

تأثیر سلنیم فلزی و نانو بر خصوصیات فیزیولوژیک گیاه گوجه فرنگی

مریم حقیقی^{۱*} و رضا ابوالقاسمی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۹)

چکیده

سلنیم (Se) یک عنصر سودمند مهم برای گیاهان است که می تواند رشد گیاه را در شرایط معمولی و تنش بهبود بخشد. در مطالعه حاضر، تأثیر سلنیم و نانوسلنیم (N-Se) بر خصوصیات فتوسنتزی، فعالیت آنتی اکسیدانی و میزان پلی فنل کل گوجه فرنگی (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Halil) تحت شرایط تنش دمایی در محیط کشت هیدروپونیک مورد بررسی قرار گرفت. با این هدف، به محلول غذایی، سلنیم و نانوسلنیم اضافه شد و پس از مدتی گیاهان در سه سطح دمایی قرار گرفتند که شامل دمای نرمال ($25/17 \pm 2^\circ\text{C}$) روز به شب)، دمای زیاد (40°C درجه سلسیوس برای ۲۴ ساعت) و دمای کم (10°C درجه سلسیوس برای ۲۴ ساعت) بود. این آزمایش به صورت فاکتوریل شامل تیمارهای دمایی (نرمال، زیاد و کم؛ به ترتیب T₁، T₂ و T₃)، سطوح سلنیم (صفر (شاهد)، ۲/۵، ۵ و ۸ میلی مولار؛ به ترتیب Se⁰، Se¹، Se² و Se³) و سطوح نانوسلنیم (۱، ۴، ۸ و ۱۲ میکرومولار؛ به ترتیب N-Se¹، N-Se²، N-Se³ و N-Se⁴) در سه تکرار بود. سپس، در شرایط دمایی معمول به مدت ۷ روز قرار گرفتند و اندازه گیری فاکتورهای فتوسنتزی و آنتی اکسیدانی انجام گرفت. براساس نتایج، تنش دمایی سرد و گرم به طور کلی تأثیر منفی بر رشد گوجه فرنگی داشت. تحت تنش دمای زیاد، نرخ فتوسنتز، هدایت مزوفیلی و کارایی مصرف آب فتوسنتزی بهبود یافت. در حالی که تنش دمای کم، تنفس گیاه را افزایش داد. اغلب شاخص های فتوسنتزی با کاربرد سلنیم و نانوسلنیم بهبود یافت. در تیمار Se¹، تحت تنش دمایی، میزان فتوسنتز، تنفس و هدایت مزوفیلی بهترین نتیجه را نشان داد و مقاومت گیاه را افزایش داد. در تیمارهای نانوسلنیم، تیمار N-Se¹ بهترین نتیجه را در فتوسنتز، آنتی اکسیدان و فنل نشان داد. در شرایط تنش کاربرد سلنیم، به خصوص در غلظت های ۵ و ۸ میلی مولار، تأثیر منفی بر نرخ فتوسنتز، دی اکسید کربن درون روزنه ای، هدایت مزوفیلی و کارایی مصرف آب فتوسنتزی داشت که نشان دهنده غیر کارا بودن سلنیم در غلظت های زیاد بود. به طور کلی، شاخص های فیزیولوژیک گوجه فرنگی در شرایط تنش دمایی کم و زیاد در تیمار نانوسلنیم N-Se¹ بهبود می یابد.

کلمات کلیدی: تنش دمایی کم و زیاد، شاخص های فتوسنتزی، سلنیم، نانوسلنیم

مقدمه

رویشی و زایشی، به ویژه در شرایط تنش های محیطی، نقش دارند (۱۹). مطالعات متعدد، اثر مفید سلنیم را بر رشد و عملکرد گیاهان اثبات کرده است. همچنین، سلنیم پیری حاصل از گل دهی در گیاهان علفی را به تعویق می اندازد (۹ و ۱۷). می توان

سلنیم عنصری مفید برای گیاهان است و ضروری بودن آن برای رشد و نمو آنها نیاز به بررسی دارد (۷). عناصر مفید به طور مستقیم در متابولیسم گیاهان دخالت ندارند؛ ولی در بهبود روند

۱. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
 *مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mhaghghi@cc.iut.ac.ir

مورد توجه است. اینکه گیاه در کدامیک از مراحل رشد، با چه تنش دمایی و با چه شدتی مواجه است باید بررسی شود. دمای زیاد یکی از عوامل بازدارنده تولید محصول بوده که باعث تحریک ریزش غنچه، گل، میوه و سرانجام کاهش عملکرد می‌گردد. کاهش محصول در اثر تنش گرما در بسیاری از گیاهان مانند گوجه‌فرنگی، فلفل، لوبیا و کلزا مشاهده شده است (۳). تأثیر دما بر تولید محصول و القاء ریزش گل می‌تواند از طریق اختلال در تعادل هورمون‌های گیاهی، تأثیر بر اندام‌های زایشی و یا تأثیر بر میزان و نحوه تقسیم شدن مواد فتوسنتزی در گیاه باشد (۳). گوجه‌فرنگی یک محصول مهم باغبانی است (۵) و مانند سایر محصولات، دارای یک دامنه دمایی می‌باشد و بیشتر یا کمتر از آن باعث آسیب‌های فیزیولوژیک و مورفولوژیک، به‌خصوص در دمای کمتر از ۱۰ و بیشتر از ۳۵ درجه سلسیوس می‌شود (۵). بنابراین، دمای مناسب برای گوجه‌فرنگی ۱۸/۵ تا ۲۶/۵ درجه سلسیوس می‌باشد (۸). طی بررسی‌هایی که صورت گرفته، گزارش شده که مهار تشکیل میوه در دمای زیاد در گوجه‌فرنگی به دلیل کاهش توزیع مواد فتوسنتزی به جوانه گل است. همچنین، بیان شده که تنش دمایی زیاد موجب ریزش اندام‌های تولید مثل و کاهش عملکرد در گوجه‌فرنگی می‌شود و در واقع ظرفیت جوانه‌های گل را برای جذب مواد فتوسنتزی به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد (۵ و ۸). دمای کم، یک عامل تنش دمایی در محیط اطراف گیاهان است که می‌تواند فعالیت‌های بیوشیمیایی سلول‌ها را تحت تأثیر قرار دهد و در نتیجه باعث عدم تعادل در فرایندهای متابولسمی شود (۱). فتوسنتز جز اولین فرایندهایی است که در گیاهان تحت تأثیر دمای کم قرار می‌گیرد. تنش دمایی کم با تأثیر بر بخش‌های مختلف دستگاه فتوسنتز، از جمله تنظیم روزنه‌ها، سنتز پیگمان‌های فتوسنتزی، فعالیت فتوسیستم‌های I و II و همچنین فعالیت آنزیم‌های سیکل کالوین، تثبیت دی‌اکسیدکربن در فرایند فتوسنتز را دچار مشکل می‌کند و فعالیت فرایند فتوسنتز را کاهش می‌دهد (۲). حساسیت یا مقاومت گیاهان در برابر تنش دمایی کم بسته به نوع گیاه، رقم، مورفولوژی اندام و سایر خصوصیات

گفت که سلنیم عنصری کم مصرف و سودمند برای گیاه است و از طرفی نقش آنتی‌اکسیدان برای حیوانات و انسان‌ها دارد (۹، ۱۲ و ۱۵). گزارش شده که سلنیم تأثیر مفید در رشد رویشی گیاه کلم در شرایط بهینه رشد دارد و این افزایش رشد ارتباطی با افزایش توانایی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی ندارد (۷). همچنین، سلنیم موجب تحریک رشد رویشی و نیز تسریع گل‌دهی در گیاه کلزا در شرایط غیرتنشی می‌شود (۱۶). افزایش سلنیم تأثیر مثبتی بر رشد سویا دارد (۹). در برخی تحقیقات، مشاهده شده که سلنیم توانایی کاهش آثار منفی تنش‌ها را دارد (۱۹ و ۲۰). نقش مفید این عنصر در شرایط تنش مانند سرما (۱۴) و نور ماوراء بنفش (۲۰) از طریق افزایش قدرت آنتی‌اکسیدانی گیاه توسط فعال کردن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دسموتاز و کاتالاز صورت می‌گیرد و باعث کاهش مقدار مالون دی‌آلدئید حاصل از تخریب غشا شده و مقاومت گیاه به تنش را افزایش می‌دهد. سلنیم باعث کاهش اثر تنش دمایی زیاد در سویا از طریق مسیرهای آنزیمی و غیرآنزیمی، کاهش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن فعال (۱۰)، در تنش دمایی کم خیار با تنظیم گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن (ROS) (۱۲)، تنش خشکی در گندم از طریق بازسازی غشای سلولی، ساختمان کلروپلاست و بهبود سیستم فتوسنتزی و افزایش ظرفیت جذب آب توسط سیستم ریشه (۱)، تنش کادمیم در فلفل از طریق تغییر در ویژگی‌های فلزات سنگین (۱۲)، سمیت فلزات سنگین با استفاده از برداشت عنصر سمی از جایگاه‌های فعال متابولیک سلول و کاهش تولید رادیکال‌های آزاد (۱۲) می‌شود. در رابطه با اثر نانو مواد، محققین در بررسی خود مشاهده کردند که نانو مواد تأثیر مثبتی در جوانه‌زنی و رشد رویشی بعضی از گیاهان از طریق افزایش رشد و سرعت جوانه‌زنی در شرایط تنش‌های غیر زیستی دارد (۲۶).

