

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Impact of Nano Selenium and Sodium Selenate on Growth and Biochemical Reactions of Spinach (*Spinacia oleracea* L) Viroflay Variety Under Greenhouse ConditionsQasemi¹, M., Shamili^{2*}, M. and Mirzaalian Dastjerdi², A.

1 and 2. MSc Graduated and Associate Professor, Respectively, Department of Horticultural Sciences, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

*: Corresponding Author

Email: shamili@ut.ac.ir

Received: 2024/10/23

Accepted: 2025/04/29

Introduction

Selenium is one of the essential food elements for humans and animals. Seleno-proteins participate in antioxidant defense systems and regulation of oxidation in mammals. Thus, their deficiency leads to immune system dysfunction. Selenium concentration in soils has been declared insufficient and as a result, approximately 15-20% of children and adults suffer from selenium deficiency, worldwide. Plants, as the best source of selenium for humans and animals, absorb this element from the soil and enter it to the food chain. Nanotechnology is a promising field of bioengineering. Selenium nanoparticles have been introduced as stable nanoparticles in the form of fertilizers in agriculture. Foliar spraying of plants with nano-selenium has been associated with the improvement of antioxidant defense mechanisms, photosynthetic indices and secondary metabolites. Spinach, an annual and long-day plant, is one of the important leafy vegetables of temperate regions. Fresh spinach contains sugars, lecithin, secretin, chlorophyll, carotene, saponins, phenolic compounds, caffeic acid, ortho-coumaric acid, para-coumaric acid, myristicin and oxalates. Since selenium is one of the useful elements in plants (including spinach) and due to toxic effects of this element in high concentrations, in this research, the impacts of selenium (in both bulk and nano forms) were considered on spinach plants. The aim of this research was to compare foliar spraying with nano-selenium (5, 10 and 20 mg/L) and sodium selenate (5, 10 and 20 mg/L) on growth (leaf and root dry matter, plant and root length and leaf number), physiological (ion leakage, proline content and malondialdehyde) and antioxidant parameters (phenol, flavonoid content, antioxidant and the activity of catalase and peroxidase enzymes) in spinach.

Material and Methods

The current study was carried out in a greenhouse condition (24-27 °C, RH=80%) in horticulture department, Hormozgan university, 2022. The experiment was carried out in a completely randomized design. The spinach virofly variety was utilized to be treated with the following treatments. The factors were included foliar spraying of nano selenium (5, 10 and 20 mg/L), sodium selenate (5, 10 and 20 mg/L) and drip irrigation with distilled water (control plants). Growth (leaf and root dry matter, plant and root length, leaf number) and biochemical (Proline content, ion leakage, MDA, flavonoid and phenol contents, antioxidant and the activity of catalase and peroxidase enzymes) traits were investigated at the end of the experiment. The normality of the data was determined by the Shapiro-Wilk method. Tukey's test was performed to compare the mean ($P < 0.01, 0.05$). Statistical analysis of data was done using SAS Ver.9.4 software. Also, the figures were drawn via EXCEL 2016 program.

Results

Based on findings, increased root dry matter, proline content, flavonoids, plant length and peroxidase were obtained via rising the levels of both treatments. Results indicated that, increasing the concentration of nano-Se up to 10 mg/L improved leaf dry matter, ion leakage, antioxidant and catalase enzyme activity, and as reaching up to 20 mg/L, these traits decreased. Nevertheless, enhancing sodium selenate up to 20 mg/L, boosted the antioxidant and catalase enzyme activities, and leaf number. However, the maximum activity of catalase enzyme was recorded at 5 mg/L. Despite being the lowest amount at 5 mg/L of nano-Se, leaf number showed a rising trend at other levels. While merely 5 mg/L of sodium selenate boosted leaf dry matter, other levels of this treatment reduced it. Root length was also enhanced only under 5 mg/L nano-Se and a decline in this trait was recorded at other selenium concentrations (both nano and bulk forms). MDA and phenol also showed the highest content only at 5 mg/L of sodium selenate. In the meantime, a

reduction was observed in its content under other levels of sodium selenate as well as all levels of nano-Se. In contrast, ion leakage was highest at 10 mg/L of sodium selenate and descended at other levels.

Conclusion

Data obtained from the impact of various selenium compounds on spinach Virofly variety in this research, indicated that high levels of selenium in nano form had an ascending effect on shoot and root length, proline content and POX activity, and in the form of sodium selenate on root dry matter and leaf number. Nevertheless, the highest level of nano-Se showed a reducing trend in MDA. In addition, data illustrated the enhancing effects of medium levels of nano-Se on root length and anti

oxidant activity, and sodium selenate on flavonoid, phenol and CAT activity. But, the reduction of ion leakage occurred at the lowest level of sodium selenate. Eventually, according to data, 5 mg/L of sodium selenate and, in the case of the nano form, 20 mg/L, were among the most effective levels of these treatments in this experiment. This difference in the effect of various levels of treatments on the studied traits shows that each trait appears optimally under certain levels of treatments. Therefore, the importance of selenium compounds (bulk or nano) dosage must be highlighted in research activities.

Keywords: Antioxidant Enzymes, Dry Matter, Flavonoid, Phenol, Proline

Citations: Qasemi, M., Shamili, M. and Mirzaalian Dastjerdi, A. (2025). M Impact of Nano Selenium and Sodium Selenate on Growth and Biochemical Reactions of Spinach (*Spinacia oleracea* L) Virofly Variety Under Greenhouse Conditions. *Plant Production Technology*, 25(1), 87-105.
<https://doi.org/10.22084/ppt.2025.30036.2138>

© 2022 The Author(s). Bu- Ali Sina University Publication. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Online ISSN: 2476-5651

Print ISSN: 2476-6321

اثر نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر صفات رشدی و بیوشیمیایی گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) رقم ویروفلائی در شرایط گلخانه

Impact of Nano Selenium and Sodium Selenate on Growth and Biochemical Reactions of Spinach (*Spinacia oleracea* L) Viroflay Variety Under Greenhouse Conditions

محمد قاسمی^۱، منصوره شمیلی^{۲*} و عبدالمجید علیان دستجردی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹

(مقاله پژوهشی)

چکیده

گیاهان، به عنوان بهترین منبع سلنیوم، این عنصر را از خاک جذب می کنند. در سال های اخیر، نانو ذرات سلنیوم، به عنوان نانو ذرات پایدار، جهت استفاده به عنوان کود گیاهی معرفی شده اند. باتوجه به نقش مهم سلنیوم در گیاهان، نیاز ضروری بدن انسان و حیوانات به آن و اثرات سمی آن در غلظت های بالا، تحقیق حاضر با هدف ارزیابی اثر سلنیوم (به شکل بالک و نانو) بر صفات رشدی و بیوشیمیایی اسفناج در شرایط گلخانه انجام شد. این تحقیق شامل هفت تیمار مختلف شامل آب مقطر، محلول پاشی با سطوح پنج، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم و محلول پاشی با سطوح پنج، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در لیتر سلنات سدیم بود که به صورت طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. نتایج حاکی از افزایش ماده خشک ریشه، محتوای پرولین، فلاونوئید، طول گیاه و فعالیت آنزیم پراکسیداز تحت افزایش سطوح هر دو تیمار، بود. براساس یافته ها، افزایش در غلظت نانوسلنیوم تا ۱۰ میلی گرم در لیتر موجب افزایش ماده خشک برگ، نشت یونی، فعالیت آنتی اکسیدان و آنزیم کاتالاز گردید و در غلظت ۲۰ میلی گرم در لیتر از میزان این صفات کاسته شد. البته افزایش غلظت سلنات سدیم تا ۲۰ میلی گرم در لیتر، موجب بهبود فعالیت آنتی اکسیدان و آنزیم کاتالاز، و تعداد برگ در بوته شد. با این وجود حداکثر فعالیت آنزیم کاتالاز در پنج میلی گرم در لیتر ثبت گردید. تعداد برگ در بوته نیز در پنج میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم کم ترین میزان را نشان داد و در سایر سطوح افزایش یافت. در حالی که تنها پنج میلی گرم در لیتر سلنات سدیم موجب افزایش ماده خشک برگ شد و سایر سطوح این تیمار موجب کاهش آن شدند. طول ریشه نیز تنها تحت تأثیر پنج میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم افزایش یافت و در سایر غلظت های سلنیوم (در هر دو شکل نانو و بالک)، کاهش داشت. مالون دی آلدئید و فنل نیز تنها در پنج میلی گرم در لیتر سلنات سدیم بیشترین محتوای را نشان داد. این در حالی بود که در سطوح دیگر سلنات سدیم و همچنین در تمام سطوح شکل نانو، کاهش آن مشاهده گردید. در مقابل، نشت یونی در غلظت ۱۰ میلی گرم در لیتر سلنات سدیم بالاترین میزان را داشت و در سایر غلظت ها کاهش یافت. تفاوت در تأثیر سطوح مختلف تیمارها بر صفات مورد مطالعه نشان دهنده این است که هر صفت تحت تأثیر سطوح خاصی از تیمارها در حالت بهینه نمایان می شود. در نتیجه اهمیت مقدار مصرفی ترکیبات سلنیوم (بالک یا نانو) در فعالیتهای پژوهشی برجسته می گردد.

واژه های کلیدی: آنزیم های آنتی اکسیدان، پرولین، فلاونوئید، فنل، ماده خشک

ارجاع به مقاله: قاسمی، م.، شمیلی، م. و علیان دستجردی، ع. (۱۴۰۴). اثر نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر صفات رشدی و بیوشیمیایی گیاه اسفناج (*Spinacia*

oleracea L. رقم ویروفلائی در شرایط گلخانه مجله فناوری تولیدات گیاهی، ۲۵(۱)، ۸۷-۱۰۵. <https://doi.org/10.22084/ppt.2025.30036.2138>

حق نشر متعلق به نویسنده (گان) است و نویسنده تحت مجوز Commons Creative License

Attribution (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>) به مجله اجازه می دهد مقاله ای چاپ شده را در

سامانه به اشتراک بگذارد، منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.



شاپا چاپی: ۲۴۷۶-۶۳۲۱

شاپا الکترونیکی: ۲۴۷۶-۵۶۵۱

۱. مقدمه

سلنیوم یکی از عناصر غذایی کم مصرف ولی ضروری در تغذیه انسان ها و حیوانات می باشد (Hartikainen, 2005). سلنوپروتئین ها، در سیستم های دفاعی آنتی اکسیدانی و تنظیم اکسایش پستانداران شرکت می کنند (Ingold et al., 2018) و کمبود آن ها منجر به اختلال در عملکرد سیستم های ایمنی می شود (Guillin et al., 2019; Xie et al., 2021). غلظت متداول سلنیوم در خاک (۰/۱ تا دو میلی گرم در کیلوگرم) ناکافی اعلام شده که در نتیجه، ۱۵ تا ۲۰ درصد انسان ها، دچار کمبود سلنیوم هستند (Thavarajah et al., 2017).

گیاهان به عنوان بهترین منبع تأمین سلنیوم برای انسان ها و حیوانات، این عنصر را از خاک جذب و وارد زنجیره غذایی می کنند (Malagoli et al., 2015). سلنیوم عمدتاً به شکل سلنات سدیم یا سلنیت سدیم توسط گیاهان از خاک جذب می شود که این دو شکل از لحاظ جذب و تحرک در گیاهان متفاوت هستند. سلنیت بیش تر جذب کانی های رسی و اکسیدهای آهن موجود در خاک می گردد، باین حال، زمانی که سلنیت جذب گیاه شد به سرعت به ترکیبات کم تحرک در گیاه تبدیل می شود. نمک های سلنات اما، بسیار محلول بوده و به آسانی جذب گیاه می شوند. به علاوه به دلیل تجمع سلنیت در ریشه و انتقال بیشتر سلنات به شاخه ها و همچنین جذب سریع تر سلنات نسبت به سلنیت، شکل سلنات در برنامه های کودی بیش تر توصیه می شود (Cartes et al., 2005).

