

تأثیر محلول پاشی نانوذرات سلنیوم (SeNPs) بر ویژگی‌های ظاهری و بیوشیمیایی گیاه سرخارگل (*Echinacea purpurea*) تحت تنش خشکی

چکیده

به منظور بررسی تأثیر محلول پاشی نانوذرات سلنیوم بر کاهش اثر منفی تنش خشکی در گیاه سرخارگل (*Echinacea purpurea*) رقم Rose Carmine، پژوهشی به صورت کرت خرد شده در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه (مرحله نشا تا دو ماه) و سپس در زمین‌های زراعی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه انجام شد. تیمارهای تنش خشکی (تیمار اصلی) بر اساس ظرفیت زراعی خاک و در چهار سطح ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه به روش سنجش رطوبت خاک در عمق ریشه و با استفاده از دستگاه TDR اعمال شدند. تیمار نانوذرات سلنیوم (تیمار فرعی) نیز همزمان با اعمال سطوح مختلف تنش خشکی، بصورت محلول پاشی برگ‌ی و در چهار سطح صفر (شاهد)، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در لیتر و با فواصل دو هفته‌ای و در یک دوره سه ماهه اعمال گردید. نتایج نشان داد که بیش‌ترین میزان انباشت پرولین ($0.73 \mu\text{mol/g}$) در تیمار محلول پاشی ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، کم‌ترین مقدار انباشت مالون‌دی آلدی‌هید ($0.8 \mu\text{mol/g}$) در تیمار محلول پاشی ۵ میلی گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۲۰ درصد ظرفیت زراعی و بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز ($2/5 \mu\text{mol/g}$) در تیمار محلول پاشی ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۲۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد که اختلاف معناداری با نمونه شاهد نشان داد. با توجه به نتایج کلی مطالعه مشخص شد که محلول پاشی نانو سلنیوم توانسته تأثیر مثبتی در افزایش میزان تحمل گیاه در شرایط تنش داشته و در نتیجه عملکرد و صفات رشد رویشی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح آبیاری و تیمار محلول پاشی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: تنش غیرزنده، ذرات نانو، گیاه دارویی، خواص آنتی‌اکسیدانی

The effect of foliar application of selenium nanoparticles (SeNPs) on the appearance and biochemical characteristics of *Echinacea purpurea* under drought stress

ABSTRACT

To investigate the effect of selenium nanoparticle foliar application on mitigating the negative impact of drought stress in *Echinacea purpurea*, cultivar Rose Carmine, a study was conducted as a split-plot based on a completely randomized design with three replications. The research was carried out in a greenhouse (from seedling stage to two months) and subsequently in the agricultural fields of the faculty of agriculture at Urmia University. The drought stress levels (main factor) were applied based on the soil field capacity at four levels (20, 40, 60, and 100% of field capacity), measured by assessing soil moisture at the root depth using a TDR device. The selenium nanoparticle treatment (sub-treatments) was applied through foliar spraying simultaneously with the different levels of drought stress at four concentrations: zero (control), 5, 10, and 20 mg per liter, with biweekly intervals over a three-month period. The results showed that the highest accumulation of proline ($0.73 \mu\text{mol/g}$) occurred with the foliar application of 20 mg per liter of selenium nanoparticles under 60% field capacity drought stress. Conversely, the lowest malondialdehyde

accumulation (0.8 nmol per gram of fresh tissue) was observed with the foliar application of 5 mg per liter of selenium nanoparticles under 20% field capacity drought stress, while the highest activity of ascorbate peroxidase (2/5 nmol per gram of fresh tissue) was recorded with the foliar application of 20 mg per liter of selenium nanoparticles under 20% field capacity drought stress, showing a significant difference compared to the control. Considering the overall results of the study, it was determined that the foliar application of selenium nanoparticles positively increased the plant's drought stress tolerance. Consequently, yield and vegetative growth indices were significantly influenced by the irrigation levels and nanoselenium foliar spray treatments.

Keywords: non-living stress, nano particles, medicinal plant, antioxidant properties

مقدمه

Echinacea purpurea با نام فارسی سرخارگل و انگلیسی purple coneflower (گل مخروطی بنفش) شناخته می‌شود (Hanafy et al., 2010). این گونه گیاهی ارزشمند از خانواده گل ستاره‌ای^۱ می‌باشد که دارای ارزش زینتی و دارویی است و طی سالیان اخیر کشت آن در فضای سبز رایج شده است. سرخارگل گیاه علفی و چندساله است که منشا آن شمال قاره آمریکا می‌باشد. این گیاه در حال حاضر نیز یکی از پرفروش‌ترین گیاهان این منطقه و دنیا محسوب می‌شود (Mehrpooya et al., 2021). این گیاه علاوه بر استفاده در فضای سبز و جنبه زینتی آن، ارزش دارویی بسیار زیادی نیز دارد. خواص دارویی متعدد سرخارگل برگرفته از وجود ترکیبات ثانویه موجود در گیاه است. مهم‌ترین ترکیبات این گونه گیاهی عبارتند از: آلکیل‌آمیدها، پلی‌ساکاریدها، گلیکوپروتئین‌ها، فلاونوئیدها و ترکیبات فنلی (Harborne and Williams, 2004) که شامل مشتقات اسید کافئیک مانند اسید کافئیک، شیکوریک‌اسید، کافتاریک‌اسید، اسید کلوروژنیک و اکیناکوزید (Attarzadeh et al., 2020 ; Bruni et al., 2018)، می‌باشد. این ترکیبات دارای طیف وسیعی از اثرات درمانی مانند خواص آنتی‌اکسیدانی، ضد میکروبی و ضد ویروسی هستند (Abdoli et al., 2013; Parsons et al., 2018; Tahmasebi et al., 2019). شربت عصاره اکیناسه، قرص فیتوکلد و کپسول ساپلاس مدز از داروهای تولیدی این گیاه محسوب می‌شوند. گیاهان به‌طور مداوم در معرض شرایط محیطی نامطلوب متفاوتی قرار می‌گیرند. گیاهان به طرق مختلف به تنش‌های غیرزیستی پاسخ می‌دهند، از بیان ژن گرفته تا بروز تغییرات فیزیولوژیکی، از ساختار گیاه تا ایجاد تغییراتی در متابولیسم اولیه و ثانویه. بروز این تغییرات پیچیده به گیاهان اجازه می‌دهد تا شرایط نامطلوب را تحمل کنند و یا با آن شرایط سازگار شوند. تنش‌های محیطی از جمله خشکی تا ۷۰ درصد بر بقا، توسعه زیست‌توده و عملکرد محصول تاثیر منفی می‌گذارند (Hashmat et al., 2021).

نانوذرات، تجمع از ذرات سازنده (اتم یا مولکول) با اندازه بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر در اندازه و شکل‌های متفاوت هستند. اندازه و جنس ذرات از عوامل تأثیرگذار بر خواص این مواد است (Zahedi et al., 2020). این ویژگی بر خواص فیزیکی و شیمیایی ذرات و همچنین

¹. Asteraceae

در میزان جذب آن‌ها در گیاهان و جانوران اثرگذار است. اثر نانوذرات به ویژگی‌های آن ذرات از جمله اندازه، شکل، پایداری، گیرنده‌های آن‌ها، غلظت ذرات و ترکیب فیزیکی یا شیمیایی ذره، بستگی دارد (Kumar et al., 2019). استفاده از نانوذرات در جهت مقابله با اثرات سوء تنش‌ها، موضوعی است که اخیراً مورد توجه محققان قرار گرفته است (Thygesen et al., 2007). اثرات تنش‌های زیستی و غیرزیستی بر گیاهان موضوعی جدی است که کاهش تلفات این آسیب‌ها با استفاده از نانوذرات موضوعی جالب توجه در کشاورزی و بحث اقتصاد کشاورزی است. یکی از نانوذره‌ها مرتبط در این زمینه نانو سلنیوم است. بااینکه نقش نانوذرات سلنیوم در گیاه به‌صورت دقیق مشخص نشده است اما نتایج مطالعات نشان داده است که استفاده از آن باعث بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، رشد و عملکرد گیاه می‌شود. همچنین میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و گلوکاتایون پراکسیداز با استفاده از این نانوذره افزایش یافته است که این افزایش حاکی از آنتی‌اکسیداتیو بودن نانوسلنیوم است (Djanaguiraman et al., 2018). یکی از عواقب بروز تنش خشکی در گیاه، تنش اکسیداتیو است. نانوذرات سلنیوم با از بین بردن رادیکال‌های آزاد میزان تنش اکسیداتیو را کاهش می‌دهند (Thygesen et al., 2007). باتوجه به اهمیت گیاه سرخارگل از جنبه زینتی و دارویی، تداوم مشکل کم‌آبی بصورت جهانی، لزوم استفاده از روش‌های نوین و کارآمد در جهت افزایش تحمل یا مقاومت گیاهان به خشکی و با توجه به اثرات مفید برخی عناصر بخصوص در حالت نانو و همچنین جایگاه سلنیوم به عنوان عنصر مفید در تغذیه و ایجاد تحمل گیاه به تنش‌های محیطی از جمله خشکی، به بررسی اثرات استفاده از نانو ذره سلنیوم در قالب محلول‌پاشی برگی در گیاه سرخارگل تحت شرایط تنش خشکی پرداخته شد.

پیشینه پژوهش

در مطالعه گل همیشه بهار گلدانی (*Calendula officinalis* L.) تحت شرایط تنش شوری با محلول‌پاشی در سطوح صفر (شاهد) و سلنیوم و نانوسلنیوم در غلظت ۱۰ میکرولیتر عنوان گردید که استفاده از نانوسلنیوم باعث افزایش وزن خشک شاخه در شرایط گلخانه به میزان ۷۷٪ و در شرایط مزرعه به مقدار ۱۱۶٪ می‌شود. همچنین استفاده از نانوسلنیوم در شرایط شوری و غیرشوری میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی برگ‌ها و گل‌ها را افزایش می‌دهد (Basireh Shahraki et al., 2022). نتایج تجزیه واریانس محلول‌پاشی سلنیوم و نانوسلنیوم در گیاه گل راعی (*Hypericum perforatum* L.) نشان داد که اثر کودهای سلنیوم و نانوسلنیوم بر ارتفاع بوته، طول گل‌آذین، تعداد گل‌آذین، وزن گل‌آذین، وزن اندام هوایی، طول ریشه، وزن کل زیست‌توده، درصد اسانس، محتوای هایپرین و هایپرفورین، تجمع سلنیوم در گیاه، محتوای نسبی آب برگ، محتوای کلروفیل a، b و کل، محتوای فنل، محتوای پرولین، تولید و تجمع کاتالاز، آنزیم‌های پراکسیداز، مالون‌دی‌آلدهید و DPPH معنی‌دار بوده است. همچنین بیش‌ترین تجمع سلنیوم با محلول‌پاشی ۱۲ میلی‌گرم در

لیتر نانوسلنیوم و بیشترین مقدار هایپرفورین نیز با محلول پاشی ۱۰ میلی گرم در لیتر سلنیوم گزارش شد. در برخی صفات نانوذره سلنیوم نسبت به سلنیوم اثرگذارتر بود (Rezaei Nazari, 2021). در آزمایشی نقش محلول پاشی نانوسلنیوم در کاهش اثرات نامطلوب شوری در گشنیز (*Coriandrum sativum*) مورد مطالعه قرار گرفت و عنوان گردید که نانوذرات سلنیوم با غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر بهترین اثر را بر رشد رویشی و میزان کلروفیل کل گیاه نشان دادند. کاربرد نانوذرات سلنیوم آسیب های تنش شوری را در گیاه گشنیز کاهش داد و منجر به افزایش غلظت پتاسیم و کاهش غلظت سدیم گیاه تحت تنش شوری گردید (Ghazi., 2018).

