

تأثیر سلیوم (نانو و بالک) بر جذب عناصر پر- و کم‌مصرف و ویژگی‌های رشدی

اسفناج (*Spinacia oleracea* L. cv. Virofly)

The Impact of Selenium (Nano and Bulk) on the Absorption of Macro- and Microelements and Growth Characteristics of Spinach (*Spinacia oleracea* L. cv. Virofly)

محمد قاسمی، منصوره شمیلی*، عبدالمجید میرزاعلیان دستجردی

گروه علوم باغبانی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: (shamili@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۹

چکیده

گیاهان به عنوان بهترین منبع سلیوم برای انسان‌ها و حیوانات، این عنصر را از خاک جذب و وارد زنجیره‌ی غذایی می‌کنند. در پژوهش حاضر بررسی اثرات سلیوم (به شکل بالک و نانو) بر جذب عناصر پر و کم‌مصرف و ویژگی‌های رشدی اسفناج در شرایط گلخانه مورد توجه قرار گرفت. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. فاکتورها شامل محلول‌پاشی با نانو سلیوم (پنج، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام)، سلنات سدیم (پنج، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام) و آب مقطر (گیاهان کنترل) بود. بر اساس یافته‌ها، با بالا رفتن سطوح تیمارها، افزایش در ماده خشک ریشه، طول اندام هوایی، تعداد برگ، محتوای کلسیم و سلیوم مشاهده شد. در مقابل سطوح بالای هر دو تیمار موجب کاهش محتوای نیترات، سدیم و منگنز برگ گردید. در سطح ۱۰ پی‌پی‌ام هر دو تیمار، ماده خشک برگ و محتوای فسفر و منیزیم، افزایش و در سطوح بالاتر، کاهش این صفات ثبت شد. بیشترین طول ریشه و محتوای آهن و روی در غلظت پنج پی‌پی‌ام نانوسلیوم مشاهده شد. این امر نشان دهنده اثر افزایشی غلظت‌های پایین سلیوم بر تقسیم سلولی مریستم نوک ریشه و همچنین روابط آبی گیاه، از طریق انتقال عناصر ضروری، می‌باشد. با این حال، در سطوح بالاتر هر دو تیمار (۲۰ پی‌پی‌ام)، کاهش صفات مذکور رخ داد. در نهایت، از بین سطوح مختلف هر دو تیمار سلیوم، بهترین تیمار، ۱۰ پی‌پی‌ام نانوسلیوم مشخص شد. با این وجود، می‌توان بیان کرد که انتخاب بهترین تیمار، بستگی به نوع گیاه، نوع تیمار مصرفی و غلظت موثر بر صفات مورد بررسی دارد.

واژه‌های کلیدی: آهن، تعداد برگ، روی، سدیم، سلنات سدیم، فسفر، نانوسلیوم.

مقدمه

سلیوم یکی از عناصر غذایی ضروری و کم مصرف برای رشد و نمو انسان‌ها و حیوانات می‌باشد (Hartikainen, 2005). سلنوپروتئین‌ها، در سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی و تنظیم اکسایش پستانداران شرکت می‌کنند (Ingold *et al.*, 2018) و کمبود آنها منجر به اختلال عملکرد سیستم ایمنی و زوال شناختی می‌شود (Guillin *et al.*, 2019; Xie *et al.*, 2021). غلظت سلیوم (۰/۰۱ تا دو میلی گرم در هر کیلوگرم) در خاک‌ها ناکافی اعلام شده و در نتیجه بنا به برآوردها، ۱۵٪ تا ۲۰٪ کودکان و بزرگسالان جهان، دچار کمبود سلیوم هستند (Thavarajah *et al.*, 2017). گیاهان به عنوان بهترین منبع سلیوم برای انسان‌ها و حیوانات، این عنصر را از خاک جذب و وارد زنجیره‌ی غذایی می‌کنند (Malagoli *et al.*, 2015). نانوتکنولوژی یک زمینه امیدبخش از مهندسی زیستی است که از ویژگی‌های منحصر به فرد نانوذرات (با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر) بهره می‌برد (Duhan *et al.*, 2017). نانوذرات سلیوم، به عنوان نانوذرات پایدار، جهت استفاده به عنوان کود در کشاورزی معرفی شده‌اند (Babajani *et al.*, 2019). فرم آلی سلیوم در گیاهان، سلنات و سلنیت است (Li *et al.*, 2020). در مقایسه با سلنات و سلنیت، فرم نانوسلیوم سمیت کمتر و زیست فعالی بالاتری دارد (Djanaguiraman *et al.*, 2018). محلول پاشی برگ گیاهان با

نانوسلنیوم، با بهبود مکانیسم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی، شاخص‌های فتوسنتزی و متابولیت‌های ثانویه همراه بوده است (Zsiros et al., 2019, Djanaguiraman 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). در آزمایشی دیگر بر تنباکو، تجمع نیتروژن در تیمار پنج میلی گرم در لیتر نانو سلنیوم، بالاترین میزان را داشت (Liu et al., 2020). محلول پاشی با سلنیوم توانست به‌طور مؤثر وزن ۱۰۰ جوانه گیاه چای را افزایش دهد. وزن ۱۰۰ جوانه به تدریج تا غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر 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 (Huang et al., 2020). ژنوتیپ‌های گلرنگ با تیمار سلنیوم بهبود قابل توجهی در ارتفاع بوته، تعداد بوته، عملکرد بیولوژیکی داشتند و همچنین کیفیت روغن آن افزایش یافت. بیشترین مقدار با محلول پاشی ۲۰۰ میلی گرم 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 (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، بر و روی) و عملکرد را افزایش دادند (Adhikary et al., 2022).

مطالعه تأثیر غلظت‌های مختلف سلنیوم (صفر، یک، دو، چهار، شش و ۱۰ میلی گرم 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 (یک، دو و چهار میلی گرم در لیتر) و نانو ذرات سبز سلنیت سدیم (یک، دو و چهار میلی گرم در لیتر) و شاهد (آب مقطر) به صورت محلول پاشی بر گیاه برنج، خصوصیات مورفوفیزیکی، فیتوشیمیایی و میزان تجمع نیترات در گیاه اسفناج، نشان داد تیمار چهار میلی گرم در لیتر سلنیت سدیم و یک میلی گرم در لیتر نانو ذرات سلنیوم به‌طور معنی‌داری باعث افزایش وزن تر و خشک بوته، کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل شدند. در اکثر تیمارها، میزان فسفر، پتاسیم و سلنیوم بیشتر از شاهد بود (Rezaei Nik et al., 2022).

اسفناج^۱ متعلق به تیره آمارانتاسه^۲، گیاهی یکساله و روز بلند، جزء سبزی‌های برگی مهم فصل سرد است (Mashayekhi & Shomali, 2018). اسفناج تازه حاوی مواد قندی، لسیتین^۳، سکرین^۴، کلروفیل، کاروتن، ساپونین^۵، ترکیبات فنلی، کافئیک اسید^۶، ارتوکوماریک اسید^۷، پاراکوماریک اسید، میریستین^۸ و اگزالات‌ها^۹ می‌باشد (Aisha et al., 2013).

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 آن در غلظت‌های بالا، در پژوهش حاضر بررسی اثرات سلنیوم (به دو شکل نمک و نانو) بر خصوصیات رشدی، فیزیولوژیک و آنتی‌اکسیدانی گیاه اسفناج مورد توجه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آماده سازی مواد گیاهی و تیمارها

پژوهش حاضر در سال ۱۴۰۱ در دانشکده کشاورزی دانشگاه هرمزگان (27.27° N, 56.44° E) به اجرا درآمد. بذر اسفناج هلندی و یروفلا^{۱۰} از شرکت فردین کشت تهیه گردید. سلنات سدیم^{۱۱} از شرکت مرک^{۱۲} تهیه شد. نانو ذره سلنیوم مورد استفاده در این آزمایش از شرکت نانوسانی (مشهد، ایران)، خریداری شد. محدوده سایز ذرات ۱۰-۴۵ نانومتر، چگالی ظاهری ۳/۸۹ گرم بر سانتیمتر مکعب، شکل تقریباً کروی، پتانسیل زتا^{۱۳}، میانگین زی، و شاخص پراکندگی نانو ذره نیز به ترتیب ۳۲/۸، ۴۱/۳۵ و ۰/۵۶۵ میلی‌ولت بود. تیمارها شامل محلول پاشی با نانو سلنیوم (پنج، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام)، سلنات سدیم (پنج، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام) و آب مقطر (گیاهان کنترل) بود.