کاربرد سلنیوم باعث افزایش سرعت فتوسنتز، تجمع زیست توده (Farooq et al., 2022)، محتوای کلروفیل، فنل، پروتئین، سطح برگ، سرعت رشد و عملکرد گیاه برنج شده است (Adhikary et al., 2022). ژنوتیپ های گلرنگ پس از تیمار با سلنیوم (۲۰۰ میلی گرم در لیتر) افزایش قابل توجهی در ارتفاع بوته، تعداد بوته و عملکرد دانه داشتند، هم چنین کیفیت روغن آن ها افزایش یافت (Sher et al., 2022). محلول پاشی با سلنیوم (۱۰۰ میلی گرم در لیتر) وزن جوانه گیاه چای را افزایش داد (Huang et al., 2020). پیش تیمار با سلنیوم (دو میلی گرم در لیتر) منجر به افزایش وزن خشک ریحان تحت تنش دمای بالا شد (Ramezan et al., 2024). همچنین Huang و همکاران (۲۰۲۳) افزایش وزن خشک تربچه را تحت محلول پاشی با سلنیوم (۱۲۰-۳۰۰ میلی گرم در لیتر) گزارش نمودند. تیمار با

سلنات سدیم (۱۰ میلی گرم در لیتر) اثر مثبت بر شاخص های رشدی و محتوای کلروفیل (آ، ب و کل)، آنتوسیانین، فنل و فلاونوئید گیاه ریحان داشت (Abdollahi et al., 2023). محلول پاشی گیاهان شوید با سلنات سدیم (۱۵ میلی گرم در لیتر) با بهبود وزن خشک (اندام هوایی و ریشه)، ارتفاع بوته، محتوای کلروفیل، افزایش ترکیبات اسانس (آلفا- پنین، بتا- میرسن و آلفا- فلاندرن) و فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان همراه بود (Samavatipour et al., 2019).

نانوتکنولوژی یک زمینه امیدبخش از مهندسی زیستی است که از ویژگی های منحصر به فرد نانو ذرات (با قطر کم تر از ۱۰۰ نانومتر) بهره می برد (Duhan et al., 2017). نانو ذرات سلنیوم، به عنوان نانو ذرات پایدار، جهت استفاده در کشاورزی معرفی شده اند (Babajani et al., 2019). فرم نانوسلنیوم سمیت کم و زیست فعالی بالایی دارد (Djanaguiraman et al., 2018). محلول پاشی برگ گیاهان با نانوسلنیوم، بهبود مکانیسم های دفاعی آنتی اکسیدانی، شاخص های فتوسنتزی و متابولیت های ثانویه را به همراه داشته است (Djanaguiraman et al., 2019; Zsiros et al., 2018). در کشت گلدانی تنباکو نیز، پس از محلول پاشی با نانوسلنیوم (۲/۵ و پنج میلی گرم در لیتر)، زیست توده، طول ریشه، محتوای کلروفیل و تجمع نیتروژن در تیمار پنج میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم، بالاترین میزان را داشت (Liu et al., 2020). مقایسه تیمار با سطوح (صفر، پنج، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی گرم در لیتر) و اشکال مختلف سلنیوم (سلنیت سدیم، سلنات سدیم و نانوسلنیوم) بر خصوصیات رشدی دانه رست پیاز حاکی از آن بود که سطوح پایین سلنیوم تأثیر مثبتی بر میزان فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز دارند. همچنین کاربرد سطوح ۱۰ و ۱۵ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم جوانه زنی بذر پیاز را در مقایسه با سلنیت و سلنات سدیم بهبود بخشید (Amerian and Nosratti, 2021). مطالعه پاسخ های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه فلفل دلمه ای به محلول پاشی نانوسلنیوم (صفر، پنج، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در لیتر) و سلنات سدیم (صفر، پنج، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در لیتر)، حاکی از آن بود که سلنیوم در غلظت های ۱۰ و ۲۰ میلی گرم در لیتر باعث کاهش تجمع بیومس (ریشه و اندام هوایی) و افزایش در محتوای پراکسید هیدروژن و مالون دی آلدئید شد. فعالیت آنزیم های کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات

انجام واکنش‌های شیمیایی در گیاهان، از جمله در اسفناج است و از طرفی دیگر با توجه به اثرات سمی این عنصر در غلظت‌های بالا، در تحقیق حاضر، اثر سلینیوم به دو شکل بالک و نانو بر صفات رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی اسفناج ارزیابی شد. هدف این تحقیق ارزیابی اثر هفت تیمار مختلف شامل آب مقطر، سطوح پنج، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و سطوح پنج، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سلنات سدیم از طریق محلول‌پاشی برگ، بر تغییرات صفات رشدی و بیوشیمیایی در گیاه اسفناج در شرایط گلخانه بود.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. آماده‌سازی مواد گیاهی و تیمارها

تحقیق حاضر در سال ۱۴۰۱ در دانشکده کشاورزی دانشگاه هرمزگان به اجرا درآمد. این تحقیق شامل هفت تیمار مختلف شامل آب مقطر، محلول‌پاشی با سطوح پنج، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و محلول‌پاشی با سطوح پنج، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سلنات سدیم بود که به صورت طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. بذر اسفناج هلندی و یروفلا از شرکت فردین کشت تهیه گردید. سلنات سدیم (Na_2SeO_3) از شرکت مرک (آلمان) تهیه شد. نانوذره سلنیوم از شرکت NanoSany (مشهد)، تهیه شد. محدوده اندازه نانوذره سلنیوم ۴۵-۱۰ نانومتر، چگالی ظاهری ۳/۸۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب، و به شکل تقریباً کروی بود (شکل ۱).

پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز نیز در پاسخ به تیمارهای سلنیوم افزایش یافت (Tabatabaie Roodsati et al., 2022).

اسفناج با نام علمی (*Spinacia oleracea* L.) و متعلق به خانواده *Amaranthaceae*، گیاهی یک‌ساله و روزبلند، جزء سبزی‌های برگ‌ی مهم فصل سرد است (Mashayekhi and Shomali, 2018). اسفناج تازه حاوی مواد قندی، لسیتین (Lecithin)، سکرترین (Secretin)، کلروفیل، کاروتن، ساپونین (Saponins)، ترکیبات فنلی، کافئیک اسید (Caffeic acid)، ارتوکوماریک اسید (o-Coumaric acid)، پاراکوماریک اسید، میریستین (Myristicin) و آگزالات‌ها (Oxalates) می‌باشد (Aisha et al., 2013).

مطالعه تأثیر غلظت‌های مختلف سلنیوم (صفر، یک، دو، چهار، شش و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر)، بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه اسفناج حاکی از تأثیر سلنیوم بر وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی و محتوای کلروفیل بود (Saffar Yazdi et al., 2012). همچنین مقایسه محلول‌پاشی برگ با سلنیت سدیم (یک، دو و چهار میلی‌گرم در لیتر) و نانو ذرات سبز سلنیت سدیم (یک، دو و چهار میلی‌گرم در لیتر) و شاهد (آب مقطر) بر خصوصیات فیتوشیمیایی در گیاه اسفناج، نشان داد تیمار چهار میلی‌گرم در لیتر سلنیت سدیم و یک میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات سلنیوم باعث افزایش وزن تر و خشک بوته و محتوای کلروفیل برگ شدند (Rezaei Nik et al., 2022).

باتوجه به این‌که ماده سلنیوم جزء عناصر مفید در تغذیه و

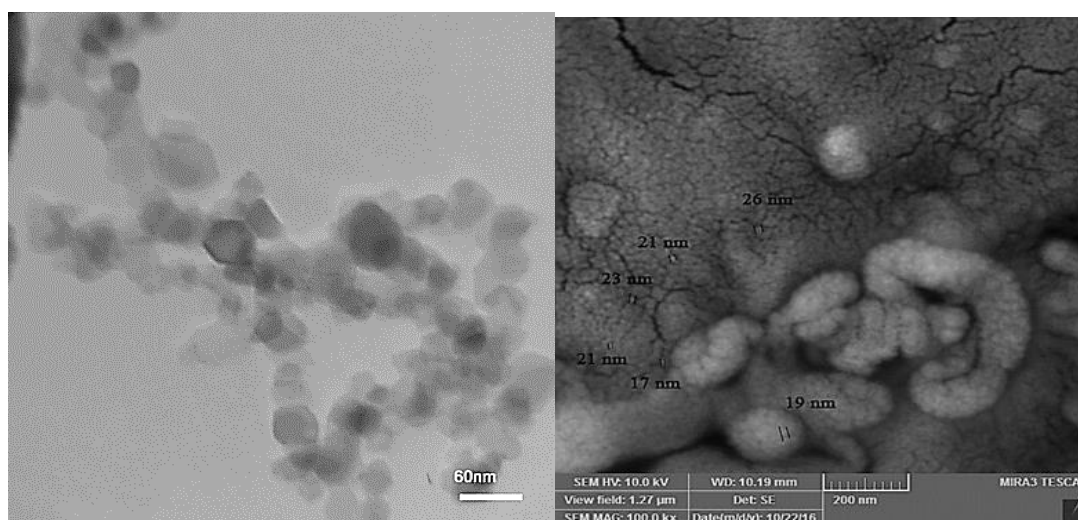


Fig. 1: The nano selenium TEM (left) and SEM (right) images (nm scale)

۲.۲. کشت گیاهان در شرایط گلخانه

بستر مورد استفاده برای کاشت بذرها، ترکیب خاک باغچه، خاک برگ و ماسه (۱:۱:۱) بود. گیاهان در فصل زمستان در محیط گلخانه با دمای متوسط روزانه 27 ± 2 و دمای متوسط شبانه 24 ± 2 درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۸۰ درصد کشت شدند. بذور در کرت‌هایی به ابعاد 1×0.8 مترمربع (فاصله کرت‌ها ۰/۵ متر) کشت شدند (۱۸ بوته در هر کرت با فاصله روی ردیف ۱۵ سانتی‌متر و فاصله بین ردیف ۳۰ سانتی‌متر). پس از کاشت، آبیاری روزانه به روش قطره‌ای انجام گرفت. پس از سبز شدن بذرها و تا مرحله چهار برگی، آبیاری هر سه روز یکبار انجام شد. پس از آن هر دو روز یکبار آبیاری صورت گرفت. سه هفته بعد عملیات تنک انجام شد. مرحله اول اعمال تیمارها، هشت هفته پس از کاشت بذرها (مرحله ۱۱ برگی) و مرحله دوم، ده هفته پس از کاشت بذرها (مرحله ۱۷ برگی) بود. دوازده هفته پس از کاشت بذرها، صفات زیر اندازه‌گیری شد.

۳.۲. سنجش صفات رشدی

جهت سنجش وزن تر برگ و ریشه، نمونه‌های برگ و ریشه جمع‌آوری و توزین (ترازوی دیجیتالی ۰/۰۱ گرم) شدند. پس از خشک کردن نمونه‌ها در آون (۷۰ درجه سانتیگراد، ۴۸ ساعت) و توزین مجدد، میزان ماده خشک برگ و ریشه محاسبه شد. طول اندام هوایی و ریشه در انتهای آزمایش، با آبیاری غرقابی کلیه کرت‌ها و با خارج کردن کل ریشه از خاک، با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری و ثبت شد. تعداد برگ هر بوته نیز در انتهای آزمایش، شمارش گردید.

