فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۴، شماره ۶۵، خرداد و تیرماه ۱۴۰۴ صفحه: ۱۷۳-۱۸۹
https://doi.org/10.22034/14.66.173

مقاله پژوهشی

تأثیر نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر خصوصیات رشدی، فیزیولوژیک و آنتی‌اکسیدانی اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) رقم دَش

محمد قاسمی، منصوره شمیلی* و عبدالمجید میرزاعلیان دستجردی

گروه علوم باغبانی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۹، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴)

چکیده

گیاهان به عنوان بهترین منبع سلنیوم برای انسان‌ها و حیوانات، این عنصر را از خاک جذب می‌کنند. نانوذرات سلنیوم، به عنوان نانوذرات پایدار، جهت استفاده به عنوان کود گیاهی معرفی شده‌اند. با توجه به نقش مفید سلنیوم در گیاهان، نیاز ضروری آن در بدن انسان و حیوانات و اثرات سمی آن در غلظت‌های بالا، در تحقیق حاضر بررسی اثرات سلنیوم (به شکل بالک و نانو) بر خصیصه‌های، رشدی، فیزیولوژیک و آنتی‌اکسیدانی اسفناج در شرایط گلخانه مورد توجه قرار گرفت. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. فاکتورها شامل محلول‌پاشی با نانوسلنیوم (۵، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام)، سلنات سدیم (۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم‌در لیتر) و آب‌مقطر (گیاهان کنترل) بود. بر اساس یافته‌ها، سطوح بالای هر دو تیمار (تا ۲۰ پی‌پی‌ام نانو سلنیوم و ۲۰ میلی‌گرم‌در لیتر سلنات سدیم) موجب افزایش طول اندام هوایی و ریشه، تعداد برگ، ماده خشک برگ و ریشه، محتوی پرولین، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و فعالیت پراکسیداز شد. نشت یونی در پاسخ به تیمار نانوسلینوم، کاهش یافت. در مقابل، بیشترین نشت یونی در سطح ۱۰ میلی‌گرم‌در لیتر سدیم سلنات ثبت شد. تنها در کمترین سطح هر دو تیمار، محتوای مالون دی‌آلدهید و فعالیت آنزیم کاتالاز افزایش نشان داد. سدیم سلنات (۲۰ میلی‌گرم در لیتر) و نانوسلنیوم (۵ پی‌پی‌ام) بهبود محتوای فلاونوئید را باعث شدند. فنل نیز تحت سطوح مختلف نانوسلنیوم و تنها در سطح ۱۰ میلی‌گرم در لیتر سدیم سلنات، افزایش یافت. اما در سطوح دیگر سدیم سلنات، کاهش این صفت رخ داد.

واژه‌های کلیدی: پراکسیداز، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، کاتالاز، مالون دی‌آلدئید، نشت یونی

مقدمه

سلنیوم یکی از عناصر غذایی ضروری و کم مصرف برای رشد و نمو انسان‌ها و حیوانات است (Hartikainen, 2005). سلنوپروتئین‌ها، در سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی و تنظیم اکسایش پستانداران شرکت می‌کنند (Ingold *et al.*, 2018). و کمبود آن منجر به اختلال عملکرد سیستم ایمنی و زوال شناختی می‌شود (Guillin *et al.*, 2019; Xie *et al.*, 2021). غلظت سلنیوم (۰/۰۱ تا ۲ میلی‌گرم 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 زنجیره غذایی می‌کنند (Malagoli *et al.*, 2015). نانوتکنولوژی یک زمینه امیدبخش از مهندسی زیستی است که

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: shamili@ut.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]

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). محلول‌پاشی برگی گیاهان با نانوسلنیوم، با بهبود مکانیسم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی، شاخص‌های فتوسنتزی و متابولیت‌های ثانویه همراه بوده است (Djanaguiraman *et al*., 2018; Zsiros *et al*., 2019).

اسفناج (Spinach) با نام علمی (*Spinacia olerace* L.) و متعلق به خانواده Amaranthaceae، گیاهی یکساله و روز بلند، جز سبزی‌های برگی مهم فصل سرد است (Mashayekhi and Shomali, 2018). اسفناج تازه حاوی مواد قندی، لسیتین (Lecithin)، سکرتین (Secretin)، کلروفیل، کاروتن، ساپونین (Saponins)، ترکیبات فنلی، کافئیک اسید (Caffeic acid)، ارتوکوماریک اسید (o-Coumaric acid)، پاراکوماریک اسید، میریستین (Myristicin) و اگزالات (Oxalates) است (Aisha *et al*., 2013). از آنجا که سلنیوم از جمله عناصر مفید در گیاهان (از جمله اسفناج) است و با توجه به اثرات سمی این عنصر در غلظت‌های بالای استفاده، در تحقیق حاضر بررسی اثرات سلنیوم (به دو شکل بالک و نانو) بر گیاه اسفناج مورد توجه قرار گرفت. هدف از این تحقیق، مقایسه محلول‌پاشی با نانو سلنیوم (۵، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام) و سلنات سدیم (۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) بر ویژگی‌های رشدی (ماده خشک برگ و ریشه، طول اندام هوایی و ریشه و تعداد برگ) و فیزیولوژیک (میزان نشت یونی، محتوای پرولین و مالون دی‌آلدئید) و آنتی‌اکسیدانی (محتوای فنل، فلاونوئید، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز) در گیاه اسفناج است.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی مواد گیاهی و تیمارها: تحقیق حاضر در سال ۱۴۰۱ در دانشکده کشاورزی دانشگاه هرمزگان به اجرا درآمد. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. فاکتورها شامل محلول‌پاشی با نانو سلنیوم (۵، ۱۰ و ۲۰ پی‌پی‌ام)، سلنات سدیم (۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر) و آب‌مقطر (گیاهان کنترل) بود. بذر اسفناج رقم دَش (Dash) (تولید شرکت تاکی ژاپن) از شرکت آرکاکشت راسپینا تهیه گردید. سلنات سدیم (Na_2SeO_3) از شرکت مرک (Merk) و نانوذره سلنیوم از شرکت NanoSany (مشهد)، تهیه شد. محدوده سایز نانوذره سلنیوم ۱۰–۴۵ نانومتر، چگالی ظاهری ۳/۸۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب، شکل تقریباً کروی، پتانسیل Zeta، میانگین Z (d.nm)، و PDI نانو ذره نیز به ترتیب ۳۲/۸، ۴۱/۳۵ و ۰/۵۶۵ mV بود.

کشت گیاهان در شرایط گلخانه: بستر مورد استفاده برای کاشت بذور، ترکیب خاک باغچه، خاک برگ و ماسه (۱:۱:۱) بود. گیاهان در دمای متوسط روزانه ۲±۲۷ و دمای متوسط شبانه ۲±۲۴ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۰ درصد کشت شدند. بذور در کرت¬هایی به ابعاد ۰/۸ × ۱ متر مربع (فاصله کرت‌ها ۰/۵ متر) کشت شدند. پس از کاشت، آبیاری روزانه به روش قطره¬ای انجام گرفت. پس از سبزشدن بذرها و تا مرحله چهار برگی، آبیاری هر سه روز یکبار انجام شد. پس از آن هر دو روز یکبار آبیاری صورت گرفت. سه هفته بعد عملیات تنک انجام شد. گیاهچه‌های اسفناج در مرحله رشد رویشی مورد تیمار قرار گرفتند. مرحله اول اعمال تیمارها، هشت هفته پس از سبزشدن بذور و مرحله دوم، ده روز پس از مرحله اول بود. ده روز پس از محلول‌پاشی دوم، صفات زیر اندازه‌گیری شد.

ماده خشک برگ و ریشه: نمونه‌های برگ و ریشه جمع‌آوری و توزین (ترازوی دیجیتالی ۰/۰۰۱ گرم) شدند. پس از خشک‌کردن نمونه‌ها در آون (۷۰ درجه سانتی‌گراد، ۷۲ ساعت) و توزین مجدد، میزان ماده خشک برگ و ریشه محاسبه شد.

طول اندام هوایی و ریشه: طول اندام هوایی و ریشه در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]

انتهای آزمایش، با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری و ثبت شد.

تعداد برگ: تعداد برگ هر بوته در انتهای آزمایش، شمارش شد.

