J. Crop Prod. Process. 2025, 15(2), 1-18; DOI: 10.47176/jcpp.15.2.38342

Journal of Crop Production and Processing

Journal homepage: https://jcpp.iut.ac.ir/

Original Article

The Effect of Nano Selenium and Sodium Selenate on Growth and Photosynthesis Parameters of Spinach (*Spinacia oleracea* L.) Virofly Variety

Mohammad Qasemi[1], Mansoore Shamili*[2] and Abdolmajid Mirzaalian Dastjerdi[2]

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

Extended Abstract

Introduction: Selenium is an essential element for humans and animals. Seleno-proteins contribute in antioxidant regulation, so the deficit leads to dysfunction of immune system. Plants, the main source of this element for mammals, absorb selenium from the soil. Nanotechnology, as a promising area of biology, has introduced stable particles as fertilizers. Foliar application of nano-selenium in plants has been involved in alternation of photosynthetic pathway and generation of secondary metabolites. Since selenium is one of the useful elements in plants (including spinach) and due to toxic effects of this element under high concentrations, in this study, the effects of bulk or nano forms of selenium were compared on spinach plants. The research aimed to compare foliar spraying of sodium selenate (5, 10 and 20 mg/L) with nano-selenium (5, 10 and 20 mg/L) on growth parameters, photosynthetic indices and selenium content in spinach.

Materials and Methods: The current study was carried out under greenhouse conditions in horticulture department, Hormozgan university, 2022. The experiment was designed as a completely randomized design. The spinach virofly variety was used. The treatments were included foliar spraying of drip irrigation with distilled water (control plants), sodium selenate (5, 10 and 20 mg/L) nano selenium (5, 10 and 20 mg/L). Growth parameters (including leaf number, leaf and root dry matter, plant and root length), photosynthetic indices (including intercellular CO_2, stomatal conductance, photosynthetic rate, transpiration rate, chlorophyll (a,b, total) and carotenoid contents) and selenium content were evaluated. The normality of the data was checked by the Shapiro-Wilk test. Tukey's test was used for mean comparisons ($P < 0.01, 0.05$). The data statistical analysis was perfumed by SAS Ver.9.4. Also, the figures were drawn using EXCEL 2016.

Results and Discussion: Based on the results of analysis of variance, the effect of treatment (nano selenium and sodium selenate) was significant on leaf dry matter, root dry matter, shoot length, root length and leaf number ($P < 0.05$). The effect of treatments was significant on carotenoids ($P < 0.01$), chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll ($P < 0.05$), leaf stomatal conductance, photosynthesis ($P < 0.01$), intracellular CO2 concentration and transpiration ($P < 0.05$). Based on findings, root dry matter, shoot length, leaf number, total and chlorophyll a content, carotenoid, photosynthesis rate, intercellular carbon dioxide, stomatal conductance and leaf Se content improved 25.69, 54.78, 14.99, 23.11 and 8.86, 31.01, 222.39, 40.49, 132.25 and 26.31 %, respectively via enhancing the levels of both treatments, compared to the control. Despite recording the highest amount of leaf dry matter (25.69%), leaf number (30.67), intercellular CO_2 (476.46

Received: Sep. 21, 2024; Revised: Feb. 01, 2025; Accepted: Feb. 02, 2025; Published Online: Jun. 16, 2025.
* Corresponding Author: shamili@ut.ac.ir

Journal of Crop Production and Processing

Journal homepage: https://jcpp.iut.ac.ir/

µmol CO_2/mol) and stomatal conductance (0.072 mol water/m2/s) under 20 mg/L of sodium selenate, the maximum shoot length (21.67 cm), chlorophyll a and total (respectively, 18.11 and 23.95 mg/g FW), carotenoid (6.97 mg/g FW), photosynthesis rate (8.35 µmol $CO_2/m^2/s$) and Se content (0.25 mg/L) were observed under the 20 mg/L of nano-Se. In addition, leaf dry matter also indicated a similar trend. However, the highest leaf dry matter was observed at 10 ppm nano-Se. Finally, despite considering 20 mg/L Se (bulk or nano) as the most effective level in enhancing traits, this level did not show a significant difference with 10 mg/L level. Selenium improves plant growth and development by increasing photosynthesis rate, stomatal conductance, increasing electron transport chain activity, and decreasing transpiration rate. Selenium improves cell division in root tip meristem, but high levels lead to reduced cell division. Nanoparticles move to the roots via apoplast and symplast pathways and are ultimately transported to the leaves and stems via phloem and xylem. Nano selenium promotes plant growth by improving water status and increasing leaf strength. Low concentrations of selenium increase plant growth, possibly by increasing starch content in chloroplasts.

Conclusion: The selenium content of plants can be increased by soil fertilization, foliar application, hydroponic cultivation, aeroponic cultivation, and seed priming in a selenium-containing solution. Data obtained from the effect of selenium compounds on spinach Virofly variety, revealed that high concentrations of selenium in nano form had an ascending impact on shoot and root length, and in the form of sodium selenate on root dry matter and leaf number. The difference in the effect of different levels of treatments on the studied traits shows that each trait appears optimally under certain levels of treatments. The 10 mg/L of nano selenium treatment can be noted as the optimal level for boosting photosynthetic and growth traits of spinach. Nevertheless, the treatment type and optimal dosage require extensive experiments in different studies with diverse plant species.

Keywords: Chlorophyll a, chlorophyll b, Photosynthetic rate, Root dry matter, Selenium, Transpiration rate

How to Cite: Qasemi M., Shamili M., Mirzaalian Dastjerdi A. The Effect of Nano Selenium and Sodium Selenate on Growth and Photosynthesis Parameters of Spinach (*Spinacia oleracea* L.) Virofly Variety. *J. Crop Prod. Process*. 2025, 15(2), 1-18 (*In Persian*). DOI: 10.47176/jcpp.15.2.38342.

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by Isfahan University of Technology press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی، ۱۴۰۴، دوره ۱۵، شماره ۲، صص. ۱۸-۱، DOI: 10.47176/jcpp.15.2.38342

نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی
صفحه خانگی نشریه: https://jcpp.iut.ac.ir/

مقاله پژوهشی

اثر نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر ویژگی‌های رشدی و فتوسنتزی گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) رقم ویروفلای

محمد قاسمی [۱]، منصوره شمیلی [۲*] و عبدالمجید میرزاعلیان دستجردی [۲]

چکیده– گیاهان به‌عنوان بهترین منبع سلنیوم برای انسان‌ها و حیوانات، این عنصر را از خاک جذب و وارد زنجیره‌ی غذایی می‌کنند. نانوذرات سلنیوم، به‌عنوان نانوذرات پایدار، جهت استفاده به‌عنوان کودگیاهی معرفی شده‌اند. در تحقیق حاضر اثرات سلنیوم (به شکل بالک و نانو) بر ویژگی‌های رشدی و فتوسنتزی اسفناج در شرایط گلخانه مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش در قالب طرح کاملا تصادفی اجرا و تیمارها شامل محلول‌پاشی با نانوسلنیوم (۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر)، سلنات‌سدیم (۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) و آب مقطر (گیاهان کنترل) بود. بر اساس یافته‌ها ماده‌خشک ریشه، طول اندام‌هوایی، تعداد برگ، محتوی کلروفیل آ و کل، کاروتنوئید، نرخ فتوسنتز، دی‌اکسیدکربن بین‌سلولی، هدایت روزنه‌ای و محتوی سلنیوم برگ توسط افزایش سطوح هر دو تیمار نسبت به تیمار شاهد (به‌ترتیب۲۵/۷، ۵۴/۷، ۱۴/۹، ۲۳/۱ و ۸/۸۶، ۳۱/۰، ۲۲۲، ۴۰/۵، ۱۳۲ و ۲۶/۳ درصد) افزایش نشان دادند. علی‌رغم ثبت بیشترین میزان ماده‌خشک برگ (۲۵/۷ درصد)، تعداد برگ (۳۰/۷)، دی‌اکسیدکربن بین‌سلولی (۴۷۶ میکرومول دی‌اکسیدکربن در مول)، هدایت‌روزنه‌ای (۰/۰۷ مول آب در مترمربع در ثانیه) و سلینوم (۰/۲۵ میلی‌گرم در لیتر) تحت تیمار ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سدیم‌سلنات، حداکثر طول اندام هوایی (۲۱/۷ سانتی‌متر)، کلروفیل آ و کل (به‌ترتیب ۱۸/۱ و ۲۳/۹۵ میلی‌گرم درگرم وزن‌تازه)، کاروتنوئید (۶/۹۷ میلی‌گرم درگرم وزن‌تازه) و نرخ فتوسنتز (۸/۳۵ میکرومول دی‌اکسیدکربن درمترمربع در ثانیه) تحت تیمار ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم مشاهده شد. علاوه بر این، ماده‌خشک برگ نیز روندی مشابه نشان داد. با این حال، حداکثر ماده‌خشک برگ تحت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم (۱۹/۶ درصد) مشاهده شد. در نهایت، علی رغم مشاهده سطح ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم (بالک یا نانو) به‌عنوان موثرترین سطح در بهبود صفات، این سطح با غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم تفاوت معنی‌داری نشان نداد. لذا می‌توان سطح ۱۰ میلی‌گرم در لیتر این تیمار را به‌عنوان سطح بهینه جهت بهبود صفات فتوسنتزی و رشدی گیاه اسفناج عنوان نمود. با این وجود، نوع تیمار و دوز مصرفی بهینه در پژوهش‌های مختلف با گونه‌های گیاهی متنوع، نیاز به آزمایشات گسترده دارد.

واژه‌های کلیدی: سلنیوم، کلروفیل‌آ، کلروفیل‌ب، ماده خشک ریشه، نرخ تعرق، نرخ فتوسنتز.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴، اولین انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۲۶

۱ و ۲. به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و دانشیار، گروه علوم باغبانی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

*: نویسنده مسئول، رایانامه: shamili@ut.ac.ir

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

فناوری‌نانو، کاربردهای نوپدیدی را در زمینه‌های مختلف علوم، از جمله کشاورزی بوجود آورده است (۳۵). ازجمله کاربردهای وسیع این فناوری در بخش کشاورزی، افزایش تولید محصول، کاهش میزان مصرف کودها و سموم و افزایش مدت زمان نگهدای محصولات تولیدی هستند. نانو تکنولوژی این قابلیت را دارد که با استفاده از ابزارهای جدیدتر، توانمندی گیاهان را برای جذب عناصر و موادغذایی افزایش دهد (٥٤).

