مجله علوم و فنون باغبانی ایران جلد ۲۵ شماره ۴ صفحه‌های ۵۱۹ تا ۵۳۶ (۱۴۰۳)
مقاله پژوهشی

تاثیر سلنیوم (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 سلنیوم برای انسان‌ها و حیوانات، این عنصر را از خاک جذب و وارد زنجیره‌ی غذایی می‌کنند. در پژوهش حاضر بررسی اثرات سلنیوم (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 کاملا تصادفی اجرا شد. فاکتورها شامل محلول‌پاشی با نانو سلنیوم (پنج، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام)، سلنات سدیم (پنج، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام) و آب مقطر (گیاهان کنترل) بود. بر اساس یافته‌ها، با بالارفتن سطوح تیمارها، افزایش در ماده خشک ریشه، طول اندام هوایی، تعداد برگ، محتوای کلسیم و سلنیوم 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 نانوسلنیوم مشاهده شد. این امر نشان دهنده اثر افزایشی غلظت‌های پایین سلنیوم بر تقسیم سلولی مریستم نوک ریشه و همچنین روابط آبی گیاه، از طریق انتقال عناصر ضروری، می باشد. 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 سلنیوم، بهترین تیمار، ۱۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم 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.

واژه های کلیدی: آهن، تعداد برگ، روی، سدیم، سلنات سدیم، فسفر، نانوسلنیوم.

مقدمه

سلنیوم 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 سلنیوم (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 سلنیوم هستند (Thavarajah *et al*., 2017). گیاهان به عنوان بهترین منبع سلنیوم 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 سلنیوم، به عنوان نانوذرات پایدار، جهت استفاده به عنوان کود در کشاورزی معرفی شده‌اند (Babajani *et al*., 2019). فرم آلی سلنیوم در گیاهان، سلنات و سلنیت است (Li *et al*. 2020). در مقایسه با سلنات و سلنیت، فرم نانوسلنیوم سمیت کمتر و زیست فعالی بالاتری دارد (Djanaguiraman *et al*., 2018). محلول پاشی برگی گیاهان با

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

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 اسیدهای‌آمینه گردید (Farooq et al., 2022). در آزمایشی دیگر بر تنباکو، تجمع نیتروژن در تیمار پنج میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، بالاترین میزان را داشت (Liu *et al.*, 2020). محلول‌پاشی با سلنیوم توانست به‌طور مؤثر وزن ۱۰۰ جوانه گیاه چای را افزایش دهد. وزن ۱۰۰ جوانه به تدریج تا غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم 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، عملکرددانه 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 (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 میلی‌گرم درلیتر)، بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه اسفناج حاکی از تأثیر معنی‌دار سلنیوم بر وزن‌تر و خشک، طول(ریشه و اندام هوایی) و محتوای کلروفیل بود (Saffar Yazdi *et al*., 2012). تأثیر سلنیت‌سدیم (یک، دو و چهار میلی‌گرم درلیتر) و نانو ذرات سبز سلنیت‌سدیم (یک، دو و چهار میلی‌گرم درلیتر) و شاهد (آب مقطر) به صورت محلول‌پاشی برگی بر خصوصیات مورفولوژیکی، فیتوشیمیایی و میزان تجمع نیترات در گیاه اسفناج، نشان داد تیمار چهار میلی‌گرم درلیتر سلنیت‌سدیم و یک میلی‌گرم درلیتر نانوذرات سلنیوم به‌طور معنی‌داری باعث افزایش وزن‌تر 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]، سکرتین[۴]، کلروفیل، کاروتن، ساپونین[۵]، ترکیبات فنلی، کافئیک‌اسید[۶]، ارتوکوماریک‌اسید[۷]، پاراکوماریک‌اسید، 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 ویروفلای[۱۰] از شرکت فردین کشت تهیه گردید. سلنات سدیم[۱۱] از شرکت مرک[۱۲] تهیه شد. نانوذره 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 تقریبا 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، خاک‌برگ و ماسه (۱:۱:۱) بود. گیاهان در دمای متوسط روزانه ۲۷ ±۲و دمای متوسط شبانه ۲۴±۲ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۰ درصد کشت شدند. بذور در کرت‌هایی به ابعاد ۰/۸ × ۱

۱- Spinach (*Spinacia olerace* 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

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

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 هرسه روز یکبار تا مرحله ۴ برگی انجام شد و پس از آن هر دو روزیکبار 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 محلول‌پاشی 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 خط‌کش اندازه‌گیری و ثبت شد. تعداد برگ نیز شمارش شد.

سنجش نیترات

بدین منظور از دستگاه نیترات‌سنج پرتابل[1] استفاده گردید. چند قطره از عصاره برگ بر صفحه دستگاه ریخته و مقدار نیترات بر حسب پی‌پی‌ام قرائت گردید.