کشت گیاهان در شرایط گلخانه

بستر مورد استفاده برای کاشت بذرها، ترکیب خاک باغچه، خاک برگ و ماسه (۱:۱:۱) بود. گیاهان در دمای متوسط روزانه ۲۷ ± ۲ و دمای متوسط شبانه ۲۴ ± ۲ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۰ درصد کشت شدند. بذور در کرت‌هایی به ابعاد ۸/۰ × ۱

۱- Spinach (*Spinacia oleracea* L.) ۲- Amaranthaceae ۳- Lecithin ۴- Secretin ۵- Saponins ۶- Caffeic acid ۷- o-Coumaric acid ۸- Myristicin ۹- Oxalates ۱۰- *Spinacia oleracea* L. cv. Virofly ۱۱- Na₂SeO₃ ۱۲- Merck ۱۳- Zeta

متر مربع (فاصله کرت ها 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 هر سه روز یکبار تا مرحله ۴ برگی انجام شد و پس از آن هر دو روز یکبار انجام شد. پس از سه 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 (پنج، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام)، سلنات سدیم (پنج، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام) 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. سپس ۱۰ روز پس از محلول پاشی دوم، اندازه‌گیری صفات انجام شد (Tabatabaie Roodsati *et al.*, 2023).

سنجش صفات مورفولوژیکی

در مرحله رشد رویشی، ماده خشک برگ و ریشه با توزین (ترازوی دیجیتالی ۰/۰۰۱ گرم) نمونه‌های برگ و ریشه، خشک کردن نمونه‌ها در آون (۷۰ درجه سلسیوس، ۷۲ ساعت) و توزین مجدد محاسبه شد. طول اندام هوایی و ریشه با استفاده از خط کش اندازه‌گیری و ثبت شد. تعداد برگ نیز شمارش شد.

سنجش نیترات

بدین منظور از دستگاه نیترات‌سنج پرتابل^۱ استفاده گردید. چند قطره از عصاره برگ بر صفحه دستگاه ریخته و مقدار نیترات بر حسب پی‌پی‌ام قرائت گردید.

سنجش عناصر پر و کم مصرف (کلسیم، منیزیم، فسفر، سدیم، آهن، روی، منگنز و سلنیوم) برگ

نمونه‌های برگ شسته، برش‌های نازک زده و به مدت یک هفته در مجاورت هوا خشک شد. سپس، نمونه‌ها در آون (۴۵ درجه سلسیوس، دو 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 ۱۲/۵ میلی لیتر 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 سلسیوس بر روی 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 میلی لیتر رسانده شد. سنجش عناصر توسط دستگاه طیف سنجی نشری پلاسمای جفت شده القایی^۲ (سری ۷۰۰) انجام شد. مقادیر عناصر با استفاده از محلول استوک استاندارد آنها و منحنی‌های کالیبراسیون بر حسب پی‌پی‌ام محاسبه شد (Dadar *et al.*, 2017).

واکاوی آماری داده‌ها

آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. فاکتورها شامل محلول پاشی با نانو سلنیوم (پنج، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام)، سلنات سدیم (پنج، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام) و آب مقطر (گیاهان کنترل) بود. نرمال بودن داده‌ها با روش شاپیرو ویلک^۳ 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 اکسل ۲۰۱۶ ترسیم شدند.

نتایج

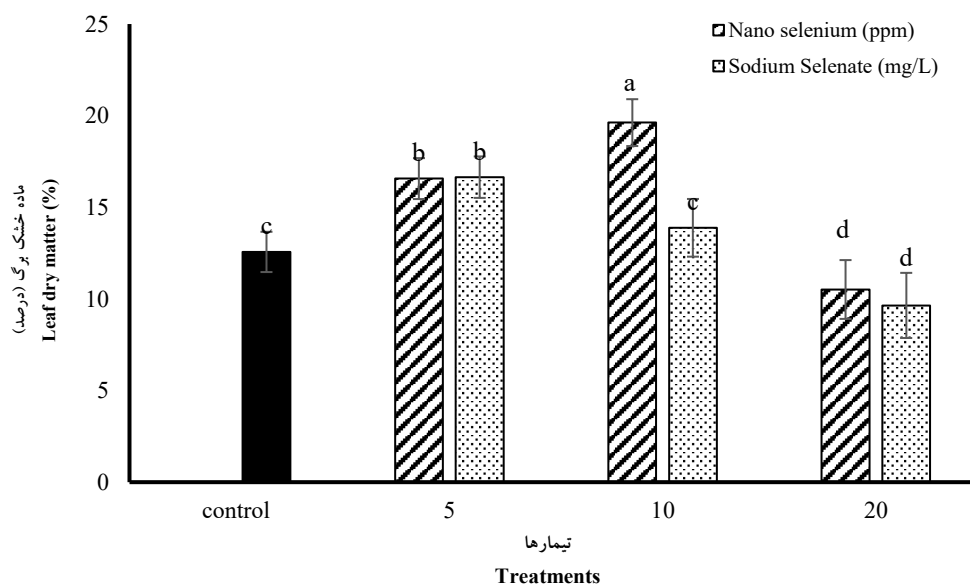
براساس نتایج تجزیه‌واریناس اثر تیمار (نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم) بر ماده‌خشک برگ، ماده‌خشک ریشه، طول اندام‌هوایی، طول ریشه و تعداد برگ ($P < 0.05$) معنی‌دار گردید. اثر تیمارها بر میزان نیترات، کلسیم، فسفر و سدیم ($P < 0.05$) معنی‌دار و بر میزان عنصر منیزیم غیرمعنی‌دار بود. همچنین تأثیر نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر محتوای عناصر کم‌مصرف شامل آهن، روی، منگنز و سلنیوم ($P < 0.05$) معنی‌دار شد.

۱- LAQUAtwin -NO3-11 model -۱

۲- Inductively Coupled Plasma- Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)- Agilent Co. USA. ۳- Shapiro-Wilk

ماده خشک برگ

تیمارهای اعمال شده بر گیاهان اسفناج، در سطوح پائین تر با افزایش ماده خشک برگ و در سطوح بالاتر با کاهش آن همراه بودند. نانوسلنیوم ۱۰ پی پی ام، ۵۶/۲۱٪ نسبت به تیمار شاهد افزایش ماده خشک برگ را نشان داد و بیشترین درصد ماده خشک برگ (۱۹/۶۲٪) متعلق به تیمار مذکور بود. با این حال، اعمال تیمار ۲۰ پی پی ام نانوسلنیوم، موجب کاهش ۱۶/۳۲٪ این صفت گردید. همچنین سطوح پنج و ۱۰ پی پی ام سلنات سدیم به ترتیب موجب افزایش ۳۲/۴۸ و ۱۰/۵٪ در ماده خشک برگ شد. در مقابل، کاهش ۲۳/۲۴٪ در ماده خشک برگ و ثبت کمترین میزان این صفت (۹/۶۴٪) با کاربرد ۲۰ پی پی ام سلنات سدیم حاصل شد (شکل ۱).



شکل ۱. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر ماده خشک برگ در اسفناج رقم ویروفلائی. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار با آزمون توکی ($P < 0.05$) است.

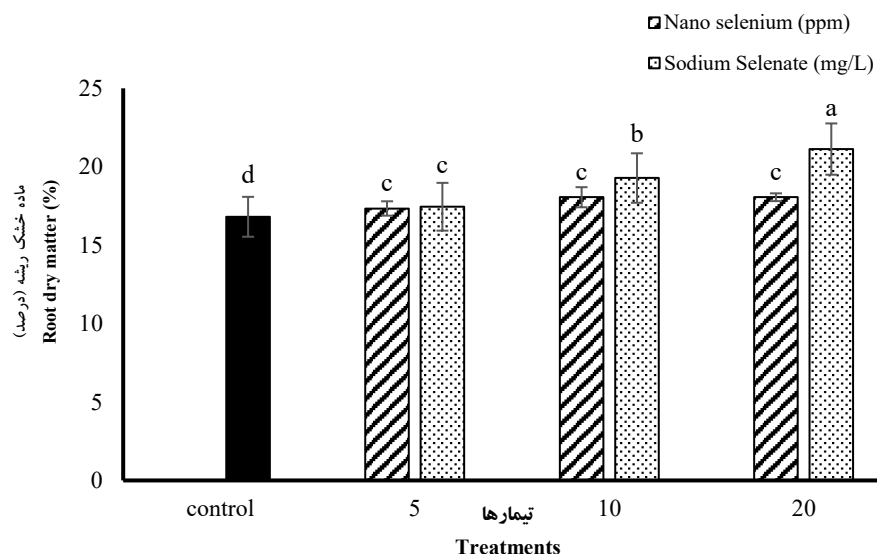
Fig. 1. The impact of nano-Selenium and Sodium Selenate treatments on leaf dry matter in spinach virofly variety. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tucky test ($P < 0.05$).