پرولین برگ: بررسی مقدار اسیدآمینه پرولین با روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) انجام شد. برای این منظور ۰/۵ گرم برگ در ۱۰ میلی‌لیتر محلول ۳ درصد سولفوسالیسیلیک اسید در هاون ساییده، از کاغذ صافی گذرانیده شد. به ۲ میلی‌لیتر از عصاره، ۲ میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین (۱/۲۵ گرم نین‌هیدرین در ۳۰ میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال) و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال اضافه و انکوبه (یک ساعت، بن‌ماری، ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) شدند. پس از نگهداری در حمام یخ (۳۰ دقیقه)، ۴ میلی‌لیتر تولوئن افزوده و ورتکس (۳۰ ثانیه) شدند. پس از انکوبه کردن لوله‌های حاوی عصاره در شرایط آزمایشگاه، دو لایه مجزا تشکیل شد که در نهایت جذب نوری روشناور در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر (CECIL- CE2501) خوانده شد. منحنی استاندارد پرولین با استفاده از استاندارد پرولین (صفر، ۱۲/۵، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) رسم و رابطه رگرسیونی $y = 0.0033x + 0.2558$ (با ضریب تبیین برابر ۰/۹۸) به‌دست آمد. مقدار پرولین بر حسب میکرومول در گرم وزن تازه گزراش گردید.

نشت یونی برگ: اندازه‌گیری میزان نشت یونی برگ براساس روش (Sairam and Srivastava, 2002) انجام شد. بدین‌منظور ۰/۵ گرم برگ از یک سوم میانی هر گیاه در ۲۵ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر درون لوله آزمایش قرار داده و در حمام آب‌گرم (۴۰ درجه سانتی‌گراد، ۳۰ دقیقه) قرار گرفتند. بعد از اینکه به دمای محیط رسید، میزان هدایت الکتریکی اولیه (EC_1) به وسیله EC متر (Tetracon 325 WTW) ثبت شد. پس از آن نمونه‌ها مجدداً در حمام آب گرم (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۵ دقیقه) قرار داده و پس از رسیدن به دمای محیط، هدایت الکتریکی (EC_2) ثبت و درصد نشت یونی (EL) از رابطه زیر محاسبه گردید.

$$EL = (EC1/EC2) \times 100$$

مالون دی‌آلدئید برگ: بدین منظور، نیم گرم از برگ‌های یک سوم میانی با ۵ میلی‌لیتر تری‌کلرو استیک اسید یک درصد در هاون چینی سائیده و عصاره‌ها سانتریفیوژ (۱۰۰۰۰ دور در دقیقه، ۴ درجه سانتی‌گراد، ۵ دقیقه) شدند. پس از آن ۲۵۰ میکرولیتر از هر نمونه با ۱ میلی‌لیتر از محلول واکنش (حاوی تری‌کلرو استیک اسید ۲۰ درصد و تیوباربیتوریک اسید ۵ درصد) مخلوط و در حمام آب گرم (۳۰ دقیقه، ۹۵ درجه سانتی‌گراد) انکوبه شدند. پس از انتقال نمونه‌ها به محیط سرد و سانتریفیوژ مجدد (۱۰۰۰۰ دور در دقیقه، ۴ درجه سانتی‌گراد، ۱۰ دقیقه) جذب عصاره در طول‌موج‌های ۴۵۰، ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر به وسیله اسپکتروفتومتر خوانده و بر حسب میلی‌مول در گرم وزن تازه گزارش شد (Alexieva *et al.*, 2001).

فلاونوئید برگ: سنجش محتوای فلاونوئید با استفاده از روش رنگ‌سنجی کلرید آلومینیوم (Braca *et al.*, 2002) انجام شد. برای این منظور مقدار نیم گرم بافت برگی به همراه ۳ میلی‌لیتر متانول ۸۵ درصد در هاون چینی همگن و سپس سانتریفیوژ (۶۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۵ دقیقه) گردید. پس از آن به هر لوله آزمایش حاوی عصاره، ۱/۵ میلی‌لیتر متانول، ۱۰۰ میکرولیتر کلرید آلومینیوم ۱۰ درصد، ۱۰۰ میکرولیتر استات پتاسیم یک مولار و ۲/۸ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر افزوده و به مدت ۳۰ دقیقه در تاریکی در دمای آزمایشگاه انکوبه شدند. در نهایت جذب عصاره توسط دستگاه میکروپلیت ریدر (Epoch2, Biotek Ltd, U.S.A) در طول‌موج ۴۱۵ نانومتر خوانده شد. منحنی استاندارد فلاونوئید با استفاده از استاندارد کوئرسیتین (صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) رسم و رابطه رگرسیونی $y = 0.089X + 0.0.354$ (با ضریب تبیین برابر ۰/۹۹) به‌دست آمد. مقدار فلاونوئید بر حسب میلی‌گرم کوئرستین در ۱۰۰ گرم وزن خشک گزارش شد.

فنل برگ: برای سنجش میزان فنل از معرف فولین-سیوکالتیو و از روش (Waterhouse, 2002) استفاده شد. بدین منظور نیم گرم برگ با ۳ میلی‌لیتر متانول ۸۵ درصد در هاون چینی سائیده و پس از سانتریفیوژ (۶۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۵

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]

دقیقه)، ۱۵۰ میکرولیتر از عصاره با ۷۵۰ میکرولیتر معرف فولین ۱۰ درصد مخلوط و پس از پنج دقیقه استراحت، ۶۰۰ میکرولیترکربنات سدیم هفت درصد افزوده و به‌مدت ۹۰ دقیقه در حالت تاریکی روی شیکر قرار گرفتند. در نهایت میزان جذب در طول‌موج ۷۶۰ نانومتر و با استفاده از میکروپلیت ریدر خوانده شد. منحنی استاندارد فنل با استفاده از استاندارد گالیک اسید (صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) رسم و رابطه رگرسیونی y = 0/0006x + 0/025 (با ضریب تبیین برابر ۰/۹۷) به‌دست آمد. مقدار فنل بر حسب میلی‌گرم گالیک اسید در ۱۰۰ گرم وزن خشک گزارش شد.

فعالیت آنتی‌اکسیدانی برگ: برای سنجش میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی از روش (Brand-Williams *et al.*, 1995) استفاده شد. بدین منظور پس از تهیه عصاره متانولی از نیم گرم برگ، مقدار ۵۰۰ میکرولیتر از عصاره متانولی با ۵۰۰ میکرولیتر آب دوبار تقطیر ترکیب و سانتریفیوژ (۱۰۰۰۰ دور در دقیقه، ۴ درجه سانتی‌گراد، پنج دقیقه) گردید. سپس ۷۵ میکرولیتر از روشناور با ۲۹۲۵ میکرولیتر، ۲ و۲ – دی‌فنیل ۱- پیکریل-هیدرازیل (DDPH) مخلوط و ورتکس شد. پس از ۳۰ دقیقه استراحت در دمای آزمایشگاه و محیط تاریک، جذب نوری عصاره در طول‌موج ۵۱۷ نانومتر توسط میکروپلیت ریدر خوانده شد. مقدار فعالیت آنتی‌اکسیدانی (بر حسب درصد) از رابطه زیر محاسبه و سپس بر اساس وزن نمونه با واحد میلی‌گرم IC_{50} گزارش شد.

درصد فعالیت آنتی‌اکسیدانی= $100 \times (A_{DPPH} - A_{Sample}/A_{DPPH})$

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

سنجش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان برگ (کاتالاز و پراکسیداز): بدین منظور نیم گرم برگ تازه در ازت مایع در حضور ۱ میلی‌لیتر بافر استخراج (حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار، ۰/۰۳۷۲ گرم EDTA و یک گرم PVP) هموژن شد. پس از سانتریفیوژ (۱۲۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۵ دیقه)، از روشناور جهت سنجش فعالیت کاتالاز و پراکسیداز استفاده شد (Dhindsa *et al.*, 1981). جهت سنجش فعالیت کاتالاز، ۵۰ میکرولیتر از عصاره آنزیمی با ۱ میلی‌لیتر محلول واکنش کاتالاز (حاوی بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار با pH برابر ۷ و پراکسید هیدروژن ۱۵ میلی‌مولار) مخلوط و جذب آن در طول‌موج ۲۴۰ نانومتر ثبت و بر حسب میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه گزارش شد (Dhindsa *et al.*, 1981). جهت سنجش فعالیت پراکسیداز، ۳۳ میکرولیتر عصاره آنزیمی با ۱ میلی‌لیتر محلول واکنش پراکسیداز (حاوی ۱۳ میلی‌مول گوایکول، ۵ میلی‌مول پراکسید هیدروژن و ۵۰ میلی‌مول بافر فسفات پتاسیم با pH برابر ۷) مخلوط و جذب آن در طول‌موج ۴۷۰ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر خوانده و بر حسب میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه گزارش گردید (Chance and Maehly, 1995).

نرمال‌بودن داده‌ها با روش Shapiro-Wilk صورت گرفت. آزمون توکی برای مقایسه میانگین ($P < 0.01, 0.05$) و آنالیز آماری داده‌ها با نرم‌افزار SAS Ver.9.4 انجام شد. همچنین تصاویر با کمک برنامه EXCEL 2016 ترسیم شدند.