سلنیوم یکی از ریزمغذی های فعال در ارگانیسم های زنده است که در خاک های قلیایی موجود است (۲۲). مقدار سلنیوم در خاک‌ها، بسته به منطقه و نوع خاک، اغلب ۰/۱ تا ۰/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است (٤١). اهمیت بیولوژیکی سلنیوم به‌دلیل پیوند قوی آن با فلزات، اتصال کووالانسی با غیر فلزات و پایداری ساختار آن در حالات مختلف اکسیداسیون-احیا است (۲۵). به صورت سلناید (Sodium selenide)، سلنیوم عنصری، سلنایت (Sodium selenite)، سلنات (Sodium selenate)، دی‌میتل سلناید (Dimethyl selenite)، سلنوآمینواسید (Seleno-amino acids (Se-AAs) و سلنوپروتئین‌ها (Seleno protein) یافت شود (۵۸).

سلنیوم عمدتاً به شکل سلنات‌سدیم 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 (۱۲).

نقش سلنیوم در پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاهان شامل فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، افزایش سطح کلروفیل، تعادل مواد معدنی و بهبود مقاومت گیاه به تنش‌ها است (۳۸). همچنین این عنصر در حفظ ساختار و عملکرد سلول، القای رشد (ریشه و شاخساره)، بهبود وضعیت آب در گیاه و آسیمیلاسیون نیتروژن نقش دارد (٤٩). سلنیوم در غلظت های پائین رشد گیاه را تحریک و درغلظت‌های بالا به‌عنوان یک اکسیدان عمل کرده و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد (٤٨). تحقیقات نشان داده بر شبدر سفید غلظت‌های بالا ۲۰ گرم در هکتار (۱۷)، در کاهو میزان ٤ میلی‌گرم در لیتر (۵۰) و در پیاز غلظت‌های بالای ۲ میلی‌گرم در لیتر از سلنات‌سدیم (٦) با بروز علائم سمت در گیاه و کاهش در رشد گیاه همراه بوده است. در تحقیق بر تنباکو نانوسلنیوم (۱۰۰-۵۰ میلی‌گرم در لیتر) بر باززایی ریشه تاثیرگذار بود. درحالی‌که در همین سلنات‌سدیم در همین غلظت تاثیری بازدارنده بر رشد ریشه داشت (۱۹). در مقایسه نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم در گیاه جو نیز نانوسلنیوم بر رشد گیاهچه های برخواسته از بذر، اثربخشی بیشتری داشت (۳۰). در بیشتر مزارع کشاورزی مقادیر ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم سلنیوم (٤) یا مقادیر کمتر (٤-۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) توصیه شده است (۵).

صرف‌نظر از اثرات مفید سلنیوم بر گیاهان، استفاده از این عنصر به‌عنوان کود می‌تواند منجر به ورود آن به زنجیره‌غذایی انسان و پستانداران شود (٦٨). کمبود سلنیوم منجر به اختلالات متابولیک مرتبط با اکسیداتیو مانند سرطان و دیابت می‌شود (٦٥). اگرچه سلنیوم یک ریزمغذی مهم برای انسان و سایر پستانداران است، اما در غلظت های بالا به‌دلیل ایجاد پیوند به جای گوگرد با اسیدهای آمینه، تغییر ساختار پروتئین‌ها و متعاقبا فعالیت آنزیم‌ها ، سمیت ایجا میکند (۸). فرم نانوسلنیوم، به‌علت اندازه کوچک، تخلخل ذرات، مساحت سطح، واکنش‌پذیری و تحرک درون گیاه، مورد توجه قرار گرفته‌است (۱۰). لذا به‌علت فراهمی زیستی بالا و آلودگی زیست محیطی کم، نانو سلنیوم به یک ماده محبوب در تحقیقات تغذیه گیاهان تبدیل شده است (٦٧).

فتوسنتز تعیین‌کننده اصلی رشد و عملکرد گیاهان است و

توانایی گیاه جهت حفظ و بهبود عملکرد فتوسنتز، برای متابولسیم مناسب ضروری است. بدین‌منظور، گیاهان مکانیسم‌های فیزیولوژیک را برای حفظ فشار تورژسانس بافت‌ها و گشودگی روزنه‌ها برای حصول حداکثر کارایی فتوسنتزی اتخاذ می‌کنند (٦۰). بروز تنش از دو مسیر فتوسنتز را در برگ‌ها تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ اول، از طریق بستن روزنه‌ها و کاهش در غلظت دی‌اکسیدکربن در دسترس سلول، دوم: از طریق تأثیر بر اجزای دستگاه فتوسنتزی از جمله رنگدانه های کلروفیل و کاروتنوئید (۱۱). در زمان بروز تنش، میزان هدایت روزنه‌ای کم می‌شود. این کاهش منجر به کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن درون سلولی و نهایتاً، به‌دلیل کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن مورد نیاز جهت کربوکسیلاسیون ریبولوز، باعث کاهش فتوسنتز خالص می‌شود. گیاه در این شرایط، با بستن روزنه‌ها و محدود کردن تعرق، کارایی مصرف آب و نرخ فتوسنتز را بهبود می‌بخشد (۲۱). لذا مطالعه پارامترهای مرتبط با تبادلات گازی (هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق، سرعت فتوسنتز و غلظت دی‌اکسیدکربن درون سلولی) و محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌تواند شدت تنش وارد به گیاه و واکنش گیاه را ارزیابی کند.

طبق مطالعه فاروک و همکاران (۲٤)، کاربرد سلنیوم در ریشه برنج به‌طور قابل‌توجهی باعث افزایش سرعت فتوسنتز و تجمع زیست توده شد. سلنیوم همچنین میزان عناصر ضروری و اسیدهای‌آمینه را بهبود بخشید. در آزمایشی دیگر، ژنوتیپ‌های گلرنگ با تیمار سلنیوم بهبود قابل‌توجهی در ارتفاع بوته، تعداد بوته، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی داشتند و همچنین کیفیت روغن آن افزایش یافت. بیشترین مقدار با محلول‌پاشی ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم به‌دست آمد (٥٥). محلول‌پاشی با سلنیوم توانست به‌طور مؤثر وزن ۱۰۰ جوانه گیاه چای را افزایش داد. وزن ۱۰۰ جوانه به‌تدریج تا غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سلنیوم افزایش و پس از آن کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که با غلظت مناسب تیمار سلنیوم، عملکرد چای ممکن است تا حد زیادی افزایش یابد (۲۹). در آزمایشی میدانی در طول دو سال، کارایی سلنیت‌سدیم، سلنات‌سدیم، نانوذرات اکسیدروی و ترکیب آن‌ها بر برنج ارزیابی شد. همه ترکیبات سلنیوم از نظر سطح کلروفیل، فنول و پروتئین گیاه بهتر از شاهد عمل کردند. همچنین تیمارهای سلنیوم شاخص سطح برگ، سرعت رشد و عملکرد را افزایش داد (۲).

اسفناج (Spinach) با نام علمی (*Spinacia olerace* L.) و متعلق به خانواده‌ی Amaranthaceae می باشد (٤۲). این گیاه یکساله و روز بلند، جزء سبزی‌های برگی مهم فصل سرد (٤۲)، بومی آسیای‌مرکزی و احتمالا ایران بوده است (۳۷). اسفناج سرشار از ویتامین‌ها (گروه ب، آ و ث)، فولیک اسید، موادمعدنی و فیبرهای خوراکی است. در اسفناج آنزیم‌های جنتیوبیاز (Gentiobiose)، سلوبیاز (Cellobiase) و ماده‌ای به نام اسپیناسین (Spinacine) یافت می‌شود که ترشحات مربوط به هاضمه را تحریک می‌کند (۳). با توجه به جدید بودن کاربرد نانوکودها در کشاورزی در کنار نیاز به مطالعه آثار سمیت قبل از مصرف و با توجه به نقش مفید سلنیوم در گیاهان و اثرات سمی و تنش‌زای آن در غلظت‌های بالا، در تحقیق حاضر بررسی اثرات سلنیوم (به دو شکل بالک و نانو) بر خصوصیات رشدی و فتوسنتزی گیاه اسفناج مورد توجه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در سال ۱٤۰۱ در آزمایشگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه هرمزگان به اجرا درآمد. بذر اسفناج هلندی ویروفلای از شرکت فردین کشت تهیه گردید. سلنات‌سدیم (Na_2SeO_3) از شرکت مرک (Merck) تهیه شد. نانوذره سلنیوم (SeNPs) مورد استفاده در این آزمایش از شرکت نانوسانی (NanoSany)، مشهد، ایران، خریداری شد. محدوده اندازه ذرات (Average size) ٤٥– ۱۰ نانومتر، چگالی (Density) ۳/۸۹ گرم بر سانتیمتر مکعب، شکل تقریبا کروی (Spherical)، پتانسیل زتا (Zeta potential)، میانگین

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بستر خاکی مورد استفاده

کربن آلی	نیتروژن کل	فسفر	پتاسیم	روی	آهن	منگنز	مس	pH	هدایت الکتریکی
درصد		میلی‌گرم بر کیلوگرم							دسی‌زیمنس بر متر
۰/۳۵	۰/۰۳	٦/۲۰	٥١٩	۰/۸	۷/۹	٦/١	۰/۹	۷/۸٦	۱/۲۱

زتا و شاخص پراکندگی (Polydispersity index) نانو ذره نیز به‌ترتیب ۳۲/۸، ٤١/۳٥ و ۰/٥٦٥ mV بود.

