

The effect of selenium (nano and bulk) on the absorption pattern of elements and growth indices of Spinach (*Spinacia oleracea* L.) Dash variety

Mohammad Qasemi¹, Mansoore Shamili^{2*}, Abdolmajid Mirzaalian Dastjerdi³

1-MSc graduated, Department of Horticultural Sciences, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

2-Associate professor, Department of Horticultural Sciences, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

3-Associate professor, Department of Horticultural Sciences, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

*Corresponding author: shamili@ut.ac.ir

(Received: 29 July 2024

Revised: 19 November 2024

Accepted: 24 December 2024)

Extended Abstract

- 1. Introduction:** Selenium is one of the essential food elements for humans and animals. Seleno-proteins participate in antioxidant defense systems and the regulation of oxidation in mammals, and their deficiency leads to immune system dysfunction. Selenium concentration in soils has been deemed insufficient, and as a result, according to estimates, 15-20% of children and adults worldwide suffer from selenium deficiency. Plants, which are the primary source of selenium for humans and animals, absorb the element from the soil and enter the food chain. Nanotechnology is a promising field of bioengineering. Selenium nanoparticles have been introduced as stable nanoparticles as 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 the cold season. 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 the toxic effects of this element in high concentrations, in this research, the effects of selenium (in both bulk and nano forms) were considered on spinach plants. This research aims to compare foliar spraying with nano-selenium (5, 10 and 20 ppm) and sodium selenate (5, 10 and 20 mg/liter) on growth indices (leaf and root dry matter, root length and plant height, leaf number) and elements content (including nitrogen, phosphorus, manganese, magnesium, sodium, calcium, zinc, selenium and iron) in spinach.
- 2. Materials and Methods:** The experiment was carried out in a completely randomized design. The factors were included: foliar spraying of nano selenium (5, 10, and 20 ppm), sodium selenate (5, 10, and 20 mg/L), and distilled water (control). Spinach Dash seedlings cultivated in the greenhouse were treated at the vegetative growth stage. At the end, the growth indices (including leaf and root dry matter, root length and plant height, leaf number) and macro and micronutrient content (including N, P, Mn, Mg, Na, Ca, Zn, Se, and Fe) were evaluated. The normality of the data was determined by the Shapiro-Wilk method. Tukey's test was performed to compare the means ($P < 0.01, 0.05$). Statistical analysis of data was done with SAS Ver.9.4 software. Also, the pictures were drawn using EXCEL 2016 Software.
- 3. Results and Discussion:** Based on findings, with increasing the levels of treatments, the root and shoot length, leaf and root dry matter, and leaf number showed an improving trend. In addition, P, Fe, Zn, and Se contents were also enhanced by increasing the levels of the two treatments. In contrast, increasing the concentration of treatments led to a decline in Na and Mn contents. Mg also decreased under the highest level of both treatments; However, at the medium level (10 mg/L sodium selenate and 10 ppm nano-selenium), an increase in its content was observed. The responses of N and Ca were different to selenium compounds. On the other hand, under 5 ppm of nano-selenium, leaf N reached the highest value; nevertheless, with the enhancement of nano-selenium concentrations, N content decreased. An increase and a decrease of N were observed under 10 and 20 mg/L of sodium selenate, respectively. A similar trend was also recorded for Ca under 10 and 20 ppm nano-selenium. In contrast, increasing the levels of sodium selenate up to 20 mg/L boosted the calcium content of leaves.
- 4. Conclusion:** Based on the results obtained from the present research, sodium selenate at suitable levels can improve some growth traits of spinach. The best concentration to enhance root length was the highest level of sodium selenate (20 mg L⁻¹). Nevertheless, reduced Mn content occurred under the same treatment. The results also indicated the positive role of nano selenium on growth characteristics and some macro and micro elements of spinach. The highest level of nano selenium (20 ppm) enhanced P, Fe, and Se content. This treatment also decreased the content of Ca, Mg, Na, and the accumulation of

nitrate in the leaves of spinach. As the application of the lowest level of nano selenium caused the more accumulation of nitrate. However, the positive impact of a moderate level of nano selenium (10 ppm) was stronger on leaf number, root dry matter, Mg, and Zn contents. Overall, since the different levels of the applied treatments illustrated different effects on growth indices and the contents of macro and micro elements, selecting the selenium type (bulk or nano) as well as its required level, can be conducted based on the purpose of the experiment, and result in desired results.

Keywords: Spinach, Morphological Characteristics, Macro and Micro Elements, Nano Selenium

Citation: Qasemi, M., Shamili, M., & Mirzaalian Dastjerdi, A. (2026). The effect of selenium (nano and bulk) on the absorption pattern of elements and growth characteristics of Spinach (*Spinacia oleracea* L.) Dash variety. *Journal of Vegetables Sciences*, 18(2), 51-72. doi:10.22034/iuvs.2024.2037058.1380

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Journal of Vegetables Sciences. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



تأثیر سلنیوم (نانو و بالک) بر الگوی جذب عناصر و مشخصه‌های رشدی اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) رقم دش

محمد قاسمی^۱، منصوره شمیلی^{۲*}، عبدالمجید میرزاعلیان دستجردی^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

۲- دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

۳- دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

نویسنده مسئول: *shamili@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۸

چکیده

گیاهان به عنوان بهترین منبع سلنیوم برای انسان‌ها و حیوانات می‌باشند که این عنصر را از خاک جذب و وارد زنجیره‌ی غذایی می‌کنند. نانوذرات سلنیوم، به عنوان ذرات پایدار، جهت استفاده به عنوان کود گیاهی معرفی شده‌اند. در تحقیق حاضر اثر سلنیوم (به شکل بالک و نانو) بر الگوی جذب عناصر و مشخصه‌های رشدی اسفناج در شرایط گلخانه در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار مورد بررسی قرار گرفت. فاکتورهای آزمایشی شامل محلول پاشی با نانو سلنیوم (۵، ۱۰ و ۲۰ پی.پی.ام)، سلنات سدیم (۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) و آب مقطر (شاهد) بود. بر اساس یافته‌ها، با افزایش سطوح تیمارها، ارتفاع بوته و ریشه، ماده خشک برگ و ریشه، تعداد برگ، محتوای عناصر فسفر، آهن، سلنیوم، منیزیم، روی و کلسیم روندی افزایشی داشت. به طوری که بیشترین میزان ارتفاع بوته (۲۷/۶۸ سانتی‌متر)، ماده خشک برگ (۱۹/۴۰ درصد)، محتوای فسفر (۰/۷۵ پی.پی.ام)، آهن (۰/۰۲۸ پی.پی.ام) و سلنیوم (۰/۵۹ پی.پی.ام) تحت تیمار ۲۰ پی.پی.ام نانوسلنیوم، تعداد برگ (۶۸/۸۶)، ماده خشک ریشه (۱۷/۴۸ درصد) منیزیم (۰/۹۲ پی.پی.ام) و روی (۴۹/۶۰ پی.پی.ام) در تیمار ۱۰ پی.پی.ام نانوسلنیوم، و طول ریشه (۲۴/۵۶ سانتی‌متر) و محتوای کلسیم (۲/۱۰ پی.پی.ام) به ترتیب تحت تیمارهای ۲۰ و ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر سلنات سدیم ثبت شد. با وجود اینکه کمترین میزان ارتفاع بوته (۲۵/۰۶ سانتی‌متر)، طول ریشه (۱۶/۱۳ سانتی‌متر)، تعداد برگ (۵۱/۱۶)، ماده خشک برگ (۱۱/۳۸ درصد)، ماده خشک ریشه (۱۶/۵۹ درصد)، فسفر (۰/۵۵ پی.پی.ام)، آهن (۰/۰۱۶ پی.پی.ام)، روی (۴۲/۲۸ پی.پی.ام) و سلنیوم (۰/۰۸ پی.پی.ام) متعلق به تیمار شاهد بود. کمترین میزان عناصر کلسیم (۱/۳۵ پی.پی.ام) و منیزیم (۰/۶۴ پی.پی.ام) در تیمار ۲۰ پی.پی.ام نانوسلنیوم به دست آمد. در مقابل، افزایش غلظت تیمارها موجب کاهش محتوای سدیم، منگنز و تجمع نیترات شد. به طوری که بیشترین میزان سدیم (۱/۹۵ پی.پی.ام) و منگنز (۱۱۹/۴۴ پی.پی.ام) در تیمار شاهد و تجمع نیترات (۳۵۶۶/۶۰ پی.پی.ام) در ۵ پی.پی.ام نانوسلنیوم به دست آمد. همچنین کمترین تجمع نیترات و سدیم (به ترتیب ۲۵۳۳/۳ و ۱/۵۲ پی.پی.ام)، و همچنین محتوای عنصر منگنز (۷۳/۳۸ پی.پی.ام) به ترتیب در بالاترین سطح نانوسلنیوم و سلنات سدیم مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: اسفناج، خصوصیات مورفولوژیکی، عناصر میکرو و ماکرو، نانوسلنیوم

استناد: قاسمی، م.، شمیلی، م. و میرزاعلیان دستجردی، ع. (۱۴۰۴). تأثیر سلنیوم (نانو و بالک) بر الگوی جذب عناصر و مشخصه‌های رشدی اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) رقم دش. علوم سبزی‌ها، ۱۸ (۲)، ۷۲-۵۱.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این مجله به صورت آزاد در وب سایت مجله برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.

مقدمه

قلبی عروقی و دیابت می‌شود (Guillin *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2023).

فناوری نانو، کاربردهای نوپدید را در زمینه‌های مختلف علوم، از جمله کشاورزی بوجود آورده است (Joshi *et al.*, 2020). از جمله کاربردهای وسیع این فناوری در بخش کشاورزی، افزایش تولید محصول، کاهش میزان مصرف کودها و سموم و افزایش مدت زمان نگهداری محصولات تولیدی می‌باشد. نانو جدیدتر، توانمندی گیاهان را برای جذب عناصر و مواد غذایی افزایش دهد (Salama *et al.*, 2020).

فرم نانوسلنیوم، به علت اندازه کوچک، تخلخل ذرات، مساحت سطح، واکنش‌پذیری و تحرک درون گیاه، مورد توجه قرار گرفته است (Bisht *et al.*, 2022). مطالعات نشان داده است که نانو سلنیوم اثر بخشی قابل مقایسه (یا بالاتری) از فرم سلنات سدیم دارد، همچنین سمیت کمتری را دارا می‌باشد (Jani *et al.*, 1992; Florence, 1998; Tran & Webster, 2008; Hassan *et al.*, 2014; Song *et al.*, 2017). لذا به علت فراهمی زیستی بالا و آلودگی زیست محیطی کم، نانو سلنیوم به یک ماده محبوب در تحقیقات تغذیه گیاهان تبدیل شده است (Zhang *et al.*, 2008; Haghghi *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2018).