۳.۲.۱. پرولین برگ

بررسی مقدار اسید آمینه پرولین با روش (Bates et al., 1973) انجام شد. برای این منظور، نیم گرم برگ در ۱۰ میلی‌لیتر محلول سه درصد سولفوسالسیلیک اسید در هاون سائیده، از کاغذ صافی گذرانیده شد. به دو میلی‌لیتر از عصاره، دو میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین (۱/۲۵ گرم نین‌هیدرین در ۳۰ میلی‌لیتر استیک اسید گلاسیال) و دو میلی‌لیتر استیک اسید گلاسیال اضافه و انکوبه (یک ساعت، بن ماری، ۱۰۰ درجه سانتیگراد) شدند. پس از نگهداری در حمام یخ (۳۰ دقیقه)،

چهار میلی‌لیتر تولوئن افزوده و ورتکس (۳۰ ثانیه) شدند. پس از انکوبه کردن لوله‌های حاوی عصاره در شرایط آزمایشگاه، دو لایه مجزا تشکیل شد که در نهایت جذب نوری رو شناور در طول موج ۵۲۰ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر (CECIL-CE2501) قرائت شد. منحنی استاندارد پرولین با استفاده از استاندارد پرولین (۰، ۱۲/۵، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) رسم و مقدار پرولین بر حسب میکرومول در گرم وزن تازه گزارش گردید.

۲.۳.۲. نشت یونی برگ

اندازه‌گیری میزان نشت یونی برگ بر اساس روش (Sairam and Srivastava, 2002) انجام شد. بدین منظور، نیم گرم برگ از برگ‌های یک‌سوم میانی هر گیاه در ۲۵ میلی‌لیتر آب دو بار تقطیر درون لوله آزمایش قرار داده و در حمام آب گرم (۴۰ درجه سانتیگراد، ۳۰ دقیقه) قرار گرفتند. بعد از اینکه به دمای محیط رسید، میزان هدایت الکتریکی اولیه (EC_1) به وسیله EC متر (Tetracon 325 WTW) ثبت شد. پس از آن نمونه‌ها مجدداً در حمام آب گرم (۱۰۰ درجه سانتیگراد، ۱۵ دقیقه) قرار داده و پس از رسیدن به دمای محیط، هدایت الکتریکی (EC_2) ثبت و درصد نشت یونی (EL) از رابطه زیر محاسبه گردید.

$$EL = (EC_1/EC_2) \times 100$$

۳.۳.۲. مالون‌دی‌آلدئید برگ (MDA)

بدین منظور، نیم گرم از برگ‌های یک‌سوم میانی با پنج میلی‌لیتر تری کلرو استیک اسید یک درصد در هاون چینی سائیده و عصاره‌ها سانتریفیوژ (۱۰۰۰۰ دور در دقیقه، چهار درجه سانتیگراد، پنج دقیقه) شدند. پس از آن، ۲۵۰ میکرولیتر از هر نمونه با یک میلی‌لیتر از محلول واکنش (حاوی تری کلرو استیک اسید ۲۰ درصد و تیو بار بیتیوریک اسید پنج درصد) مخلوط و در حمام آب گرم (۳۰ دقیقه، ۹۵ درجه سانتیگراد) انکوبه شدند. پس از انتقال نمونه‌ها به محیط سرد و سانتریفیوژ مجدد (۱۰۰۰۰ دور در دقیقه، چهار درجه سانتیگراد، ۱۰ دقیقه) جذب عصاره در طول موج‌های ۴۵۰، ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر به وسیله اسپکتروفتومتر قرائت و بر حسب میلی‌مول در گرم وزن تازه گزارش شد (Alexieva et al., 2001).

۲.۳.۴. فلاونوئید برگ

سنجش محتوای فلاونوئید با استفاده از روش رنگ‌سنجی کلرید آلومینیوم (Braca et al., 2002) انجام شد. برای این منظور مقدار نیم گرم بافت برگ تازه به همراه سه میلی لیتر متانول ۸۵ درصد در هاون چینی همگن و سپس سانتریفیوژ (۶۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۵ دقیقه) گردید. پس از آن به هر لوله آزمایش حاوی عصاره یک و نیم میلی لیتر متانول، ۱۰۰ میکرولیتر کلرید آلومینیوم ۱۰ درصد، ۱۰۰ میکرولیتر استات پتاسیم یک مولار، و ۲/۸ میلی لیتر آب دوبار تقطیر افزوده و به مدت ۳۰ دقیقه در تاریکی و در دمای آزمایشگاه انکوبه شدند. در نهایت جذب عصاره توسط دستگاه میکروپلیت ریدر (Epoch2, Biotek Ltd, U.S.A) در طول موج ۴۱۵ نانومتر قرائت شد. منحنی استاندارد فلاونوئید با استفاده از استاندارد کوئرستین (۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی گرم در لیتر) رسم و مقدار فلاونوئید برحسب میلی گرم کوئرستین در ۱۰۰ گرم وزن تازه گزارش شد.

۲.۳.۵. فنل برگ

برای سنجش میزان فنل از معرف فولین-سیوکالتیو و از روش (Waterhouse, 2002) استفاده شد. بدین منظور، نیم گرم بافت برگ تازه با سه میلی لیتر متانول ۸۵ درصد در هاون چینی سائیده و پس از سانتریفیوژ (۶۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۵ دقیقه)، ۱۵۰ میکرولیتر از عصاره با ۷۵۰ میکرولیتر معرف فولین ۱۰ درصد مخلوط و پس از پنج دقیقه استراحت، ۶۰۰ میکرولیتر کربنات سدیم هفت درصد به آن افزوده و به مدت ۹۰ دقیقه در حالت تاریکی بر روی شیکر قرار گرفتند. در نهایت میزان جذب در طول موج ۷۶۰ نانومتر و با استفاده از میکروپلیت ریدر قرائت شد. منحنی استاندارد فنل با استفاده از استاندارد گالیک اسید (۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی گرم در لیتر) رسم و مقدار فنل برحسب میلی گرم گالیک اسید در ۱۰۰ گرم وزن تازه گزارش شد.

۲.۳.۶. فعالیت آنتی اکسیدانی برگ

برای سنجش میزان فعالیت آنتی اکسیدانی از روش (Brand-Williams et al., 1995) استفاده شد. بدین منظور پس از تهیه عصاره متانولی از نیم گرم برگ، مقدار ۵۰۰ میکرولیتر از

عصاره متانولی با ۵۰۰ میکرولیتر آب دو بار تقطیر ترکیب و سانتریفیوژ (۱۰۰۰۰ دور در دقیقه، چهار درجه سانتی گراد، پنج دقیقه) گردید. سپس ۷۵ میکرولیتر از روشناور با ۲۹۲۵ میکرولیتر، ۲ و ۲ - دی فنیل ۱- پیکریل هیدرازیل (DPPH) مخلوط و ورتکس شد. پس از ۳۰ دقیقه استراحت در دمای آزمایشگاه و محیط تاریک، جذب نوری عصاره در طول موج ۵۱۷ نانومتر توسط میکروپلیت ریدر قرائت شد. مقدار فعالیت آنتی اکسیدانی (برحسب درصد) از رابطه زیر محاسبه و سپس بر اساس وزن تازه با واحد میلی گرم IC₅₀ گزارش شد.

$$\text{Antioxidant activity} = (A_{\text{DPPH}} - A_{\text{Sample}}/A_{\text{DPPH}}) \times 100$$

که در آن A_{DPPH} و A_{Sample} به ترتیب جذب عصاره و جذب نمونه کنترل بود.

۲.۳.۷. سنجش آنزیم های آنتی اکسیدان برگ (کاتالاز و

پراکسیداز)

بدین منظور، نیم گرم برگ تازه در ازت مایع در حضور یک میلی لیتر بافر استخراج (حاوی ۱۰۰ میلی لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی مولار، ۰/۰۳۷۲ گرم EDTA و یک گرم PVP) هموژن شد. پس از سانتریفیوژ (۱۲۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۵ دقیقه)، از روشناور جهت سنجش فعالیت کاتالاز و پراکسیداز استفاده شد (Dhindsa et al., 1981). جهت سنجش فعالیت کاتالاز، ۵۰ میکرولیتر از عصاره آنزیمی با یک میلی لیتر محلول واکنش کاتالاز (حاوی بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی مولار با pH برابر هفت و پراکسید هیدروژن ۱۵ میلی مولار) مخلوط و جذب آن در طول موج ۲۴۰ نانومتر ثبت و برحسب میکرو مول در دقیقه در گرم وزن تازه گزارش شد (Dhindsa et al., 1981). جهت سنجش فعالیت پراکسیداز، ۳۳ میکرولیتر عصاره آنزیمی با یک میلی لیتر محلول واکنش پراکسیداز (حاوی ۱۳ میلی مول گایاکول، پنج میلی مول پراکسید هیدروژن و ۵۰ میلی مول بافر فسفات پتاسیم با pH برابر هفت) مخلوط و جذب آن در طول موج ۴۷۰ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر قرائت و برحسب میکرو مول در دقیقه در گرم وزن تازه گزارش گردید (Chance and Maehly, 1995).

۲.۴. واکاوی آماری داده ها

نرمال بودن داده ها با روش Shapiro-Wilk صورت گرفت.

قاسمی و همکاران: اثر نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر صفات رشدی...

گردید. لازم به ذکر است که اثر تیمار بر ماده خشک ریشه معنی دار نگردید (جدول ۱). اثر تیمارها بر پرولین و مالون دی آلدئید ($P < 0.05$) معنی دار و بر نشت یونی غیرمعنی دار بود (جدول ۲). همچنین تأثیر نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر فعالیت پراکسیداز ($P < 0.01$) و کاتالاز ($P < 0.05$) معنی دار شد؛ اما بر محتوای فلاونوئید، فنل و فعالیت آنتی اکسیدانی معنی دار نبود (جدول ۳).

آزمون توکی برای مقایسه میانگین ($P < 0.01, 0.05$) انجام شد. آنالیز آماری داده ها با نرم افزار SAS Ver.9.4 انجام شد. همچنین نمودارها با کمک برنامه Excel 2016 ترسیم شدند.

۳. نتایج

براساس نتایج تجزیه واریانس اثر تیمار (نانوسلنیوم و سلنات سدیم) بر ماده خشک برگ، ماده خشک ریشه، طول اندام هوایی، طول ریشه و تعداد برگ ($P < 0.05$) معنی دار

Table 1: The analysis of variance of treatments on growth characteristics of spinach plant

SOV	df	MS				
		Leaf dry matter	Root matter	dry shoot length	Root length	Leaf number
Treatments	6	40.06*	7.53*	12.63*	11.02*	34.41*
Error	14	10.35	2.61	4.65	5.41	3.19
% CV		23.18	13.64	21.74	21.66	23.21

** , * and ^{ns} respectively indicate significance at 5%, 1% level and non-significance with Tukey's test.

Table 2: The analysis of variance of treatments on physiological characteristics of spinach plant

SOV	df	MS		
		Proline	Ion leakage	MDA
Treatments	6	543.1*	37.6 ^{ns}	0.010*
Error	14	3.2	38.4	0.001
% CV		17.79	6.78	16.72

** , * and ^{ns} respectively indicate significance at 5%, 1% level and non-significance with Tukey's test.

Table 3: The analysis of variance of treatments on antioxidant characteristics of spinach plant

SOV	df	MS				
		Flavonoids	Phenol	Antioxidant activity	Catalase	Peroxidase
Treatments	6	53.4 ^{ns}	871.6 ^{ns}	102.6 ^{ns}	26.0*	488.6**
Error	14	345.1	979.9	46.1	4.6	57.0
% CV		21.36	19.45	16.70	2.31	22.65

** , * and ^{ns} respectively indicate significance at 5%, 1% level and non-significance with Tukey's test.

۳. ۱. ماده خشک برگ

موجب کاهش ۱۶/۳۲ درصدی این صفت گردید. همچنین سطوح پنج و ۱۰ میلی گرم در لیتر سلنات سدیم به ترتیب موجب افزایش ۳۲/۴۸ و ۱۰/۵ درصدی در ماده خشک برگ شد. در مقابل، کاهش ۲۳/۲۴ درصدی در ماده خشک برگ و ثبت کمترین میزان این صفت (۹/۶۴ درصد) با کاربرد ۲۰ میلی گرم در لیتر سلنات سدیم حاصل شد (شکل ۲).