بستر مورد استفاده برای کاشت بذور، ترکیب خاک باغچه، خاک برگ و ماسه (۱:۱:۱) بود (جدول ۱). گیاهان در دمای متوسط روزانه ۲ ± ۲۷ و دمای متوسط شبانه ۲ ± ٢٤ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۰ درصد کشت شدند. بذور در کرت‌هایی به ابعاد ۰/۸ × ۱ مترمربع (فاصله کرت‌ها ۰/۵ متر) کشت شدند. در هر کرت سه ردیف، به عمق دو سانتی‌متر و با فاصله ۳۰ سانتی‌متر آماده شد که از حاشیه کرت، ۱۰ سانتی‌متر فاصله داشتند. پس از کاشت، آبیاری روزانه به روش قطره‌ای انجام گرفت. پس از سبز شدن بذرها آبیاری به‌طور متوسط هرسه روز یکبار تا مرحله چهار برگی انجام شد و پس از آن هر دو روزیکبار انجام شد. پس از ۳ هفته تنک انجام و در هر کرت ۱۸ بوته با فاصله روی ردیف ۱۵ سانتی‌متر و بین ردیف ۳۰ سانتی‌متر نگه داشته شد. گیاهچه‌های اسفناج کشت‌یافته در گلخانه در مرحله رشد رویشی مورد تیمار قرار گرفتند. تیمارها شامل محلول پاشی با نانو سلنیوم (۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر)، سلنات‌سدیم (۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) و آب مقطر (گیاهان کنترل) بود. مرحله اول اعمال تیمارها، هشت هفته پس از سبز شدن بذور و مرحله دوم ۱۰ روز پس از مرحله اول بود. ده روز پس از محلول‌پاشی دوم، اندازه‌گیری صفات انجام شد (۵۹).

به‌منظور سنجش ماده خشک برگ و ریشه، نمونه‌های برگ و ریشه توزین (ترازوی دیجیتالی ۰/۰۰۱ گرم) شدند. سپس در آون (۷۰ درجه سانتی‌گراد ، ۷۲ ساعت) خشک و سپس مجددا توزین شده و صفت مذکور محاسبه شد. طول اندام هوایی و ریشه نیز با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری و ثبت شد. تعداد برگ نیز شمارش شد.

به‌منظور سنجش کلروفیل (آ، ب، کل) و کاروتنوئید، نیم گرم برگ تازه در ۱۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد و در تاریکی سائیده شد. سپس سانتریفیوژ (۱۰۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۵ دقیقه) و از مایع رویی برای قرائت کلروفیل و کاروتنوئید استفاده شد. جذب عصاره‌ها در سه طول موج ٦٦٣ (A_{663})، ٦٤٥ (A_{645}) و ٤٧٠ (A_{470}) نانومتر توسط اسپکتروفتومتر (CECIL- CE2501) قرائت شد. محتوای کلروفیل (آ، ب و کل) و کاروتنوئید از روابط یک تا چهار محاسبه شد (۹).

$$Chl_a\ (mg\ g^{-1}FW)=(12.25\times A_{663})-(2.79\times A_{645})$$ رابطه (۱)

$$Chl_b\ (mg\ g^{-1}FW)=(21.21\times A_{645})-(5.1\times A_{663})$$ رابطه (۲)

$$Chl_{total}\ (mg\ g^{-1}FW)=(20.21\times A_{645})+(8.02\times A_{663})$$ رابطه (۳)

$$Carotenoids\ (mg\ g^{-1}FW)=((1000\times A_{470})-(1.8\times Chl_a)-(85.02\times Chl_b))/198$$ رابطه (٤)

که در آنها chl_a، chl_b ، chl_{total} و Carotenoids به‌ترتیب معادل کلروفیل‌آ، کلروفیل‌ب ، کلروفیل‌کل و کاروتنوئیدها بودند.

اندازه‌گیری شاخص‌های فتوسنتزی برگ (غلظت دی‌اکسیدکربن بین سلولی میکرومول دی‌اکسیدکربن در مول)، نرخ تعرق (میلی‌مول آب در مترمربع در ثانیه) هدایت روزنه‌ای (مول آب در مترمربع در ثانیه) و نرخ فتوسنتز (میکرومول دی‌اکسیدکربن در مترمربع در ثانیه) در ۵ بوته که به‌طور تصادفی از هرکرت

جدول ۲. تجزیه واریانس تیمارهای اعمال شده بر مشخصه‌های رشدی در اسفناج رقم ویروفلای

		میانگین مربعات				
منابع تغییرات	درجه آزادی	ماده خشک برگ	ماده خشک ریشه	طول اندام هوایی	طول ریشه	تعداد برگ
تیمار	٦	٤٠/١*	٧/٥٣*	١٢/٦*	١١/٠٢*	٣٤/٤*
خطا	١٤	١٠/٣	٢/٦١	٤/٦٥	٥/٤١	٣/١٩
ضریب تغییرات		٢٣/٢	١٣/٦	٢١/٧	٢١/٦	٢٣/٢

*: معنی‌دار در سطح احتمال ٥ درصد

انتخاب شـــده بودند توســـط دســـتگاه فتوســـنتزمتر مدل (ADC BioScientific Ltd, uk) در گلخانه انجام شد (۲۳).

سنجش عنصر سلنیوم در برگ

نمونه‌های برگ شسته، برش‌های نازک زده و به مدت ۱ هفته در مجاورت هوا خشک شد. سپس، نمونه‌ها در آون (٤٥ درجه سانتی‌گراد، ۲ ساعت) خشک و پس از آن توسط آسیاب‌برقی پودر شدند. درادامه، به‌منظور هضم اسیدی، نیم گرم از هر نمونه به‌طور جداگانه توزین و به آن ۱۲/٥ میلی‌لیتر اسیدنیتریک غلیظ اضافه شد. مخلوط حاصل به مدت ۲ ساعت در دمای آزمایشگاه انکوبه شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت در دمای ٦۰ درجه سانتی‌گراد بر روی دستگاه گرمکن مجهز به همزن حرارت داده شد تا محلول شفافی حاصل شود. بعد از سرد شدن و عبور از کاغذ صافی واتمن (۰/٦٥ میکرومتر)، محلول زیر صافی با آب دوبار تقطیر به حجم ٥۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سنجش عنصر سلنیوم توسط دستگاه طیف‌سنجی نشری پلاسمای جفت‌شده القایی (Inductively Coupled Plasma- Optical Emission Spectrometry ICP-OES) (سری ۷۰۰ ساخت شرکت Agilent آمریکا) انجام و مقدار آن بر حسب پی‌پی‌ام گزارش شد (١٦).

واکاوی آماری داده‌ها

آزمایش در قالب طرح کاملا تصادفی در سه تکرار اجرا شد. فاکتورها شامل محلول‌پاشی با نانو سلنیوم (٥، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر)، سلنات‌سدیم (٥، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) و آب مقطر (گیاهان کنترل) بود. نرمال بودن داده‌ها با روش Shapiro-Wilk صورت گرفت. آزمون توکی برای مقایسه میانگین ($P < 0.01, 0.05$) انجام شد. آنالیز آماری داده‌ها با نرم افزار SAS Ver.9.4 انجام شد. همچنین نمودارها با کمک برنامه EXCEL 2016 ترسیم شدند.

نتایج

براساس نتایج تجزیه واریانس اثر تیمار (نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم) بر ماده خشک برگ، ماده خشک ریشه، طول اندام هوایی، طول ریشه و تعداد برگ ($P < 0.05$) معنی‌دار شد (جدول ۲). اثر تیمارها بر کاروتنوئید ($P < 0.01$)، کلروفیل‌آ، کلروفیل‌ب، کلروفیل‌کل ($P < 0.05$)، هدایت روزنه‌ای برگ، فتوسنتز ($P < 0.01$)، غلظت CO_2 بین سلولی و تعرق ($P < 0.05$) معنی‌دار شد (جدول ۳).

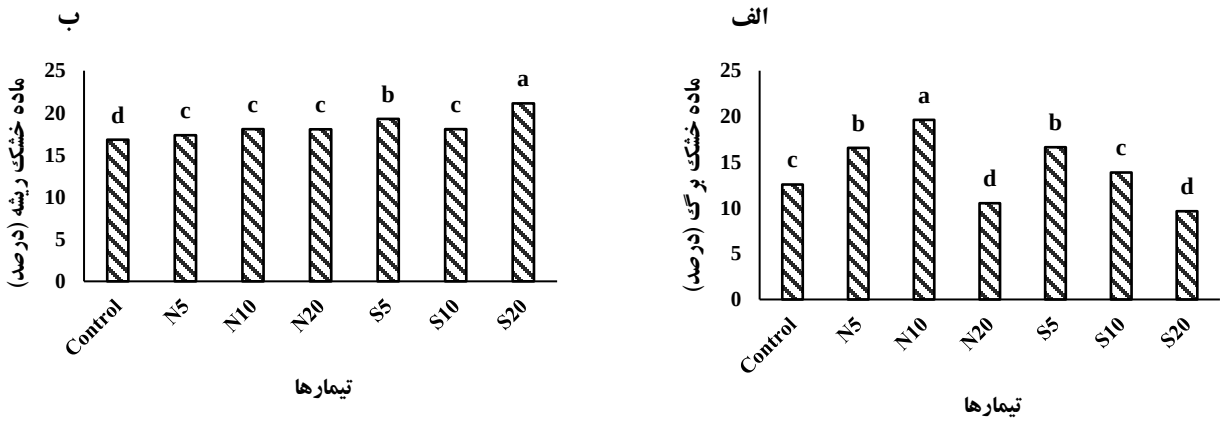
ماده خشک برگ و ریشه

سطوح پائین تیمارهای سلنیوم، با افزایش در ماده خشک برگ و ســـطوح بالاتر، با کاهش این صـــفت همراه بودند. گیاهان تیمار شـــده با نانوســـلنیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر، نســـبت به تیمار شـــاهد، ٥٦/۲ درصد افزایش در ماده خشک برگ را نشان دادند و بیشترین درصد ماده خشک برگ (۱۹/٦ درصد) متعلق به تیمار مذکور بود.