نتایج

براساس نتایج تجزیه واریانس اثر تیمار (نانوسلنیوم و سلنات سدیم) بر ماده خشک برگ ($P< 0.05$)، طول اندام هوایی، طول ریشه و تعداد برگ ($P< 0.01$) معنی‌دار گردید. لازم به ذکر است که اثر تیمار بر ماده خشک ریشه معنی‌دار نگردید (جدول ۱). همچنین تأثیر تیمارها بر محتوای پرولین ($P< 0.01$) و مالون دی‌آلدئید ($P< 0.05$) معنی‌دار بود اما بر میزان نشت یونی تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۲). اثر تیمارها بر فعالیت کاتالاز و پراکسیداز ($P< 0.01$) معنی‌دار بود اما بر محتوای فلاونوئید، فنل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی معنی‌دار نبود (جدول ۳).

طول اندام هوایی: براساس نتایج تجزیه واریانس اثر تیمار بر طول اندام هوایی ($P< 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۱). همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، با افزایش سطوح نانوسلنیوم تا ۲۰ پی‌پی‌ام، طول اندام هوایی ۱۱/۱۷ درصد

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]

جدول ۱- تأثیر تیمارهای اعمال‌شده بر مشخصه‌های رشدی در اسفناج رقم دش

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		ماده خشک برگ (درصد)	ماده خشک ریشه (درصد)	طول اندام هوایی (سانتی متر)	طول ریشه (سانتی متر)	تعداد برگ
تیمار	۶	۵۰/۱*	۱/۶ns	۲/۰**	۱۷/۱**	۹۸/۱**
خطا	۱۴	۱۳/۰	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۷/۹
ضریب تغییرات		۲۲/۹۲	۱۰/۷۳	۳/۳۱	۱۱/۵۲	۱۱/۰۹

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

جدول ۲- تأثیر تیمارهای اعمال‌شده بر مشخصه‌های فیزیولوژیک گیاه اسفناج رقم دش

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		پرولین (میکرومول در گرم وزن تازه)	نشت یونی (درصد)	مالون دی‌آلدئید (میلی‌مول در گرم وزن تازه)
تیمار	۶	۵۴۳/۱**	۳۷/۶ns	۰/۰۱۰*
خطا	۱۴	۳/۲	۳۸/۴	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات		۱۹/۶۹	۶/۵۷	۲۱/۱۶

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

جدول ۳- تأثیر تیمارهای اعمال‌شده بر مشخصه‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه اسفناج رقم دش

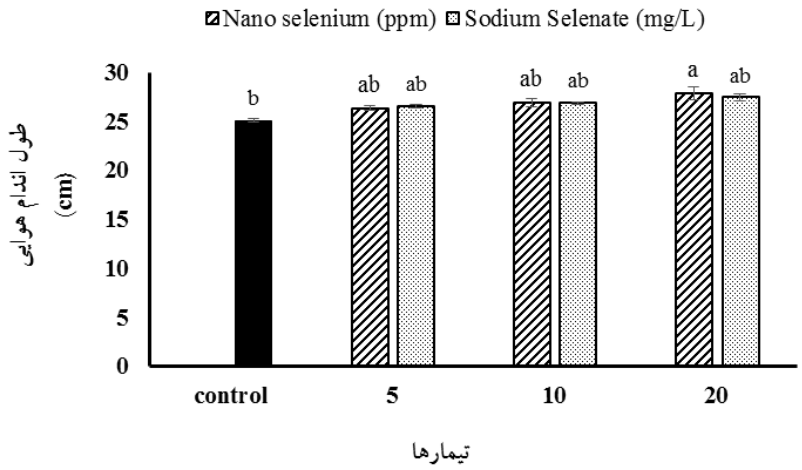
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		فلاونوئید (میلی‌گرم کوئرستین در گرم وزن خشک)	فنل (میکروگرم گالیک اسید در گرم وزن خشک)	فعالیت آنتی‌اکسیدانی (میلی‌گرم)	کاتالاز (میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه)	پراکسیداز (میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه)
تیمار	۶	۵۳/۴ ns	۸۷۱/۶ ns	۱۰۲/۶ ns	۲۶/۰**	۴۸۸/۶**
خطا	۱۴	۳۴۵/۱	۹۷۹/۹	۴۶/۱	۴/۶	۵۷/۰
ضریب تغییرات		۱۳/۱۹	۲۳/۵۸	۱۷/۴۹	۲/۰۹	۱۴/۴۷

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

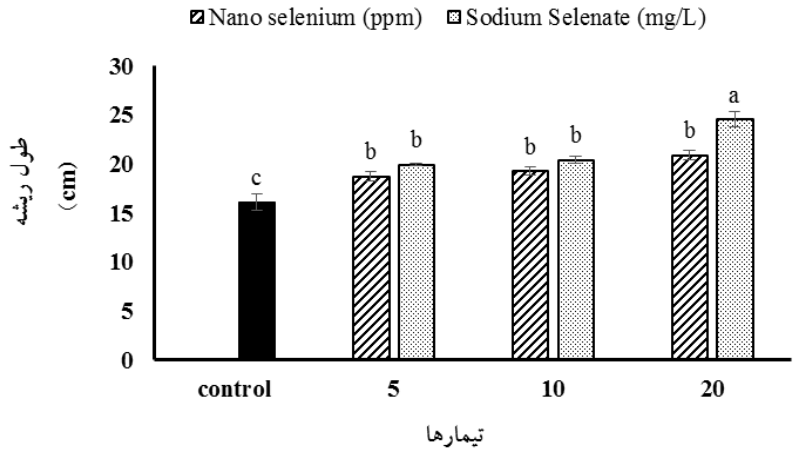
نسبت به تیمار شاهد، افزایش یافت. بیشترین طول اندام هوایی تحت تیمار ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم (۲۷/۸۶ سانتی‌متر) و کمترین میزان آن تحت تیمار شاهد (۲۵/۰۶ سانتی‌متر) بدست آمد. علاوه بر این تیمار با سلنات سدیم تا ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نیز موجب افزایش ۹/۴۵ درصدی در طول اندام هوایی شد.

طول ریشه: براساس نتایج اثر تیمار با نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر صفت طول ریشه اسفناج ($P< 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۱). داده‌های موجود در شکل ۲، حاکی از آن بود که با افزایش محتوای نانوسلنیوم تا ۲۰ پی‌پی‌ام، طول ریشه تا ۲۹/۷۵ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. علاوه بر این، بالاترین سطح سلنات سدیم (۲۰ میلی‌گرم در لیتر)، موجب افزایش (۵۲/۲۶ درصد) در طول ریشه و ثبت بیشترین

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]



شکل ۱- اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر طول اندام هوایی در اسفناج رقم دش. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P < 0.01$) است.



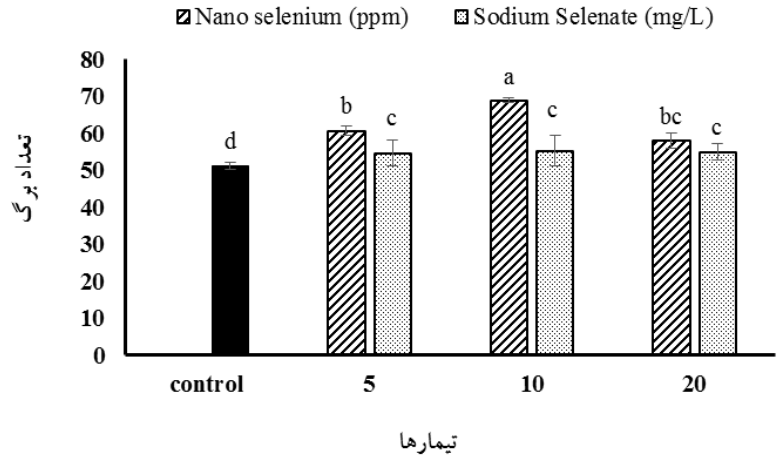
شکل ۲- اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر طول ریشه در اسفناج رقم دش. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.01$) است.

میزان این صفت (۲۴/۵۶ سانتی‌متر) شد. کمترین میزان طول ریشه (۱۶/۱۳ سانتی‌متر) نیز متعلق به تیمار شاهد بود.