وانگ و همکاران (۲۰۲۴) اثرات محلول پاشی سلنیوم آلی و نانوسلنیوم را بر فرآیندهای فیزیولوژیکی و مولکولی در گیاه (*Brassica chinensis* var. *pekinensis*. cv. 'Suzhouqing') تحت شرایط تنش خشکی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه به دنبال محلول-پاشی، افزایش وزن در گیاه رخ داد. همچنین سردری و همکاران (۲۰۲۲) اثر سلنیوم و نانو سلنیوم را بر تحمل به تنش خشکی در گندم (*Triticum aestivum* L.) مورد مطالعه قرار دادند و عنوان کردند که سلنیوم و نانو سلنیوم می توانند با بازگرداندن رشد و کاهش آسیب اکسیداتیو، گیاهان گندم را از آسیب حفظ کنند. کاربرد سلنیوم و نانو سلنیوم باعث افزایش تنظیم تجمع املاح سازگار مانند پرولین و قند محلول در گیاهان تحت تنش شد.

روش شناسی پژوهش

نشا‌های یک ماهه بذری گیاه سرخارگل رقم Rose Carmine از گلخانه معتبر تولید نشا خریداری و از تاریخ ۳۰ فروردین ۱۴۰۱ به مدت دو ماه در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه ارومیه (گلخانه با پوشش پلی کربنات، تحت شرایط نور طبیعی، رطوبت ۵۰ تا ۶۰ درصد و در محدوده 2 ± 18 درجه سانتی گراد شب و 2 ± 28 درجه سانتی گراد روز) نگهداری شدند. نشاها پس از رشد کافی در سینی کشت، در تاریخ ۳۰ خرداد ۱۴۰۱ به شرایط مزرعه‌ای منتقل شدند. پس از استقرار و شروع رشد رویشی جدید گیاهان و رسیدن به مرحله ۸ الی ۱۰ برگی، تنش خشکی شروع شد. تیمارهای تنش خشکی بر اساس ظرفیت زراعی خاک و در چهار سطح ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به روش سنجش رطوبت خاک در عمق ریشه و با استفاده از دستگاه TDR (TDR 150) (Spectrum (USA)) اعمال شد. اعمال سطوح آبیاری بر اساس تخلیه مجاز مدیریتی تعیین گردید. در این روش کسری از آب قابل استفاده خاک که تا قبل آبیاری از منطقه فعال ریشه تخلیه شده است، قابل مدیریت است. زمانی که تخلیه مجاز مدیریتی هر تیمار آبیاری به مقدار مورد نظرمان می‌رسید، آبیاری بر اساس سطوح تنش، محاسبه و اعمال می‌شد (Allen et al., 1998). برای آبیاری بوته‌ها در مزرعه از سیستم آبیاری قطره‌ای با دبی خروجی مشخص در واحد زمان در کنار هر بوته استفاده شد. تیمار نانوذرات سلنیوم (تهیه شده از شرکت پیشگامان نانو مواد

ایرانیان، به صورت محلول با خلوص ۹۹/۹۵ درصد و ذرات به شکل کروی با اندازه ذرات ۱۰ تا ۳۰ نانومتر) همزمان با اعمال سطوح مختلف تنش خشکی، بصورت محلول پاشی برگ و در چهار سطح صفر (شاهد)، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در لیتر و با فواصل دو هفته‌ای و در یک دوره سه ماهه انجام شد. با تکمیل شدن دوره گلدهی، برداشت نمونه‌های گیاهی انجام گردید. آزمایش مورد نظر به صورت کرت خرد شده در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. گیاهان در زمین زراعی در ۴ کرت جداگانه کاشته شدند که هر کرت مربوط به یکی از سطوح تنش‌های آبیاری بود. محلول پاشی بوته‌ها در هر کرت در ۴ غلظت مورد نظر در این پژوهش انجام شد و هر غلظت بر روی ۱۰ بوته اعمال گردید که از ۱۰ بوته، ۳ تکرار ۳ مشاهده‌ای جهت اندازه‌گیری صفات و نمونه‌برداری‌های لازم مدنظر قرار گرفتند. تجزیه اطلاعات توسط نرم‌افزار آماری SAS ورژن ۹/۴ (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) و مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد. جهت رسم شکل‌ها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

سنجش رنگیزه آنتوسیانین گلبرگ

۰/۱ گرم گلبرگ در هاون چینی ساییده شد. ۱۰ میلی لیتر متانول اسیدی را در فالكون ۱۵ میلی لیتری ریخته و سپس نمونه گیاهی پودر شده به آن اضافه گردید و به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی قرار داده شد. عصاره حاصل ۱۰ دقیقه در سانتریوفیوژ با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه قرار داده شد. سپس میزان جذب محلول روشن‌ر در طول موج ۵۵۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر (مدل Halo DB-20) قرائت گردید. سپس با استفاده از رابطه ۱، غلظت آنتوسیانین بر حسب میکروگرم بر گرم وزن تر گلبرگ بدست آمد (Wagner., 1979).

$$A = \epsilon bc$$

رابطه ۱)

A = عدد جذب قرائت شده، ϵ = ضریب خاموشی ($33000 \text{ mM}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)، b = عرض کووت (۱ سانتی متر)، c = مقدار آنتوسیانین

سنجش میزان انباشت پرولین

۰/۵ گرم از برگ تازه وزن و در هاون چینی له شد. نمونه گیاهی به همراه ۱۰ میلی لیتر سولفوسالسیلیک اسید سه درصد از صافی کاغذی شماره ۲ گذرانده و درون لوله آزمایش شیشه‌ای ۵۰ میلی لیتری درب‌دار ریخته شد. سپس ۲ میلی لیتر معرف نین‌هیدرین و ۲ میلی لیتر اسید استیک گلاسیال به محلول اضافه گردید. درب لوله‌ها بسته شده و یک ساعت در حمام آب گرم با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. لوله‌ها بلافاصله به ظرف حاوی یخ منتقل شدند تا واکنش متوقف شود. سپس به هر لوله ۴ میلی لیتر تولوئن اضافه و ۲۰ ثانیه بخوبی تکان داده شدند. در نهایت فاز رویی که به رنگ مایل به قرمز درآمده بود (پرولین محلول در تولوئن) جدا شد. میزان جذب محلول‌های استاندارد (برای تعیین غلظت پرولین موجود در هر نمونه، نیاز به تهیه استاندارد محلول پرولین خالص در غلظت‌های

مختلف است. با توجه به میزان جذب این غلظت‌ها، منحنی پرولین بدست می‌آید) و نمونه، در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت گردید. اعداد در رابطه ۲ جایگذاری شده و میزان پرولین در نمونه گیاه بدست آمد (Bates et al., 1973).

$$Y = 0/000136 + 1/277X \quad R_2 = 0/99 \quad \text{رابطه ۲}$$

Y = مقدار جذب خوانده شده، X = میزان پرولین موجود در نمونه گیاهی

سنجش میزان انباشت مالون دی آلدهاید

۰/۵ گرم برگ تازه وزن و در هاون چینی ساییده شد. ۵ میلی لیتر تری کلرو استیک اسید یک درصد به نمونه اضافه و عصاره حاصل ۲۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. ۱ میلی لیتر از محلول رویی جدا و با ۵ میلی لیتر محلول ۲۰ درصد تری کلراستیک اسید حاوی ۰/۵ درصد تیوباربیئتوریک اسید ترکیب شد. محلول موردنظر درون بن ماری قرار گرفت (۳۰ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سانتی گراد) و بلافاصله در یخ، سرد شد. نمونه‌ها ۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند (۱۰۰۰ دور در دقیقه). جذب ماده قرمز رنگ مالون دی آلدهاید تیوباربیئتوریک اسید در طول موج ۵۳۲ نانومتر و جذب سایر رنگیزه‌ها نیز در طول موج ۶۰۰ نانومتر قرائت گردید. مقدار مالون دی آلدهاید بر حسب نانومول بر گرم بافت تازه و ضریب خاموشی ۱۵۵ $\text{mM}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ مطابق رابطه ۳ محاسبه شد (Valentovic et al., 2006).

$$\text{MDA} = \frac{A_{532} - A_{600}}{155} \times 1000 \quad \text{رابطه ۳}$$

A = میزان جذب خوانده شده در هر طول موج

سنجش فعالیت آنزیمی

استخراج عصاره گیاهی

برای استخراج عصاره گیاهی از روش Kang و Saltiveit (۲۰۰۲) با اندکی تغییرات استفاده شد. ۰/۵ گرم از بافت تر برگ و گل به همراه ۳ میلی لیتر بافر استخراج تریس- اسید کلریدریک ۵۰ میلی مولار (pH=7) محتوی ۳ میلی مولار MgCl_2 ، ۱ میلی مولار EDTA در هاون سرد ساییده شد. بافر استخراجی برای آنزیم آسکوربات پراکسیداز محتوی ۰/۲ میلی مولار آسکوربیک اسید نیز بود. هموژنات به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱ درجه سانتی گراد سانتریفیوژ و محلول رویی برای سنجش فعالیت آنزیمی استفاده شد.

سنجش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز

سنجش فعالیت آسکوربات پراکسیداز با استفاده از روش Nakano و Asada (۱۹۸۱) با اندکی تغییر انجام شد. مخلوط واکنش شامل ۲ میلی لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی مولار (pH=7) و آسکوربات سدیم ۱۰ میکرولیتر که به ۳۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی اضافه شد. H_2O_2 در

آخرین مرحله به کووت اضافه و سپس بلافاصله تغییرات جذب ثبت شد. فعالیت APX به صورت کاهش در جذب طی ۱ دقیقه در طول موج ۲۹۰ نانومتر با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد.

$$\text{Units} \left(\frac{mM}{min} \right) = \frac{\frac{doD}{min(slope)} \times TV \times D}{E \times EV} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$\frac{doD}{min(slope)}$ = اختلاف جذب، TV = حجم کل (بافر و عصاره آنزیمی استفاده شده)، D = ضریب رقت، E = ضریب خاموشی با عدد ثابت ۳۹/۴، EV = حجم عصاره استفاده شده

سنجش فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز

میزان فعالیت گایاکول پراکسیداز با روش Mac Adam (۱۹۹۲) با اندکی تغییر تعیین شد. ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی به مخلوط واکنش شامل ۲/۵ میکرولیتر بافر فسفات (pH = ۷) و ۵۰ میکرولیتر گایاکول خالص اضافه شد. ۵۰ میکرولیتر هیدروژن پراکسید در آخرین مرحله به کووت اضافه و سپس بلافاصله تغییرات جذب در نتیجه اکسیداسیون گایاکول به تتراگایاکول در طول موج ۴۲۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر به مدت یک دقیقه بصورت تغییرات جذب در یک دقیقه در یک گرم وزن تر گیاه محاسبه شد.

$$\text{Units} \left(\frac{mM}{min} \right) = \frac{\frac{doD}{min(slope)}}{26/6} \quad (\text{رابطه ۵})$$