کاربرد سلنیوم در ریشه برنج، به‌طور قابل توجهی باعث افزایش تجمع سلنیوم، عناصر ضروری و اسیدهای آمینه گردید (Farooq *et al.*, 2022). محلول‌پاشی با سلنیوم (۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) وزن ۱۰۰ جوانه گیاه چای را افزایش داد (Huang *et al.*, 2020). ژنوتیپ‌های گلرنگ با تیمار سلنیوم بهبود قابل توجهی 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 (Sher *et al.*, 2022). در آزمایشی دیگر بر گیاه برنج، ترکیبات حاوی سلنیوم (سلنیت سدیم و سلنات سدیم) سطح برگ، سرعت رشد، جذب مواد مغذی (نیترژن، فسفر، پتاسیم، بر و

اسفناج (*Spinach*) با نام علمی (*Spinacia oleracea* L.) و متعلق به خانواده *Amaranthaceae* می‌باشد (Mashayekhi & Shomali, 2018). این گیاه یکساله و روز بلند، جزء سبزی‌های برگی مهم فصل سرد (Mashayekhi & Shomali, 2018)، بومی آسیای مرکزی و احتمالاً ایران بوده است (Kawazu *et al.*, 2003). اسفناج سرشار از ویتامین‌ها (گروه A، B و C)، فولیک اسید، مواد معدنی 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 (Aisha *et al.*, 2013).

سلنیوم یکی از ریزمغذی‌های فعال در موجودات زنده است که در خاک‌های قلیایی موجود است (Ettieb *et al.*, 2021). اهمیت بیولوژیکی سلنیوم به دلیل پیوند قوی آن با فلزات، اتصال کووالانسی با غیر فلزات و پایداری ساختار آن در حالات مختلف اکسیداسیون-احیا است (Fernandes *et al.*, 2018). سلنیوم می‌تواند به صورت سلناید، سلنیوم عنصری، سلنات، دی میتل سلناید، سلنوآمینواسید و سلنوپروتئین‌ها یافت شود (Surai *et al.*, 2018). نقش سلنیوم در پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاهان شامل فعال سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، افزایش سطح کلروفیل، تعادل مواد معدنی و بهبود مقاومت گیاه به تنش‌ها است (Khan *et al.*, 2023). همچنین این عنصر در حفظ ساختار و عملکرد سلول، القای رشد (ریشه و شاخساره)، بهبود وضعیت آب در گیاه و آسیمیلاسیون نیترژن نقش دارد (Raina *et al.*, 2021). صرف نظر از اثرات مفید سلنیوم بر گیاهان، استفاده از این عنصر به عنوان کود می‌تواند منجر به ورود آن به زنجیره غذایی انسان و پستانداران گردد (Zhao & McGrath, 2009). کمبود سلنیوم منجر به اختلالات متابولیک مرتبط با اکسیداتیو مانند سرطان، اختلالات

کلروفیل کل شدند. در اکثر تیمارها، میزان فسفر، پتاسیم و سلنیوم بیشتر از شاهد بود (Rezaei Nik *et al.*, 2022). با این حال تحقیقی بر تاثیر سلنیوم بر جذب عناصر درشت مغذی و ریز مغذی در این گیاه انجام نشده است.

از آنجا که سلنیوم از جمله عناصر مفید در گیاهان (از جمله اسفناج) است و با توجه به اثرات سمی این عنصر در غلظت‌های بالای استفاده، در تحقیق حاضر بررسی اثرات سلنیوم (به دو شکل بالک و نانو) بر گیاه اسفناج مورد توجه قرار گرفت. هدف از این تحقیق، مقایسه محلول پاشی با نانو سلنیوم (۵، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام) و سلنات سدیم (۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) بر ویژگی‌های رشدی (ماده خشک برگ و ریشه، ارتفاع بوته و ریشه و تعداد برگ) و محتوای عناصر درشت مغذی و ریز مغذی (کلسیم، منیزیم، فسفر، سدیم، آهن، روی، منگنز و سلنیوم) در گیاه اسفناج است.

مواد و روش‌ها

آماده سازی مواد گیاهی و تیمارها

تحقیق حاضر در سال ۱۴۰۱ در دانشکده کشاورزی دانشگاه هرمزگان به اجرا درآمد. بذر اسفناج رقم دَش (Dash) (تولید شرکت تاکی ژاپن) از شرکت آراکاشت راسپینا (دزفول، خوزستان، ایران) تهیه گردید. سلنات سدیم (Na_2SeO_3) از شرکت مرک (Merck, Germany) تهیه شد. نانوذره سلنیوم مورد استفاده در این آزمایش از شرکت NanoSany (مشهد، ایران)، خریداری شد. اندازه ذرات در محدوده ۱۰-۴۵ نانومتر، چگالی ظاهری ۳/۸۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب، شکل تقریباً کروی، پتانسیل Zeta، میانگین $Z(d.nm)$ ، و PDI نانو ذره نیز به ترتیب ۳۲/۸، ۴۱/۳۵ و ۰/۵۶۵ mV بود. تیمارها شامل محلول پاشی با نانو سلنیوم (۵، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام)، سلنات سدیم (۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) و آب مقطر (شاهد) بود.

روی) و عملکرد را افزایش دادند (Adhikary *et al.*, 2022). کاربرد سلنیوم باعث افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی، سطح گلوکاتیون و میزان پروتئین در گیاه برنج شده است. علاوه بر این، عملکرد، جذب آهن، منگنز، مس و روی را افزایش داده و در نتیجه رشد گیاه را بهبود بخشیده است (Wang *et al.*, 2022). محلول پاشی با سلنیوم (۸ میکرومولار) باعث افزایش محتوای کلروفیل، فتوسنتز خالص و سرعت تعرق در بوته‌های گندم گردید. همچنین، هدایت روزنه‌ای، شاخص پایداری غشاء و محتوای نسبی آب برگ را نیز افزایش داد. قندهای محلول، پرولین، کلسیم، پتاسیم و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی (آنزیمی و غیر آنزیمی) نیز نرخ افزایشی داشتند (Desoky *et al.*, 2021). در آزمایشی روی تنباکو، تجمع نیتروژن در تیمار ۵ میلی‌گرم در لیتر نانو سلنیوم، بالاترین میزان را داشت (Liu *et al.*, 2020). طبق مطالعه Yin و همکاران (۲۰۱۹)، کاربرد سلنیوم در ریشه برنج به‌طور قابل توجهی باعث افزایش تجمع سلنیوم، سرعت فتوسنتز و تجمع زیست‌توده گردید. سلنیوم همچنین میزان عناصر ضروری و اسیدهای آمینه را بهبود بخشیده و در عین حال قابلیت آنتی‌اکسیدانی را افزایش داد (Yin *et al.*, 2019).

مطالعه تأثیر غلظت‌های مختلف سلنیوم (۰، ۱، ۲، ۴، ۶ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر)، بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه اسفناج حاکی از تأثیر معنی‌دار سلنیوم بر وزن تر و خشک، طول (ریشه و اندام هوایی) و محتوای کلروفیل بود (Saffar Yazdi *et al.*, 2012). تأثیر سلنیت سدیم (۱، ۲ و ۴ میلی‌گرم در لیتر) و نانو ذرات سبزی سلنیت سدیم (۱، ۲ و ۴ میلی‌گرم در لیتر) و شاهد (آب مقطر) به صورت محلول پاشی بر ویژگی‌های خصوصیات مورفولوژیکی، فیتوشیمیایی و میزان تجمع نیترات در گیاه اسفناج، نشان داد تیمار چهار میلی‌گرم در لیتر سلنیت سدیم و یک میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سلنیوم به‌طور معنی‌داری باعث افزایش وزن تر و خشک بوته، کلروفیل a، کلروفیل b و

کشت گیاهان در شرایط گلخانه

بستر مورد استفاده برای کاشت بذور، ترکیب خاک باغچه، خاک برگ و ماسه (۱:۱:۱) بود. گیاهان در دمای متوسط روزانه 27 ± 2 و دمای متوسط شبانه 24 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۰ درصد کشت شدند. بذرها در کرت‌هایی به ابعاد $1 \times 0/8$ مترمربع (فاصله‌ی کرت‌ها ۰/۵ متر) کشت شدند. پس از کاشت، آبیاری روزانه به روش قطره‌ای انجام گرفت. پس از سبزشدن بذرها و تا مرحله‌ی چهاربرگی، آبیاری هر سه روز یکبار انجام شد. پس از آن هر دو روز یکبار آبیاری صورت گرفت. سه هفته بعد، عملیات تنک انجام شد. گیاهچه‌های اسفناج در مرحله‌ی رشد رویشی مورد تیمار قرار گرفتند. مرحله‌ی اول اعمال تیمارها، هشت هفته پس از سبزشدن بذور و مرحله‌ی دوم، ده روز پس از مرحله‌ی اول بود. ده روز پس از محلول پاشی دوم، صفات زیر اندازه‌گیری شد.

مشخصه‌های رشدی

جهت سنجش ماده خشک برگ و ریشه، نمونه‌های برگ و ریشه جمع‌آوری و توزین (ترازوی دیجیتالی Sartorius Cubis, Germany ۰/۰۱ گرم) شدند. پس از خشک کردن نمونه‌ها در آون (۷۰ درجه سانتی‌گراد، ۴۸ ساعت) و توزین مجدد، از اختلاف نسبت وزن تر و خشک میزان ماده خشک برگ و ریشه محاسبه شد. ارتفاع بوته و طول ریشه در انتهای آزمایش، با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری و ثبت شد. تعداد برگ هر بوته نیز در انتهای آزمایش، شمارش شد.

سنجش نیترات

بدین منظور از دستگاه نیترات-سنج پرتابل مدل (LAQUAtwin -NO3-11) استفاده گردید. چند قطره از عصاره برگ بر صفحه دستگاه ریخته و مقدار نیترات بر حسب پی‌پی‌ام قرائت گردید.