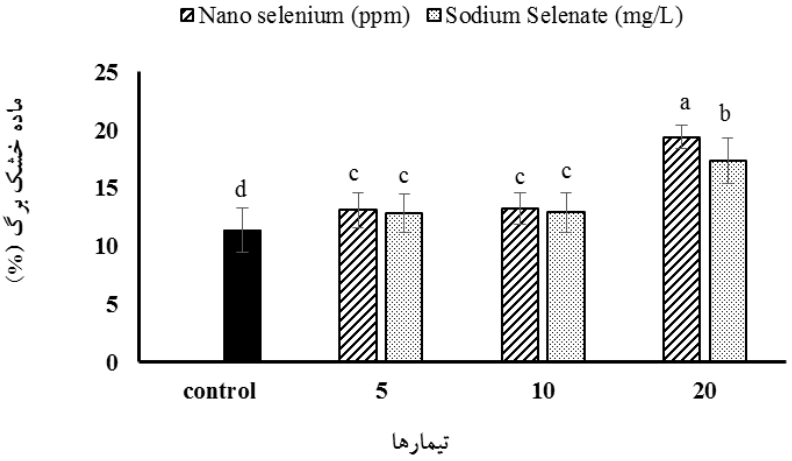
تعداد برگ: براساس نتایج اثر تیمار سلنیوم بر صفت تعداد برگ ($P< 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۱). بر اساس نتایج شکل ۳، تیمار گیاهان اسفناج با نانوسلنیوم تا ۱۰ پی‌پی‌ام، موجب افزایش ۳۴/۵۹ درصدی در تعداد برگ، شد. بیشترین تعداد برگ (۶۸/۸۶) تحت همین تیمار ثبت شد. با اینکه کاربرد ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم نیز موجب افزایش تعداد برگ نسبت به شاهد شد، اما این افزایش ۲۱/۲۳ درصد کمتر از زمانی بود که ۱۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم اعمال شده بود. علاوه بر این، سلنات سدیم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نیز موجب افزایش ۷/۵ درصدی در تعداد برگ شد. کمترین تعداد برگ (۵۱/۱۶) متعلق به تیمار شاهد بود.

ماده خشک برگ: اثر تیمار (نانوسلنیوم و سلنات سدیم) بر ماده خشک برگ ($P< 0.05$) معنی‌دار بود. بر اساس شکل ۴، تیمار با هر دو ترکیب حاوی سلنیوم باعث افزایش ماده خشک برگ شد. نانوسلنیوم ۲۰ پی‌پی‌ام و سلنات سدیم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر، به ترتیب افزایش ۷۰/۴۷ و ۵۲/۱۹ درصدی در ماده

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]



شکل ۳- اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر تعداد برگ در اسفناج رقم دش. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی (P< 0.01) است.



شکل ۴- اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر ماده خشک برگ در اسفناج رقم دش. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی (P< 0.05) است.

خشک برگ ایجاد کردند. بیشترین میزان ماده خشک برگ به گیاهان تیمارشده با ۲۰ پی‌پی‌ام از نانوسلنیوم (۱۹/۴۰ درصد) و کمترین میزان این صفت به تیمار شاهد (۱۱/۳۸ درصد) تعلق داشت.

ماده خشک ریشه: در تحقیق حاضر اثر تیمار بر ماده خشک ریشه معنی‌دار نگردید (جدول ۱). با توجه به نتایج جدول ۴، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای اعمال‌شده و تیمار شاهد از نظر ماده خشک ریشه وجود نداشت. تیمار گیاهان اسفناج با نانوسلنیوم (تا ۱۰ پی‌پی‌ام) باعث افزایش ۵/۳۶ درصدی در ماده خشک ریشه شد. با وجود افزایش ماده خشک ریشه تحت تیمار ۲۰ پی‌پی‌ام، این افزایش ۴/۲۲ درصد کمتر از زمانی بود که گیاهان با ۱۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم تیمار شده بودند. علاوه بر این، سلنات سدیم ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نیز موجب افزایش ۲/۸۹ درصدی در ماده خشک ریشه، نسبت به تیمار شاهد شد. بیشترین و کمترین میزان ماده خشک ریشه به ترتیب در تیمارهای ۱۰ پی‌پی‌ام نانوسلینوم و تیمار شاهد (۱۷/۴۸ و ۱۶/۵۹ درصد) ثبت شد.

پرولین: تأثیر تیمارها بر محتوای پرولین (P< 0.01)

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]

جدول ۴- اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر ماده خشک ریشه، نشت یونی، فلاونوئید، فنل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی اسفناج رقم دش

تیمار		ماده خشک ریشه	نشت یونی	فلاونوئید	فنل	فعالیت آنتی‌اکسیدانی
نانوسلنیوم ((پی¬پی¬ام	شاهد	۱۶/۵۹^{a}	۸۹/۶۵^{a}	۶۵/۸۹^{a}	۱۵۵/۵۹^{a}	۳۷۱/۲۵^{a}
	۵	۱۷/۴۷^{a}	۸۹/۰۷^{a}	۶۶/۱۲^{a}	۱۵۹/۲۶^{a}	۳۸۱/۲۹^{a}
	۱۰	۱۷/۴۸^{a}	۸۸/۲۵^{a}	۶۶/۱۲^{a}	۱۵۵/۷۰^{a}	۳۸۲/۶۳^{a}
	۲۰	۱۶/۷۸^{a}	۸۸/۸۸^{a}	۶۶/۱۲^{a}	۱۵۷/۳۵^{a}	۳۸۴/۸۳^{a}
سلنات سدیم (میلی¬گرم در لیتر)	۵	۱۶/۸۶^{a}	۸۹/۲۰^{a}	۶۸/۴۸^{a}	۱۵۵/۵۱^{a}	۳۷۶/۸۰^{a}
	۱۰	۱۷/۰۸^{a}	۸۸/۰۹^{a}	۶۷/۰۶^{a}	۱۵۹/۵۲^{a}	۳۷۹/۴۳^{a}
	۲۰	۱۷/۰۷^{a}	۸۹/۸۷^{a}	۶۷/۴۵^{a}	۱۵۲/۷۸^{a}	۳۸۴/۲۰^{a}

مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P < 05$) است.

معنی‌دار بود (جدول ۲). در شکل ۵ مشاهده می‌شود که تیمار با هر دو فرم سلنیوم باعث افزایش محتوای پرولین شد. بالاترین سطح نانوسلنیوم و سلنات سدیم، به ترتیب موجب افزایش ۸۸/۱۶ و ۶۳/۰۷ درصدی در میزان پرولین برگ شد. بیشترین (۸۹/۳۲ میکرومول در گرم وزن تازه) و کمترین (۴۷/۴۷ میکرومول در گرم وزن تازه) میزان پرولین برگ تحت تیمار ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم و شاهد ثبت شد.

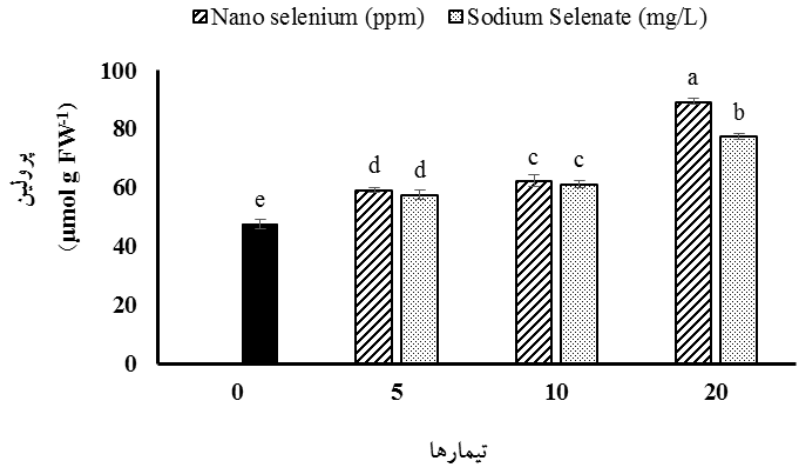
نشت یونی: براساس نتایج، اثر تیمار بر میزان نشت یونی تأثیر معنی‌داری نبود (جدول ۲). نتایج موجود در جدول ۴، حاکی از آن است که هر چند تیمارهای اعمال‌شده اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نداشتند، اما با افزایش سطوح نانوسلنیوم تا ۲۰ پی‌پی‌ام، کاهش ۰/۷۵ درصدی در نشت یونی مشاهده شد. افزایش سطوح سلنات سدیم تنها تا ۱۰ میلی‌گرم در لیتر موجب کاهش ۱/۶۴ درصدی در نشت یونی، نسبت به شاهد و ثبت کمترین (۸۸/۰۹ درصد) میزان این صفت شد. با این وجود، اعمال غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سلنات سدیم موجب افزایش ۰/۳۴ درصدی در نشت یونی نسبت به شاهد گردید و بیشترین درصد نشت یونی (۸۹/۸۷ درصد) نیز همین تیمار ثبت شد.