یافته‌های پژوهش

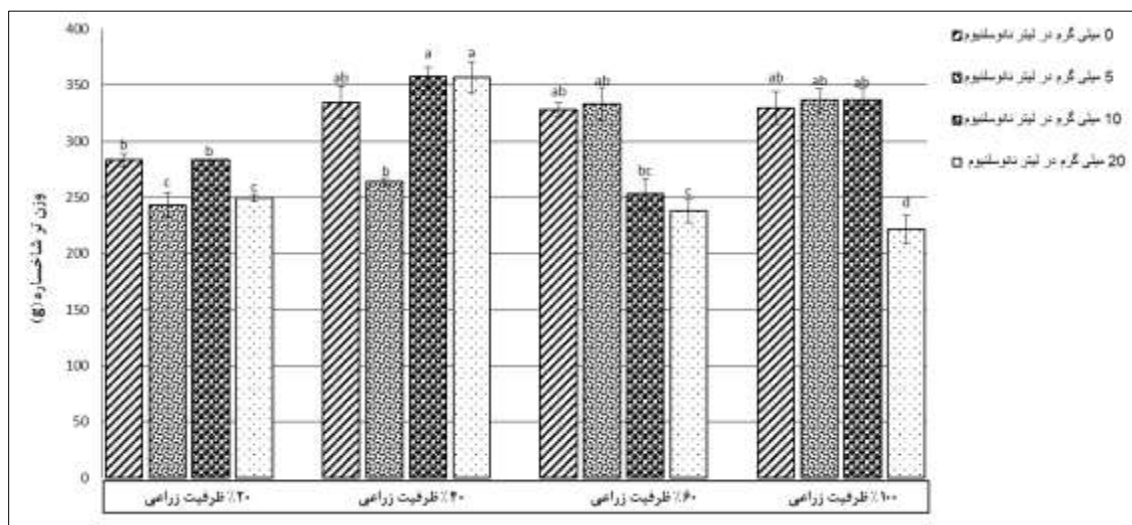
نتایج پژوهش حاضر در قالب جدول تجزیه واریانس (جدول ۱) و نمودار روند تغییرات برای تمام صفات در ادامه آورده شده است.

جدول ۱- تجزیه واریانس محلول‌یابی نانوذرات سلنیوم سرخارگل (*Echinacea purpurea*) تحت تنش خشکی

میانگین مربعات										
منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن تر شاخساره	وزن خشک شاخساره	تعداد برگ	تعداد گل	آنتوسیانین گلبرگ	پرولین	مالون دی آلدهاید	آنزیم آسکوربات پراکسیداز	آنزیم گایاکول پراکسیداز
تنش خشکی	۳	۹۱۷۹/۳۵*	۵۷۶۱/۱۱ ^{ns}	۱۱۹۴۹/۸۰ ^{ns}	۱۱۶۰/۹۱**	۰/۰۶۸ ^{ns}	۰/۰۲۶ ^{ns}	۱/۶۸**	۴۰/۷۴**	۲۴/۰۱*
محلول پاشی نانوذره سلنیوم	۳	۱۷۳۵/۷۴ ^{ns}	۱۳۸۱/۹۴ ^{ns}	۴۰۲۲/۹۱**	۳۶/۰۸*	۰/۱۱۸ ^{ns}	۰/۰۰۸**	۰/۶۸**	۶۷/۶۶**	۱۸/۱۶**
اثر متقابل تیمارها	۹	۶۶۰۲/۹۶*	۲۸۵۸/۷۹**	۸۴۶۳/۷۵**	۵۹۴/۰۰**	۰/۳۱۸**	۰/۰۳۲**	۰/۶۲**	۱۴۲/۶۹**	۲۶/۲۳*
خطا	۲۴	۳۶۸۳/۳۱	۷۵۰/۶۸	۲۳۲۷/۱۸	۲۳/۰۰	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۰۷	۰/۰۰۳	۲/۸۲	۰/۹۰
ضریب تغییرات	۱۷	۲۲	۱۹	۱۹	۱۴	۱۷	۴	۱۳	۲۲	

^{ns}: بدون معنی و ** و *: اختلاف معنی‌دار در سطوح ۱٪ و ۵٪

وزن تر شاخساره

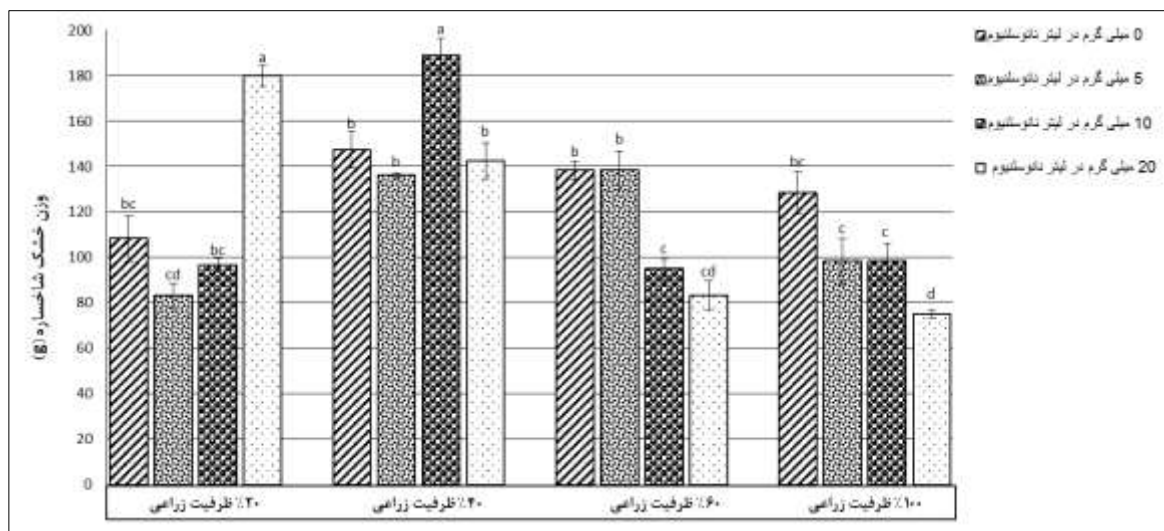


شکل ۱. اثر تیمار غلظت‌های مختلف نانوذره سلنیوم و سطوح مختلف خشکی بر وزن تازه شاخساره سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) رقم Rose Carmine

(منبع: یافته‌های تحقیق). حروف غیرمشترک به معنی معناداری در سطح احتمال ۱٪ با آزمون دانکن

با توجه به شکل ۱، بیش‌ترین مقدار عددی وزن تر شاخساره (۳۵۷ گرم) و (۳۵۱/۵ گرم) بترتیب در تیمارهای محلول‌پاشی ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد هر چند که از لحاظ آماری با تیمارهای صفر میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم در ۴۰ درصد ظرفیت زراعی، صفر و ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم در شرایط ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری نداشتند. کم‌ترین وزن تر شاخساره (۲۲۱/۷ گرم) نیز در تیمار محلول‌پاشی ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بدست آمد که اختلافی معنی‌دار با سایر تیمارها داشت.

وزن خشک شاخساره

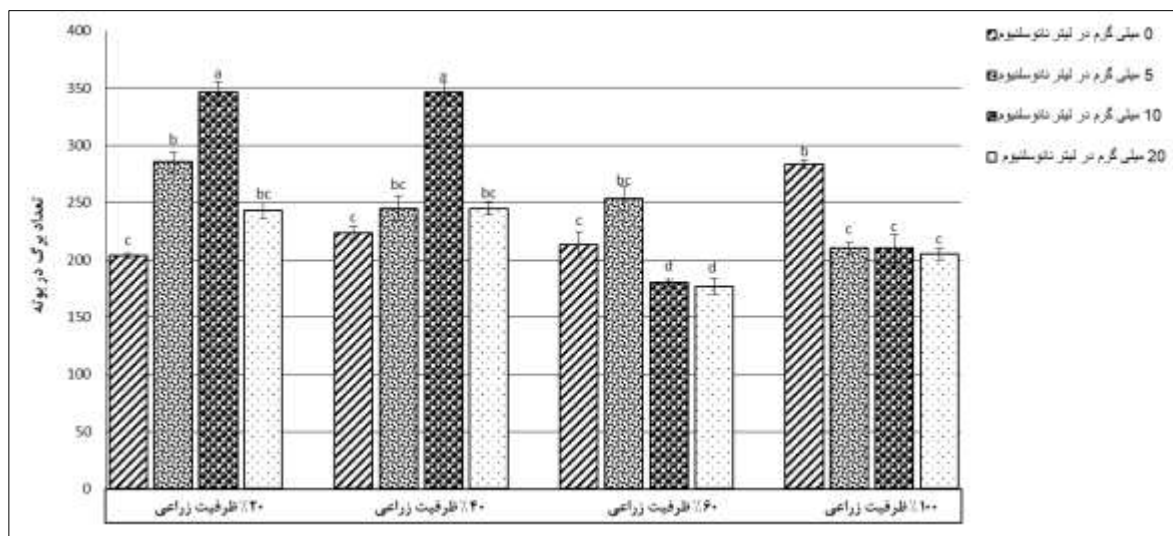


شکل ۲. اثر تیمار غلظت‌های مختلف نانوذره سلنیوم و سطوح مختلف خشکی بر وزن خشک شاخساره سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) رقم Rose Carmine

(منبع: یافته‌های تحقیق). حروف غیرمشترک به معنی معناداری در سطح احتمال ۱٪ با آزمون دانکن

با توجه به شکل ۲، بیش‌ترین مقدار وزن خشک شاخساره (۱۸۸/۷۵ گرم) و (۱۸۰ گرم) به ترتیب در تیمار ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی و تیمار ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۲۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد که با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری نشان دادند. کم‌ترین مقدار عددی وزن خشک شاخساره (۷۵ گرم) در تیمار محلول‌پاشی ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بدست آمد که با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری نشان داد هر چند که از لحاظ آماری با تیمارهای ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۲۰ درصد ظرفیت زراعی و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۶۰ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری نداشتند.