جدول ۳. تجزیه واریانس تیمارهای اعمال شده بر رنگدانه‌های فتوسنتزی و مشخصه‌های فتوسنتزی گیاه اسفناج رقم ویروفلای

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل آ	کلروفیل ب	کلروفیل کل	کاروتنوئید	غلظت CO_2 درونی	نرخ تعرق	هدایت روزنه ای	نرخ فتوسنتز
		میانگین مربعات							
تیمار	٦	١٠/١*	٨/٠*	٢٠/٣*	٢/٥**	٥٦٩٦٤*	١/٠٠*	٠/٠٠٠٥**	٢٣/٩**
خطا	١٤	٧/٩	١/٦	١٧/١	١/٨	٢٢٩٠	٠/٠٢	٠/٠٠٠٠٠٤	٠/٧
ضریب تغییرات		١٦/٧	٢٠/٠	١٩/٧	٢٤/١	٩/٥١	١٠/٦٤	٧/٦١	١٣/٢

**** و *: به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد**



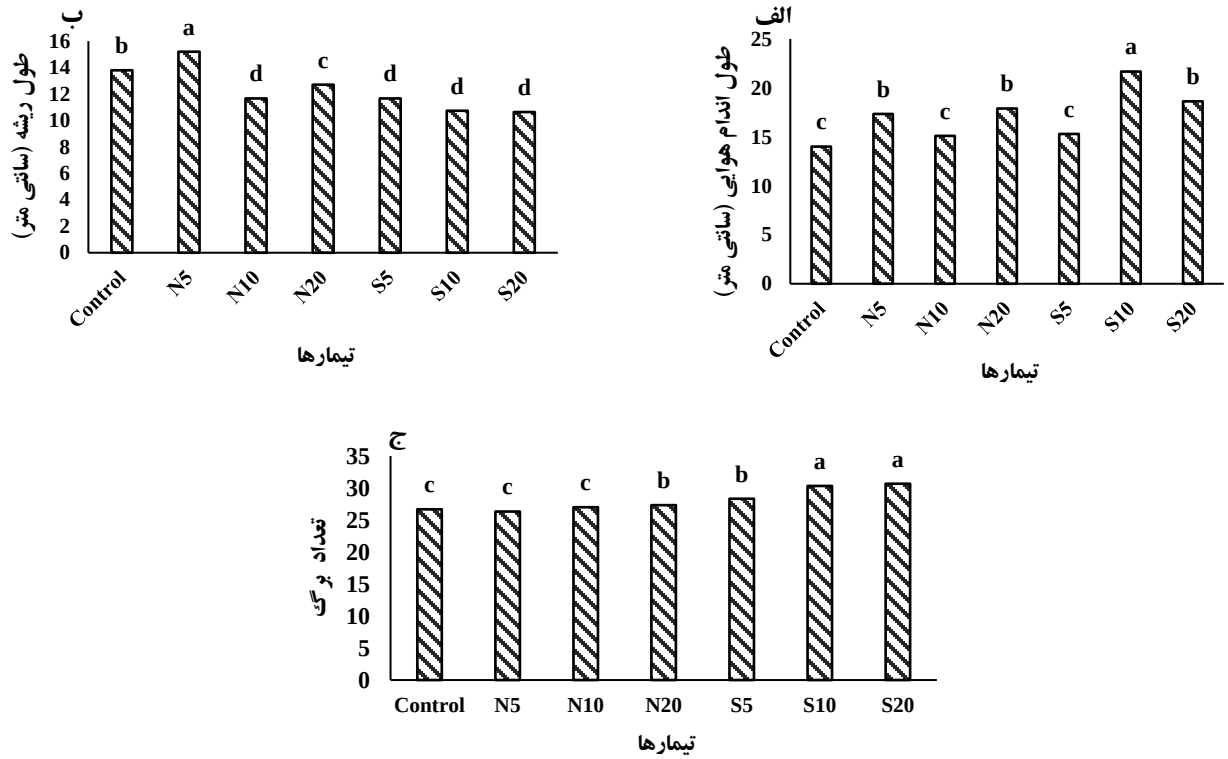
شکل ۱. اثر تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر ماده خشک برگ (الف) و ریشه (ب) در اسفناج رقم ویروفلای.

Control، N5، N10،N20، S5،S10 و S20 به‌ترتیب معرف تیمارهای کنترل، نانوسلنیوم ۵، ۱۰، ۲۰، سلنات‌سدیم ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.05$) است.

با این حال، اعمال تیمار ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، موجب کاهش ١٦/٣ درصدی این صفت شد. همچنین سطوح ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر سلنات‌سدیم به‌ترتیب موجب افزایش ۳۲/۵ و ۱۰/۵ درصدی در ماده خشک برگ شدند. در مقابل، کمترین میزان این صفت (٩/٦٤ درصد) در گیاهان تیمار شده با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر از سلنات‌سدیم (با کاهش ۲۳/۲ درصدی نسبت به تیمار شاهد) حاصل شد (شکل ۱ الف). نتایج حاکی از آن بود که ماده خشک ریشه اسفناج در تیمار با ترکیبات سلنیوم افزایش می‌یابد. بیشترین ماده خشک ریشه در تیمار سلنات‌سدیم (۲۰ میلی‌گرم در لیتر) با ۲۵/۷ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد، مشاهده شد. کمترین میزان نیز (١٦/٨ درصد) به گیاهان تیمار شاهد تعلق داشت (شکل ۱ ب).

طول اندام هوایی، طول ریشه و تعداد برگ

تیمار با هر دو ترکیب سلنیوم باعث افزایش طول اندام هوایی در گیاه اسفناج شد. بیشترین افزایش در بالاترین سطح نانوسلنیوم و



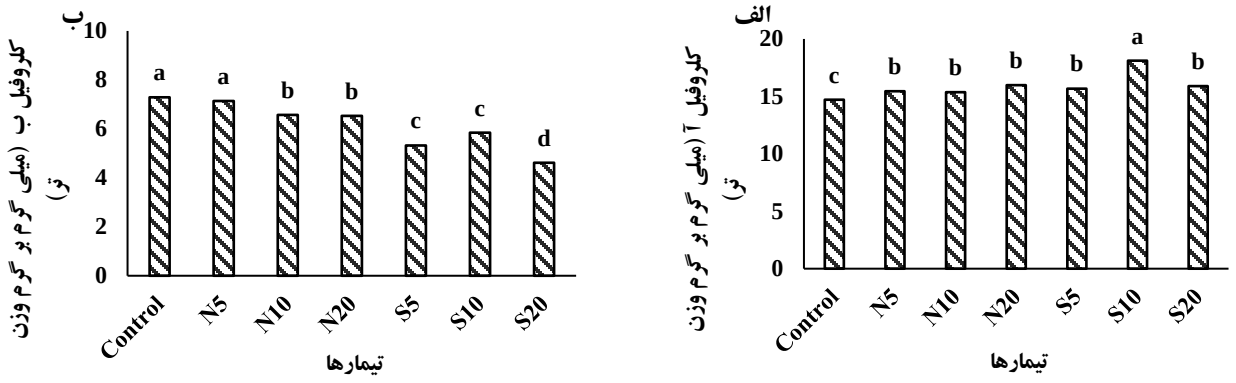
شکل ۲. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر طول اندام هوایی (الف)، طول ریشه (ب) و تعداد برگ (ج) در اسفناج رقم ویروفلای

Control، N5، N10،N20، S5،S10 و S20 به‌ترتیب معرف تیمارهای کنترل، نانوسلنیوم ۵، ۱۰، ۲۰، سلنات‌سدیم ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.05$) است.

سلنات‌سدیم (به‌ترتیب ٥٤/٨ و ۳۳/۱ درصد افزایش نسبت به شاهد) به‌دست آمد. بیشترین و کمترین میزان طول اندام هوایی به‌ترتیب در گیاهان تیمار شده با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم (۲۱/۷ سانتی‌متر) و تیمار شاهد (١٤ سانتی‌متر) مشاهده شد (شکل ۲ الف). بیشترین طول ریشه (۱۵/۲ سانتی‌متر) در تیمار گیاهان اسفناج با ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم (با افزایش ۱۰/۱ درصدی نسبت به تیمار شاهد)، حاصل شد. در مقابل، افزایش سطوح نانوسلنیوم تا ۲۰ میلی‌گرم در لیتر موجب کاهش ۲۲/۲ درصدی طول ریشه، نسبت به تیمار شاهد، شد. علاوه بر این، افزایش غلظت‌های سلنات‌سدیم از ۵ تا ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نیز موجب کاهش طول ریشه، نسبت به تیمار شاهد، شد. به‌طوریکه کمترین طول ریشه (١٠/٦ سانتی‌متر) در گیاهان تیمار شده با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر از سلنات‌سدیم مشاهده شد (شکل ۲ ب). تیمارهای اعمال شده باعث روندی افزایشی در تعداد برگ اسفناج نسبت به تیمار شاهد شد. بیشترین تعداد برگ (۳۰/۷) در گیاهان تیمار شده با سلنات‌سدیم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر (افزایش ١٤/٩ درصدی نسبت به شاهد) مشاهده شد (شکل ۲ ج).

محتوای کلروفیل (آ، ب و کل) و کاروتنوئید

با توجه به نتایج، محتوی کلروفیل‌آ در اسفناج در پاسخ به تیمارهای سلنیوم افزایش یافت. افزایش۲۳/۱ و ۸/۰۲ درصدی در محتوی کلروفیل‌آ، به‌ترتیب در بالاترین سطوح نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم



شکل ۳. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر کلروفیل‌آ (الف) و کلروفیل‌ب (ب) در اسفناج رقم ویروفلای

Control، N5، N10،N20، S5،S10 و S20 به‌ترتیب معرف تیمارهای کنترل، نانوسلنیوم ۵، ۱۰، ۲۰، سلنات‌سدیم ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.05$) است.

حاصل شد. کمترین محتوای کلروفیل‌آ به تیمار شاهد (۱٤/۷ میلی‌گرم در گرم وزن تازه) و بیشترین مقدار آن به تیمار ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم (۱۸/۱ میلی‌گرم در گرم وزن تازه) تعلق داشت (شکل ۳ الف). با توجه به یافته‌ها، محتوای کلروفیل‌ب، اما، در پاسخ به تیمارهای به کار رفته کاهش یافت. کاهشی ۱۹/۹ و ۳٦/٦ درصدی (نسبت به تیمار شاهد) در محتوای کلروفیل‌ب در بالاترین سطح از تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم یافت شد. تیمار شاهد حاوی بیشترین محتوای کلروفیل‌ب (۷/۳ میلی‌گرم در گرم وزن تازه) و تیمار ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سلنات‌سدیم حاوی کمترین میزان این رنگدانه (٤/٦۲ میلی‌گرم در گرم وزن تازه) بود (شکل ۳ ب).