سنجش عناصر درشت مغذی و ریز مغذی (کلسیم، منیزیم، فسفر، سدیم، آهن، روی، منگنز و سلنیوم) برگ

نمونه‌های برگ شسته، برش‌های نازک زده و به مدت ۱ هفته در مجاورت هوا خشک شد. سپس، نمونه‌ها در آون (۷۰ درجه سانتی‌گراد، ۴۸ ساعت) خشک و پس از آن توسط آسیاب برقی پودر شدند. در ادامه، به منظور هضم اسیدی، نیم گرم از هر نمونه به طور جداگانه توزین و به آن $12/5$ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ اضافه گردید. مخلوط حاصل به مدت دو ساعت در دمای آزمایشگاه انکوبه شد. سپس نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد بر روی یک دستگاه گرمکن مجهز به همزن حرارت داده شد تا محلول شفاف حاصل شود. بعد از سرد شدن و عبور از کاغذ صافی واتمن (۰/۶۵ میکرومتر)، محلول زیر صافی با آب دوبار تقطیر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سنجش عناصر توسط دستگاه طیف سنجی نوری پلاسمای جفت شده القایی (Inductively Coupled Plasma- Optical Emission Spectrometry Agilent (ICP-OES)) (سری ۷۰۰ ساخت شرکت Agilent آمریکا) انجام شد. مقادیر عناصر با استفاده از محلول استاندارد آن‌ها و معادلات منتج از منحنی‌های کالیبراسیون بر حسب پی‌پی‌ام محاسبه شد (Dadar *et al.*, 2017).

تجزیه آماری داده‌ها

آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. فاکتورها شامل محلول پاشی با نانو سلنیوم (۵، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام)، سلنات سدیم (۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) و آب مقطر (شاهد) 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 تصاویر با کمک برنامه EXCEL 2016 ترسیم شدند.

نتایج و بحث

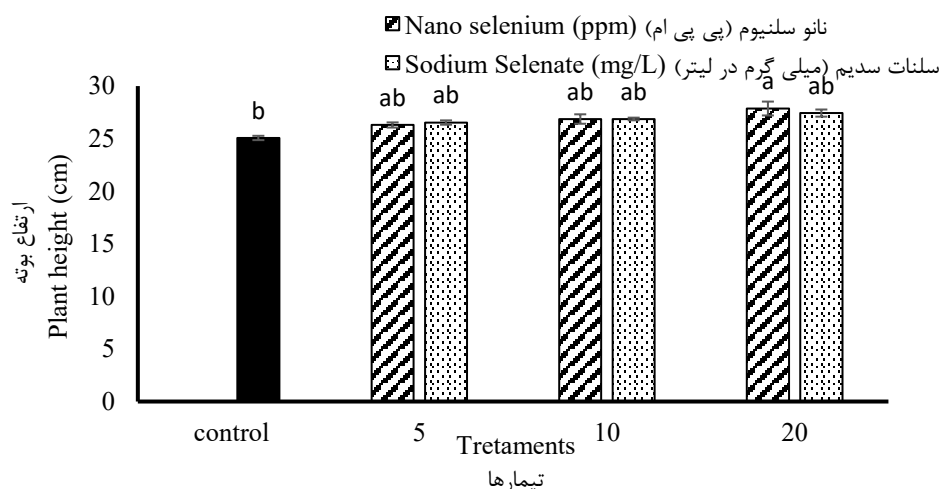
ارتفاع بوته

با افزایش سطوح نانو سلنیوم تا ۲۰ پی‌پی‌ام، ارتفاع بوته ۱۱/۱۷ درصد نسبت به تیمار شاهد، افزایش یافت.

داده‌ها حاکی از آن بود که با افزایش محتوای نانوسلنیوم تا ۲۰ پی‌پی‌ام، طول ریشه تا ۲۹/۷۵ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. علاوه بر این، بالاترین سطح سلنات سدیم (۲۰ میلی گرم در لیتر)، موجب افزایش (۵۲/۲۶ درصد) در طول ریشه و ثبت بیشترین میزان این صفت (۲۴/۵۶ سانتی‌متر) شد. کمترین میزان ریشه (۱۶/۱۳ سانتی‌متر) نیز متعلق به تیمار شاهد بود (شکل ۲).

بیشترین ارتفاع بوته تحت تیمار ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم (۲۷/۸۶ سانتی‌متر) و کمترین میزان آن تحت تیمار شاهد (۲۵/۰۶ سانتی‌متر) بدست آمد. علاوه بر این، تیمار با سلنات سدیم تا ۲۰ میلی گرم در لیتر نیز موجب افزایش ۹/۴۵ درصدی در ارتفاع بوته شد، که البته این افزایش معنی‌دار نبود (شکل ۱).

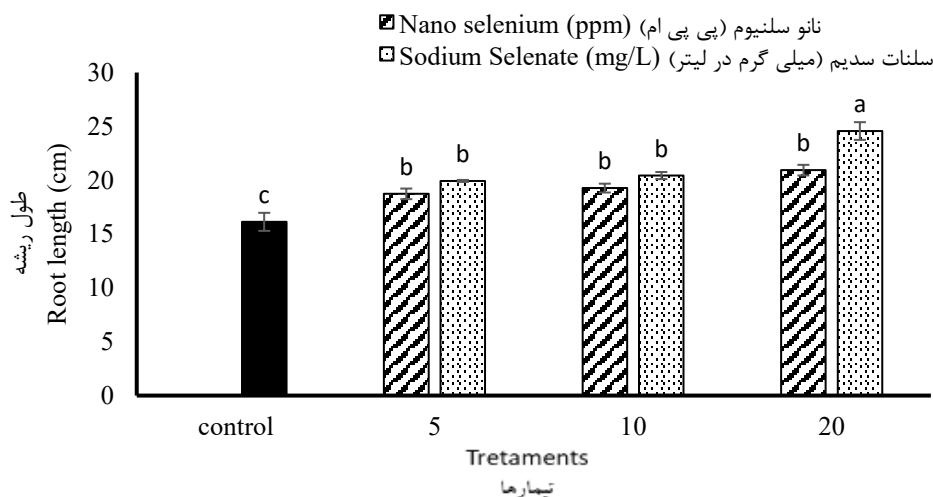
طول ریشه



شکل ۱. اثر تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر ارتفاع بوته در اسفناج رقم دش

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال یک درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ندارند.

Figure 1. The impact of nano-selenium and sodium selenate treatments plant height in spinach Dash cultivar. In each column, means followed by the same letters are not significantly different according Tuckey test ($P < 0.01$).



شکل ۲. اثر تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر طول ریشه در اسفناج رقم دش

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال یک درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ندارند.

Figure 2. The impact of nano-selenium and sodium selenate treatments on root length in spinach Dash cultivar. In each column, means followed by the same letters are not significantly different according Tuckey test ($P < 0.01$).

تعداد برگ

بر اساس نتایج، تیمار گیاهان اسفناج با نانوسلنیوم تا ۱۰ پی‌پی‌ام، موجب افزایش ۳۴/۵۹ درصدی در تعداد برگ، شد. بیشترین تعداد برگ (۶۸/۸۶) تحت همین تیمار ثبت شد. با اینکه کاربرد ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم نیز موجب افزایش تعداد برگ نسبت به شاهد شد، اما این افزایش ۲۱/۲۳ درصد کمتر از زمانی بود که ۱۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم اعمال شده بود. علاوه بر این، سلنات سدیم ۲۰ میلی‌گرم‌درلیتر نیز موجب افزایش ۷/۵ درصدی در تعداد برگ شد. کمترین تعداد برگ (۵۱/۱۶) متعلق به تیمار شاهد بود (شکل ۳).

ماده خشک برگ

تیمار با هر دو ترکیب حاوی سلنیوم باعث افزایش ماده خشک برگ گردید. نانوسلنیوم ۲۰ پی‌پی‌ام و سلنات سدیم ۲۰ میلی‌گرم‌درلیتر، به ترتیب افزایش ۷۰/۴۷ و ۵۲/۱۹ درصدی در ماده خشک برگ ایجاد کردند. بیشترین میزان ماده خشک برگ به گیاهان تیمار شده با ۲۰ پی‌پی‌ام از نانوسلنیوم (۱۹/۴۰ درصد) و کمترین میزان این صفت به تیمار شاهد (۱۱/۳۸ درصد) تعلق داشت (شکل ۴).

ماده خشک ریشه

با توجه به نتایج، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای اعمال شده و تیمار شاهد از نظر ماده خشک ریشه وجود نداشت. تیمار گیاهان اسفناج با نانوسلنیوم (تا ۱۰ پی‌پی‌ام) باعث افزایش ۵/۳۶ درصدی در ماده خشک ریشه شد. با وجود افزایش ماده خشک ریشه تحت تیمار ۲۰ پی‌پی‌ام، این افزایش ۴/۲۲ درصد کمتر از زمانی بود که گیاهان با ۱۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم تیمار شده بودند. علاوه بر این، سلنات سدیم ۲۰ میلی‌گرم‌درلیتر نیز موجب افزایش ۲/۸۹ درصدی در

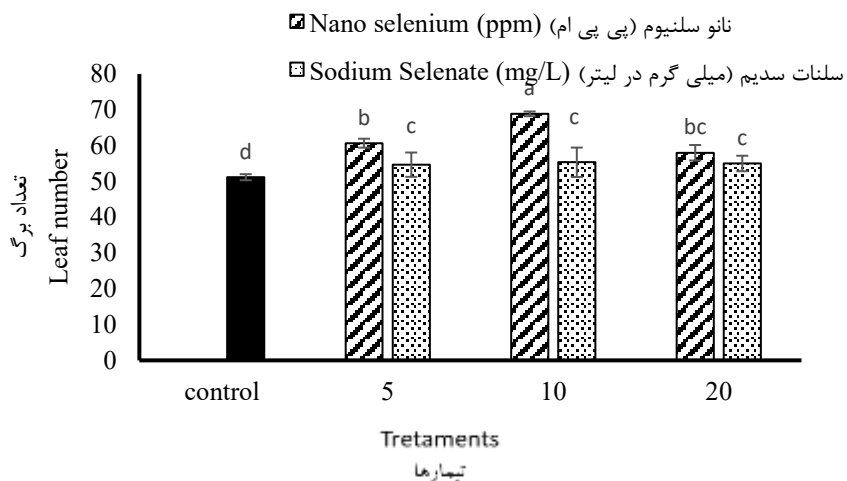
ماده خشک ریشه، نسبت به تیمار شاهد شد. بیشترین و کمترین میزان ماده خشک ریشه به ترتیب در تیمارهای ۱۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم و تیمار شاهد (۱۷/۴۸ و ۱۶/۵۹ درصد) ثبت شد.