ماده خشک ریشه

نتایج حاکی از آن بود که ماده خشک ریشه اسفناج در تیمار با ترکیبات سلنیوم افزایش می یابد. بیشترین مقدار سلنات سدیم (۲۰ پی پی ام)، ۲۵/۶۹٪ افزایش نسبت به تیمار شاهد، ایجاد کرد. کمترین (۱۶/۸۱٪) ماده خشک ریشه تحت تیمار شاهد حاصل شد (شکل ۲).

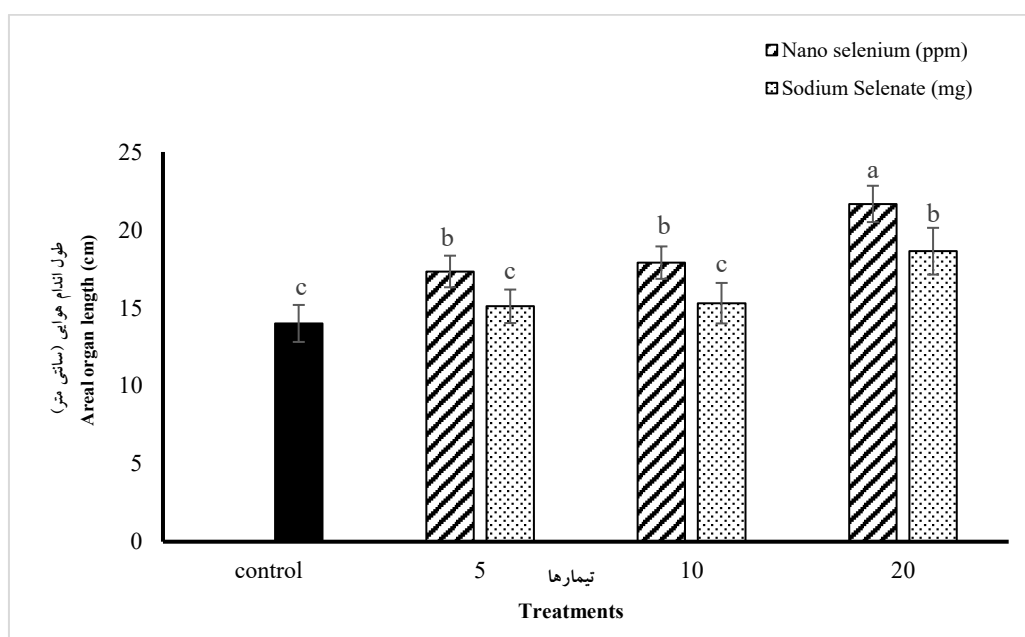
طول اندام هوایی

تیمار با هر دو ترکیب سلنیوم باعث افزایش طول اندام هوایی اسفناج شد. بیشترین افزایش در بالاترین سطح نانوسلنیوم و سلنات سدیم (به ترتیب ۵۴/۷۸ و ۳۳/۰۷٪ افزایش) بدست آمد. بیشترین و کمترین میزان طول اندام هوایی به ترتیب در گیاهان تیمار شده با ۲۰ پی پی ام نانوسلنیوم (۲۱/۶۷ سانتی متر) و تیمار شاهد (۱۴ سانتی متر) گزارش شد (شکل ۳).



شکل ۲. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر ماده خشک ریشه در اسفناج رقم ویروفلی. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P < 0.05$) است.

Fig. 2. The impact of nano-Selenium and Sodium Selenate treatments on root dry matter in spinach virofly variety. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tucky test ($p < 0.05$).



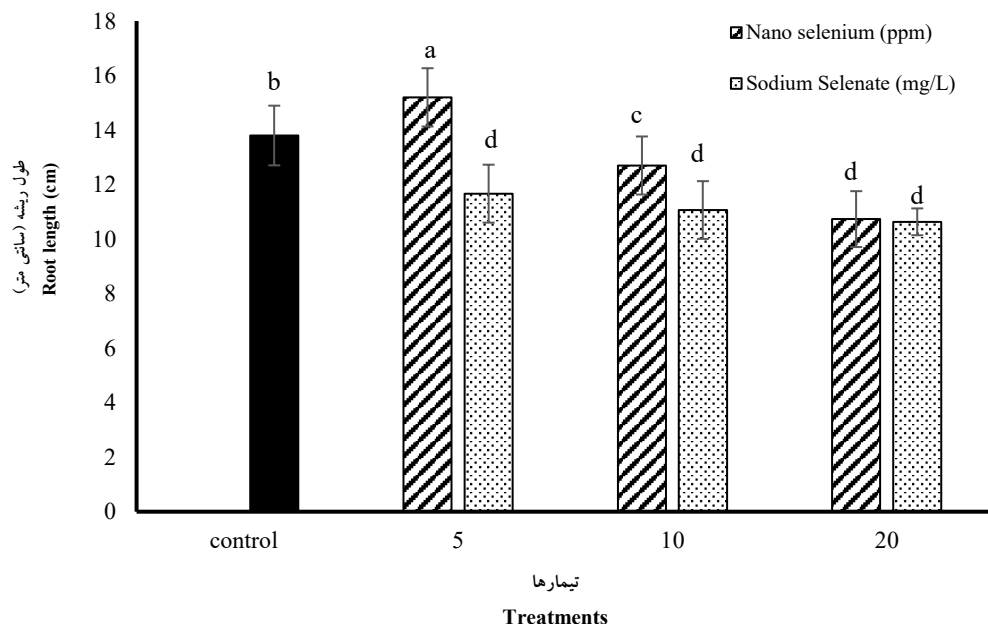
شکل ۳. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر طول اندام هوایی در اسفناج رقم ویروفلی. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P < 0.05$) است.

Fig. 3. The impact of nano-Selenium and Sodium Selenate treatments on areal organ length in spinach virofly variety. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tucky test ($p < 0.05$).

طول ریشه

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

تیمار شاهد، شد. علاوه بر این، افزایش غلظت‌های سلنات سدیم از پنج تا ۲۰ پی‌پی‌ام نیز موجب کاهش در طول ریشه نسبت به تیمار شاهد، شد. به طوریکه که کمترین طول ریشه (۱۰/۶۳ سانتی‌متر) تحت تیمار ۲۰ پی‌پی‌ام از سلنات سدیم ثبت شد (شکل ۴).



شکل ۴. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر طول ریشه در اسفناج رقم ویروفلائی. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P < 0.05$) است.

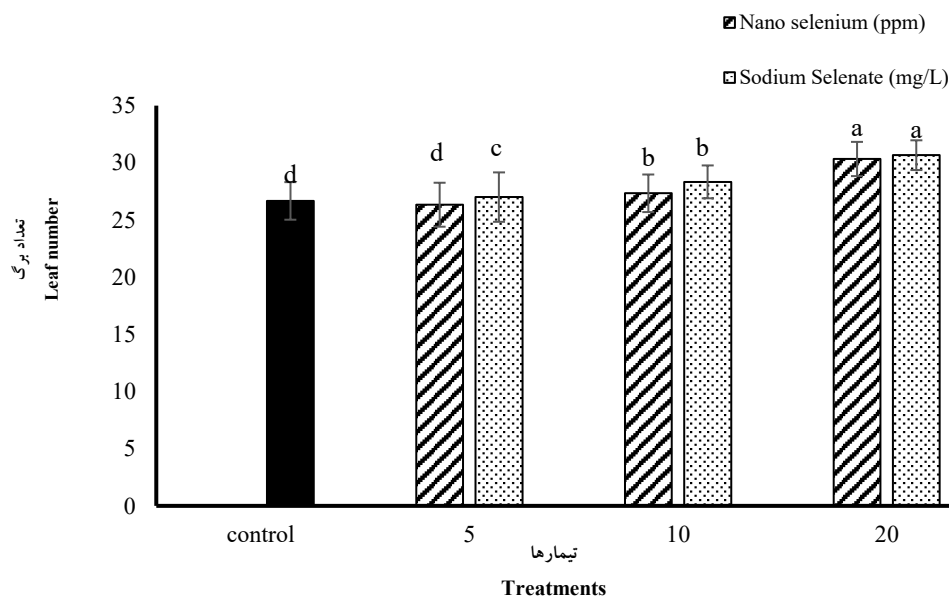
Fig. 4. The impact of nano-Selenium and Sodium Selenate treatments on root length in spinach virofly variety. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tucky test ($P < 0.05$).

