



Effect of Selenium Application on Physiological and Growth Indices in Canola (*Brassica napus* L.) Under Nickel-Induced Stress

Touraj Dadpour Kariyak¹, Ahmad Mohtadi^{1*}  and Mohsen Movahhedi Dehnavi² 

1- Department of Biology, Faculty of Science, Yasouj University, Yasouj, Iran

2- Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran

* Corresponding author, Email: a.mohtadi@yu.ac.ir

(Received: 6 May 2025; Revised: 25 June 2025; Accepted: 29 June 2025)

Abstract

Background and Objective: While nickel is a necessary trace element, its accumulation in the environment becomes toxic, inhibiting germination and plant growth. Selenium, also an essential micronutrient, can function as a protective agent against such abiotic stresses. The present study aimed to evaluate the effects of selenium and nano-selenium application on the physiological and growth indices of canola (*Brassica napus* L.) under nickel stress.

Methods: In the present study, the effects of different levels of nickel and selenium on some physiological and biochemical traits of canola were investigated under hydroponic conditions in a factorial experiment based on a completely randomized design with four replications. The first factor was nickel application in the nutrient solution at three levels (0, 10, and 50 μM) supplied as nickel sulfate. The second factor was a combination of selenium application in two forms: (1) selenium added to the nutrient solution as selenate at three levels (0, 10, and 20 μM) from sodium selenate, and (2) foliar spraying of nano-selenium at three levels (0, 2, and 5 ppm).

Results: The results indicated that exposure to 10 μM nickel did not cause any significant changes in the measured indicators compared to the control. The 50 μM nickel application increased nickel accumulation in both the roots and shoots, but reduced the other traits. Increasing nickel levels also enhanced root potassium content. The application of 10 μM selenium and 2 ppm nano-selenium generally moderated adverse effects of nickel toxicity. These treatments enhanced root and shoot dry weights compared to the control by increasing soluble sugar levels in leaves, boosting potassium retention in roots, reducing electrolyte leakage percentage, and elevating chlorophyll content.

Conclusion: This study demonstrates that selenium enhances canola growth under nickel stress by increasing leaf soluble sugar and potassium levels. Finally, the application of 10 μM selenium in the nutrient solution or foliar spraying with 2 ppm nano-selenium is recommended for canola cultivation under nickel stress conditions.

Keywords: Biochemical index, Heavy metal, Nano-selenium, Soluble sugars.

How to Cite: Dadpour Kariyak, T., Mohtadi, A., Movahhedi Dehnavi, M., 2025. Effect of selenium application on physiological and growth indices in canola (*Brassica napus* L.) under nickel-induced stress. J. Soil Plant Interact. 16(2), 1–20 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.16.2.21182>





اثر کاربرد سلنیوم بر شاخص‌های فیزیولوژیک و رشد کلزا (*Brassica napus* L.) تحت تنش نیکل

تورج دادپور کریک^۱، احمد مهتدی^{۱*} و محسن موحدی دهنوی^۲

۱- فیزیولوژی گیاهی، گروه زیست شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۲- فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.mohtadi@yu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۱۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۴/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۸)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: نیکل از عناصر سنگین و کم‌مصرف ضروری است، اما افزایش غلظت آن در محیط، جوانه‌زنی و رشد گیاهان را به مخاطره می‌اندازد. سلنیوم به‌عنوان یک عنصر کم‌مصرف اما ضروری در بسیاری از فرآیندهای زیستی نقش مهمی ایفا می‌کند و در شرایط تنش‌های محیطی، می‌تواند به‌عنوان یک عامل محافظتی عمل کند. هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر سطوح مختلف سلنیوم و نانوسلنیوم بر شاخص‌های فیزیولوژیک و رشد کلزا (*Brassica napus* L.) تحت تنش نیکل بود.

روش‌ها: در پژوهش حاضر، اثر سطوح مختلف نیکل و سلنیوم بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی کلزا در شرایط کشت بدون خاک به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار مورد بررسی قرار گرفت. عامل اول شامل کاربرد نیکل در محلول غذایی با سه سطح (صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار) از منبع سولفات نیکل و عامل دوم، کاربرد ترکیبی از سطوح سلنیوم به دو شکل سلنات در محلول غذایی در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار) از منبع سلنات سدیم و محلول‌پاشی برگی نانوسلنیوم در سه سطح (صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر) بود.

نتایج: نتایج نشان داد که اثر سطح ۱۰ میکرومولار نیکل بر شاخص‌های مورد بررسی، نسبت به شاهد، اختلاف معنی‌داری نداشت. سطح ۵۰ میکرومولار نیکل، محتوای نیکل ریشه و شاخساره را افزایش داد و سایر صفات مورد بررسی را کاهش داد. با افزایش سطوح نیکل، پتاسیم ریشه نیز افزایش یافت. استفاده از ۱۰ میکرومولار سلنیوم و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم در اغلب موارد، منجر به تعدیل آثار ناشی از سمیت نیکل شد. کاربرد سطوح ۱۰ میکرومولار سلنیوم و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، با افزایش محتوای قندهای محلول برگ، محتوای پتاسیم ریشه و کاهش درصد نشت الکترولیت و به‌تبع آن افزایش شاخص سبزی‌نگی، سبب افزایش وزن خشک ریشه و شاخساره این گیاه شد.

نتیجه‌گیری کلی: می‌توان نتیجه گرفت که اثر مثبت سلنیوم بر رشد کلزا به افزایش محتوای قندهای محلول برگ و محتوای پتاسیم مرتبط باشد. در نهایت می‌توان کاربرد ۱۰ میکرومولار سلنیوم در محلول غذایی و یا محلول‌پاشی برگی ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم را برای تولید کلزا در شرایط تنش نیکل پیشنهاد کرد.

واژه‌های کلیدی: شاخص بیوشیمیایی، فلز سنگین، نانوسلنیوم، قندهای محلول.



مقدمه

کلزا با نام علمی *Brassica napus* L. جزء گیاهان خانواده براسیکاسه (Brassicaceae) بوده و از مهم‌ترین گیاهان دانه روغنی در سراسر جهان به شمار می‌رود. دانه کلزا به عنوان مهم‌ترین قسمت گیاه دارای درصد بالایی روغن و پروتئین است، علاوه بر این اجزای دیگری از جمله گلوکوزینولات‌ها، فنل‌ها، اسیدفیتیک‌ها، سلولز و قند در آن وجود دارد (Raboanatahiry et al., 2021). گیاهان خانواده براسیکاسه به علت توانایی تولید مقادیر زیادی از گلوکاتینون و فیتوکلاتین و توان انباشت زیاد برای ذخیره یون‌ها، از جمله گیاهان مقاوم به سمیت فلزات سنگین محسوب می‌شوند (Rosca et al., 2021). امروزه افزایش آلاینده‌های محیطی به ویژه فلزات سنگین یکی از عمده‌ترین معضلات زیست‌محیطی و بهداشتی است، که زمین‌های کشاورزی را در تمام نقاط جهان آلوده کرده است. این آلودگی ناشی از مصرف بیش از حد کودهای فسفاته، پساب‌های شهری، صنعتی و گرد و غبار کارخانه‌ها است که تهدیدی برای سلامت جانداران به شمار می‌آید (Yadav, 2010). همچنین افزایش نیاز آبی برای آبیاری در بخش کشاورزی، باعث افزایش استفاده مجدد از پساب‌های تصفیه‌شده یا خام شهری و صنعتی در بسیاری از کشورها شده است. فلزات سنگین موجود در این آب‌ها، یکی از منابع آلودگی آب، خاک و گیاه به شمار می‌روند (Rang Zan et al., 2020; Mohammadidust et al., 2024). برخی از فلزات سنگین مانند مس، روی، آهن، منگنز، مولیبدن و نیکل برای رشد گیاهان ضروری هستند اما غلظت زیاد آن‌ها در گیاهان موجب تنش اکسیداتیو می‌شود (Zhuang et al., 2009).

نیکل، فلز ضروری برای گیاهان محسوب می‌شود، ولی غلظت زیاد آن برای اکثر گونه‌های گیاهی سمی بوده و بسیاری از فعالیت‌های فیزیولوژیک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Chen et al., 2009). کاهش تعداد گل‌ها، میوه‌ها، کمبود برخی از عناصر، کاهش محتوای کلروفیل، تخریب غشای تیلاکوئید، تأخیر در جوانه‌زنی و کاهش هدایت روزنه‌ای از جمله آثار سمیت نیکل در گیاهان است (Ali et al., 2009). در پژوهشی روی گیاه

گشنیز، Tagharobian et al. (2016) مشاهده نمودند انباشتگی غلظت نیکل در ریشه نسبت به شاخساره بیشتر بود و بیشترین انباشتگی فلز نیکل در ریشه گیاه گشنیز در غلظت ۵۰۰ میکرومولار رخ داد. آن‌ها بیان نمودند انباشت یون‌های نیکل در ریشه یک سازوکار مقاومتی است که در برابر تنش فلز سنگین نیکل اعمال می‌شود. همچنین Aqeel et al. (2021) مشاهده نمودند با افزایش سطوح نیکل، از میزان پتاسیم در شاخساره و ریشه گیاه ماش کاسته شد. پژوهشگران گزارش کردند که کاهش درصد آب برگ تحت غلظت‌های زیاد نیکل می‌تواند به دلیل کاهش پتانسیل اسمزی شیره سلولی، کاهش اندازه و سطح برگ و کاهش تعداد روزنه‌های سالم در واحد سطح برگ باشد (Rucińska-Sobkowiak, 2016). در پژوهش Shaker Koochi et al. (2021) بیشترین مقدار نشت الکترولیت و کم‌ترین وزن خشک گیاه جو در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک حاصل شد.

عنصر سلیوم و نانوذرات آن به عنوان عوامل مؤثر در بهبود رشد، افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی و تنظیم فرآیندهای متابولیکی گیاهان شناخته شده‌اند. سلیوم با تأثیر بر صفات مختلف فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در گیاهان، نقش مهمی در تغذیه ایفا می‌کند. گزارش شده است که این عنصر متابولیسم گیاه را تحریک کرده، متابولیت‌های ثانویه را افزایش داده و تنش‌های غیرزیستی و زیستی را در گیاهان کاهش می‌دهد (Samynathan et al., 2023). همچنین سلیوم می‌تواند رشد گیاهان را بهبود بخشد و بر میزان جذب و توزیع عناصر معدنی دیگر در گیاه تأثیر بگذارد (Schiavon et al., 2017; Titov et al., 2022). سلیوم در حفظ تعادل آب درون سلولی از راه تقویت اسمولیت‌ها، بازسازی غشای سلولی، تأثیر در کمپلکس‌های فتوسنتزی و افزایش مقاومت گیاهان به تشعشع فرابنفش مؤثر است (Liu et al., 2023). نانوذرات سلیوم به دلیل سطح ویژه زیاد و زیست‌فراهمی بهبودیافته، حتی در مقادیر کم (۲ تا ۴ میلی‌گرم بر لیتر) قادرند آثار مثبت قابل توجهی بر رشد ریشه و شاخساره، محتوای پروتئین‌ها و تقویت سیستم دفاعی گیاهان در برابر تنش‌های

دانشکده علوم پایه دانشگاه یاسوج به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با چهار تکرار به صورت کشت گلدانی در بستر پرلیت اجرا شد. عامل اول شامل نیکل در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار) از منبع سولفات نیکل و عامل دوم، کاربرد ترکیبی از سطوح سلنیوم به دو شکل سلنات در محلول غذایی در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار) از منبع سلنات سدیم و نانوسلنیوم به صورت محلول پاشی در سه سطح (صفر، ۲ و ۵ میلی گرم در لیتر) بود. نانوسلنیوم با غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر به صورت سوسپانسیون در آب و اندازه ذرات ۱۰ تا ۴۰ نانومتر و خلوص ۹۹/۹۵ درصد از شرکت ایرانیان مشهد تهیه شد. انتخاب سطوح تیمارها بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین در این زمینه صورت گرفت (Feng et al., 2021; Sardari et al., 2022).