تجمع نیترات

تیمار گیاهان اسفناج با ۵ پی‌پی‌ام از نانوسلنیوم موجب افزایش (۱۲/۶۳ درصد) در محتوای نیترات برگ نسبت به شاهد و ثبت بیشترین مقدار این صفت (۳۵۶۶/۶ پی‌پی‌ام) شد. با این حال افزایش سطوح نانوسلنیوم تا ۲۰ پی‌پی‌ام موجب کاهش ۲۰ درصدی در محتوای نیترات گردید و در نتیجه کمترین میزان نیترات (۲۵۳۳/۳ پی‌پی‌ام) به تیمار ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم تعلق داشت. علاوه بر این، افزایش در سطوح سلنات سدیم تا ۱۰ میلی‌گرم‌درلیتر موجب افزایش ۱/۰۵ درصدی در محتوای نیترات گردید، اما سطح بالای آن (۲۰ میلی‌گرم‌درلیتر)، کاهش ۳/۱۵ درصدی به دنبال داشت (شکل ۵).

کلسیم

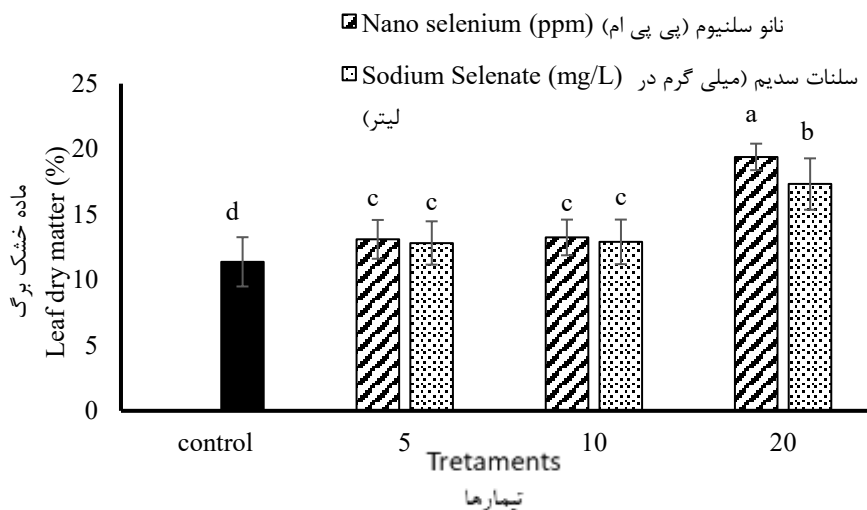
پاسخ گیاهان اسفناج به تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات سدیم، متفاوت بود. به طوری که با افزایش سطوح نانوسلنیوم تا ۱۰ پی‌پی‌ام، افزایش (۱۶/۷۶ درصد) در محتوای این عنصر، مشاهده شد. اما تیمار ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم، کاهش (۱۹/۱۶ درصد) در محتوای کلسیم برگ را به همراه داشت و کمترین میزان کلسیم (۱/۳۵ پی‌پی‌ام) در این تیمار ثبت شد. در مقابل، با افزایش سطوح سلنات سدیم تا ۲۰ میلی‌گرم‌درلیتر، میزان کلسیم تا ۲۵/۷۴ درصد نسبت به شاهد، افزایش یافت و بیشترین میزان کلسیم (۲/۱۰ پی‌پی‌ام) در این تیمار بدست آمد (شکل ۶).



شکل ۳. اثر تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر تعداد برگ در اسفناج رقم دش

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال یک درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ندارند.

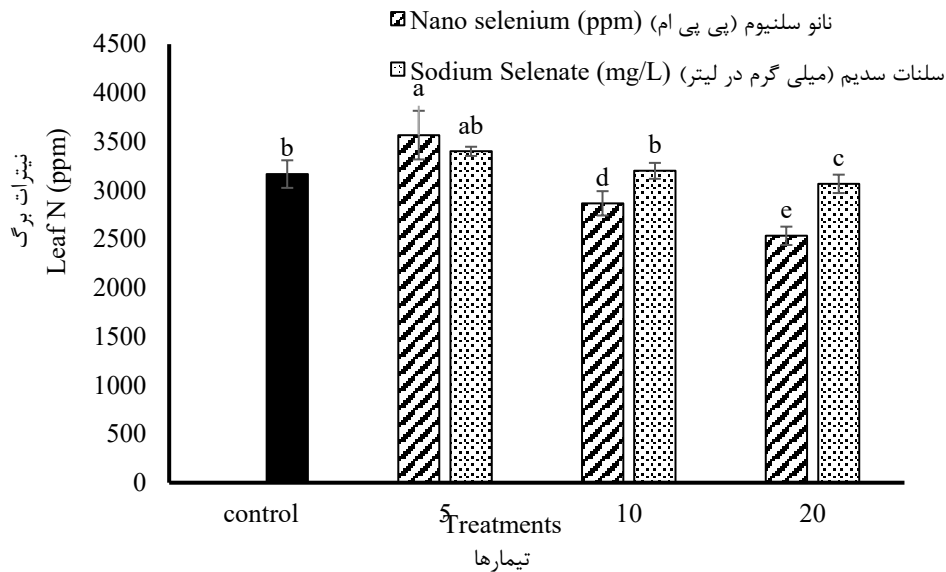
Figure 3. The impact of nano-selenium and sodium selenate treatments on leaf number in spinach Dash cultivar. In each column, means followed by the same letters are not significantly different according Tuckey test ($P < 0.01$).



شکل ۴. اثر تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر ماده خشک برگ در اسفناج رقم دش

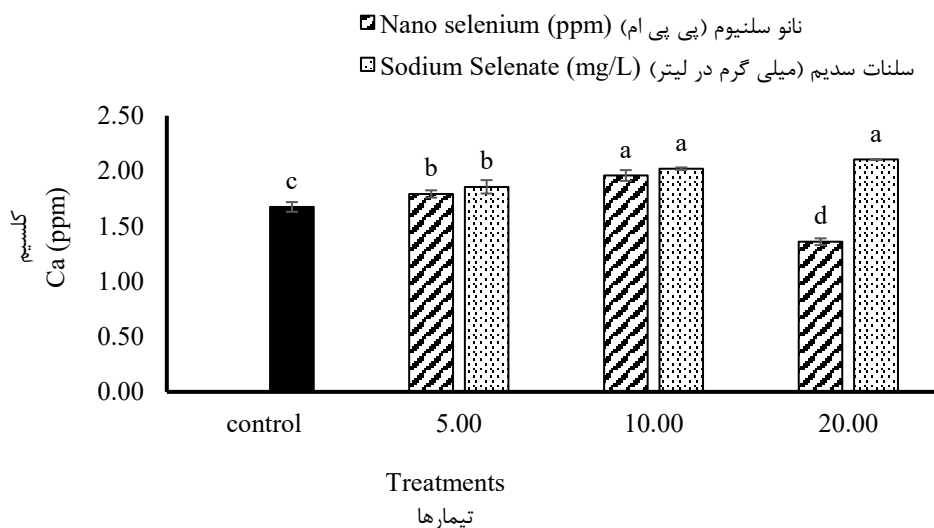
در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال یک درصد با یکدیگر اختلاف معنی‌دار ندارند.

Figure 4. The impact of nano-selenium and sodium selenate treatments on leaf dry matter in spinach Dash cultivar. In each column, means followed by the same letters are not significantly different according Tuckey test ($P < 0.01$).



شکل ۵. اثر تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای نیترات برگ در اسفناج رقم دش مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($p < 0.01$) است.

Figure 5. The impact of nano-selenium and sodium selenate treatments on N content in spinach Dash cultivar. In each column, means followed by the same letters are not significantly different according Tuckey test ($P < 0.01$).



شکل ۶. اثر تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای کلسیم برگ در اسفناج رقم دش مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($p < 0.01$) است.

Figure 6. The impact of nano-selenium and sodium selenate treatments on Ca content in spinach Dash cultivar. In each column, means followed by the same letters are not significantly different according Tuckey test ($P < 0.01$).

نانوسلنیوم مشاهده شد. تیمار گیاهان با ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر از سلنات سدیم به ترتیب کاهش ۱۴/۶۶ و ۴ درصدی در محتوای منیزیم برگ راباعث شد. کمترین مقدار این عنصر (۰/۶۴ پی‌پی‌ام) در تیمار ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم ثبت شد (شکل ۷).

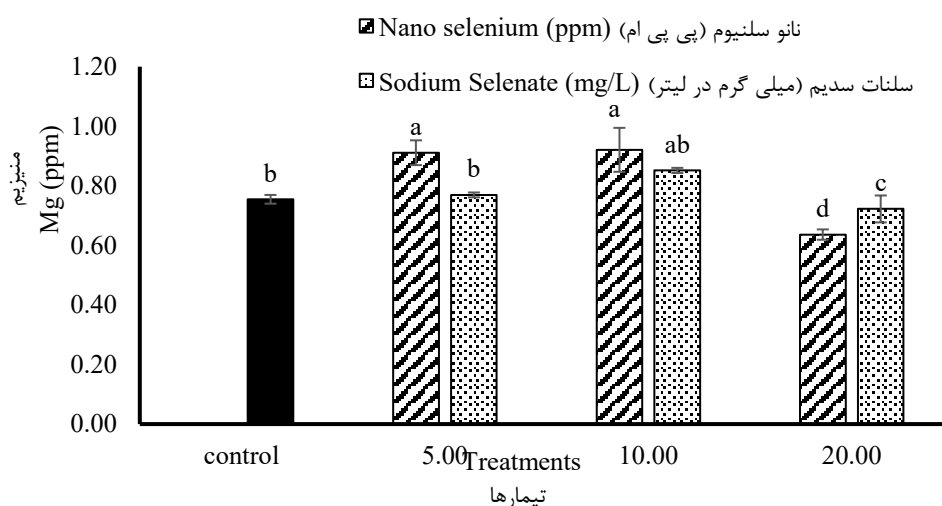
منیزیم

تیمار با نانوسلنیوم و سلنات سدیم در سطوح پائین به ترتیب موجب افزایش ۲۲/۶۶ و ۱۳/۳۳ درصدی منیزیم برگ نسبت به تیمار شاهد شد. بیشترین محتوای منیزیم (۰/۹۲ پی‌پی‌ام) در تیمار ۱۰ پی‌پی‌ام

فسفر

درصدی در محتوای فسفر برگ نشان دادند. همچنین با افزایش سطوح سلنات سدیم از ۵ تا ۲۰ میلی‌گرم در لیتر، تا ۲۷/۲۷ درصد افزایش در فسفر برگ مشاهده شد. کمترین میزان (۰/۵۵ پی‌پی‌ام) به تیمار شاهد تعلق داشت (شکل ۸).