تیمارهای اعمال شده بر گیاهان اسفناج، در سطوح پایین تر با افزایش ماده خشک برگ و در سطوح بالاتر با کاهش آن همراه بودند. نانوسلنیوم ۱۰ میلی گرم در لیتر، ۵۶/۲۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش ماده خشک برگ را نشان داد و بیشترین درصد ماده خشک برگ (۱۹/۶۲ درصد) متعلق به تیمار مذکور بود. باین حال، اعمال تیمار ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم،

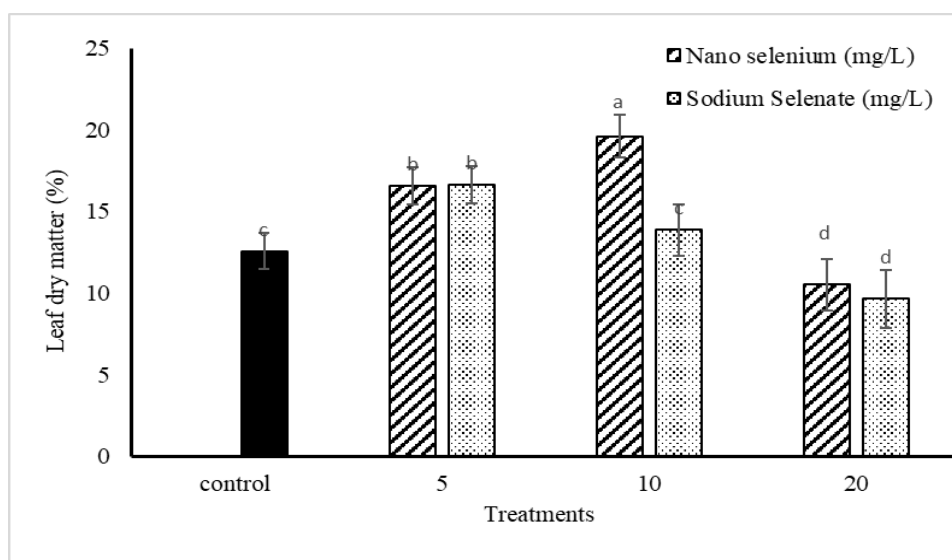


Fig. 2. The impact of nano selenium and sodium selenate treatments on leaf dry matter of spinach plant. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tukey's test ($P < 0.05$).

۳.۲. ماده خشک ریشه

(۲۰ میلی گرم در لیتر)، ۲۵/۶۹ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد، ایجاد کرد. کمترین (۱۶/۸۱ درصد) ماده خشک ریشه تحت تیمار شاهد حاصل شد (شکل ۳).

نتایج حاکی از آن بود که ماده خشک ریشه اسفناج در تیمار با ترکیبات سلنیوم افزایش می یابد. بیشترین مقدار سلنات سدیم

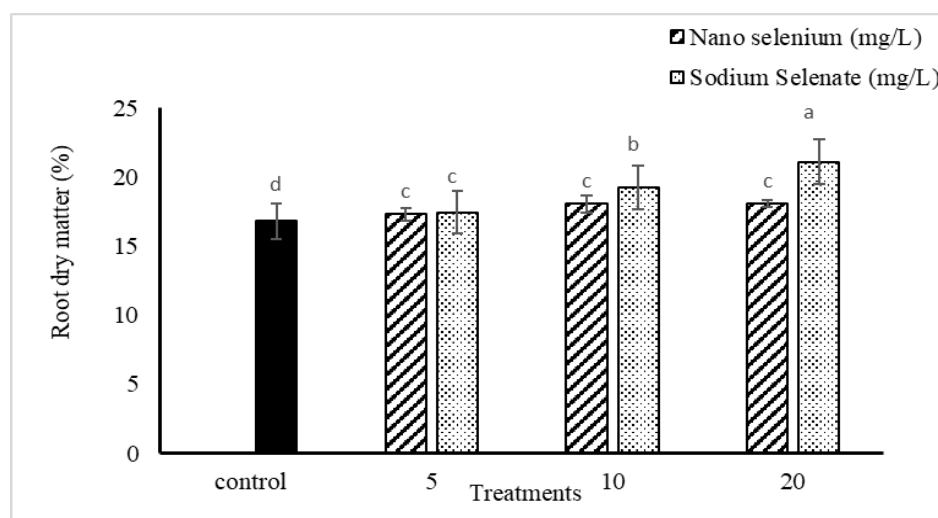


Fig. 3: The impact of nano selenium and sodium selenate treatments on root dry matter of spinach plant. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tukey's test ($P < 0.05$).

۳.۳. طول گیاه

به دست آمد. بیشترین و کمترین میزان طول گیاه به ترتیب در گیاهان تیمار شده با ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم (۲۱/۶۷ سانتی متر) و تیمار شاهد (۱۴ سانتی متر) گزارش شد (شکل ۴).

تیمار با هر دو ترکیب سلنیوم باعث افزایش طول گیاه اسفناج شد. بیشترین افزایش در بالاترین سطح نانوسلنیوم و سلنات سدیم (به ترتیب ۵۴/۷۸ و ۳۳/۰۷ درصد افزایش)

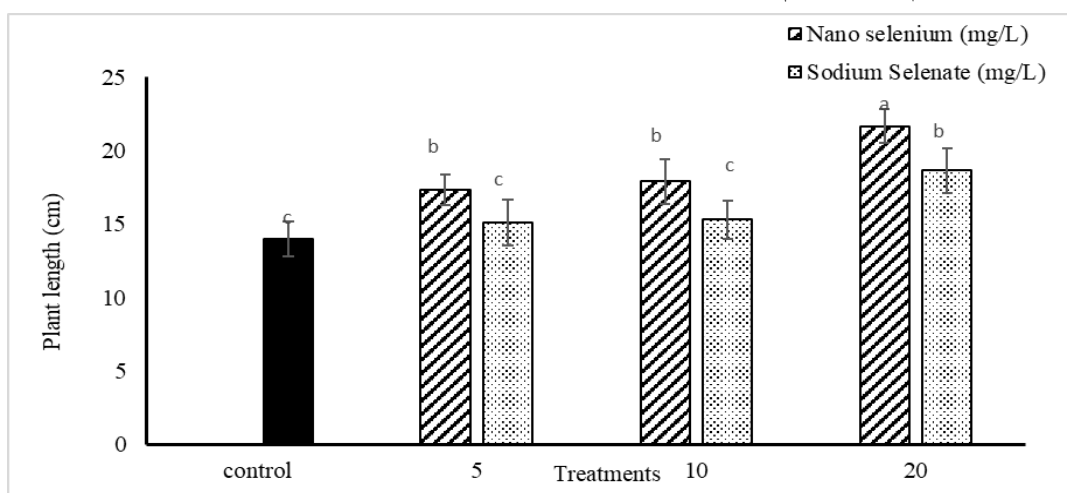


Fig. 4. The impact of nano selenium and sodium selenate treatments on aerial organ length of spinach plant. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tukey's test ($P < 0.05$).

۳. ۴. طول ریشه

درصدی در طول ریشه نسبت به تیمار شاهد، گردید. علاوه-
براین، افزایش غلظت‌های سلنات سدیم از پنج تا ۲۰ میلی‌گرم
در لیتر نیز موجب کاهش در طول ریشه نسبت به تیمار شاهد،
شد. به‌طوری‌که، کم‌ترین طول ریشه (۱۰/۶۳ سانتی‌متر) تحت
تیمار ۲۰ میلی‌گرم در لیتر از سلنات سدیم ثبت شد (شکل ۵).

در اسفناج، تیمار گیاهان با پنج میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم (با
افزایش ۱۰/۱۴ درصدی نسبت به تیمار شاهد)، موجب ثبت
بیش‌ترین طول ریشه (۱۵/۲۰ سانتی‌متر) شد. در مقابل، افزایش
سطوح نانوسلنیوم تا ۲۰ میلی‌گرم در لیتر موجب کاهش ۲۲/۲۴

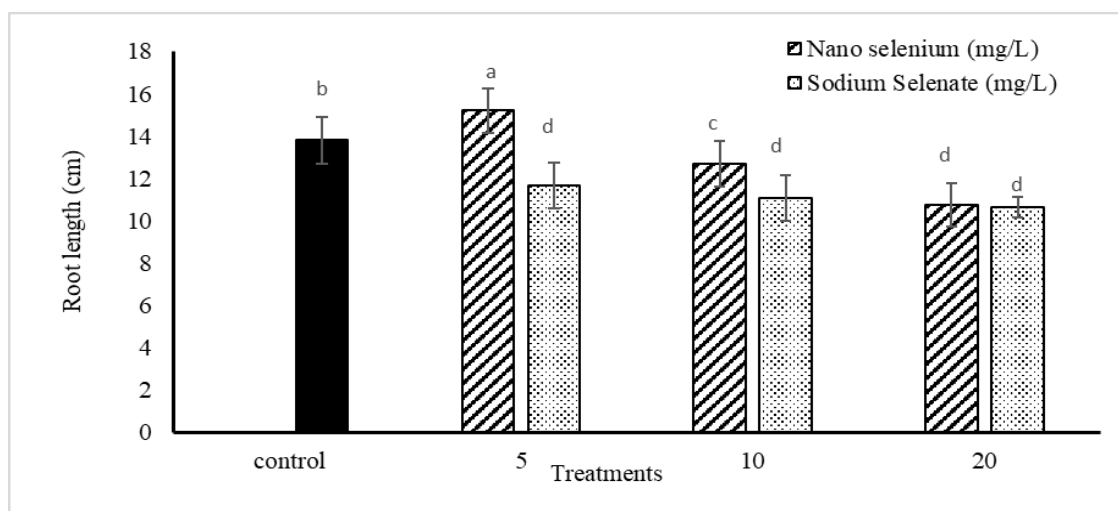


Fig. 5: The impact of nano selenium and sodium selenate treatments on root length of spinach plant. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tukey's test ($P < 0.05$).

۳. ۵. تعداد برگ در بوته

این، بالاترین سطح سلنات سدیم (۲۰ میلی‌گرم در لیتر) نیز با
افزایش ۱۴/۹۹ درصدی در تعداد برگ منجر به ثبت بیش‌ترین
تعداد برگ (۳۰/۶۷) گردید (شکل ۶).

تیمارهای اعمال‌شده باعث روند افزایشی در تعداد برگ هر
بوته اسفناج گردید. تیمار گیاهان با ترکیبات حاوی سلنیوم
موجب افزایش تعداد برگ نسبت به تیمار شاهد شد. علاوه‌بر

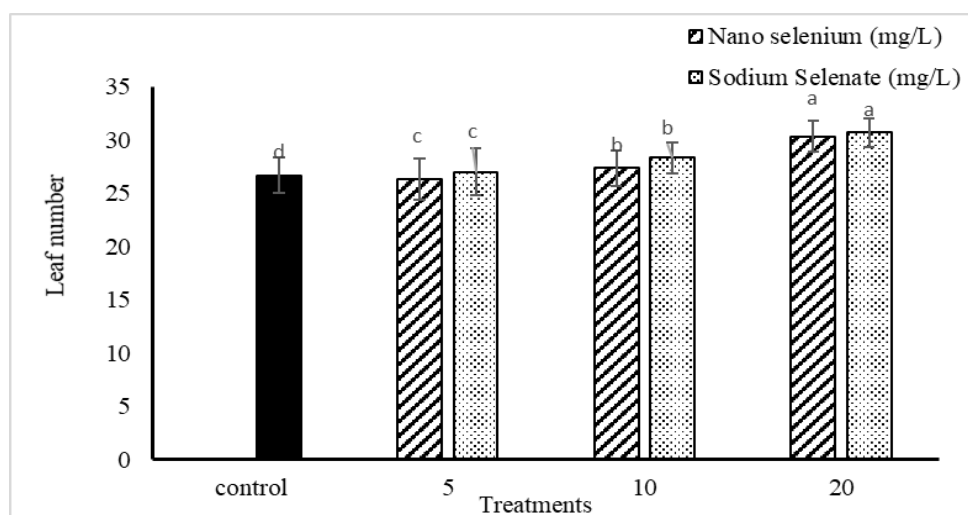


Fig. 6: The impact of nano selenium and sodium selenate treatments on leaf number of spinach plant. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tukey's test ($P < 0.05$).