تعداد برگ

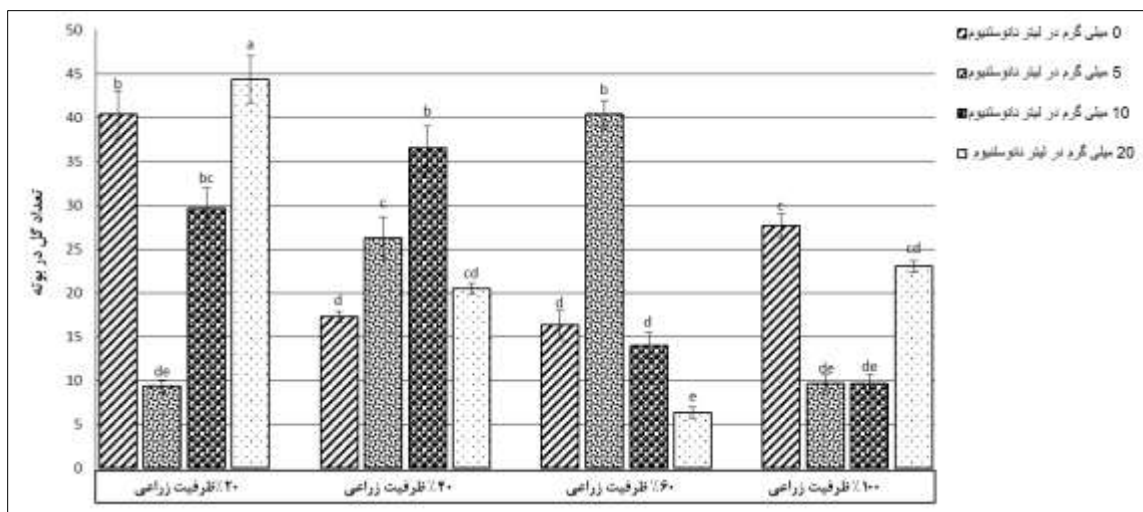


شکل ۳. اثر تیمار غلظت‌های مختلف نانوذره سلنیوم و سطوح مختلف خشکی بر تعداد برگ در بوته سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) رقم Rose Carmine

(منبع: یافته‌های تحقیق). حروف غیرمشترک به معنی معناداری در سطح احتمال ۱٪ با آزمون دانکن

با توجه به شکل ۳، بیش‌ترین تعداد برگ در بوته (۳۴۶/۷ عدد) و (۳۴۵ عدد) بترتیب در تیمارهای محلول‌پاشی ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۲۰ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد که با سایر تیمارها اختلافی معنادار نشان دادند. کم‌ترین تعداد برگ در بوته (۱۷۶/۷ عدد) و (۱۸۰ عدد) بترتیب در تیمارهای محلول‌پاشی ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی بدست آمد که با سایر تیمارها اختلافی معنادار نشان دادند.

تعداد گل

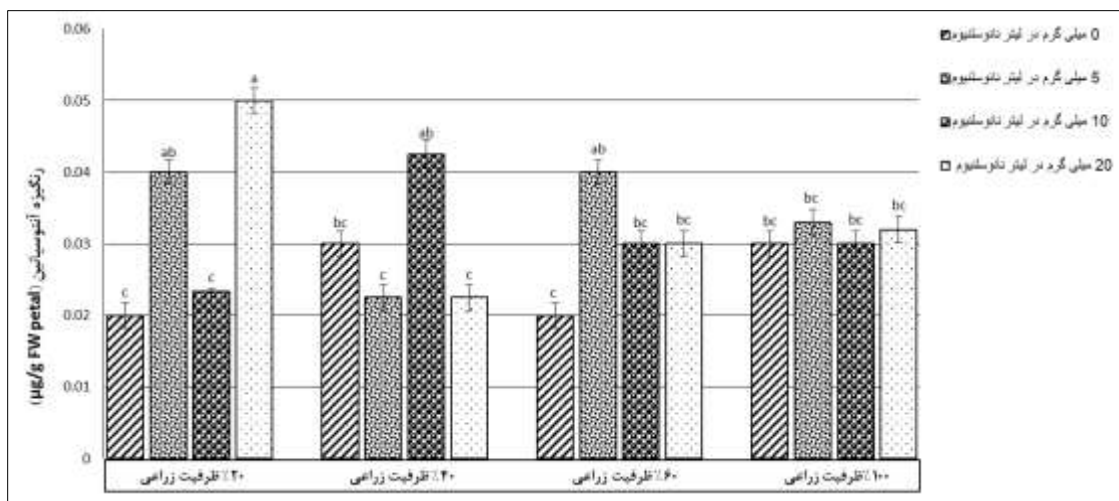


شکل ۴. اثر تیمار غلظت‌های مختلف نانوذره سلنیوم و سطوح مختلف خشکی بر تعداد گل در بوته سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) رقم Rose Carmine

(منبع: یافته‌های تحقیق). حروف غیرمشترک به معنی معناداری در سطح احتمال ۱٪ با آزمون دانکن

با توجه به شکل ۴، بیش‌ترین تعداد گل در بوته (۴۴/۳ عدد) در تیمار محلول‌پاشی ۲۰ میلی‌گرم نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۲۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد که با نتایج سایر تیمارها، اختلافی معنی‌دار نشان داد. کم‌ترین تعداد گل در بوته (۶/۳ عدد) در تیمار محلول‌پاشی ۲۰ میلی‌گرم نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد هر چند که از لحاظ آماری با تیمارهای ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۲۰ درصد ظرفیت زراعی و ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری نداشتند.

میزان آنتوسیانین گلبرگ

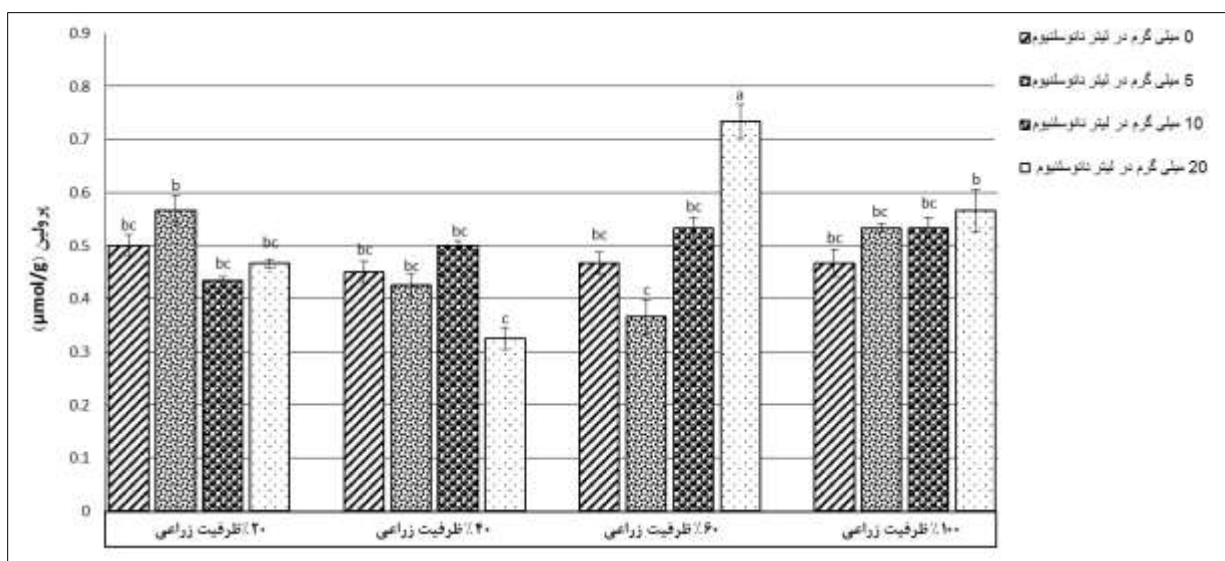


شکل ۵. اثر تیمار غلظت‌های مختلف نانوذره سلنیوم و سطوح مختلف خشکی بر مقدار آنتوسیانین گلبرگ سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) رقم Rose

Carmine (منبع: یافته‌های تحقیق). حروف غیرمشترک به معنی معناداری در سطح احتمال ۱٪ با آزمون دانکن

با توجه به شکل ۵، بیش‌ترین میزان آنتوسیانین گلبرگ (۰/۰۵ میکروگرم بر گرم وزن تر)، در تیمار محلول‌پاشی ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۲۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد که با سایر تیمارها اختلافی معنی‌دار نشان داد. هر چند که از لحاظ آماری با تیمارهای ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۲۰ درصد ظرفیت زراعی، ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۴۰ درصد ظرفیت زراعی و ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۶۰ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری نداشتند. کم‌ترین مقدار آنتوسیانین (۰/۰۲ میکروگرم بر گرم وزن تر) در تیمار بدون محلول‌پاشی و در شرایط تنش آبیاری ۲۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد هر چند که از لحاظ آماری با تیمارهای ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۲۰ درصد ظرفیت زراعی، صفر، ۵ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۴۰ درصد ظرفیت زراعی و صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و صفر، ۵ و ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری نداشتند.

انباشت پرولین

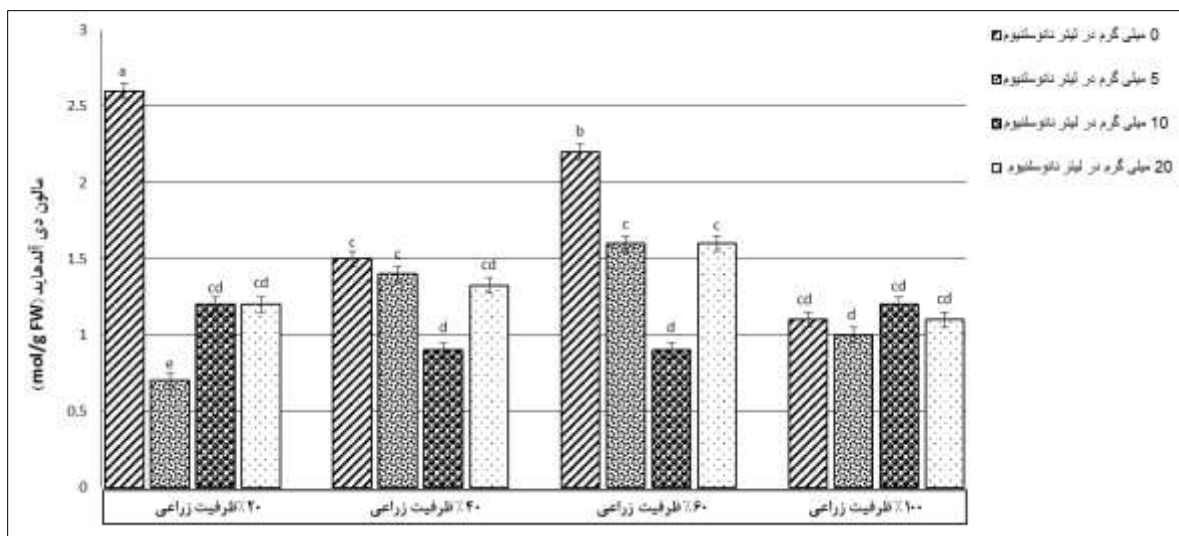


شکل ۶. اثر تیمار غلظت‌های مختلف نانوذره سلیوم و سطوح مختلف خشکی بر مقدار پرولین سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) رقم Rose Carmine (منبع: یافته‌های

تحقیق). حروف غیرمشترک به معنی معناداری در سطح احتمال ۱٪ با آزمون دانکن

با توجه به شکل ۶، بیش‌ترین میزان انباشت پرولین (۰/۷۳ میکرومول بر گرم) در تیمار محلول‌پاشی ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوذره سلیوم در شرایط تنش آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد که تفاوتی معنی‌دار با سایر تیمارها نشان داد. کم‌ترین مقدار پرولین (۰/۳۳ میکرومول بر گرم) و (۰/۳۶ میکرومول بر گرم) بترتیب در تیمارهای محلول‌پاشی ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوذره سلیوم در شرایط تنش آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی ۵ میلی گرم در لیتر نانوذره سلیوم در شرایط تنش آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده گردید که با تیمارهای محلول‌پاشی ۵ میلی گرم در لیتر نانوذره سلیوم در شرایط تنش آبیاری ۲۰ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوذره سلیوم در شرایط تنش آبیاری ۶۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی تفاوتی معنی‌دار نشان داد هر چند که از لحاظ آماری با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری نداشتند.