سنجش عناصر پر و کم‌مصرف (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 شفافی 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[2] (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 کاملا 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[3] 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 تجزیه‌واریانس 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

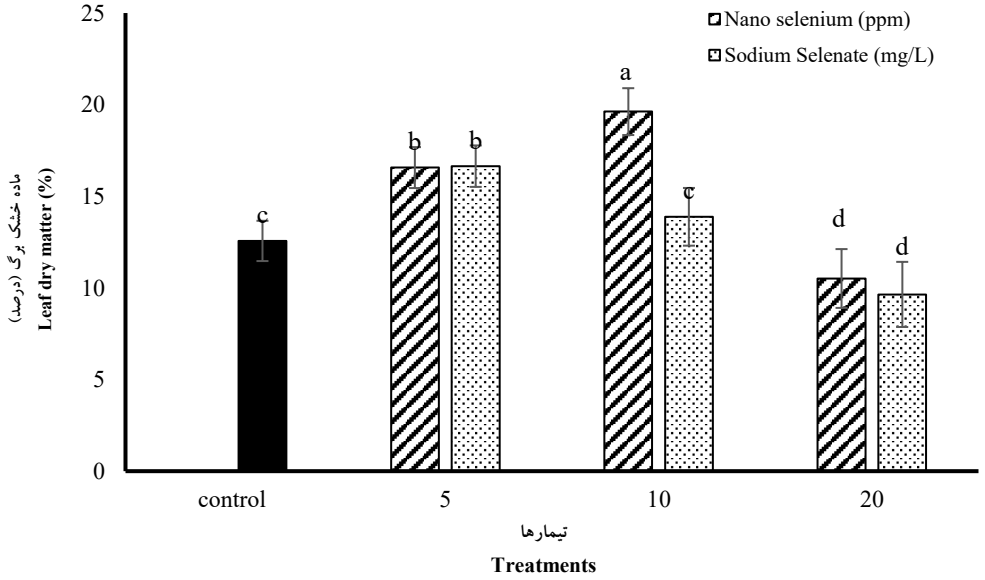
۲- Inductively Coupled Plasma- Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)- Agilent Co. USA.

۳- Shapiro-Wilk

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

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 پی‌پی‌ام، 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 پی‌پی‌ام نانوسلنیوم، موجب کاهش ۱۶/۳۲٪ این صفت گردید. همچنین سطوح پنج و ۱۰ پی‌پی‌ام 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 پی‌پی‌ام سلنات سدیم حاصل شد (شکل ۱).



شکل ۱. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر ماده خشک برگ در اسفناج رقم ویروفلای. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار 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 ($P< 0.05$).

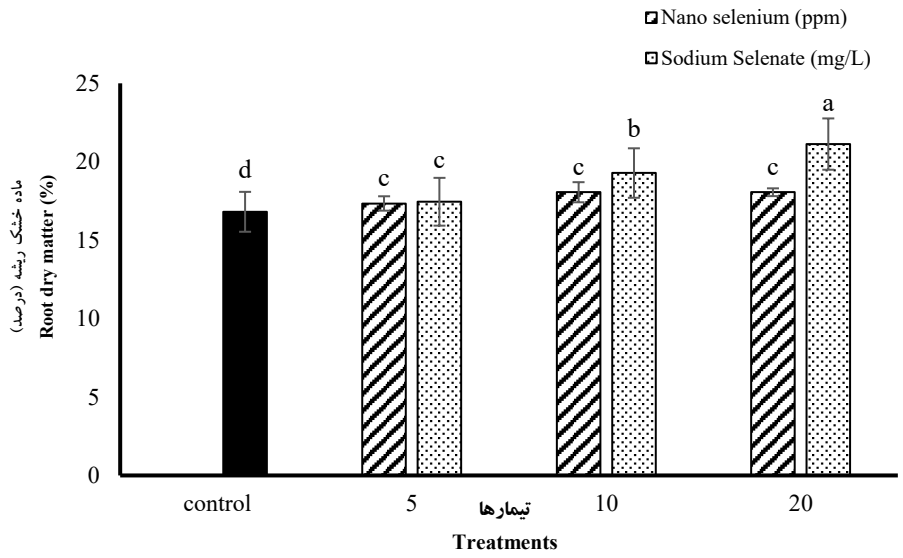
ماده خشک ریشه

نتایج حاکی از آن بود که ماده خشک ریشه اسفناج در تیمار با ترکیبات سلنیوم افزایش می یابد. بیشترین مقدار سلنات سدیم (۲۰ پی‌پی‌ام)، 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