محتوای کلروفیل‌کل روندی افزایشی نشان داد. با افزایش سطوح نانوسلنیوم تا ۲۰ میلی‌گرم در لیتر، ۸/۸٦ درصد افزایش در محتوای این رنگدانه، نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد. بیشترین محتوای کلروفیل‌کل (۲۳/۹ میلی‌گرم در گرم وزن تازه) متعلق به همین تیمار بود. در مقابل، با رسیدن میزان تیمار سلنات‌سدیم به ۲۰ میلی‌گرم در لیتر، یک کاهش ٦/۷۷ درصدی در محتوای کلروفیل‌کل حاصل شد و کمترین میزان کلروفیل‌کل (۲۰/۵ میلی‌گرم در گرم وزن تازه) در این تیمار ثبت شد (شکل ٤ الف).

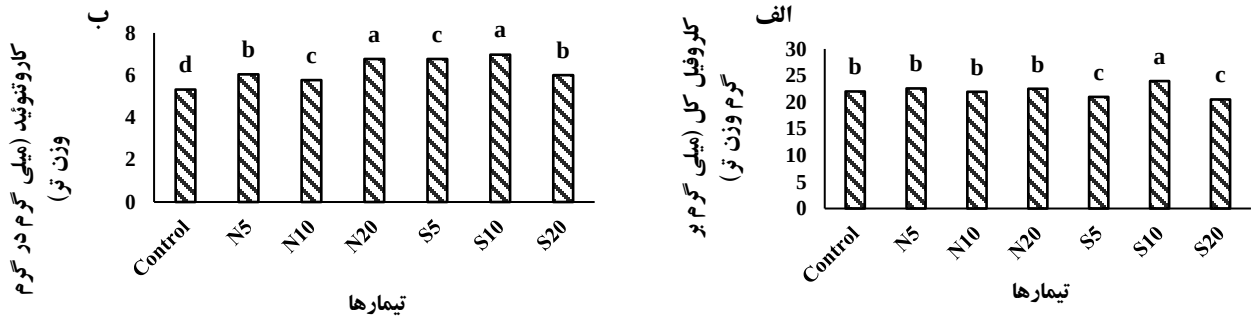
با توجه به نتایج، کاروتنوئید برگ اسفناج در پاسخ به تیمارهای اعمال شده افزایش یافت و با رسیدن نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم به بالاترین سطح خود، ۳۱/۰ و ۱۲/۸ درصد نسبت به تیمار شاهد، افزایش یافت. بیشترین (٦/۹۷ میلی‌گرم در گرم وزن تازه) و کمترین (۵/۳۲ میلی‌گرم در گرم وزن تازه) محتوای کاروتنوئید برگ به‌ترتیب در گیاهان تیمار شده با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و تیمار شاهد بدست آمد (شکل ٤ ب).

نرخ تعرق

نتایج حاکی از کاهش نرخ تعرق در پاسخ به تیمارهای به کار رفته بود و کاهشی ٤۸/۷ و ۵۲/۵۸ درصدی (نسبت به تیمار شاهد) در نرخ تعرق در بالاترین سطح از نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم مشاهده شد. کمترین نرخ تعرق (۱/۱۰ میلی‌مول آب در مترمربع در ثانیه) تحت تیمار ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سلنات‌سدیم و بیشترین مقدار (۲/۳۲ میلی‌مول آب در مترمربع در ثانیه) در تیمار شاهد ثبت شد (شکل ۵ الف).

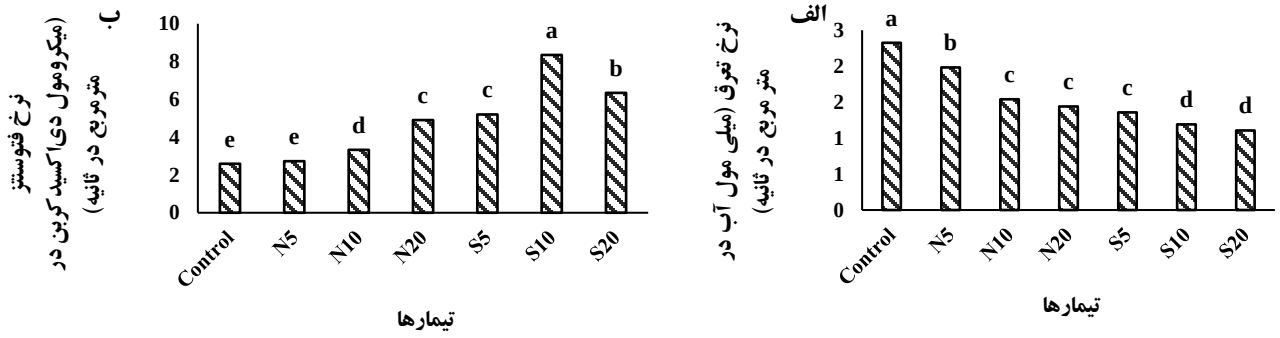
نرخ فتوسنتز

نتایج نشان داد که با افزایش سطوح هر دو تیمار نانوسلنیوم و



شکل ٤. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر کلروفیل‌کل (الف) و کاروتنوئید (ب) در اسفناج رقم ویروفلای

Control، N5، N10، N20، S5، S10 و S20 به‌ترتیب معرف تیمارهای کنترل، نانوسلنیوم ۵، ۱۰، ۲۰، سلنات‌سدیم ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.05$) است.



شکل ۵. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر نرخ تعرق (الف) و نرخ فتوسنتز (ب) در اسفناج رقم ویروفلای

Control، N5، N10، N20، S5، S10 و S20 به‌ترتیب معرف تیمارهای کنترل، نانوسلنیوم ۵، ۱۰، ۲۰، سلنات‌سدیم ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.05$) است.

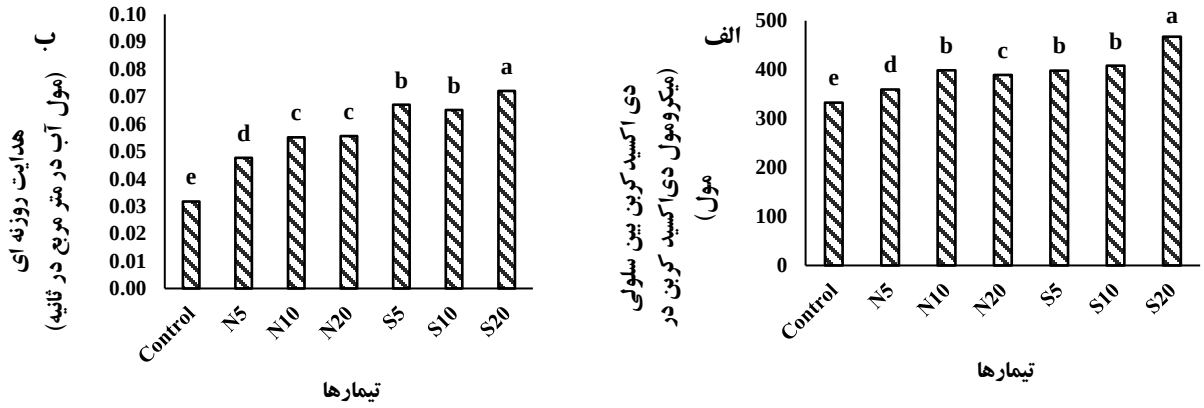
سلنات‌سدیم، نرخ فتوسنتز برگ افزایش می‌یابد که این افزایش به ترتیب ۲۲۲ و ۱٤٤ درصد بیشتر از تیمار شاهد، بود. کمترین نرخ فتوسنتز (۲/۵۹ میکرومول دی‌اکسیدکربن در مترمربع در ثانیه) تحت تیمار شاهد و بیشترین میزان (۸/۳۵ میکرومول دی‌اکسید کربن در مترمربع در ثانیه) تحت تیمار ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم به‌دست آمد (شکل ۵ ب).

دی اکسید کربن بین سلولی

با توجه به یافته‌ها، تیمار گیاهان اسفناج با ترکیبات حاوی سلنیوم، با افزایش دی اکسید کربن بین سلولی همراه بود. در سطوح بالای نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم، به‌ترتیب ۳۰/۱ و ٤۰/۵ درصد افزایش، در این مشخصه ثبت شد. به‌طوریکه بیشترین (٤۷٦ میکرومول دی‌اکسیدکربن در مول) و کمترین (۳۳۲ میکرومول دی‌اکسیدکربن در مول) میزان صفت مذکور به‌ترتیب در تیمار ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سلنات‌سدیم و تیمار شاهد مشاهده شد (شکل ٦ الف).

هدایت روزنه‌ای

نتایج مربوط به تغییرات هدایت روزنه ای برگ اسفناج، روندی



شکل ٦. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر دی اکسید کربن بین سلولی (لف) و هدایت روزنه‌ای (ب) در اسفناج رقم ویروفلای

Control، N5، N10،N20، S5،S10 و S20 به‌ترتیب معرف تیمارهای کنترل، نانوسلنیوم ۵، ۱۰، ۲۰، سلنات‌سدیم ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.05$) است.

افزایشی در پاسخ به تیمارهای اعمال شده نشان داد. هدایت روزنه‌ای در بالاترین سطح نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم ، به‌ترتیب ۱۰۹ و ۱۳۲ درصد نسبت به تیمار شاهد، افزایش ایجاد کردند. به‌طوری‌که تیمار شاهد کمترین (۰/۰۳ مول آب در مترمربع در ثانیه) و تیمار ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سلنات‌سدیم بیشترین (۰/۰۷ مول آب در مترمربع در ثانیه) میزان هدایت روزنه‌ای را به خود اختصاص دادند (شکل ٦ ب).

