Differential Selenium Application Modulates Physio-Biochemical and Growth Parameters in Canola (*Brassica napus* L.) Under Nickel-Induced Stress

Touraj Dadpour Kariyak[1], Ahmad Mohtadi[1*] and Mohsen Movahhedi Dehnavi[2]

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

Abstract

In the present study, the effects of varying levels of nickel and selenium on certain growth and biochemical characteristics of canola were investigated under hydroponic conditions using a factorial arrangement in a completely randomized design with four replications. The first factor involved applying nickel to the nutrient solution at three levels (0, 10, and 50 µM) using nickel sulfate as the source. The second factor consisted 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). The results indicated that exposure to 10 µM nickel did not cause any significant changes in the measured indicators compared to the control group. However, treatment with 50 µM nickel led to an increase in nickel accumulation in both the roots and shoots, while it resulted in a reduction in the other traits examined. Alongside elevated nickel levels, root potassium content also rose. The application of 10 µM selenium and 2 ppm nano selenium generally moderated nickel toxicity effects. These treatments enhanced root and shoot dry weight compared to the control group by increasing soluble sugar levels in leaves, boosting potassium retention in roots, reducing electrolyte leakage percentage, and elevating chlorophyll content. 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: Shirmardi, M., Hayatzadeh, M., Ghaneei-Bafghi, M.J., Hemmat, N., Fooladi Doghzloo, M., 2025. Soil fertility assessment in saffron (*Crocus sativus* L.) cultivated fields (case study: Bahabad city, Yazd province). J. Soil Plant Interact. 16(2), 1–17 (In Persian). https://doi.org/10.47176/jspi.16.2.21182

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]

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

تورج دادپور کریک[1]، احمد مهتدی[1*] و محسن موحدی دهنوی[2]

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

نسخه پیش از انتشار

چکیده

در تحقیق حاضر اثر سطوح مختلف نیکل و سلنیوم بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی کلزا در شرایط کشت بدون خاک به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار مورد مطالعه قرار گرفت. عامل اول شامل کاربرد نیکل در محلول غذایی در ۳ 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) بودند. نتایج نشان داد که اثر سطح ۱۰ میکرو مولار نیکل بر شاخص‌های مورد بررسی، نسبت به سطح شاهد، اختلاف معنی‌داری نداشت. سطح ۵۰ میکرو مولار نیکل، محتوای نیکل ریشه و شاخساره را افزایش و سایر صفات مورد مطالعه 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 اثرات ناشی از سمیت نیکل گردید. 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. 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، قندهای محلول، نانوسلنیوم.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]

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 علّت توانایی تولید سطوح بالایی از گلوتاتیون و فیتوکلاتین و ظرفیت انباشت بالا برای ذخیره یون‌ها ازجمله گیاهان مقاوم نسبت به سمیت فلزات سنگین محسوب می‌شوند (Rosca et al., 2021). امروزه افزایش آلاینده‌های محیطی به‌ویژه فلزات سنگین یکی از عمده‌ترین معضلات زیست محیطی 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 موجودات زنده به شمار می‌آید (Yadav, 2010). همچنین افزایش نیاز آبی جهت 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 به‌شمار می‌روند (Rang Zan et al., 2020; Mohammadidust et al., 2024). برخی از فلزات سنگین از قبیل مس، روی، آهن، منگنز، مولیبدن و نیکل برای رشد گیاهان ضروری هستند اما غلظت بالای آن‌ها در گیاهان موجب تنش اکسیداتیو می‌شود (Zhuang et al., 2009). نیکل، فلز ضروری برای گیاهان محسوب می‌شود ولی غلظت بالای 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 بر گیاهان می‌باشد (Ali et al., 2009).

طی پژوهشی روی گیاه گشنیز، Tagharobiyan 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 میکرو مولار رخ داده بود. 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. محققان گزارش کردند که کاهش درصد آب برگ تحت غلظت‌های بالای نیکل می‌تواند 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). در تحقیق Shaker Koohi et al. (2021) بیشترین مقدار نشت الکترولیت و کم‌ترین وزن خشک گیاه جو در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک حاصل شد.

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

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]