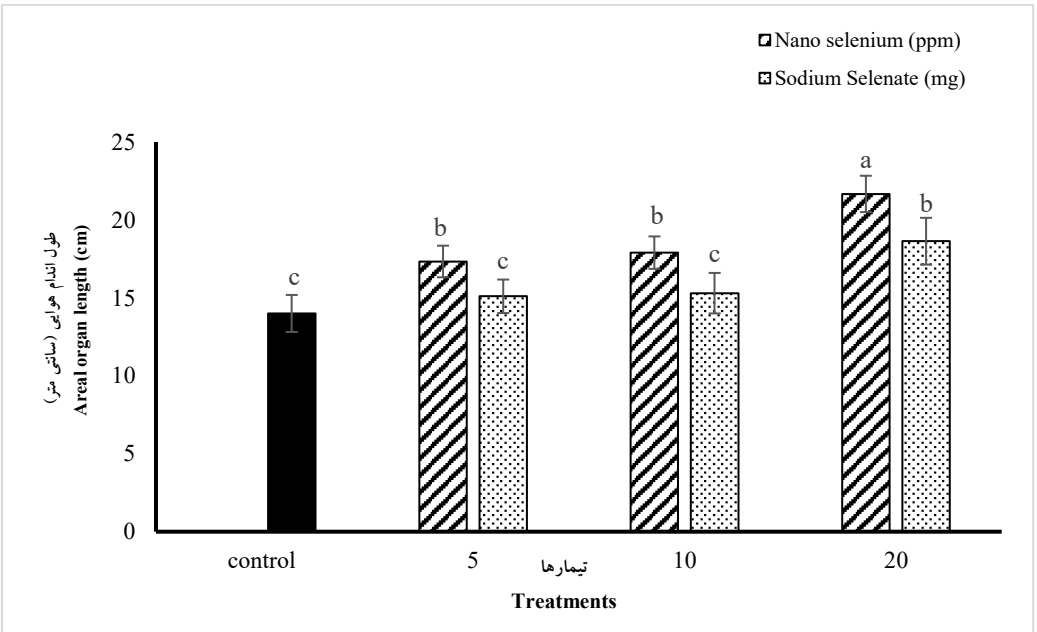
تیمار با هر دو ترکیب سلنیوم باعث افزایش طول اندام هوایی اسفناج شد. بیشترین افزایش در بالاترین سطح نانوسلنیوم و سلنات سدیم (به ترتیب ۵۴/۷۸ و ۳۳/۰۷٪ افزایش) بدست آمد. بیشترین و کمترین میزان طول اندام هوایی به ترتیب در گیاهان تیمار شده با ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم (۲۱/۶۷ سانتی‌متر) و تیمار شاهد (۱۴ سانتی‌متر)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

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]



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

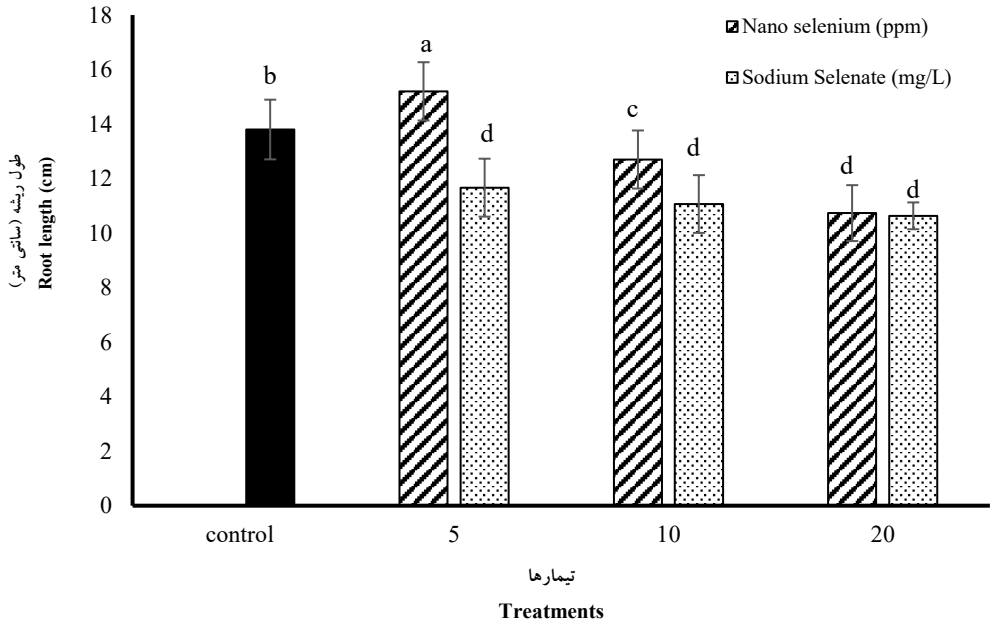
Fig. 3. The impact of nano-Selenium and Sodium Selenate treatments on areal organ length in spinach virofly variety. Values are the average of three repetitions and the same letters indicate no significant difference with Tucky test ($p< 0.05$).