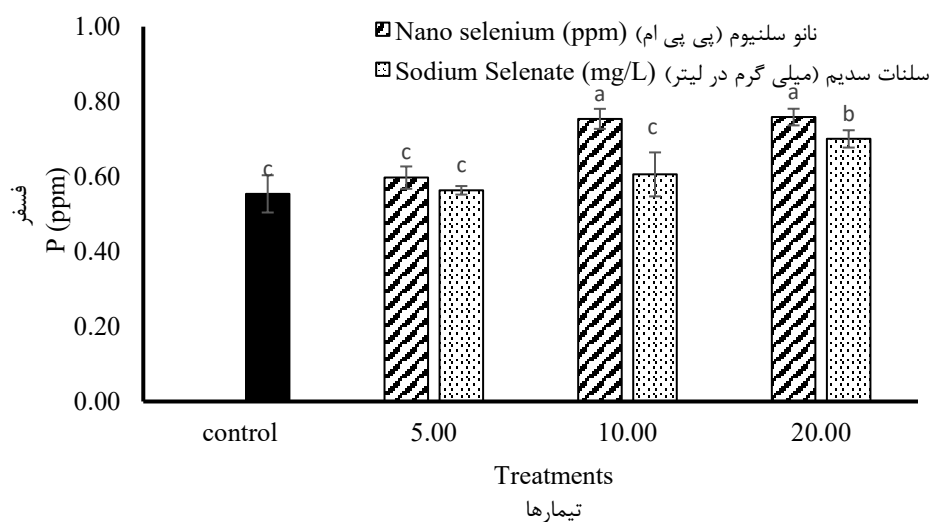
گیاهان اسفناج تیمار شده با نانوسلنیوم، افزایش در میزان فسفر برگ داشتند. تیمار با نانوسلنیوم ۵، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام به ترتیب افزایش ۷/۲۷، ۳۶/۳۷ و ۳۶/۳۷



شکل ۷. اثر تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای منیزیم در اسفناج رقم دش

مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($p < 0.01$) است.

Figure 7. The impact of nano-selenium and sodium selenate treatments on Mg content in spinach Dash cultivar. In each column, means followed by the same letters are not significantly different according Tuckey test ($P < 0.01$).



شکل ۸. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای فسفر در اسفناج رقم دش

مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($p < 0.01$) است.

Figure 8. The impact of nano-selenium and sodium selenate treatments on P content in spinach Dash cultivar. In each column, means followed by the same letters are not significantly different according Tuckey test ($P < 0.01$).

سدیم

محتوای این صفت (۴۹/۶۰ پی پی ام) را دارا بودند. کمترین غلظت این عنصر (۴۲/۲۸ پی پی ام) در تیمار شاهد، بدست آمد (شکل ۱۱).

منگنز

با توجه به نتایج، تیمار با نانوسلنیوم و سلنات سدیم، روندی کاهشی در محتوای منگنز برگ اسفناج را باعث شد. افزایش سطح نانوسلنیوم (تا ۲۰ پی پی ام) و سلنات سدیم (تا ۲۰ میلی گرم در لیتر) موجب کاهش ۸/۹ و ۳۸/۵۶ درصدی غلظت این عنصر نسبت به شاهد شد. کمترین (۷۳/۳۸ پی پی ام) و بیشترین (۱۱۹/۴۴ پی پی ام) میزان منگنز برگ به تیمار ۲۰ میلی گرم در لیتر سلنات سدیم و تیمار شاهد متعلق بود (شکل ۱۲).

سلنیوم

محتوای سلنیوم برگ اسفناج تحت تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات سدیم، به طور قابل توجهی افزایش یافت. به طوری که، افزایش سطح نانوسلنیوم (تا ۲۰ پی پی ام) و سلنات سدیم (تا ۲۰ میلی گرم در لیتر) به ترتیب موجب افزایش ۶۳۷/۵ و ۱۳۷/۵ درصدی در میزان سلنیوم نسبت به تیمار شاهد شد. بیشترین (۰/۵۹ پی پی ام) و کمترین (۰/۰۸ پی پی ام) غلظت سلنیوم به ترتیب در تیمارهای ۲۰ پی پی ام از نانو سلنیوم و شاهد ثبت گردید (شکل ۱۳).

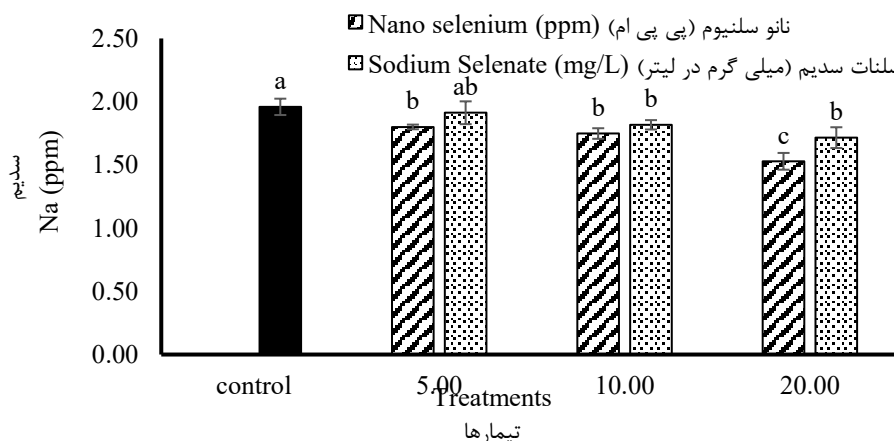
مطابق با شکل ۹، با افزایش غلظت نانوسلنیوم از ۵ تا ۲۰ پی پی ام، میزان سدیم در برگ ۲۲٪ نسبت به شاهد، کاهش پیدا کرد. کمترین (۱/۵۲ پی پی ام) و بیشترین (۱/۹۵ پی پی ام) محتوای سدیم برگ به ترتیب به تیمار ۲۰ پی پی ام نانوسلنیوم و تیمار شاهد تعلق داشت. با افزایش سطوح سلنات سدیم محتوای سدیم برگ روندی کاهشی نشان داد. این کاهش در گیاهانی که با ۲۰ میلی گرم در لیتر از سلنات سدیم تیمار شده بودند، ۱۲/۳٪ بود.

آهن

بر اساس یافته‌ها، کمترین آهن برگ (۰/۰۱۶ پی پی ام) در تیمار شاهد بدست آمد. تیمار با هر دو ترکیب نانوسلنیوم و سلنات سدیم تا بالاترین سطح به ترتیب موجب افزایش ۷۵ و ۶۸/۷۵ درصدی در میزان آهن، شد. بیشترین میزان آهن برگ (۰/۰۲۸ پی پی ام) در تیمار ۲۰ پی پی ام نانوسلنیوم ثبت شد (شکل ۱۰).

روی

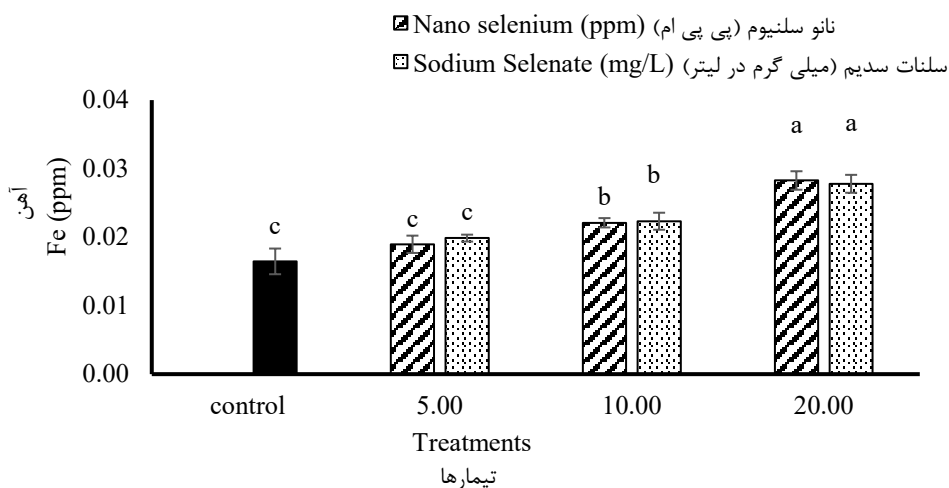
محتوای عنصر روی برگ اسفناج با افزایش سطوح نانوسلنیوم (تا ۲۰ پی پی ام) و سلنات سدیم (تا ۲۰ میلی گرم در لیتر)، روندی افزایشی نسبت به شاهد، نشان داد. گیاهان تیمار شده با نانوسلنیوم ۱۰ پی پی ام با افزایش ۱۷/۳۱ درصدی در غلظت روی، بیشترین



شکل ۹. اثر تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای سدیم در اسفناج رقم دش

مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($p < 0.01$) است.

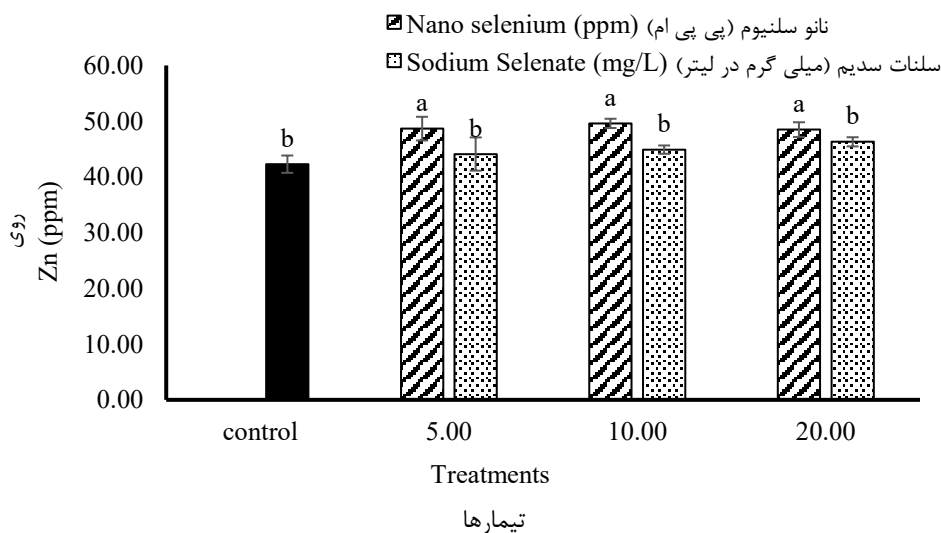
Figure 9. The impact of nano-selenium and sodium selenate treatments on Na content in spinach Dash cultivar. In each column, means followed by the same letters are not significantly different according Tuckey test ($P < 0.01$).



شکل ۱۰. اثر تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای آهن در اسفناج رقم دش

مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($p < 0.01$) است.