دما یکی از عوامل محیطی است که بر چرخه‌های زیستی، رویشی و زایشی گیاهان اثر می‌گذارد (۲). آثار مخرب تنش‌های دمایی بر تولید گیاهان مشکل مهمی است که خسارت ناشی از این تنش‌ها کمتر از سایر تنش‌های محیطی نیست. بنابراین، بررسی دماهایی که گیاه در دوره رشد در معرض آنها قرار دارد،

سلولی و همچنین شرایط وقوع تنش از نظر مدت، زمان و شدت متفاوت است (۶). کاهش آماس سلولی و افزایش نشت الکترولیت‌ها از سلول‌های گیاه به دنبال بروز تنش دمایی کم، نقش غشاء سلولی در حفاظت گیاه از خسارت تنش سرما را به خوبی نشان داده است و تئوری قابل قبول خسارت غشاء سلولی بیان می‌شود. بر طبق این تئوری، تنش دمایی کم باعث تغییر حالت غشا از فاز مایع به ژل می‌شود که با این تغییر فیزیکی، فعالیت غشا مختل می‌گردد (۴). در گوجه‌فرنگی، تنش دمایی کم باعث کاهش بیوستتز کلروفیل، نرخ فتوستتز و متابولیسم کربوهیدرات‌ها می‌شود (۴). در واقع، فتوستتز گیاهان به سرعت تحت تأثیر دمای کم قرار می‌گیرد، به طوری که رشد گیاه کاهش یافته و در نتیجه باعث کاهش عملکرد و محصول گیاه می‌شود، زیرا کربوهیدرات‌های قابل استفاده کمتری برای تولید میوه وجود خواهد داشت (۴ و ۶). آلن و همکاران (۲) گزارش دادند که گیاه گوجه‌فرنگی تحت تنش دمایی کم با کاهش رشد و محصول همراه بود و آسیب به لیپیدهای غشایی، پروتئین و نوکلئیک اسیدها مشاهده شده است (۲ و ۶).

از آنجایی که تحرک سلنیم در خاک کم است (۲۵) و مواد نانو دارای حلالیت بیشتر و سطح واکنش بیشتری نسبت به مواد معمولی می‌باشند (۱۳ و ۲۶)، این فرضیه مطرح است که نانوسلنیم می‌تواند مؤثرتر از سلنیم باشد با توجه به اینکه در رابطه با کاهش اثرهای تنش‌های دمایی با کاربرد سلنیم و نانوسلنیم بررسی‌های زیادی صورت نگرفته است، هدف از انجام آزمایش حاضر بررسی ترکیبات فنلیک، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و همچنین خصوصیات فتوستتزی گوجه‌فرنگی قرار گرفته در معرض تنش دمایی زیاد و کم به مدت ۲۴ ساعت، در مرحله رشد رویشی، و توانایی سلنیم و نانوسلنیم در کاهش اثرهای مخرب تنش دمایی است.

مواد و روش‌ها

شرایط کشت و اعمال تیمارها

به منظور بررسی اثر سلنیم در کاهش تنش‌های دمایی بر

نشاهای به مدت ۱۰ روز در سیستم آبکشت رشد کردند و سپس تنش دمایی اعمال شد، به طوری که به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴۰ و ۱۰ درجه سلسیوس نگهداری و سپس به گلخانه با دمای 25 ± 2 درجه به مدت ۷ روز (زمان ترمیم) منتقل

جدول ۱. خصوصیات نانوسلیم استفاده شده در آزمایش

ویژگی	واحد	ارزش
تجزیه و تحلیل ترموگرافی	TGA	$\pm 50/02$
پلاسمای جفت شده به طور انحصاری	ICP	$4/9 \pm 0/09$
فضای سطح فعال	مترمربع بر گرم	۴۶۱
خلوص	درصد	۹۸
اندازه نانوذرات	نانومتر	۲۰-۳۵

۱. تخمین زده شده توسط ایزوترم‌های جذب نیتروژن

۲. ارزیابی شده توسط روشهایی از قبیل TGA, ICP و غیره

۳. تخمین زده شده با میکروسکوپ الکترونی از قبیل SEM, AFM و TEM

اندازه‌گیری شد. سری دوم از لوله‌های آزمایش را نیز به مدت نیم ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار داده و پس از سرد شدن، هدایت الکتریکی آن‌ها اندازه‌گیری شد (۱۳).

$$MSI = 1 - (EC_1/EC_2) \times 100 \quad [1]$$

که MSI شاخص پایداری غشاء سلولی، EC_1 هدایت الکتریکی بافت برگ، اندازه‌گیری شده در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۰ دقیقه و EC_2 هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه است.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات شیمیایی ناشی از تنش دمایی، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و فنل کل در دو مرحله (مرحله اول پس از ترمیم، که ۷ روز پس از اعمال تنش بود و مرحله دوم پس از پایان آزمایش) ارزیابی شد (۲۵). اندازه‌گیری میزان فنل کل شاخصاره با استفاده از فولین براساس میزان گالیک اسید در هر گرم وزن تازه شاخصاره و اسپکتروفتومتر (V-530, JASCO, Japan) با طول موج ۷۶۵ نانومتر اندازه‌گیری شد (۲۲). برای اندازه‌گیری فعالیت آنتی‌اکسیدانی برگ، به ۰/۲ گرم از بافت تازه ۱۰ میلی‌لیتر متانول اضافه شده و سپس سانتریفیوژ گردید و به ۵۰ میکرولیتر عصاره متانولی ۹۵۰ میکرولیتر محلول DPPH اضافه شده و سپس در دمای اتاق به مدت ۱۵ دقیقه در شرایط تاریکی نگهداری گردید. کاهش در جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۱۵ نانومتر تعیین گردید (۲۳).

$$DPPH_{sc} = ((A_{cont} - A_{smp}) / A_{cont}) \times 100 \quad [2]$$

شدند. جهت اعمال تنش دمایی زیاد و کم، گیاهچه‌ها به انکوباتور با مدل EYELA LTI-1000 SD منتقل شدند.

اندازه‌گیری فاکتورهای مورد بررسی

نرخ فتوسنتز ($\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)، ضریب هدایتی روزنه‌ها ($\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) و CO_2 درون روزنه‌ای (μmol) با دستگاه فتوسنتز متر (Li-Cor, Li-3000, USA) اندازه‌گیری شدند.

هدایت مزوفیلی (میلی‌مول دی‌اکسید کربن در متر مربع در ثانیه) از تقسیم کردن فتوسنتز به غلظت دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای به دست آمد (۱). به‌منظور تعیین کارایی مصرف آب فتوسنتزی (میکرومول دی‌اکسید کربن برمول H_2O) میزان فتوسنتز به هدایت روزنه‌ای تقسیم شد (۲۱). کارایی مصرف آب فتوسنتزی شاخصی است که میزان فتوسنتز به‌ازای هر واحد هدایت روزنه‌ای و تعرق را نشان می‌دهد.