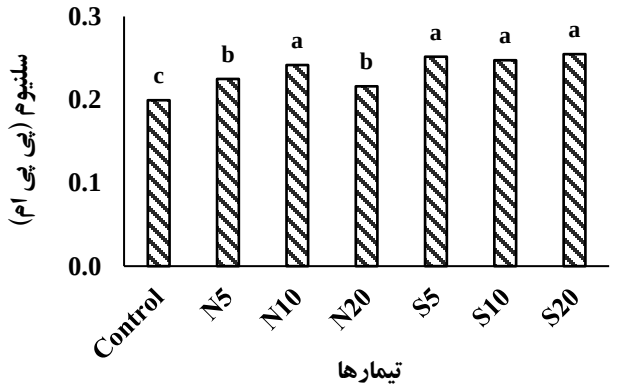
محتوای سلنیوم

نتایج مربوط به محتوای سلنیوم برگ، حاکی از افزایش ۲٦/۳ درصدی این صفت نسبت به تیمار شاهد، در تیمار نانوسلینوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر بود. با اینکه کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلینوم نیز موجب افزایش سلنیوم برگ نسبت به تیمار شاهد شد، اما این افزایش، ۱۵/۸ درصد از سطح ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم کمتر بود. تحت سطوح مختلف سلنات‌سدیم نیز افزایش میزان سلنیوم مشاهده شد. بیشترین محتوای سلنیوم (۰/۲۵ میلی‌گرم در لیتر) در گیاهان تیمار شده با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سلنات‌سدیم و کمترین مقدار آن (۰/۱۹ میلی‌گرم در لیتر) در گیاهان تیمار شاهد به‌دست آمد (شکل ۷).

بحث

محتوای سلنیوم گیاهان می‌تواند توسط کوددهی خاکی، کاربرد برگی، کشت هیدروپونیک، کشت آئروپونیک و پرایمینگ بذر در یک محلول حاوی سلنیوم افزایش یابد (١٤). جذب سلنیوم توسط گیاهان و کارایی بیولوژیکی آن به‌طور نزدیکی با روش کاربرد خارجی سلنیوم، وضعیت کود حاوی سلنیوم، خصوصیات خاک و گونه گیاه مرتبط است (٦٤). کاربرد برگی سلنیوم موجب افزایش قابل‌توجه محتوای سلنیوم در شاهی (۳۹) و اسفناج (٤٥) شده است که با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق مطابقت دارد.

سلنیوم رشد و نمو گیاه را از طریق افزایش در نرخ فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، افزایش فعالیت زنجیره انتقال الکترون و کاهش در نرخ تعرق بهبود می‌بخشد (٣٤). سلنیوم، تقسیم سلولی را در سلول‌های مریستمی نوک ریشه بهبود می‌بخشد، اما سطوح بالای آن منجر به کاهش تقسیم سلولی در این سلول‌ها می‌شود (٤٠). نانو ذرات از طریق مسیرهای آپوپلاستی و سیمپلاستی به سمت ریشه حرکت و در نهایت از طریق آوند آبکش و چوب به برگ‌ها و



شکل ۷. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر محتوای سلنیوم برگ اسفناج رقم ویروفلای

Control، N5، N10،N20، S5،S10 و S20 به‌ترتیب معرف تیمارهای کنترل، نانوسلنیوم ۵، ۱۰، ۲۰، سلنات‌سدیم ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.05$) است.

ساقه‌ها منتقل می‌شوند (٦٣). نانوسلنیوم رشد گیاهان را توسط بهبود وضعیت آبی و افزایش استحکام برگ ارتقا می‌بخشد (۳۲). سلنات‌سدیم موجب افزایش وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه در گیاه نعنا فلفلی شده است (۳۱). محلول پاشی برگی با نانوذرات سلنیوم تعداد برگ و وزن تر ساقه را را در گیاه نخود افزایش داده است (۲۰). مقایسه تغییرات گوجه فرنگی گلخانه‌ای تیمار شده با سلنیوم عنصری و نانوسلنیوم آشکار ساخت که سلنیوم عنصری بیشتر بر صفات رویشی، و نانوسلنیوم بیشتر بر تغییرات فتوسنتزی و آنتی‌اکسیدانی این گیاه تاثیرگذار بود (۱). بر اساس یافته‌های این تحقیق، تیمار با ترکیبات حاوی سلنیوم باعث افزایش ماده خشک برگ در اسفناج شد. غلظت‌های پایین سلنیوم، احتمالاً از راه افزایش میزان نشاسته در کلروپلاست‌ها، رشد گیاه را افزایش می‌دهد (۲۸). البته یافته‌ها در گیاه اسفناج (۳٦) نشان داد که غلظت‌های بالای سلنیوم باعث کاهش ماده خشک برگ می‌شود که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. این کاهش زیست‌توده گیاه می‌تواند به‌دلیل اختلال در تنفس و جذب آب توسط گیاه باشد (۳٤).

کلروفیل از اجزای اصلی کلروپلاست در فرآیند فتوسنتز است، لذا میزان نسبی کلروفیل، همبستگی مثبتی با نرخ سرعت فتوسنتز دارد. پرتوهای فعال فتوسنتزی در گیاه، توسط کلروفیل و سایر رنگدانه‌های مجموعه کلروفیل- پروتئین جذب می‌شوند و سپس به مرکز واکنش فتوسیستم II منتقل و تبدیل کوانتومی فرآیندهای فتوسنتزی رخ می‌دهد . افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز و تجزیه مولکول‌های کلروفیل، از جمله مهمترین عامل کاهش میزان کلروفیل در شرایط تنش هستند. کاروتنوئیدها نقش اساسی در کمک به گیاهان برای ایجاد مقاومت در برابر شرایط تنش را دارند. هنگامی‌که گیاه با شرایط تنش مواجه می‌شود، تعادل بین دو مرحله زنجیره انتقال الکترونی و آسیمیلاسیون دی‌اکسیدکربن به هم میخورد؛ درنتیجه انرژی مازاد باعث ایجاد گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود گیاه برای مقابله با این گونه‌های فعال، مجهز دو سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی است. کاروتنوئیدها، از اجزای غیرآنزیمی سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه، می‌توانند کلروفیل‌ها و سایر اجزای ساختار فتوسنتزی را در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن حفظ کنند (۱۳). براساس نتایج این پژوهش، کاربرد سلنیوم، موجب افزایش کلروفیل‌آ، کلروفیل‌کل و کاروتنوئید شد. کاربرد برگی سلنیوم (عنصری و نانو) موجب افزایش رنگدانه های فتوسنتزی در یونجه (۵۷) و کلزا (۵۱) شده که همسو با یافته های این تحقیق است. سلنیوم می‌تواند بیوسنتز کلروفیل را با کنترلِ بیوسنتز پورفیرین، تنظیم برهم‌کنش بین ۵- آمینو لِوُلینیک اسید

دهیدراتاز (5-aminolevulinic acid dehydratase) حاوی سولفیدریل و پورفوبیلینوژن دآمیناز (Porphobilinogen deaminase)، جلوگیری از تجزیه کلروفیل، جاروب کردن رادیکال های آزاد و در نهایت حفاظت کلروفیل از آسیب اکسیداتیو افزایش دهد (٦٥ و ٦٩). افزایش در محتوای کاروتنوئید تحت غلظت‌های بالای نانوذرات سلینوم نشان‌دهنده این است که کاروتنوئید آنتی-اکسیدانی کارآمد است که رادیکال های پراُکسیل و گونه‌های فعال اکسیژن را جاروب نموده و اجزای فتوسنتزی را در برابر اکسیداسیون نوری محافظت می‌کند (٦٢). همچنین همسو با تحقیقات ما، سلنات‌سدیم در غلظت‌های بالا منجر به کاهش محتوای کلروفیل‌ب در تنباکو شده (٧٠) که ناشی از تاثیر سلنیوم بر سنتز پورفوبیلینوژن مورد نیاز برای بیوسنتز کلروفیل‌ب است (٥٢).

اولین پاسخ اغلب گیاهان در هنگام وقوع تنش، بستن روزنه‌ها برای کاهش تعرق است. این امر منجر به کاهش سرعت فتوسنتز و غلظت دی‌اکسیدکربن درون سلولی می‌شود. کاهش دسترسی به دی‌اکسیدکربن در کلروپلاست، کاهش ظرفیت فتوسنتزی را به همراه دارد. این کاهش، به‌دلیل محدودیت‌های روزنه‌ای (ناشی از افت هدایت روزنه‌ای بر اثر بسته شدن روزنه‌ها) و محدودیت‌های غیر روزنه‌ای (مجموعه فرآیندهای درونی برگ که در تثبیت دی‌اکسیدکربن نقش دارند مانند محتوای کلروفیل برگ، فعالیت آنزیم رابیسکو و سایر آنزیم‌های فتوسنتزی و پروسه‌های بیوشیمیایی مرتبط با غشای کلروپلاست که با عنوان هدایت مزوفیلی در نظر گرفته می‌شوند) رخ می‌دهد (٢٦). تنش با کاهش نفوذ روزنه‌ای، هم هدایت روزنه‌ای و هم هدایت مزوفیلی را کاهش می‌دهد سلول‌های نگهبان روزنه در اپیدرم برگ گیاه، قادر به ایجاد تعادل بین ورود دی‌اکسیدکربن فتوسنتزی و خروج آب از طریق فرآیند تعرق هستند. تنش‌ها، معمولا با افزایش تولیدآبسیزیک اسید، باعث رها شدن آنیون‌ها و پتاسیم از کانال‌های یونی غشای پلاسمایی سلول‌های نگهبان، کاهش فشار تورژسانس سلول‌ها و در نهایت بسته شدن روزنه‌های گیاه می‌شوند (٤٦). براساس یافته‌های این پژوهش، سلنیوم موجب افزایش غلظت CO_2 بین سلولی، هدایت روزنه‌ای برگ و فتوسنتز و کاهش تعرق شد. اثربخشی سلنیوم در بهبود عملکرد فتوسنتز در تربچه (٧) مشهود بوده است. سلنیوم در غلظت های بهینه، رشد ونمو گیاه را از طریق افزایش تجمع قندها و نشاسته، تغییر در ویژگی‌های آناتومیک برگ و درنهایت افزایش کارایی فتوسنتز افزایش می‌دهد (٥٣ و ٥٦). احتمالا سلنیوم با افزایش اندازه فضای بین سلولی در مزوفیل، منجر به افزایش ضخامت برگ و زیست توده خشک می‌شود. درنتیجه سلنیوم با افزایش CO_2 بین سلولی، فتوسنتز خالص را بهبود می‌بخشد (٦١). علاوه بر این، سلنیوم می‌تواند هدایت روزنه‌ای را افزایش داده و ورود اکسیژن را تسهیل بخشد و این فرایند را تسریع کند (٣٣). کاربرد برگی سلنیوم از طریق حفظ تورژسانس و افزایش ویژگی‌های تبادل گاز و کارایی دستگاه آنتی‌اکسیدانی با کاهش در نرخ تعرق همراه بوده است (٤٧). البته غلظت‌های بالای سلنیوم موجب اختلال در عملکرد سیستم های فتوسنتزی می‌شود (٢٧). محلول‌پاشی با سلنیوم در گندم هدایت روزنه‌ای، شاخص پایداری غشاء و محتوای نسبی آب برگ را افزایش داده است (١٨). افزایش در کارایی مصرف آب در کلزا (٤٤) تحت تیمار سلنیوم مشاهده شده است. تیمار با سلنیوم، CO_2 بین سلولی برگ را در گل صد-تومانی (٦٢) را افزایش داده است. کاهش تعرق در گیاهان اسفناج کشت شده احتمالا به‌دلیل بالا بودن رطوبت نسبی گلخانه رخ داده است. از آنجا که در گلخانه‌ای با رطوبت نسبی بالا، گیاهان نیاز کمتری به از دست دادن آب از طریق تعرق دارند، بنابراین، گیاهان می‌توانند با باز نگه داشتن روزنه‌ها، بدون اینکه کمبود آب را تجربه کنند ،به جذب دی اکسید کربن ادامه دهند (١٥ و ٤٣).