نمونه‌های بذری گیاه کلزای بهاره، رقم هایولا ۵۰ از مرکز تحقیقات کشاورزی گچساران تهیه گردید. گلدان‌های پلاستیکی با قطر ۱۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر با پرلیت پر شدند. بذره‌های کلزای بهاره پس از ضدعفونی با محلول هیپوکلریت سدیم پنج درصد، در پرلیت کاشت شدند. از مرحله کاشت تا جوانه‌زنی، آبیاری با آب مقطر صورت گرفت. زمانی که ۵۰ درصد بذرها سبز شدند، گلدان‌ها با یک چهارم غلظت محلول هوگلند آبیاری شدند. پس از آنکه گیاهچه‌ها بیشتر رشد نمودند، آبیاری توسط نصف غلظت محلول غذایی هوگلند انجام شد. پس از دو هفته در هر گلدان، ۶ عدد گیاه نگهداری شد. تیمار سولفات نیکل (NiSO_4) از مرحله‌ی شش برگی به مدت چهار هفته اعمال شد. سلنیوم (سلنات سدیم Na_2SeO_4) به محلول غذایی هوگلند افزوده شد و نانوسلنیوم به صورت محلول پاشی اعمال شد. محلول پاشی نانوسلنیوم طی دو مرتبه، ابتدا همزمان با تنش نیکل و تکرار آن سه هفته پس از محلول پاشی اول صورت گرفت. محلول پاشی نانوسلنیوم به همراه توئین ۲۰ با غلظت یک درصد اعمال شد. pH محلول غذایی با محلول دو میلی مولار بافر MES (2-(N-morpholino) ethane sulphononic acid) و با استفاده از KOH در محدوده pH برابر ۵/۵ ثابت نگه داشته شد. گیاهان در

اکسیداتیو ایجاد کنند (Samynathan et al., 2023). همچنین نانوذرات سلنیوم به دلیل اندازه کوچک (۲۰ تا ۱۰۰ نانومتر) و بار سطحی مثبت، در مقایسه با عنصر سلنیوم نفوذپذیری بیشتری به برگ‌ها دارند (Khan et al., 2023). نانوسلنیوم به دلیل زیست-فراهمی زیاد و فعالیت زیستی مطلوب نظر پژوهشگران را به خود جلب نموده است. بکارگیری نانوسلنیوم باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و گلوکاتایون پراکسیداز در گیاهان شده و این امر منجر به بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و افزایش رشد و عملکرد گیاه می‌شود (El-Ramady et al., 2014; Hosnedlova et al., 2018; Khan et al., 2023).

نانوذرات به علت اندازه بسیار کوچک‌شان برتری ویژه‌ای نسبت به ذرات بزرگ‌تر دارند (Monica and Cremonini, 2009). اولین استفاده از فناوری نانو توسط وزارت کشاورزی آمریکا در سال ۲۰۰۳ انتشار یافت (Scott and Chen, 2013). عوامل مختلفی مانند سن گیاه، نوع نانوذره و اندازه نانوذره بر میزان اثرگذاری نانوذره بر گیاهان دخیل هستند (Djanaguiraman et al., 2018). اگرچه پژوهش‌های متعددی به بررسی اثر سلنیوم در کاهش تنش ناشی از فلزات سنگین پرداخته‌اند، اما بیشتر این پژوهش‌ها بر فلزاتی مانند کادمیوم و سرب متمرکز بوده و نقش سلنیوم در کاهش تنش ناشی از نیکل کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، مقایسه دقیق بین اثر سلنیوم و نانوسلنیوم در این زمینه، به‌ویژه در گیاهان زراعی مهمی مانند کلزا که از اهمیت اقتصادی زیادی برخوردارند، انجام نشده است. با توجه به کاربردهای گسترده کلزا از جمله تولید روغن خوراکی، حفظ سلامت این محصول از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف سلنیوم و نانوسلنیوم بر رشد و شاخص‌های فیزیولوژیک کلزا تحت تنش نیکل انجام شد.

مواد و روش‌ها

تیمارها و شیوه‌ی اجرای آزمایش

این پژوهش در سال ۱۴۰۳ در آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهی

کشور ژاپن قرائت شد و میانگین آن‌ها به عنوان شاخص سبزی‌نگی یادداشت شد.

برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب (RWC)، از روش Mishra and Choudhuri (1999) استفاده شد. قطعاتی تقریباً هم‌اندازه از برگ بوته‌های انتخابی جدا شد و بلافاصله با ترازو وزن گردید (FW). پس از آن برای تعیین وزن آماس برگ، نمونه‌ها در ظروف پتری سربسته و حاوی آب مقطر در مکانی تاریک با دمای ثابت به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. سپس رطوبت سطحی برگ‌ها با کاغذ واتمن گرفته شده و وزن آماس (TW) اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری وزن خشک، برگ‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس قرار داده شده و سپس وزن شدند (DW). در نهایت RWC برگ‌ها با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$RWC = (FW - DW) / (TW - DW) \times 100 \quad (1)$$

برای اندازه‌گیری نشت الکترولیت‌های برگ از روش McKay (1992) استفاده شد. دیسک‌های دایره‌ای به اندازه یکسان از برگ‌های جوان از هر تیمار تهیه شد. پس از آن نمونه‌ها در ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس قرار داده شد. پس از مدت چهار تا شش ساعت، رسانایی الکتریکی هر نمونه با استفاده از دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد (EC_1). هم‌چنین لوله‌های آزمایش به مدت ۴۵ دقیقه در حمام آب جوش با دمای ۹۵ درجه سلسیوس قرار داده شدند و پس از سرد شدن در دمای آزمایشگاه مجدداً رسانایی الکتریکی نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید (EC_2). در نهایت درصد نشت الکترولیت (EL) نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$EL = (EC_1 / EC_2) \times 100 \quad (2)$$

برای اندازه‌گیری محتوای قندهای محلول برگ از روش Chapin and Kennedy (1994) استفاده شد. مقدار ۰/۱ گرم از ماده خشک برگ گیاه کلزا وزن، به‌خوبی پودر شده و درون فالكون ریخته شد و سپس ۲/۵ میلی‌لیتر اتانول ۷۰ درصد به آن افزوده شد. نمونه‌ها به مدت هفت روز در تاریکی نگهداری شدند،

اتاق کشت با دمای ۲۰ درجه سلسیوس در روز و ۱۵ درجه سلسیوس در شب و تناوب نوری ۱۶ ساعت نور و ۸ ساعت تاریکی نگهداری شدند. پس از چهار هفته اعمال تنش نیکل و کاربرد سلنیوم و محلول‌پاشی نانو سلنیوم، از هر گلدان پنج بوته انتخاب و برداشت شد.

اندازه‌گیری محتوای نیکل و پتاسیم در ریشه و شاخساره

ابتدا ریشه گیاهان برداشت شده به مدت ۱۵ دقیقه در محلول ۲۰ میلی‌مولار Na_2EDTA قرار داده شد و سپس با آب مقطر به‌طور کامل شسته شدند. سپس شاخساره و ریشه هر گیاه، جدا گردید. نمونه‌های برداشت شده در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت در آون خشک شدند. سپس یک گرم از نمونه خشک شده توزین و ۳ میلی‌لیتر اسید نیتریک به آن افزوده شده و ۱۲ ساعت در دمای محیط قرار داده شد. پس از آن به مدت یک ساعت در حمام آب گرم قرار داده و پس از سرد شدن یک میلی‌لیتر آب اکسیژنه به آن افزوده شد و مجدداً به مدت یک ساعت درون حمام آب گرم گذاشته و در نهایت حجم نمونه با آب مقطر به حجم ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس مقدار نیکل کل در ریشه و شاخساره گیاه با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی مدل HITACHI-Z-2000 اندازه‌گیری شد (Heidari Dehno and Mohtadi, 2018). برای اندازه‌گیری میزان پتاسیم کل، نیم گرم نمونه خشک شده پودر شد و سپس به مدت ۱۲ ساعت در ۳ میلی‌لیتر اسید نیتریک قرار داده شد. پس از آن این مخلوط برای یک ساعت در حمام آب گرم قرار داده شد. سپس یک میلی‌لیتر آب اکسیژنه به آن افزوده شد و مجدداً درون حمام آب گرم برای یک ساعت گذاشته شد و با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. در نهایت محتوای پتاسیم ریشه و شاخساره با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر مدل Jenway PFP7 اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی

برای اندازه‌گیری شاخص سبزی‌نگی (SPAD)، از هر بوته ۵ برگ انتخاب شده و میزان سبزی‌نگی با دستگاه SPAD-502 ساخت

نتایج و بحث

نتایج نشان داد اثر برهم‌کنش تنش نیکل و سلیوم در سطح احتمال یک درصد بر محتوای نیکل ریشه، محتوای نیکل شاخساره، محتوای پتاسیم ریشه و محتوای پتاسیم شاخساره در کلزا معنی‌دار شد (جدول ۱). همچنین نتایج نشان داد اثر برهم‌کنش تنش نیکل و سلیوم بر شاخص سبزی‌نگی برگ، درصد نشت الکترولیت‌ها، محتوای قندهای محلول شاخساره، طول ریشه و شاخساره در سطح احتمال یک درصد و سطح برگ در سطح احتمال پنج درصد در گیاه کلزا معنی‌دار شد، اما بر محتوای نسبی آب برگ و وزن خشک شاخساره تنها آثار اصلی تنش نیکل و سلیوم معنی‌دار شد (جدول ۲).

محتوای نیکل ریشه

با افزایش سطوح تنش نیکل، میزان نیکل ریشه کلزا به تدریج افزایش یافت. در سطح ۱۰ میکرومولار، نیکل تنها با کاربرد ۱۰ میکرومولار سلیوم محتوای نیکل ریشه کاهش یافت و در سطح ۵۰ میکرومولار نیز سطوح ۱۰ و ۲۰ میکرومولار سلیوم و میلی‌گرم در لیتر نانوسلیوم بدون وجود اختلاف معنی‌دار با یکدیگر محتوای نیکل ریشه را نسبت به شاهد کاهش دادند (شکل ۱-الف). بیشترین محتوای نیکل ریشه (با میانگین ۳۹۱ میکروگرم بر گرم وزن خشک) در سطح کاربرد ۵۰ میکرومولار نیکل و بدون کاربرد نانوسلیوم بود که با سایر سطوح سلیوم و نانوسلیوم اختلاف معنی‌داری داشت. در شرایط بدون کاربرد نیکل، هیچ‌گونه تجمع نیکل در ریشه کلزا مشاهده نشد. همچنین در شرایط کاربرد نیکل، کم‌ترین محتوای نیکل ریشه (۶۳/۵۰ میکروگرم بر گرم وزن خشک) در سطح ۱۰ میکرومولار نیکل به همراه ۱۰ میکرومولار سلیوم حاصل شد (شکل ۱-الف).

محتوای نیکل شاخساره

با افزایش سطوح تنش نیکل، به تدریج محتوای نیکل شاخساره افزایش یافت و کاربرد سلیوم و نانوسلیوم در سطح ۵۰ میکرو

سپس یک میلی‌لیتر از محلول رویی به درون فالتون جدید انتقال داده شد و با آب مقطر به حجم دو میلی‌لیتر رسانده شد. مقدار یک میلی‌لیتر فنل پنج درصد به آن افزوده و به خوبی هم زده شد. سپس، مقدار پنج میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ به آن افزوده شد. نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه درون یخچال نگهداری شدند. جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل philler scientific SU-6/00) در طول موج ۴۸۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. این سنجش به روش فنل سولفوریک اسید صورت گرفت و برای سنجش قند از منحنی استاندارد که از گلوکز تهیه شده بود استفاده شد.