۶.۳. پرولین

در میزان این صفت را باعث شدند. کمترین (۲۷/۷۱) میکرومول در گرم وزن تازه) و بیشترین (۵۵/۴۸) میکرومول در گرم وزن تازه) محتوای پرولین به ترتیب تحت تیمار شاهد و ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم حاصل شد (شکل ۷).

محتوای پرولین برگ اسفناج در تیمار با ترکیبات حاوی سلنیوم افزایش یافت. بالاترین سطح از نانوسلنیوم و سلنات سدیم (۲۰ میلی گرم در لیتر)، به ترتیب افزایش ۱۰۰/۲۱ و ۵۰/۷۳ درصدی

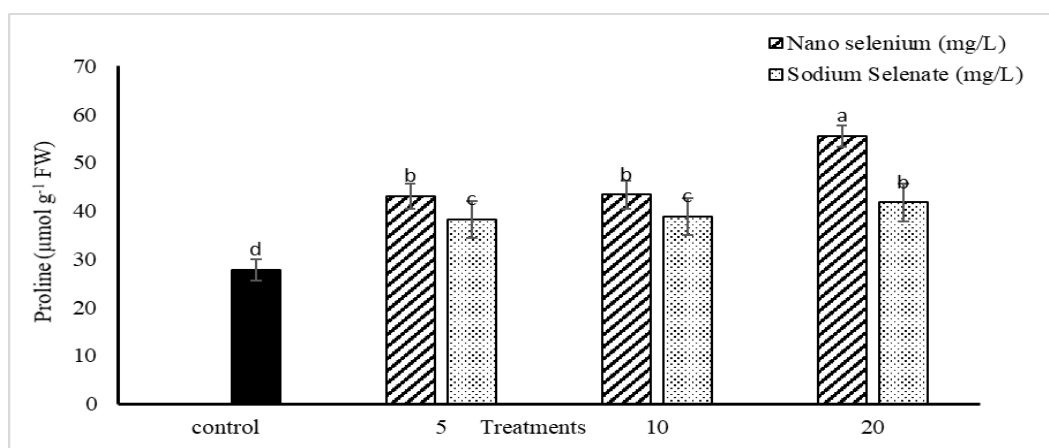


Fig. 7: The impact of nano selenium and sodium selenate treatments on proline content of spinach plant. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tukey's test ($P < 0.05$).

۸.۳. مالون دی آلدئید

تیمار با نانوسلنیوم موجب کاهش معنی دار در محتوای مالون دی آلدئید گردید. نتایج نشان داد که محتوای مالون دی آلدئید با افزایش سطوح نانوسلنیوم (تا ۲۰ میلی گرم در لیتر)، ۲۱/۲ درصد نسبت به تیمار شاهد، کاهش داشت. به طوری که، کمترین مقدار مالون دی آلدئید متعلق به گیاهان تیمار شده با ۲۰ میلی گرم در لیتر از نانوسلنیوم بود. باین وجود، کاربرد پنج میلی گرم در لیتر سلنات سدیم موجب افزایش ۱/۳ درصدی و ثبت بیشترین (۰/۳۸۷) میلی مول در گرم وزن تازه)

۷.۳. نشت یونی

باتوجه به یافته ها، تأثیر تیمارهای اعمال شده بر نشت یونی برگ معنی دار نبود، باوجود این، کاهش ۰/۲ درصدی در نشت یونی تحت تیمار ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم، نسبت به تیمار شاهد، مشاهده شد. علاوه بر این، کاربرد پنج میلی گرم در لیتر سلنات سدیم موجب کاهش ۰/۶ درصدی در نشت یونی نسبت به تیمار شاهد شد. به طوری که، کمترین نشت یونی (۸۱/۶۶ درصد) تحت این تیمار به دست آمد.

قاسمی و همکاران: اثر نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر صفات رشدی...

شدند (شکل ۸).

میزان این صفت شد. در مقابل، سطوح دیگر سلنات سدیم موجب کاهش مالون دی آلدئید نسبت به تیمار شاهد

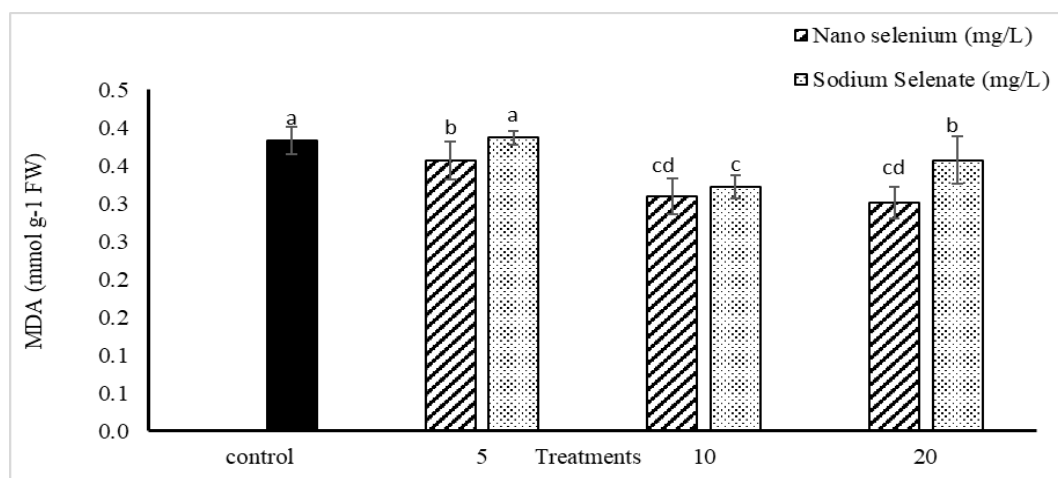


Fig. 8: The impact of nano selenium and sodium selenate treatments on MDA content of spinach plant. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tukey's test ($P < 0.05$).

۹.۳. فلاونوئید

لیتر نانوسلنیوم ثبت شد. کاربرد پنج میلی گرم در لیتر سلنات سدیم با افزایش ۰/۳۹ درصدی (نسبت به تیمار شاهد) در محتوای فنل، بیشترین میزان این صفت (۹۴/۳۱ میلی گرم گالیک اسید در ۱۰۰ گرم وزن تازه) را به خود اختصاص داد. سایر سطوح سلنات سدیم موجب کاهش محتوای فنل نسبت به تیمار شاهد شدند.

هرچند تأثیر تیمارهای به کاررفته بر محتوای فلاونوئید معنی دار نبود، اما کمترین میزان فلاونوئید (۲۳/۰۷ میلی گرم کوئرستین در ۱۰۰ گرم وزن تازه) در گیاهان تیمار شاهد ثبت شد. میزان فلاونوئید با کاربرد پنج میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم نسبت به شاهد، تغییر نکرد. با این حال، با افزایش سطوح نانوسلنیوم (از ۱۰ تا ۲۰ میلی گرم در لیتر)، افزایش ۱/۶ درصدی در محتوای فلاونوئید نسبت به تیمار شاهد ایجاد کرد. غلظت های مختلف سلنات سدیم نیز موجب افزایش در محتوای فلاونوئید نسبت به تیمار شاهد شدند. افزایش ۳/۶ درصدی در محتوای فلاونوئید نسبت به تیمار شاهد در گیاهان تیمار شده با پنج میلی گرم در لیتر سلنات سدیم مشاهده و بیشترین میزان این صفت (۲۳/۹۱ میلی گرم کوئرستین در ۱۰۰ گرم وزن تازه) در این تیمار حاصل شد.

۱۱.۳. فعالیت آنتی اکسیدانی

علی رغم عدم اختلاف آماری معنی دار بین تیمارهای اعمال شده، فعالیت آنتی اکسیدانی با افزایش سطوح نانوسلنیوم تا ۱۰ میلی گرم در لیتر، ۲/۰۴ درصد نسبت به تیمار شاهد، افزایش داشت. به طوری که، بیشترین فعالیت آنتی اکسیدانی (۳۹۶/۳۱ میلی گرم) در گیاهان تیمار شده با ۱۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم حاصل شد. البته کاربرد ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم نیز باعث افزایش فعالیت آنتی اکسیدانی نسبت به شاهد شد، اما ۱/۸۲ درصد کم تر از زمانی بود که تیمار ۱۰ میلی گرم در لیتر بر گیاهان اعمال شد. با افزایش سلنات سدیم تا ۲۰ میلی گرم در لیتر، فعالیت آنتی اکسیدانی ۱/۳۵ درصد نسبت به تیمار شاهد، افزایش نشان داد. کمترین میزان این صفت (۳۸۸/۳۶ میلی گرم) نیز در تیمار شاهد ثبت شد.

۱۰.۳. فنل

تیمار با سطوح مختلف از هر دو شکل سلنیوم، تأثیر معنی داری در محتوای فنل برگ اسفناج نداشت. با وجود این، نتایج حاکی از آن بود که با افزایش سطوح نانوسلنیوم تا ۲۰ میلی گرم در لیتر، محتوای فنل ۱/۸ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت. به طوری که، کمترین محتوای فنل (۹۲/۲۲ میلی گرم گالیک اسید در ۱۰۰ گرم وزن تازه) در گیاهان تیمار شده با ۲۰ میلی گرم در

۱۲.۳. آنزیم کاتالاز

میلی گرم در لیتر سلنات سدیم، ۸/۰۱ درصد بیش تر از مقدار این صفت تحت تیمار ۲۰ میلی گرم در لیتر بود. بیش ترین فعالیت این آنزیم (۱۹/۳۳ میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه)، با اعمال پنج میلی گرم در لیتر از سلنات سدیم حاصل شد (شکل ۹).

نتایج حاکی از آن بود که فعالیت آنزیم کاتالاز اسفناج، تحت تیمار ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم، ۱۲/۸۸ درصد نسبت به تیمار شاهد، افزایش یافت. غلظت های مختلف سلنات سدیم نیز موجب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز نسبت به تیمار شاهد شدند. باین حال، میزان فعالیت این آنزیم تحت تیمار ۱۰

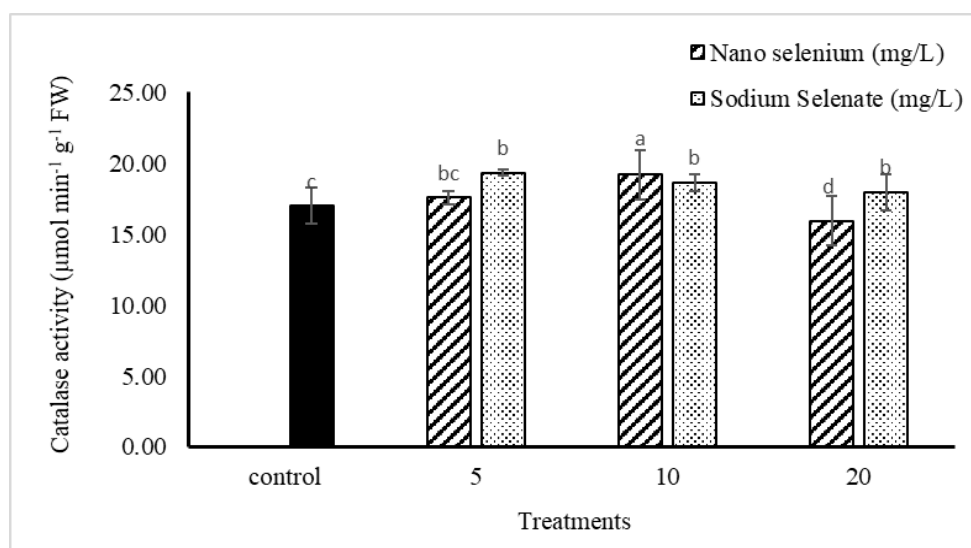


Fig. 9: The impact of nano selenium and sodium selenate treatments on catalase activity of spinach plant. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tukey's test ($P < 0.05$).