تعداد برگ

تیمارهای اعمال شده باعث روندی افزایشی در تعداد برگ اسفناج گردید. تیمار گیاهان با ترکیبات حاوی سلنیوم موجب افزایش تعداد برگ نسبت به تیمار شاهد شد. علاوه بر این، بالاترین سطح سلنات سدیم (۲۰ پی‌پی‌ام) نیز با افزایشی ۱۴/۹۹٪ در تعداد برگ منجر به ثبت بیشترین تعداد برگ (۳۰/۶۷) گردید (شکل ۵).

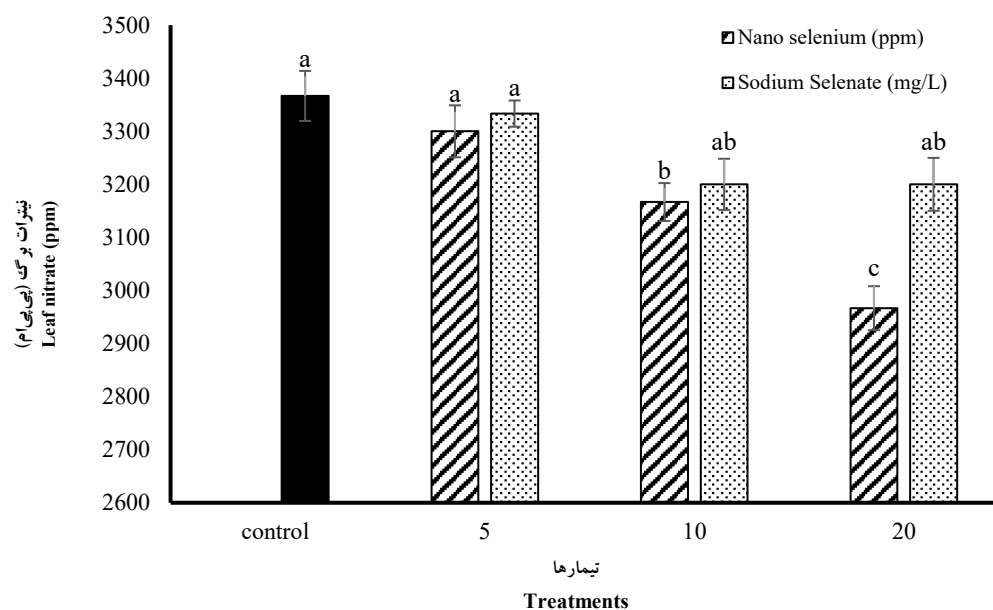
نیترات

نیترات در بالاترین سطوح از نانوسلنیوم و سلنات سدیم، به ترتیب ۱۱/۸۸ و ۴/۹۴٪ نسبت به شاهد، کاهش داشت. کمترین میزان نیترات در بالاترین سطح نانوسلنیوم (۲۹۶۶/۶ پی‌پی‌ام) و بیشترین میزان این صفت (۳۳۶۶/۶ پی‌پی‌ام)، تحت تیمار شاهد مشاهده شد (شکل ۶).



شکل ۵. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر تعداد برگ در اسفناج رقم ویروفلی. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P < 0.05$) است.

Fig. 5. The impact of nano-Selenium and Sodium Selenate treatments on leaf number in spinach virofly variety. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tucky test ($P < 0.05$).

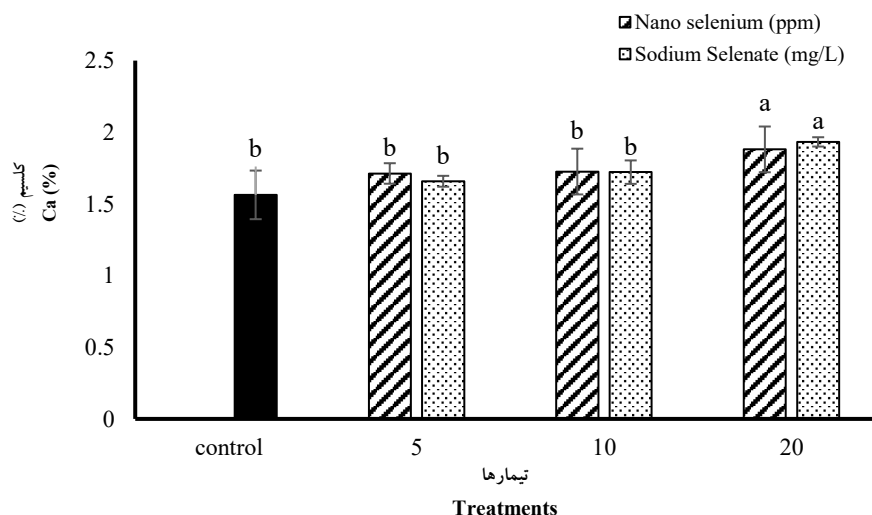


شکل ۶. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای نیترات برگ در اسفناج رقم ویروفلی. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P < 0.05$) است.

Fig. 6. The impact of nano-Selenium and Sodium Selenate treatments on the content of leaf nitrate in spinach virofly variety. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tucky test ($P < 0.05$).

کلسیم

افزایش سطوح نانوسلنیوم و سلنات سدیم تا بالاترین سطح، به ترتیب موجب افزایش ۲۰/۵۱ و ۲۳/۷۱٪ در محتوای کلسیم برگ شدند. کمترین میزان کلسیم (۱/۵۶٪)، در گیاهان تیمار شاهد حاصل شد (شکل ۷).



شکل ۷. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای کلسیم در اسفناج رقم ویروفلی. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P < 0.05$) است.

Fig. 7. The impact of nano-Selenium and Sodium Selenate treatments on Ca content in spinach virofly variety. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tucky test ($P < 0.05$).

منیزیم

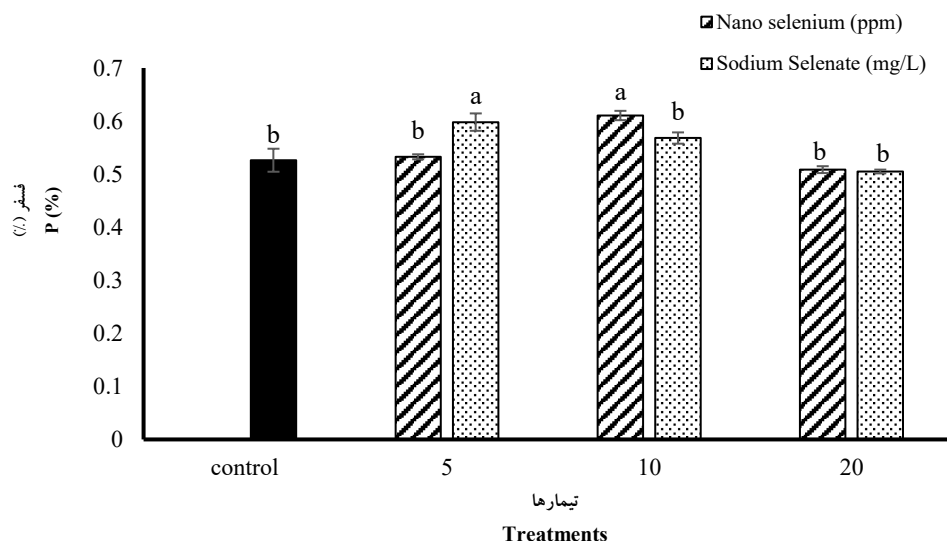
تأثیر تیمارهای اعمال شده بر منیزیم برگ معنی‌دار نبود. با وجود این، نانوسلنیوم تا ۱۰ پی‌پی‌ام، افزایش ۱/۷۷٪ در محتوای منیزیم نسبت به شاهد را باعث شد و بیشترین میزان آن (۰/۶۸۹ پی‌پی‌ام) در همین تیمار ثبت شد. در مقابل کاربرد ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم موجب کاهش در محتوای منیزیم گردید. سلنات سدیم ۲۰ پی‌پی‌ام نیز موجب کاهش ۳/۱٪ در محتوای منیزیم گردید و کمترین میزان این عنصر (۰/۶۵۶ پی‌پی‌ام) در تیمار مذکور، ثبت شد.

