

تأثیر نانو سلنیوم و سلنات سدیم بر پارامترهای بیوشیمیایی، فیزیولوژیک و رشدی فلفل دلمه‌ای

شیوا طباطبایی رودسری^۱، علیرضا ایرانبخش^۱، منصوره شمیلی^۲ و زهرا اوراچی اردبیلی^۳

^۱گروه زیست شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران؛ ^۲گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، هسته پژوهشی علوم و فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشکده هرمز، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران؛ ^۳گروه زیست شناسی، واحد گرمسار، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمسار، ایران
مسئول مکاتبات: علیرضا ایرانبخش، iranbakhsh@iau.ac.ir

چکیده. سلنیوم جزء عناصر غیرضروری برای گیاهان و ضروری برای انسان و جانوران به شمار می‌رود. اگرچه هنوز نقش سلنیوم در گیاهان به درستی شناخته نشده است اما نتایج تحقیقات نشان داده که این عنصر در فیزیولوژی و متابولیسم گیاهان مؤثر است. در پژوهش حاضر تأثیر محلول پاشی نانو سلنیوم (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) و سلنات سدیم (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annum*) مورد بررسی قرار گرفت. اثرات تیمارهای اعمال شده بر شاخص‌های مختلف رشدی و بیوشیمیایی ارزیابی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، تیمارهای سلنیوم در غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر باعث کاهش تجمع بیومس در ریشه و اندام هوایی شد. این تیمارها همچنین موجب افزایش درمحتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدئید شد. استفاده از سلنیوم موجب افزایش در میزان فنل، پرولین و تیول‌ها شد. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شامل کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات‌پراکسیداز، پلی‌فنل‌اکسیداز و نیز آنزیم پروتئاز در پاسخ به تیمارهای سلنیوم افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی. آسکوربات‌پراکسیداز، پراکسیداز، پلی‌فنل‌اکسیداز، کاتالاز، فنل، مالون‌دی‌آلدئید

The effect of nano selenium and sodium selenate on biochemical, physiological, and growth parameters of Bell pepper (*Capsicum annum*)Shiva Tabatabai Rudsari¹, Alireza Iranbakhsh¹, Mansoure Shamili² & Zahra Oraghi Ardabili³

¹Department of Biology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran; ²Horticulture Department, Agriculture Faculty, Nanoscience, Nanotechnology and nanomaterials Research Center, Hormoz Research Center, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran; ³Department of Biology, Garmsar Branch, Islamic Azad University, Garmsar, Iran

Correspondent author: Alireza Iranbakhsh, iranbakhsh@iau.ac.ir

Abstract. Selenium, a non-essential element for plants, is essential for animals as well as human beings. Although the role of selenium in plants is yet to be properly understood, previous researches have shown that this element can affect plant growth and metabolism. In this study, the effect of foliar application of selenium nanoparticles (0, 5, 10, and 20 mg/L) and sodium selenate (0, 5, 10, and 20 mg/L) on the physiological and biochemical responses of bell pepper (*Capsicum annum* L.) was investigated. The potential changes in various growth and biochemical indices were evaluated in response to the treatments. According to the results, selenium treatments at concentrations of 10 and 20 mg/L reduced the biomass accumulation in both roots and shoots. These treatments also increased the content of hydrogen peroxide and malondialdehyde. The foliar application of selenium led to the increase of the concentrations of soluble phenols, proline and thiols. The activity of antioxidant enzymes including catalase, peroxidase, ascorbate peroxidase, and polyphenol oxidase were increased in response to the selenium treatments. The protease activity displayed a similar upward trend following the selenium treatments.

Key words. ascorbate peroxidase, catalase, malondialdehyde, peroxidase, phenol, polyphenol oxidase

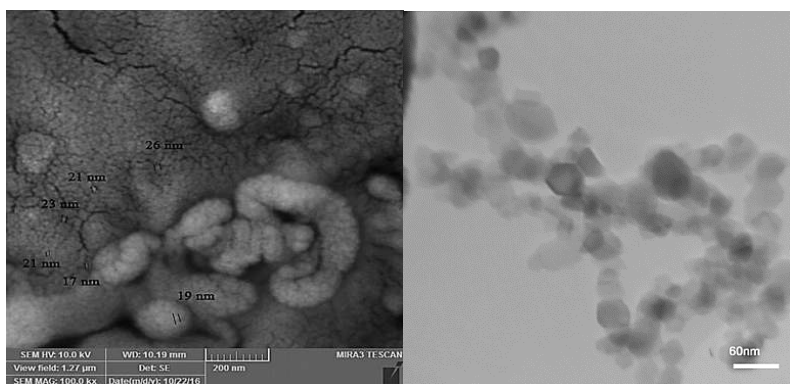
مقدمه

فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annuum* L.) متعلق به تیره بادنجانیان (Solanaceae) و بومی نواحی حاره‌ای آمریکا است. علاوه بر اهمیت اقتصادی و غذایی، خواص آنتی‌اکسیدانی بسیاری نیز دارد (Iranbakhsh & Ghaderi, 2020). خنثی نمودن رادیکال‌های آزاد اکسیژن، کاهش خسارت ناشی از تنش‌های اکسیداتیو و ممانعت از بروز سرطان، از جمله اثرات مفید ترکیبات فیتوشیمیایی موجود در فلفل دلمه‌ای است (Mardanlu et al., 2014).

تنش‌های زیستی رشد و تولید گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. عمده‌ترین تغییرات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک در گیاهان در مواجهه با این شرایط عبارتند از تجمع رادیکال‌های آزاد، اختلال در متابولیسم سلول، پراکسید شدن لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک (Mittler et al., 2004). علاوه بر این، تنش‌های اکسیداتیو مورفولوژی گیاه را نیز تحت تأثیر قرار داده و کاهش محسوس در تعداد برگ، طول اندام‌ها، ارتفاع شاخساره و تغییر در وزن تر و خشک را به همراه دارند (Bhantana & Lazarovich, 2010).

سلنیوم از نظر خواص شیمیایی مشابه گوگرد است و این تشابه در فرآیندهای جایگزینی سلول تأثیر گذاشته و جایگزینی آن به جای گوگرد در پروتئین‌ها و دیگر ترکیبات گوگردی را موجب می‌گردد. گیاهان، سلنیوم را به Se-methionine تبدیل و آن را به جای متیونین در پروتئین قرار می‌دهند (Tapiero et al., 2003). گیاهانی که با سلنیوم تغذیه شده‌اند، تجمع نشاسته در کلروپلاست‌های آن‌ها افزایش یافته و همچنین نقش تنظیم کنندگی آن در تنظیم وضعیت آبی گیاه تحت شرایط تنش خشکی به اثبات رسیده است. همچنین این عنصر می‌تواند با ممانعت از تخریب کلروفیل در شرایط تنش‌های محیطی، سبب افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گردد (Bybordi, 2016). سلنیوم قادر است به طور قابل توجهی محتوای کلروفیل را بالا برد و این افزایش در محتوای کلروفیل می‌تواند در طی افزایش محتوای کاروتنوئید باشد، زیرا کاروتنوئیدها کلروفیل را از تخریب اکسیداسیون نوری حفاظت می‌کنند (Khademi Astaneh et al., 2015). سلنیوم، محتوای کلروفیل کل و فعالیت کاتالاز را در گندم افزایش داده و موجب تخفیف خسارت ناشی از تنش کادمیوم و در نهایت افزایش وزن خشک و تر گردیده است (Daryaei, 2015). همچنین سلنات سدیم (۱۰ میلی‌گرم در لیتر) با افزایش فعالیت آنزیم فنیل‌آلانین آمونیا لیاز و فنل، در نهایت محتوای سلنیوم و رشد اندام هوایی را در بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) افزایش داده است (Habibi et al., 2016).