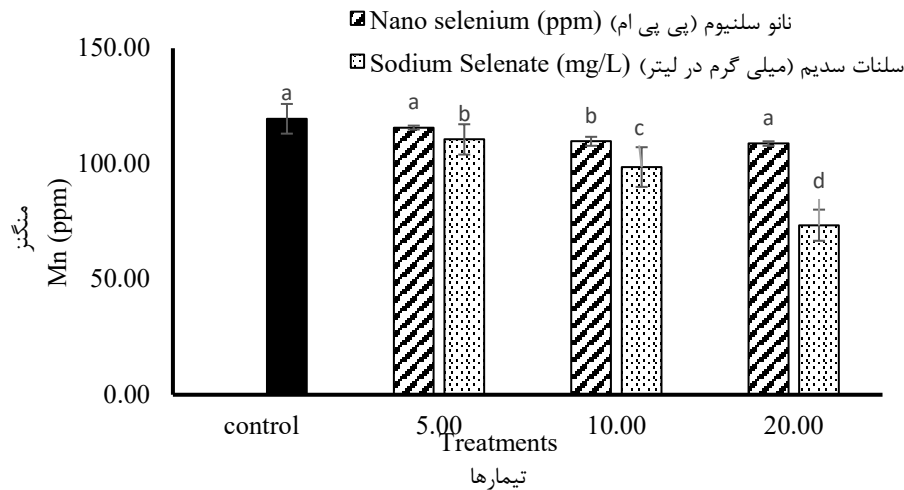
Figure 10. The impact of nano-selenium and sodium selenate treatments on Fe content in spinach Dash cultivar. In each column, means followed by the same letters are not significantly different according Tuckey test ($P < 0.01$).



شکل ۱۱. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای روی در اسفناج رقم دش

مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($p < 0.01$) است.

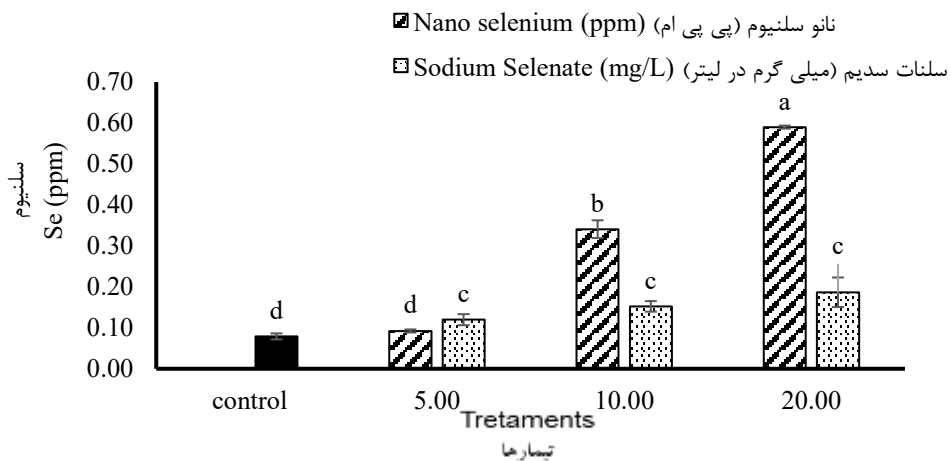
Figure 11. The impact of nano-selenium and sodium selenate treatments on Zn content in spinach Dash cultivar. In each column, means followed by the same letters are not significantly different according Tuckey test ($P < 0.01$).



شکل ۱۲. اثر تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای منگنز در اسفناج رقم دش

مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار با آزمون توکی ($p < 0.01$) است.

Figure 12. The impact of nano-selenium and sodium selenate treatments on Mn content in spinach Dash cultivar. In each column, means followed by the same letters are not significantly different according Tuckey test ($P < 0.01$).



شکل ۱۳. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای سلنیوم در اسفناج رقم دش

مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار با آزمون توکی ($p < 0.01$) است.

Figure 13. The impact of nano-selenium and sodium selenate treatments on Se content in spinach Dash cultivar. In each column, means followed by the same letters are not significantly different according Tuckey test ($P < 0.01$).

(*al.*, 2010). همچنین سطوح بالای سلنیوم، از طریق افزایش میزان ترکیبات فنلی، اکسیداسیون آنزیمی اکسین و دکربوکسیله کردن ایندول استیک اسید (*Gul et al.*, 2017; Guardado-Felix *et al.*, 2019)، منجر به کاهش تقسیم سلولی در سلول‌های ریشه می‌شود (Tavakoli *et al.*, 2020).

نلنوزرات از طریق مسیرهای آپوپلاستی و سیمپلاستی به سمت ریشه حرکت و در نهایت از طریق آوند آبکش و چوب به برگ‌ها و ساقه منتقل می‌شوند (Wang *et al.*, 2012). نانوسلنیوم رشد گیاهان را

سلنیوم، به‌عنوان یک عنصر مفید، رشدونمو گیاه را از طریق افزایش در فتوسنتز و بهبود کارایی فتوسیستم II بهبود می‌بخشد (Ozolt *et al.*, 2008; Siddiqui *et al.*, 2014). غلظت‌های پایین سلنیوم، احتمالاً از راه افزایش میزان نشاسته در کلروپلاست‌ها، رشد گیاه را افزایش می‌دهد (Han -Wens *et al.*, 2010). غلظت‌های بالای سلنیوم، اما، به‌دلیل تغییر در نفوذپذیری غشاء سلول نسبت به یون‌های سدیم، پتاسیم و کلسیم متعاقباً اختلال در تنفس و جذب آب، منجر به کاهش ماده خشک گیاه می‌شود (Dziubinskaa *et*

(2020). کاربرد برگی سلنیوم موجب افزایش قابل توجه محتوای سلنیوم در عدس (Thavarajah *et al.*, 2015)، گندم (Nawaz *et al.*, 2015)، شاهی (Moteshare *et al.*, 2022) و اسفناج (Khosravi *et al.*, 2020) شده است که با نتایج به دست آمده در این تحقیق مطابقت دارد.

سلنیوم جذب و توزیع عناصر ضروری، به علاوه متابولیسم گیاه را تنظیم و تعادل یونی و یکپارچگی سلول‌های گیاه را حفظ می‌نماید (Feng *et al.*, 2013). متابولیسم سلنیوم و نیتروژن مرتبط هستند؛ سلنیوم با اثر بر ناقلین نیترات در غشاء، سبب کاهش جذب نیترات و افزایش فعالیت آنزیم‌های نیترات ردوکتاز و نیتريت ردوکتاز می‌شود. از طرفی، نیاز گیاهان به ترکیبات نیتروژنی موجب افزایش آسمیلاسیون گوگرد می‌شود. لذا کاربرد سلنیوم سبب افزایش متابولیسم گوگرد می‌شود (Amerian and Nosratti, Rios *et al.*, 2010). چنین رخدادی در نعنای فلفلی (Jafari & Moghaddam, 2021)، گندم (Hajiboland & Sadeghzade, 2014) و پیاز (Golubkina *et al.*, 2012) مشاهده شده است. البته همسو با یافته‌های ما، سلنیوم در مقادیر کمتر، تاثیری افزایش بر میزان نیتروژن در باقلا (*Vicia faba*) (Boghdady *et al.*, 2017) و انار (Zahedi *et al.*, 2019) داشته که می‌تواند ناشی از القا متابولیسم نیتروژن توسط نانو ذرات باشد (Gao *et al.*, 2008).

منیزیم، پتاسیم و فسفر، عناصری هستند که موجب افزایش محتوای کلروفیل a و کلروفیل کل می‌گردند. تیمار با نانوذرات سلنیوم با بهبود قدرت گیاهچه، رشد و طویل شدن سریع سلول، حفاظت اسمزی، گیاه را قادر می‌سازد تا ناقل‌ها و آنتی پورترهای مرتبط با جابجایی عناصر مذکور بر غشای سلول و دیواره واکوئل، را توسعه دهد (Ishfaq *et al.*, 2022; Zielewicz *et al.*, 2020). کاربرد برگی سلنیوم موجب افزایش کلسیم و فسفر در ذرت (Hawrylak-

Iqbal et al.,) توسط بهبود وضعیت آبی سلول (Jiang *et al.*, 2015)، افزایش در اندازه و تعداد سلول (Kahakachchi *et al.*, 2017) و افزایش استحکام برگ (Jia *et al.*, 2018; *et al.*, 2004) و رشد ریشه را، توسط مهار سیگنالینگ اتیلن (Rezvani *et al.*, 2018; Rezende *et al.*, 2012) و القاء تقسیم سلولی در سلول‌های مرستمی نوک ریشه (Du *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019)، ارتقاء می‌بخشد. همسو با یافته‌های این تحقیق، تیمار با ترکیبات حاوی سلنیوم موجب افزایش طول ساقه در گیاه خیار (Mousavi *et al.*, 2022)، افزایش وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه در گیاه نعنای فلفلی (Jafari & Moghaddam, 2023)، بهبود مشخصات رشدی در کاهو (Khanmohammadi *et al.*, 2025) و ویژگی‌های رشدی در گیاه تنباکو (Liu *et al.*, 2020) شده است. همچنین محلول پاشی برگی با نانوذرات سلنیوم، وزن تر و خشک برگ، تعداد برگ و ارتفاع را در گیاه گشنیز (Ghazi, 2018) و تعداد برگ، وزن تر ساقه و ارتفاع بوته را در گیاه نخود افزایش داده است (Shedeed *et al.*, 2018; El-Sawy *et al.*, 2019). مقایسه تیمار سلنیوم عنصری و نانوسلنیوم در گیاه گوجه‌فرنگی (Abulghasemi & Haghghi, 2018) و گیاه 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.

محتوای سلنیوم گیاهان می‌تواند توسط کوددهی خاکی، کاربرد برگی، کشت هیدروپونیک، کشت آئروپونیک و پرایمینگ بذر در یک محلول حاوی سلنیوم افزایش یابد (Hassan *et al.*, 2014). جذب سلنیوم توسط گیاهان و کارایی بیولوژیکی آن بطور نزدیکی با روش کاربرد خارجی سلنیوم، وضعیت کود حاوی سلنیوم، خصوصیات خاک و گونه گیاه مرتبط است (Hassan Wu *et al.*, *et al.*, 2014; Nawaz *et al.*, 2015).

اسفناج و Mohammadi و همکاران (۲۰۲۲) در کاهو و Khosravi و همکاران (۲۰۲۲) در شاهی همخوانی دارد. نتایج این پژوهش هماهنگ با نتایج به‌دست آمده در نعنای فلفلی (Jafari & Moghadda, 2023) است که کاهش غلظت منگنز در برگ را در سطوح بالای سلنات سدیم و نانوسلنیوم نشان داد.