اندازه‌گیری شاخص‌های رشد

برای اندازه‌گیری طول ریشه و شاخساره گیاه، ابتدا پس از خارج کردن گیاه از گلدان و تمیز کردن آن، به وسیله قیچی قسمت اصلی ریشه از شاخساره جدا گردیده و به وسیله خط کش طول گیاهان اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک، پس از خالی کردن گلدان‌ها و شست‌وشوی گیاهان، ریشه و شاخساره گیاه از هم جدا شدند و نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سلسیوس قرار گرفته و توسط ترازوی دیجیتالی مدل Te313s توزین شد. در نهایت جمع داده‌ها به صورت میانگین برای هر بوته محاسبه گردید. برای تعیین سطح برگ در هر گلدان یک بوته انتخاب شده و برگ‌های آن شمارش و وزن تازه آن اندازه‌گیری شد. سپس برگ‌ها شماره‌گذاری شده و برای اندازه‌گیری سطح برگ از دستگاه سطح برگ‌سنج مدل WINARA-UT-11 استفاده گردید (Arshad et al., 2016).

تجزیه داده‌ها

تجزیه آماری داده‌ها و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای SAS و Excel انجام گرفت. مقایسه میانگین داده‌ها بر اساس آزمون LSD در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شد.

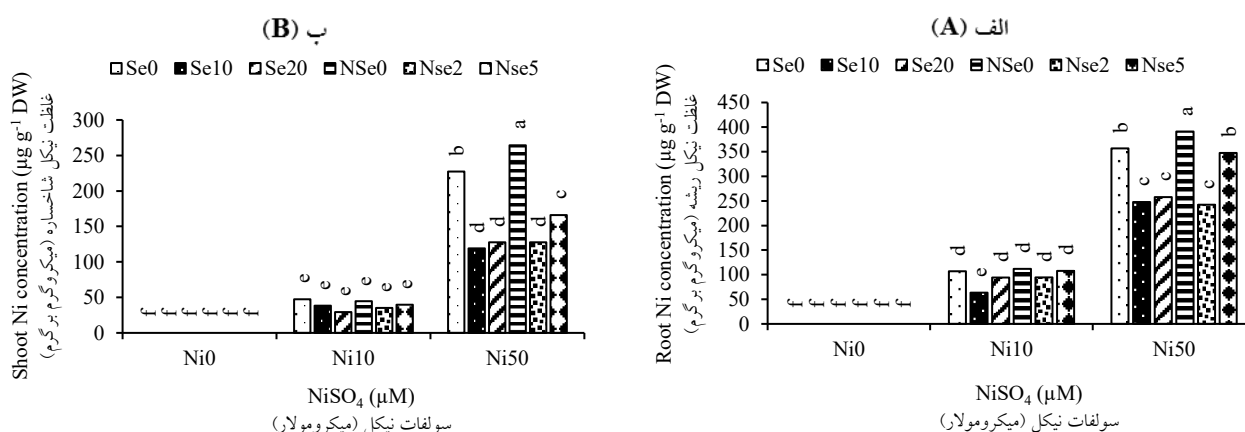
جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس اثر نیکل (Ni) و سلیوم (Se) بر محتوای Ni و پتاسیم (K) در ریشه و شاخساره و نسبت غلظت Ni ریشه به شاخساره کلزا

Table 1. Analysis of variance of nickel (Ni) and selenium (Se) effects on Ni and potassium (K) concentrations in root and shoot and root to shoot Ni concentration ratio of canola

منابع تغییرات	درجه آزادی	نیکل ریشه	نیکل شاخساره	پتاسیم ریشه	پتاسیم شاخساره
Source of variation	df	Root Ni	Shoot Ni	Root K	Shoot K
نیکل Ni	2	592214**	229909**	1272**	78.4**
سلیوم Se	5	7565**	4935**	214.8**	54.3**
نیکل × سلیوم	10	5363**	4279**	234.5**	154.6**
Ni × Se					
خطا Error	54	175.5	208.8	19.7	2.78
ضریب تغییرات (درصد)	-	9.84	9.84	12.33	4.44
CV (%)					

ns و ** به ترتیب نبود اثر معنی‌دار و معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد را نشان می‌دهد.

ns and ** indicate non-significant effect and significant effect at probability level of 1 percent, respectively.



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش نیکل و سلیوم بر محتوای نیکل ریشه (الف) و محتوای نیکل شاخساره (ب) در کلزا. Ni0، Ni10 و Ni50 به ترتیب نیکل (Ni) در سه سطح صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار از منبع سولفات نیکل، Se0، Se10 و Se20 به ترتیب سلیوم (Se) در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار از منبع سلنات سدیم و NSe0، NSe2 و NSe5 به ترتیب نانوسلیوم (NSe) در غلظت‌های صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر را بیان می‌کنند. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود تفاوت آماری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 1. Mean comparisons of interaction effect of nickel (Ni) and selenium (Se) on root Ni concentration (A) and shoot Ni concentration (B) of canola. Nickel (Ni) was used at three levels of 0, 10, and 50 μM from a nickel sulfate source (Ni0, Ni10 and Ni50), selenium (Se) at concentrations of 0, 10, and 20 μM from a sodium selenate source (Se0, Se10 and Se20), and nano-selenium (NSe) at concentrations of 0, 2, and 5 mg/L (NSe0, NSe2 and NSe5). Means with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

محتوای نیکل شاخساره (۲۶۴ میکروگرم بر گرم وزن خشک) حاصل شد که با سایر سطوح آزمایشی اختلاف معنی‌داری داشت. در شرایط کاربرد نیکل، کم‌ترین محتوای نیکل شاخساره (۲۹/۵۰ میکروگرم بر گرم وزن خشک) در سطح ۱۰ میکرومولار نیکل

مولار نیکل در مقایسه با شاهد موجب کاهش محتوای نیکل شاخساره شد اما در سطح ۱۰ میکرومولار نیکل اختلاف معنی‌داری بین سطوح سلیوم حاصل نشد (شکل ۱-ب). با کاربرد ۵۰ میکرومولار نیکل و بدون کاربرد نانوسلیوم بیش‌ترین

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثر نیکل (Ni) و سلیوم (Se) بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک و شاخص‌های رشد کلزا
 Table 2. Analysis of variance of nickel (Ni) and selenium (Se) effects on some physiological characteristics and growth indices of canola

منابع تغییرات	درجه آزادی	شاخص سبزیگی	درصد نشت الکترولیت	محتوای نسبی آب برگ	محتوای قندهای محلول	طول ریشه	طول شاخساره	وزن خشک ریشه	وزن خشک شاخساره	سطح برگ
Source of variation	df	Chlorophyll index	Percentage of electrolyte leakage	Relative water content	Soluble sugars	Root length	Shoot length	Root dry weight	Shoot dry weight	Leaf area
Ni	2	2751**	1972**	77.2*	0.16**	1444**	86.09**	1.81**	28.72**	29746980**
Se	5	33.6**	315**	146**	2.79**	35.2**	3.15 ^{ns}	0.37**	1.65**	1514974*
Ni × Se	10	37.96**	25.20**	17.94 ^{ns}	0.46**	25.9**	6.39**	0.04**	0.39 ^{ns}	1484916*
خطا Error	54	5.18	7.03	16.72	0.02	17.29	1.49	0.009	0.48	4622741
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	6.48	12.82	5.08	10.58	16.98	13.26	16.63	23.46	23.96

ns, * and ** indicate non-significant effect and significant effect at probability levels of 5 and 1 percent, respectively.

ns, * and ** indicate non-significant effect and significant effect at probability levels of 5 and 1 percent, respectively.

2015). بنابراین تجمع نیکل در مقادیر بیشتر از حد مجاز در کلزا می‌تواند موجب سمیت و کاهش کیفیت محصول شود. این موضوع اهمیت کنترل میزان نیکل در خاک و منابع آبیاری را نشان می‌دهد، به‌ویژه در مناطقی که پساب‌های صنعتی به‌عنوان منبع آبیاری استفاده می‌شوند.

در پژوهشی روی گیاه گشنیز، Tagharobiyan et al. (2016) مشاهده نمودند بیشترین انباشتگی فلز نیکل در ریشه این گیاه رخ داد. به‌بیان آن‌ها، دیواره‌های سلولی ریشه دارای پلی‌ساکاریدها و ترکیباتی مانند پکتین هستند که می‌توانند یون‌های نیکل را به خود جذب کرده و از انتقال آن به بخش‌های درونی گیاه جلوگیری کنند. پژوهش Davoodi et al. (2018) نشان داد بیشترین مقدار نیکل در شاخساره گیاه ریحان (۵/۵۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) در غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر نیکل و کم‌ترین میزان آن نیز در تیمار بدون تنش نیکل حاصل شد. آن‌ها بیان نمودند گیاهان دارای ناقل‌های فلزات سنگین هستند که برخی از این ناقل‌ها به‌صورت فعال، نیکل را به واکوئل‌ها انتقال می‌دهند یا آن را به خارج از سلول پمپ می‌کنند تا از ورود نیکل به سیستم آوندی جلوگیری شود.

در برخی گیاهان، حضور سلیوم می‌تواند جذب نیکل را کاهش دهد. این اثر ممکن است به‌دلیل رقابت بین این دو عنصر برای جذب از راه ریشه باشد. سلیوم ممکن است در جذب نیکل اختلال ایجاد کند و باعث کاهش انتقال نیکل به ریشه و شاخساره شود (Hasanuzzaman et al., 2022). Gajewska et al. (2006) با بررسی گیاه گندم مشاهده نمودند سلیوم به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان طبیعی در گیاهان عمل می‌کند و می‌تواند در برابر سمیت نیکل از گیاه محافظت کند. سلیوم از راه تشکیل کمپلکس‌های غیرآلی با فلزات سنگین و خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن سمیت این عناصر را کاهش می‌دهد. همچنین در برخی موارد، سلیوم می‌تواند با تشکیل ترکیبات پایدار با نیکل، از تجمع بیش از حد نیکل در ریشه و شاخساره جلوگیری کند. به‌عبارتی، سلیوم باعث بهبود عوارض سوء ناشی از جذب نیکل در گیاهان می‌شود (Gajewska et al., 2006). در پژوهش حاضر در تمامی سطوح تنش نیکل، کاربرد ۱۰ میکرومولار سلیوم و

به‌همراه ۱۰ میکرومولار سلیوم حاصل شد. در سطح ۱۰ میکرومولار نیکل، بین اثر سطوح مختلف سلیوم و نانوسلیوم بر محتوای نیکل شاخساره، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. در سطح ۵۰ میکرومولار نیکل نیز کاربرد سلیوم و نانوسلیوم محتوای نیکل شاخساره را نسبت به شرایط بدون کاربرد آن‌ها کاهش داد و بین سطوح ۱۰ و ۲۰ میکرومولار سلیوم و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلیوم اختلاف معنی‌داری حاصل نشد. همچنین کاربرد ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلیوم نسبت به ۵ میلی‌گرم در لیتر از محتوای نیکل کم‌تری برخوردار بود (شکل ۱-ب).