مالون دی‌آلدئید: براساس نتایج تجزیه واریانس، هر دو فرم سلنیوم بر میزان مالون دی‌آلدئید تأثیر معنی‌داری داشتند. (جدول ۲). با توجه به شکل ۶، در گیاهان تیمارشده با ۵ پی‌پی‌ام از نانوسلنیوم، محتوی مالون دی‌آلدئید برگ، با افزایش ۳۲/۱۴ درصدی نسبت به تیمار شاهد، به حداکثر مقدار (۰/۳۷ میلی‌مول در گرم وزن تازه) رسید. با این وجود، افزایش سطح نانوسلنیوم تا ۲۰ پی‌پی‌ام، موجب کاهش مالون دی‌آلدئید نسبت به گیاهان شاهد شد. تحت تیمار ۵ میلی‌گرم در لیتر سلنات سدیم نیز، افزایش ۷/۱۴ درصدی در محتوی مالون دی‌آلدئید نسبت به گیاهان شاهد، ثبت شد. با این حال، افزایش سطح تیمار سلنات سدیم تا ۲۰ میلی‌گرم در لیتر، موجب کاهش ۳۵/۷۱ درصدی نسبت به تیمار شاهد، شد. کمترین محتوای مالون دی‌آلدئید (۰/۱۸ میلی‌مول در گرم وزن تازه) نیز تحت تیمار ۲۰ میلی‌گرم در لیتر از سلنات سدیم بدست آمد.

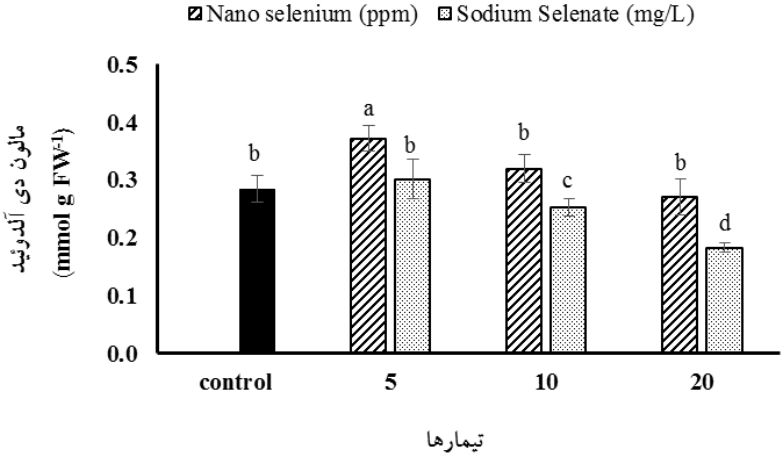
فلاونوئید: براساس نتایج تجزیه واریانس جدول ۳، محتوای فلاونوئید برگ اسفناج تحت تأثیر اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم قرار نگرفت. با وجود این، داده‌های جدول ۴، در خصوص تغییرات فلاونوئید برگ، نشان داد که محلول‌پاشی گیاهان اسفناج با نانوسلنیوم، تنها در غلظت ۵ پی‌پی‌ام، ۰/۳۳ درصد میزان فلاونوئید را نسبت به تیمار شاهد، افزایش داد و این میزان افزایش، تحت سطوح دیگر نانوسلنیوم تغییری نکرد. در مقابل، افزایش سطوح سلنات سدیم تا ۲۰ میلی‌گرم در لیتر موجب افزایش ۲/۳۶ درصدی در میزان فلاونوئید برگ نسبت به تیمار شاهد و ثبت بیشترین میزان این صفت (۶۴/۴۵ میلی‌گرم کوئرستین در ۱۰۰ گرم وزن خشک) در این تیمار شد. کمترین میزان فلاونوئید (۶۵/۸۹ میلی‌گرم کوئرستین در ۱۰۰ گرم وزن خشک) نیز در تیمار شاهد ثبت شد.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]



شکل ۵- اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر پرولین در اسفناج رقم دش. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.01$) است.

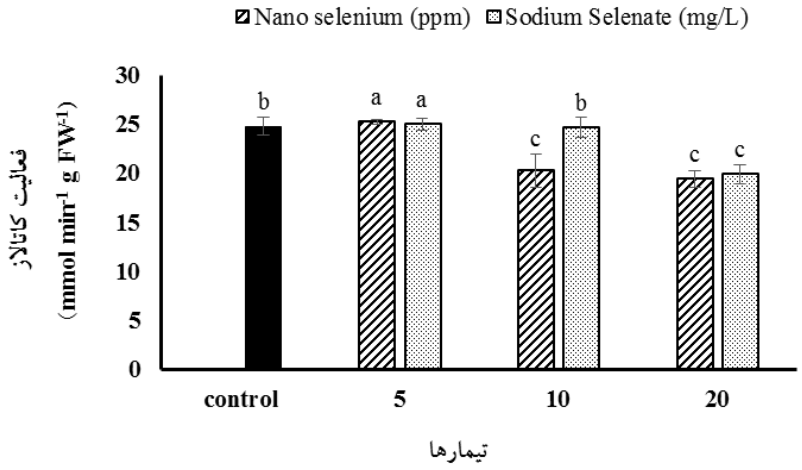


شکل ۶- اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر مالون دی‌آلدئید در اسفناج رقم دش. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.05$) است.

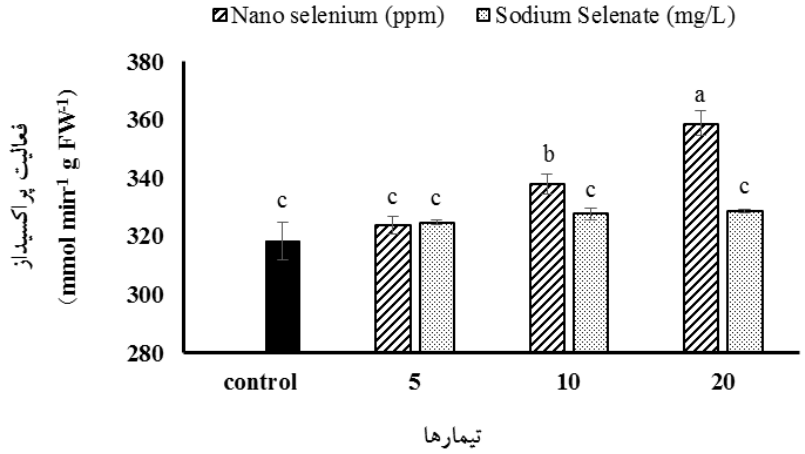
فنل: نتایج تجزیه واریانس نشان داد تأثیر تیمارها بر محتوای فنل گیاه اسفناج معنی‌دار نیست (جدول ۳). در جدول ۴ مشاهده می‌شود تیمار با سطوح مختلف از هر دو فرم سلنیوم، تأثیر معنی‌داری در محتوای فنل برگ اسفناج نداشت. با وجود این، محتوای فنل با افزایش سطوح نانوسلنیوم تا ۲۰ پی‌پی‌ام، یک روند افزایشی ۱/۱۳ درصدی نسبت به تیمار شاهد، نشان داد. علاوه بر این، کاربرد سلنات سدیم تنها در سطح ۱۰ میلی‌گرم در لیتر موجب افزایش ۲/۵۲ درصدی در میزان فنل نسبت به تیمار شاهد، شد. بیشترین میزان این صفت (۱۵۹/۵۲ میلی‌گرم گالیک اسید در ۱۰۰ گرم وزن خشک) در این تیمار مشاهده شد. در مقابل، سطوح ۵ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سلنات سدیم به ترتیب موجب کاهش ۰/۰۵ و ۱/۸ درصدی در محتوی فنل برگ نسبت به تیمار شاهد، شدند. کمترین محتوای فنل (۱۵۲/۷۸ میلی‌گرم گالیک اسید در ۱۰۰ گرم وزن خشک) متعلق به ۲۰ میلی‌گرم در لیتر سلنات سدیم بود.

فعالیت آنتی‌اکسیدانی: نتایج تجزیه واریانس حاکی از آن بود که اثر تیمارها بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی برگ گیاه اسفناج معنی‌دار نیست (جدول ۳). البته نتایج جدول ۴ حاکی از آن است که هر چند بین تیمارهای اعمال‌شده اختلاف آماری

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]



شکل ۷- اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر فعالیت کاتالاز در اسفناج رقم دش. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.01$) است.



شکل ۸- اثر تیمار نانوسلنیوم و سلنات سدیم بر فعالیت پراکسیداز در اسفناج رقم دش. مقادیر، میانگین سه تکرار و حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار با آزمون توکی ($P< 0.01$) است.

معنی‌داری از نظر فعالیت آنتی‌اکسیدانی وجود نداشت، اما افزایش غلظت هر دو نانوسلینوم و سلنات سدیم از ۵ تا ۲۰، بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی اسفناج (تا ۳/۵ درصد نسبت به شاهد) افزود. به بیانی دیگر، کمترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی (۳۷۱/۲۴ میلی‌گرم) در تیمار شاهد مشاهده و بیشترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی (۳۸۴/۸۲ میلی‌گرم) با اعمال تیمار ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم حاصل شد.