باتوجه به نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر، سلنات سدیم در سطوح مناسب می‌تواند برخی صفات رشدی گیاهچه اسفناج رقم دش را بهبود بخشد. به‌طوری‌که بهترین سطح جهت افزایش طول ریشه، بالاترین سطح سلنات سدیم بود. با این وجود کاهش در محتوای منگنز تحت همین تیمار رخ داد. نتایج این تحقیق، همچنین نشان‌دهنده نقش مثبت نانوسلنیوم بر مشخصه‌های رشدی، و برخی عناصر ماکرو و میکرو، بود. به‌طوری‌که، غلظت بالای نانوسلنیوم (۲۰ پی‌پی‌ام) باعث افزایش فسفر، آهن و سلنیوم شد. همچنین این تیمار موجب کاهش محتوای کلسیم، منیزیم، سدیم و تجمع نیترات برگ در اسفناج رقم دش گردید. به‌طوری‌که اعمال کمترین سطح نانوسلنیوم، موجب ثبت بیشترین تجمع نیترات در برگ گردید. البته نقش مثبت سطح متوسط نانوسلنیوم (۱۰ پی‌پی‌ام) بر صفاتی چون تعداد برگ، ماده خشک ریشه، محتوای منیزیم و روی پررنگ‌تر بود. به‌طور کلی، از آنجایی که سطوح مختلف تیمارهای مورد استفاده در بهبود صفات رشدی و یا تغییر محتوای عناصر ماکرو و میکرو اثرات متفاوتی نشان دادند، لذا انتخاب نوع سلنیوم (بالک و یا نانو) و همچنین سطح مورد نیاز آن، می‌تواند براساس هدف آزمایش انجام شده و موجب ثبت نتایج مطلوب گردد.

سپاسگزاری

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

(Nowak, 2008)، افزایش فسفر و پتاسیم در باقلا (Boghdady *et al.*, 2017) شده است. همچنین کاربرد سلنیوم (هم به صورت نانو و هم بالک) موجب افزایش فسفر، پتاسیم و کلسیم در انار (Zahedi *et al.*, 2019)؛ افزایش منیزیم و پتاسیم در درمنه (Logvinenko *et al.*, 2022) شده است. در آزمایش حاضر افزایش غلظت سلنیوم سبب افزایش جذب فسفر و در نتیجه افزایش رشد ریشه شد. در واقع قدرت ریشه برای جذب فسفر افزون می‌شود (Farsaraei & Moghaddam, 2020). در پژوهش حاضر، کاهش جذب عناصر کلسیم و منیزیم، در شرایط غلظت زیاد سلنیوم، توسط اسفناج را احتمالاً می‌توان به کاهش حلالیت و فراهمی عناصر، کاهش رشد و تعرق و توسعه سیستم ریشه‌ای گیاه نسبت داد (Ishfaq *et al.*, 2022; Zielewicz *et al.*, 2020).

نانوذرات سلنیوم موجب کاهش نسبت سدیم به پتاسیم در گیاه می‌گردد که ممکن است به علت فتوسنتز و متابولیسم سازگار شده با سلنیوم در بافت برگ باشد که با تغییر روابط منبع/مخزن و سیستم ریشه، موجب تنظیم جذب و توزیع مجدد عناصر ضروری گردد (Ghazi, 2018). کاربرد برگی سلنیوم موجب کاهش سدیم در گندم (Nawaz *et al.*, 2015)؛ سیر و پیاز (Golubkina *et al.*, 2021) شده است. اثرات مثبت نانوذرات سلنیوم در کاهش کاتیون‌های مضر مانند سدیم، به علت رابطه آنتاگونیستی این عنصر با پتاسیم می‌باشد (Hussein *et al.*, 2019, Maleki *et al.*, 2021).

سلنیوم نقش فعالی در جذب برخی عناصر میکرو ایفا می‌کند (Feng & Wei, 2012). گیاهان رشد یافته در محیط کشت‌های غنی از سلنیوم، افزایش آهن (Nawaz *et al.*, 2015) و روی (Zahedi *et al.*, 2019) داشته‌اند. براساس یافته‌های این پژوهش، با کاربرد نانوسلنیوم میزان روی افزایش پیدا کرد که با نتایج Moteshare Zadeh و همکاران (۲۰۲۰) در

References

- Abulghasemi, R. & Haghghi, M. (2018). Study of changes in greenhouse tomatoes treated with beneficial elements in the form of metal and nanometals. *Plant Process and Function*, 6 (19), 153-162. (In Persian).
- Adhikary, S., Biswas, B., Chakraborty, D., Timsina, J., Pal, S., Chandra Tarafdar, J., Banerjee, S., Hossain, A. & 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. & 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.
- 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(8), 67-80. doi: 10.22034/iuvs.2021.521119.1136
- Bisht, N., Phalswal, P. & Khanna, P. K. (2022). Selenium nanoparticles: A review on synthesis and biomedical applications. *Mater Advance*, 3, 1415–1431. <https://doi.org/10.1039/D1MA00639H>.
- Boghdady, M. S., Desoky, E. M., Azoz, S. N. & Nassar, M. A. (2017). Effect of Selenium on Growth, Physiological Aspects and Productivity of Faba Bean (*Vicia faba* L.). *Egypt. J. Agron*, 39(1), 83- 97.
- Chauhan, R., Awasthi, S., Singh, A. P., Srivastava, S., Pande, V., Tripathi, R.D. & Kumar, A. (2017). Heavy metal tolerance in crop plants: physiological and biochemical aspects. Plant adaptation strategies in changing environment. Springer, Singapore, 253–26.
- Dadar, M., Adel, M., Nasrollahzadeh Saravi, H. & Fakhri, Y. (2017). Trace element concentration and its risk assessment in common kilka (*Clupeonella cultriventris* caspia Bordin, 1904) from southern basin of Caspian Sea. *ToxinRev.* 36(3), 222-227.
- Desoky, ES., Merwad, AR., Abo El-Maati, MF., Mansour, E., Arnaout, SM., Awad, MF., Ramadan, MF., & Ibrahim, SA . 2021. Physiological and biochemical mechanisms of exogenously applied selenium for alleviating destructive impacts induced by salinity stress in bread wheat. *Agronomy*, 11: 926. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050926>
- Du, B., Luo, H., He, L., Zhang, L., Liu, Y., Mo, Z. Z., Pan, S., Tian, H., Duan, M., & Tang, X. (2019). Rice seed priming with sodium selenate: Effects on germination, seedling growth, and biochemical attributes. *Scientific Reports*, 9(1), 1-9. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-40849-3>
- El-Sawy, S. M., Fawzy, Z. F., El-Bassiony, A. M., & 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, SI, 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>
- Farsaraei, S. & Moghaddam, M. (2020). Influence of three types of superabsorbents on growth characteristics and elements uptake in basil under salinity stress. *Horticultural Plants Nutrition*, 3(2), 159–174.
- Feng, R. W., Wei, C. Y. & Tu, S. X. (2013). The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. *Environmental and Experimental Botany*, 87, 58–68.
- Feng, R. W., & Wei, C. Y. (2012). Antioxidative mechanisms on selenium

- accumulation in *Pteris vittata* L., a potential selenium phytoremediation plant. *Plant, Soil and Environment*, 58 (3), 105–10.
- Fernandes, J., Hu, X., Smith, M. R., Go, Y. M. & Jones, D. P. (2018). Selenium at the redox interface of the genome, metabolome and exposome. *Free Radic Biol Med*, 127, 215–227.
- Florence, D. (1998). Evaluation of nano- and microparticle uptake by the gastrointestinal tract. *J Drug Target*, 34, 221–223. [https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(98\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S0169-409X(98)00041-6)
- Gao, F.Q., Liu, C., Qu, C.X., Zheng, L., Yang, F., Su, M.G. & Hong, F.H. (2008). Was the improvement of spinach growth by nano-TiO₂ treatment related to the changes of Rubisco activase? *Biometals*, 21, 211–217.
- Ghazi, D.A. (2018). The Contribution of Nano-Selenium in Alleviation of Salinity Adverse Effects on Coriander Plants. *J. Soil Sci. and Agric. Eng*, 9 (12), 753-760.
- Golubkina, N. A., G. E. Folmanis, O. V. Kosheleva, & Tananaev, I. G. (2012). “Comparative evaluation of selenium accumulation by allium species after foliar application of selenium nanoparticles, sodium selenite and sodium selenate,” *Dokl. Biol. Sci*, 444, 176–179.
- Golubkina, N., Moldovan, A., Fedotov, M., Kekina, H., Kharchenko, V., Folmanis, G., Alpatov, A. & Caruso, G. (2021). Iodine and Selenium Biofortification of Chervil Plants Treated with Silicon Nanoparticles. *Plants*, 10, 2528.
- Guardado-Felix, D., Serna-Saldivar, S. O., Gutierrez-Urbe, J. A., & ChuckHernandez, C. (2019). Selenium in germinated chickpea (*Cicer arietinum* L.) increases the stability of its oil fraction. *Plants*, 8(5), 113. <https://doi.org/10.3390%2Fplants8050113>
- Guillin, O. M., Vindry, C., Ohlmann, T. & Chavatte, L. (2019). Selenium, seleno-proteins and viral infection. *Nutrients*, 11, 2101. <https://doi.org/10.3390/nu11092101>
- Gul, H., Kinza, S., Shinwari, Z.K., & Hamayun, M. (2017). Effect of selenium on the biochemistry of *Zea mays* under salt stress. *Pakistan Journal of Botany*, 49, 25-32. <https://www.researchgate.net/publication/317633064>.
- Haghighi, M., Abolghasemi, R. & Silva, J.A.T. (2014). Low and high temperature stress affect the growth characteristics of tomato in hydroponic culture with Se and nano-Se amendment. *Sci Horti Amsterdam*, 178, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.006>
- Hajiboland, H. & Sadeghzade, N. (2014) “Effect of selenium on CO₂ and assimilation under low and adequate nitrogen supply in wheat (*Triticum aestivum* L.),” *Pho-NO-3 tosynthetica*, 52, 501–510.
- Han-Wens, S., Jing, H., Shu-Xuan, L., & 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>
- Hassan, R.E., Éva, D., Neama, A.A., Tarek, A.A., Tarek, A.S., Attila, S., József, P. & Miklós, F. (2014) Selenium and nano-selenium in agroecosystems. *Environ Chem Lett* 12:495–510. <https://doi.org/10.1007/s10311014-0476-0>
- Hawrylak-Nowak, B. (2008). Effect of selenium on selected macronutrients in maize plants. *J Elem*, 13, 513–519.
- Huang, S., Kan, Y. & Tang, Y. (2020). Effect of bioorganic selenium on yield, quality and selenium content of green tea. *Journal Tea Commun*, 47: 610–616.
- Hussein, H. A. A., Darwesh, O. M. & 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.
- Iqbal, M., Hussain, I., Liaqat, H., Ashraf, M. A., Rasheed, R. & Rehman, A. U. (2015). Exogenously applied selenium reduces oxidative stress and induces heat tolerance in spring wheat. *Plant Physiol. Biochem*, 94, 95–103.
- Ishfaq, M., Wang, Y., Yan, M., Wang, Z., Wu, L., Li, C. & Li, X. (2022). Physiological Essence of Magnesium in Plants and Its