نتیجه گیری کلی

اطلاعات حاصل از این پژوهش حاکی از اثرات مثبت سطوح بالای نانو سلنیوم بر صفات طول اندام هوایی، کلروفیلآ و کل، کاروتنوئید،

نرخ فتوسنتز و سلنات‌سدیم بر تعداد برگ، ماده خشک ریشه، دی‌اکسیدکربن بین سلولی، هدایت روزنه‌ای و محتوای سلنیوم برگ بود. در مقابل، طول ریشه، ماده خشک برگ و محتوی کلروفیل‌ب تنها تحت تاثیر مثبت سطوح پایین نانوسلنیوم قرار گرفتند. در مقابل سطوح بالای نانوسلنیوم اثر منفی بر روند نرخ تعرق داشت. به‌طور کلی صفات مورد بررسی تحت غلظت‌های مختلف ترکیبات سلنیوم، روندهای متفاوتی نشان دادند. در نهایت، علی رغم مشاهده سطح ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم (بالک یا نانو) به‌عنوان موثرترین سطح در بهبود صفات، این سطح با غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم تفاوت معنی‌داری نشان نداد. لذا می‌توان سطح ۱۰ میلی‌گرم در لیتر این تیمار را به‌عنوان سطح بهینه جهت بهبود صفات فتوسنتزی و رشدی گیاه اسفناج عنوان نمود. با این وجود، نوع تیمار و دوز مصرفی بهینه در پژوهش‌های مختلف با گونه‌های گیاهی متنوع، نیاز به آزمایشات گسترده دارد.

تشکر و قدردانی

از معاونت پژوهشی دانشگاه هرمزگان (حمایت مالی) و آزمایشگاه مرکزی دانشگاه هرمزگان (فراهم آوردن امکانات) سپاسگزاری می‌شود.

منابع

1. Abulghasemi, R. and M. Haghighi. 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.
2. Adhikary, S., B. Biswas, D. Chakraborty, J. Timsina, S. Pal, J. Chandra Tarafdar, S. Banerjee, A. Hossain and S. Roy. 2022. Seed priming with selenium and zinc nanoparticles modifies germination, growth, and yield of direct-seeded rice (*Oryza sativa* L.). *Scientific Reports* 12: 7103.
3. Aisha, H. A., M. M. Hafez, R. M. Asmaa and M. R. Shafeek. 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.
4. Alfthan, G., P. Aspila, P. Ekholm, M. Eurola, H. Hartikainen, H. Hero, V. Hietaniemi, T. Root, P. Salminen, E. R. Vena¨la¨inen and A. Aro. 2011. Nationwide supplementation of sodium selenate to commercial fertilizers: history and 25-year results from the Finnish selenium monitoring program. pp. 312-337, In: B. Thompson, L. Amoroso (eds.), Combating micronutrient deficiencies: Food-based approaches. FAO/CAB International 2010, Rome, 312-337.
5. Alfthan, G., M. Eurola, P. Ekholm, E. R. Venalainen, T. Root, K. Korkalainen, H. Hartikainen, P. Salminen, V. Hietaniemi, P. Aspila and A. Pro. 2015. Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: from deficiency to optimal selenium status of the population. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*,31: 142-147.
6. Ameriyan, M., F. Dashti and M. Delshad. 2015. Effect of different sources and levels of selenium on growth and some physiological characteristics of onion (*Allium cepa L.*). Plant Production Technology 6(2): 163-179.
7. Amirabad, S. A., F. Behtash and Y. Vafaee. 2020. Selenium mitigates cadmium toxicity by preventing oxidative stress and enhancing photosynthesis and micronutrient availability on radish (*Raphanus sativus* L.) cv. Cherry Belle. *Environmental Science* and *Pollution Research* 27: 12476-12490.
8. Amweg, E. L., D. L. Stuart and D. P. Weston. 2003. Comparative bioavailability of selenium to aquatic organisms after biological treatment of gricultural drainage water. *Aquatic Toxicology* 63: 13-25.
9. Arnon, D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenol oxidase *Beta Vulgaris*. *Plant Physiology* 24: 1-15.
10. Bisht, N., P. Phalswal and P. K. Khanna. 2022. Selenium nanoparticles: A review on synthesis and biomedical applications. *Mater Advance* 3:1415-1431.
11. Cai, S., G. Chen, Y. Wang, Y. Huang, D. B. Marchant, Y. Wang and P. J. Franks. 2017. Evolutionary conservation of ABA signaling for stomatal closure. *Plant Physiology* 174: 732-747.
12. Cartes, P., L. Gianfera and M. L. Mora. 2005. Uptake of selenium and its antioxidative activity in ryegrass when applied a selenate and selenite forms. *Plant and Soil* 276: 359-367.

13. Cazzonelli, C. I. 2011. Carotenoids in nature: insights from plants and beyond. *Functional Plant Biology* 38: 833-847.
14. Chauhan, R., S. Awasthi, A. P. Singh, S. Srivastava, V. Pande, R. D. Tripathi and A. Kumar. 2017. Heavy metal tolerance in crop plants: physiological and biochemical aspects. pp. 253-260. In: V. Shukla, S. Kumar, N. Kumar (eds), Plant Adaptation Strategies in Changing Environment. Springer, Singapore
15. Chia, S. and M. Lim. 2022. A critical review on the influence of humidity for plant growth forecasting. . In proceeding of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Malaysia.
16. Dadar, M., M. Adel, H. Nasrollahzadeh Saravi and Y. Fakhri. 2017. Trace element concentration and its risk assessment in common kilka (*Clupeonella cultriventris* caspia Bordin, 1904) from southern basin of Caspian Sea. *Toxin* Reviews 36(3): 222-227.
17. De la Luz Mora, M., L. Pinilla, A. Rosas and P. Cartes. 2008. Selenium uptake and its influence on the antioxidative system of white clover as affected by lime and phosphorus fertilization. *Plant Soil* 303: 139-149.
18. Desoky, E. S., A. R. Merwad, M. F. Abo El-Maati, E. Mansour, S. M. Arnaout, M. F. Awad, M. F. Ramadan and S. A. Ibrahim. 2021. Physiological and biochemical mechanisms of exogenously applied selenium for alleviating destructive impacts induced by salinity stress in bread wheat. *Agronomy* 11: 926.
19. El-Ramady, H., N. Abdalla, H. S. Taha, T. Alshaal, A. El-Henawy, S. Faizy, M. S. Shams, S. M. Youssef, T. Shalaby and Y. Bayoumi. 2016. Selenium and nano-selenium in plant nutrition. *Environmental Chemistry Letters* 14: 123-147.
20. El-Sawy, S. M., Z. F. Fawzy, A. M. El-Bassiony and S. M. Mahmoud, 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.
21. Erice, G., S. Louahlia, J. J. Irigoyen, M. Sánchez-Díaz, I. T. Alami and J. C. Avice. 2011. Water use efficiency, transpiration and net CO_2 exchange of four alfalfa genotypes submitted to progressive drought and subsequent recovery. *Environmental and Experimental Botany* 72: 123-130.
22. Etteieb, S., S. Magdouli, S. P. Komtchou, M. Zolfaghari, R. Tanabene, K. K. Brar, L. L. Calugaru and S. K. Brar. 2021. Selenium speciation and bioavailability from mine discharge to the environment: a field study in Northern Quebec, Canada. *Environmental Science and Pollution Research* 28: 50799-50812.
23. Evans, J., S. Von Caemmerer and J. Vans. 1996. Carbon dioxide diffusion inside leaves. *Plant Physiology* 110: 339-346.
24. Farooq, M. U., I. Ishaaq, C. Barutcular, M. Skalicky, R. Maqbool, A. Rastogi, S. Hussain, S. I. Allakhverdiev and J. Zhu. 2022. Mitigation effects of selenium on accumulation of cadmium and morphophysiological properties in rice varieties. *Plant Physiology and Biochemistry* 170: 1-13.
25. Fernandes, J., X. Hu, M. R. Smith, Y. M. Go and D. P. Jones. 2018. Selenium at the redox interface of the genome, metabolome and exposome. *Free Radical Biology and Medicine* 127: 215-227.
26. Flexas, J., M. Ribas-Carbó, A. Diaz-Espejo, J. Galmes and H. Medrano. 2008. Mesophyll conductance to CO_2: current knowledge and future prospects. *Plant, Cell & Environment* 31: 602-621.
27. Gupta, M. and S. Gupta. 2017. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Frontiers Plant Science* 7: 2074.
28. Han-Wens, S., H. Jing, L. Shu-Xuan and K. Wei. 2010. Protective role of selenium on garlic growth under cadmium stress. *Plant Analysis* 41: 1195-1204.
29. Huang, S., Y. Kan and Y, Tang. 2020. Effect of bioorganic selenium on yield, quality and selenium content of green tea. *Journal Tea Commununication* 47: 610-616.
30. Ikram, M., N. I. Raja, B. Javed, Z. U. R. Mashwani, M. Hussain, M. Ehsan, N. Rafique, K. Malik, T. A. Sultana and A. Akram. 2020. Foliar applications of bio-fabricated selenium nanoparticles to improve the growth of wheat plants under drought stress. *Green Processing and Synthesis* 9: 706-714.
31. Jafari, H. and M. Moghaddam. 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. (In Farsi).
32. Jia, H., Z. Song, F. Wu, M. Ma, Y. Li, D. Han, Y. Yang, S. Zhang and H. Cui. 2018. Low selenium increases the auxin concentration and enhances tolerance to low phosphorous stress in tobacco. *Environmental and Experimental Botany* 153: 127-134.
33. Jiang, C., C. Zu, J. Shen, F. Shao and T. Li. 2015. Effect of selenium on the growth and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 84: 71–7.