سلنیوم در دوزهای پایین به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان عمل کرده و رشد گیاه را افزایش می‌دهد ولی در سطوح بالاتر باعث کاهش بازده گیاه می‌شود. نانوذره‌ی سلنیوم، سمیت بسیار کمتری در مقایسه با عنصر سلنیوم داشته، در عین حال قدرت بالایی در پاک‌سازی رادیکال‌های آزاد دارد. این ذره موجب سم‌زدایی هیدروپراکسیدازها و لیپوهیدروپراکسیدازها در سطوح سیتوپلاسمی و ماتریکس میتوکندری می‌شود (Esparham et al., 2017). همچنین سلنیوم با کاهش محتوی پرولین و مالون دی‌آلدئید و افزایش فعالیت کاتالاز، پلی فنل اکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و نیز پراکسید هیدروژن، موجب کاهش اثرات مخرب کادمیوم و فعال کردن سیستم دفاعی گیاه سیر (*Allium sativum*) در شرایط سمیت کادمیوم گردید (Namdar & Bahreman, 2019). نانوذرات با اتصال به مولکول‌های فعال بیولوژیکی شامل پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک، از غشا سلول عبور می‌کنند. سپس بسته به ماهیت ذره و مقدار آن با تقویت یا از کاراندازی سیستم آنتی‌اکسیدانی، از اثرات مخرب ناشی از تنش اکسیداتیو کاسته یا موجب مرگ برنامه‌ریزی شده سلول می‌شوند (Lei et al., 2008). نانواکسیدرویی، جوانه‌زنی بذر فلفل چیلی (*Capsicum annuum*) را افزایش داد (Afrayem & Chaurasia, 2017). نانوسلنیوم (۴ میکرومولار) موجب افزایش رشد و تحریک فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز (۳۵٪) و کاتالاز (۱۰٪) (Abolghasemi & Haghghi, 2018) در گوجه‌فرنگی شده و به‌طور قابل توجهی فعالیت کاتالاز در ریشه خربزه تلخ (*Momordica charantia*) را افزایش داد (Rajae Behbahani et al., 2020). میزان تیول‌های پروتئینی با افزایش غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی و ریشه ذرت افزایش نشان دادند (Pourakbar, 2011). فعالیت آنزیم پروتئاز نیز در گیاه سیب‌زمینی در تیمار با نیترات نقره نسبت به نانو نقره افزایش نشان داد (Bagherzadeh Homaei & Ehsanpour, 2016). در بررسی تأثیر سه نانوذره سلنیوم، سیلیسیوم و مس بر ماده فعال زیستی ترکیبات میوه‌های فلفل دلمه‌ای تحت تنش شوری معلوم شد که نانوذرات افزایش دهنده فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مهار ROS مانند آسکوربات پراکسیداز، برای محافظت از سلول‌ها در برابر آسیب اکسیداتیو هستند (González-García et al., 2021). نظر به ورود نانوذرات در عرصه اکولوژی و تأثیر آن‌ها بر محصولات کشاورزی، انجام پژوهش در این حوزه ضروری می‌نماید. لذا در این تحقیق تأثیر محلول‌پاشی نانوذره سلنیوم (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) و سلنات سدیم (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) بر پاسخ‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی گیاه فلفل دلمه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت.



شکل ۱- تصاویر نانوذره سلینیوم برحسب نانومتر (nm)، SEM (راست) و TEM (چپ).
Figure 1. SEM (right) and TEM (left) of selenium nanoparticles.

مواد و روش‌ها

بذرهای گیاه فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annum*) رقم Cavendish F₁ از شرکت POP Vriend Seeds (کشور هلند) تهیه گردید. سلنات سدیم (به‌عنوان بالک) و نانوذره سلینیوم از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه شدند. خصوصیات ساختاری ذرات نانوسلینیوم شامل خلوص: ۹۵-۹۹٪، میانگین سایز ذرات: ۴۵-۱۰ نانومتر، سطح ویژه (Specific surface): 30-50 m²/g، رنگ: خاکستری، شکل: تقریباً کروی، چگالی: 3.89 g است. مورفولوژی نانوذرات سلینیوم در شکل ۱ آمده است. پژوهش به‌صورت فاکتوریل در سه تکرار طراحی شد. فاکتورها شامل محلول‌پاشی با سطوح نانوذره سلینیوم و سلنات سدیم بود. بذرهای ضدعفونی شده در پتری دیش کشت شده و بعد از جوانه‌زنی و رسیدن به مرحله ۴ برگی (۷۰ روز بعد از کاشت) در گلدان‌هایی با حجم ۲ لیتر (بستر کشت مخلوطی از دو حجم ورمی‌کولایت و یک حجم پیت) قرار گرفتند، با محلول غذایی هوگلدن کامل تغذیه شدند و در شرایط نورخورشید در دمای ۲۰±۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۵±۴ درصد رشد یافتند. از مرحله ۶ برگی (۸۴ روز بعد از کاشت)، محلول‌پاشی گیاهان ۴ بار، به‌صورت یک هفته در میان (به منظور کاهش احتمال آسیب‌دیدگی گیاهان با تیمارها) با نانوذره سلینیوم (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) و سلنات سدیم (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) به صورت اسپری برگی انجام شد. دو روز بعد از آخرین تیمار (۱۳۵ روز بعد از کاشت) نمونه‌گیری از برگ جهت سنجش فعالیت کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات‌پراکسیداز، پروتئاز، پلی‌فنل‌اکسیداز، محتوای پرولین، مالون دی‌آلدئید، فنل کل، پراکسید هیدروژن، تیول‌های پروتئینی و غیرپروتئینی انجام شد. همچنین وزن تر و خشک ساقه و ریشه سنجش شد.

تهیه عصاره آنزیمی

عصاره آنزیمی از نیم‌گرم برگ تازه با استفاده از بافر استخراج (۱۰۰ میلی‌لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار، ۰/۰۳۷۲ گرم EDTA و یک گرم PVP) استخراج شد. سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز به روش اسپکتروفتومتری در طول موج ۲۴۰ نانومتر با استفاده از محیط واکنش محتوی بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌لیتر و پراکسید هیدروژن ۱۵ میلی‌مولار انجام شد (Dazy et al., 2008). فعالیت آنزیم پراکسیداز با ثبت تغییر در جذب در دقیقه در طول موج ۴۷۰ نانومتر بعد از افزودن عصاره آنزیمی به محیط واکنش حاوی افر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار و گوایکول ۱۳ میلی‌مولار و پراکسید هیدروژن ۵ میلی‌مولار) تعیین شد (Nakano & Asada, 1981). عصاره آنزیمی و محیط واکنش آنزیم اسکوربات پراکسیداز حاوی ۶۰ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار، ۰/۰۲۳ گرم EDTA ۰/۱ میلی‌مولار، و ۰/۰۵۳ گرم آسکوربات نیم میلی‌مولار به درون کووت ریخته شد. در مرحله بعد، ۲/۵ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۰/۱ میلی‌مولار به کووت اضافه شد. سپس تغییر جذب در دقیقه در طول موج ۲۹۰ نانومتر قرائت شد (Nakano & Asada, 1981). برای سنجش فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز، ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی به همراه ۲/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار و ۲۰۰ میکرولیتر پیروگال ۰/۰۲ مولار همگن شد و در نهایت جذب نوری به مدت ۳ دقیقه در طول موج ۲۴۰ نانومتر ثبت شد (Kar & Mishra, 1976).