آنزیم کاتالاز: براساس جدول ۳، اثر تیمار (نانوسلنیوم و سلنات سدیم) بر فعالیت آنزیم کاتالاز ($P< 0.01$) معنی‌دار بود. در شکل ۷ مشاهده می‌شود تیمار گیاهان اسفناج با ۵ پی‌پی‌ام از نانوسلینوم موجب افزایش ۱/۳۷ درصدی در فعالیت کاتالاز شد و حداکثر فعالیت آنزیم (۲۵/۲۱ میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه) در این تیمار به ثبت رسید. در مقابل، افزایش سطح تیمار نانوسلنیوم، منجر به کاهش ۲۱/۵۴ درصدی در فعالیت آنزیم مذکور نسبت به شاهد، شد. کمترین میزان فعالیت این آنزیم (۱۹/۴۴ میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه) در تیمار ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم مشاهده شد. فعالیت آنزیم کاتالاز تحت تیمارهای مختلف سلنات سدیم نیز روندی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]

مشابه نشان داد. به‌طوری‌که، تیمار با ۵ میلی‌گرم در لیتر سلنات سدیم با افزایش ۰/۸ درصدی فعالیت و تیمار با ۲۰ میلی‌گرم در لیتر، با کاهش ۱۹/۸۱ درصدی فعالیت آنزیم نسبت به شاهد، همراه بود.

آنزیم پراکسیداز: براساس نتایج تجزیه واریانس اثر تیمار فعالیت آنزیم پراکسیداز ($P< 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۳). همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، فعالیت آنزیم پراکسیداز اسفناج تحت سطوح مختلف سلنات سدیم و نانوسلنیوم، روندی افزایشی دارد. افزایش نانوسلنیوم تا ۲۰ پی‌پی‌ام، موجب افزایش ۹/۴۱ درصدی در فعالیت آنزیم پراکسیداز نسبت به شاهد، شد. بیشترین و کمترین میزان فعالیت این آنزیم (به‌ترتیب ۳۵۸/۸۰ و ۳۱۸/۴۰ میکرومول در دقیقه در گرم وزن تازه) متعلق به تیمارهای ۲۰ پی‌پی‌ام نانوسلنیوم و شاهد بود.

بحث

سلنیوم، به عنوان یک عنصر مفید، رشد و نمو گیاه را از طریق افزایش در فتوسنتز، بهبود کارایی فتوسیستم II و کاهش نرخ تعرق بهبود می‌بخشد (Siddiqui *et al*., 2014; Ozbolt *et al*., 2008). غلظت‌های پایین سلنیوم، احتمالاً از راه افزایش میزان نشاسته در کلروپلاست‌ها، رشد گیاه را افزایش می‌دهد (Han- Wens *et al*., 2010). غلظت‌های بالای سلنیوم، اما، به‌دلیل تغییر در نفوذپذیری غشاء سلول نسبت به یون‌های سدیم، پتاسیم و کلسیم (Dziubinskaa *et al*., 2010) و متعاقباً اختلال در تنفس و جذب آب، منجر به کاهش ماده خشک گیاه می‌شود (John *et al*., 2009; Jahid and Kumar, 2010). همچنین سطوح بالای سلنیوم، از طریق افزایش میزان ترکیبات فنولی، اکسیداسیون آنزیمی اکسین و دکربوکسیله کردن ایندول استیک اسید (Gul *et al*., 2017; Guardado-Felix *et al*., 2019)، منجر به کاهش تقسیم سلولی در سلول‌های ریشه می‌شود (Tavakoli *et al*., 2020).

نانو ذرات از طریق مسیرهای آپوپلاستی و سیمپلاستی به سمت ریشه حرکت و در نهایت از طریق آوند آبکش و چوب به برگ‌ها و ساقه منتقل می‌شوند (Wang *et al*., 2012). نانوسلنیوم رشد گیاهان را 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 القا تقسیم سلولی در سلول‌های مریستمی نوک ریشه (Du *et al*., 2019; Li *et al*., 2019) ارتقا می‌بخشد. همسو با یافته‌های این تحقیق، تیمار با ترکیبات حاوی سلنیوم موجب افزایش طول ساقه در گیاه خیار (موسوی و همکاران، ۱۴۰۱)، افزایش وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه در گیاه نعنا فلفلی (جعفری و مقدم، ۱۴۰۲) و بهبود ویژگی‌های رشدی در گیاه تنباکو (Liu *et al*., 2020) شده است. همچنین محلول‌پاشی برگی با نانوذرات سلنیوم، وزن تر و خشک برگ، تعداد برگ و ارتفاع را در گشنیز (Ghazi, 2018) و تعداد برگ، وزن تر ساقه و ارتفاع بوته را در گیاه نخود افزایش داده است (El-Sawy *et al*., 2019; Shedeed *et al*., 2018). مقایسه تیمار سلنیوم عنصری و نانوسلنیوم در گیاه گوجه‌فرنگی (ابوالقاسمی و حقیقی، ۱۳۹۶) و درمنه (Logvinenko *et al*., 2022) نیز آشکار ساخت که سلنیومِ عنصری بیشتر بر صفات رویشی و نانوسلنیوم بیشتر بر تغییرات فتوسنتزی و آنتی‌اکسیدانی تأثیرگذار بوده است.

پرولین یک اسیدآمینه حیاتی است که به‌عنوان تنظیم‌کننده اسمزی، تثبیت‌کننده ساختارهای پروتئینی، حذف‌کننده رادیکال‌های آزاد و بازدارنده پراکسیداسیون لیپیدی در گیاهان عمل می‌کند (Madebo *et al*., 2021). پرولین با حفظ پتانسیل اسمزی سلول نقش عمده‌ای در مقابله با شرایط نامساعد محیطی دارد (Zhao *et al*., 2020). افزایش میزان پرولین در اثر کاربرد سلنیوم در گیاهان کلزا (شیخ‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳)، جو (Akbulut and Cakir, 2010) و نعناع (Nazerieh *et al*., 2018)، به تأثیر سلنیوم بر آنزیم متابولیسم پرولین به‌نام آنزیم γ-glu amyl kinase (γ-GK) نسبت داده شده (Abbas, 2012)، که همسو با یافته‌های این تحقیق است.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]

نشت یونی پارامتری مناسب جهت نمایش ثبات غشاء و بیان مقدار نسبی یون‌ها در فضای آپوپلاست است (Kaya *et al*., 2001). سلنیوم تجزیه H_2O_2 را تقویت، توانایی آنتی‌اکسیدانی سلول و ثبات غشا را بهبود بخشیده، رادیکال‌های آزاد را متعادل، نشت یونی را کاهش و بدین ترتیب از ساختار و عملکرد غشای سلول در برابر آسیب اکسیداسیون، محافظت می‌کند (Hartikainen *et al*., 2000). همچنین سلنیوم بطور مستقیم در فرایندهای آنزیمی و غیرآنزیمی، به عنوان جزئی از سیستم گلوتاتیون پراکسیداز (Glutathione peroxidase (GSH-Px)) شرکت می‌کند و با بهبود فعالیت این آنزیم، احیای پراکسید سمی را به ترکیبات هیدروکسیل غیرسمی القا می‌کند (Hartikainen *et al*., 2000). سلنیوم در غلظت‌های بالا به‌عنوان اکسیدان عمل می‌کند (Hartikainen *et al*., 2000). در این شرایط، دریافت الکترون توسط NADP محدود شده و O_2 به عنوان گیرنده الکترون عمل می‌کند. این پدیده منجر به تولید رادیکال‌های آزاد شده که پراکسیداسیون غشای سلول و افزایش نشت یونی را القا می‌کند (El-Kinany *et al*., 2019). مالون دی‌آلدئید یک پراکسید لیپیدی بسیار فعال است که بر سیالیت غشای سلولی و اتصال پروتئین‌ها بر غشا، اثر می‌گذارد (Ebrahimi *et al*., 2016). هر چند در این پژوهش، تیمارهای نانوسلنیوم و سلنات سدیم تأثیر معنی‌داری بر نشت یونی نداشتند، اما همسو با نتایج بیرانوند و همکاران (۱۴۰۱)، با افزایش غلظت سلنیوم، نشت یونی افزایش یافت. همچنین با کاربرد سلنیوم، کاهش معنی‌دار مالون دی‌آلدئید در گل صد تومانی (Wang *et al*., 2021)، در لوبیا سبز (Rady *et al*., 2021) و قهوه (Brito Mateus *et al*., 2021)، نیز گزارش شده است.