34. John, R., P. Ahmad, K. Gadgil and S. Sharma. 2009. Heavy metal toxicity: Effect plant growth, biochemical parameters and metal accumulation by Brassica juncea L. *International Journal of Plant Production* 3: 65-75.
35. Joshi, H., R. Kumar, D. S. Pandey and C. H. Jariwala. 2020. Effect of plasma and nanotechnology on nutrient use efficiency of wheat (Triticum aestivum L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 9 (2): 137-141.
36. Kacjan Maršič, N., A. Golob, H. Šircelj, M. Mihori, A. Krofli, V. Stibilj and M. Germ. 2019. Effects of exogenous selenium in different concentrations and forms on selenium accumulation and growth of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of Agricultural Science and Technology* 21: 1905-1917.
37. Kawazu, Y., M. Okimura, T. Ishii and S. Yui. 2003. Varietal and seasonal differences in oxalate content of spinach. *Scientia Horticulturae* 97(3-4): 203-210.
38. Khan, Z., T. Thounaojam and D. Chowdhury. 2023. The role of selenium and nano selenium on physiological responses in plant. *Plant Growth Regulation* 100: 409-433.
39. Khosravi, S., B. ValizadehKaji and A. Abbasifar. 2022. Foliar application of selenium affects nitrate accumulation and morpho-physiochemical responses of garden cress plants. *International Journal of Horticultural Science and Technology* 9(3): 329-338.
40. Li, R., J. He, H. Xie, W. Wang, S. K. Bose, Y. Y. Sun and H. Yin. 2019. Effects of chitosan nanoparticles on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Biological Macromolecules* 126: 91-100.
41. Li, Z., D. L. Liang, Q. Peng, Z. W. Cui, J. Huang and Z. Q. Lin. 2017. Interaction between selenium and soil organic matter and its impact on soil selenium bioavailability: A review. *Geoderma* 295: 69-79.
42. Mashayekhi, K. and A. Shomali. 2018. Botany, Physiology and Culture of Vegetable. Gorgan University Press, Gorgan.
43. Martínez-Goñi, X. S., J. Miranda-Apodaca and U. Pérez-López. 2024. Enhanced photosynthesis, transpiration regulation, water use-efficiency and growth in buckwheat outperforms wheat response to high CO_2, high temperature and drought. *Environmental and Experimental Botany* 222: 105756.
44. Mohtashami, R., M. M. Dehnavi, H. Balouchi and H. Faraji. 2020. Improving yield, oil content and water productivity of dryland canola by supplementary irrigation and selenium spraying. *Agricultural Water Management* 232: 106046.
45. Moteshare Zadeh, B., S. Ghorbani and H. A. Alikhani. 2020. Spinach (*Spinacia oleracea*) nutritional responses to selenium application. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 51(20): 2537-2550.
46. Nambara, E. and A. Marion-Poll. 2005. Abscisic acid biosynthesis and catabolism. *Annual Review of Plant Biology* 56: 165-185.
47. Nawaz, F., R. Ahmad, M. Y. Ashraf, E. A. Waraich and S. Z. Khan. 2015. Effect of selenium foliar spray on physiological and biochemical processes and chemical constituents of wheat under drought stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 113: 191-200.
48. Pennanen, A., T. Xue, H. Hartikainen and T. L. Xue. 2002. Protective role of selenium in plant subjected to severe UV irradiation stress. *Journal Applied. Botany* 76: 66-76.
49. Raina, M., A. Sharma, M. Nazir, P. Kumari, A. Rustagi, A. Hami, B. S. Bhau, S. M. Zargar and D. Kumar. 2021. Exploring the new dimensions of selenium research to understand the underlying mechanism of its uptake, translocation, and accumulation. *Physiologia Plantarum* 171: 882-895.
50. Ramos, S. J., V. Faquin, L. R. G. Guilherme, E. M. Castro, F. W. Ávila, G. S. Carvalho, C. E. A. Bastos and C. Oliveira. 2010. Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite. *Plant, Soil and Environment* 56(12): 584-588.
51. Rostamihir, M., P. sheikhzadeh, S. Khomari and N. Zare. 2023. Investigating the effect of nanoselenium in improving the physiological, biochemical and agronomic characteristics of spring rapeseed under water deficit stress at the end of the season. *Journal of Crop Production* 16(3): 69-90.
52. Saffar Yazdi, A., M. lahouti and A. Ganjeali. 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.
53. Sager, M. 2006. Selenium in agriculture, food, and nutrition. *Pure and Applied Chemistry* 78(1): 111-133.
54. Salama, D. M., M. E. Abd El-Aziz, F. A. Rizk and M. S. A. Abd Elwahed. 2020. Applications of nanotechnology on vegetable crops. *Chemosphere* 129026.
55. Sher, A., S. Ul-Allah, A. Sattar, M. Ijaz, W. Ahmad, Y. Bibi and A. Qayyum. 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.

56. Siddiqui, M. H., M. H. Al-Whaibi, M. Faisal and A. A. Al Sahli. 2014. Nano-silicon dioxide mitigates the adverse effects of salt stress on *Cucurbita pepo* L. *Environmental Toxicology and Chemistry* 33(11): 2429-2437.
57. Sun, P., Z. Wang, N. Yuan, Q. Lu, L. Sun, Y. Li, J. Zhang, Y. Zhang, G. Ge and Y. Jia. 2023. Evaluation of nano-selenium biofortification characteristics of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Green Processing and Synthesis* 12(1): 20228121.
58. Surai, P. F., I. I. Kochish, V. I. Fisinin and O. A. Velichko. 2018. Selenium in poultry nutrition: from sodium selenite to organic selenium sources. *The Journal of Poultry science* 55: 79-93.
59. Tabatabaie Roodsati, S., A. Iranbakhsh, M. Shamili and Z. Oraghi Ardabili. 2022. The effect of nano selenium and sodium selenate on biochemical, physiological, and growth parameters of Bell pepper (*Capsicum anumm*). *Nova Biologica Reperta* 9(4): 296-306.
60. Viger, M., H. K. Smith, D. Cohen, J. Dewoody, H. Trewin, M. Steenackers and G. Taylor. 2016. Adaptive mechanisms and genomic plasticity for drought tolerance identified in European black poplar (*Populus nigra* L.). *Tree Physiology* 36: 909-928.
61. Wang, H., C. Zhang, M. Nie, D. Cheng, J. Chen, S. Wang, J. Lv and Y. Niu. 2021. Effects of foliar application of nano-se on photosynthetic characteristics and se accumulation in *Paeonia Ostii*. *Research Square*10: 1016.
62. Wang, J., Z. Wang, H. Mao, H. Zhao and D. Huang. 2013. Increasing Se concentration in maize grain with soil- or foliar-applied selenite on the Loess Plateau in China. *Field Crops Research* 150: 83-90.
63. Wang, Y. D., X. Wang and Y. S. Wong. 2012. Proteomics analysis reveals multiple regulatory mechanisms in response to selenium in rice. *Journal of Proteomics* 75: 1849-1866.
64. Wu, M., X. Cong, M. Li, S. Rao, Y. Liu, J. Guo, S. Hu, S. H. Chen, F. Xu, S. H. Cheng, L. Liu and T. Yu. 2020. Effects of different exogenous selenium on Se accumulation, nutrition quality, elements uptake, and antioxidant response in the hyper accumulation plant *Cardamine violifolia*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 204: 111045.
65. Yang, H., X. Yang, Z. Ning, S. Y. Kwon, M. L. Li, F. M. Tack, E. E. Kwon, J. Rinklebe and R. Yin. 2022. The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-plant-human system: an overview. *Journal of Hazardous Materials*, 422: 126876.
66. Xie, M., X. Sun, P. Li, X. Shen and Y. Fang. 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.
67. Zhang, J., X. Wang and T. Xu. 2008. Elemental selenium at nano size (Nano-Se) as a potential chemo preventive agent with reduced risk of selenium toxicity: Comparison with Se-Methyl seleno-cysteine in Mice. *Toxicological Sciences* 101(1): 22-31.
68. Zhao, F. J. and S. P. McGrath. 2009. Biofortification and phytoremediation. *Current Opinion Plant Biology* 12: 373-380.
69. Zhao, Y., W. Xu, L. Wang, S. Han, Y. Zhang, Q. Liu, B. Liu, X. Zhao. 2022. A maize necrotic leaf mutant caused by defect of coproporphyrinogen III oxidase in the porphyrin pathway. *Genes* 13: 272.
70. Zsiros, O., V. Nagy, A. Párducz, G. Nagy, R. Ünnep, H. El-Ramady, J. Prokisch, Z. Lisztes-Szabó, M. Fári, J. Csajbók, S. Z. Toth, G. Garab and E. D. Szabolcsy. 2019. Effects of selenate and red Se-nanoparticles on the photosynthetic apparatus of Nicotiana tabacum. *Photosynthesis Research* 139: 449-460.