فسفر

افزایش نانوسلنیوم تا ۱۰ پی‌پی‌ام موجب افزایش (۱۷/۳۰٪) در فسفر برگ شد و بیشترین میزان این عنصر (۰/۶۱٪) در این تیمار ثبت شد. همچنین سلنات سدیم پنج و ۱۰ پی‌پی‌ام نیز به ترتیب موجب افزایش ۱۳/۴۶ و ۷/۶۹٪ در فسفر برگ گردید. در مقابل، کاربرد ۲۰ پی‌پی‌ام از نانوسلنیوم و ۲۰ پی‌پی‌ام از سلنات سدیم موجب کاهش ۳/۸۴٪ در محتوای فسفر گردید (شکل ۸).

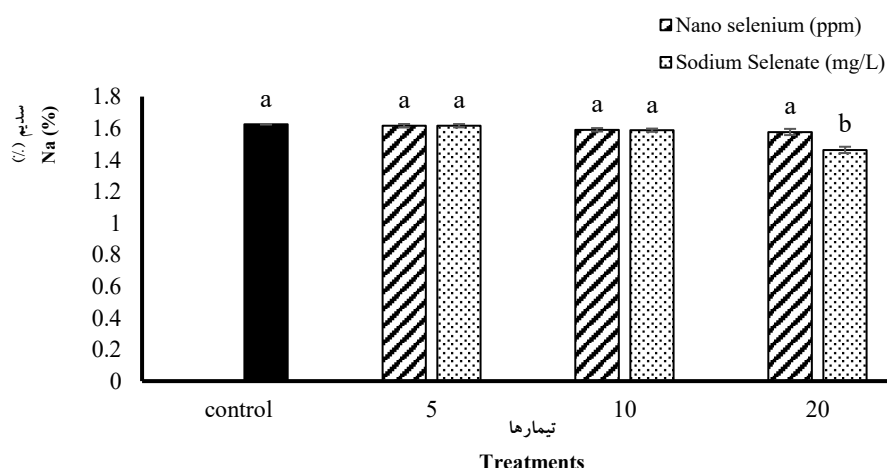
سدیم

نتایج نشان داد که، میزان سدیم برگ با افزایش سطوح نانوسلنیوم و سلنات سدیم تا بالاترین سطح، به ترتیب ۳/۰۸ و ۹/۸٪ کاهش نشان داد. بطوریکه بیشترین و کمترین غلظت این عنصر به ترتیب به تیمار شاهد (۱/۶۲٪) و ۲۰ پی‌پی‌ام از سلنات سدیم (۱/۴۶٪) تعلق داشت (شکل ۹).



شکل ۸. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای فسفر در اسفناج رقم ویروفلی. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P < 0.05$) است.

Fig. 8. The impact of nano-Selenium and Sodium Selenate treatments on P content in spinach virofly variety. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tucky test ($P < 0.05$).

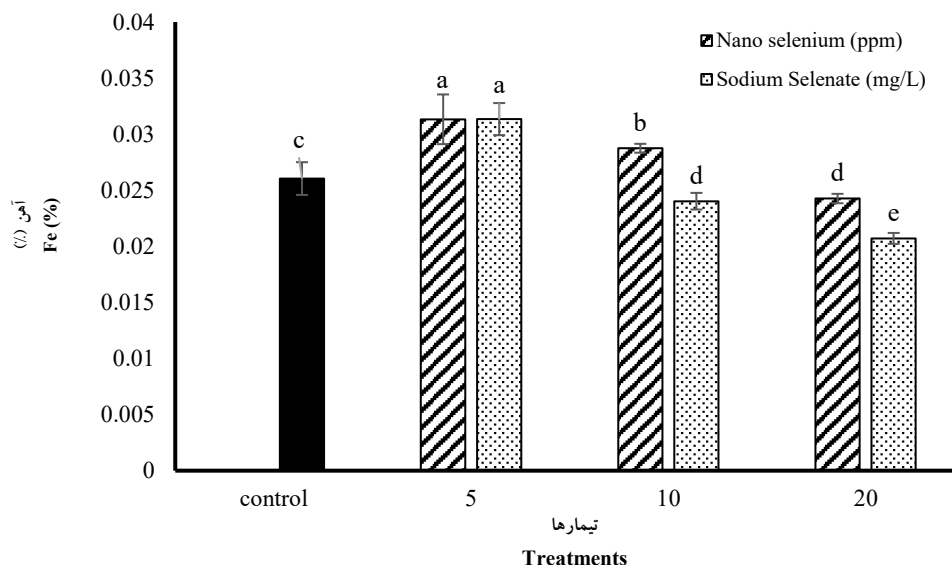


شکل ۹. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای سدیم در اسفناج رقم ویروفلی. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P < 0.05$) است.

Fig. 9. The impact of nano-Selenium and Sodium Selenate treatments on Na content in spinach virofly variety. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tucky test ($P < 0.05$).

آهن

تیمار گیاهان اسفناج با پنج پی‌پی‌ام از نانوسلنیوم موجب افزایش (۱۹/۲۳٪) آهن برگ و ثبت بیشترین مقدار این عنصر (۰/۰۳۱٪) شد. با وجود اینکه ۱۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم نیز موجب افزایش (۷/۶۹٪) محتوای آهن شد، اما کاربرد ۲۰ پی‌پی‌ام این تیمار موجب کاهش (۷/۶۹٪) در مقدار این عنصر نسبت به تیمار شاهد گردید. همچنین سلنات سدیم ۲۰ پی‌پی‌ام موجب کاهش (۲۳/۰۷٪) در آهن برگ شد و کمترین میزان آهن (۰/۰۲۰٪) در این تیمار حاصل شد (شکل ۱۰).

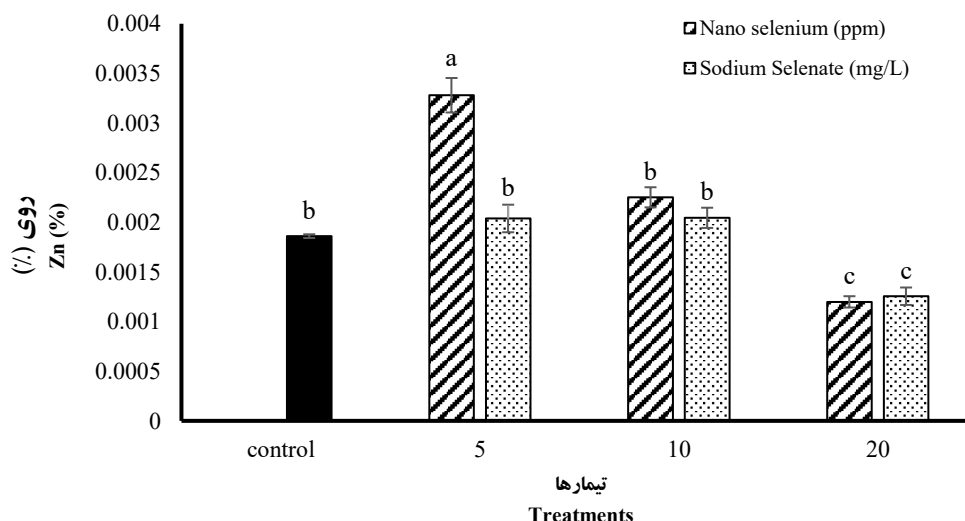


شکل ۱۰. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای آهن در اسفناج رقم ویروفلی. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار با آزمون توکی ($P < 0.05$) است.

Fig. 10. The impact of nano-Selenium and Sodium Selenate treatments on Fe content in spinach virofly variety. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tucky test ($P < 0.05$).

روی

داده‌های بدست آمده نشان دادند که کاربرد پنج پی پی ام از نانوسلنیوم موجب افزایش ۷۷/۷۷٪ در محتوای عنصر روی و ثبت بیشترین مقدار این عنصر (۰/۰۰۳۲٪) گردید. با این حال تیمار با نانوسلنیوم ۲۰ پی پی ام با کاهش ۳۸/۸۸٪ در غلظت روی، کمترین میزان این عنصر (۰/۰۰۱۱٪) را به خود اختصاص داد (شکل ۱۱).