در پژوهش حاضر، میزان انباشتگی نیکل در ریشه بیشتر از شاخساره بود. در غلظت‌های زیاد نیکل، این عنصر ممکن است در ریشه‌ها تجمع یابد. این امر به‌عنوان یک سازوکار دفاعی عمل می‌کند، تا گیاه از انتقال بیش از حد نیکل به شاخساره جلوگیری کند. نیکل در غلظت‌های کم ممکن است به شاخساره انتقال یابد و در تنظیم فعالیت‌های آنزیمی و متابولیکی نقش داشته باشد. با این حال، در شرایط سمی، تجمع نیکل در برگ‌ها می‌تواند منجر به زردشدن (کلروز) و کاهش کارایی فتوسنتزی شود (Dubey and Pandey, 2011). افزایش غلظت نیکل در بافت‌های گیاهی به‌دلیل افزایش غلظت این عنصر در محیط رشد گیاه است. واکوئل مقصد نهایی تقریباً همه مواد سمی است که گیاه با آن مواجه می‌گردد (Clemens, 2006). حد طبیعی نیکل در گیاهان ۰/۰۲ تا ۵ میکروگرم بر گرم وزن خشک و حد بحرانی آن ۱۰ تا ۱۰۰ میکروگرم بر گرم وزن خشک است (Marschner, 2012; Sayadmanesh et al., 2015). آستانه سمیت نیکل در گیاه کلزا به‌طور دقیق در منابع علمی به‌صورت عددی مشخص نشده است، اما بر اساس پژوهش‌های موجود، تجمع نیکل در برگ‌های کلزا از حد مجاز بیشتر شده و می‌تواند آثار سمی داشته باشد. در پژوهشی که اثر استفاده از پساب صنعتی بر تجمع عناصر سنگین از جمله نیکل در خاک و گیاه کلزا را بررسی کرده است، مشاهده شد که تجمع نیکل در گیاه کلزا تحت شرایط آبیاری با پساب صنعتی بین ۱۶ تا ۱۳۶ درصد افزایش یافته و این تجمع در برگ‌های کلزا از حد مجاز بیشتر بود (Sayadmanesh et al., 2015).

فعال اکسیژن (ROS) در گیاه می‌شود که این امر منجر به آسیب غشای سلولی و کاهش کارایی انتقال یون‌های ضروری از جمله پتاسیم می‌گردد (Ishaq et al., 2023). نتایج (Aqeel et al. (2021 نشان داد با افزایش سطوح نیکل و کادمیوم از میزان پتاسیم در شاخساره و ریشه گیاه ماش کاسته شد. در پژوهش حاضر مشاهده شد با افزایش سطوح تنش نیکل، میزان پتاسیم ریشه بیشتر شد. افزایش پتاسیم در ریشه کلزا تحت تنش نیکل می‌تواند نشان‌دهنده تلاش گیاه برای مقابله با تنش فلز سنگین باشد. همچنین نانوسلنیوم به دلیل فعالیت آنتی‌اکسیدانی قوی، احتمالاً به گیاه در کاهش آثار مضر نیکل کمک کرده و باعث افزایش انباشت پتاسیم شده است.

سلنیوم با کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تنش‌های محیطی، به حفظ یکپارچگی و عملکرد غشاهای سلولی کمک می‌کند. این موضوع از تخریب کانال‌ها و پمپ‌های یونی جلوگیری کرده و جذب پتاسیم را افزایش می‌دهد. در نتیجه، گیاه می‌تواند تعادل یونی خود را بهتر حفظ کرده و پتاسیم بیشتری جذب کند (Madaan and Mudgal, 2011). به‌طور کلی، نتایج پژوهش حاضر نشان داد که نانوسلنیوم به دلیل اندازه کوچک و پایداری زیاد، اثر بهتری نسبت به سلنیوم بر انباشتگی پتاسیم در شاخساره کلزا داشت. این یافته می‌تواند ناشی از توانایی نانوسلنیوم در تحریک بهتر متابولیسم و انتقال یون‌ها در گیاه باشد.

شاخص سبزینگی برگ

بیشترین میزان کاهش شاخص سبزینگی برگ کلزا، در سطح ۵۰ میکرومولار نیکل حاصل شد. کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم موجب بهبود شاخص سبزینگی برگ شد. در سطح بدون کاربرد تنش نیکل و ۱۰ میکرومولار سلنیوم، بیشترین شاخص سبزینگی برگ و در سطح ۵۰ میکرومولار نیکل و ۵ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم، کم‌ترین شاخص سبزینگی برگ حاصل شد که اختلاف بین آن‌ها ۱/۱ برابر، برآورد شد (شکل ۳-الف). اثر بهبوددهندگی سلنیوم نسبت به شرایط بدون کاربرد سلنیوم تنها در شرایط بدون تنش نیکل مشاهده گردید.

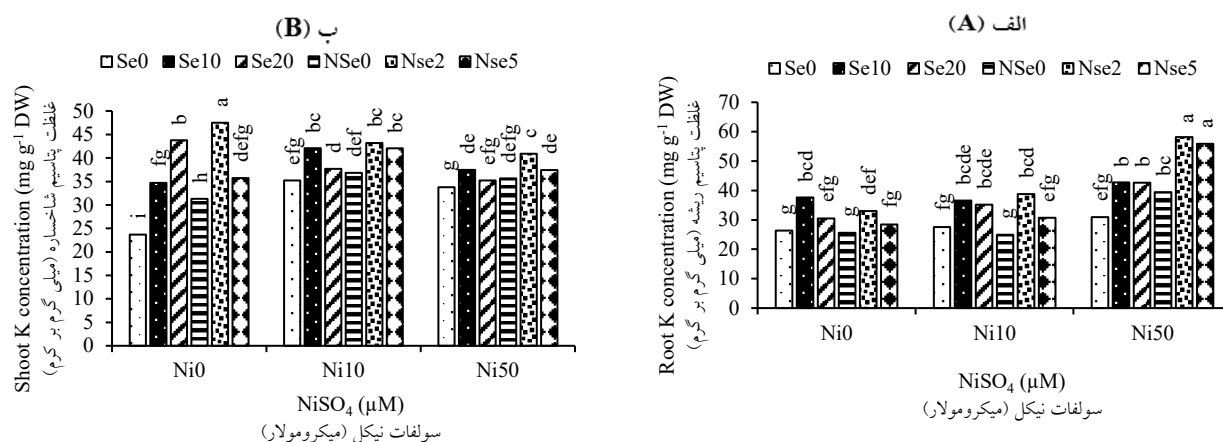
پس از آن ۲ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم، موجب کاهش نیکل در ریشه و شاخساره شد. اما غلظت‌های بیشتر سلنیوم و نانوسلنیوم نتوانستند اثر کاهشی بر محتوای نیکل ریشه و شاخساره نسبت به سطوح ۱۰ میکرومولار سلنیوم و پس از آن ۲ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم داشته باشند.

محتوای پتاسیم ریشه

با افزایش سطوح تنش نیکل، به تدریج محتوای پتاسیم ریشه گیاه کلزا به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بیشترین محتوای پتاسیم ریشه، در سطح تنش ۵۰ میکرومولار نیکل و کاربرد ۲ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم با میانگین ۵۸/۲۱ میلی گرم بر گرم وزن خشک حاصل شد که با سطح کاربرد ۵ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم اختلاف معنی‌داری نشان نداد. کم‌ترین محتوای پتاسیم ریشه در شرایط بدون کاربرد نیکل و بدون کاربرد نانوسلنیوم با میانگین ۲۵/۵۷ میلی گرم بر گرم وزن خشک حاصل شد. در تمامی سطوح نیکل، کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم محتوای پتاسیم ریشه را نسبت به شاهد افزایش داد (شکل ۲-الف).

محتوای پتاسیم شاخساره

بیشترین محتوای پتاسیم شاخساره کلزا با میانگین ۴۷/۵۰ میلی گرم بر گرم وزن خشک، در سطح بدون کاربرد نیکل و کاربرد ۲ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم و کم‌ترین آن با میانگین ۲۳/۶۸ میلی گرم بر گرم وزن خشک، از تیمار بدون کاربرد نیکل و بدون کاربرد سلنیوم حاصل شد. در هر سه سطح تنش نیکل، کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم محتوای پتاسیم شاخساره کلزا بهبود یافت. به‌طور کلی نانوسلنیوم اثر بهتری بر انباشتگی پتاسیم شاخساره نسبت به سلنیوم نشان داد (شکل ۲-ب). یکی از سازوکارهای تأثیر تنش نیکل بر جذب پتاسیم به برهمکنش آن با سامانه‌های انتقال یونی گیاه مربوط می‌شود. نیکل می‌تواند موجب ایجاد اختلال در تعادل یونی گیاه شود و به‌ویژه با تغییر در عملکرد پمپ‌های یونی و کانال‌های غشایی، جذب پتاسیم را تحت تأثیر قرار دهد. تنش نیکل باعث افزایش تولید گونه‌های



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش نیکل و سلنیوم بر محتوای پتاسیم ریشه (الف) و محتوای پتاسیم شاخساره (ب) در کلزا. Ni0 و Ni10 و Ni50 به ترتیب نیکل (Ni) در سه سطح صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار از منبع سولفات نیکل، Se0 و Se10 و Se20 به ترتیب سلنیوم (Se) در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار از منبع سلنات سدیم و NSe0 و NSe2 و NSe5 به ترتیب نانوسلنیوم (NSe) در غلظت‌های صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر را بیان می‌کنند. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود تفاوت آماری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 2. Mean comparisons of interaction effect of nickel and selenium on root K concentration (A) and shoot K concentration (B) of canola. Nickel (Ni) was used at three levels of 0, 10, and 50 μM from a nickel sulfate source (Ni₀, Ni₁₀ and Ni₅₀), selenium (Se) at concentrations of 0, 10, and 20 μM from a sodium selenate source (Se₀, Se₁₀ and Se₂₀), and nano-selenium (NSe) at concentrations of 0, 2, and 5 mg/L (NSe₀, NSe₂ and NSe₅). Means with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

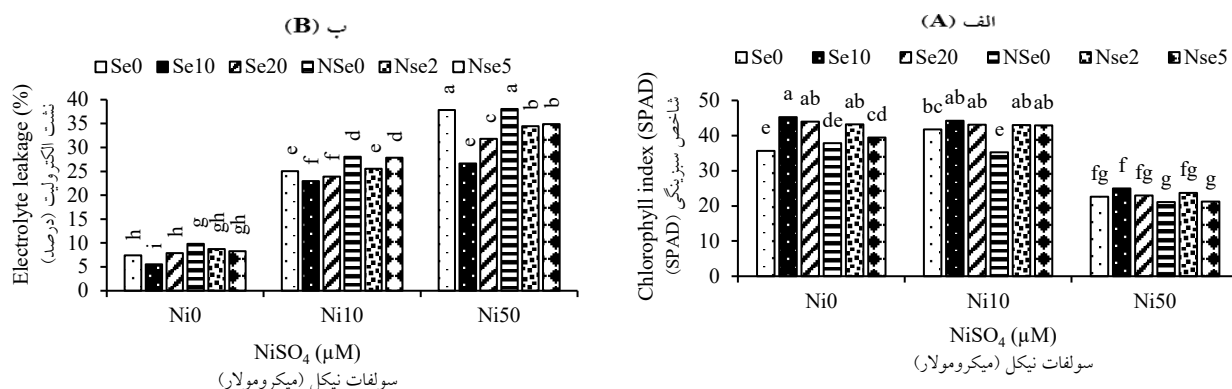
عملکرد بهتری نسبت به شرایط بدون کاربرد آن نشان داد و موجب افزایش شاخص سبزیگی شد (شکل ۳-الف). این نتیجه احتمالاً به دلیل نقش سلنیوم به عنوان آنتی‌اکسیدان و تقویت‌کننده سامانه فتوسنتز در شرایط عادی است. پژوهش González et al. (2015) نشان داد که با افزایش سطوح نیکل از یک به چهار میلی‌گرم بر لیتر، از محتوای کلروفیل برگ گیاه سنبل آبی کاسته شد. به بیان آن‌ها تجمع نیکل در سلول‌های گیاهی می‌تواند منجر به تولید رادیکال‌های آزاد و ایجاد تنش اکسیداتیو شود که به غشاهای سلولی و اجزای کلروپلاست آسیب می‌زند. بررسی‌ها نشان داده غلظت‌های کم سلنیوم با محافظت از آنزیم‌های کلروپلاستی، بیوستز رنگدانه‌های فتوسنتزی را افزایش می‌دهد، اما با افزایش غلظت سلنیوم، این عنصر آنزیم‌های بیوستزکننده کلروفیل را مهار می‌کند و از این راه تأثیر منفی بر سنتز کلروفیل می‌گذارد.