برای تعیین شاخص پایداری غشاء سلولی (Membrane stability index)، از هر گلدان دو برگ جوان توسعه یافته انتخاب و سپس در یک پلاستیک قرار داده و به آزمایشگاه منتقل شدند. سپس، ۱/۰ گرم برگ را وزن شده و داخل دو سری لوله‌های آزمایش حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب دو بار تقطیر شده قرار گرفت. سپس، یکسری از نمونه‌ها در دستگاه بن ماری در دمای ۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفته و پس از این زمان، هدایت الکتریکی نمونه‌ها به کمک دستگاه EC متر (model RC-16C, Alpha Metals, NJ, USA)

جدول ۲. تأثیر تنش دمایی بر خصوصیات فتوسنتزی و شاخص پایداری گوجه‌فرنگی

شاخص پایداری	نرخ فتوسنتز ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	هدایت روزنه‌ای ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	تنفس ($\text{mmol/m}^2 \cdot \text{s}$)	دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای (μmol)	هدایت مزوفیلی ($\text{mmol/m}^2 \cdot \text{s}$)	کارایی مصرف آب فتوسنتزی ($\mu\text{mol CO}_2 / \text{mol}$)	شاخص پایداری غشا سلول (%)
T1	8/78 b	0/20 a	4/93 b	332/00 a	0/026 b	1/93 b	57/80 a
T2	9/74 a	0/10 c	4/04 c	288/38 b	0/036 a	2/30 a	53/13 b
T3	9/24 ab	0/15 b	5/43 a	274/75 c	0/036 a	1/67 c	38/53 c

حروف یکسان، سطح معنی‌داری مشابهی را توسط آزمون LSD در هر ستون نشان می‌دهند (T1) $25 \pm 2^\circ \text{C}$, (T2) 40°C , (T3) 10°C

کم نسبت به شاهد کاهش یافت. اما پس از طی دوران ترمیم (اندازه‌گیری فعالیت آن‌تی‌اکسیدانی) میزان این فاکتور در تنش‌های اعمال شده با شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت. می‌توان اینگونه بیان کرد که احتمالاً افزایش ظرفیت آن‌تی‌اکسیدانی در پاسخ به تجمع رادیکال‌های فعال اکسیژن بوده و گیاه توانسته است از طریق افزایش ظرفیت آن‌تی‌اکسیدانی با اثرهای سمی رادیکال‌های آزاد مقابله کند. کاهش فعالیت آن‌تی‌اکسیدان پس از تنش در دمای زیاد و کم نسبت به دمای بهینه به ترتیب ۱ و ۵ درصد بود. میزان فنل کل بعد از تنش در تیمار دمایی کم کاهش و در دمای زیاد تغییر معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد نداشت. همچنین میزان فنل کل در پایان آزمایش در دمای زیاد کاهش و در دمای کم تغییر معنی‌داری نداشت. میزان کاهش فنل در پایان آزمایش تحت تنش دمایی زیاد ۱۳/۶ درصد بود. میزان فنل کل پس از تنش تحت تنش دمایی زیاد تغییری نکرد. ولی در دمای کم، کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۳).

با توجه به جدول (۴)، نرخ فتوسنتز و کارایی مصرف آب فتوسنتزی در تیمار N-Se1 بیشترین میزان بود که این میزان افزایش در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب ۱۵/۸، ۳۷/۲ و ۱۸/۷ درصد بود. بین بقیه تیمارها، تفاوت معنی‌داری در میزان کارایی مصرف آب فتوسنتزی مشاهده نشد و کمترین میزان نرخ فتوسنتز و کارایی مصرف آب فتوسنتزی در تیمار N-Se4 مشاهده شد. هدایت روزنه‌ای، شاخص پایداری غشاء سلول و تنفس در تیمار Se3 بیشترین مقدار را داشت، به‌طوری که در

که DPPH_{sc} درصد بازدارندگی، A_{samp} میزان جذب (نمونه) + (DPPH) و A_{cont} میزان جذب DPPH است. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار 8 Statistix و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵٪ انجام شد.

نتایج

میزان فتوسنتز با کاهش و افزایش دما نسبت به شاهد افزایش داشت اما بین دو دما تغییر معنی‌داری دیده نشد. میزان افزایش فتوسنتز در دمای زیاد ۹/۸ درصد بود. هدایت روزنه‌ای، دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای، شاخص پایداری غشاء در هر دو تنش دمایی زیاد و کم کاهش یافت. در هدایت روزنه‌ای میزان کاهش در دمای زیاد بیش از دمای کم و به میزان ۵۰ درصد بود. اما در دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای و شاخص پایداری غشاء در تنش دمایی کم کاهش بیشتری (به ترتیب ۱۷/۲۴ و ۳۳/۳۳ درصد) نسبت به دمای زیاد داشت. تنش دمایی زیاد باعث کاهش ۱۸ درصدی و تنش دمایی کم افزایش ۹/۲ درصدی تنفس نسبت به شرایط بهینه را نشان داد. کارایی مصرف آب فتوسنتزی در تنش دمایی زیاد بیشترین و در تنش دمایی کم کمترین مقدار داشت. در دمای زیاد میزان کارایی مصرف آب فتوسنتزی ۱۶ درصد افزایش داشت. با تنش دمایی میزان هدایت مزوفیلی در هر دو تنش افزایش یافت، به‌طوری که میزان هدایت مزوفیلی در هر دو تنش دمایی افزایش ۲۷/۷ درصدی را نشان داد (جدول ۲).

پس از اعمال تنش، آن‌تی‌اکسیدان کل در تنش دمایی زیاد و

جدول ۳. تأثیر تنش دمایی بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی و فنل کل در دو مرحله اندازه‌گیری شده

تیمارهای دمایی	فعالیت آنتی‌اکسیدانی پس از تنش (µm)	فعالیت آنتی‌اکسیدانی پایانی (µm)	فنل کل پس از تنش (mg/l)	فنل کل در پایان آزمایش (mg/l)
T1	۶۹/۲۴ a	۶۸/۳۶a	۰/۷۶۵ a	۰/۷۳ a
T2	۶۸/۴۸ b	۶۱/۰۴ a	۰/۷۶۴ a	۰/۷۲ b
T3	۶۵/۲۵ c	۷۱/۱۸ a	۰/۷۶۲ b	۰/۷۳ a

حروف یکسان، سطح معنی‌داری مشابهی را توسط آزمون LSD در هر ستون نشان می‌دهند (T1) ۲۵ ± ۲ °C, (T2) ۴۰ °C, (T3) ۱۰ °C

جدول ۴. تأثیر سلنیم و نانوسلنیم بر شاخص‌های فتوسنتزی گوجه‌فرنگی

شاخص	کارایی مصرف آب فتوسنتزی (µmol CO ₂ /mol)	هدایت مزوفیلی (mmol/m ² .s)	دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای (µmol)	تنفس (mmol/m ² .s)	هدایت روزنه‌ای (mmol CO ₂ m ⁻² .s)	نرخ فتوسنتز (µmol CO ₂ m ⁻² .s)	تیمار
شاخص پایدارى غشا سلول (%)							Control
۵۶/۰۲ b	۱/۸۲ bc	۰/۰۱ e	۳۳۵/۵۰ a	۴/۰۷ c	۰/۱۲ b	۶/۶۰ e	Se1
۳۸/۷۳ g	۲/۱۴ ab	۰/۰۳ c	۳۰۷/۱۷ b	۴/۷۵ abc	۰/۱۶ ab	۱۰/۰۳ abc	Se2
۴۳/۷۶ f	۲/۰۵ ab	۰/۰۳ c	۳۱۱/۸۳ b	۴/۸۴ ab	۰/۱۶ ab	۹/۶۱ bc	Se3
۷۴/۱۳ a	۱/۹۰ abc	۰/۰۳ bc	۳۱۱/۸۳ b	۵/۴۸ a	۰/۱۸ a	۱۰/۴۵ ab	N-Se1
۴۶/۲۶ e	۲/۲۴ a	۰/۰۳ b	۳۰۰/۳۳ b	۴/۸۰ abc	۰/۱۶ ab	۱۰/۵۱ a	N-Se2
۴۷/۱۳ d	۲/۱۲ ab	۰/۰۴ a	۲۳۲/۱۷ d	۴/۵۸ bc	۰/۱۴ ab	۹/۲۷ c	N-Se3
۴۳/۹۰ f	۲/۱۲ ab	۰/۰۳ b	۲۷۵/۰۰ c	۴/۶۳ bc	۰/۱۳ ab	۹/۳۷ c	N-Se4
۴۸/۶۶ c	۱/۵۸ c	۰/۰۲ d	۳۱۳/۱۷ b	۵/۲۸ ab	۰/۱۶ ab	۸/۱۲ d	

حروف یکسان، سطح معنی‌داری مشابهی را توسط آزمون LSD در هر ستون نشان می‌دهند

۰ mM Se (C), ۲/۵ mM Se (Se1), ۵ mM Se (Se2), ۸ mM Se (Se3); ۱ µM nano-Se (N-Se1), ۴ µM nano-Se (N-Se2),

۸ µM nano-Se (N-Se3), ۱۲ µM nano-Se (N-Se4).