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

تعادل بین تولید رادیکال‌های آزاد و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان تعیین می‌کند که آیا در سلول آسیب اکسیداتیو و یا سیگنال‌دهی رخ دهد (Moller *et al*., 2007). کاتالاز و پراکسیداز از جمله آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان هستند که تبدیل H_2O_2 را به آب و اکسیژن را باعث می‌شوند (Gratao *et al*., 2005). سلنیوم محتوای H_2O_2 را کاهش داده و بهبود عملکرد آنتی‌اکسیدانی را به همراه دارد (Lapaz *et al*., 2019). تیمار گیاهان با سلنیوم موجب افزایش فعالیت در پراکسیداز و کاهش در فعالیت کاتالاز شده است (Hussein *et al*., 2019; Raigond *et al*., 2017). افزایش در فعالیت پراکسیداز به عنوان نقطه عطفی در فعالیت آنتی‌اکسیدانی آنزیمی، تجزیه H_2O_2، به ویژه تحت غیرفعال بودن کاتالاز، در نظر گرفته می‌شود. کاهش در فعالیت کاتالاز ممکن است به نقش واسطه سلنیوم در مکانیزم‌های تجزیه علیه تنش اکسیداتیو، مرتبط باشد (Silva *et al*., 2018). تأثیر سلنیوم و نانوسلنیوم بر فعالیت کاتالاز و پراکسیداز در گیاهان نعنا فلفلی (جعفری و مقدم، ۱۴۰۲)، خیار (موسوی و همکاران، ۱۴۰۱)، شاهی (*Lepidium sativum*)، قهوه عربی (*Coffea arabica*)، گندم (Wu *et al*., 2020) و خربزه (Rajaee Behbahani *et al*., 2020) همسو با تحقیقات ما بود.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر، استفاده از سطوح مناسب سلنیوم به صورت بالک، در مجموع بر صفات طول ریشه، نشت یونی، محتوی فلاونوئید اثر افزایشی داشت. البته اعمال سطح متوسط سدیم سلنات اثر کاهشی بر نشت

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]

یونی برگ اسفناج رقم دش داشت. علاوه بر این، نانوسلنیوم در سطوح مختلف دارای اثر افزایشی در صفات طول اندام هوایی و ریشه، تعداد برگ، ماده خشک برگ و ریشه، محتوی پرولین، مالون دی‌آلدهید، فنل، فعالیت آنتی‌اکسیدان و همچنین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز داشت. البته با در نظر گرفتن افزایش برخی صفات مانند مالون دی‌آلدهید و آنزیم کاتالاز در پایین‌ترین سطح نانوسلنیوم (۵ پی‌ام)، و یا افزایش فنل تنها در سطح ۱۰ میلی‌گرم در لیتر سدیم سلنات، اهمیت تعیین دوز مناسب این تیمارها در فعالیت‌های پژوهشی برجسته می‌گردد.

منابع

ابوالقاسمی، رضا، و حقیقی، مریم (۱۳۹۶). بررسی تغییرات گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای تیمارشده با عنصر مفید به شکل فلزی و نانو فلزی. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، *۶*(۱۹)، ۱۶۲-۱۵۳. URL: http://jispp.iut.ac.ir/article-1-417-fa-html

بیرانوند، فرهاد، زاهدی، بهمن، و رضایی‌نژاد، عبدالحسین (۱۴۰۱). بررسی تأثیر محلول‌پاشی سلنیوم بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه سلوی زینتی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، *۱۱*(۴۷)، ۳۳۹-۳۲۳.

جعفری، حلیمه، و مقدم، محمد (۱۴۰۲). اثر سطوح مختلف سلنات و سلنیت سدیم بر برخی ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیکی نعناع فلفلی (*Mentha piperata* L.). *علوم باغبانی ایران*، ۵۴(۲)، ۲۶۹-۲۸۴. DOI: http//doi.org/10.22059/IJHS.2023.344758.2039

موسوی، سیدعلی اصغر، روستا، حمیدرضا، اسماعیلی‌زاده، مجید، و عشقی، سعید (۱۴۰۱). تأثیر سلنیوم و سیلیسیوم بر برخی از فراسنجه‌های رویشی و زیست‌شیمیایی خیار زیر تنش شوری و قلیائیت در کشت هیدروپونیک. *مجله علوم و فنون باغبانی ایران*، ۲۳(۱)، ۷۸-۶۳. URL: http://journal-irshs.ir/article-1-541-fa.html

شیخ‌زاده، پریسا، بهزاد، غلام، زارع، ناصر، و رستمی، میترا (۱۴۰۳). بهبود شاخص‌های فتوسنتزی، بیوشیمیایی و تحمل به سرمای کلزا پاییزه با کاربرد نانوسلنیوم در مرحله روزت. *به‌زراعی کشاورزی*، *۲۶*(۲)، ۲۳۳-۲۱۳.

Abbas, S. M. (2012). Effects of low temperature and selenium application on growth and the physiological changes in sorghum seedlings. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*, *8*(1), 268-286. https://www.researchgate.net/publication/284698346

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.

Akbulut, M, & Cakir, S. (2010). The effects of Se phytotoxicity on the antioxidant systems of leaf tissues in barley (*Hordeum vulgare* L.) seedling. *Plant Physiology and Biochemistry*, *48*(2-3), 160-166. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2009.11.0011

Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S., & Karanov, E. (2001). The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant, Cell and Environment*, *24*(12), 1337-1344. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x

Babajani, A., Iranbakhsh, A., Ardebili, Z. O., & Eslami, B. (2019). Differential growth, nutrition, physiology, and gene expression in *Melissa officinalis* mediated by zinc oxide and elemental selenium nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*, 24430-24444.

Bates, L. S., Waldren, R. P., & Tear, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, *39*, 205-207. https://www.jstor.org/stable/42932378

Braca, A., Sortino, C., Politi, M., Morelli, I., & Mendez, J. (2002). Antioxidant activity of flavonoids from *Licania licaniaeflora*. *Journal of Ethnopharmacology*, *79*(3), 379-381. https://doi.org/10.1016/S0378-8741(01)00413-5

Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, *28*, 25-30.

Brito Mateus, M., Tavanti, R., Tavanti, T., Santos, E., Jalal, A., & Reis, A. (2021). Selenium biofortification enhances ROS scavenge system increasing yield of coffee plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 209. 111772. 10.1016/j.ecoenv.2020.111772

Chance, B, & Maehly, A. C. (1995). Assay of catalase and proxidases. *Methods in Enzymology*, *11*, 755-764. https://doi.org/10.1002/9780470110171.ch14

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]

Dhindsa, R. S., Plumb-Dhindsa, P., & Thorpe, T. (1981). Leaf senescence: Correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany, 32*, 93-101. https://doi.org/10.1093/jxb/32.1.93

Djanaguiraman, M., Belliraj, N., Bossmann, S. H., & 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.

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

Ebrahimi, A., Galavi, M., Ramroudi, M., & Moaveni, P. (2016) Effect of TiO_2 nanoparticles on antioxidant enzymes activity and biochemical biomarkers in pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Molecular Biology*, *6*, 58-66. https://doi.org/10.5539/jmbr.v6n1p58

El-Kinany, R., Brengi, S., Nassar, A., & El-Batal, A. (2019). Enhancement of plant growth, chemical composition and secondary metabolites of essential oil of salt-stressed coriander (*Coriandrum sativum* L.) plants using selenium, nano-selenium, and glycine betaine. *Scientific Journal of Flowers and Ornamental Plants*, *6*(3), 151-173. Doi: 10.21608/sjfop.2019.84973

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.

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.

Gonzalez-Lemus, U., Medina-Perez, G., Pelaez-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

Gratao, P. L., Polle, A., Lea, P. J., & Azevedo, R. A. (2005). Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. *Functional Plant Biology*, *32*, 481-494.

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, seleno-proteins and viral infection. *Nutrients*, *11*, 2101. https://doi.org/10.3390/nu11092101

Gul, H., Kinza, S., Shinwari, Z. K., & Hamayun, M. (2017). Effect of selenium on the biochemistry of *Zea mays* under salt stress. *Pakistan Journal of Botany*, *49*, 25-32. https://www.researchgate.net/publication/317633064

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*, 309-318. doi:10.1016/j.jtemb.2005.02.009

Hartikainen, H., Xue, T., & Piironen, V. (2000). Selenium as an anti-oxidant and pro-oxidant in ryegrass. *Plant and Soil*, *225*, 193-200. https://www.jstor.org/stable/42950858

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. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *18*, 101080.

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

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 Physiology and Biochemistry*, *94*, 95-103.

Jahid, A. M, & Kumar, T. P. (2010). Promotion of growth in mungbean (*Phaseolusaureus roxb.*) by selenium is associated with stimulation of carbohydrate metabolism. *Biological Trace Element Resarch*, *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 Experimental Botany*, *153*, 127-134.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]

Jiang, C., Zu, C., Lu, D., Zheng, Q., Shen, J., & Wang, H. (2017). Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na^+ accumulation and antioxidative capacity of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. *Nature Publishing Group*, 1-14.