درصد نشت الکترولیت‌ها

با افزایش سطوح تنش نیکل به تدریج بر درصد نشت الکترولیت‌ها

در سطح تنش پایین (۱۰ میکرومولار نیکل)، شاخص سبزیگی برگ افزایش یافت، اما در تنش شدیدتر (۵۰ میکرومولار نیکل)، کاهش قابل توجهی مشاهده شد. این روند نشان می‌دهد که نیکل در غلظت کم ممکن است به عنوان یک عنصر ریزمغذی عمل کرده و متابولیسم فتوسنتزی را تحریک کند، اما در غلظت‌های زیاد، اثر سمی آن غالب شده و منجر به کاهش ساخت و پایداری کلروفیل می‌شود. غلظت کم نیکل برای فعالیت برخی از آنزیم‌های گیاهی به ویژه آنزیم آورده‌آز ضروری است. همچنین در غلظت‌های کم، نیکل باعث بهبود فرایندهای فتوسنتزی از راه افزایش تولید کلروفیل و تسهیل جذب آهن و عناصر غذایی می‌گردد (Gopal and Nautiyal, 2012). در پژوهش حاضر مشاهده شد در سطح ۱۰ میکرومولار نیکل، کاهش قابل توجهی در شاخص کلروفیل برگ ایجاد نشد و احتمالاً اثر مثبت بر شاخص سبزیگی داشته است.

کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم در پژوهش حاضر توانست شاخص سبزیگی برگ را بهبود بخشد، اما این اثر به شدت به سطح تنش نیکل وابسته بود. در شرایط بدون تنش نیکل، سلنیوم



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش نیکل و سلنیوم بر شاخص سبزیگی برگ یا SPAD (الف) و درصد نشت الکترولیت برگ (ب) در کلزا. Ni₀, Ni₁₀ و Ni₅₀ به ترتیب نیکل (Ni) در سه سطح صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار از منبع سولفات نیکل، Se₀، Se₁₀ و Se₂₀ به ترتیب سلنیوم (Se) در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار از منبع سلنات سدیم و NSe₀، NSe₂ و NSe₅ به ترتیب نانوسلنیوم (NSe) در غلظت‌های صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر را بیان می‌کنند. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود تفاوت آماری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 3. Mean comparisons of interaction effect of nickel and selenium on chlorophyll SPAD index (A) and electrolyte leakage (B) of canola. Nickel (Ni) was used at three levels of 0, 10, and 50 μM from a nickel sulfate source (Ni₀, Ni₁₀ and Ni₅₀), selenium (Se) at concentrations of 0, 10, and 20 μM from a sodium selenate source (Se₀, Se₁₀ and Se₂₀), and nano-selenium (NSe) at concentrations of 0, 2, and 5 mg/L (NSe₀, NSe₂ and NSe₅). Means with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

اکسیژن فعال و در نتیجه کاهش اکسیداسیون چربی‌های غشاء سلولی می‌شود (Ríos et al., 2009). بنابراین در پژوهش حاضر، کاهش درصد نشت الکترولیت‌ها را می‌توان به تأثیر سلنیوم (غلظت ۱۰ میکرومولار) و نانوسلنیوم (۲ میلی‌گرم در لیتر) بر افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نسبت داد.

محتوای نسبی آب برگ

بیشترین محتوای نسبی آب برگ (۸۲/۱۴ درصد)، از سطح بدون تنش نیکل و کم‌ترین میزان این صفت نیز، در زمان کاربرد ۵۰ میکرومولار نیکل (۷۸/۵۵ درصد) به‌دست آمد که نسبت به یکدیگر اختلاف ۴/۵۷ درصدی نشان دادند تنش فلزات سنگین می‌تواند منجر به تولید اکسیژن فعال و آسیب به غشاءها و نشت شیره سلولی به‌واسطه پراکسیداسیون لیپید شود و موجب کاهش شدید آب در شاخساره از راه محدود کردن حرکت آب از ریشه‌ها به بخش‌های هوایی در گیاهان شوند. پژوهشگران گزارش کردند که کاهش درصد آب برگ تحت غلظت‌های زیاد نیکل می‌تواند

در کلزا افزوده شد و به‌طور کلی سلنیوم در سطح ۱۰ میکرومولار در هر سه سطح تنش نیکل از کم‌ترین درصد نشت الکترولیت‌ها برخوردار بود و پس از آن سطح ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم اثر بهبوددهنده بر این صفت داشت. بیشترین درصد نشت الکترولیت‌ها (۳۷/۸۶ درصد)، در شرایط کاربرد ۵۰ میکرومولار نیکل و بدون کاربرد سلنیوم و کم‌ترین آن (۵/۵۴ درصد) نیز از تیمار بدون کاربرد نیکل و ۱۰ میکرومولار سلنیوم به‌دست آمد (شکل ۳-ب).

نیکل می‌تواند باعث اختلال در عملکرد غشاءهای سلولی شود و این امر موجب افزایش نشت الکترولیت‌ها می‌شود. غشاءهای سلولی در نتیجه‌ی تنش نیکل آسیب دیده و این آسیب به نشت بیشتر یون‌ها منجر می‌شود (Amjad et al., 2020). فلزات سنگین از راه افزایش تجمع ROS و در اثر تنش اکسیداتیو حاصل از آن، منجر به آسیب به ساختار غشاء می‌شوند. همین امر باعث نشت الکترولیت‌ها به خارج سلول می‌شود. سلنیوم با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سبب پاک‌سازی گونه‌های

به‌دست آمد. کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم نسبت به شاهد (بدون کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم) موجب افزایش محتوای قندهای محلول شاخساره، در سطوح بدون کاربرد نیکل و ۱۰ میکرومولار نیکل شد. اما در سطح ۵۰ میکرومولار نیکل، محتوای قندهای محلول شاخساره تنها در تیمار ۱۰ میکرومولار سلنیوم افزایش یافت (شکل ۴).

با کاهش انتقال آب به برگ‌ها و اختلال در تعلق برگ‌ها به دنبال تجمع فلز سنگین در سلول‌ها، محتوای قندهای محلول در گیاه افزایش می‌یابد. علاوه بر نقش قندها در تنظیم فشار اسمزی، تصور می‌شود با افزایش قندها، گیاه بتواند ذخیره کربوهیدراتی خود را برای حفظ متابولیسم پایه محلول در شرایط محیطی تحت تنش در حد مطلوب نگه دارد (Aghili et al., 2009). در پژوهشی نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان قندهای محلول در گیاه گشنیز نشان داد که افزایش غلظت نیکل در محیط کشت باعث افزایش میزان قندهای محلول ریشه و شاخساره در تمام سطوح نیکل می‌شود (Tagharobiyan et al., 2016). نتایج پژوهش دیگری نشان داد که میزان کربوهیدرات محلول و نامحلول در گیاهان جو رشدیافته تحت تنش فلزات سنگین با توجه به غلظت بکار رفته از فلزات در آزمایش، می‌تواند افزایش یا کاهش یابد (Gubrelay et al., 2013). سلنیوم می‌تواند فعالیت آنزیم‌هایی مانند ساکارز فسفات سنتاز و آنزیم‌های آمیلولیتیک را افزایش دهد. افزایش فعالیت این آنزیم‌ها منجر به تولید بیشتر قندهای محلول می‌شود که به‌عنوان یک منبع انرژی برای سلول‌ها و همچنین اسمولیت‌ها عمل می‌کنند (Hasanuzzaman et al., 2022). سلنیوم از راه افزایش قندهای محلول در برگ‌ها، به حفظ تعادل اسمزی سلول‌ها کمک می‌کند. قندهای محلول به‌عنوان اسمولیت‌ها درون سلول‌ها عمل کرده و مانع از خروج آب از سلول می‌شوند، که این امر به حفظ آب درون‌سلولی کمک کرده و باعث افزایش مقاومت گیاه به تنش می‌شود (Ríos et al., 2009).

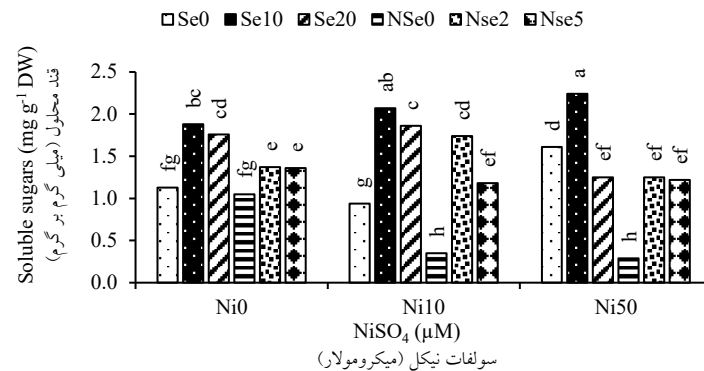
کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم در شرایط بدون تنش نیکل و تنش ملایم (۱۰ میکرومولار نیکل) موجب افزایش محتوای قندهای محلول شد. با این حال، در شرایط تنش شدید

به‌دلیل کاهش در پتانسیل اسمزی شیره سلولی، کاهش اندازه و سطح برگ و کاهش تعداد روزنه‌های سالم در هر واحد سطح برگ باشد (Rucińska-Sobkowiak, 2016). نتایج Izadi et al. (2021) نشان داد در سلول‌های برگ گیاه تربچه سمیت فلزات سنگین می‌تواند نفوذپذیری غشاء پلاسمایی را تحت تأثیر قرار دهد که سبب کاهش محتوای آب بافت می‌شود.

در بین سطوح سلنیوم، ۱۰ میکرومولار سلنیوم بیشترین محتوای نسبی آب برگ را ایجاد نمود و با دیگر سطوح سلنیوم در یک گروه آماری قرار گرفت. کم‌ترین محتوای نسبی آب برگ در شرایط بدون کاربرد نانوسلنیوم حاصل شد که با سطح ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم تفاوت معنی‌داری نداشت. بررسی‌ها نشان می‌دهد سلنیوم می‌تواند باعث بهبود روابط آبی گیاهان به-دلیل جذب فعال آب شده و عملکرد گیاه را افزایش دهد (Nawaz et al., 2014). سلنیوم با افزایش تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از آسیب به غشاهای سلولی جلوگیری می‌کند. سلنیوم می‌تواند از راه کاهش جذب سدیم و افزایش جذب پتاسیم، تعادل یونی درون سلول‌ها را بهبود بخشد. پتاسیم به‌عنوان یک عنصر کلیدی در تنظیم فشار اسمزی سلول‌ها عمل می‌کند و با جذب بیشتر آن، گیاه می‌تواند آب را درون سلول‌های خود حفظ کرده و مانع از کاهش محتوای نسبی آب برگ شود (Ríos et al., 2009). به‌طور کلی در پژوهش حاضر، سلنیوم و نانوسلنیوم با کاهش آثار تنش نیکل، موجب بهبود نسبی محتوای آب برگ شدند. با این حال، تنش شدید نیکل (۵۰ میکرومولار) همچنان اثر غالبی بر کاهش روابط آبی گیاه داشت و این نشان می‌دهد که کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم نمی‌تواند به‌طور کامل آثار منفی تنش‌های شدید را خنثی کند.