سنجش فعالیت آنزیم پروتئاز

۵۰ میکرو عصاره آنزیمی با ۳۵۰ میکروبافر فسفات (PH=7) و ۸۰۰ میکرولیتر کازئین یک درصد مخلوط و به مدت ۱۰ دقیقه در دمای اتاق انکوبه شد. سپس ۴۰۰ میکرولیتر TCA ۱۰ درصد به آن اضافه و مجدداً ۲۰ دقیقه در دمای اتاق انکوبه شد. پس از

سنجش محتوای تیول‌های پروتئینی و غیرپروتئینی

۰/۱ گرم برگ به کمک ۲ میلی‌لیتر آسکوربات سدیم ۱۵ درصد همگن شد. سپس عصاره‌ها به میکروتیوب منتقل شده و سانتریفیوژ (۱۰۰۰۰ دور در دقیقه، ۵ دقیقه) شدند. این عصاره‌ها برای قرائت تیول‌های پروتئینی و غیر پروتئینی استفاده شدند. برای قرائت تیول پروتئینی ۵۰۰ میکرولیتر از محلول رویی با ۱ میکرولیتر بافر تریس اسیدی ۲۰۰ میلی مولار مخلوط شد. سپس ۵۰۰ میکرولیتر SDS هشت درصد و ۱۰۰ میکرولیتر DTNB ۱۰ میلی‌مولار (تهیه شده در بافر فسفات ۲۰ میلی‌مولار) به آن اضافه شد. بعد از قرار گرفتن نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۳۰ درجه، تیول پروتئینی در طول موج ۴۱۵ قرائت شد. سپس عصاره‌های حاوی تیول‌های پروتئینی را به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه انکوبه نموده و مجدداً سانتریفیوژ (۱۰۰۰۰ دور در دقیقه، ۲۰ دقیقه) شدند. در نهایت در همان طول موج ۴۱۵ قرائت و محتوای تیول‌های غیرپروتئینی محاسبه شد (De Kok & Kuiper 1986).

سنجش وزن تر و وزن خشک نمونه‌ها

به منظور تعیین وزن تر، ریشه و بخش هوایی توسط ترازوی دیجیتالی (با دقت ۰/۰۰۱) توزین شدند. سپس برای به دست آوردن وزن خشک، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۸۰ درجه سلیسیوس قرار گرفتند و در نهایت با ترازو وزن شدند.

آنالیز آماری داده‌ها

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. فاکتورها شامل نوع و غلظت سلنیوم بود. بعد از تأیید نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگراف-اسمیرنوف، آنالیز واریانس چند متغیره با در نظر گرفتن نوع و غلظت ذره به عنوان متغیر مستقل انجام شد. آزمون LSD برای مقایسه میانگین انجام شد. آنالیز واریانس توسط نرم‌افزار SPSS (P<0/05) version 24 صورت گرفت. خطوط بار بر روی ستون‌های نمودارها میانگین سه تکرار، به علاوه و منهای انحراف معیار هستند.

نتایج

نتایج تأثیر معنی‌دار نوع و غلظت سلنیوم بر محتوای کاتالاز را نشان داد. بیشترین محتوای کاتالاز به نانو ذره سلنیوم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر تعلق داشت (۱۹۹۵/۷۲ میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه). هر چند تیمار با هر دو ترکیب روندی صعودی در فعالیت آنزیم مذکور را باعث گردید اما بین غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر سلنات سدیم (۹۴۶/۲۷ میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه) با شاهد (۹۶۸/۲۹ و ۹۸۳/۸۷ میکرومول در دقیقه در گرم

سانتریفیوژ (۱۰۰۰۰ دور در دقیقه)، جذب عصاره در طول موج ۲۸۰ نانومتر سنجش شد (Kar & Mishra, 1976).

سنجش محتوای پرولین

۰/۵ گرم برگ تازه با ۵۰ میکرولیتر اتانول ۹۵ درصد و سپس با اتانول ۷۰ درصد همگن شد. عصاره‌ها سانتریفیوژ (۶۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۵ دقیقه) شدند. سپس ۲ میکرولیتر عصاره رویی با ۲ میکرولیتر محلول نین‌هیدرین و ۲ میکرولیتر اسید استیک خالص مخلوط شده و به مدت یک ساعت در بن ماری آب جوش انکوبه شدند. پس از آن به آب سرد منتقل شده و به هر نمونه ۴ میکرولیتر تولوئن اضافه شد و به مدت ۱۵ ثانیه ورتکس شدند و از فاز بالایی برای قرائت محتوای پرولین در طول موج ۵۲۰ نانومتر استفاده شد (Bates, et al., 1973). غلظت پرولین در واحد وزن برگ (میکرومول در هر گرم وزن تازه) از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$\mu\text{g proline/ml} \times \text{ml toluene} / 115.5 \times 5/\text{g sample}$$

سنجش محتوای مالون‌دی‌آلدئید

۰/۵ گرم برگ تازه با ۵ میکرولیتر TCA یک درصد همگن شد. سپس نمونه‌ها سانتریفیوژ (۱۰۰۰۰ دور در دقیقه، ۵ دقیقه) شدند و ۲۵۰ میکرولیتر از هر نمونه به میکروتیوب منتقل شد. سپس به هر نمونه ۱ میکرولیتر MDA (حاوی TCA ۵ درصد و TBA ۲۰ درصد) اضافه و ۳۰ دقیقه در حمام بن ماری ۹۵ درجه انکوبه شدند. نمونه‌ها به یخ منتقل شده و پس از آن ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند. در نهایت جذب عصاره در طول موج‌های ۵۲۳ و ۶۰۰ قرائت شد (Alexieva et al., 2001).

سنجش محتوای فنل کل

۰/۱ گرم نمونه برگ با ۱۰ میکرولیتر متانول ۸۰ درصد همگن و سانتریفیوژ (۶۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۵ دقیقه) شدند. سپس ۱۰۰ میکرولیتر عصاره به میکروتیوب منتقل شده و ۴۹۰ میکرولیتر آب و ۵۰۰ میکرولیتر معرف فولین به آن اضافه شده و به مدت ۳ دقیقه در تاریکی قرار گرفتند. بعد از آن ۵۰۰ میکرولیتر کربنات سدیم ۱٪ به هر نمونه افزوده و ۳۰ دقیقه در تاریکی قرار گرفتند. در نهایت فنل کل در طول موج ۷۶۵ قرائت شد (Spanos & Wrolstad, 1990).

سنجش محتوای پراکسید هیدروژن

۰/۵ گرم برگ تازه با ۵ میلی‌لیتر TCA یک درصد خرد شدند. سپس سانتریفیوژ (۱۲۰۰۰ دور در دقیقه، ۵ دقیقه) شده و ۲ میلی‌لیتر مخلوط واکنش (حاوی ۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار و ۱ میکرولیتر یدید پتاسیم و ۲۵۰ میکرولیتر TCA) افزوده و در طول موج ۳۹۰ نانومتر قرائت شد (Nakano & Asada, 1981).

در کمترین سطح نانو سلنیوم (۱۰/۸۸ میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه) با تیمارهای شاهد (۱۰/۵۹ و ۱۰/۴۱ میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه) اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل 4a). سلنات‌سدیم و نانوذره سلنیوم باعث افزایش در میزان تیول‌های پروتئینی و غیرپروتئینی گردیدند. این روند افزایشی در گیاهان تیمار شده با نانوذره سلنیوم کمتر بود (شکل 4b,c). بیشترین میزان تیول‌های پروتئینی و غیرپروتئینی (به ترتیب ۱۹۱/۶۴ و ۱۳۲/۱۷ میکرومول در یک گرم وزن تازه) به گیاهان تیمار شده با ۲۰ میلی‌گرم‌درلیتر سلنات‌سدیم تعلق داشتند.