انباشت مالون‌دی آلدهاید

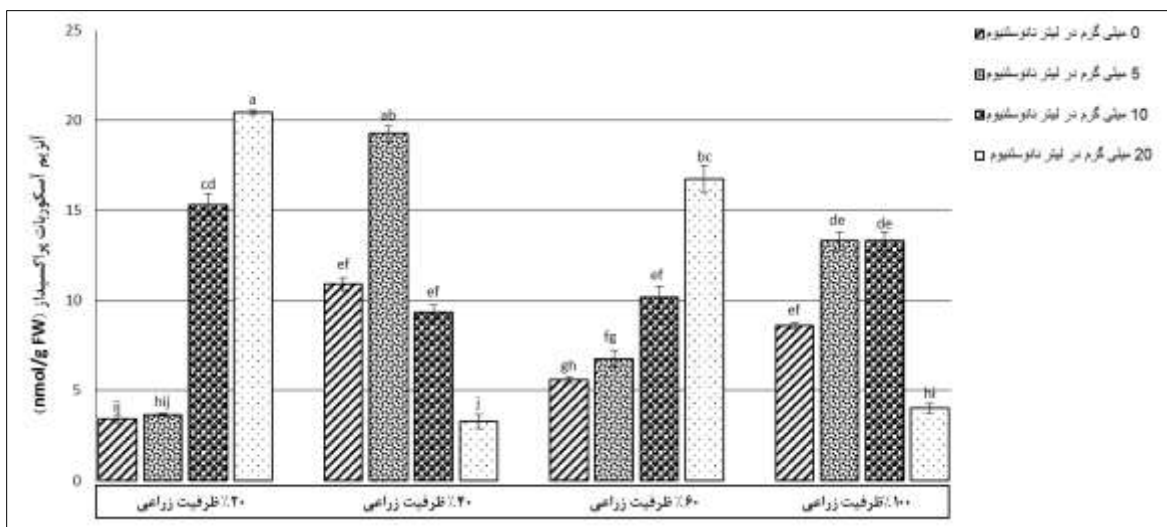


شکل ۷. اثر تیمار غلظت‌های مختلف نانوذره سلنیوم و سطوح مختلف خشکی بر صفت انباشت مالون‌دی‌آلدهاید سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) رقم Rose

Carmin (منبع: یافته‌های تحقیق). حروف غیرمشترک به معنی معناداری در سطح احتمال ۱٪ با آزمون دانکن

با توجه به شکل ۷، بیش‌ترین میزان انباشت مالون‌دی‌آلدهاید (۲/۶ نانومول بر گرم بافت تازه) در تیمار بدون محلول‌پاشی در شرایط تنش آبیاری ۲۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده گردید که تفاوتی معنی‌دار با همه تیمارها نشان داد. کم‌ترین مقدار انباشت مالون‌دی‌آلدهاید (۰/۸ نانومول بر گرم بافت تازه) در تیمار محلول‌پاشی ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۲۰ درصد ظرفیت زراعی، مشاهده گردید.

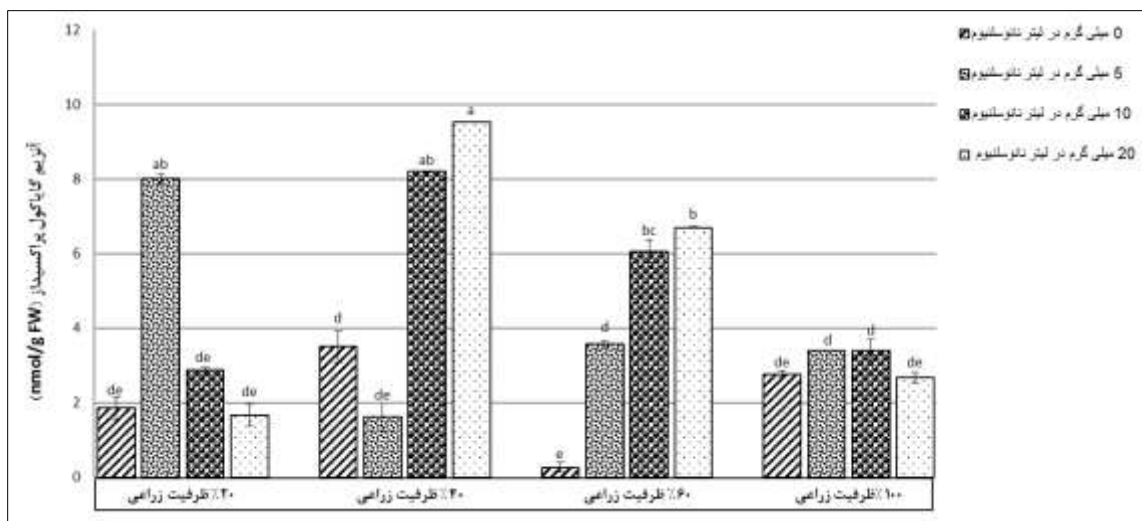
فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز



شکل ۸. اثر تیمار غلظت‌های مختلف نانوذره سلنیوم و سطوح مختلف خشکی بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) رقم Rose Carmine (منبع: یافته‌های تحقیق). حروف غیرمشترک به معنی معناداری در سطح احتمال ۱٪ با آزمون دانکن

با توجه به شکل ۸، بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (۲۰/۵ نانومول بر گرم بافت تازه)، در تیمار محلول‌پاشی ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۲۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد که تفاوتی معنی‌دار با سایر تیمارها نشان داد هر چند که از لحاظ آماری با تیمار ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۴۰ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری نداشت. کم‌ترین مقدار فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (۳/۲ نانومول بر گرم بافت تازه) در تیمار محلول‌پاشی ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارها نشان داد هر چند که از لحاظ آماری با تیمارهای صفر و ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۲۰ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری نداشتند.

فعالیت آنزیم کایاکول پراکسیداز



شکل ۹. اثر تیمار غلظت‌های مختلف نانوذره سلنیوم و سطوح مختلف خشکی بر فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز (GA) سرخارگل (*Echinacea purpurea* L.) رقم

Rose Carmine (منبع: یافته‌های تحقیق). حروف غیرمشترک به معنی معناداری در سطح احتمال ۱٪ با آزمون دانکن

با توجه به شکل ۹، بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز (۹/۵۲ میلی‌مولار بر سانتی‌متر) در تیمار محلول‌پاشی ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط تنش آبیاری ۴۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارها داشت هر چند که از لحاظ آماری با تیمارهای ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۲۰ درصد ظرفیت زراعی و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۴۰ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری نداشتند. کم‌ترین مقدار فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز (۰/۲۷ میلی‌مولار بر سانتی‌متر) در تیمار بدون محلول‌پاشی در شرایط تنش آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی مشاهده گردید هر چند که از لحاظ آماری با تیمارهای صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۲۰ درصد ظرفیت زراعی، ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۴۰ درصد ظرفیت زراعی و صفر و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم در شرایط ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی تفاوت معنی‌داری نداشتند.

بحث

وزن تر و خشک شاخساره

وزن تر شاخساره در گیاهان تحت تاثیر شرایط مختلف محیطی و تنش‌های زیستی و غیرزیستی قرار می‌گیرد. کمبود آب طی وقوع تنش خشکی باعث می‌شود میزان تورژسانس گیاه کاهش یابد و در نهایت رشد و توسعه سلولی کم شود و در نتیجه وزن تر و خشک

شاخساره کم شود. برای مثال Javanmard et al., (2022) گزارش کردند که وزن تر و خشک بالنگو (*Lalelemantia iberica*) تحت تنش آبی متوسط (۶۰ درصد ظرفیت زراعی) و در شرایط تنش شدید آبی (۳۰ درصد ظرفیت زراعی) کاهش یافته است.

استفاده از محرک‌های رشد در گیاهان با روش‌هایی متنوع همچون محلول‌پاشی، به‌عنوان یک عامل بیرونی عمل کرده و در تسریع تقسیمات سلولی و رشد سلول‌ها اثر می‌گذارد. زمانی که گیاه در معرض تنش قرار گرفته باشد، استفاده از محرک‌های رشد برای مهار اثرات منفی تنش اثرگذار خواهد بود. علاقه فزاینده‌ای به استفاده از فناوری نانو در بخش کشاورزی برای مدیریت تنش‌های غیرزیستی و بهبود عملکرد گیاه در این شرایط وجود دارد. با این حال، استفاده بیش از حد از نانو کودها در غلظت‌های بالا نیز باعث ایجاد سمیت در گیاهان و تأثیر منفی بر رشد گیاه می‌شود (Asghari et al., 2023). نانوذرات سلنیوم قادرند محتوای آب را افزایش داده و در نتیجه فرآیند پیوشیمیایی سلول‌های گیاهی و در نهایت رشد و عملکرد گیاه را بهبود بخشند (Merwad et al., 2018). طی تنش دمای پایین و بالا، مقادیر کم سلنیوم (۲/۵ میکرومولار) و نانوذره سلنیوم (۱ میکرومولار) رشد و عملکرد گیاه را افزایش می‌دهند (Haghighi et al., 2014). محلول‌پاشی سلنیوم در گندم (*Triticum aestivum*) در غلظت ۰/۶۷ میکرومولار باعث تحریک رشد بیشتر و در نتیجه افزایش وزن تر و خشک گردیده است (Nawaz et al., 2017). محلول‌پاشی نانوذره سلنیوم در گیاه گوار (*Cyamopsis tetragonoloba*) انجام گرفت و عنوان شد که طول ریشه، وزن تازه و خشک و همچنین سطح برگ در تیمار ۲۰۰ میلی گرم نانوذره سلنیوم نسبت به سایر تیمارها بیشتر بوده است (Ragavan et al., 2017). در توت‌فرنگی (*Fragaria × ananassa*) محلول‌پاشی نانوذره سلنیوم در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر باعث تعدیل اثرات نامطلوب خشکسالی بر رشد و عملکرد گیاه شد (Zahedi et al., 2020). نتایج مطالعه حاضر با این پژوهش همخوانی داشت. اما در پژوهشی دیگر نتایج متفاوتی از سلنیوم گزارش شده است. در این مطالعه اثرات محلول‌پاشی نانوذرات سلنیوم در غلظت‌های ۰، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در لیتر بر عملکرد و محتوا و ترکیب اسانس نعنای آناناسی (*Mentha suaveolens* Ehrh.) بررسی شد. گزارش شد که وزن خشک نعنای تحت تأثیر محلول‌پاشی نانوذره قرار نگرفته و محلول‌پاشی ۱۰ میلی گرم در لیتر نانوذره سلنیوم افزایش اندکی در وزن تر و خشک گیاه ایجاد نموده است (Kiumarzi et al., 2022). همچنین در گیاه بادنجبویه (*Melissa officinalis*) نیز گزارش شده است که غلظت پایین سلنیوم باعث رشد ریشه شده ولی غلظت‌های بالاتر آن میزان تقسیم سلولی را کاهش داده است (Tavakoli et al., 2020). استفاده از یک تیمار مشابه در غلظت‌های مشابه اما در گیاهان مختلف ممکن است اثراتی متفاوت بر جای بگذارد. در مطالعه حاضر غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم موثرتر بودند. استفاده از نانو ذره سلنیوم در غلظت ۶/۲۵ مولار روی برگ‌های گیاه لوبیا چشم بلبلی (*Vigna unguiculata* L.) باعث شد میزان رشد شاخساره گیاه افزایش یابد. محققان علت بروز این مورد را با افزایش سیتوکینین و جیبرلین مرتبط دانستند (El Lateef Gharib et al., 2019). اما (Neysanian et al., 2020) نتایج متفاوتی گزارش کرده‌اند. این محققان محلول‌پاشی غلظت‌های ۰، ۳ و ۱۰ میلی گرم

در لیتر نانوذره سلنیوم را روی گوجه‌فرنگی انجام دادند و عنوان کردند که با محلول‌پاشی ۳ میلی‌گرم در لیتر شاهد افزایش زیست‌توده در بخش هوایی و ریشه بودند ولی محلول‌پاشی ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سلنیوم باعث کاهش زیست‌توده در شاخساره و ریشه گردیده است.