طول ریشه

در اسفناج، تیمار گیاهان با پنج پی‌پی‌ام نانوسلنیوم (با افزایش ۱۰/۱۴٪ 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

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

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 سلنات‌سدیم بر طول ریشه در اسفناج رقم ویروفلای. 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 ($P< 0.05$).

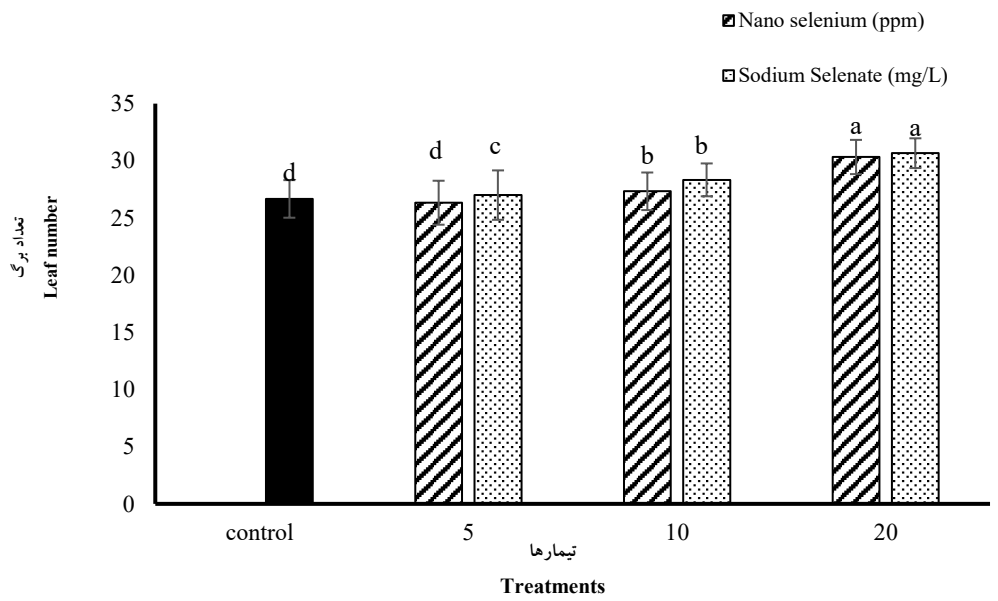
تعداد برگ

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

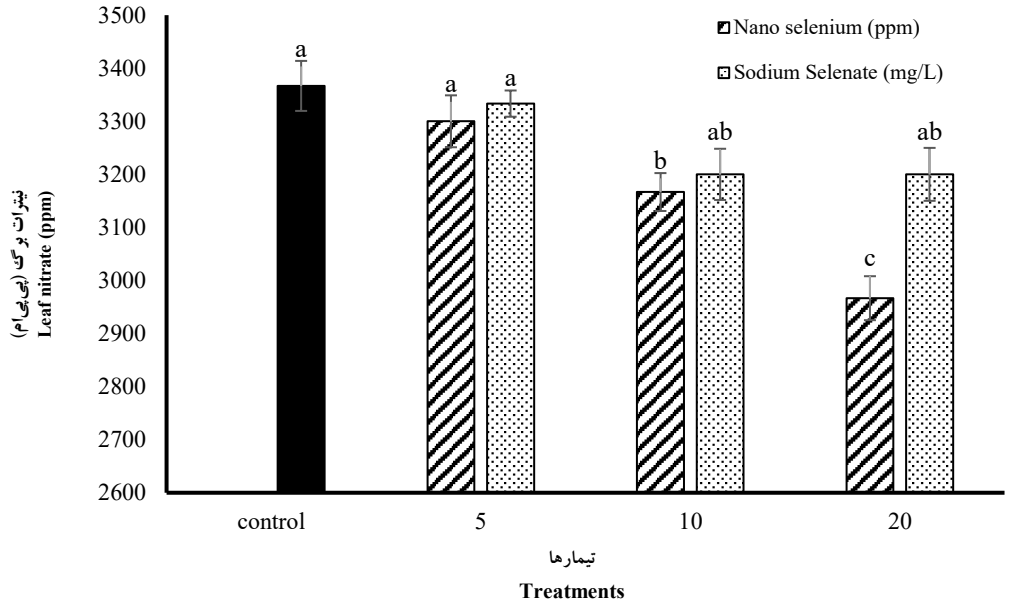
نیترات در بالاترین سطوح از نانوسلنیوم و سلنات سدیم ، به ترتیب ۱۱/۸۸ و ۴/۹۴٪ نسبت به شاهد، کاهش داشت. کمترین میزان نیترات در بالاترین سطح نانوسلنیوم (۲۹۶۶/۶ پی‌پی‌ام) و بیشترین میزان این صفت (۳۳۶۶/۶ پی‌پی‌ام)، تحت تیمار شاهد مشاهده شد (شکل ۶).