محتوای قندهای محلول شاخساره

با افزایش کاربرد نیکل، محتوای قندهای محلول شاخساره افزایش یافت. بیشترین محتوای قندهای محلول شاخساره، در شرایط کاربرد ۵۰ میکرومولار نیکل و ۱۰ میکرومولار سلنیوم و کم‌ترین آن، از تیمار ۵۰ میکرومولار تنش نیکل و بدون کاربرد نانوسلنیوم



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش نیکل و سelenium بر محتوای قندهای محلول شاخساره کلزا. Ni0، Ni10 و Ni50 به‌ترتیب نیکل (Ni) در سه سطح صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار از منبع سولفات نیکل، Se0، Se10 و Se20 به‌ترتیب سelenium (Se) در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار از منبع سلنات سدیم و NSe0، NSe2 و NSe5 به‌ترتیب نانوسلنیوم (NSe) در غلظت‌های صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر را بیان می‌کنند. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود تفاوت آماری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 4. Mean comparisons of interaction effect of nickel and selenium on soluble sugars of canola. Nickel (Ni) was used at three levels of 0, 10, and 50 μM from a nickel sulfate source (Ni0, Ni10 and Ni50), selenium (Se) at concentrations of 0, 10, and 20 μM from a sodium selenate source (Se0, Se10 and Se20), and nano-selenium (NSe) at concentrations of 0, 2, and 5 mg/L (NSe0, NSe2 and NSe5). Means with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

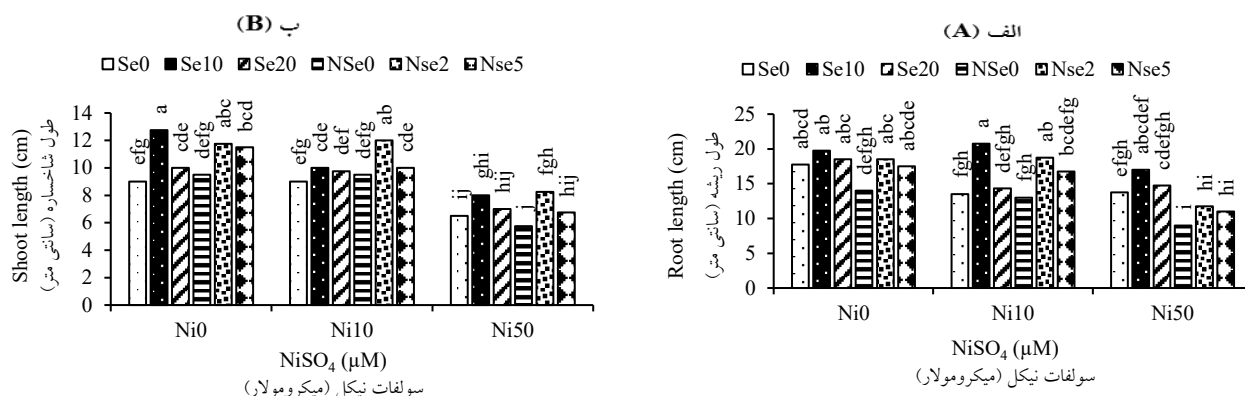
ریشه کاسته شد اما تنش ۱۰ میکرومولار نیکل، سبب کاهش طول ریشه نسبت به شرایط بدون تنش نیکل نشد. همچنین کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم موجب افزایش طول ریشه شد. در تنش شدید (۵۰ میکرومولار نیکل) کاربرد سلنیوم اثر بهتری بر طول ریشه نسبت به نانوسلنیوم داشت. بیشترین طول ریشه، در شرایط کاربرد ۱۰ میکرومولار نیکل و ۱۰ میکرومولار سلنیوم و کم‌ترین آن، از تیمار کاربرد ۵۰ میکرومولار تنش نیکل و بدون کاربرد نانوسلنیوم به‌دست آمد. در هر سه سطح تنش نیکل، کاربرد ۱۰ میکرومولار سلنیوم، طول ریشه را نسبت به شاهد و دیگر سطوح سلنیوم و نانوسلنیوم افزایش داد (شکل ۵-الف).

همراه با افزایش سطوح تنش نیکل، طول شاخساره کاهش یافت و کاربرد سطوح سلنیوم و نانوسلنیوم طول شاخساره را نسبت به شاهد، افزایش داد (شکل ۵-ب). بیشترین طول شاخساره، در شرایط بدون تنش نیکل و ۱۰ میکرومولار سلنیوم، و کم‌ترین مقدار آن در تنش شدید نیکل (۵۰ میکرومولار) و بدون کاربرد نانوسلنیوم مشاهده شد. در سطوح ۱۰ و ۵۰ میکرومولار تنش نیکل، کاربرد نانوسلنیوم اثر بهتری بر طول شاخساره نسبت به سلنیوم نشان داد.

(۵۰ میکرومولار نیکل)، تنها کاربرد ۱۰ میکرومولار سلنیوم توانست موجب افزایش محتوای قندهای محلول شود. این تفاوت اثر در شرایط تنش شدید احتمالاً به‌دلیل برهم‌کنش بین نیکل و نانوسلنیوم، از جمله تنش مضاعف ناشی از استفاده از نانوذرات و پایدارکننده نانوذرات (توئین ۲۰) است که ممکن است تأثیر مثبت نانوسلنیوم را محدود کند. در گزارش Zaji et al. (2019) مشخص شد که کاربرد سلنیوم به‌ویژه در غلظت ۵ میکرومولار سبب تحریک تجمع قندهای محلول در سطوح مختلف شوری شد. به بیان آن‌ها سلنیوم با خاصیت آنتی‌اکسیدانی خود از آسیب به ساختارهای سلولی جلوگیری می‌کند. به‌نظر می‌رسد گیاه کلزا در غیاب سلنیوم، نتوانسته است با افزایش میزان قندهای محلول در شرایط تنش نیکل، سبب تنظیم اسمزی شود، ولی با کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم، هم‌زمان با تنش نیکل، منجر به افزایش این صفت شد که خود می‌تواند در افزایش مقاومت به تنش، مؤثر باشد.

طول ریشه و شاخساره

با افزایش تنش نیکل از سطح ۱۰ به ۵۰ میکرومولار، از طول



شکل ۵. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش نیکل و سلیوم بر طول ریشه (الف) و طول شاخساره (ب) کلزا. Ni0، Ni10 و Ni50 به ترتیب نیکل (Ni) در سه سطح صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار از منبع سولفات نیکل، Se0، Se10 و Se20 به ترتیب سلیوم (Se) در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار از منبع سلنات سدیم و Nse0، Nse2 و Nse5 به ترتیب نانوسلیوم (Nse) در غلظت‌های صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر را بیان می‌کنند. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود تفاوت آماری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 5. Mean comparisons of interaction effect of nickel and selenium on root length (A) and shoot length (B) of canola. Nickel (Ni) was used at three levels of 0, 10, and 50 μM from a nickel sulfate source (Ni₀, Ni₁₀ and Ni₅₀), selenium (Se) at concentrations of 0, 10, and 20 μM from a sodium selenate source (Se₀, Se₁₀ and Se₂₀), and nano-selenium (Nse) at concentrations of 0, 2, and 5 mg/L (Nse₀, Nse₂ and Nse₅). Means with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

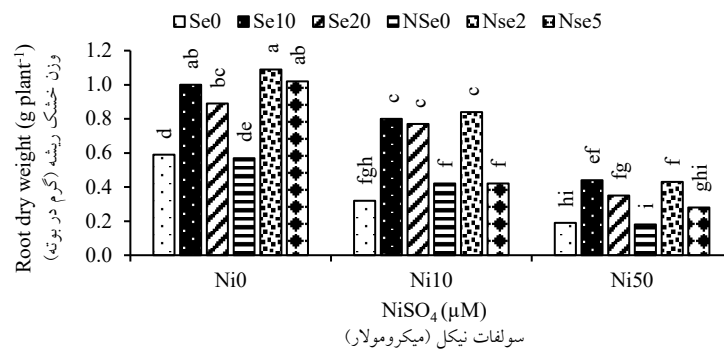
و همچنین سنتز و هیدرولیز نشاسته و ساکارز موجب افزایش ارتفاع گیاه می‌شود. سلیوم در غلظت‌های کم تقسیم سلولی را در سلول‌های مریستمی نوک ریشه و ساقه تحریک کرده و متعاقباً رشد ریشه را در گیاه بهبود می‌بخشد اما در سطوح بالا منجر به کاهش تقسیم سلولی در این سلول‌ها می‌شود (Salwa, 2012). همچنین تیمار سلیوم با افزایش میزان رشد ریشه، می‌تواند منجر به ایجاد اثر رقت شده و میزان تجمع نیکل در ریشه کاهش یابد. در پژوهش حاضر نیز سلیوم از تجمع نیکل در ریشه و شاخساره جلوگیری کرده و عوارض ناشی از جذب نیکل در گیاهان را بهبود بخشیده است.

وزن خشک ریشه و شاخساره

همراه با افزایش سطوح تنش نیکل، وزن خشک ریشه کاهش یافت و کاربرد سطوح سلیوم و نانوسلیوم، به ترتیب وزن خشک ریشه را نسبت به شاهد افزایش داد (شکل ۶). بیشترین وزن خشک ریشه در شرایط بدون تنش نیکل و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلیوم، و کم‌ترین آن در تنش شدید نیکل (۵۰ میکرومولار) و بدون کاربرد نانوسلیوم مشاهده شد. در سطوح بدون کاربرد

کاهش طول ریشه و شاخساره در نتیجه حضور فلزات سنگین می‌تواند به دلیل تأثیر بازدارنده این فلزات بر رشد طولی ریشه و کاهش جذب مواد معدنی باشد (Aghili et al., 2009). همچنین فلزات سنگین با اختلال در عمل هورمون‌هایی مانند اکسین، کاهش در رشد گیاه را در پی دارند. در پژوهشی گزارش شد که طول ریشه و شاخساره گیاه گشنیز با افزایش غلظت نیکل کاهش می‌یابد (Tagharobiyan et al., 2016). در پژوهش دیگری نیز گزارش شد که افزایش غلظت نیکل در خاک منجر به کاهش ارتفاع بوته جو می‌شود، به طوری که این کاهش در تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۱۶ و ۳۳ درصد به دست آمد (Shaker Koochi et al., 2021).

اثر بهبوددهنده سلیوم بر رشد گیاهان، چه در شرایط تنش و چه در شرایط بدون تنش موضوع پژوهش‌های متعدد بوده است. از جمله بررسی در گندم بهاره نشان داد سلیوم مانع کاهش رشد گیاهان در اثر کمبود آب گردید (Madaan and Mudgal, 2011). این پژوهشگران چنین نتیجه‌گیری کردند که غلظت‌های کم سلیوم به دلیل افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی، افزایش تثبیت کربن



شکل ۶. مقایسه میانگین اثر برهم کنش نیکل و سلنیوم بر وزن خشک ریشه کلزا. Ni0، Ni10 و Ni50 به ترتیب نیکل (Ni) در سه سطح صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار از منبع سولفات نیکل، Se0، Se10 و Se20 به ترتیب سلنیوم (Se) در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار از منبع سلنات سدیم و NSe0، NSe2 و NSe5 به ترتیب نانوسلنیوم (NSe) در غلظت‌های صفر، ۲ و ۵ میلی گرم در لیتر را بیان می‌کنند. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود تفاوت آماری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 6. Mean comparisons of interaction effect of nickel and selenium on root dry weight of canola. Nickel (Ni) was used at three levels of 0, 10, and 50 μM from a nickel sulfate source (Ni0, Ni10 and Ni50), selenium (Se) at concentrations of 0, 10, and 20 μM from a sodium selenate source (Se0, Se10 and Se20), and nano-selenium (NSe) at concentrations of 0, 2, and 5 mg/L (NSe0, NSe2 and NSe5). Means with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

ریشه باعث کاهش جذب مواد غذایی شده و کاهش رشد و وزن خشک گیاه را به دنبال دارد (Fuentes et al., 2006).