تنش در تیمار Se3 بیشترین میزان بود، به‌طوری که میزان آنتی‌اکسیدان و فنل کل پس از تنش به‌ترتیب ۱۷/۵ و ۰/۲ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد. کمترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی و فنل کل پس از تنش در تیمار N-Se2 مشاهده شد که این کاهش به‌ترتیب ۲۶/۹ و ۲/۱ درصد بود. اما در زمان ترمیم، تغییرات معنی‌داری در تیمارهای ذکر شده مشاهده نشد. با این حال، کمترین میزان فنل کل در تیمار N-Se1 بود (جدول ۵).

با توجه به شکل (۱)، میزان فتوسنتز در تیمار شاهد تحت

تیمار Se3، ۳۳/۳۳ درصد افزایش هدایت روزنه‌ای را نسبت به تیمار شاهد مشاهده کردیم. این افزایش تنفس در تیمار Se3 برابر ۲۵/۷ درصد بود. دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای در شاهد بیشترین میزان را داشت و با افزایش غلظت سلنیم تغییر معنی‌داری مشاهده نشد. هدایت مزوفیلی در حضور سلنیم تغییر معنی‌داری نشان نداد و نانوسلنیم در ابتدا هدایت مزوفیلی را افزایش و سپس کاهش داد، به‌طوری که کمترین میزان در تیمار N-Se4 مشاهده شد (جدول ۴).

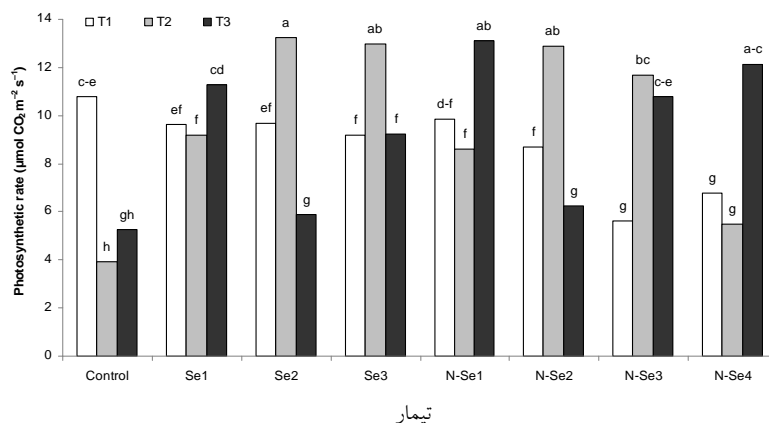
فعالیت آنتی‌اکسیدانی و فنل کل بلافاصله بعد از اعمال

جدول ۵. تأثیر سلنیم و نانوسلنیم بر فنل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه در دو مرحله اندازه‌گیری شده

تیمارهای سلنیم	فعالیت آنتی‌اکسیدانی پس از تنش (μm)	فعالیت آنتی‌اکسیدانی فنل کل پس از تنش (mg/l)	فنل کل پایان آزمایش (mg/l)
Control	۶۴/۷۵ f	۶۰/۵۱ a	۰/۷۲ ab
Se۱	۶۱/۸۶ g	۶۸/۲۵ a	۰/۷۳ ab
Se۲	۶۷/۹۰ e	۷۴/۹۸ a	۰/۷۴ a
Se۳	۷۸/۵۳ a	۷۱/۴۱ a	۰/۷۳ a
N-Se۱	۶۹/۹۶ d	۵۴/۱۱ a	۰/۷۱ b
N-Se۲	۴۷/۳۰ h	۷۱/۷۶ a	۰/۷۳ a
N-Se۳	۷۴/۵۶ c	۷۶/۰۵ a	۰/۷۳ a
N-Se۴	۷۶/۴۰ b	۵۷/۸۳ a	۰/۷۲ ab

حروف یکسان، سطح معنی‌داری مشابهی را توسط آزمون LSD در هر ستون نشان می‌دهند

۰ mM Se (C), ۲/۵ mM Se (Se۱), ۵ mM Se (Se۲), ۸ mM Se (Se۳); ۱ μM nano-Se (N-Se۱), ۴ μM nano-Se (N-Se۲), ۸ μM nano-Se (N-Se۳), ۱۲ μM nano-Se (N-Se۴)/



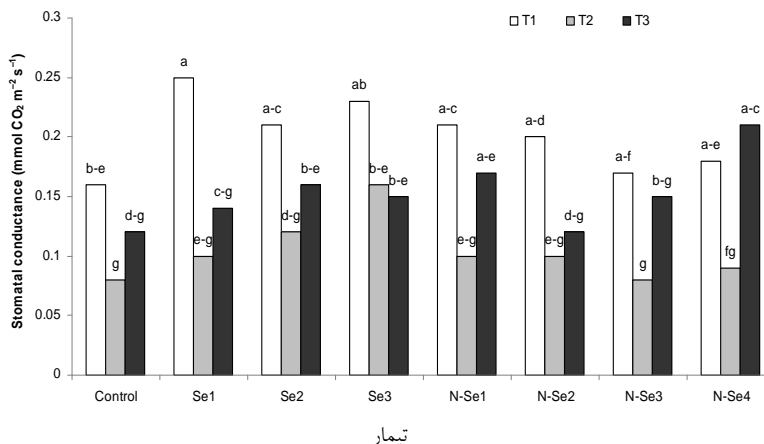
شکل ۱. اثر متقابل سلنیم/ نانوسلنیم و تنش دمایی بر نرخ فتوسنتز اندازه‌گیری شده در پایان آزمایش

۰ mM Se (C), ۲/۵ mM Se (Se۱), ۵ mM Se (Se۲), ۸ mM Se (Se۳); ۱ μM nano-Se (N-Se۱), ۴ μM nano-Se (N-Se۲), ۸ μM nano-Se (N-Se۳), ۱۲ μM nano-Se (N-Se۴); ۲۵ ± ۲°C (T1), ۴۰°C (T۲; تنش دمایی زیاد), ۱۰°C (T۳; تنش دمایی کم)

یافت. تیمار Se۲ باعث افزایش ۲۶/۹۲ درصدی میزان فتوسنتز تحت شرایط تنش دمایی زیاد شد. در تنش دمایی کم هم با کاربرد سلنیم و نانوسلنیم در کلیه تیمارها افزایش نرخ فتوسنتز را شاهد بودیم. هرچند که در تیمارهای Se۲ و N-Se۲ این افزایش معنی‌دار نبود (شکل ۱).

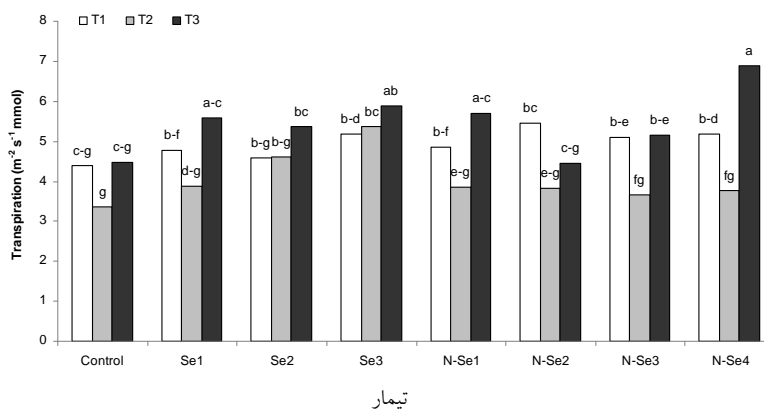
همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، میزان هدایت

تنش دمایی زیاد و کم کاهش داشت و کاربرد سلنیم و نانوسلنیم به‌طور کلی باعث ادامه فتوسنتز در شرایط تنش دمایی، به‌خصوص نسبت به تنش دمایی زیاد، شده است. به‌طوری که با افزایش غلظت سلنیم و نانوسلنیم، میزان فتوسنتز تحت تنش دمایی زیاد ادامه یافته است. میزان نرخ فتوسنتز در کلیه تیمارها با کاربرد سلنیم و نانوسلنیم تحت تنش دمایی زیاد افزایش



شکل ۲. اثر متقابل سلنیم / نانوسلنیم و تنش دمایی بر هدایت روزنه‌ای اندازه‌گیری شده در پایان آزمایش

◦ mM Se (C), ۲/۵ mM Se (Se۱), ۵ mM Se (Se۲), ۸ mM Se (Se۳); ۱ μM nano-Se (N-Se۱), ۴ μM nano-Se (N-Se۲), ۸ μM nano-Se (N-Se۳), ۱۲ μM nano-Se (N-Se۴); ۲۵ ± ۲°C (T1), ۴۰°C (T۲; تنش دمایی زیاد), ۱۰°C (T۳; تنش دمایی کم)