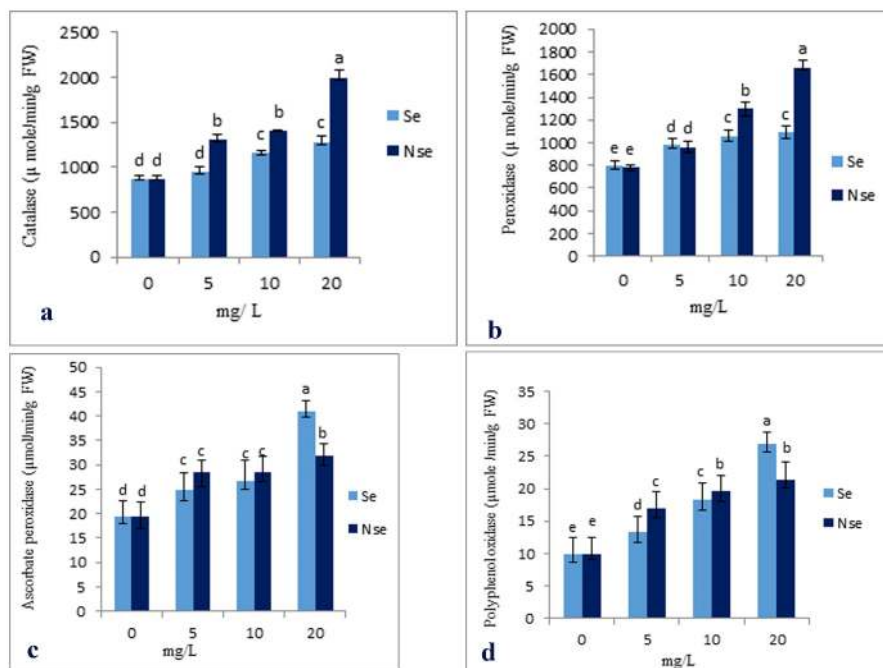
تیمار با سلنیوم به هر دو فرم باعث افزایش وزن تر (شکل 5a) و کاهش وزن خشک ریشه (شکل 5b) در گیاه فلفل‌دل‌لمه شد. بالاترین وزن تر ریشه مربوط به غلظت سلنات‌سدیم با ۲۰ و ۱۰ میلی‌گرم‌برلیتر (به ترتیب ۴۶/۵ و ۴۵/۵ گرم) بود. بیشترین میزان وزن خشک ریشه نیز به تیمارهای شاهد (۶۱ و ۶۰/۵ گرم) مرتبط بود. تیمار با نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم روندی مشابه با وزن تر و خشک‌ریشه، در وزن تر و خشک ساقه فلفل به همراه داشت. بیشترین وزن تر ساقه به ترتیب به سلنات‌سدیم ۱۰ و ۲۰ (۹۰ گرم) تعلق داشت (شکل 5c,d).

بحث و نتیجه‌گیری

گیاهان برای مقابله با تنش‌های زیستی به مکانسیم‌های آنزیمی (آسکوربات‌پراکسیداز، سوپراکسیددیس‌موتاز، کاتالاز، گلوکاتایون‌ردوکتاز) و غیرآنزیمی (کاروتنوئید، فلاونوئید، آسکوربات، گلوکاتایون و توکوفرول) مجهز شده‌اند (Ahmed et al., 2009). کاتالاز آنزیمی است که در متابولیسم زنجیره طولانی اسیدهای چرب در پراکسی‌زوم‌ها و همچنین در از بین بردن پراکسید هیدروژن نقش دارد. پراکسیدازها در بسیاری از فرایندهای سلولی از قبیل متابولیسم اکسین، تشکیل چوب، اتصالات عرضی در دیواره سلول گیاهی، پاسخ به تنش‌های محیطی و نظایر آن شرکت می‌کنند (Rahmani et al., 2013). آسکوربات پراکسیداز که از اسید آسکوربیک به‌عنوان یک دهنده الکترونی برای کاهش اکسیدان‌ها استفاده می‌کند نیز نقش مهمی در حفظ وضعیت ردوکس سلول‌ها در بسیاری از تنش‌های زیستی و غیر زیستی دارد (Del Buono et al., 2011). در نهایت تبدیل ترکیبات فنلی محلول به لیگنین بر عهده آنزیم پلی فنل اکسیداز می‌باشد (Namdar & Bahremand, 2019). در پژوهش حاضر تیمار با هر دو ترکیب سلنات‌سدیم و نانو سلنیوم موجب روند صعودی در فعالیت آنزیم‌ها گردید. بیشترین فعالیت کاتالاز و پراکسیداز در گیاهان تیمار شده با نانوسلنیوم و بالاترین میزان آسکوربات پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز در تیمار با سلنات‌سدیم مشاهده شد.

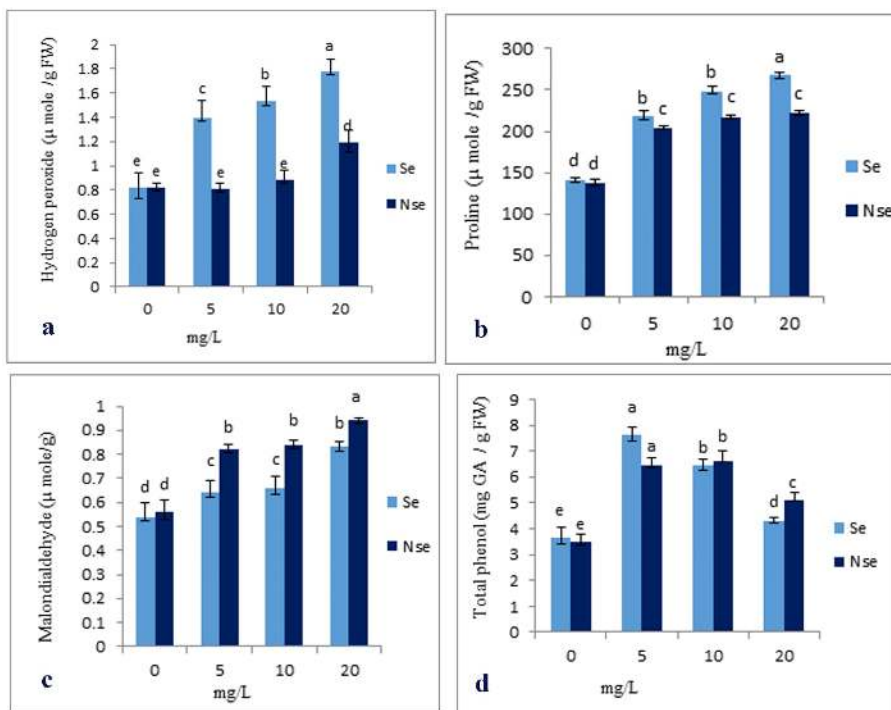
وزن تازه، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (شکل 2a). تیمار با سلنات‌سدیم و نانوذره سلنیوم باعث افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز شد، این افزایش در تیمار نانوذره مشهودتر بود. بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز (۱۶۶۳/۸۲ میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه) به غلظت ۲۰ میلی‌گرم‌درلیتر نانوذره سلنیوم تعلق داشت. کمترین فعالیت آنزیم در تیمار شاهد (۷۹۳/۳۶ و ۷۷۹/۱۲ میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه) مشاهده شد. بین غلظت‌های ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم‌درلیتر سلنات‌سدیم اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (شکل 2b). سطوح مختلف هر دو تیمار، میزان فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز را افزایش داد. بیشترین فعالیت آنزیم (۴۰/۹۱ میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه) مربوط به گیاهان تیمار شده با سلنات‌سدیم با غلظت ۲۰ میلی‌گرم‌برلیتر بود. بین سطوح ۵ و ۱۰ میلی‌گرم‌برلیتر از هر دو تیمار اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل 2c). حضور سلنیوم به هر دو فرم سلنات‌سدیم و نانوذره سلنیوم، فعالیت پلی‌فنل‌اکسیداز را افزایش داد. بیشترین میزان فعالیت به تیمار ۲۰ و ۱۰ میلی‌گرم‌درلیتر از سلنات‌سدیم (۲۶/۸۴ و ۲۱/۳۳ میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه) تعلق داشت. افزایش فعالیت آنزیم در گیاهان تیمار شده با سلنات‌سدیم بیشتر بود (شکل 2d).