۱۳.۳. آنزیم پراکسیداز

بیش ترین فعالیت آنزیم پراکسیداز (به ترتیب ۳۱۸/۵۹ و ۳۷۳/۰۱ میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه) تحت تیمار شاهد و ۲۰ میلی گرم در لیتر از نانوسلنیوم مشاهده شد (شکل ۱۰).

فعالیت آنزیم پراکسیداز با افزایش سطوح نانوسلنیوم و سلنات سدیم (تا ۲۰ میلی گرم در لیتر)، به ترتیب ۱۷/۰۸ و ۱۶/۷۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. کم ترین و

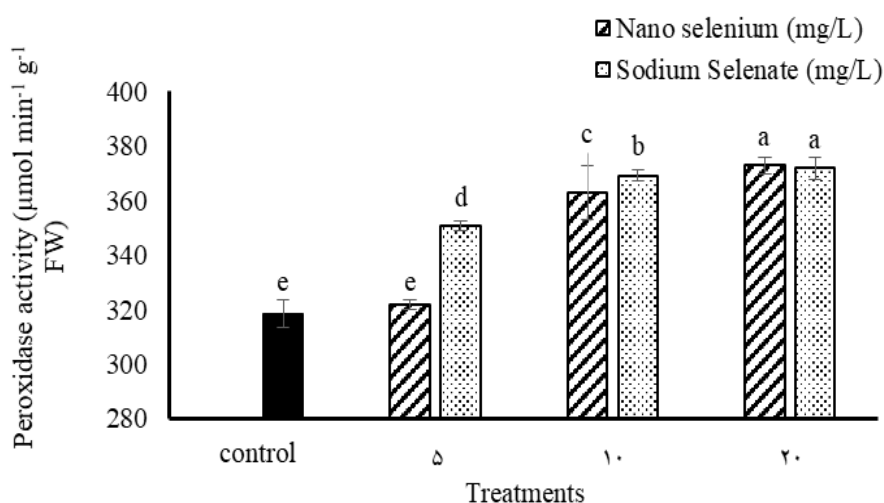


Fig. 10: The impact of nano selenium and sodium selenate treatments on peroxidase activity of spinach plant. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tukey's test ($P < 0.01$).

۴. بحث

سلنیوم عمدتاً به شکل سلنات سدیم یا سلنیت سدیم از خاک توسط گیاهان جذب می‌شود که این دو شکل از لحاظ جذب و تحرک در گیاهان متفاوت هستند. سلنیت بیش‌تر جذب کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن موجود در خاک می‌شود، با این‌حال، زمانی‌که سلنیت جذب گیاه می‌شود به‌سرعت به ترکیبات کم‌تحرک در گیاه تبدیل می‌شود. نمک‌های سلنات، اما، بسیار محلول بوده و به آسانی جذب گیاه می‌شوند. به‌علاوه به‌دلیل تجمع سلنیت در ریشه و انتقال بیشتر سلنات به شاخه‌ها و هم‌چنین جذب سریع‌تر سلنات نسبت به سلنیت، فرم سلنات در برنامه‌های کودی بیش‌تر توصیه می‌شود (Cartes et al., 2005). سلنیوم در غلظت‌های پائین رشد گیاه را تحریک و در غلظت‌های بالا به‌عنوان یک اکسیدان عمل کرده و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد (Pennanen et al., 2002). غلظت‌های پایین سلنیوم (دو تا پنج میلی‌گرم در لیتر)، احتمالاً از طریق تغییر در مسیر بیوسنتز نشاسته، رشد را بهبود می‌بخشد (Han -Wens et al., 2010). غلظت‌های بالای آن (۲۰ تا ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) اما، به‌دلیل ایجاد تغییر در نفوذپذیری غشاء سلول نسبت به ورود و خروج یونها (خصوصاً سدیم، پتاسیم و کلسیم) (Dziubinskaa et al., 2010) و متعاقباً بروز اختلال در فرآیند تنفس، منجر به کاهش ماده خشک گیاه می‌شود (John et al., 2010; Jahid et al., 2010; al., 2009).

نانو ذرات سلنیوم از مسیرهای آپوپلاستی و سیمپلاستی ریشه، آوند چوب و آبکش، به برگ‌ها و ساقه منتقل شده (Wang et al., 2012) و رشد را از طریق بهبود وضعیت آبی سلول (Iqbal et al., 2015)، افزایش در اندازه و تعداد سلول (Jiang et al., 2017) بهبود می‌بخشد. همسو با یافته‌های این تحقیق، تیمار با چهار و شش میلی‌گرم در لیتر سلنیوم موجب افزایش طول ساقه در گیاه خیار (Mousavi et al., 2022) و تیمار با چهار میلی‌گرم در لیتر سلنات سدیم موجب افزایش وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه در گیاه نعنا فلفلی (Jafari and Moghaddam, 2023) شد. هم‌چنین محلول‌پاشی برگی با نانو ذرات سلنیوم (۵۰ میلی‌گرم در لیتر)، وزن تر و خشک برگ، تعداد برگ و ارتفاع را در گشنیز (Ghazi, 2018) و تعداد برگ، وزن تر ساقه و ارتفاع بوته را در گیاه نخود افزایش داد

(Shedeed et al., 2018; El-Sawy et al., 2019). مقایسه تیمار سلنیوم عنصری و نانوسلنیوم در گیاه گوجه‌فرنگی (Abulghasemi and Haghighi, 2018) و درمنه (Logvinenko et al., 2022) نیز آشکار ساخت که سلنیوم عنصری بیش‌تر بر صفات رویشی و نانوسلنیوم بیش‌تر بر تغییرات فتوسنتزی و آنتی‌اکسیدانی تأثیرگذار بوده است.

پرویلین به‌عنوان تنظیم‌کننده اسمزی، تثبیت‌کننده ساختارهای پروتئینی، حذف‌کننده رادیکال‌های آزاد و بازدارنده پراکسیداسیون لیپیدی در گیاهان عمل کرده (Madebo et al., 2021) و نقش عمده‌ای در مقابله با شرایط نامساعد محیطی دارد (Zhao et al., 2020). افزایش میزان پرویلین در اثر کاربرد نانوسلنیوم (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) در کلزا (sheikhzadeh et al., 2024)، سلنات سدیم (۱۶ میلی‌گرم در لیتر) در جو (Akbulut and Cakir, 2010) و نانوسلنیوم (۲۰ میلی‌گرم در لیتر) در نعناع (Nazerieh et al., 2018) به تأثیر این عنصر بر آنزیم متابولیسم پرویلین به‌نام آنزیم γ -glu amyl kinase (γ -GK) نسبت داده‌شده (Abbas, 2012)، که همسو با یافته‌های این تحقیق است.

میزان نشت یونی، نشانگر درجه ثبات غشاء و بیان مقدار نسبی حضور یونها در فضای آپوپلاست است (Kaya et al., 2001). سلنیوم در غلظت کم، با تقویت تجزیه H_2O_2 ، توانایی آنتی‌اکسیدانی سلول را بهبود بخشیده و بدین‌ترتیب از ساختار غشای سلول در برابر آسیب اکسیداسیون، محافظت می‌کند (Hartikainen et al., 2000). هم‌چنین سلنیوم به‌طور مستقیم در فرآیندهای آنزیمی و غیرآنزیمی، به‌عنوان جزئی از سیستم گلوکوتاتیون‌پراکسیداز (GSH-Px) Glutathione peroxidase)) شرکت و احیای پراکسید سمی را به ترکیبات هیدروکسیل غیرسمی القاء می‌کند (Hartikainen et al., 2000). البته سلنیوم در غلظت‌های بالا، خود به‌عنوان اکسیدان عمل کرده، دریافت الکترون توسط NADP را محدود و O_2 به‌عنوان گیرنده الکترون عمل می‌کند. این پدیده منجر به تولید رادیکال‌های آزادشده که پراکسیداسیون غشای سلول و افزایش نشت یونی را القاء می‌کند (El-Kinany et al., 2019). مالون‌دی‌آلدئید یک پراکسید لیپیدی بسیار فعال است که بر سیالیت غشای سلولی و اتصال پروتئین‌ها بر غشاء، اثر می‌گذارد (Ebrahimi et al., 2016). در این تحقیق میزان نشت یونی در برگ گیاهان تفاوت

فعالیت پراکسیداز در گیاهان نعنا فلفلی (Jafari and Moghaddam, 2023)، خیار (Mousavi et al., 2022) و شاهی (Wu et al., 2020) همسو با تحقیقات ما بود. کاهش مشاهده شده در فعالیت کاتالاز، در این تحقیق، احتمالاً ممکن است به نقش واسطه سلنیوم در مکانیزم‌های تجزیه علیه تنش اکسیداتیو، مرتبط باشد (Silva et al., 2020).

۵. نتیجه‌گیری کلی

اطلاعات به‌دست‌آمده از تأثیر ترکیبات مختلف سلنیوم بر اسفناج رقم ویروفلائی در این پژوهش، حاکی از آن بود که سطوح بالای سلنیوم به شکل نانو بر محتوای پرولین و فعالیت آنزیم پراکسیداز، و به شکل سلنات‌سدیم بر طول گیاه، ماده‌خشک ریشه و تعداد برگ، اثر افزایشی داشت. بااین‌وجود، بالاترین سطح نانوسلنیوم بر مالون‌دی‌آلدئید اثری کاهنده نشان داد. علاوه‌براین، داده‌ها حاکی از اثرات افزایشی سطوح متوسط نانوسلنیوم بر ماده‌خشک برگ، و سطح پایین سلنات‌سدیم بر فلاونوئید، فنل، مالون‌دی‌آلدئید و فعالیت آنزیم کاتالاز بود. اما در پایین‌ترین سطح سلنات‌سدیم کاهش نشت یونی رخ داد. درنهایت باتوجه‌به داده‌های به‌دست‌آمده، غلظت پنج میلی‌گرم در لیتر سلنات‌سدیم، و در شکل نانو، غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر از مؤثرترین سطوح این تیمارها در این آزمایش بودند. این تفاوت در تأثیر سطوح مختلف تیمارها بر صفات مورد‌مطالعه نشان‌دهنده این است که هر صفت تحت سطوح خاصی از تیمارها در حالت بهینه نمایان می‌شود. در نتیجه اهمیت مقدار مصرفی ترکیبات سلنیوم (بالک یا نانو) در فعالیت‌های پژوهشی برجسته می‌گردد.

معنی‌داری نداشت. بالا بودن میزان نشت یونی، حتی در گیاهان شاهد، احتمالاً می‌تواند حاکی از شروع روند پیری در برگ باشد که بعضاً در برخی گیاهان برگ‌ساره‌ای رخ می‌دهد. (Rolny et al., 2011). هرچند در این پژوهش، تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم تأثیر معنی‌داری بر نشت یونی نداشتند، اما همسو با نتایج Beiramvand et al (2023)، با افزایش غلظت سلنیوم (در غلظت ۰/۵ میکرو مولار)، نشت یونی افزایش یافت. همچنین با کاربرد سلنیوم، کاهش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدئید در گل صدتومانی (Wang et al., 2024)، لوبیا سبز (Rady et al., 2021) و قهوه (Brito Mateus et al., 2021) گزارش شده است.