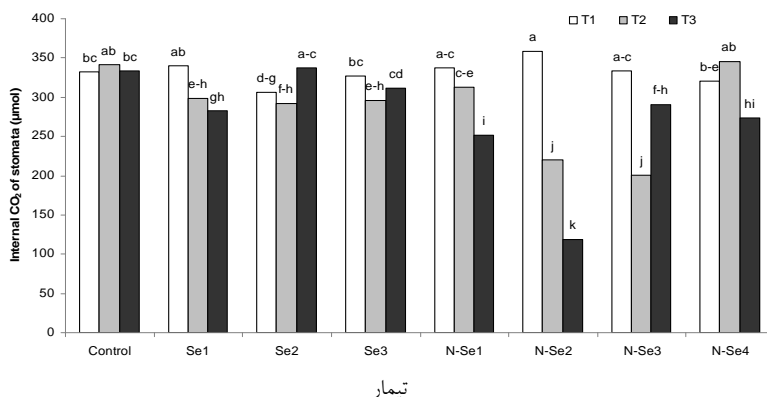


شکل ۳. اثر متقابل سلنیم / نانوسلنیم و تنش دمایی بر تنفس اندازه‌گیری شده در پایان آزمایش

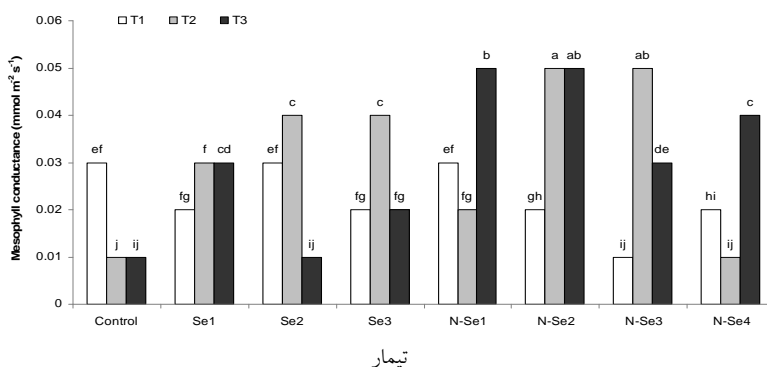
◦ mM Se (C), ۲/۵ mM Se (Se۱), ۵ mM Se (Se۲), ۸ mM Se (Se۳); ۱ μM nano-Se (N-Se۱), ۴ μM nano-Se (N-Se۲), ۸ μM nano-Se (N-Se۳), ۱۲ μM nano-Se (N-Se۴); ۲۵ ± ۲°C (T1), ۴۰°C (T۲; تنش دمایی زیاد), ۱۰°C (T۳; تنش دمایی کم)

با توجه به شکل (۳)، تغییرات تنفس تحت تنش دمایی، اختلاف معنی‌داری را نشان نداد. میزان تنفس با افزایش غلظت سلنیم تحت تنش دمایی زیاد افزایش یافت و میزان تنفس با کاربرد نانوسلنیم در دمای زیاد کاهش پیدا کرد؛ هر چند که این کاهش تنفس معنی‌دار نبود. همچنین، با کاربرد سلنیم در تنش دمایی کم، میزان تنفس زیاد شد و در تیمار N-Se۴ تحت تنش دمایی کم، بیشترین میزان تنفس را شاهد بودیم. کاربرد نانومواد باعث کاهش تنفس در شرایط تنش دمایی زیاد نسبت به کاربرد سلنیم شد (شکل ۳).

روزنه‌ای در شرایط تنش دمایی کاهش یافته است. در تیمار شاهد، مطابق این شکل، تنش دمایی زیاد تأثیر بیشتری در هدایت روزنه‌ای داشته و به میزان ۵۰٪ این فاکتور را کاهش داده است. کاهش هدایت روزنه‌ای بر اثر تنش دمایی کم به میزان ۲۵٪ بود. هدایت روزنه‌ای با کاربرد سلنیم و نانوسلنیم تحت تنش دمایی زیاد در کلیه تیمارها، به‌جز N-Se۳ و N-Se۴ افزایش یافت و در تنش دمایی کم هم به‌جز تیمار N-Se۲، در کلیه تیمارها افزایش هدایت روزنه‌ای را شاهد بودیم (شکل ۲).



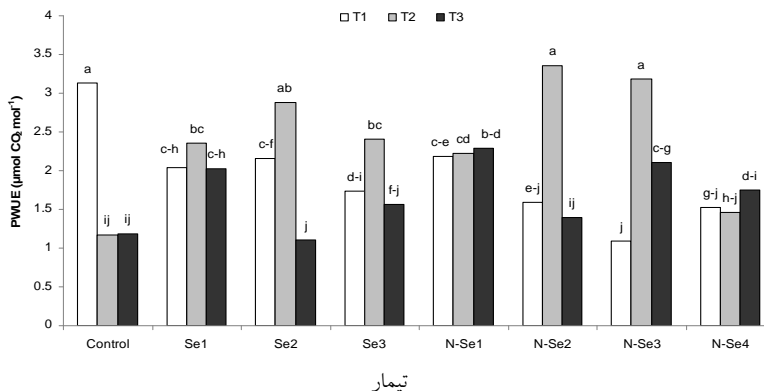
شکل ۴. اثر متقابل سلنیم / نانو سلنیم و تنش دمایی بر دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای اندازه‌گیری شده در پایان آزمایش
 ° mM Se (C), ۲/۵ mM Se (Se۱), ۵ mM Se (Se۲), ۸ mM Se (Se۳); ۱ µM nano-Se (N-Se۱), ۴ µM nano-Se (N-Se۲),
 ۸ µM nano-Se (N-Se۳), ۱۲ µM nano-Se (N-Se۴); ۲۵ ± ۲°C (T۱), ۴۰°C (T۲); (تنش دمایی زیاد; ۱۰°C (T۳); (تنش دمایی کم)



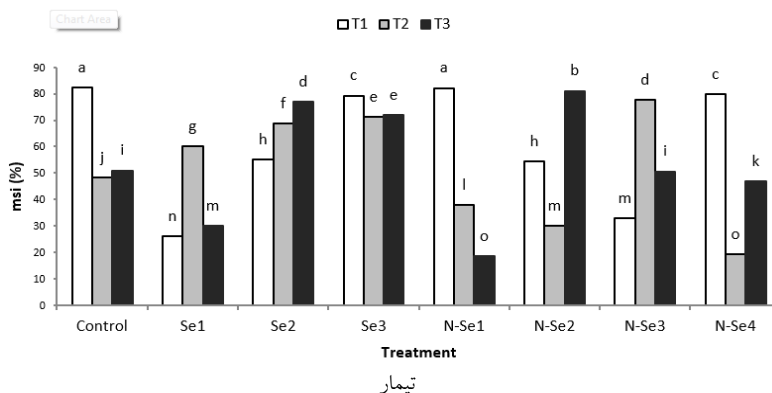
شکل ۵. اثر متقابل سلنیم / نانو سلنیم و تنش دمایی بر هدایت مزوفیلی اندازه‌گیری شده در پایان آزمایش
 ° mM Se (C), ۲/۵ mM Se (Se۱), ۵ mM Se (Se۲), ۸ mM Se (Se۳); ۱ µM nano-Se (N-Se۱), ۴ µM nano-Se (N-Se۲),
 ۸ µM nano-Se (N-Se۳), ۱۲ µM nano-Se (N-Se۴); ۲۵ ± ۲°C (T۱), ۴۰°C (T۲); (تنش دمایی زیاد; ۱۰°C (T۳); (تنش دمایی کم)

آنچه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، کاهش هدایت مزوفیلی تحت شرایط تنش دمایی در تیمار شاهد است. هدایت مزوفیلی با کاربرد سلنیم و نانو سلنیم در تنش دمایی زیاد در کلیه تیمارها، به جز تیمار N-Se۴، افزایش معنی‌داری داشت و در تنش سرما، به جز تیمار Se۲، نسبت به شاهد افزایش یافت. کاربرد سلنیم و نانو سلنیم توانسته است تا حدی هدایت مزوفیلی را تحت شرایط تنش بهبود بخشد. بیشترین میزان هدایت مزوفیلی در تیمار N-Se۱ در شرایط تنش سرما مشاهده گردید (شکل ۵).
 کارایی مصرف آب فتوسنتزی تحت تأثیر تنش دمایی قرار گرفت، به طوری که در تیمار شاهد، با ایجاد تنش دمایی،

با مقایسه تغییرات دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای مشاهده شد که در تیمار شاهد با افزایش یا کاهش دما، دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای تحت تأثیر قرار نگرفت و از نظر آماری معنی‌دار نبود. با کاربرد سلنیم و نانو سلنیم تحت تنش دمایی زیاد در کلیه تیمارها، به جز تیمار N-Se۴، کاهش دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای را شاهد بودیم. در شرایط تنش دمایی کم نیز با کاربرد سلنیم و نانو سلنیم در کلیه تیمارها، به جز Se۲، کاهش دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای را مشاهده کردیم (شکل ۴). کمترین میزان دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای تحت تنش دمایی کم در تیمار N-Se۲ به میزان ۶۹٪ مشاهده شد.