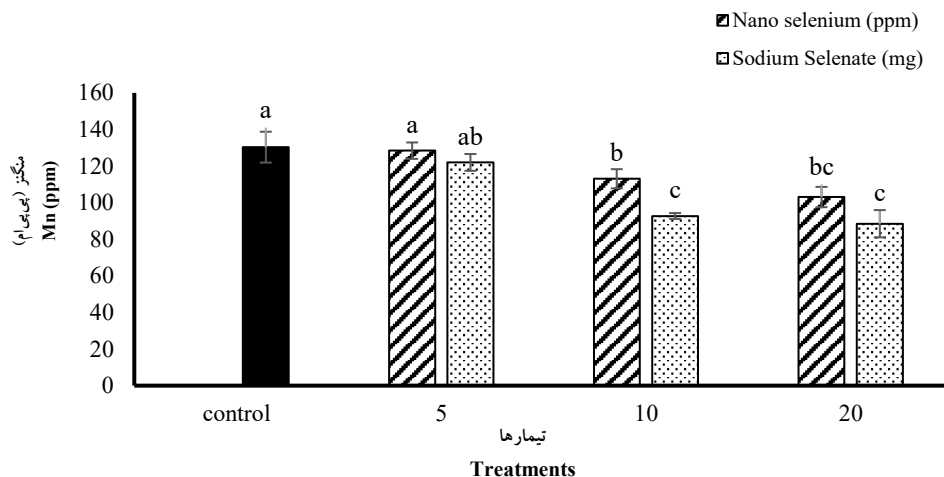


شکل ۱۱. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای روی در اسفناج رقم ویروفلی. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار با آزمون توکی ($P < 0.05$) است.

Fig. 11. The impact of nano-Selenium and Sodium Selenate treatments on Zn content in spinach virofly variety. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tucky test ($P < 0.05$).

منگنز

نتایج تاثیر تیمارهای اعمال شده بر محتوای منگنز، موید آن بود که بالاترین سطح نانوسلنیوم و سلنات سدیم به ترتیب موجب کاهش ۲۰/۹۲ و ۳۲/۱۱٪ در میزان منگنز نسبت به تیمار شاهد شد. بیشترین (۱۳۰/۳۳ پی‌پی‌ام) و کمترین (۸۸/۴۷ پی‌پی‌ام) میزان این عنصر تحت تیمار شاهد و ۲۰ پی‌پی‌ام سلنات سدیم حاصل شد (شکل ۱۲).

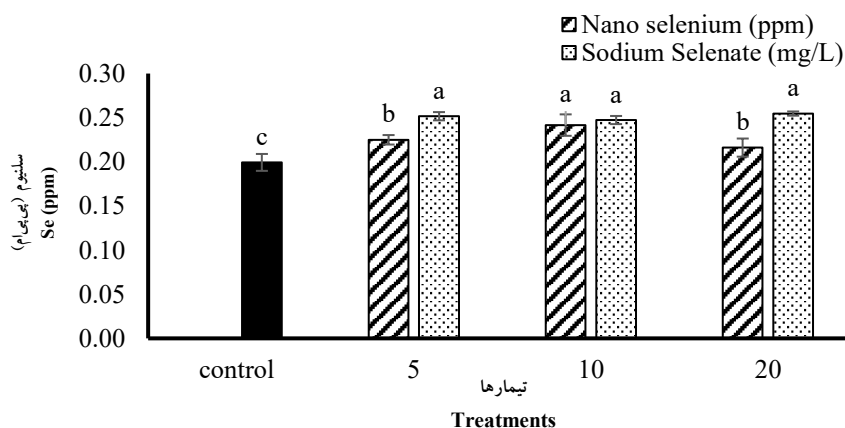


شکل ۱۲. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای منگنز در اسفناج رقم ویروفلائی. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P < 0.05$) است.

Fig. 12. The impact of nano-Selenium and Sodium Selenate treatments on Mn content in spinach virofly variety. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tucky test ($P < 0.05$).

سلنیوم

نتایج مربوط به محتوای سلنیوم برگ، حاکی از افزایش ۲۶/۳۱٪ این صفت نسبت به تیمار شاهد، در تیمار نانوسلنیوم ۱۰ پی‌پی‌ام بود. با اینکه کاربرد ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم نیز موجب افزایش سلنیوم برگ نسبت به تیمار شاهد شد، اما این افزایش، ۱۵/۷۹٪ از سطح ۱۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم کمتر بود. تحت سطوح مختلف سلنات سدیم نیز افزایش میزان سلنیوم مشاهده شد. بیشترین محتوای سلنیوم (۰/۲۵ پی‌پی‌ام) در گیاهان تیمار شده با ۲۰ پی‌پی‌ام سلنات سدیم و کمترین مقدار آن (۰/۱۹ پی‌پی‌ام) در گیاهان تیمار شاهد بدست آمد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر محتوای سلنیوم در اسفناج رقم ویروفلائی. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P < 0.05$) است.

Fig. 13. The impact of nano-Selenium and Sodium Selenate treatments on Se content in spinach virofly variety. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tucky test ($P < 0.05$).

بحث

سلنیوم، به عنوان یک عنصر مفید، رشد و نمو گیاه را از طریق افزایش در فتوسنتز و بهبود کارایی فتوسیستم II بهبود می بخشد (Ozbolt *et al.*, 2008; Siddiqui *et al.*, 2014). غلظت های پایین سلنیوم، احتمالاً از راه افزایش میزان نشاسته در کلروپلاست ها، رشد گیاه را افزایش می دهد (Han -Wens *et al.*, 2010). غلظت های بالای سلنیوم، اما، به دلیل تغییر در نفوذپذیری غشاء سلول نسبت به یون های سدیم، پتاسیم و کلسیم متعاقباً اختلال در تنفس و جذب آب، منجر به کاهش ماده خشک گیاه می شود (Dziubinskaa *et al.*, 2010; John *et al.*, 2009). همچنین سطوح بالای سلنیوم، از طریق افزایش میزان ترکیبات فنلی، اکسیداسیون آنزیمی اکسین و دکربوکسیله کردن ایندول استیک اسید (Gul *et al.*, 2017; Guardado *et al.*, 2019)، منجر به کاهش تقسیم سلولی در سلول های ریشه می شود (Tavakoli *et al.*, 2020).

نانوذرات از طریق مسیرهای آپوپلاستی و سیمپلاستی به سمت ریشه حرکت و در نهایت از طریق آوند آبکش و چوب به برگ ها و ساقه منتقل می شوند (Wang *et al.*, 2012). نانوسلنیوم رشد گیاهان را توسط بهبود وضعیت آبی سلول (Iqbal *et al.*, 2015)، افزایش در اندازه و تعداد سلول (Jiang *et al.*, 2017) و افزایش استحکام برگ (Kahakachchi *et al.*, 2004; Jia *et al.*, 2018) و رشد ریشه را، توسط مهار سیگنالینگ اتیلن (Rezvani *et al.*, 2012; Rezende *et al.*, 2018) و القاء تقسیم سلولی در سلول های مریستمی نوک ریشه (Du *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019)، ارتقاء می بخشد. همسو با یافته های این پژوهش، تیمار با ترکیبات حاوی سلنیوم موجب افزایش طول ساقه در گیاه خیار^۱ (Mousavi *et al.*, 2022)، افزایش وزن خشک اندام های هوایی و ریشه در گیاه نعناء فلفلی^۲ (Jafari & Moghaddam 2023) و بهبود ویژگی های رشدی در گیاه تنباکو^۳ (Liu *et al.*, 2020) شده است. همچنین محلول پاشی برگ با نانوذرات سلنیوم، وزن تر و خشک برگ، تعداد برگ و ارتفاع را در گیاه گشنیز^۴ (Ghazi, 2018) و تعداد برگ، وزن تر ساقه و ارتفاع بوته را در گیاه نخود^۵ افزایش داده است (Shedeed *et al.*, 2018; El-Sawy *et al.*, 2019). مقایسه تیمار سلنیوم عنصری و نانوسلنیوم در گیاه گوجه فرنگی^۶ (Abulghasemi & Haghighi, 2018) و گیاه درمنه^۷ (Logvinenko *et al.*, 2022) نیز آشکار ساخت که سلنیوم عنصری بیشتر بر صفات رویشی و نانوسلنیوم بیشتر بر تغییرات فتوسنتزی و آنتی اکسیدانی تأثیر گذار بوده است. همچنین تیمار با سلنیوم، موجب افزایش فعالیت آنتی اکسیدانی در گیاهان بادام زمینی^۸ (Hussein *et al.*, 2019)، انار^۹ (Zahedi *et al.*, 2019)، گوجه فرنگی (Mejía-Ramírez *et al.*, 2023)، فستوکا^{۱۰} (González-Lemus *et al.*, 2022) و جو^{۱۱} (Singh *et al.*, 2019) شده است. افزودن سلنیوم می تواند سنتز پروتئین را با تأثیر مستقیم بر آن از طریق اشکال اسید آمینه که شامل گوگرد جایگزین شده است، تقویت کند. علاوه بر این، تیمار با سلنیوم منجر به افزایش گلوز، پروتئین، فلاونوئید و ساکارز شده است (Sun *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022).