تیمار با سلنیوم، موجب افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی در گیاهان بادام‌زمینی (Hussein et al., 2019)، انار (Zahedi et al., 2019)، گوجه‌فرنگی (Mejía-Ramírez et al., 2023)، فستوکا (González-Lemus et al., 2022) و جو (Singh et al., 2019) شده است. در این تحقیق، تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم تأثیر معنی‌داری بر میزان فنل و فلاونوئید نداشتند؛ اما کاربرد سلنیوم موجب افزایش جزئی در هر دو صفت گردید. این افزایش محتوای فنل، می‌تواند به فعال‌سازی آنزیم فنیل‌آلانین آمونیا‌لیاز که سنتز ترکیبات فنلی را کنترل می‌کند، مرتبط باشد (walaa et al., 2010). همچنین سلنیوم سرعت مسیر بیوستزی فنیل پروپانویید، که به تجمع فلاونوئیدها منجر می‌گردد را افزایش می‌دهد (Mimmo et al., 2017).

سلنیوم یکی از اجزای ضروری برای فعالیت سیستم آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان بوده و تحمل آنها را در برابر تنش‌های محیطی افزایش می‌دهد. سلنیوم با افزایش فعالیت آنزیم‌ها و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و نیز افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز موجب کاهش پراکسیداسیون لیپیدها می‌گردد (Lapaz et al., 2005; 2019). تأثیر سلنیوم و نانوسلنیوم بر

۶. منابع

- Abbas, S. M. (2012). Effects of low temperature and selenium application on growth and the physiological changes in sorghum seedlings. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*, 8(1), 268-286. <https://www.researchgate.net/publication/284698346>.
- Abdollahi, A., Barin, M., Soltani, A. A., Torabi Giglou, M., Behrouz Ismailpour, B. and tahami, S. K. (2023). Evaluation of Influence of Selenium Foliar Application on Growth and Physiological Characteristics of Basil (*Ocimum basilicum* L.) in Arsenic-Contaminated Soil. *Journal of Vegetables Sciences*, 7(2), 59-76. doi: 10.22034/ivvs.2022.1973789.1250

- Amerian, M. and Nosratti, I. (2021). Effect of Different Levels of Nano-Selenium and Selenium on Seed Germination and Seedling Growth of Onion (*Allium cepa* L.). *Journal of Vegetables Sciences*, 4(2), 67-80. doi: 10.22034/iuvs.2021.521119.1136
- Abulghasemi, R. and Haghighi, M. (2018). Study of changes in greenhouse tomatoes treated with beneficial elements in the form of metal metal and nanometals. *Plant Process and Function*, 6 (19), 153-162. <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-417-en.htm>
- Adhikary, S., Biswas, B., Chakraborty, D., Timsina, J., Pal, S., Chandra Tarafdar, J., Banerjee, S., Hossain, A. and Roy, S. (2022). Seed priming with selenium and zinc nanoparticles modifies germination, growth, and yield of direct-seeded rice (*Oryza sativa* L.). *Scientific Reports*, 12, 7103. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11307-4>
- Aisha, H. A., Hafez, M. M., Asmaa, R. M. and Shafeek, M. R. (2013). Effect of Bio and chemical fertilizers on growth, yield and chemical properties of spinach plant (*Spinacia oleracea* L.). *Middle East Journal of Agriculture Research*, 2(1), 16-20.
- Akbulut, M. and Cakir, S. (2010). The effects of Se phytotoxicity on the antioxidant systems of leaf tissues in barley (*Hordeum vulgare* L.) seedling. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(2-3), 160-166. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2009.11.0011>
- Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S. and Karanov, E. (2001). The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant, Cell and Environment*, 24(12), 1337-1344. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x>
- Babajani, A., Iranbakhsh, A., Ardebili, Z. O. and Eslami, B. (2019). Differential growth, nutrition, physiology, and gene expression in *Melissa officinalis* mediated by zinc oxide and elemental selenium nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research International*, 26, 24430–24444.
- Bates, L. S., Waldren, R. P. and Tear, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and soil*, 39, 205-207. <https://www.jstor.org/stable/42932378>.
- Beiramvand, F., Zahedi, B. and Rezaei Nejad, A. (2023). Investigation of the effect of selenium foliar application on morphophysiological and biochemical characteristics of ornamental salvia under irrigation regime. *Journal of Plant Process and Function*, 11(47), 323-330. <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1525-fa.html>
- Braca, A., Sortino, C., Politi, M., Morelli, I. and Mendez, J. (2002). Antioxidant activity of flavonoids from *Licania licaniaeflora*. *Journal of Ethnopharmacology*, 79(3), 379-381. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(01\)00413-5](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(01)00413-5)
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E. and Berset, C. (1995). Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*. 28, 25-30.
- Cartes, P., Gianfera, L. and Mora, M.L. (2005). Uptake of selenium and its antioxidative activity in ryegrass when applied a selenate and selenite forms. *Plant and Soil*. 276, 359–367. doi.org/10.1007/s11104-005-5691-9
- Chance, B. and Maehly, A. C. (1995). Assay of catalase and peroxidases. *Methods in Enzymology*. 11, 755–764. <https://doi.org/10.1002/9780470110171.ch14>
- Dhindsa, R. S., Plumb-Dhindsa, P. and Thorpe, T. (1981). Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany*. 32, 93–101. <https://doi.org/10.1093/jxb/32.1.93>
- Djanaguiraman, M., Belliraj, N., Bossmann, S.H. and Prasad, P.V. (2018). High-temperature stress alleviation by selenium nanoparticle treatment in grain sorghum. *ACS Omega*. 3, 2479–2491.
- Duhan, J.S., Kumar, R., Kumar, N., Kaur, P., Nehra, K. and Duhan, S. (2017). Nanotechnology. The new perspective in precision agriculture. *Biotechnology Reports*. 15, 11–23.
- Dziubinskaa, H., Filekb, M., Krol, E. and Trebacz, K. (2010). Cadmium and selenium modulate slow vacuolar channels in rape (*Brassica napus*) vacuoles. *Journal of Plant Physiology*. 167, 1566–1570. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.06.016>
- Ebrahimi, A., Galavi, M., Ramroudi, M. and Moaveni, P. (2016) Effect of TiO₂ nanoparticles on antioxidant enzymes activity and biochemical biomarkers in pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Molecular Biology Research*. 6, 58– 66. <https://doi.org/10.5539/jmbr.v6n1p58>
- El-Kinany, R., Brengi, S., Nassar, A. and El-Batal, A. (2019). Enhancement of plant growth, chemical composition and secondary metabolites of essential oil of salt-stressed coriander (*Coriandrum sativum* L.) plants using selenium, nano-selenium, and glycine betaine. *Scientific Journal of Flowers and Ornamental Plants*. 6(3), 151-173. Doi: 10.21608/sjfo.2019.84973
- El-Sawy, S. M., Fawzy, Z. F., El-Bassiony, A. M. and Mahmoud, S. M. (2019). Effect of Nano bio-selenium and mineral selenium, ascorbic acid and salicylic acid on vegetative growth and fruit yield of pea plants grown under sandy soil conditions. *International Journal of Environment*. 8 (4), 210- 220.
- Farooq, M.U., Ishaq, I., Barutcular, C., Skalicky, M., Maqbool, R., Rastogi, A., Hussain, S., Allakhverdiev, S.I. and Zhu, J. (2022). Mitigation effects of selenium on accumulation of cadmium and morphophysiological properties in rice varieties. *Plant Physiology and Biochemistry*. 170, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.035>
- Ghazi, D.A. (2018). The Contribution of Nano-Selenium in Alleviation of Salinity Adverse Effects on Coriander Plants. *Journal of Soil Science and Agricultural Engineering*, 9 (12), 753 - 760.
- González-Lemus, U., Medina-Pérez, G., Peláez-Acero, A. and Campos-Montiel, R.G. (2022). Decrease of Greenhouse Gases during an In Vitro Ruminant Digestibility Test of Forage (*Festuca arundinacea*) Conditioned with Selenium Nanoparticles. *Nanomaterials*. 12, 3823. <https://doi.org/10.3390/nano12213823>.
- Gratão, P.L., Polle, A., Lea, P.J. and Azevedo, R.A. (2005). Making the life of heavy metal-stressed plants a little

- easier. *Functional Plant Biology*. 32, 481- 494
- Guillin, O. M., Vindry, C., Ohlmann, T. and Chavatte, L. (2019). Selenium, seleno-proteins and viral infection. *Nutrients*. 11, 2101. <https://doi.org/10.3390/nu11092101>
- Han-Wens, S., Jing, H., Shu-Xuan, L. and Wei-Jun, K. (2010). Protective role of selenium on garlic growth under cadmium stress. *Plant Analysis*. 41, 1195-1204. <http://dx.doi.org/10.1080/00103621003721395>
- Hartikainen, H. 2005. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* 18:309–18. <http://doi:10.1016/j.jtemb.2005.02.009>.
- Hartikainen, H., Xue, T. and Piironen, V. (2000). Selenium as an anti-oxidant and pro-oxidant in ryegrass. *Plant and Soil*. 225, 193-200. <https://www.jstor.org/stable/42950858>
- Huang, S., Kan, Y. and Tang, Y. (2020). Effect of bioorganic selenium on yield, quality and selenium content of green tea. *Journal Tea Communication*. 47, 610–616.
- Huang, S., Yu, K., Xiao, Q., Song, B., Yuan, W., Long, X., Cai, D., Xiong, X. and Zheng, W. (2023). Effect of bio-nano-selenium on yield, nutritional quality and selenium content of radish. *Journal of Food Composition and Analysis*. 115, 104927. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104927>.
- Hussein, H. A. A., Darwesh, O. M. and Mekki, B. B. (2019). Environmentally friendly nano- selenium to improve antioxidant system and growth of groundnut cultivars under sandy soil conditions. *Biocatal. Agric. Biotechnol*. 18, 101080.
- Ingold, I., Berndt, C., Schmitt, S., Doll, S., Poschmann, G., Buday, K., Roveri, A., Peng, X., Freitas, F.P., Seibt, T. and Mehr, L. (2018). Selenium utilization by GPX4 is required to prevent hydroperoxide-induced ferroptosis. *Cell*. 172, 409–422. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2017.11.048>
- Iqbal, M., Hussain, I., Liaqat, H., Ashraf, M. A., Rasheed, R. and Rehman, A. U. (2015). Exogenously applied selenium reduces oxidative stress and induces heat tolerance in spring wheat. *Plant Physiol. Biochem*. 94, 95–103.
- Jafari, H. and Moghaddam, M. (2023). The Effect of Different Levels of Sodium Selenate and Selenite on Some Growth and Physiological Characteristics of Peppermint (*Mentha piperita* L.). *Iranian Journal of Horticultural Science*, 54 (2), 269-284. <http://doi.org/10.22059/IJHS.2023.344758.2039>.
- Jahid, A.M. and Kumar, T.P. (2010). Promotion of growth in mungbean (*Phaseolusaureus* Roxb.) by selenium is associated with stimulation of carbohydrate metabolism. *Biological Trace Element Research*. 143(1), 530-539. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8872-1>
- Jiang, C., Zu, C., Lu, D., Zheng, Q., Shen, J. and Wang, H. (2017). Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na⁺ accumulation and antioxidative capacity of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. *Nature Publishing Group*, 1-14.
- John, R., Ahmad, P., Gadgil, K. and Sharma, S. (2009). Heavy metal toxicity: Effect plant growth, biochemical parameters and metal accumulation by *Brassica juncea* L. *International Journal of Plant Production*. 3, 65-75. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2012.653>
- Kaya, C., Higgs, D., Krinak, H. (2001). The effects of high salinity (NaCl) and supplementary phosphorus and potassium on physiology and nutrition development of spinach. *Journal of Plant Physiology*. 27, 47-59. <https://www.researchgate.net/publication/228876941>
- Lapaz, A. D. M., Santos, L. F. D. M., Yoshida, C. H. P., Heinrichs, R., Campos, M. and Reis, A. R. D. (2019). Physiological and toxic effects of selenium on seed germination of cowpea seedlings. *Bragantia*. 78(4), 498-508.
- Li, R., He, J., Xie, H., Wang, W., Bose, S.K., Sun, Y.Y. and Yin, H. (2019). Effects of chitosan nanoparticles on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Biological Macromolecules*. 126, 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.118>.
- Liu, Y., Sanz-Saez, A., Meng, X., Liu, J., Liang, T., Dai, H. and Zhai, Z. (2020). Promoting effect of Nano-Se on tobacco growth and reactive oxygen species metabolism. *Journal of Plant Nutrition*. 2810-2821. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1793187>
- Logvinenko, L., Golubkina, N., Fedotova, I., Bogachuk, M., Fedotov, M., Kataev, V., Alpatov, A., Shevchuk, O. and Caruso, G. (2022). Effect of Foliar Sodium Selenate and Nano Selenium Supply on Biochemical Characteristics, Essential Oil Accumulation and Mineral Composition of *Artemisia annua* L. *Molecules*. 27, 8246. <https://doi.org/10.3390/molecules27238246>
- Madebo, M. P., Luo, S. M., Wang, L., Zheng, Y. H. and Jin, P. (2021). Melatonin treatment induces chilling tolerance by regulating the contents of polyamine, γ -aminobutyric acid, and proline in cucumber fruit. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(11), 3060-3074. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(20\)63485-2](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(20)63485-2)
- Malagoli, M., Schiavon, M., dall'Acqua, S., Pilon-Smits, and E. A. H. (2015). Effects of Selenium Biofortification on Crop Nutritional Quality. *Front Plant Science*. 6, 280. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00280>
- Mashayekhi, K. and Shomali, A. (2018). Botany, physiology and culture of vegetable. *Gorgan Univ. Press*, 502p. (In Persian).
- Mateus, M., Tavanti, R., Tavanti, T., Santos, E., Jalal, A. and Reis, A. (2021). Selenium biofortification enhances ROS scavenge system increasing yield of coffee plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 209. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111772>.
- Mejía-Ramírez, F., Benavides-Mendoza, A., González-Morales, S., Juárez-Maldonado, A., Lara-Viveros, F.M.,