تنش خشکی می‌تواند اثراتی منفی بر رشد بخش هوایی و ریشه داشته باشد. (Ostadi et al., 2022) گزارش کردند که عملکرد خشک مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.) تحت تنش کم آبی متوسط و شدید به ترتیب ۳۰ و ۳۵ درصد کاهش یافت. استفاده از برخی عناصر ریزمغذی محرک رشد می‌تواند در نقش تعدیل‌کننده تنش عمل کرده و اثرات کاهشی آن را خنثی نماید. تحریک رشدی که به دنبال استفاده از سلنیوم در شرایط مختلف تنش محیطی ایجاد می‌شود، با افزایش فتوسنتز و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مرتبط است (Kiumarzi et al., 2022). در مطالعه‌ای محلول‌پاشی نانو ذرات سلنیوم در غلظت‌های ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر در گیاه گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) مورد مطالعه قرار گرفت. صفات وزن اندام هوایی و ریشه، محتوای کلروفیل و محتوای نسبی آب تحت تاثیر این محلول‌پاشی قرار گرفته و این صفات در گیاهان تحت تنش کادمیوم، بهبود یافتند. محلول‌پاشی نانو ذرات سلنیوم در غلظت‌های ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر باعث تعدیل اثر تنش در گیاه گشنیز گردید و افزایش وزن خشک شاخساره و ریشه را باعث شد (Babashpour-Asl et al., 2022). مطالعات مختلف گزارش کرده‌اند که سلنیوم، به‌ویژه در غلظت‌های پایین، اثرات نامطلوب تنش شوری را با تحریک رشد گیاه کاهش می‌دهد (Zahedi et al., 2019). اثرگذاری استفاده از نانوذره سلنیوم در جهت کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی در گیاه تحت تنش در این مطالعه، با پژوهش‌های ذکر شده، مطابقت داشت.

در پژوهشی اثر نانوذرات سلنیوم در سه غلظت ۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر تحت شرایط تنشی شامل ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد ظرفیت زراعی در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) مورد مطالعه قرار گرفت. عملکرد ماده خشک در تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سلنیوم به مقدار ۱۴ درصد و در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سلنیوم به مقدار ۱۳ درصد، افزایش یافت. بیش‌ترین عملکرد خشک گیاه در ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر و کم‌ترین عملکرد خشک در ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و بدون محلول‌پاشی نانوذره بدست آمد (Asghari et al., 2023). در مطالعه حاضر نانوذره سلنیوم در گیاهان تحت تنش خشکی بیشترین تاثیر مثبت را در رشد داشته و در شرایط عادی و غلظت بالا نانو ذره اثر منفی داشته است و غلظت‌های پایین‌تر آن نتایج بهتری نشان داده‌اند. سلنیوم در غلظت‌های پایین قادر است رشد ریشه را از طریق تعامل در تولید تنظیم‌کننده‌های رشدی تحت تاثیر قرار دهد. مشخص شده است که اکسین و اتیلن ساختمان‌سازی ریشه را سبب می‌شوند که این مورد در گیاهانی از جمله تنباکو و آرابیدوپسیس دیده شده است (Malheiros et al., 2019). باتوجه به اینکه اثرگذاری این عنصر در طول‌شدن ریشه، تعداد ریشه‌های جانبی یا میزان توده ریشه است، در نتیجه بر میزان وزن تر و خشک ریشه اثرگذار خواهد بود (Malheiros et al., 2019).

تعداد برگ

محققان گزارش کردند هنگامی که گندم تحت تنش خشکی را در معرض نانوذرات سلینیوم با غلظت ۳۰ میلی گرم در لیتر قرار دادند، تعداد برگ در بوته، طول ساقه، طول ریشه و ارتفاع بوته افزایش یافته است (Ikram et al., 2021). همچنین محلول پاشی سلینیوم در کلزا (*Brassica napus*) با غلظت‌های ۲,۵ و ۵ میلی گرم در لیتر باعث افزایش عملکرد، طول ساقه و تعداد برگ گیاه در شرایط تنش شوری گردید (Hashem et al., 2013). نتایج این مطالعات با تحقیق حاضر همخوانی داشته و محلول پاشی نانوذره سلینیوم توانسته به عنوان عامل محرک رشد برای گیاه عمل کرده و تعداد برگ در واحد سطح را افزایش دهد.

تعداد گل

کاهش رشد در گیاهان یک مکانیسم تطبیقی برای مقابله با تنش است زیرا به گیاه اجازه می‌دهد از انرژی متابولیک سلولی کمتری برای رشد استفاده کند و از آن انرژی بیشتر برای مقابله با تنش بهره بگیرد (Kiumarzi et al., 2022). در پژوهشی غلظت‌های ۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذره سلینیوم روی گل داودی (*Chrysanthemum morifolium* Ramat) محلول پاشی شد. در این مطالعه گزارش شده است که محلول پاشی نانوذره سلینیوم در غلظت‌های ۵۰ و ۱۵۰ میلی گرم در لیتر باعث افزایش تعداد گل در بوته شده است (Seliem et al., 2020). نتایج مطالعه حاضر مبنی بر اثرگذاری نانوذره سلینیوم در افزایش میزان تولید گل در بوته تحت تنش خشکی، با پژوهش‌های ذکر شده مطابق دارد.

رنگیزه آنتوسیانین

آنتوسیانین‌ها مهم‌ترین گروه از رنگدانه‌های طبیعی بعد از کلروفیل هستند که محلول در آب بوده و در سطح وسیعی در سیتوپلاسم گیاهی وجود دارند. این رنگیزه خاصیت آنتی اکسیدانی داشته و در شرایط تنش می‌تواند به عنوان محافظ برای گیاه عمل کند. محلول پاشی نانوذره سلینیوم در گیاه گوار (*Cyamopsis tetragonoloba*) در غلظت ۴۰۰ میلی گرم باعث افزایش فعالیت بیوشیمیایی گردید و شاخص‌های کلروفیل a و b، کلروفیل کل، کاروتنوئیدها، آنتوسیانین و پروتئین در این تیمار نسبت به سایر تیمارها مقادیر بالاتری نشان دادند (Ragavan et al., 2017). نتایج مطالعه حاضر با این پژوهش همسو بود.

انباشت پرولین

تحت شرایط کمبود آب، غلظت اسمولیت (پرولین و قند محلول) افزایش می‌یابد. تجمع قندهای محلول و پرولین در پاسخ به تنش محیطی با تنظیم اسمزی یا محافظت از غشای سلولی مرتبط است. طی این فرآیند فیزیولوژیکی، سلول‌های گیاهی ترکیبات اسمولیت مانند اسیدهای آمینه (بویژه پرولین)، قندهای محلول و غیره را جذب می‌کنند که باعث کاهش پتانسیل اسمزی و حفظ فشار تورژسانس

سلول‌های گیاهی در سطح بالایی می‌شود. بنابراین، افزایش پرولین و قندهای محلول تحت تنش آبی، سطوح رادیکال‌های آزاد را در محدوده طبیعی حفظ می‌کند (سم‌زدایی از رادیکال‌های آزاد) و پراکسیداسیون لیپیدی را کاهش داده و غشاها را تثبیت می‌کند (Furlan *et al.*, 2019). علاوه بر این، استفاده از نانوذرات سلنیوم باعث افزایش محتوای قندهای محلول و پرولین می‌شود که ممکن است به دلیل نقش کلیدی نانوذرات سلنیوم در کاهش تجزیه کلروفیل و افزایش سرعت فتوسنتز باشد که باعث افزایش کربوهیدرات و سایر مولکول‌های زیستی تحت تنش آب می‌شود. گیاهان زمانی که در معرض تنش‌های متفاوتی قرار می‌گیرند، غلظت پرولین را جهت تنظیم نفوذ سلولی تغییر داده و بدین وسیله از خود در برابر آسیب تنش محافظت می‌کنند (Bhagyawant *et al.*, 2019). محلول‌پاشی نانوذره سلنیوم میزان پرولین در گیاه تحت تنش را افزایش می‌دهد که این افزایش به دنبال افزایش بیان ژن‌های مرتبط با پرولین رخ می‌دهد (Babashpour-Asl *et al.*, 2012). محلول‌پاشی سلنیوم با افزایش فعالیت گلوتامیل کیناز (آنزیم کاتالیزکننده پرولین و نخستین آنزیم مسیر بیوسنتزی پرولین که در تبدیل گلوتامات به پرولین نقش دارد)، تولید پرولین را تقویت کند، این آنزیم تجمع پرولین را در گیاهان کنترل می‌کند (Khan *et al.*, 2015). (Ghasemian *et al.*, 2021) نیز نشان دادند که نانوذره سلنیوم محتوای پرولین را افزایش می‌دهد. با افزایش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز، که برای تولید پرولین ضروری است، تولید پرولین بیشتر می‌شود. استفاده از سلنیوم باعث می‌شود محتوای پکتین و همی سلولز افزایش و در نتیجه ضخامت دیواره سلولی بیشتر شود و همچنین از اتصال فلزات مضر به دیواره سلولی جلوگیری بعمل آید (Zhao *et al.*, 2019). اثر مثبت استفاده از نانوذره سلنیوم در سرخارگل تحت تنش خشکی با نتایج مطالعات بالا مطابقت دارد.