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]



شکل ۵. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر تعداد برگ در اسفناج رقم ویروفلای. 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 ($P< 0.05$).



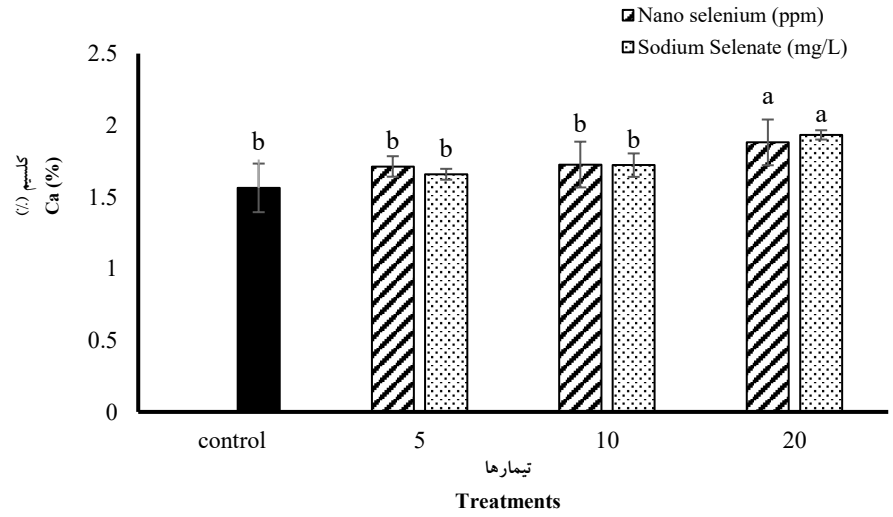
شکل ۶. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر محتوای نیترات برگ در اسفناج رقم ویروفلای. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.05$) است.

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 ($P< 0.05$).

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

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 سلنات‌سدیم بر محتوای کلسیم در اسفناج رقم ویروفلای. 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

تاثیر 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.

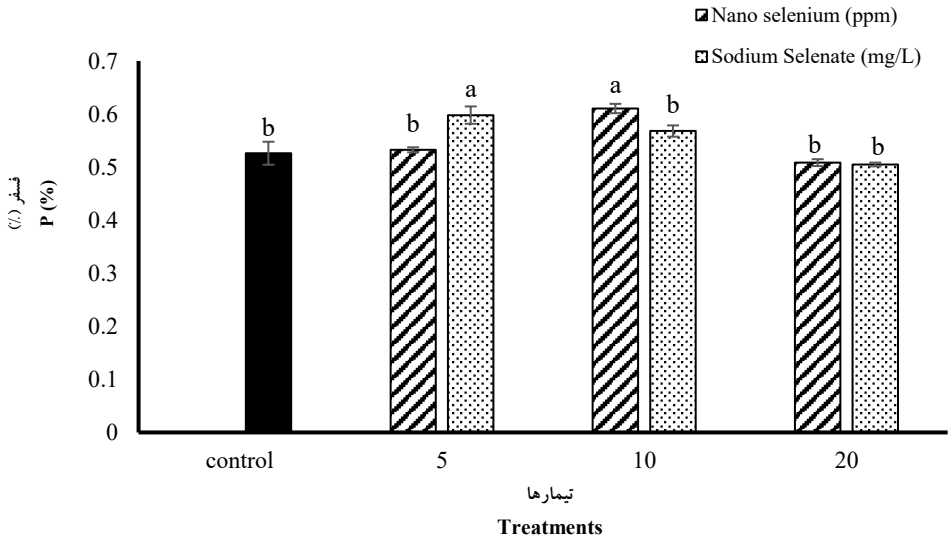
فسفر

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 نانوسلینوم و ۲۰ پی‌پی‌ام از سلنات سدیم موجب کاهش ۳/۸۴٪ در محتوای فسفر گردید (شکل ۸).