- Widespread Deficiency in the Farming System of China. *Front. Plant Sci*, 13, 802274.
- Jafari, H. & 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>
- Jani, P.U., McCarthy, D.E. & Florence, A.T. (1992) Nano-spheres and microsphere uptake via Peyer's patches: observation of the rate of uptake in the rat after a single oral dose. *Int J Pharmaceut*, 86, 239-246. [https://doi.org/10.1016/0378-5173\(92\)90202-D](https://doi.org/10.1016/0378-5173(92)90202-D)
- Jia, H., Song, Z., Wu, F., Ma, M., Li, Y., Han, D., Yang, Y., Zhang, S., & Cui, H. (2018). Low selenium increases the auxin concentration and enhances tolerance to low phosphorus stress in tobacco. *Environ. Exp. Bot*, 153, 127-134.
- Jiang, C., Zu, C., Lu, D., Zheng, Q., Shen, J. & 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.
- Joshi, H., Kumar, R., Pandey, D. S., Jariwala, C. H. (2020). Effect of plasma and nanotechnology on nutrient use efficiency of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9 (2), 137-141.
- Kahakachchi, C., Boakye, H. T., Uden, P. C., & Tyson, J. F. (2004). Chromatographic speciation of anionic and neutral selenium compounds in Se-accumulating *Brassica juncea* (Indian mustard) and in selenized yeast. *J. Chromatogr. A*, 1054, 303-312.
- Kawazu, Y., Okimura, M., Ishii, T. & Yui, S. (2003). Varietal and seasonal differences in oxalate content of spinach. *Scientia Horticulturae*, 97 (3-4), 203-210. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(02\)00154-1](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(02)00154-1).
- Khan, Z., Thounaojam, T. & Chowdhury, D. (2023). The role of selenium and nano selenium on physiological responses in plants. *Plant Growth Regulation*, 100, 409-433. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-00988-0>.
- Khanmohammadi, H., Behrouz Ismailpour, B., Azarmi, R., Tahami, S. K., Shahi, A., Aslani, Z. and Maham, N. (2025). The effect of Serendipitia indica fungus and foliar application of selenate on physiological and morphological traits of lettuce under the stress of the heavy metal cadmium in hydroponic culture. *Journal of Vegetables Sciences*, 9(17), 101-124. (In Persian).
- Khosravi, S., ValizadehKaji, B., & Abbasifar, A. (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. <https://doi.org/10.22059/ijhst.2021.325036.472>
- Li, Q., Zhang, J., Yang, R.Y., Gao, Z.J., Shan, J.L. & Liang, P.X. (2018). Evaluation and exploration of Se-enriching effects of microbial nano-selenium on several kinds of vegetables. *Agr Biotechnol*, 7, 26-28. (in Chinese with English abstract).
- Li, R., He, J., Xie, H., Wang, W., Bose, S.K., Sun, Y.Y. & 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., & 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. & 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>
- Maleki Lajayer, H., Soltanzadeh-pormehr, S., Torabi-giglou, M., Poorbeyrami Hir, Y. and Chamani, E. (2021). Effects of Pre-Treatment with Salicylic Acid and Silicon Nanoparticles on Germination, Growth and Physiological Indices of Savory (*Satureja hortensis*) Seeds under Lead Heavy Metal Stress. *Journal of Vegetables Sciences*, 4(8), 147-160. (In Persian).
- Mashayekhi, K. & Shomali, A. (2018). Botany, physiology and culture of vegetables. Gorgan Univ. Press, 502p. (In Persian).
- Moteshare Zadeh, B., Ghorbani, S., & Alikhani, H. A. (2020). Spinach (*Spinacia oleracea*) Nutritional Responses to Selenium Application. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(20), 2537–2550. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1844729>
- Mohammadi, M., Abbasifar, A., & ValizadehKaji, B. (2022). Nitrate accumulation and physicochemical characteristics of lettuce as affected by sodium selenite and synthesized selenium nanoparticles. *International Journal of Vegetable Science*, 28(6), 570-582. (In Persian).
- Mousavi, A. A., Roosta, H. R., Esmaeilzadeh, M., & 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).
- Nawaz, F., Ahmad, R., Ashraf, M.Y., Waraich, E.A. & Khan, S.Z. (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.
- Ozbolt, L., Kreft, S., Kreft, I., Germ, M., & Stibilj, V. (2008). Distribution of selenium and phenolics in buckwheat plants grown from seeds soaked in Se solution and under different levels of UV-B radiation. *Food Chemistry*, 110, 691-696. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.073>.
- Raina, M., Sharma, A., Nazir, M., Kumari, P., Rustagi, A., Hami, A., Bhau, B. S., Zargar, S. M. & Kumar, D. (2021). Exploring the new dimensions of selenium research to understand the underlying mechanism of its uptake, translocation, and accumulation. *Physiol Plant*, 171, 882–895.
- Rezaei Nik, M., Abbasifar, A., & 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
- Rezende, R. A. L. S., Rodrigues, F. A., Soares, J. D. R., Silveira, H. R. D. O., Pasqual, M., & Dias, G. D. M. G. (2018). Salt stress and exogenous silicon influence physiological and anatomical features of in vitro-grown cape gooseberry. *Cienc. Rural*, 48, e20170176.
- Rezvani, N., Sorooshzadeh, A., & Farhadi, N. (2012). Effect of nano-silver on growth of saffron in flooding stress. *Proc. World Acad. Sci. Eng. Technol*, 1, 517–522.
- Rios, J., Blasco, B., Rosales, M.A., Sanchez-Rodriguez, E., Leyva, R., Cervilla, L.M., Romero, L. & Ruiz, J.M. (2010). Response of nitrogen metabolism in lettuce plants subjected to different doses and forms of selenium. *Journal of the science of food and agriculture*, 90 (11), 1914-1919.
- Salama, D. M., Abd El-Aziz, M. E., Rizk, F. A. & Abd Elwahed, M. S. A. (2020). Applications of nanotechnology on vegetable crops. *Chemosphere*, 129026.
- Saffar Yazdi, A, Lahouti, M. & Ganjeali, A. (2012). The Effects of Different Selenium Concentrations on Some Morphophysiological Characteristics of Spinach

- (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of Horticultural Science*, 26(3), 292-300. <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.15211>
- Shedeed, Shaymaa I., Fawzy, Z. F., & El-Bassiony, A.M. (2018). Nano and Mineral Selenium Foliar Application Effect on Pea Plants (*Pisum sativum* L.). *Bioscience Research*, 15(2), 645-654.
- Sher, A., Ul-Allah, S., Sattar, A., Ijaz, M., Ahmad, W., Bibi, Y. & 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>
- Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, M. H., Faisal, M., & Al Sahli, A. A. (2014). Nano-silicon dioxide mitigates the adverse effects of salt stress on *Cucurbita pepo* L. *Environ. Toxicol. Chem*, 33 (11), 2429–2437.
- Song, D., Lu, Z., Wang, F. & Wang, Y. (2017). Biogenic nano-selenium particles effectively attenuate oxidative stress-induced intestinal epithelial barrier injury by activating the Nrf2 antioxidant pathway. *J Anim Sci*, 95, 20–21.
- Surai, P. F., Kochish, I. I., Fisinin, V.I. & Velichko, O. A. (2018). Selenium in poultry nutrition: from sodium selenite to organic selenium sources. *J Poult Sci*, 55, 79–93.
- Tavakoli, S., Enteshari, S. & Yousefifard, M. (2020). Investigation of the effect of selenium on growth, antioxidant capacity and secondary metabolites in *Melissa officinalis*. *Plant Physiology*, 10 (2), 3125-3134. <https://doi.org/10.30495/ijpp.2020.672572>
- Thavarajah, D., Thavarajah, P., Vial, E., Gebhardt, M., Lacher, C., Kumar, S. & Combs, G. F. (2015). Will selenium increase lentil (*Lensculinaris medik*) yield and seed quality? *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00356>
- Tran, P. & Webster, T. J. (2008). Enhanced osteoblast adhesion on nanostructured selenium compacts for anti-cancer orthopedic applications. *Int J Nanomed*, 3, 391–396. <https://doi.org/10.2147/IJN.S3801>.
- Wang, C., Yue, L., Cheng, B., Chen, F., Zhao, X., Wang, Z., & Xing, B. (2022). Mechanisms of growth-promotion and Se-enrichment in *Brassica chinensis* L. by selenium nanomaterials: beneficial rhizosphere microorganisms, nutrient availability, and photosynthesis. *Environmental Science Nano*, 9: 302–312.
- Wang, Y.D., Wang, X., & 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.jpro.2011.12.030>
- Wu, M., Cong, X., Li, M., Rao, S., Liu, Y., Guo, J., Hu, S., Chen, S. h., Xu, F., Cheng, S. h., Liu, L. & 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>
- Yin, H., Qi, Z., Li, M., Ahammed, GJ., Chu, X., & Zhou, J. (2019). Selenium forms and methods of application differentially modulate plant growth, photosynthesis, stress tolerance, selenium content and speciation in *Oryza sativa* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169: 911–917. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.080>
- Zahedi, S. M., Sadat Hosseini, M., Daneshvar Hakimi Meybodi, N. & 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, F. J., & McGrath, S. P. (2009). Biofortification and phytoremediation.

Current Opinion Plant Biology, 12, 373–80.

<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.005>

Zielewicz, W., Wróbel, B. & Niedbała, G. (2020). Quantification of chlorophyll and carotene pigment content in mountain melick (*Melica nutans* L.) in relation to edaphic variables. *Forests*, 11, 1197.

Zhang, J., Wang, X. & Xu, T. (2008). Elemental Selenium at Nano Size (Nano-Se) as a Potential Chemopreventive Agent with Reduced Risk of Selenium Toxicity: Comparison with Se-Methyl seleno-cysteine in Mice, *Toxicological Sciences*, 101 (1), 22-31. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfm221>

Zhang, F., Li, X. & Wei, Y. (2023). Selenium and Seleno-proteins in Health. *Biomolecules*, 13, 799. <https://doi.org/10.3390/biom13050799>