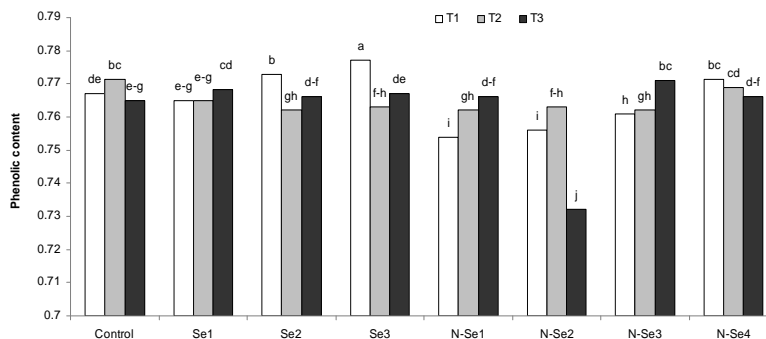
شکل ۶. اثر متقابل سلنیم / نانوسلنیم و تنش دمایی بر کارایی مصرف آب فتوسنتزی اندازه‌گیری شده در پایان آزمایش
 • mM Se (C), ۲/۵ mM Se (Se₁), ۵ mM Se (Se₂), ۸ mM Se (Se₃); ۱ µM nano-Se (N-Se₁), ۴ µM nano-Se (N-Se₂),
 ۸ µM nano-Se (N-Se₃), ۱۲ µM nano-Se (N-Se₄); ۲۵ ± ۲°C (T1), ۴۰°C (T2); (تنش دمایی زیاد), ۱۰°C (T3); (تنش دمایی کم)



شکل ۷. اثر متقابل سلنیم / نانوسلنیم و تنش دمایی بر شاخص پایداری غشاء سلول اندازه‌گیری شده در پایان آزمایش
 • mM Se (C), ۲/۵ mM Se (Se₁), ۵ mM Se (Se₂), ۸ mM Se (Se₃); ۱ µM nano-Se (N-Se₁), ۴ µM nano-Se (N-Se₂),
 ۸ µM nano-Se (N-Se₃), ۱۲ µM nano-Se (N-Se₄); ۲۵ ± ۲°C (T1), ۴۰°C (T2); (تنش دمایی زیاد), ۱۰°C (T3); (تنش دمایی کم)

شاخص پایداری غشا تحت تأثیر تنش دمایی قرار گرفت، به طوری که این شاخص تحت تنش در تیمار شاهد به شدت کاهش یافت. با افزایش غلظت سلنیم، روند افزایشی را در رابطه با تیمار تنش دمایی زیاد شاهد بودیم. در تنش دمایی زیاد، با کاربرد نانوسلنیم، شاخص پایداری غشا در کلیه تیمارها، به جز در تیمار N-Se₃، کاهش یافت. شاخص پایداری غشا با کاربرد سلنیم تحت تنش دمایی کم در تیمارهای Se₂ و Se₃ افزایش یافت و با کاربرد نانوسلنیم تنها در تیمار N-Se₂ افزایش را مشاهده کردیم (شکل ۷).

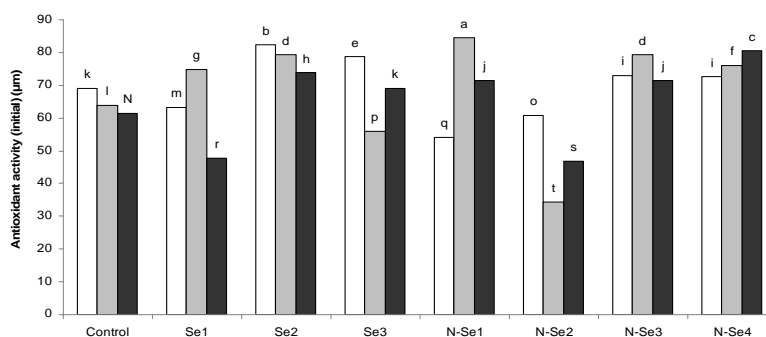
مصرف آب فتوسنتزی به میزان ۶۱/۲ درصد کاهش معنی‌دار نشان داد (شکل ۶). در مقابل با کاربرد سلنیم و نانوسلنیم، کارایی مصرف آب فتوسنتزی در شرای تنش دمایی در کلیه تیمارها بهبود یافت و گیاه توانست در شرایط تنش هم کارایی مصرف آب فتوسنتزی را حفظ کند. با کاربرد سلنیم و نانوسلنیم در کلیه تیمارها، به جز Se₂، در شرایط تنش دمایی کم، افزایش کارایی مصرف آب فتوسنتزی را شاهد بودیم. بیشترین میزان کارایی در تیمار نانوسلنیم تحت شرایط تنش دمایی زیاد مشاهده شد (شکل ۶).



تیمار

شکل ۸. اثر متقابل سلنیم/ نانو سلنیم و تنش دمایی بر میزان فنل کل اندازه‌گیری شده پس از تنش

• mM Se (C), ۲/۵ mM Se (Se۱), ۵ mM Se (Se۲), ۸ mM Se (Se۳); ۱ µM nano-Se (N-Se۱), ۴ µM nano-Se (N-Se۲), ۸ µM nano-Se (N-Se۳), ۱۲ µM nano-Se (N-Se۴); ۲۵ ± ۲°C (T1), ۴۰°C (T۲), ۱۰°C (T۳; تنش دمایی کم)



تیمار

شکل ۹. اثر متقابل سلنیم/ نانو سلنیم و تنش دمایی بر میزان فعالیت آنتی‌اکسیدان اندازه‌گیری شده

• mM Se (C), ۲/۵ mM Se (Se۱), ۵ mM Se (Se۲), ۸ mM Se (Se۳); ۱ µM nano-Se (N-Se۱), ۴ µM nano-Se (N-Se۲), ۸ µM nano-Se (N-Se۳), ۱۲ µM nano-Se (N-Se۴); ۲۵ ± ۲°C (T1), ۴۰°C (T۲), ۱۰°C (T۳; تنش دمایی کم)

هم در تنش سرما و هم در تنش گرما مشاهده کردیم (شکل ۸). تغییرات اثر متقابل فنل پس از ترمیم معنی‌دار نشد. به همین دلیل از آوردن جدول مربوطه خودداری شد.

با توجه به شکل (۹)، تغییرات فعالیت آنتی‌اکسیدان پس از اعمال تنش دمایی معنی‌دار بود، به طوری که تنش دمایی زیاد و کم باعث کاهش میزان آنتی‌اکسیدان در تیمار شاهد شد. این میزان کاهش آنتی‌اکسیدان در تنش دمایی زیاد و کم به ترتیب ۱۰/۱ و ۱۱/۵ درصد بود. میزان فعالیت آنتی‌اکسیدان با کاربرد سلنیم و نانو سلنیم در کلیه تیمارها، به جز Se۳ و N-Se۲، در

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، تغییرات فنل پس از اعمال تنش دمایی تغییر می‌کند، به طوری که در تیمار شاهد در تنش دمایی زیاد، میزان فنل افزایش معنی‌داری نشان داد. میزان فنل تحت تنش دمایی کم در تیمار شاهد کاهش پیدا کرد. ولی این کاهش از نظر آماری معنی‌دار نبود. با کاربرد سلنیم و نانو سلنیم تحت تنش دمایی زیاد، در کلیه تیمارها کاهش میزان فنل مشاهده شد. از طرفی، با کاربرد سلنیم و نانو سلنیم در کلیه تیمارها، به جز تیمار N-Se۲، افزایش میزان فنل مشاهده شد. با کاربرد نانو سلنیم با غلظت ۱ میکرومولار افزایش میزان فنل را

می‌رسد در آزمایش حاضر بهترین غلظت و تیمار به‌کار رفته در شرایط تنش دمایی باشد. سلنیم در غلظت‌های کم، رشد گیاه را تحریک می‌کند. اما در غلظت‌های زیاد به عنوان یک اکسیدان عمل می‌کند و عملکرد را کاهش می‌دهد (۹). در مقابل، در کمترین سطح کاربرد نانوسلنیم (۱ میکرومولار) نتایج بهتری را شاهد بودیم، به طوری که بیشترین میزان فتوسنتز و کارایی مصرف آب فتوسنتزی در این تیمار مشاهده شد که برحسب اطلاع نویسندگان، تحقیقی در خصوص اثر نانوسلنیم بر خصوصیات رشدی گیاه تحت شرایط تنش، جهت مقایسه با نتایج این آزمایش صورت نگرفته است اما به نظر می‌رسد که با توجه به اثرهای مثبت ذرات نانو در غلظت‌های کم، مؤثرتر از کاربرد سلنیم باشد و بهترین نتایج در تیمار ۱ میکرومولار نانوسلنیم مشاهده شد.