سدیم

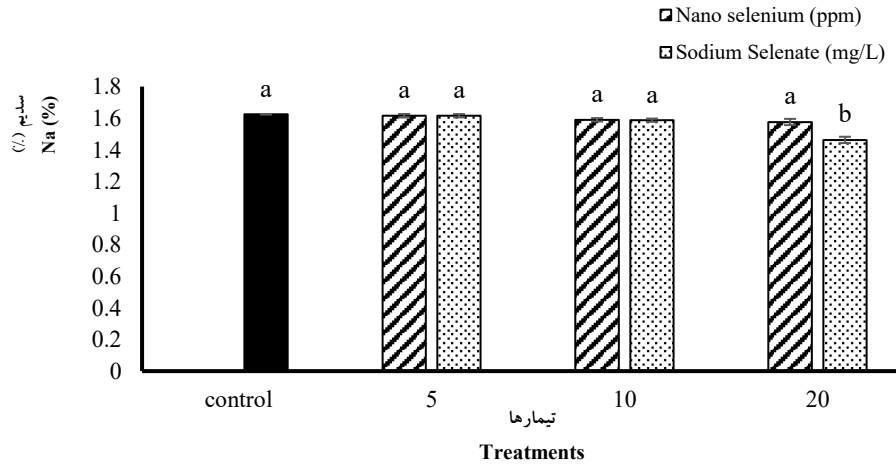
نتایج نشان داد که، میزان سدیم برگ با افزایش سطوح نانوسلنیوم و سلنات سدیم تا بالاترین سطح، به ترتیب ۳/۰۸ و ۹/۸٪ کاهش نشان داد. بطوریکه بیشترین و کمترین غلظت این عنصر به ترتیب به تیمار شاهد (۱/۶۲ ٪) و ۲۰ پی‌پی‌ام از سلنات سدیم (۱/۴۶ ٪) تعلق داشت (شکل ۹).

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]



شکل ۸. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر محتوای فسفر در اسفناج رقم ویروفلای. 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 ($P< 0.05$).



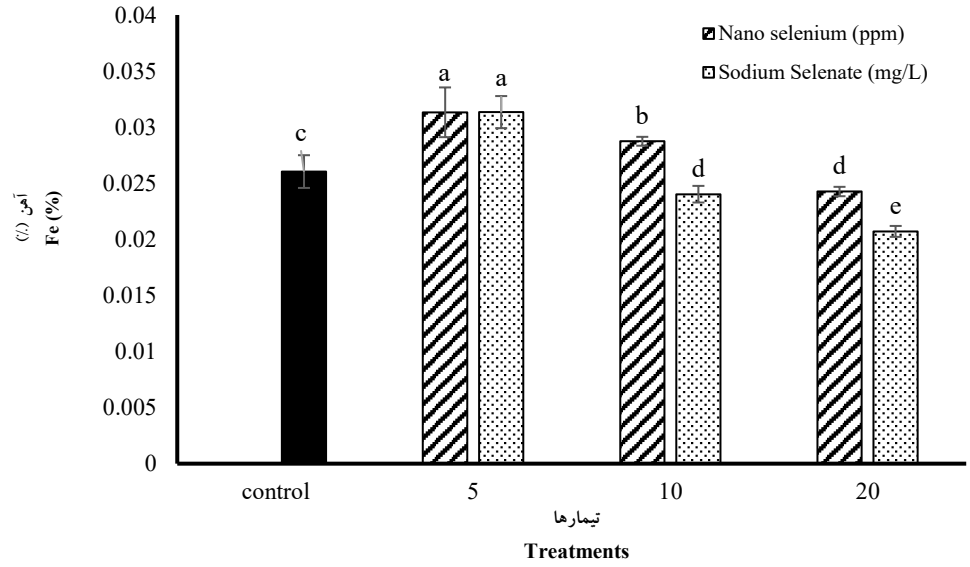
شکل ۹. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر محتوای سدیم در اسفناج رقم ویروفلای. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.05$) است.

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).

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

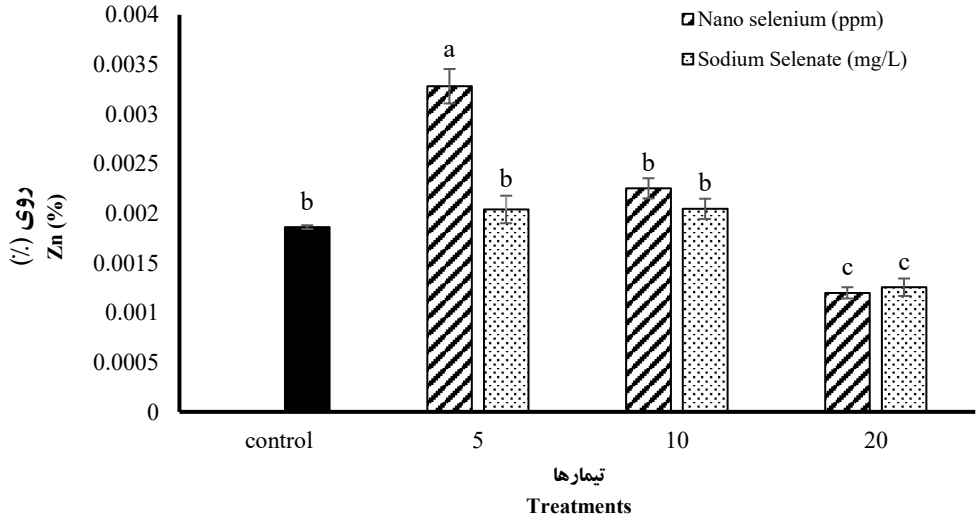


شکل ۱۰. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر محتوای آهن در اسفناج رقم ویروفلای. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.05$) است.