سلنات‌سدیم موجب افزایش معنی‌دار در محتوای پراکسید هیدروژن شد. تاثیر نانوذره سلنیوم تا غلظت ۱۰ میلی‌گرم‌درلیتر با شاهد اختلاف معنی‌داری نداشت. بیشترین میزان پراکسید هیدروژن به غلظت ۲۰ میلی‌گرم‌درلیتر از سلنات‌سدیم (۱/۷۸ میکرومول در یک گرم وزن تازه) تعلق داشت (شکل 3a). تیمار با نانوذره سلنیوم و سلنات‌سدیم، موجب افزایش محتوای پرولین شد. این افزایش در سلنات‌سدیم بیشتر بود. بیشترین میزان پرولین به غلظت ۲۰ میلی‌گرم‌برلیتر سلنات‌سدیم (۲۶۶/۶۷ میکرومول در گرم وزن تازه) تعلق داشت (شکل 3b). سلنات‌سدیم و نانوذره سلنیوم باعث افزایش میزان مالون دی‌آلدئید شد و بیشترین میزان به غلظت ۲۰ میلی‌گرم‌درلیتر نانوذره سلنیوم تا (۰/۹۴ میکرومول در گرم) تعلق دارد (شکل 3c). نانوذره سلنیوم تا ۱۰ میلی‌گرم‌درلیتر باعث افزایش میزان فنل کل شد، درحالی‌که سلنات‌سدیم تا ۵ میلی‌گرم‌درلیتر باعث افزایش و در غلظت‌های بالاتر از ۵ میلی‌گرم‌درلیتر موجب کاهش فنل کل شد (شکل 3d). تیمار با هر دو نوع سلنیوم همراه با افزایش در فعالیت پروتئاز بود. با این وجود بیشترین افزایش در فعالیت به گیاهان تیمار شده با سلنات‌سدیم تعلق داشت. بیشترین فعالیت آنزیم متعلق به ۲۰ و ۱۰ میلی‌گرم‌درلیتر از سلنات‌سدیم (به ترتیب ۱۶/۳۵ و ۱۵/۹۲ میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه) بود. فعالیت آنزیم



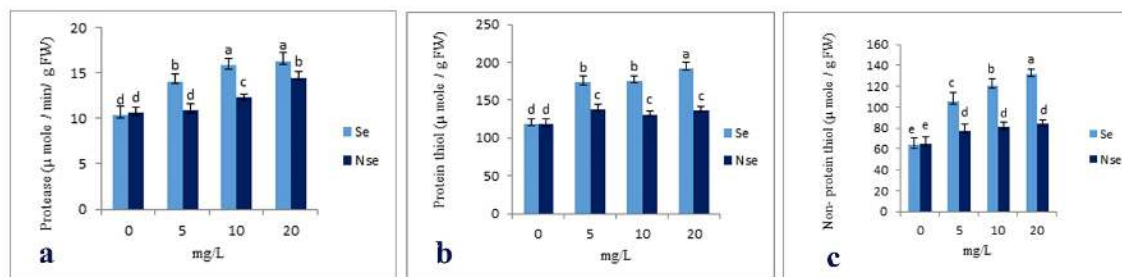
شکل ۲- برهمکنش نوع و غلظت سلنیوم بر فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان شامل کاتالاز (a)، پراکسیداز (b)، آسکوربات پراکسیداز (c) و پلی فنل اکسیداز (d).

Figure 2. Interaction of the type and concentration of selenium on the activities of antioxidant enzymes, including catalase (a), peroxidase (b), ascorbate peroxidase (c), and polyphenol oxidase (d).



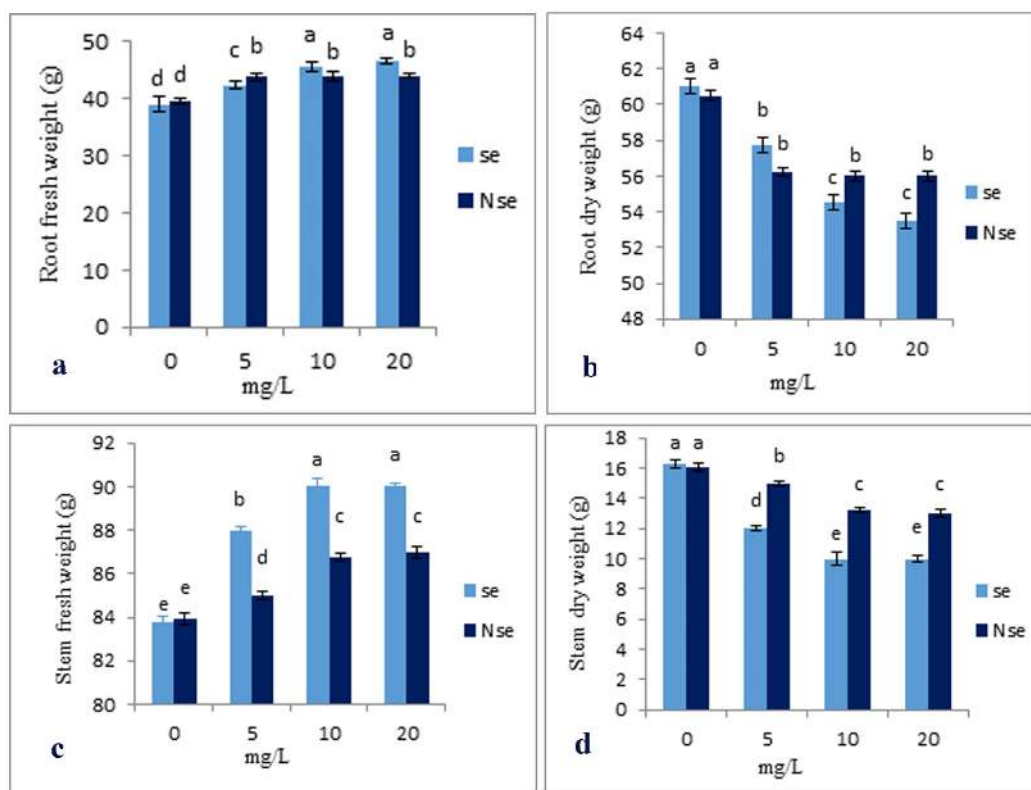
شکل ۳- برهمکنش نوع و غلظت سلنیوم بر میزان پراکسیدهییدروژن (a)، پرولین (b)، مالون دی آلدئید (c) و فنل کل (d).

Figure 3. Interaction of the type and concentration of selenium on the amount of hydrogen peroxide (a), proline (b), malondialdehyde (c), and total phenols (d).



شکل ۴- برهمکنش نوع و غلظت سلنیوم بر فعالیت آنزیم پروتئاز (a)، تیول‌های پروتئینی (b) و تیول‌های غیر پروتئینی (c).