جاناگویرامن و همکاران (۱۰) در مطالعه خود، کاهش ۷۰ درصدی در میزان هدایت روزنه‌ای گیاه سورگوم را ۴۵ روز پس از اعمال تنش دمایی گزارش کردند. مطابق با این نتایج، تنش دمایی زیاد باعث کاهش ۵۰ درصدی و تنش سرما باعث کاهش ۲۵ درصدی هدایت روزنه‌ای شد. طبق بررسی‌های انجام شده، تنش‌های غیر زیستی بر میزان دی‌اکسید کربن داخل روزنه‌ای اثر دارد (۵). در حالی که در آزمایش حاضر، تفاوت معنی‌داری در میزان دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای مشاهده نشد. اما هدایت مزوفیلی تحت تنش دمایی به شدت کاهش یافت که با کاربرد سلنیم، هدایت مزوفیلی تحت تنش دمایی زیاد افزایش داشت و نانوسلنیم ۱ میکرومولار توانست تحت تنش دمایی کم، هدایت مزوفیلی را بهبود بخشد.

کارایی مصرف آب در شرایط تنش، عملکرد گیاهان را بهبود می‌بخشد و به عنوان یک صفت مطلوب برای ایجاد تحمل به تنش در گیاهان در مطالعات مد نظر می‌باشد. گیاهانی که از کارایی مصرف آب زیادتری برخوردار هستند به ازای مصرف آب کمتر، تولید بیشتری دارند (۴). در این پژوهش، تنش دمایی کم باعث کاهش ۱۳/۴ درصدی این شاخص در گوجه‌فرنگی شد که این کاهش نشان دهنده حساسیت

تنش دمایی زیاد افزایش یافت و در رابطه با تنش دمایی کم در کلیه تیمارها، به جز Se1 و N-Se2، کاهش تغییرات آنتی‌اکسیدان مشاهده شد. در تیمارهای نانوسلنیم، با اعمال تنش، تیمار N-Se1 توانست افزایش معنی‌داری در میزان آنتی‌اکسیدان نشان دهد، به طوری که بیشترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدان در شرایط دمای زیاد در این تیمار مشاهده شد. فعالیت آنتی‌اکسیدان در تنش دمای زیاد در تیمار ۱ میکرومولار نانوسلنیم به میزان ۳۵/۲ درصد و در شرایط تنش دمای کم ۲۱/۴ درصد افزایش نشان داد (شکل ۹). تغییرات میزان فعالیت آنتی‌اکسیدان در پایان آزمایش معنی‌دار نبود. به همین دلیل از آوردن شکل مربوطه خودداری شد.

بحث

اثر سلنیم و نانوسلنیم تحت تنش دمایی بر تغییرات فتوسنتزی گوجه‌فرنگی

تنش دمایی منجر به آثار منفی روی فیزیولوژی، مورفولوژی و در نتیجه عملکرد اغلب گیاهان می‌شود (۲ و ۲۱). در بررسی‌های انجام شده، مشخص شده که تنش دمایی زیاد (۳۰/۴۰ درجه سلسیوس روز/ شب برای ۴۵ روز) تأثیر منفی بر شاخص‌های فتوسنتزی گیاه سورگوم داشت (۷ و ۲۴). آلن و اورت (۲) گزارش دادند که گیاه گوجه‌فرنگی تحت تنش سرما با کاهش رشد و محصول همراه بود و تنش دمایی از عوامل مهم تغییر و تنوع میزان برداشت است. تنش دمایی زیاد، بیشترین اثر را روی فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای و تبادلات گازی روزنه دارد (۵ و ۸).

بک و همکاران (۴) گزارش کردند که گیاه برنج تحت تنش سرما با کاهش میزان کلروفیل همراه بود، که باعث کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شود. مطابق با این نتایج، در آزمایش حاضر، تنش دمایی باعث کاهش میزان فتوسنتز در گوجه‌فرنگی شد. نرخ فتوسنتز با افزایش غلظت سلنیم تحت تنش دمای زیاد افزایش داشت. کاربرد نانوسلنیم به میزان ۱ میکرومولار (N-Se1) بیشترین اثر را در میزان فتوسنتز داشت که به نظر

تنش گرمایی نشان دادند (نسبت به دمای بهینه به ترتیب ۱ و ۵/۷ درصد کاهش). البته، بعد از گذشت ۱۰ روز از تنش و بازگشت به شرایط بهینه، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای تنش مشاهده نشد که به نظر می‌رسد گیاه اثر تنش را بهبود بخشیده و سطح آنتی‌اکسیدان به شرایط معمول برگشته است.

بررسی تغییرات فنل کل نشان داد که با افزایش سطح تنش خشکی، به‌طور معنی‌داری از مقدار فنل کل در برگ‌های سیب‌زمینی کاسته شد (۱۱). در تأیید این نتیجه، در بررسی که روی فنل گوجه‌فرنگی در واکنش به تنش دمایی انجام شد، از میزان این فاکتور تحت تنش دمایی کم کاسته شد. به علاوه اینکه، بعد از اندازه‌گیری نهایی نیز تنش دمایی زیاد باعث کاهش سطح فنل شد.

عنصر سلنیم دارای خصوصیات آنتی‌اکسیدانی است و می‌تواند مکانیسم‌های محافظی که کاهش‌دهنده تنش‌ها هستند را از طریق راه‌های آنزیمی و غیر آنزیمی و کاهش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن فعال کند (۱۹). سلنیم یک نقش آنتی‌اکسیدانی مهم با بیان ژن کنترل تولید گوگرد در گیاهان دارد (۱۰). در گیاه توت‌فرنگی، سلنیم باعث افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود (۲۰). سلنیم در غلظت‌های کم به عنوان یک آنتی‌اکسیدان عمل کرده و باعث افزایش رشد گیاه می‌شود. در حالی که غلظت‌های زیاد باعث ایجاد سمیت و کاهش عملکرد در گیاه می‌شود (۱۸). راون (۲۵) بیان کرد که سمیت سلنیم در غلظت‌های زیاد، در گیاهان حساس به سلنیم، ممکن است باعث جایگزینی سلنیم با گوگرد موجود در آمینو اسیدهای سیستین و متیونین شود که باعث تغییر ساختار و فعالیت پروتئینی شده و در نتیجه تأثیر منفی بر رشد گیاه دارد. در تأیید این ویژگی، بهترین نتیجه با کاربرد سلنیم به‌صورت نانو در تیمار N-Se1 مشاهده شد که باعث افزایش ترکیبات فنلی و آنتی‌اکسیدانی تحت تنش دمایی شد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، از آزمایش حاضر می‌توان نتیجه گرفت که تنش

گوجه‌فرنگی به دمای کم است و بیشترین کارایی مصرف آب فتوسنتزی مربوط به تیمار تنش دمایی زیاد بود. به‌نظر می‌رسد که تفاوت در کارایی مصرف آب فتوسنتزی در پاسخ به شرایط تنش دمایی به دلیل تفاوت در سطح دیواره سلولی، غشای سلولی و اندامک‌ها باشد (۶). در شرایط تنش، فتوسنتز و کارایی مصرف آب فتوسنتزی ارقام مقاوم بیشتر از ارقام حساس است. در بین فاکتورهای فتوسنتزی میزان نرخ فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای و کارایی مصرف آب فتوسنتزی و دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای بیش از سایر عوامل تحت تأثیر تنش دمایی قرار گرفتند. تنش دمایی کم، آثار مخرب بیشتری بر این فاکتورها در گوجه‌فرنگی داشت. با کاربرد سلنیم و نانوسلنیم، میزان کارایی مصرف آب تحت تنش دمایی زیاد افزایش یافت.