محتوای سلنیوم گیاهان می تواند توسط کوددهی خاکی، کاربرد برگ، کشت هیدروپونیک، کشت آئروپونیک و پرایمینگ بذر در یک محلول حاوی سلنیوم افزایش یابد (Chauhan *et al.*, 2017; 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 (Wu *et al.*, 2020; Hassan *et al.*, 2014; Nawaz *et al.*, 2015). کاربرد برگ سلنیوم موجب افزایش قابل توجه محتوای سلنیوم در عدس^{۱۲} (Thavarajah *et al.*, 2015)، گندم^{۱۳} (Nawaz *et al.*, 2015)، شاهی^{۱۴} (Khosravi *et al.*, 2022) و اسفناج^{۱۵} (Moteshare Zadeh *et al.*, 2020) شده است که با نتایج به دست آمده در این پژوهش مطابقت دارد.

سلنیوم جذب و توزیع عناصر ضروری، به علاوه متابولیسم گیاه را تنظیم و تعادل یونی و یکپارچگی سلول های گیاه را حفظ می نماید (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 آنزیم های نیترات ردوکتاز و نیتريت ردوکتاز می شود. از طرفی، نیاز گیاهان به ترکیبات نیتروژنه موجب افزایش آسمیلاسیون گوگرد می شود. لذا کاربرد سلنیوم سبب افزایش متابولیسم گوگرد

۱- *Cucumis sativus* ۲- *Mentha piperita* ۳- *Nicotiana rustica* ۴- *Coriandrum sativum* ۵- *Cicer arietinum*
۶- *Solanum lycopersicum* ۷- *Artemisia persica* ۸- *Arachis hypogaea* ۹- *Punica granatum* ۱۰- *Festuca ovina*
۱۱- *Triticum aestivum* ۱۲- *Lens culinaris* ۱۳- *Lepidium sativum* ۱۴- *Spinacia oleracea* ۱۵- *Hordeum vulgare*

می‌شود (Amerian, 2012; Rios *et al.*, 2010). چنین رخدادی در نعنای فلفلی (Jafari & Moghaddam, 2023)، گندم (Hajiboland & Sadeghzade, 2014) و پیاز (Golubkina *et al.*, 2012) مشاهده شده است. البته همسو با یافته‌های ما، سلنیوم در مقادیر کمتر، تاثیری افزایش‌دهنده بر میزان نیتروژن در باقلا (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 آ و کلروفیل کل می‌گردند. تیمار با نانوذرات سلنیوم با بهبود قدرت گیاهچه، رشد و طول 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-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 تاثیر بر بهبود جذب پتاسیم می‌باشد (Hussein *et al.*, 2019).

سلنیوم نقش فعالی در جذب برخی عناصر کم‌مصرف 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 اسفناج^۱ و Mohammadi و همکاران (۲۰۲۲) در کاهو^۲ و Khosravi و همکاران (۲۰۲۲) در شاهی^۳ همخوانی دارد. نتایج این پژوهش هماهنگ با نتایج به‌دست آمده در نعنای فلفلی^۴ (Jafari & Moghadda, 2023) است که کاهش غلظت منگنز در برگ را در سطوح بالای سلنات سدیم و نانوسلنیوم نشان داد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر نتایج حاکی از اثر افزایشی نانوذرات سلنیوم بر طول اندام هوایی و اثر کاهشی بر محتوای نیترات و سدیم برگ بود. از سوی دیگر، افزایش سطوح سلنات سدیم موجب بهبود ماده خشک ریشه، تعداد برگ، محتوای سلنیوم و کلسیم شد. با این وجود کاهش منگنز تحت افزایش سطوح سلنات سدیم ثبت شد. علاوه بر اینکه ترکیبات سلنیوم (بالک و یا نانو) در تقویت صفات رشدی و عناصر پر و کم‌مصرف موثر بودند، اما نتایج حاکی از اهمیت دوز مورد استفاده این ترکیبات بود. به طوریکه سطح متوسط این دو تیمار (۱۰ پی‌پی‌ام نانو سلنیوم و ۱۰ پی‌پی‌ام سلنات سدیم) دارای اثر افزایشی بر محتوای منیزیم، فسفر، آهن، روی، طول ریشه و ماده خشک برگ بود. با این حال اعمال سطوح بالای هر دو تیمار، کاهش صفات مذکور را به دنبال داشت. در نهایت، از بین سطوح مختلف هر دو تیمار سلنیوم، بهترین تیمار، ۱۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم مشخص شد. با این وجود، می‌توان بیان کرد که انتخاب بهترین تیمار جهت انجام آزمایشات دیگر، بستگی به نوع گیاه، نوع تیمار مصرفی و غلظت موثر بر صفات مختلف دارد.

سپاسگزاری

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

References

منابع

- 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>.
- Abulghasemi, R., Haghighi, M. (2018). Study of changes in greenhouse tomatoes treated with beneficial elements in the form of metal metal and nanometals. *Plant Process and Function*, 6 (19), 153-162 URL: <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-417-en.htm>
- 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. (2012). Effect of Nitrogen, Selenium and Nanoselenium on Some Phytochemical Characteristics of Onion (*Allium cepa* L.). PhD Thesis, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Iran.
- Babajani, A., Iranbakhsh, A., Ardebili, & Z.O., Eslami, B. (2019). Differential growth, nutrition, physiology, and gene expression in *Melissa officinalis* mediated by zinc oxide and elemental selenium nanoparticles. *Journal of Environmental Science and Pollution Research*, 26, 24430-24444. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05676-z>.
- Boghady, 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.). *Egyptian Journal of Agronomy*, 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, 253–260. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-6744-0_10.
- Dadar, M., Adel, M., Nasrollahzadeh Saravi, H., & Fakhri, Y. (2017). Trace element concentration and its risk assessment in common kilka (*Chupeonella cultriventris* caspia Bordin, 1904) from southern basin of Caspian Sea. *Toxin Reviews*, 36(3), 222-227. <https://doi.org/10.1080/15569543.2016.1274762>.
- Djanaguiraman, M., Belliraj, N., Bossmann, S.H., & Prasad, P.V. (2018). High-temperature stress alleviation by selenium nanoparticle treatment in grain sorghum. *ACS Omega* 3, 2479–2491 Mittler R (2017) ROS are good. *Trends in Plant Science*, 22, 11–19. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b01934>.
- 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>
- Duhan, J.S., Kumar, R., Kumar, N., Kaur, P., Nehra, K., & Duhan, S., (2017). Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. *Biotechnology Reports*, 15, 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.03.002>.
- Dziubinskaa H, Filekb M, Krol E, Trebacz K. 2010. Cadmium and selenium modulate slow vacuolar channels in rape (*Brassica napus*) vacuoles. *Journal of Plant Physiology*, 167, 1566–1570. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.06.016>
- 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 MU, 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 super absorbents on growth characteristic and elements uptake in basil under salinity stress. *Horticultural Plants Nutrition*, 3(2), 159–174.
- Feng, R. W., & C. Y. Wei. (2012). Antioxidative mechanisms on selenium accumulation in *Pteris vittata* L., a potential selenium phytoremediation plant. *Plant, Soil and Environment*, 58 (3), 105–10.
- 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.
- Ghazi, D. A. (2018). The Contribution of Nano-Selenium in Alleviation of Salinity Adverse Effects on Coriander Plants. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 9 (12), 753 - 760.
- Gao, F.Q., Liu, C., Qu, C.X., Zheng, L., Yang, F., Su, M.G. & Hong, F.H. (2008). Was improvement of spinach growth by nano-TiO₂ treatment related to the changes of Rubisco activate? *Biometals*, 21, 211–217.
- González-Lemus, U., Medina-Pérez, G., Peláez-Acero, A., Campos-Montiel, R.G. (2022). Decrease of Greenhouse Gases during an In Vitro Ruminant Digestibility Test of Forage (*Festuca arundinacea*) Conditioned with Selenium Nanoparticles. *Nanomaterials*, 12, 3823. <https://doi.org/10.3390/nano12213823>.
- 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,” *Doklady Biological Sciences*, 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, selenoproteins 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>.
- Hajiboland, H. & Sadeghzade, N. (2014) “Effect of selenium on CO₂ and NO₃⁻ assimilation under low and adequate nitrogen supply in wheat (*Triticum aestivum* L.),” *Photosynthetica*, 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>
- Hartikainen, H., 2005. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 18 (4), 309-318. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.009>.
- 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 agro-ecosystems. *Environmental Chemistry Letters*, 12, 495–510. <https://doi.org/10.1007/s10311014-0476-0>.
- Hawrylak-Nowak, B. (2008). Effect of selenium on selected macronutrients in maize plants. *Journal of Elements*, 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 Communication*, 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. *Biocatalysts and Agricultural Biotechnology*, 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. Biochemistry*, 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. *Fronts in Plant Science*, 13, 802274.
- Ingold, I., Berndt, C., Schmitt, S., Doll, S., Poschmann, G., Buday, K., Roveri, A., Peng, X., Freitas, F.P., Seibt, T., & Mehr, L. 2018. Selenium utilization by GPX4 is required to prevent hydroperoxide-induced ferroptosis. *Cell*, 172, 409–422. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2017.11.048>.
- 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. [Doi: 10.22059/ijhs.2023.344758.2039](https://doi.org/10.22059/ijhs.2023.344758.2039). (In Persian).
- Jahid AM, Kumar TP. 2010. Promotion of growth in mungbean (*Phaseolusaureus* Roxb.) by selenium is associated with stimulation of carbohydrate metabolism. *Biological Trace Elements Research*, 143(1), 530-539. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8872-1>
- 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 phosphorous stress in tobacco. *Environmental and Experimental Botany*, 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*, 7:1-14.
- John, R., Ahmad, P., Gadgil, K., & Sharma, S. (2009). Heavy metal toxicity: Effect plant growth, biochemical parameters and metal accumulation by *Brassica juncea* L. *International Journal of Plant Production*, 3, 65-75. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2012.653>
- 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. *Journal of Chromatography A*, 1054, 303–312.
- 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. [Doi: 10.22059/ijhst.2021.325036.472](https://doi.org/10.22059/ijhst.2021.325036.472).
- 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.jbiomac.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*, 43(18), 2810-2821. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1793187>
- Li, Y., Zhu, N., Liang, X., Zheng, L., Zhang, C., Li, Y.F., Zhang, Z., Gao, Y., & Zhao, J. (2020). A comparative study on the accumulation, translocation and transformation of selenite, selenate, and SeNPs in a hydroponic-plant system. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189, 109955. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109955>.
- 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>
- Malagoli, M., Schiavon, M., dall'Acqua, S., Pilon-Smits, EAH. (2015). Effects of Selenium Biofortification on Crop Nutritional Quality. *Front Plant Science*, 6: 280. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00280>.
- Mashayekhi, K. & Shomali, A. 2018. Botany, physiology and culture of vegetable. Gorgan Univ. Press, 502p.
- Mejía-Ramírez, F., Benavides-Mendoza, A., González-Morales, S., Juárez-Maldonado, A., Lara-Viveros, F.M., Morales-Díaz, A.B., & Morelos-Moreno, Á. (2023). Seed Priming Based on Iodine and Selenium Influences the Nutraceutical Compounds in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Crop. *Antioxidants*, 12, 1265. <https://doi.org/10.3390/antiox12061265>