Figure 4. Interaction of the type and concentration of selenium on protease enzyme activity (a), protein thiols (b), and non-protein thiols (c).



شکل ۵- برهمکنش نوع و غلظت سلنیوم بر وزن تر ریشه (a)، وزن خشک ریشه (b)، وزن تر ساقه (c) و وزن خشک ساقه (d).

Figure 5. Interaction of the type and concentration of selenium on root fresh mass (a), root dry mass (b), stem fresh weight (c), and stem dry weight (d).

Rajaei (Momordica charantia) گردیده است (Behbahani et al., 2020). سلنیوم در گیاه سیر (Allium sativum) تحت تنش کادمیوم، فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز را افزایش داد (Namdar & Bahremand, 2019). در گیاه گلرنگ (Carthamus tinctorius) نیز نانواکسیدروی (۱۰ و ۵۰ میلی گرم بر لیتر) فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز افزایش داد (Davari et al., 2018).

این نتایج، تفاوت در پاسخ گیاه را به نوع ماده نشان می دهد. افزایش غلظت سلنات سدیم میزان فعالیت کاتالاز در گیاه آفتابگردان (Helianthus annuus) را افزایش داد (Najafi et al., 2018). فعالیت پراکسیداز در ریشه گیاه بادرنجبویه (Melissa officinalis L.) تیمار شده با اکسید روی و نانو ذرات سلنیوم به طور قابل توجهی افزایش داشته است (Babajani et al., 2019). نانو سلنیوم موجب تحریک فعالیت آنزیم های پراکسیداز (۳۵٪) و کاتالاز (۱۰٪) در ریشه خریزه تلخ

است (Shekari et al., 2017)، اما در گوجه فرنگی بدون تأثیر معنی‌دار بود (Abolghasemi & Haghighi, 2018).

رشد و نمو در تمام موجودات زنده در نتیجه توازن بین سنتز و پروتئولیز اتفاق می‌افتد. در گیاهان، تخریب پروتئین از مرحله جوانه‌زنی، طی اندام‌زائی و در صورت مواجه با تنش‌های زیستی و غیرزیستی رخ می‌دهد. همچنین پروتئولیز یکی از اجزای توأم با تنش اکسیداتیو ناشی از فلزات سنگین است (Palma et al., 2002). استرس اکسیداتیو، پروتئین‌های اکسیده شده تولید می‌کند که به صورت انتخابی توسط پروتئازها تخریب می‌شوند (Nakano & Asada, 1981). پروتئازها در بسیاری از جنبه‌های حیات گیاه، از جمله تجزیه ماکرومولکول‌های نظیر پروتئین‌ها، جابجائی پروتئین‌های ذخیره‌ای، اندام‌زائی، ریتم‌های ساعت بیولوژیک، شناسائی پاتوژن‌ها، پیری و مرگ سلولی، نقش دارند (Konno et al., 2004). با این حال شرایط بیرونی (تنش‌های زیستی و غیرزیستی) و درونی گیاه (مرحله تمایز سلول، میزان هورمون‌های گیاهی، محتوای پلی‌آمین‌ها و پیری) محتوای پروتئازها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Zafar et al., 2005). فعالیت آنزیم پروتئاز در گیاه سیب‌زمینی تیمار شده با نیترات‌نقره نسبت به نانونقره افزایش نشان داد (Bagherzadeh Homaei & Ehsanpour, 2016). همچنین مقدار تیول‌های غیرپروتئینی در تیمار با سلنیوم نسبت به کنترل، افزایش یافتند (Ghosh & Biswas 2017). در این مطالعه، مواجهه با سلنات سدیم و نانوذره سلنیوم باعث افزایش در فعالیت پروتئاز و محتوای تیول‌ها گردید که این افزایش در گیاهان تیمار شده با سلنات سدیم بیشتر بود. این افزایش با توجه به فزونی محسوس پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدئید در گیاهان تیمار شده با این ترکیب، دور از انتظار نبود.

در تحقیق حاضر تیمار گیاهان فلفل دلمه با هر دو فرم سلنیوم منجر به افزایش در وزن تر ریشه و ساقه و کاهش در وزن خشک دو اندام مذکور گشت که حاکی از افزایش در محتوای آب درون آن‌ها است. سلنیوم با تشکیل اسیدهای آمینه سلنیوم دار، موجب تغییر ترکیب لیپیدهای غشایی، افزایش نفوذپذیری غشا به برخی یون‌ها (نظیر کلسیم) و نشت پتاسیم می‌شود که نتیجه آن افزایش آب در فضای بین سلولی و افزایش وزن بافت است (Dziubinskaa et al., 2010; Tailin et al., 2001). همچنین کاهش وزن خشک گیاه در اثر افزایش سطوح سلنیوم می‌تواند بر اثر کاهش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی، کاهش فتوسنتز (Chen et al., 2005)، مختل شدن جذب مواد غذایی و تنش ثانویه اکسیداتیو (John et al., 2009) باشد. سطوح

در تحقیق حاضر تنش اکسیداتیو ناشی از تیمار با سلنیوم باعث افزایش در محتوای پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدئید گردید که میزان افزایش در گیاهان تیمار شده با سلنات سدیم بیشتر بود. در گوجه‌فرنگی محتوای مالون‌دی‌آلدئید، پراکسید هیدروژن و پرولین تحت استرس کادمیوم (Neysanian et al., 2020) به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. در صورت بروز تنش اکسیداتیو، افزایش H_2O_2 با صدمه به سلول، نقشی تخریبی دارد. یکی از واکنش‌هایی که در حضور مقادیر بالای تولید شده از پراکسید هیدروژن سرعت بیشتری دارد، پراکسیداسیون لیپیدهای غشا است که باعث تولید آلدئیدهایی نظیر مالون‌دی‌آلدئید می‌شود. میزان پراکسیداسیون لیپید در گیاهان برای ارزیابی اثر تنش‌های محیطی استفاده می‌شود.

در این تحقیق تیمار با نانوذره سلنیوم و سلنات سدیم، موجب افزایش محتوای پرولین شد که با افزایش پرولین خیار در تنش خشکی همخوانی دارد (Amin et al., 2016). افزایش در محتوای پرولین در گیاهان مواجهه شده با تنش‌های زیستی به افزایش در اورنیتین‌آمینوترانسفراز (Ornithine aminotransferase)، پیرولین-5-کربوکسیلات‌ردوکتاز (Pyrroline-5-carboxylate reductase) و کاهش در پرولین‌اکسیداز (Proline oxidase) و پرولین‌کربوکسیلاز (Proline carboxylase) نسبت داده شده است (Sharma et al., 2011).