انباشت مالون‌دی‌آلدهاید

مالون‌دی‌آلدهاید (MDA) ترکیبی آلدهیدی و آلی، فعال و بسیار واکنش‌پذیر است که حاصل پراکسیداسیون اسیدهای چرب غیراشباع است. در نتیجه با اندازه‌گیری میزان مالون‌دی‌آلدهاید در نمونه‌های زنده متفاوت می‌توان به میزان پراکسیداسیون چربی‌ها پی‌برد و از آن به عنوان یک نشانگر برای اندازه‌گیری سطح تنش اکسیداتیو در یک موجود زنده و آسیب به غشاهای زیستی استفاده نمود. از طرفی چون مالون‌دی‌آلدهاید خود ترکیبی فعال و بسیار واکنش‌پذیر است با حمله به مولکول‌های دیگر، با برقراری اتصال کووالان و محکم، عملکرد مولکول‌ها و نهایتاً عملکرد سلول را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین اتصال مالون‌دی‌آلدهاید به بازهای پورینی در ساختمان DNA سبب خاصیت جهش‌زایی می‌شود. با توجه به اهمیت مالون‌دی‌آلدهاید به عنوان یک نشانگر پراکسیداسیون چربی‌ها و همچنین عملکرد منفی آن در برابر سلامت گیاه، نیاز به ارزیابی مالون‌دی‌آلدهاید در تحقیقات بسیار ضروری است تا بتوان با راهکارهایی میزان تولید آن را در شرایط تنش گیاهی کاهش داد. تعیین سطح پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی با اندازه‌گیری محتوای مالون‌دی‌آلدهاید مشخص می‌شود و از این‌رو یک مشخصه بیوشیمیایی تنش محسوب می‌شود زیرا این ماده تولید زیست‌توده را به حداقل می‌رساند و

میزان سازگاری گیاه با تنش را کاهش می‌دهد (Hernández & Almansa., 2002). در پژوهشی به بررسی اثر تغذیه برگ با نانو دی‌اکسید سلنیوم در سه غلظت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌مولار روی لوبیا (*Phaseolus vulgaris L.*) پرداخته شد. نتایج افزایش قابل توجه شاخص‌های مربوط به رشد و عملکرد را نشان داد. رنگدانه‌های مربوط به فتوسنتز، محافظت‌کننده‌های اسمزی (پرولین آزاد و قندهای محلول) و همچنین کلیه فعالیت‌های آنزیمی از جمله این موارد هستند. محلول‌پاشی نانوذره سلنیوم باعث شد نشانگرهای تنش اکسیداتیو از جمله رادیکال سوپراکسید و پراکسید هیدروژن و همچنین میزان مالون‌دی‌آلدهید و نشت یونی، کاهش قابل توجه‌ای نشان دهد. بهترین نتایج ثبت شده با اعمال محلول‌پاشی نانوذره سلنیوم در غلظت ۱ میلی‌مولار گزارش شد که اثرات منفی تنش شوری خاک را کاهش داد (Rady et al., 2021). در مطالعه‌ای دیگر محلول‌پاشی نانو ذرات سلنیوم در غلظت‌های ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر در گیاه گشنیز (*Coriandrum sativum L.*) مورد مطالعه قرار گرفت. تنش کادمیوم باعث افزایش محتوای مالون‌دی‌آلدهید و پرولین می‌شود که محلول‌پاشی با نانوذره باعث کاهش میزان مالون‌دی‌آلدهید گردید. در کل عنوان گردید که محلول‌پاشی ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم باعث کاهش عوارض تنش کادمیوم شده است (Babashpour-Asl et al., 2022). نتایج مطالعه حاضر مبنی بر اثرگذاری نانوذره سلنیوم بر صفت مالون‌دی‌آلدهید و کاهش مقدار آن در گیاه تحت شرایط تنش شدید، با پژوهش‌های ذکر شده مطابقت نشان داد.

فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز

گیاهان سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی پیچیده‌ای برای از بین بردن رادیکال‌های آزاد دارند. سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی شامل سیستم آنزیمی و سیستم غیر آنزیمی است. سیستم آنزیمی شامل آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مختلفی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و غیره است. آنزیم‌ها در زمان وقوع تنش خشکی، نقش مهمی در القای مقاومت ایفا می‌کنند (Samynathan et al., 2023). مطالعات اخیر نشان داده است که سلنیوم توانایی بسیاری از گیاهان را برای حذف رادیکال‌های آزاد از طریق سیستم آنزیمی بهبود می‌بخشد (Pereira et al., 2018). به گفته Al-Deriny et al., (2020) نانوذرات سلنیوم در غلظت‌های پایین باعث ایجاد تغییر در اسید جاسمونیک، اسید سالیسیلیک و اتیلن می‌شوند و سیگنال‌دهی آن باعث تغییر در متابولیسم همراه با بیان ژن‌های دفاعی می‌شود (Al-Deriny et al., 2020). طبق گفته محققان نانو ذرات سلنیوم با افزایش عملکرد دانه، درصد تشکیل دانه از گرده، سرعت فتوسنتز و کاهش تنش اکسیداتیو، آسیب تنش ناشی از دمای بالا را کاهش می‌دهند (Djanaguiraman et al., 2018). تیمار با سلنیوم باعث فعالیت بیشتر آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، دهیدروآسکوربات ردوکتاز، گلوکاتایون ردوکتاز و مونودیهیدروآسکوربات ردوکتاز می‌شود که آنزیم‌هایی با ظرفیت آنتی‌اکسیدانی هستند (Schiavon et al., 2017). نتایج مطالعه حاضر در شرایط تنش شدید با تحقیقات ذکر شده مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

در شرایط تنش خشکی، گیاه راهکارهای متنوعی برای فرار یا اجتناب از عواقب تنش انتخاب می‌کند اما سطوح شدید تنش باعث آسیب جدی به ساختار گیاه و تغییر روند فعالیت‌های بیوشیمیایی گیاه می‌شود. در نتیجه استفاده از موادی همچون نانوذره سلنیوم می‌تواند به عنوان ماده کمکی عمل کرده و با ایجاد تداخل در فرآیندهای مختلف، میزان مقاومت گیاه را افزایش و آسیب وارده به آن را کاهش دهد. این نانوذره قادر به حذف رادیکال‌های آزاد و ایجاد تغییرات در میزان تولید تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی است و بدین وسیله اثرگذاری خود را در گیاه اعمال می‌کند. طبق نتایج بدست‌آمده از مطالعه ما و بررسی عملکرد نانوذره تحت سطوح مختلف بکار رفته خشکی در این آزمایش و مطالعه صفات عملکردی و بیوشیمیایی، مشخص شد که محلول‌پاشی نانوذره سلنیوم توانسته میزان مقاومت گیاه سرخارگل را در شرایط تنش افزایش دهد و میزان آسیب وارده به ساختار گیاه را تحت شرایط تنش شدید، تعدیل بخشد. بررسی و مطالعه سایر غلظت‌های نانوذره سلنیوم و مقایسه آن با سایر منابع سلنیوم و همچنین کاربرد نانوذره بصورت کودآبیاری در مراحل نشایی گیاه سرخارگل به منظور ارزیابی تغییرات سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌تواند درک ما را نسبت به این عنصر شبه فلزی مفید و اثرات آن در کاهش صدمات ناشی از تنش‌های اکسیداتیو گسترده‌تر کند.

References

- Abdoli, M., Moieni & Badi H.N. (2013). Morphological, physiological, cytological and phytochemical studies in diploid and colchicine-induced tetraploid plants of *Echinacea purpurea* (L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 35, 2075–2083. <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1242-9>.
- Allen, D.J., Kee, I.F.M., Farage, P.K., & Baker, N.R. (1998). Analysis of the limitation to CO₂ assimilation to exposure of leaves of two *Brassica napus* cultivars to UV-B. *Plant, Cell & Environment*, 20, 633–640. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1997.00093.x>.
- Asghari, J., Mahdavi, H., Rezaei-Chiyaneh, E., Banaei-Asl, F., Amani Machiani, M., & Tom Harrison, M. (2023). Selenium Nanoparticles Improve Physiological and Phytochemical Properties of Basil (*Ocimum basilicum* L.) under Drought Stress Conditions. *Land*, 12(1), 164. <https://doi.org/10.3390/land12010164>.
- Attarzadeh, M., Balouchi, H., Rajaie, M., Dehnavi, M.M., & Salehi, A. (2020). Improving growth and phenolic compounds of *Echinacea purpurea* root by integrating biological and chemical resources of phosphorus under water deficit stress. *Industrial Crops and Products*, 154, 112763. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112763>.
- Babashpour-Asl, M., Farajzadeh Memari Tabrizi, E., & Yousefpour-Dokhanieh, A. (2022). Foliar-applied selenium nanoparticles alleviate cadmium stress through changes in physio-biochemical status and essential oil profile of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(53), 80021-80031. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19941-1>.
- Bates, L.S., Waldren, R.P. & Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39(1), 205–207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>.
- Bhagyawant, S.S., Narvekar, D.T., Gupta, N., Bhadkaria, A., Koul, K.K., & Srivastava, N. (2019). Variations in the antioxidant and free radical scavenging under induced heavy metal stress expressed as proline content in chickpea. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 25(3), 683–696. <https://doi.org/10.1007/s12298-019-00667-3>.
- Bruni, R., Brighenti, V., Caesar, L.K., Bertelli, D., Cech, N.B., & Pellati, F. (2018). Analytical methods for the study of bioactive compounds from medicinally used *Echinacea* species. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 160, 443–477. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2018.07.044>.

- Djanaguiraman, M., Belliraj, N., Bossmann, S.H., & Prasad, P.V. (2018). High-temperature stress alleviation by selenium nanoparticle treatment in grain sorghum. *ACS Omega*, 3, 2479–2491. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b01934>.
- El Lateef Gharib, F.A., Zeid, I.M., Ghazi, S.M., & Ahmed, E.Z. (2019). The response of cowpea (*Vigna unguiculata* L) plants to foliar application of sodium selenate and selenium nanoparticles (SeNPs). *Journal of Nanomaterials & Molecular Nanotechnology*, 8, 4. DOI: 10.4172/2324-8777.1000272.
- Furlan, A.L., Bianucci, E., Giordano, W., Castro, S., & Becker, D.F. (2020). Proline metabolic dynamics and implications in drought tolerance of peanut plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 151, 566–578. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.010>.
- Ghasemian, S., Masoudian, N., Saeid Nematpour, F., & Safipour Afshar, A. (2021). Selenium nanoparticles stimulate growth, physiology, and gene expression to alleviate salt stress in *Melissa officinalis*. *Biologia*, 76, 2879–2888. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s11756-021-00854-2>.
- Ghazi, D.A. (2018). The contribution of nano-selenium in alleviation of salinity adverse effects on coriander plants. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 9(12), 753-760. DOI: 10.21608/jssae.2018.36530.
- Haghighi, M., Abolghasemi, R., & da Silva, J.A.T. (2014). Low and high temperature stress affect the growth characteristics of tomato in hydroponic culture with Se and nano-Se amendment. *Scientia Horticulturae*, 178, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.006>.
- Hanafy, M., Aly, U., & Mohamed, A. (2010). Regeneration and transformation via *Agrobacterium tumefaciens* of *Echinacea purpurea* L. *Plant Tissue Culture and Biotechnology*, 20(2), 101-111. DOI: 10.3329/ptcb.v20i2.6888
- Harborne, J.B., & Williams, C.A. (2004). Phytochemistry of the genus *Echinacea*, In: Miller, S.C. and Yu, H. (eds.) *Echinacea: The genus Echinacea (Medicinal and Aromatic Plants - Industrial Profiles)*. CRC Press, pp. 55-71. ISBN 9780415288286.
- Hashmat, S., Shahid, M., Tanwir, K., Abbas, S., Ali, Q., Niazi, N. K., Akram, M. S., Saleem, M. H., & Javed, M.T. (2021). Elucidating distinct oxidative stress management, nutrient acquisition and yield responses of *Pisum sativum* L. fertigated with diluted and treated wastewater. *Agricultural Water Management*, 247, 106720. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106720>.
- Hernández, J.A., & Almansa, M. (2002). Short-term effects of salt stress on antioxidant systems and leaf water relations of pea leaves. *Physiologia Plantarum*, 115(2), 251-257. DOI: 10.1034/j.1399-3054.2002.1150211.x.
- Javanmard, A., Ashrafi, M., Morshedloo, M.R., Machiani, M.A., Rasouli, F., & Maggi, F. (2022). Optimizing phytochemical and physiological characteristics of Balangu (*Lallemantia iberica*) by foliar application of chitosan nanoparticles and myco-root inoculation under water supply restrictions. *Horticulturae*, 8(8), 695. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8080695>.
- Kang, H.M., & Saltveit, M.E. (2002). Chilling tolerance of maize, cucumber and rice seedling (leaves and roots) and differentially affected by salicylic acid. *Physiologia Plantarum*, 115(4), 571-576. DOI: 10.1034/j.1399-3054.2002.1150411.x.
- Kiumarzi, F., Morshedloo, M.R., Zahedi, S.M., Mumivand, H., Behtash, F., Hano, C., Chen, J.T., & Lorenzo, J.M. (2022). Selenium nanoparticles (Se-NPs) alleviates salinity damages and improves phytochemical characteristics of pineapple mint (*Mentha suaveolens* Ehrh.). *Plants*, 1(10), 1384. <https://doi.org/10.3390/plants11101384>.
- Kumar, A., Gupta, K., Dixit, S., Mishra, K., & Srivastava, S. (2019). A review on positive and negative impacts of nanotechnology in agriculture. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 2175–2184. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2119-7>.
- Mac Adam, J.W., Nelson, C.J., & Sharp, R.E. (1992). Peroxidase activity in the leaf elongation zone of tall fescue. *Plant Physiology*, 99(3), 872–878. doi: 10.1104/pp.99.3.872.
- Malheiros, R.S., Costa, L.C., Ávila, R.T., Pimenta, T.M., Teixeira, L.S., Brito, F.A., & Zsögön, A. (2019). Selenium downregulates auxin and ethylene biosynthesis in rice seedlings to modify primary metabolism and root architecture. *Planta*, 250(1), 333–345. 10.1007/s00425-019-03175-6.
- Mehrpooya, Zh., Abdoli, M., & Talebian, M.R. (2021). Effect of salicylic acid and yeast extract on caffeic acid derivatives production in *Echinacea purpurea* L. *Journal of Medicinal Plants*, 20(78): 36-47. 10.52547/jmp.20.78.36.
- Merwad, ARM., Desoky, ESM., & Rady, MM. (2018). Response of water deficit-stressed *Vigna unguiculata* performances to silicon, proline or methionine foliar application. *Scientia Horticulturae*, 228(3), 132-144. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.10.008.

- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22(5), 867-880. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>.
- Neysanian, M., Iranbakhsh, A., Ahmadvand, R., OraghiArdebili, Z., & Ebadi, M. (2020). Comparative efficacy of selenate and selenium nanoparticles for improving growth, productivity, fruit quality, and postharvest longevity through modifying nutrition, metabolism, and gene expression in tomato; potential benefits and risk assessment. *PLoS ONE*, 15, e0244207. DOI: 10.1371/journal.pone.0244207.
- Ostadi, A., Javanmard, A., Amani Machiani, M., Sadeghpour, A., Maggi, F., Nouraein, M., Morshedloo, M.R., Hano, C., & Lorenzo, J.M. (2022). Co-Application of TiO₂ Nanoparticles and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Improves Essential Oil Quantity and Quality of Sage (*Salvia officinalis* L.) in Drought Stress Conditions. *Plants*, 11(13), 1659. <https://doi.org/10.3390/plants11131659>.
- Parsons, J.L., Cameron, S.I., Harris, C.S., & Smith, M.L. (2018). *Echinacea* biotechnology: advances, commercialization and future considerations. *Pharmaceutical Biology*, 56(1), 485-494. <https://doi.org/10.1080/13880209.2018.1501583>.
- Pereira, G.A., Gerolis, L.G.L., Gonçalves, L.S., Pedrosa T.A., & José Neve, M. (2018). Selenized *Saccharomyces cerevisiae* cells are a green dispenser of nanoparticles. *Journal of Biomedical Physics & Engineering Express* 4(3), 035028. doi:10.1088/2057-1976/aab524.
- Rady, M.M., Belal, H.E., Gadallah, F.M., & Semida, W.M. (2020). Selenium application in two methods promotes drought tolerance in *Solanum lycopersicum* plant by inducing the antioxidant defense system. *Scientia Horticulturae*, 266:109290. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109290>.
- Ragavan, P., Ananth, A., & Rajan, M.R. (2017). Impact of selenium nanoparticles on growth, biochemical characteristics and yield of cluster bean *Cyamopsis tetragonoloba*. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB)* 2(6), 2917-2926. DOI: 10.22161/ijeab/2.6.19.
- Rezaei Nazari, M., Abdossi, V., Zamani Hargalani, F., & Larijani, K. (2021). The response of *Hypericum perforatum* L. to the application of selenium and nano-selenium. *Research square*. 1-9. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-708123/v1>.
- Samynathan, R., Venkidasamy, B., Shanmugam, A., Sathishkumar Ramalingam, S., & Thiruvengadam, M. (2023). Functional role of microRNA in the regulation of biotic and abiotic stress in agronomic plants. *Frontiers in Genetics*, 14:1272446. doi: 10.3389/fgene.2023.1272446.
- Sardari, M., Rezayian, M., & Niknam, V. (2022). Comparative Study for the Effect of selenium and nano-selenium on wheat plants grown under drought stress. *Russian Journal Plant Physiology*, 69, 127. <https://doi.org/10.1134/S102144372206022X>.
- Schiavon, M., Ertani, A., Parrasia, S., & Dalla Vecchia, F. (2017). Selenium accumulation and metabolism in algae. *Aquatic toxicology*, <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.05.011>.
- Seliem, M.K., Hafez, Y., & El-Ramady, H. (2020). Using Nano-selenium in reducing the negative effects of high temperature stress on *Chrysanthemum morifolium* Ramat. *Journal of Sustainable Agricultural Sciences*, 46(3), 47-60. <https://doi.org/10.21608/jsas.2020.23905.1203>.
- Shahraki, B., Bayat, H., Aminifard, M.H., & Azarmi Atajan, F. (2022). Effects of foliar application of selenium and nano-selenium on growth, flowering, and antioxidant activity of pot marigold (*Calendula officinalis* L.) under salinity stress conditions. *Journal of Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(20), 2749-2765. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2089679>.
- Tahmasebi, A., Ebrahimie, E., Pakniyat, H., Ebrahimi, M., & Mohammadi-Dehcheshmeh, M. (2019). Tissue-specific transcriptional biomarkers in medicinal plants: application of large-scale meta-analysis and computational systems biology. *Gene* 691, 114-124. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2018.12.056>.
- Tavakoli, S., Enteshari, S., & Yousefifard, M. (2020). Investigation of the effect of selenium on growth, antioxidant capacity and secondary metabolites in *Melissa officinalis*. *Iranian Journal of Plant Physiology*, 10(2), 3125-3134. 10.30495/ijpp.2020.672572.
- Thygesen, L., Thulin, J., Mortensen, A., & Skibsted, L. (2007). Antioxidant activity of cichoric acid and alkamides from *Echinacea purpurea*, alone and in combination. *Food Chemistry*. 101(1), 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.11.048>.

- Valentovic, P., Luxova, M., Kolarovi, L., & Gasparikora, O. (2006). Effect of osmotic stress on compatible solutes content, membrane stability and water relations in two maize cultivars. *Plant, Soil and Environment*, 52(4), 186-191. DOI: 10.17221/3364-PSE.
- Wagner, G.J. (1979). Content and vacuole extra vacuole distribution of neutral sugars, free amino acids and anthocyanins in protoplasts. *Plant Physiology*, 64(1): 88-93. <https://doi.org/10.1104/pp.64.1.88>.
- Wang, Y., Rao, C., Huang, L., Wu, J., Sun, P., Zhan, J., Wu, J., Liu, S., Zhou, C., Hu, L., Li, N., Chen, J., & He, X. (2024). Effects of organic selenium and nanoselenium on drought stress of pak choi (*Brassica chinensis* var. *pekinensis*. cv. 'Suzhouqing') and Its Transcriptomic Analysis. *Agronomy*, 14(1), 78; <https://doi.org/10.3390/agronomy14010078>.
- Zahedi, S.M., Moharrami, F., Sarikhani, S., & Padervand, M. (2020). Selenium and silica nanostructure-based recovery of strawberry plants subjected to drought stress. *Scientific Reports*, 10, 17672. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74273-9>.
- Zhao, X., Zhao, Q., Chen, H., & Xiong, H. (2019). protective role in soybean β -conglycinin (7S globulins) under AAPH-induced oxidative stress. *Food Chemistry*, 272, 201-209. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.039>.

Extended Abstract

Introduction

Echinacea purpurea is a valuable plant from the asteraceae family, which has ornamental and medicinal value, and its cultivation has become common in urban green space in recent years. Considering the importance of *Echinacea purpurea* from an ornamental and medicinal point of view, the continuation of climate changes and water deficiency as a global concern, the need to use new and efficient methods to increase the tolerance or resistance of plants to drought stress conditions and considering the beneficial effects of some elements, especially at the nano scale and also, the role of selenium as a useful element in plant nutrition and conferring tolerance to environmental stressors including drought, the effects of selenium nanoparticles foliar spraying in *Echinacea purpurea* cv. Rose Carmine under drought stress conditions were investigated.

Materials and Methods

The seedlings of Rose Carmine variety were transferred to field conditions after growing sufficiently in the plug trays in the research greenhouse of Urmia University. Drought stress levels were applied based on the soil field capacity at four levels (20, 40, 60 and 100% of the field capacity) by measuring the soil moisture at the root depth using the TDR device. Selenium nanoparticles treatment were applied at four levels of zero (control), 5, 10 and 20 mg per liter as foliar spraying with two-week intervals and in a three-months period, concurrently with drought stress. The experiment was carried out as a split plot in the form of a completely randomized design with three replications. With the completion of the flowering period, plant samples were collected and the intended morphological and physiological traits were measured. Analysis of variance and data mean comparison was done using SAS statistical analysis software, and Duncan's multiple range test, respectively.

Results and Discussion

In this study, the highest activity of ascorbate peroxidase enzyme was observed in the 20 mg. l⁻¹ of selenium nanoparticles under 20% field capacity drought stress conditions, which showed a significant difference compared to

the control. This result may be attributed to the antioxidant protective effects of selenium, the improvement of the plant's metabolic efficiency, and the enhancement of nutrient uptake and availability due to selenium.

Additionally, the lowest accumulation of malondialdehyde (MDA) was observed in the 5 mg. l⁻¹ selenium nanoparticles under 20% field capacity drought stress conditions. Malondialdehyde is considered a marker of lipid peroxidation, and its increase is typically regarded as an indicator of oxidative damage in plant tissues under stress conditions. Therefore, the reduction of MDA levels indicates plant resistance and mitigation of drought stress adverse effects on cell membrane. The lowest MDA level in the treatment with 5 mg. l⁻¹ of selenium nanoparticles under severe drought stress indicates that this nano-element has effectively reduced damages caused by oxidative stress. Additionally, the highest activity of the guaiacol peroxidase was recorded in 20 mg. l⁻¹ selenium nanoparticle treatment under 40% of field capacity drought stress. In our study, selenium was able to improve the plant's defense system against free radicals and reducing cellular damage.

Conclusion

According to the results obtained from our study about the performance of selenium nanoparticles under different drought stress levels, it can be concluded that foliar spraying of selenium nanoparticles is able to increase the resistance of the *Echinacea purpurea* under stress conditions and alleviating the damages to the plant structure under extreme stress conditions. Strengthening the antioxidant defense system by nano-selenium and consequently, decreasing lipid peroxidation, regulating plant metabolism and improving metabolic efficiency can be attributed as potential reasons for this.