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 پی‌پی‌ام از نانوسلینوم موجب افزایش ۷۷/۷۷٪ در محتوای عنصر روی و ثبت بیشترین مقدار این عنصر (۰/۰۰۳۲ ٪) گردید. با این حال تیمار با نانوسلنیوم ۲۰ پی‌پی‌ام با کاهش ۳۸/۸۸٪در غلظت روی، کمترین میزان این عنصر (۰/۰۰۱۱ ٪) را به خود اختصاص داد (شکل ۱۱).



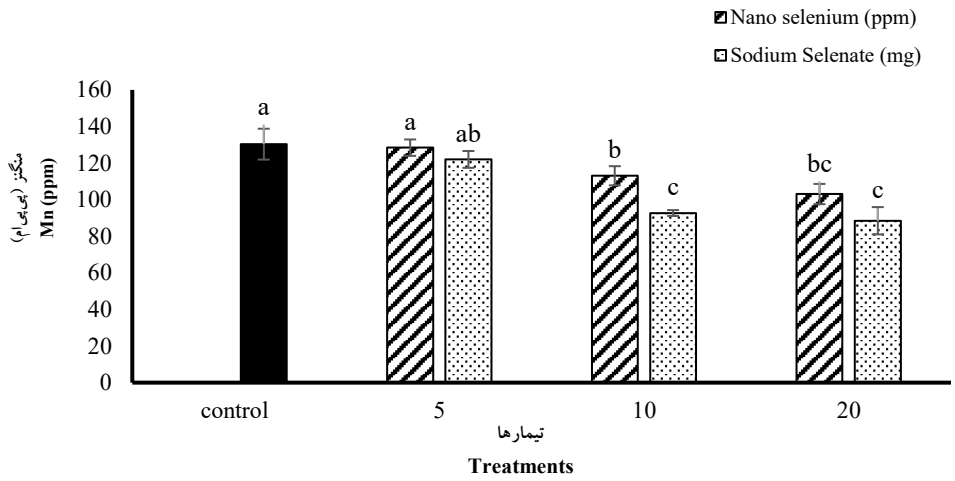
شکل ۱۱. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر محتوای روی در اسفناج رقم ویروفلای. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.05$) است.

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 ($P< 0.05$).

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

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).

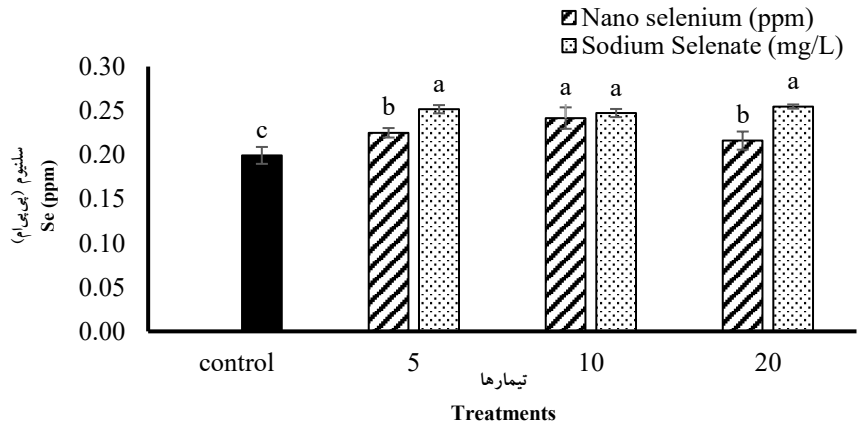


شکل ۱۲. اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات‌سدیم بر محتوای منگنز در اسفناج رقم ویروفلای. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.05$) است.

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 نانوسلینوم ۱۰ پی‌پی‌ام بود. با اینکه کاربرد ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلینوم 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 سلنات‌سدیم بر محتوای سلنیوم در اسفناج رقم ویروفلای. 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 ($P< 0.05$).