ترکیبات فنلی (شامل فنل‌های ساده، فنل‌های اسیدی، چالکون‌ها، فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌ها) به‌طور وسیعی در گیاهان وجود دارند (Sorahinobar et al., 2010) و نقش آنتی‌اکسیدانی خود را با سازوکارهایی نظیر پاک‌روبی رادیکال‌های آزاد، از دست دادن هیدروژن، کلات کردن یون‌های فلزی یا همکاری با پراکسیدازها ایفا می‌کنند (Mazarie et al., 2019). در این تحقیق، افزایش میزان فنل کل بعد از تیمار با سلنیوم مشاهده شد که احتمالاً دلیل آن افزایش در فعالیت آنزیم فنیل‌آلانین‌آمونیا‌لیاز باشد (Chu et al., 2010). ولی افزایش در فنل فقط تا سطح ۵ میلی‌گرم در لیتر از دو ترکیب مؤثر بود و در غلظت‌های بالاتر افزایش در محتوای پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان برای جاروب کردن آثار تنش اکسیداتیو مؤثرتر بودند. کاهش فنل‌ها در غلظت‌های بالای سلنیوم می‌تواند به دلیل تجزیه آنزیم کلیدی در سنتز این ماده و یا اثر ترکیبی رادیکال‌های آزاد تولید شده با برخی پروتئین‌ها و آنزیم‌ها باشد. هرچند سلنیوم بر محتوای فنل کل در فلفل اثر افزایشی داشته

REFERENCES

- Abolghasemi, R. & Haghghi, M.** 2018. Study of changes in greenhouse tomatoes treated with beneficial elements in the form of metal and nanometals. *Journal of Plant Process and Function* 6: 153-162.
- Ahmed, P., Jaleel, C., Azooz, M. & Nabi, G.** 2009. Generation of ROS and non-enzymatic antioxidants during abiotic stress in plants. *Journal of Botanic Resources International* 2: 11-20.
- Afrayeem, S.M. & Chaurasia, A.K.** 2017. Effect of zinc oxide nanoparticles on seed germination and seed vigour in chilli (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 6: 1564-1566.
- Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S. & Karanov, E.** 2001. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant. Journal of Cell and Environment* 24: 1337-1344.
- Ameriyan, M., Dashti, F. & Delshad, M.** 2015. Effect of different sources and levels of selenium on growth and some physiological characteristics of onion (*Allium cepa* L.). *Journal of Plant Products and Technology* 6: 163-179.
- Amin, I.F., Askari, M & Haghiri, M.** 2016. Changes in protein and antioxidant system of *Cucumis sativus* cv. Isfahani in response to drought stress. *Journal of Cell and Tissue* 7: 375-385
- Babajani, A., Iranbakhsh, A., Ardebili, Z.O. & Eslami, B.** 2019. Differential growth, nutrition, physiology, and gene expression in *Melissa officinalis* mediated by zinc oxide and elemental selenium nanoparticles. *Journal of Environmental Science and Pollution Research* 26: 24430-24444.
- Bagherzadeh Homaei, M. & Ehsanpour, A.A.** 2016. Induction of protein oxidation, protease activity, thiol groups alterations and total antioxidative capacity in potato (*Solanum tuberosum*) by silver nanoparticles and silver nitrate under in vitro culture conditions. *Journal of Cell and Tissue* 7: 231-241.
- Bates, L.S., Waldren, R.P. & Teare, I. D.** 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Journal of Plant and Soil* 39: 205-207.
- Bhantana, P. & Lazarovitch, N.** 2010. Evapotranspiration, crop coefficient and growth of two young pomegranates (*Punica granatum* L.) varieties under salt stress. *Journal of Agricultural Water Management* 97: 715-722.
- Bybordi, A.** 2016. Effect of zeolite, selenium and silicon on yield, yield components and some physiological traits of canola under salt stress conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research* 14: 154-170.
- Chen T.F., Zheng W.J., Luo Y., Yang F., Bai Y., & Tu F.** 2005. Effects of selenium stress on photosynthetic pigment contents and growth of *Chlorella vulgaris*. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology* 3: 369-373.
- Chu, J., Xiaoqin & Y., Zhuona, Z.** 2010. Responses of wheat seedlings to exogenous selenium supply under cold stress. *Journal of Biology Trace Element Research* 136: 355-363.
- مختلف نانوسلنیوم، سلنیت سدیم و سلنات سدیم اثر معنی‌داری بر وزن تر برگ، وزن تر و خشک ریشه و وزن تر ساقه پیاز (*Allium cepa* L.) داشته است (Ameriyan et al., 2015). نانواکسید آهن (۱، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر) موجب افزایش ارتفاع، وزن تر ریشه، ساقه و برگ شده است. در گیاهان گندم تیمار شده با نانوسلنیوم نیز، وزن خشک در گیاهان تیمار شده با نانوسلنیوم ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، به طور قابل توجهی در مقایسه با شاهد کاهش پیدا کرد (Safari et al., 2018).
- در این تحقیق پاسخ فیزیولوژیک و آنتی‌اکسیدانی گیاهان فلفل دلمه تیمار شده با سطوح مختلف نانوسلنیوم و سلنات سدیم مورد مقایسه قرار گرفتند. بر اساس یافته‌ها، تیمار با سلنیوم ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر باعث بروز تنش اکسیداتیو و در نتیجه افزایش محتوای پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدئید گردید. پاسخ دفاعی گیاه افزایش در میزان فنل، پرولین و تیول‌ها بود. همچنین افزایش محسوس در فعالیت کاتالاز و پراکسیداز در گیاهان تیمار شده با نانوسلنیوم و فعالیت بارز آسکوربات پراکسیداز، پلی‌فنل اکسیداز و پروتئاز در گیاهان تیمار شده با سلنات سدیم مشاهده گردید. همچنین گیاهان تیمار شده با سلنیوم از وزن خشک کمتری برخوردار بودند. از نتایج این تحقیق می‌توان پیشنهاد کرد که بکارگیری سلنیوم در غلظت مناسب می‌تواند اثرات مثبتی بر فیزیولوژی گیاه داشته باشد. از طرف دیگر نتایج این تحقیق به خوبی نسبت به شمیم سلنیوم در غلظت نامناسب هشدار می‌دهد.

سپاسگزاری

مولفین از کارشناسان محترم آزمایشگاه های واحد علوم و تحقیقات تشکر و قدردانی می کنند.