- Morales-Díaz, A. B. and Morelos-Moreno, Á. (2023). Seed Priming Based on Iodine and Selenium Influences the Nutraceutical Compounds in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Crop. *Antioxidants*. 12, 1265. <https://doi.org/10.3390/antiox12061265>
- Mimmo, T., Tiziani, R., Valentinuzzi, F., Lucini, L., Nicoletto, C., Sambo, P., Scampicchio, M., Pii, Y. and Cesco, S. (2017). Selenium biofortification in *Fragaria × ananassa*: implications on strawberry fruits quality, content of bioactive health beneficial compounds and metabolomic profile. *Front. Plant Sci.* 8, 1887.
- Møller, I. M., Jensen, P. E. and Hansson, A. (2007). Oxidative modifications to cellular components in plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 58, 459–481. [Doi: 10.1146/annurev.arplant.58.032806.103946](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.58.032806.103946)
- Mousavi, A. A., Roosta, H. R., Esmaeilzadeh, M. and Eshghi, S. (2022). Effects of Selenium and Silicon on Some Vegetative and Biochemical Attributes of Cucumber under Salinity and Alkalinity Stresses in Hydroponic Culture. *IJHST*. 23 (1), 63-78. URL: <http://journal-irshs.ir/article-1-541-fa.html>. (In Persian).
- Nazerieh, H., Ardebili, Z. O. and Iranbakhsh, A. (2018). Potential benefits and toxicity of nanoselenium and nitric oxide in peppermint. *Acta agriculturae Slovenica*, 111(2), 357-368. <http://dx.doi.org/10.14720/aas.2018.111.2.11>
- Pennanen, A., Xue, T., Hartikainen, H and Xue, T. L. (2002). Protective role of selenium in plant subjected to severe UV irradiation stress. *Journal Applied. Botany*. 76, 66-76.
- Rady, M. M., Desoky, E.- S. M., Ahmed, S.M., Majrashi, A., Ali, E. F., Arnaout, S. M. A. I. and Selem, E. (2021). Foliar Nourishment with Nano-Selenium Dioxide Promotes Physiology, Biochemistry, Antioxidant Defenses, and Salt Tolerance in *Phaseolus vulgaris*. *Plants*. 10, 1189. <https://doi.org/10.3390/plants10061189>.
- Ramezan, D., Zargar, M., Nakhaev, M., Akhmadovich, K., Bayat, M. and Ghaderi, A. (2024). Selenium alleviates growth characteristics, plant pigments, photosynthetic and antioxidant capacity of basil (*Ocimum basilicum* L.) under low temperature, *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 58, 103198, <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103198>.
- Rezaei Nik, M., Abbasifar, A. and ValizadehKaji, B. 2022. Improvement of the quantitative and qualitative properties of spinach with the use of selenium and green selenium nanoparticles. *Journal of horticultural plant nutrition*. 4(2)129-144. [DOI: 10.22070/HPN.2022.15335.1158](https://doi.org/10.22070/HPN.2022.15335.1158)
- Rolny, N., Costa, L., Carrión, C. and Guiamet, J. J. (2011). Is the electrolyte leakage assay an unequivocal test of membrane deterioration during leaf senescence? *Plant Physiology and Biochemistry*. 49(10): 1220-1227. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2011.06.010>.
- Saffar Yazdi, A., Lahouti, M. and Ganjeali, A. (2012). The Effects of Different Selenium Concentrations on some Morpho-physiological Characteristics of Spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of horticultural science*. 26(3). 292-300. <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.15211>
- Sairam, R. K. and Srivastava, G. C. (2002). Changes in antioxidant activity in sub-cellular fraction of tolerant and susceptible wheat genotypes in response to long term salt stress. *Plant Science*. 162: 897–904. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00037-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00037-7)
- Samavatipour, P., Abdossi, V., Salehi, R., Samavat, S. and Ladan Moghadam, A. (2019). Effect of selenium and some organic materials on morphophysiological traits and secondary metabolites of dill (*Anethum graveolens* L.). *Agroecology Journal*. 15(4): 57-66. [Doi: 10.22034/aej.2021.682649](https://doi.org/10.22034/aej.2021.682649)
- Shedeed, Shaymaa I., Fawzy, Z. F. and El-Bassiony, A.M. (2018). Nano and mineral selenium foliar application effect on pea plants (*Pisum sativum* L.). *Bioscience Research*. 15(2), 645-654.
- sheikhzadeh, P., Behzad, G., Zare, N. and Rostami, M. (2024). Improvement of photosynthetic and biochemical characteristics and cold tolerance in winter oilseed rape (*Brassica napus* L. Var napus) via selenium nanoparticles application in the rosette stage. *Journal of Crops Improvement*, 26(2), 213-233. [Doi: 10.22059/jci.2022.340264.2692](https://doi.org/10.22059/jci.2022.340264.2692)
- Sher, A., Ul-Allah, S., Sattar, A., Ijaz, M., Ahmad, W., Bibi, Y. and Qayyum, A. (2022). The effect of selenium concentration on the quantitative and qualitative yield of four safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25, 1–7. <http://dx.doi.org/10.3389/fagro.2024.1389045>
- Silva, V. M., Tavanti, R. F. R., Gratão, P. L., Alcock, T. D. and Reis, A. R., (2020). Selenate and selenite affect photosynthetic pigments and ROS scavenging through distinct mechanisms in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) walp) plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 201, 110777. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110777>.
- Singh, S., Kaur, M., Sogi, D. S. and Purewal, S.S. (2019). A comparative study of phytochemicals, antioxidant potential and in-vitro DNA damage protection activity of different oat (*Avena sativa*) cultivars from India. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 13, 347–356.
- Tabatabaie Roodsati, S., Iranbakhsh, A., Shamili, M. and Oraghi Ardabili, Z. (2022). The effect of nano selenium and sodium selenate on biochemical, physiological, and growth parameters of Bell pepper (*Capsicum annum*). *Nova Biologica Reperta*, 9 (4), 296-306. [DOI: 10.24236330.1401.9.4.6.8](https://doi.org/10.24236330.1401.9.4.6.8)
- Thavarajah, D., Abare, A., Mapa, I., Coyne, C. J., Thavarajah, P. and Kumar, S. (2017). Selecting Lentil Accessions for Global Selenium Biofortification. *Plants*, 6(3), 34. <https://doi.org/10.3390/plants6030034>
- Walaa, A. E., Shatlah, M. A., Atteia, M. H. and Srour, H. A., 2010. Selenium induces antioxidant defensive enzymes and promotes tolerance against salinity stress in cucumber seedlings (*Cucumis sativus*). *Arab University Journal of Agricultural Science*. 18, 65–76.

- Wang, H., Zhang, C., Nie, M., Cheng, D., Chen, J., Wang, S., Lv, J., Niu, Y., (2024). Effects of Foliar Application of Nano-Se on Photosynthetic Characteristics and Se Accumulation in *Paeonia Ostii*. *Russian Journal of Plant Physiology*. 71-117. doi.org/10.21203/rs.3.rs-951366/v1
- Wang, Y.D., Wang, X. and Wong, Y.S. (2012). Proteomics analysis reveals multiple regulatory mechanisms in response to selenium in rice. *Journal of Proteomics*. 75, 1849–1866. https://doi.org/10.1016/j.jprot.2011.12.030
- Waterhouse, A.L. (2002). Determination of total phenolics. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*. 3, 18-19. https://doi.org/10.1002/0471142913.fai0101s06
- Wu, M., Cong, X., Li, M., Rao, S., Liu, Y., Guo, J., hu, S., Chen, S. h., Xu, F., Cheng, S. h., Liu, L. and Yu, T. (2020). Effects of different exogenous selenium on Se accumulation, nutrition quality, elements uptake, and antioxidant response in the hyperaccumulation plant *Cardamine violifolia*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 204, 111045. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111045
- Xie, M., Sun, X., Li, P., Shen, X. and Fang, Y. (2021). Selenium in cereals: Insight into species of the element from total amount. *Comprehensive review in food science and food safety*. 20 (3), 2914- 2940. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12748.
- Zahedi, S. M., Sadat Hosseini, M., Daneshvar Hakimi Meybodi, N. and da Silva, J. (2019). Foliar application of selenium and nano-selenium affects pomegranate (*Punica granatum* cv. Malase Saveh) fruit yield and quality. *South African Journal of Botany*. 124, 350-358. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.019
- Zhao, L., Lu, L., Wang, A., Zhang, H., Huang, M., Wu, H., Xing, B., Wang, Z. and Ji, R. (2020). Nano-biotechnology in agriculture, use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(7), 1935-1947. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06615
- Zsiros, O., Nagy, V., Párducz, Á., Nagy, G., Ünneper, R., El-Ramady, H., Prokisch, J., Lisztes-Szabó, Z., Fári, M., Csajbók, J., Tóth, S. Z., Garab, G. and Domokos-Szabolcsy, E. (2019). Effects of selenate and red Se-nanoparticles on the photosynthetic apparatus of *Nicotiana tabacum*. *Photosynth Research*. 139, 449–460. doi.org/10.1007/s11120-018-0599-