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

بحث

سلنیوم، به‌عنوان یک عنصر مفید، رشدونمو گیاه را از طریق افزایش در فتوسنتز و بهبود کارایی فتوسیستم II بهبود می‌بخشد (Ozbolt *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 غشاءسلول نسبت‌به یون‌های سدیم، پتاسیم و کلسیم متعاقباً اختلال در تنفس و جذب‌آب، منجربه کاهش ماده‌خشک گیاه می‌شود (Dziubinskaa *et al*., 2010; John *et al*., 2009). همچنین سطوح بالای سلنیوم، از طریق افزایش میزان ترکیبات‌فنلی، اکسیداسیون‌آنزیمی‌اکسین و دکربوکسیله‌کردن ایندول‌استیک‌اسید (Gul *et al*., 2017; Guardado-Felix *et al*., 2019)، منجربه کاهش تقسیم‌سلولی در سلول‌های ریشه می‌شود (Tavakoli *et al*., 2020).

نانوذرات از طریق مسیرهای آپوپلاستی و سیمپلاستی به‌سمت ریشه حرکت و درنهایت از طریق آوند آبکش و چوب به برگ‌ها و ساقه منتقل می‌شوند (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 سیگنالینگ‌اتیلن (Rezvani *et al*., 2012; Rezende *et al*., 2018) و القاء تقسیم‌سلولی در سلول‌های مریستمی نوک ریشه (Du *et al*., 2019; Li *et al*., 2019)، ارتقاء می‌بخشد. همسو با یافته‌های این‌پژوهش، تیمار با ترکیبات حاوی‌سلنیوم موجب افزایش طول ساقه در گیاه خیار[۱] (Mousavi *et al*., 2022)، افزایش وزن‌خشک اندام‌های‌هوایی و ریشه در گیاه نعناءفلفلی[۲] (Jafari & Moghaddam 2023) و بهبود ویژگی‌های‌رشدی در گیاه تنباکو[۳] (Liu *et al.,* 2020) شده است. همچنین محلول‌پاشی برگی با نانوذرات سلنیوم، وزن‌تر و خشک برگ، تعداد برگ و ارتفاع را در گیاه گشنیز[۴] (Ghazi, 2018) و تعداد برگ، وزن‌تر 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 گوجه‌فرنگی[۶] (Abulghasemi & Haghighi, 2018) و گیاه درمنه[۷] (Logvinenko *et al*., 2022) نیز آشکار ساخت که سلنیومِ عنصری بیشتر بر صفات‌رویشی و نانوسلنیوم بیشتر بر تغییرات‌فتوسنتزی و آنتی‌اکسیدانی تأثیرگذار بوده‌است. همچنین تیمار با سلنیوم، موجب افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی 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 می‌تواند سنتز پروتئین را با تأثیر مستقیم بر آن از طریق اشکال اسیدآمینه که شامل گوگرد جایگزین شده است، تقویت کند. علاوه‌براین، تیمار با سلنیوم منجر به افزایش گلوکز، پروتئین، فلاونوئید و ساکارز شده است (Sun et *al*., 2022، Wang *et al*., 2022).

محتوای سلنیوم گیاهان می‌تواند توسط کوددهی خاکی، کاربرد برگی، 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 برگی سلنیوم موجب افزایش قابل توجه محتوای سلنیوم در عدس[۱۲] (Thavarajah *et al*., 2015)، گندم[۱۳] (Nawaz *et al*., 2015)، شاهی[۲] (Khosravi et al., 2022) و اسفناج[۱۵] (Moteshare Zadeh *et al*., 2020) شده است که با نتایج به‌دست آمده در این پژوهش مطابقت دارد.

سلنیوم جذب و توزیع عناصر ضروری، به‌علاوه 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 نیتریت ردوکتاز می‌شود. از طرفی، نیاز گیاهان به ترکیبات نیتروژنه موجب افزایش آسمیلاسیون گوگرد می‌شود. 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- *Hordeum vulgare* ۱۲- *Lens culinaris* ۱۳- *Triticum aestivum* ۱۴- *Lepidium sativum* ۱۵- *Spinacia oleracea*

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

می‌شود (Amerian, 2012 ؛Rios *et al*., 2010). چنین رخدادی در نعناع 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 افزاینده 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 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-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 درنتیجه 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 احتمالا 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) داشته اند. 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 نعناع 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.

۱- *Spinacia oleracea* ۲- *Lactuca sativa* ۳- *Lepidium sativum* ۴- *Mentha piperita*

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

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.

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.). *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 (*Clupeonella 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, Ishaaq 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

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

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 Ruminal 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-Uribe, 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 CO_2 and NO_3^- 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.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

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. (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.

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*, *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

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

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., Esmaeilizadeh, 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 Chem*istry, *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

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

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.jprot.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., Ünnep, 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.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]

Iranian Journal of Horticultural Science and Technology 25 (4):519-536 (2024)
Research article

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

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-11-17]