سلنیوم با افزایش کارایی فرآیندهای فتوسنتزی و شاخص سبزیگی برگ، به تولید بیشتر مواد آلی در گیاه کمک می‌کند. در برخی پژوهش‌ها نشان داده شده که گیاهانی که تحت تأثیر سلنیوم قرار می‌گیرند، افزایش قابل توجهی در سطح کلروفیل و شدت فتوسنتز دارند که مستقیماً بر وزن خشک اثر می‌گذارد (Liu et al., 2023). در گزارش Zaji et al. (2019) مشخص شد که کاربرد سلنیوم به‌ویژه در غلظت ۵ میکرومولار سبب بهبود وزن خشک شاخساره گیاه تحت تنش شوری شد. این بررسی نشان داد تیمار سلنیوم در غلظت کم نقش بسزایی در کاهش آثار مضر شوری از راه افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی، حفظ یکپارچگی غشاء، کاهش پتانسیل آب و انباشت محلول‌های سازگار داشته و در نتیجه سبب بهبود وزن خشک شاخساره گیاهان بادرشبو تحت تنش شوری شد.

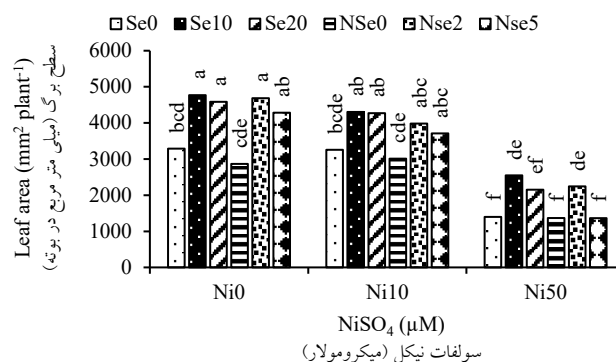
سطح برگ

با افزایش سطوح تنش نیکل، از سطح برگ کلزا به تدریج کاسته

نیکل و ۱۰ میکرومولار تنش نیکل، کاربرد نانوسلنیوم اثر بهتری بر وزن خشک ریشه نسبت به سلنیوم نشان داد.

بیشترین وزن خشک شاخساره (۳/۷۸ گرم در بوته)، از سطح بدون تنش نیکل به‌دست آمد و کم‌ترین میزان این صفت در تنش شدید نیکل یا ۵۰ میکرومولار نیکل (۱/۷۱ گرم در بوته) به‌دست آمد که نسبت به یکدیگر اختلاف ۱/۶ برابری نشان دادند. در بین سطوح سلنیوم، کاربرد ۱۰ میکرومولار سلنیوم بیشترین وزن خشک شاخساره را ایجاد نمود. کم‌ترین وزن خشک شاخساره در سطوح بدون کاربرد نانوسلنیوم حاصل شد.

کاهش وزن خشک ریشه و شاخساره به‌طور مستقیم به کاهش رشد هر دو اندام مربوط است. تنش فلزات سنگین از جمله عوامل محدودکننده رشد ریشه است که به دنبال آن فعالیت‌های رشدی گیاه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین، گسترش نامناسب سیستم ریشه‌ای باعث کاهش سطوح جذب‌کننده مواد غذایی، تغییر در ساختار غشای یاخته‌ای و کاهش جذب محتوای آب شده که در نهایت موجب کاهش رشد در سایر قسمت‌های گیاه (از جمله کاهش زیست‌توده) می‌شود. به‌طور کلی ایجاد تغییر در مورفولوژی ریشه در اثر افزایش غلظت نیکل و تغییر ساختار



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش نیکل و سلیوم بر سطح برگ کلزا. Ni_0 ، Ni_{10} و Ni_{50} به ترتیب نیکل (Ni) در سه سطح صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار از منبع سولفات نیکل، Se_0 ، Se_{10} و Se_{20} به ترتیب سلیوم (Se) در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار از منبع سلنات سدیم و NSe_0 ، NSe_2 و NSe_5 به ترتیب نانوسلیوم (NSe) در غلظت‌های صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر را بیان می‌کنند. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود تفاوت آماری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 7. Mean comparisons of interaction effect of nickel and selenium on leaf area of canola. Nickel (Ni) was used at three levels of 0, 10, and 50 μM from a nickel sulfate source (Ni_0 , Ni_{10} and Ni_{50}), selenium (Se) at concentrations of 0, 10, and 20 μM from a sodium selenate source (Se_0 , Se_{10} and Se_{20}), and nano-selenium (NSe) at concentrations of 0, 2, and 5 mg/L (NSe_0 , NSe_2 and NSe_5). Means with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

غذایی برای ساخت برگ‌های جدید کاهش یافته و در نتیجه سطح کل برگ‌ها کاهش پیدا می‌کند (Helaoui et al., 2022). سلیوم با افزایش فعالیت آنزیم‌ها و بهبود متابولیسم مواد غذایی مانند نیتروژن و پتاسیم، می‌تواند باعث تقسیم و گسترش سریع‌تر سلول‌های برگ شود. این روند به افزایش تعداد و اندازه برگ‌ها منجر شده و سطح برگ را افزایش می‌دهد. همچنین سلیوم با افزایش فعالیت فتوسنتزی از راه تقویت کارایی چرخه کالوین و حفاظت از فتوسیستم‌ها در برابر آسیب‌های اکسیداتیو، به تولید بیشتر مواد آلی و انرژی در برگ‌ها کمک می‌کند (Madaan and Mudgal, 2011).

نتیجه‌گیری

نیکل از عناصر سنگین کم‌مصرف است اما مقادیر زیاد آن سمی است و منجر به کلروز و نکروزه شدن گیاهان می‌گردد. بر اساس نتایج این پژوهش مشخص شد که با افزایش سطوح نیکل، صفات مورد بررسی به استثنای محتوای نیکل ریشه و شاخساره کاهش یافتند و کاربرد ۱۰ میکرومولار سلیوم و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلیوم توانست تا حدودی اثر تنش نیکل را کاهش دهد. با

شد اما کاربرد سلیوم و نانوسلیوم سبب افزایش سطح برگ نسبت به سطوح بدون کاربرد سلیوم و نانوسلیوم شد. در سطح بدون تنش نیکل و ۱۰ میکرومولار سلیوم، بیشترین سطح برگ حاصل شد که با سطوح بدون تنش نیکل و ۲۰ میکرومولار سلیوم و سطح بدون تنش نیکل و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلیوم در یک گروه آماری قرار گرفتند. در سطح ۵۰ میکرومولار نیکل و ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلیوم، کم‌ترین سطح برگ حاصل شد. همچنین مشاهده می‌شود که در هر سه سطح تنش نیکل، کاربرد ۱۰ میکرومولار سلیوم نسبت به سایر سطوح سلیوم بیشترین سطح برگ در کلزا را نشان داد (شکل ۷).

سطح برگ یک عامل کلیدی برای ارزیابی رشد گیاه است که نشان‌دهنده میزان برگ‌های موجود در مقایسه با سطح کلی گیاه است. نیکل می‌تواند بر فرآیندهای فتوسنتزی تأثیر منفی گذاشته و منجر به کاهش محتوای کلروفیل شود، که در نهایت باعث محدود شدن رشد برگ‌ها می‌گردد. این تأثیر منفی می‌تواند رشد گیاه را محدود نموده و سطح برگ‌ها را کاهش دهد. مشاهده شد با افزایش سطوح تنش نیکل، از شاخص کلروفیل برگ کاسته شد (شکل ۳) و پس از آن با کاهش فتوسنتز، تولید انرژی و مواد

رشد را بهبود بخشید. به‌طور کلی کاربرد ۱۰ میکرومولار سلینیوم و ۲ میلی گرم در لیتر نانوسلینیوم نسبت به سطوح دیگر، بیشترین تأثیر را در بهبود صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک داشت و اثر تعدیل‌کنندگی نیکل را نشان داد. بنابراین کاربرد سلینیوم و نانوسلینیوم در محیط رویشی گیاه کلزا، می‌تواند تا حدودی منجر به کاهش آثار سمیت فلز سنگین نیکل شود.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه یاسوج به‌خاطر حمایت مالی پژوهش حاضر قدردانی می‌نمایند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منفعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

افزایش سطوح نیکل، محتوای نیکل ریشه و شاخساره در گیاه کلزا افزایش یافت. وجود سلینیوم و نانوسلینیوم تا حدودی، سبب کاهش جذب این عنصر در سطوح تنش شدید توسط گیاه و انباشتگی آن‌ها در شاخساره شد. تنش نیکل، شاخص کلروفیل برگ و محتوای نسبی آب برگ کلزا را کاهش داد اما درصد نشت الکترولیت‌ها و محتوای قندهای محلول شاخساره را افزایش داد. سلینیوم و نانوسلینیوم، موجب افزایش شاخص کلروفیل برگ، محتوای نسبی آب برگ و محتوای قندهای محلول برگ شد. اگر چه تنش نیکل موجب کاهش طول ریشه و شاخساره، وزن خشک ریشه و شاخساره و سطح برگ شد، اما اعمال سلینیوم و نانوسلینیوم به‌ویژه در غلظت‌های ۱۰ میکرومولار سلینیوم و ۲ میلی گرم در لیتر نانوسلینیوم، سبب بهبود صفات مورد بررسی گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد سلینیوم و نانوسلینیوم برای مقابله با تنش می‌تواند با بهبود صفات بیوشیمیایی مانند محتوای نسبی آب برگ و محتوای قندهای محلول برگ، شرایط

References

منابع مورد استفاده

1. Aghili, F., Khoshgoftarmanesh, A.H., Afyuni, M., Schulin, R., 2009. Health risks of heavy metals through consumption of greenhouse vegetables grown in central Iran. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 15(5), 999–1015. <https://doi.org/10.1080/10807030903153337>.
2. Ali, M.A., Ashraf, M., Athar, H.R., 2009. Influence of nickel stress on growth and some important physiological/biochemical attributes in some diverse canola (*Brassica napus* L.) cultivars. *J. Hazard. Mater.* 172, 964–969. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.077>.
3. Amjad, M., Raza, H., Murtaza, B., Abbas, G., Imran, M., Shahid, M., Naeem, M. A., Zakir, A., Iqbal, M.M., 2020. Nickel toxicity induced changes in nutrient dynamics and antioxidant profiling in two maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Plants* 9(1), 5. <https://doi.org/10.3390/plants9010005>.
4. Aqeel, M., Khalid, N., Tufail, A., Ahmad, R.Z., Akhter, M.S., Luqman, M., Javed, M.T., Irshad, M.K., Alamri, S., Hashem, M., Noman, A., 2021. Elucidating the distinct interactive impact of cadmium and nickel on growth, photosynthesis, metal-homeostasis, and yield responses of mung bean (*Vigna radiata* L.) varieties. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 27376–27390. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12579-5>.
5. Arshad, M.N., Ahmad, A., Wajid, A., Rasul, F., Khaliq, T., Awais, M., Fatima, H.N., 2016. Quantification of growth, yield and radiation use efficiency of sunflower at different irrigation and nitrogen levels under semi-arid conditions of Faisalabad. *J. Agric. Res.* 54(4), 647–656.
6. Chapin, M.F., Kennedy, G.F., 1994. *Carbohydrate Analysis: A Practical Approach*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199634491.001.0001>.
7. Chen, C., Huang, D., Liu, J., 2009. Functions and toxicity of nickel in plants: recent advances and future prospects. *Clean-Soil Air Water* 37(4–5), 304–313. <https://doi.org/10.1002/clen.200800199>.
8. Clemens, S., 2006. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie* 88(11), 1707–1719. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.07.003>.
9. Davoodi, M., Esmaeilpour, B., Fatemi, H., 2018. Effect of silicon nutrition on alleviation the detrimental effects of nickel stress in basil (*Ocimum basilicum* L.). *J. Plant Proc. Func.* 7(24), 25–38. <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-672-fa.html>. (In Persian with English abstract).
10. Djanaguiraman, M., Belliraj, N., Bossmann, S., Prasad, P.V., 2018. High temperature stress alleviation by selenium nanoparticle treatment in grain sorghum. *ACS Omega*. 3(3), 2479–2491. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b01934>.