- Daryaei, F.** 2015. Study the effects of Se and Cd on some parameters morphological and physiological in cultivars of wheat plant. *Journal of Plant Process and Function* 3: 101-114.
- Davari, A., Solouki, M & Fazeli, N.B.** 2018. Effects of jasmonic acid and titanium dioxide nanoparticles on process of changes of phytochemical and antioxidant in genotypes of *Satureja hortensis* L. *Eco-phytochemical Journal of Medicinal Plants* 5: 1-20.
- Dazy, M., Jung, V., Férard, J.F. & Masfarau, J.F.** 2008. Ecological recovery of vegetation on a coke-factory soil: role of plant antioxidant enzymes and possible implications in site restoration. *Journal of Chemosphere* 74: 57-63.
- De Kok, L.J. & Kuiper, P.J.** 1986. Effect of short term dark incubation with sulfate, chloride and selenate on the glutathione content of spinach leaf discs. *Journal of Physiologia Plantarum* 68: 477-482.
- Del Buono, D., Ioli, G., Nasini, L. & Proietti, P., A.** 2011. comparative study on the interference of two herbicides in wheat and Italian ryegrass and on their antioxidant activities and detoxification rates. *Journal of Food Chemistry* 59: 12109-12115.
- Dziubinskaa H., Filekb M., Krol E. & Trebacz K.** 2010. Cadmium and selenium modulate slow vacuolar channels in rape (*Brassica napus*) vacuoles. *Journal of Plant Physiology* 167: 1566-1570.
- Esparham, E., Saeidisar, S., Mahmoodzadeh, H., & Hadi, M.** 2017. the effects of zinc oxide (zno) nanoparticles on the germination, biochemical and ultrastructural cell characteristics of *Ricinus communis*. *Journal of Cell & Tissue* 8: 151-164.
- Ghosh, S. & Biswas, A. K.** 2017. Selenium modulates growth and thiol metabolism in wheat (*Triticum aestivum* L.) during arsenic stress. *American Journal of Plant Sciences* 8: 363-389.
- González-García, Y., Cárdenas-Álvarez, C., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., Cabrera-de-la-Fuente, M., Sandoval-Rangel, A., Valdés-Reyna, J. & Juárez-Maldonado, A.** 2021. Effect of Three nanoparticles (Se, Si and Cu) on the bioactive compounds of Bell pepper fruits under saline stress. *Plants* 10: 1-16.
- Habibi, G., Ghorbanzade, P. & Abedini, M.** 2016. Effects of selenium application on physiological parameters of *Melissa officinalis* L. plants. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research* 32: 698-715.
- Iranbakhsh, A & Ghaderi, S.A.** 2020. The effect of nano-iron oxide on growth, physiology, and callogenesis in pepper in vitro. *Nova Biologica Reperta* 7: 219-227.
- John, R., Ahmad, P., Gadgil, K. & Sharma, S.** 2009. Heavy metal toxicity: Effect plant growth, biochemical parameters and metal accumulation by *Brassica juncea* L. *Journal of Plant Production* 3: 65-75.
- Kar, M. & Mishra, D.** 1976. Catalase, Peroxidase, and Poly phenol oxidase activities during rice leaf senescence. *Journal of Plant Physiology* 57: 315-319.
- khademi astaneh, R., tabatabaei, S. & Bolandnazar, S.** 2015. The Effect of different concentrations of Se on yield and physiological characteristics of *Brussels* Sprouts (*Brassica oleracea* var. *Gemmifera*). *Journal of Horticultural Science* 28: 535-543.
- Konno, K., Hirayama, C., Nakamura, M., Tateishi, K., Tamura, Y., Hattori, M. & Kohno, K.** 2004. Papain protects papaya trees from herbivorous insects: role of cysteine proteases in latex. *Journal of Plant* 37: 370-378.
- Lei, Z., Mingyu, S., Xiao, W., Chao, L., Chunxiang, Q., Liang, C., Hao, H., Xiaoqing, L. & Fashui, H.** 2008. Antioxidant stress is promoted by nano-anatase in spinach chloroplasts under UV-B radiation. *Journal of Biological Trace Element Research* 121: 69-79.
- Mardanlu, S., Souri, M. & Dehnavard, S.** 2014. Evaluation of quantitative and qualitative characteristics of long pepper as affected by different potassium concentrations in soilless culture. *Iranian Journal of Soil Research* 28: 397-406.
- Mazarie, A., Mousavi-nik, S.M., Ghanbari, A. & Fahmideh, L.** 2019. Effect of different spraying concentrations of jasmonic acid and titanium dioxide nanoparticles on some physiological traits and antioxidant system activity of Sage (*Salvia officinalis* L). *Iranian Journal of Plant Biology* 11: 1-22.
- Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M. & Breusegem, F.V.** 2004. Reactive oxygen gene network of plants. *Journal of Trends in Plant Science* 9: 490-498.
- Najafi, F., Khavari-Nejad, R.A. & Rashidi, M.** 2018. The effect of sodium selenate on some of antioxidant enzymes activity in sunflower seedlings (*Helianthus annuus* L.) under salt stress. *Journal of Plant Process and Function* 6: 351-364.
- Nakano, Y. & Asada, K.** 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Journal of Plant and Cell Physiology* 22: 867-880.
- Namdar, M. & Bahremand, N.** 2019. Effect of selenium on growth, physiological and biochemical indices of garlic plant (*Allium sativum*) under cadmium toxicity. *Journal of Plant Process and Function* 8: 137-153.
- Neysanian, M., Iranbakhsh, A., Ahmadvand, R., Oraghi Ardebili, 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. *Journal of PLoS One* 16: 1-17.
- Palma, J.M., Sandalio, L.M., Corpas, F.J., Romero-Puertas, M.C., McCarthy, I. & Luis, A.** 2002. Plant proteases, protein degradation, and oxidative stress: role of peroxisomes. *Journal of Plant Physiology and Biochemistry* 40: 521-530.

- Pourakbar, I.** 2011. Effects of cadmium on some biochemical parameters and nitrate reductase activity in *Zea mays* L. *Journal of Plants* 10: 959-976.
- Rahmani, A., Seighali, N. & Ebrahimzadeh, H.** 2013. A study on peroxidase activity alterations in corms of saffron (*Crucus sativus* L.) exposed to different H₂O₂ concentrations and pH measurement during dormancy and waking. *Journal of New Cellular and Molecular Biotechnology* 3: 79-84.
- Rahmatizadeh, R., Arvin, S.M.J., Jamei, R., Mozaffari, H. & Reza Nejjad, F.** 2019. Response of tomato plants to interaction effects of magnetic (Fe₃O₄) nanoparticles and cadmium stress. *Journal of Plant Interactions* 14: 474-481.
- Rajaee Behbahani, S., Iranbakhsh, A., Ebadi, M., Majd, A. & Ardebili, Z.O.** 2020. Red elemental selenium nanoparticles mediated substantial variations in growth, tissue differentiation, metabolism, gene transcription, epigenetic cytosine DNA methylation, and callogenesis in bittermelon (*Momordica charantia*); an in vitro experiment. *Journal of PloS One* 15: 1-22.
- Safari, M., Ardebili, Z.O. & Iranbakhsh, A.** 2018. Selenium nano-particle induced alterations in expression patterns of heat shock factor A₄A (HSFA₄A), and high molecular weight glutenin subunit 1Bx (Glu-1Bx) and enhanced nitrate reductase activity in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Acta Physiologiae Plantarum* 40: 1-8.
- Sharma, D.K., Dubey, A.K., Srivastav, M., Singh, A.K., Sairam, R.K., Pandey, R.N., Dahuja, A. & Kaur, C.** 2011. Effect of putrescine and paclobutrazol on growth, physiochemical parameters, and nutrient acquisition of salt-sensitive citrus rootstock karna khatta (*Citrus karna* Raf.) under NaCl stress. *Journal of Plant Growth Regulation* 30: 301-311.
- Shekari, L., Mozafarian, M., Kamelmanesh, M. & Sadeghi, F.** 2017. Effect of selenium on some morphological and physiological properties of hot pepper (*Capsicum annum*) grown in hydroponic culture. *Journal of Plant Production Technology* 9: 91-98.
- Sorahinobar, M., Niknam, V. & Moradi, B.** 2010. Effect of NaCl salinity on protein, pigments, sugars and phenolic compounds contents in calli of some *Trigonella* species. *Journal of Science, University of Tehran* 36: 53-59.
- Spanos, G.A. & Wrolstad, R.E.** 1990. Influence of processing and storage on the phenolic composition of Thompson seedless grape juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 38: 1565-1571.
- Tapiero, H., Townsend, D.M & Tew, K.D.** 2003. The antioxidant role of selenium and seleno-compounds. *Journal of Biomedicine and Pharmacotherapy* 57: 134-144.
- Tailin X., Hartikainen H. & Piironen V.** 2001. Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing Lettuce. *Journal of Plant and Soil* 237: 55-61.
- Zafar, S., Yasin Ashraf, M. & Ashraf, M.** 2005. Protease activity and associated change during germination and early seedling stages of cotton growth under saline condition. *International Journal of Botany* 1: 103-107.

How to cite this article:

Tabatabai Rudsari, sh., Iranbakhsh, A., Shamili, M. & Oraghi Ardabili, Z. 2023. The effect of nano selenium and sodium selenate on biochemical, physiological, and growth parameters of Bell pepper (*Capsicum annum* L.). *Nova Biologica Reperta* 9: 296-306. (In Persian).

طباطبایی رودسری، ش.، ایرانبخش، ع.، شمیلی، م. و اوراچی اردبیلی، ز. ۱۴۰۱. تأثیر نانو سلنیوم و سلنات سدیم بر پارامترهای بیوشیمیایی، فیزیولوژیک و رشدی فلفل دلمه‌ای. یافته‌های نوین در علوم زیستی ۹: ۳۰۶-۲۹۶.