- 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.
- Moteshare Zadeh, B., Ghorbani, S., & Alikhani, H. A. (2020). Spinach (*Spinaciaoleracea*) Nutritional Responses to Selenium Application. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(20), 2537–2550. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1844729>
- Mousavi, A. A., Roosta, H. R., Esmailizadeh, 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. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 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>
- 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. *Ciencia Rural*, 48, e20170176.
- Rezvani, N., Sorooshzadeh, A., & Farhadi, N. (2012). Effect of nano-silver on growth of saffron in flooding stress. *Proc. World Academic Science Engineering Technology*, 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.
- Saffar Yazdi, A., Lahouti, M., Ganjeali, A. (2012). The Effects of Different Selenium Concentrations on some Morpho-physiological Characteristics of Spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of horticultural science*. 26(3). 292-300. <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.15211>
- 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. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 33 (11), 2429–2437.
- Singh, S., Kaur, M., Sogi, D.S., & Purewal, S.S. (2019). A comparative study of phytochemicals, antioxidant potential and in-vitro DNA damage protection activity of different oat (*Avena sativa*) cultivars from India. *Journal of Food Measurement and Capacitation*, 13, 347–356.
- Sun, MF., Wang, JJ., Wei, LI., Peng, YI., Guo, GY., Tong, CL. & Chang, YL. (2022). Effect and mechanism of exogenous selenium on selenium content and quality of fresh tea leaves. *Notulae Botanicae Horticulture Agrobotanici Cluj-Napoca*, 6:12814. <http://dx.doi.org/10.15835/nbha50312814>
- Tabatabaie Roodsati S, Iranbakhsh A, Shamili . M, Oraghi Ardabili Z. (2023). The effect of nano selenium and sodium selenate on biochemical, physiological, and growth parameters of Bell pepper (*Capsicum anumm*). *Nova Biologica Reperta*, 9 (4), 296-306. <http://nbr.khu.ac.ir/article-1-3463-fa.html>

- 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., Abare, A., Mapa, I., Coyne, C.J., Thavarajah, P., & Kumar, S. (2017). Selecting Lentil Accessions for Global Selenium Biofortification. *Plants*, 6(3), 34. <https://doi.org/10.3390/plants6030034>.
- 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*. doi:10.3389/fpls.2015.00356.
- Wang, C., Yue, L., Cheng, B., Chen, F., Zhao, X., Wang, Z. & Xing, B. (2022). A 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>
- Xie, M., Sun, X., Li, P., Shen, X., & Fang, Y., 2021. Selenium in cereals: Insight into species of the element from total amount. *Comprehensive review in food science and food safety*. 20 (3), 2914- 2940. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12748>.
- Zahedi, S. M., Sadat Hosseini, M., Daneshvar Hakimi Meybodi, N. & 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>.
- Zielewicz, W., Wróbel, B. & Niedbała, G. (2020). Quantification of chlorophyll and carotene pigments content in mountain melick (*Melica nutans* L.) in relation to edaphic variables. *Forests*, 11, 1197.
- Zsiros, O., Nagy, V., Párducz, Á., Nagy, G., Ünneper, R., El-Ramady, H., Prokisch, J., Lisztes-Szabó, Z., Fári, M., Csajbók, J., Toth, S.Z., Garab, G., & Szabolcy, E.D. (2019). Effects of selenate and red Se-nanoparticles on the photosynthetic apparatus of *Nicotiana tabacum*. *Photosynth Research*, 139, 449–460.

The Impact of Selenium (Nano and Bulk) on the Absorption of Macro- and Microelements and Growth Characteristics of Spinach (*Spinacia oleracea* L. cv. Virofly)

Mohammad Qasemi, Mansoore Shamili*, Abdolmajid Mirzaalian Dastjerdi

Department of Horticultural sciences, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran,

*Corresponding Author, E-mail: (shamili@ut.ac.ir)

Plants absorb Se element from the soil and enter it into the food chain as the best source of selenium for humans and animals. In the current research, the effects of selenium (bulk and nano forms) were investigated on the absorption of macro and micro elements and growth characteristics of spinach under greenhouse conditions. The experiment was carried out in a completely randomized design. The factors were foliar spraying of nano selenium (5, 10 and 20 ppm), sodium selenate (5, 10 and 20 ppm) and distilled water (control plants). Based on the findings, an improvement was observed in root dry matter, shoot length, leaf number, and Ca and Se contents with increasing the levels of treatments, in contrast, high levels of both treatments declined the content of leaf nitrate, Na and Mn. Leaf dry matter and P and Mg contents were boosted at the level of 10 ppm of both treatments, and lessened at higher levels. The highest root length and Fe and Zn contents were observed at 5 ppm of nano-Se. This indicates the additive effects of low Se concentrations on root tip meristem cell division as well as plant water relations via transport of essential elements. However, the reduction of the mentioned traits occurred at higher levels of both treatments (20 ppm). Eventually, among the different levels of both Se treatments, the best one was 10 ppm Nano-Se. However, it can be stated that selecting the best treatment depends on the type of plant species, the type of utilized treatment, and the effective level on studied traits.

Keywords: Leaf number, Ferrous, Nano selenium, Phosphorus, Root length, Sodium, Sodium selenite, Zinc