11. Dubey, D., Pandey, A., 2011. Effect of nickel (Ni) on chlorophyll, lipid peroxidation and antioxidant enzymes activities in black gram (*Vigna mungo* L.) leaves. Int. J. Sci. Nat. 2, 395–401.
12. Feng, R., Zhao, P., Zhu, Y., Yang, J., Wei, X., Yang, L., Liu, H., Rensing, C., Ding, Y., 2021. Application of inorganic selenium to reduce accumulation and toxicity of heavy metals (metalloids) in plants: The main mechanisms, concerns, and risks. Sci. Total Environ. 771, 144776. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144776>.
13. Fuentes, D., Disante, K.B., Valdecantos, A., Cortinaand, J., Vallejo, V.R., 2006. Response of *Pinus halepensis* Mill. seedlings to biosolids enriched with Cu, Ni and Zn in three mediterranean forest soils. Environ. Pollut. 145(1), 316–323. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.005>.
14. El-Ramady, H.R., Domokos-Szabolcsy, É., Abdalla, N.A., Alshaal, T.A., Shalaby, T.A., Sztrik, A., Fári, M., 2014. Selenium and nano-selenium in agroecosystems. Environ. Chem. Lett. 12, 495–510. <https://doi.org/10.1007/s10311-014-0476-0>.
15. Gajewska, E., Skłodowska, M., Słaba, M., Mazur, J., 2006. Effect of nickel on antioxidative enzyme activities, proline and chlorophyll contents in wheat shoots. Biol. Plant. 50, 653–659. <http://dx.doi.org/10.1007/s10535-006-0102-5>.
16. González, C. I., Maine, M. A., Cazenave, J., Hadad, H.R., Benavides, M.P., 2015. Ni accumulation and its effects on physiological and biochemical parameters of *Eichhornia crassipes*. Environ. Exp. Bot. 117, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.04.006>.
17. Gopal, R., Nautiyal, N., 2012. Growth, antioxidant enzymes activities, and proline accumulation in mustard due to nickel. Int. J. Veg. Sci. 18(3), 223–234. <https://doi.org/10.1080/19315260.2011.619641>.
18. Gubrelay, U., Agnihotri, R.K., Singh, G., Kaur, R., Sharma, R., 2013. Effect of heavy metal Cd on some physiological and biochemical parameters of Barley (*Hordeum vulgare* L.). Intl. J. Agri. Crop Sci. 5(22), 2743–2751.
19. Hasanuzzaman, M., Nahar, K., García-Caparrós, P., Parvin, K., Zulfikar, F., Ahmed, N., Fujita, M., 2022. Selenium supplementation and crop plant tolerance to metal/metalloid toxicity. Front. Plant Sci. 12, 792770. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.792770>.
20. Heidari Dehno, A., Mohtadi, A., 2018. The effect of different iron concentrations on lead accumulation in hydroponically grown *Matthiola flava* Boiss. Ecol. Res. 33(4), 757–765. <https://doi.org/10.1007/s11284-018-1558-4>.
21. Helaoui, S., Hattab, S., Mkhinini, M., Boughattas, I., Majdoub A., Banni, M., 2022. The effect of nickel exposure on oxidative stress of *Vicia faba* plants. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 108(6), 1074–1080. <https://doi.org/10.1007/s00128-022-03535-1>.
22. Hosnedlova, B., Kepinska, M., Skalickova, S., Fernandez, C., Ruttkay-Nedecky, B., Peng, Q., Baron, M., Melcova, M., Opatrilova, R., Zidkova, J., Bjørklund, G., Sochor, J., Kizek, R., 2018. Nano-selenium and its nanomedicine applications: a critical review. Int. J. Nanomed. 13, 2107–2128. <https://doi.org/10.2147/IJN.S157541>.
23. Ishaq, H., Waraich, E.A., Hussain, S., Ahmad, M., Ahmad, Z., Saifullah, Z., 2023. Silicon-mediated growth, physiological, biochemical and root alterations to confer drought and nickel stress tolerance in maize (*Zea mays* L.). Silicon 15(15), 6579–6589. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02536-x>.
24. Izadi, F., Ghabooli, M., Rostami, M., Movahedi, Z., 2021. Evaluation of fungus *Piriformospora indica* effects on some morphophysiological traits of radish under heavy metal stress. Agric. Sci. Sustain. Prod. 31(3), 117–129. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.13694>. (In Persian with English abstract)
25. Khan, Z., Thounaojam, T.C., Chowdhury, D., Upadhyaya, H., 2023. The role of selenium and nano selenium on physiological responses in plant: a review. Plant Growth Regul. 100, 409–433. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-00988-0>.
26. Liu, H., Xiao, C., Qiu, T., Deng, J., Cheng, H., Cong, X., Cheng, S., Rao, S., Zhang, Y., 2023. Selenium regulates antioxidant, photosynthesis, and cell permeability in plants under various abiotic stresses: a review. Plants 12(1), 44. <https://doi.org/10.3390/plants12010044>.
27. Madaan, N., Mudgal, V., 2011. Phytotoxic effect of selenium on the accessions of wheat and safflower. Res. J. Environ. Sci. 5, 82–87. <https://doi.org/10.3923/rjes.2011.82.87>.
28. Marschner, H., 2012. Mineral Nutrition of Higher Plants, Third ed. Academic Press, New York.
29. McKay, H.M., 1992. Electrolyte leakage from fine roots of conifer seedlings: a rapid index of plant vitality following cold storage. Can. J. For. Res. 22, 1371–1377. <https://doi.org/10.1139/x92-182>.
30. Mishra, A., Choudhuri, M.A., 1999. Effects of salicylic acid on heavy metal-induced membrane deterioration mediated by lipoxygenase in rice. Biol. Plant. 42, 409–415. <https://doi.org/10.1023/A:1002469303670>.
31. Mohammadidust, S., Mohtadi, A., Amiri Fahlyani, R., 2024. Silicon-mediated mitigation of manganese stress in linseed (*Linum usitatissimum* L.): a physiological and morphological exploration. J. Soil Plant Interact. 15(1), 51–69. <https://doi.org/10.47176/jspi.15.1.21181>. (In Persian with English abstract)
32. Monica, R.C., Cremonini, R., 2009. Nanoparticles and higher plants. Caryologia 62(2), 161–165. <http://dx.doi.org/10.1080/00087114.2004.10589681>.
33. Nawaz, F., Ashraf, M.Y., Ahmad, R., Waraich, E.A., Shabbir, R.N., 2014. Selenium (Se) regulates seedling growth in wheat under drought stress. Adv. Chem. 14(1), 143567. <https://doi.org/10.1155/2014/143567>.

34. Potters, G., Pasternak, T.P., Guisez, Y., Palme, K.J., Jansen, M.A.K., 2007. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? Trends Plant Sci. 12, 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2007.01.004>.
35. Raboanatahiry, N., Li, H., Yu, L., Li, M., 2021. Rapeseed (*Brassica napus*): Processing, utilization, and genetic improvement. Agronomy 11(9), 1776. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091776>.
36. Rang Zan, N., Golsoltani, M., Lajmiorak Nejati, M., 2020. Chemical fractionation of iron and manganese in soil adjacent to Khuzestan Steel Company. Iranian J. Soil Res. 33(4), 541–557. doi: 10.22092/ijsr.2019.126876.459. (In Persian with English abstract).
37. Ríos, J.J., Blasco, B., Cervilla, L.M., Rosales, M.A., Sanchez-Rodriguez, E., Romero, L., Ruiz, J.M., 2009. Production and detoxification of H₂O₂ in lettuce plants exposed to selenium. Ann. Appl. Biol. 154, 107–116. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2008.00276.x>.
38. Rosca, M., Cozma, P., Minut, M., Hlihor, R., Bețianu, C., Diaconu, M., Gavrilăscu, M., 2021. New evidence of model crop *Brassica napus* L. in soil clean-up: comparison of tolerance and accumulation of lead and cadmium. Plants 10(10), 2051. <https://doi.org/10.3390/plants10102051>.
39. Rucińska-Sobkowiak, R., 2016. Water relations in plants subjected to heavy metal stresses. Acta Physiol. Plant. 38, 257. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2277-5>.
40. Salwa, M.A., 2012. Effects of low temperature and selenium application on growth and the physiological changes in sorghum seedlings. J. Stress Physiol. Biochem. 8, 268–286.
41. Samynathan, R., Venkidasamy, B., Ramya, K., Muthuramalingam, P., Shin, H., Kumari, P.S., Thangavel, S., Sivanesan, I., 2023. A recent update on the impact of nano-selenium on plant growth, metabolism, and stress tolerance. Plants 12(4), 853. <https://doi.org/10.3390/plants12040853>.
42. Sardari, M., Rezayian, M., Niknam, V., 2022. Comparative study for the effect of selenium and nano-selenium on wheat plants grown under drought stress. Russ. J. Plant Physiol. 69, 127. <https://doi.org/10.1134/S102144372206022X>.
43. Sayadmanesh, S.M., Ghajar Sepanlu, M., Bahmanyar, M.A., 2015. An investigation of heavy metals in canola and soil of farms irrigated with wastewater of the industrial city of Amol. J. Water Res. Agric. 29(2), 141–155. doi: 10.22092/jwra.2015.101655. (In Persian with English abstract)
44. Schiavon, M., Lima, L.W., Jiang, Y., Hawkesford, M.J., 2017. Effects of selenium on plant metabolism and implications for crops and consumers. In: Pilon-Smits, E., Winkel, L., Lin, Z.Q. (Eds.), Selenium in Plants. Plant Ecophysiology, vol 11. Springer, Cham. pp. 257–275. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56249-0_15.
45. Scott, N., Chen, H., 2013. Nanoscale science and engineering for agriculture and systems. Ind. Biotechnol. 9(1), 17–18. <http://dx.doi.org/10.1089/ind.2013.1555>.
46. Shaker Koochi, S., Nasrollezhadeh, P., Ghasemi Golazani, K., Najafi, N.A., 2021. Morpho-physiological changes of rotated barley and faba bean plants in response to nickel toxicity and chemical and biological fertilization. Agric. Sci. Sustain. Prod. 31(2), 199–215. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.13158>. (In Persian with English abstract).
47. Tagharobiyani, M., Poozesh, V., Khorshidi, M., 2016. Influence of nickel on the indices of growth and content of photosynthetic pigments, protein, soluble sugar, proline and nickel accumulation in coriander. Appl. Res. Plant Ecophysiol. 2(2), 59–74. <http://arpe.gonbad.ac.ir/article-1-151-en.html>. (In Persian with English abstract)
48. Titov, A.F., Kaznina, N.M., Karapetyan, T.A., Dorshakova, N.V., Tarasova, V.N., 2022. Role of selenium in plants, animals, and humans. Biol. Bull. Rev. 12, 189–200. <https://doi.org/10.1134/S2079086422020104>.
49. Yadav, S.K., 2010. Heavy metals toxicity in plants: an overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. S. Afr. J. Bot. 76(2), 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2009.10.007>.
50. Zaji, B., Khavarinejad, R., Saadatmand, S., Iranbakhsh, A., 2019. Investigation of some morphological and physiological responses of Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.) to selenium under salt stress. J. Plant Environ. Physiol. 14(56), 13–27. (In Persian with English abstract)
51. Zhuang, P., McBride, M.B., Xia, H., Li, N., Li, Z., 2009. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China. Sci. Total Environ. 407, 1551–1561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.061>.