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*, *1054*, 303-312.

Kaya, C., Higgs, D., & Krinak, H. (2001). The effects of high salinity (NaCl) and supplementary phosphorus and potassium on physiology and nutrition development of spinach. *Journal of Plant Physiology*, *27*, 47-59. https://www.researchgate.net/publication/228876941

Lapaz, A. D. M., Santos, L. F. D. M., Yoshida, C. H. P., Heinrichs, R., Campos, M., & Reis, A. R. D. (2019). Physiological and toxic effects of selenium on seed germination of cowpea seedlings. *Bragantia*, *78*(4), 498-508.

Li, R., He, J., Xie, H., Wang, W., Bose, S. K., Sun, Y. Y., & Yin, H. (2019). Effects of chitosan nanoparticles on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Biological Macromolecules*, *126*, 91-100. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.118

Liu, Y., Sanz-Saez, A., Meng, X., Liu, J., Liang, T., Dai, H., & Zhai, Z. (2020). Promoting effect of Nano-Se on tobacco growth and reactive oxygen species metabolism. *Journal of Plant Nutrition*, 2810-2821. https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1793187

Li, Y., Zhu, N., Liang, X., Zheng, L., Zhang, C., Li, Y., 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

Madebo, M. P., Luo, S. M., Wang, L., Zheng, Y. H., Jin, P. (2021). Melatonin treatment induces chilling tolerance by regulating the contents of polyamine, γ-aminobutyric acid, and proline in cucumber fruit. *Journal of Integrative Agriculture*, *20*(11), 3060-3074. https://doi.org/10.1016/s2095-3119(20)63485-2

Malagoli, M., Schiavon, M., dall'Acqua, S., & Pilon-Smits, E. A. H. (2015). Effects of selenium biofortification on crop nutritional quality. *Front Plant Science*, *6*, 280. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00280

Mashayekhi, K, & Shomali, A. (2018). Botany, Physiology and Culture of Vegetable. Gorgan University Press. (In Persian).

Mejia-Ramirez, F., Benavides-Mendoza, A., Gonzalez-Morales, S., Juarez-Maldonado, A., Lara-Viveros, F. M., Morales-Diaz, A. B., & Morelos-Moreno, A. (2023). Seed priming based on iodine and selenium influences the nutraceutical compounds in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) crop. *Antioxidants*, *12*, 1265. https://doi.org/10.3390/antiox12061265

Mimmo, T., Tiziani, R., Valentinuzzi, F., Lucini, L., Nicoletto, C., Sambo, P., Scampicchio, M., Pii, Y., & Cesco, S. (2017). Selenium biofortification in *Fragaria* × *ananassa*: Implications on strawberry fruits quality, content of bioactive health beneficial compounds and metabolomic profile. *Frontier in Plant Science*, *8*, 1887.

Moller, I. M., Jensen, P. E., & Hansson, A. (2007). Oxidative modifications to cellular components in plants. *Annual Review of Plant Biology*, *58*, 459-481. Doi: 10.1146/annurev.arplant.58.032806.103946

Nazerieh, H., Ardebili, Z. O., & Iranbakhsh, A. (2018). Potential benefits and toxicity of nanoselenium and nitric oxide in peppermint. *Acta agriculturae Slovenica*, *111*(2), 357-368. http://dx.doi.org/10.14720/aas.2018.111.2.11

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 Chemistery*, *110*, 691-696. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.073

Rady, M. M., Desoky, E. S. M., Ahmed, S. M., Majrashi, A., Ali, E. F., Arnaout, S. M. A. I., & Selem, E. (2021). Foliar nourishment with nano-selenium dioxide promotes physiology, biochemistry, antioxidant defenses, and salt tolerance in *Phaseolus vulgaris*. *Plants*, *10*, 1189. https://doi.org/10.3390/plants10061189

Raigond, P., Raigond, B., Kaundal, B., Singh, B., Joshi, A., & Dutt, S. (2017). Effect of zinc nanoparticles on antioxidative system of potato plants. *Journal of Environmental Biology*, *38*, 435.

Rajaee Behbahani, S., Iranbakhsh, A., Ebadi, M., Majd, A., & Ardebili, Z. O. (2020). Red elemental selenium nanoparticles mediated substantial variations in growth, tissue differentiation, metabolism, gene transcription, epigenetic cytosine DNA methylation, and callogenesis in bittermelon (*Momordica charantia*); an in vitro experiment. *Journal of PloS One*, *15*, 1-22. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235556

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).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]

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. *Journal of Saffron Agronomy and Technology*, *1*, 517-522.

Sairam, R. K, & Srivastava, G. C. (2002). Changes in antioxidant activity in sub-cellular fraction of tolerant and susceptible wheat genotypes in response to long term salt stress. *Plant Science*, *162*, 897-904 https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00037-7

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.

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.

Silva, V., Boleta, E., Lanza, M., Lavres, J., Martins, J., Santos, E., Santos, F., Putti, F., Junior, E., White, P., Broadley, M., de Carvalho, H., & dos Reis, A. (2018). Physiological, biochemical, and ultrastructural characterization of selenium toxicity in cowpea plants. *Environmental and Experimental Botany*. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.020

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 Measurments and Characterisation*, *13*, 347-356.

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., Thavarajahand, P., & Kumar, S. (2017). Selecting lentil accessions for global selenium biofortification. *Plants*, *6*(3), 34. doi:10.3390/plants6030034

Walaa, A. E., Shatlah, M. A., Atteia, M. H., & Sror, H. A. (2010). Selenium induces antioxidant defensive enzymes and promotes tolerance against salinity stress in cucumber seedlings (*Cucumis sativus*). Arab University Journal of Agricultural Sciences. *18*, 65-76.

Wang, H., Zhang, C., Nie, M., Cheng, D., Chen, J., Wang, S., Lv, J., & Niu, Y. (2021). Effects of Foliar Application of Nano-Se on Photosynthetic Characteristics and Se Accumulation in Paeonia Ostii. PREPRINT (Version 1) available at Research Square [https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-951366/v1].

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

Waterhouse, A. L. (2002). Determination of total phenolics. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, *3*, 18-19. https://doi.org/10.1002/0471142913.fai0101s06

Wu, M., Cong, X., Li, M., Rao, S., Liu, Y., Guo, J., hu, S., Chen, S. H., Xu, F., Cheng, S. H., Liu, L., & 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

Zhao, L., Lu, L., Wang, A., Zhang, H., Huang, M., Wu, H., Xing, B., Wang, Z., & Ji, R. (2020). Nano-biotechnology in agriculture, use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *68*(7), 1935-1947. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06615

Zsiros, O., Nagy, V., Parducz, A., Nagy, G., Unnep, R., El-Ramady, H., Prokisch, J., Lisztes-Szabo, Z., Fari, M., Csajbok, J., et al. (2019). Effects of selenate and red Se-nanoparticles on the photosynthetic apparatus of *Nicotiana tabacum*. *Photosynthetic Research*, *139*, 449-460.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]

Effect of nano selenium and sodium selenate on growth, physiological and antioxidant characteristics of Spinach (*Spinacia oleracea* L.) Dash variety

Mohammad Qasemi, Mansoore Shamili*, Abdolmajid Mirzaalian Dastjerdi*

Department of Horticultural Sciences, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
(Received: 2024/07/30, Accepted: 2024/12/24)

Abstract

Plants, as the best source of selenium for humans and animals, absorb the element from the soil. Selenium nanoparticles have been introduced as stable nanoparticles as plant fertilizers. Considering the positive role of selenium in plants and the toxic effects of its higher concentrations, in this research the impact of selenium (in bulk and nano forms) on growth, physiological and antioxidant characteristics of spinach under greenhouse conditions was investigated. The experiment was carried out in a completely randomized design in three replications. The factors included foliar spraying of nano selenium (5, 10 and 20 ppm), sodium selenate (5, 10 and 20 mg/L) and distilled water (control plants). Based on our findings, higher concentrations of both treatments (up to 20 ppm of nano selenium and 20 mg/L of sodium selenate) led to increases in the areal organ and root length, leaf number, leaf and root dry matter, proline content, antioxidant activity and peroxidase activity. Ion leakage was declined in response to nano selenium application. In contrast, the highest ion leakage was recorded under 10 mg/L of sodium selenate treatment. Malondialdehyde content and catalase activity were improved at the lowest level of both treatments. Sodium-selenate (20 mg/L) and nano selenium (5 ppm) boosted flavonoid content. Phenol was also raised under different levels of nano selenium and under 10 mg/L of sodium selenate. However, this trait was lessened under other sodium selenate levels.

Keywords: Antioxidant activity, Catalase, Ion leakage, Malondialdehyde, Peroxidase

Corresponding author, Email: shamili@ut.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOI: DOI: 10.22034/14.66.173]