxide nanoparticles. Plant Physiology and Biochemistry 155:416-428.

Heppard EP, Kinney AJ, Stecca KL, Miao GH (1996) Developmental and growth temperature regulation of two different microsomal [omega]-6 desaturase genes in soybeans. Plant Physiology 110:311-319.

Horiguchi G, Fuse T, Kawakami N, Kodama H, Iba K (2000) Temperature-dependent translational regulation of the ER ω-3 fatty acid desaturase gene in wheat root tips. The Plant Journal 24:805-813.

Hyeon H, Xu JL, Kim JK, Choi Y (2020) Comparative metabolic profiling of cultivated and wild black soybeans reveals distinct metabolic alterations associated with their domestication. Food Research International 134:109290.

Jia Y, Kang L, Wu Y, Zhou C, Cai R, Zhang H, Li J, Chen Z, Kang D, Zhang L, Pan C (2024) Nano-selenium foliar intervention-induced resistance of cucumber to *Botrytis cinerea* by activating jasmonic acid biosynthesis and regulating phenolic acid and cucurbitacin. Pest Management Science 80:554-68.

Juárez-Maldonado A, Ortega-Ortíz H, Morales-Díaz AB, González-Morales S, Morelos-Moreno Á, Cabrera-De la Fuente M, Sandoval-Rangel A, Cadenas-Pliego G, Benavides-Mendoza A (2019) Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. International Journal of Molecular Sciences 20:162.

Kiany T, Pishkar L, Sartipnia N, Iranbakhsh A, Barzin G (2022) Effects of silicon and titanium dioxide nanoparticles on arsenic accumulation, phytochelatin metabolism, and antioxidant system by rice under arsenic toxicity. Environmental Science and Pollution Research 29:34725-34737.

Knutzon DS, Thompson GA, Radke SE, Johnson WB, Knauf VC, Kridl JC (1992) Modification of Brassica seed oil by antisense expression of a stearoyl-acyl carrier protein desaturase gene. Proceedings of the National Academy of Sciences 89:2624-2628.

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 82:412-425

Leon J, Rojo E, Sanchez-Serrano JJ (2001) Wound signalling in plants. Journal of Experimental Botany 52:1-9.

Li D, An Q, Wu Y, Li JQ, Pan C (2020) Foliar application of selenium nanoparticles on celery stimulates several nutrient component levels by regulating the α-linolenic acid pathway. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 8:10502-10510.

Liang Y, Nikolic M, Bélanger R, Gong H, Song A (2015) Silicon in agriculture. Springer, Dordrecht 978-994.

Liu R, Lal R (2015) Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. Science of the Total Environment 514:131-139.

[Downloaded from mail.mg.genetics.ir on 2026-11-19]