بهره‌گیری از تعیین نشت الکترولیت‌ها و محاسبه شاخص پایداری غشا یکی از پرکاربردترین نشانگرهایی است که برای تخمین میزان اثر فرایندهای تخریب‌گر غشا در بافت‌های گیاهی، تحت تأثیر عوامل نامساعد محیطی، مورد استفاده قرار می‌گیرد (۹). کاهش میزان شاخص پایداری غشا تحت تأثیر تنش غیرزیستی انجام گرفته روی نخود (۱۹) گزارش شده است. در تأیید این نتایج، تنش دمایی کم و بعد تنش دمایی زیاد در گوجه‌فرنگی، شاخص پایداری غشا را به ترتیب به میزان ۳۳/۳ و ۸ درصد کاهش دادند.

اثر سلنیم و نانوسلنیم تحت تنش دمایی بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی گوجه‌فرنگی

جاناگورامان و همکاران (۱۰) نشان دادند که تنش دمایی زیاد (۳۰ و یا ۴۰ درجه سانتی‌گراد) باعث کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سورگوم می‌شود، که این کاهش به‌خاطر کاهش آسیمیلایسیون می‌باشد. در تأیید این نتیجه، این آزمایش نیز که روی تنش دمایی انجام گرفت تفاوت معنی‌داری بین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی بعد از تنش را نشان داد، به‌طوری که بعد از تنش، بیشترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی را تیمار شاهد و کمترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی را تنش سرمایی و سپس

تنش دمایی کم روند بهتری را نشان داد. میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی و فنل در تیمار N-Se₁ روند بهتری را داشت. به‌طور کلی، سطوح زیاد نانوسلنیم N-Se₄ به‌دلیل اثرگذاری نامناسب و احتمالاً مخرب قابل توصیه نبوده و با توجه به اثر پذیری بهتر N-Se₁ به‌دلیل خاصیت نانو، کاربرد این تیمار برای کاربرد توصیه می‌شود.

دمایی اثرهای منفی بر خصوصیات رشدی و فتوسنتزی گیاه داشته است و این اثرها در برخی موارد مانند هدایت روزنه‌ای، دی‌اکسید کربن درون روزنه‌ای و آنتی‌اکسیدان در تنش سرما بیش از تنش گرما بوده است. تحت تنش دمایی در گوجه‌فرنگی، میزان فتوسنتز، تنفس و هدایت مزوفیلی در تیمار Se₁ نسبت به بقیه تیمارها روند بهتری را نشان داد و شاخص پایداری غشا در Se₂ بهتر بود. در رابطه با کاربرد نانوسلنیم می‌توان گفت که میزان هدایت مزوفیلی در تیمار N-Se₁ تحت

منابع مورد استفاده

- Ahmadi, A. and A. Siosemardeh. 2005. Investigation on the physiological basis of grain yield and drought resistance in wheat: Leaf photosynthetic rate, SC, and non-stomatal limitations. *Int. J. Agric. Biol.* 7(5): 807-811.
- Allen, D.J. and D.R. Ort. 2001. Impact of chilling temperature on photosynthesis in warm climate plants. *Trends Plant Sci.* 6: 36-42.
- Aloni, B., M.M. Peet, M. Pharr and L. Karni. 2001. The effect of high temperature and high atmospheric CO₂ on carbohydrate changes in bell pepper (*capsicum annum*) pollen in relation to its germination. *Physiol. Plant.* 112: 505-512.
- Beck, E.H., R. Heim and J. Hansen. 2004. Plant resistance to cold stress: Mechanisms and environmental signals triggering frost hardening and dehardening. *J. Biol. Sci.* 29: 449-459.
- Benton, J. 1930. *Tomato Plant Culture in the Field, Greenhouse, and Home Garden.* 2nd Ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 422 p.
- Cardona, C.A., R.R. Duncan and O. Lindstrom. 1997. Low temperature tolerance assessment in Paspalum. *Crop Sci.* 37: 1283-1291.
- Cartes, P., A. Jara, L. Pinilla, A. Rosas and M. Mora. 2010. Selenium improves the antioxidant ability against aluminium-induced oxidative stress in ryegrass roots. *Ann. Appl. Biol.* 156: 297-307.
- Dewanto, V., X. Wu, K. Adom and R.H. Liu. 2002. Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *J. Agric. Food Chem.* 50: 3010-3014.
- Djanaguiraman, M., A.K. Shanker, J.A. Sheeba, D.D. Devi and U. Bangarusamy. 2005. Selenium an antioxidative protectant in soybean during senescence. *Plant Soil* 272: 77-86.
- Djanaguiraman, M., P.V.V. Prasad and M. Seppanen. 2010. Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage under high temperature stress by enhancing antioxidant defense system. *Plant Physiol. Biochem.* 48: 999-1007.
- Germ, M. 2008. The response of two potato cultivars on combined effects of selenium and drought. *Acta Agric. Slov.* 91: 121-137.
- Haghighi M, Teixeira da Silva J A (2014). Influence of selenium on cadmium toxicity in cucumber (*Cucumissativus* cv. '4200') at an early growth stage in a hydroponic system. *Comm Soil Sci Plant Anal.* 2(47):142-155. Haghighi, M., S. Heidarian and J.A. Teixeira da Silva. 2012. The effect of titanium amendment in N-withholding nutrient solution on physiological and photosynthesis attributes and micro-nutrient uptake of tomato. *Biol. Trace Elem. Res.* 150(1): 381-390.
- Hajiboland, R. 2012. Effects of micronutrient deficiencies on plants stress responses. PP. 282-326. *In: Parvaiz, A. and M.N.V. Prasad (Eds.), Abiotic Stress Responses in Plants: Metabolism, Productivity and Sustainability,* Springer Verlag.
- Hajiboland, R. and L. Amjad. 2007. Does antioxidant capacity of leaves play a role in growth response to selenium at different sulfur nutritional status? *Plant Soil Environ.* 53: 207-215.
- Hajiboland, R. and N. Keivanfar. 2012. Selenium supplementation stimulates vegetative and reproductive growth in canola (*Brassica napus* L.) plant. *Acta Agric. Slov.* 99: 13-19.
- Hartikainen, H., T. Xue and V. Piironen. 2000. Selenium as an anti-oxidant and pro-oxidant in ryegrass. *Plant Soil* 225: 193-200.

17. Hartikainen, H. and T. Xue. 1999. The promotive effect of selenium on plant growth as triggered by ultraviolet irradiation. *J. Environ. Qual.* 28: 1272-1275.
18. Hawrylak-Nowak, B. 2009. Beneficial effects of exogenous selenium in cucumber seedlings subjected to salt stress. *Biol. Trace Elem. Res.* 132: 259-269.
19. Heijari, J., M. Kivimäenpää, H. Hartikainen, R. Julkunen-Tiitto and A. Wulff. 2006. Responses of strawberry (*Fragaria×ananassa*) to supplemental UV-B radiation and selenium under field conditions. *Plant Soil* 28: 27-39.
20. Hossain, A., M.A.Z. Sarker, M. Saifuzzaman, J.A. Teixeira da Silva, M.V. Lozovskaya and M.M. Akhter. 2013. Evaluation of growth, yield, relative performance and heat susceptibility of eight wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes grown under heat stress. *Int. J. Plant Prod.* 7(3): 615-636.
21. Moulehi, I., S. Bourgou, I. Ourghemmi and M.S. Tounsi. 2012. Variety and ripening impact on phenolic composition and antioxidant activity of mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) and bitter orange (*Citrus aurantium* L.) seeds extracts. *Indus. Crops Prod.* 39: 74-80.
22. Oktay, M., I. Gulcin and O.I. Kufrevioglu. 2003. Determination of *in vitro* antioxidant activity of fennel (*Foeniculum vulgare*) seed extracts. *J. Food Sci. Technol.* 36: 263-271.
23. Prasad, P.V.V., S.R. Pisipati, R.N. Mutava and M.R. Tuinstra. 2008. Sensitivity of grain sorghum to high temperature stress during reproductive development. *Crop Sci.* 48: 1911-1917.
24. Raven, J.A. 2003. Cycling silicon: The role of accumulation in plants. *J. New Phytol.* 158: 419-430.
25. Ruffini, C.M. and R. Cremonini. 2009. Nanoparticles and higher plants. *Caryologia* 62(2): 161-165.