Los DA, Murata N (1998) Structure and expression of fatty acid desaturases. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Lipids and Lipid Metabolism 1394:3-15.
Manivannan A, Soundararajan P, Arum LS, Ko CH, Muneer S, Jeong BR (2015) Silicon-mediated enhancement of physiological and biochemical characteristics of *Zinnia elegans* 'Dreamland Yellow'grown under salinity stress. Horticulture, Environment, and Biotechnology 56:721-731.
Mikami K, Murata N (2003) Membrane fluidity and the perception of environmental signals in cyanobacteria and plants. Progress in Lipid Research 42:527-543.
Mikkilineni V, Rocheford T (2003) Sequence variation and genomic organization of fatty acid desaturase-2 (*fad2*) and fatty acid desaturase-6 (*fad6*) cDNAs in maize. Theoretical and Applied Genetics106:1326-1332.
Mukarram M, Petrik P, Mushtaq Z, Khan MM, Gulfishan M, Lux A (2022) Silicon nanoparticles in higher plants: Uptake, action, stress tolerance, and crosstalk with phytohormones, antioxidants, and other signalling molecules. Environmental Pollution 310:119855.
Muneer S, Park YG, Manivannan A, Soundararajan P, Jeong BR (2014) Physiological and proteomic analysis in chloroplasts of *Solanum lycopersicum* L. under silicon efficiency and salinity stress. International Journal of Molecular Sciences 15:21803-21824.
Napier JA, Sayanova O, Sperling P, Heinz E (1999) A growing family of cytochrome b5-domain fusion proteins. Trends in Plant Science 4:2-4.
Ohlrogge J, Browse J (1995) Lipid biosynthesis. The plant Cell 7:957-970
Okafor IA, Ayalokunrin MB, Orachu LA (2014) A review on *Portulaca oleracea* (purslane) plant-its nature and biomedical benefits. International Journal of Biomedical Research 5:75-80
Okuley J, Lightner J, Feldmann K, Yadav N, Lark E, Browse J (1994) *Arabidopsis FAD2* gene encodes the enzyme that is essential for polyunsaturated lipid synthesis. The Plant Cell 6:147-158.
Pan L, Zhao X, Chen M, Fu Y, Xiang M, Chen J (2020) Effect of exogenous methyl jasmonate treatment on disease resistance of postharvest kiwifruit. Food Chemistry 305:125483.
Pavlovic J, Kostic L, Bosnic P, Kirkby EA, Nikolic M (2021) Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. Frontiers in Plant Science 12:697592.
Pfaffl MW, Horgan GW, Dempfle L (2002) Relative expression software tool (REST©) for group-wise comparison and statistical analysis of relative expression results in real-time PCR. Nucleic Acids Research 30:e36-e36
Qiu Z, Guo J, Zhu A, Zhang L, Zhang M (2014) Exogenous jasmonic acid can enhance tolerance of wheat seedlings to salt stress. Ecotoxicology and Environmental Safety 104:202-208.
Romanovski V, Roslyakov S, Trusov G, Periakaruppan R, Romanovskaia E, Chan HL, Moskovskikh D (2023) Synthesis and effect of CoCuFeNi high entropy alloy nanoparticles on seed germination, plant growth, and microorganisms inactivation activity. Environmental Science and Pollution Research 30:23363-23371.
Rui M, Ma C, White JC, Hao Y, Wang Y, Tang X, Yang J, Jiang F, Ali A, Rui Y, Cao W (2018) Metal oxide nanoparticles alter peanut (*Arachis hypogaea* L.) physiological response and reduce nutritional quality: a life cycle study. Environmental Science: Nano. 2018 5:2088-20102.
Sánchez-Martín J, Canales FJ, Tweed JK, Lee MR, Rubiales D, Gómez-Cadenas A, Arbona V, Mur LA, Prats E (2018) Fatty acid profile changes during gradual soil water depletion in oats suggests a role for jasmonates in coping with drought. Frontiers in Plant Science 9:1077.
Sasaki Y, Nagano Y (2004) Plant acetyl-CoA carboxylase: structure, biosynthesis, regulation, and gene manipulation for plant breeding. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry 68:1175-1184.
Shanklin J, Cahoon EB (1998) Desaturation and related modifications of fatty acids. Annual Review of Plant Biology 49:611-41.
Siddiqui MH, Al-Whaibi 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 33:2429-2437.
Simopoulos AP, Norman HA, Gillaspy JE (1995) Purslane in human nutrition and its potential for world agriculture. World Review of Nutrition and Dietetics 77:47-74.
Soundararajan P, Manivannan A, Park YG, Muneer S, Jeong BR (2015) Silicon alleviates salt stress by modulating antioxidant enzyme activities in *Dianthus caryophyllus* 'Tula'. Horticulture, Environment, and Biotechnology 56:233-239.
Tripathi DK, Singh VP, Prasad SM, Chauhan DK, Dubey NK (2015) Silicon nanoparticles (SiNp) alleviate chromium (VI) phytotoxicity in *Pisum sativum* (L.) seedlings. Plant Physiology and Biochemistry 96:189-98.
Uddin MK, Juraimi AS, Hossain MS, Nahar MA, Ali ME, Rahman MM (2014) Purslane weed (*Portulaca oleracea*): A prospective plant source of nutrition, omega-3 fatty acid, and antioxidant attributes. The Scientific World Journal 2014:951019.
Upchurch RG (2008) Fatty acid unsaturation, mobilization, and regulation in the response of plants to stress. Biotechnology Letters 30:967-977.
Verma KK, Liu XH, Wu KC, Singh RK, Song QQ, Malviya MK, Song XP, Singh P, Verma CL, Li YR (2020) The impact of silicon on photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under different soil moisture levels. Silicon 12:1355-1367.
Wang SY, Galletta GJ (1998) Foliar application of potassium silicate induces metabolic changes in strawberry plants. Journal of Plant Nutrition 21:157-167.
Weisany W, Khosropour E (2023) Engineered nanomaterials in crop plants drought stress management. In: Engineered nanomaterials for sustainable agricultural production, soil improvement and stress management, Academic Press 183-204.
Weisany W, Razmi J, Eshaghabadi AH, Pashang D (2024) Silicon nanoparticles (SiNP): A novel and sustainable

[Downloaded from mail.mg.genetics.ir on 2026-11-19]

strategy for mitigating environmental stresses in plants. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 24:2167-2191.
Zadegan K, Monem R, Pazoki A (2023) Silicon dioxide nanoparticles improved yield, biochemical attributes, and fatty acid profile of cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) under different irrigation regimes. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 23:3197-3208.
Zhang L, Li X, Yue L, Cao X, Cheng B, Wang C, Wang Z (2024) Selenium nanomaterials promoted ferredoxin and iron–sulfur protein synthesis and acetyl CoA carboxylase activity to improve the photosynthesis and fatty-acid synthesis in soybean. Environmental Science: Nano 11:2073-2082.
Zheng H, Rowland O, Kunst L (2005) Disruptions of the *Arabidopsis* enoyl-CoA reductase gene reveal an essential role for very-long-chain fatty acid synthesis in cell expansion during plant morphogenesis. The Plant Cell 17:1467-1481.
Zhou YX, Xin HL, Rahman K, Wang SJ, Peng C, Zhang H (2015) *Portulaca oleracea* L.: a review of phytochemistry and pharmacological effects. BioMed Research International 2015:925631.

[Downloaded from mail.mg.genetics.ir on 2026-11-19]