گیاهان در برابر تنش‌های اکسیداتیو ایجاد کنند (Samynathan et al., 2023). همچنین نانوذرات سلنیوم به دلیل اندازه کوچک (۲۰ تا۱۰۰ نانومتر) و بار سطحی مثبت، نفوذپذیری بالاتری از طریق روزنه‌ها و کوتیکول برگ‌ها دارند (Khan et al., 2023). نانوسلنیوم به دلیل دسترسی زیستی زیاد و فعالیت زیستی مطلوب نظر محققان را به خود جلب نموده و بکارگیری آن باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و گلوتاتیون پراکسیداز در گیاهان می‌شود و این امر منجر به بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و افزایش رشد و عملکرد می‌شود (El-Ramady et al., 2014; Hosnedlova et al., 2018; Khan et al., 2023). نانوذرات به علت اندازه بسیار کوچک ذرات‌شان 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 از قبیل سن گیاه، نوع نانوذره و اندازه نانوذره بر میزان اثرگذاری نانوذره بر گیاهان دخیل هستند (Djanaguiraman et al., 2018). اگرچه تحقیقات متعددی به بررسی اثر سلنیوم در کاهش تنش ناشی از فلزات سنگین پرداخته‌اند، اما بیشتر این مطالعات بر فلزاتی نظیر 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 نانو سلنیوم در این زمینه، به‌ویژه در گیاهان زراعی مهمی مانند کلزا که از اهمیت اقتصادی بالایی برخوردارند، انجام نشده است. با توجه به کاربردهای گسترده کلزا از جمله تولید روغن خوراکی، حفظ سلامت این محصول از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا این پژوهش 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 ۱۴۰۳در آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهی دانشکده علوم پایه دانشگاه یاسوج به‌صورت 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 میکرو مولار) 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 میکرو مولار) از منبع سلنات سدیم و نانو سلنیوم بصورت محلول‌پاشی در سه سطح (صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر) بود. نانوسلنیوم با غلظت ۱۰۰۰ پی‌پی‌ام (میلی‌گرم 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 براساس نتایج تحقیقات قبلی 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 و ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر با پرلیت پر شدند. بذرهای 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. زمانیکه 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 به‌مدت چهار هفته اعمال شد. سلنیوم (سلنات سدیم Na_2SeO_4) به‌محلول غذایی هوگلند اضافه شد و نانوسلنیوم به‌صورت محلول‌پاشی اعمال شد. محلول‌پاشی نانوسلنیوم طی دو مرتبه، ابتدا همزمان با تنش نیکل و تکرار آن سه هفته بعد از محلول‌پاشی اول صورت گرفت. محلول‌پاشی نانو سلنیوم به همراه توئین ۲۰ با غلظت یک درصد اعمال شد. pH محلول غذایی با محلول دو میلی‌مولار بافر MES (2-(N-) (morpholino) ethane sulphonic acid) و با استفاده از KOH در محدوده pH برابر ۵/۵ ثابت نگه داشته شد. گیاهان در اتاق کشت با دمای۲۰ درجه سلسیوس در روز و ۱۵ درجه سلسیوس در شب و تناوب نوری ۱۶ساعت نور و ۸ ساعت تاریکی نگه‌داری

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]

شدند. پس از چهار هفته اعمال تنش نیکل و کاربرد سلنیوم و محلول‌پاشی نانوسلنیوم از هر گلدان پنج بوته انتخاب شد.

اندازه‌گیری محتوای نیکل و پتاسیم در ریشه و شاخساره

برای اندازه‌گیری محتوای نیکل ریشه و شاخساره ابتدا ریشه گیاهان برداشت شده به‌مدت ۱۵ دقیقه در محلول ۲۰ میلی‌مولار Na_2EDTA قرار داده شدند و سپس با آب مقطر بطور کامل شسته شدند. شاخساره و ریشه هر گیاه، جدا گردید. نمونه‌های برداشت شده در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۴۸ ساعت در آون خشک شدند. سپس یک گرم از نمونه خشک شده توزین و ۳ میلی‌لیتر اسیدنیتریک به آن افزوده و ۱۲ ساعت در دمای محیط قرار داده شد. پس از آن به‌مدت یک ساعت در حمام آب گرم قرار داده و پس از سرد شدن یک میلی‌لیتر آب اکسیژنه به آن افزوده شد و مجدد به‌مدت یک ساعت درون حمام آب گرم گذاشته و در نهایت حجم نمونه با آب مقطر به حجم ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس مقدار نیکل موجود 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 نیم گرم نمونه خشک شده پودر شد و سپس به مدت ۱۲ ساعت در ۳ میلی‌لیتر اسیدنیتریک قرار داده شد. پس از آن برای یک ساعت در حمام آب گرم قرارداده شد. سپس یک میلی‌لیتر آب اکسیژنه به آن افزوده شد و مجدد درون حمام آب گرم برای یک ساعت گذاشته شد و با آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. محتوای پتاسیم ریشه و شاخساره با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر تعیین شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی

جهت اندازه‌گیری شاخص سبزینگی (SPAD)، از هر بوته ۵ برگ انتخاب و میزان سبزینگی با دستگاه SPAD-502 ساخت 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 تقریبا هم‌اندازه از برگ بوته‌های انتخابی جدا شد و بلافاصله با ترازو وزن گردید (FW)، پس از آن برای تعیین وزن آماس یافته‌ی برگ، نمونه‌ها در ظروف پتری سربسته و حاوی آب مقطر در محلی 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 در دمای ۷۵ درجه سلسیوس قرار داده شدند و سپس وزن شدند (DW). در نهایت مقدار محتوای نسبی آب برگ‌ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

محتوای نسبی آب برگ (درصد) =

$$((FW - DW) / (TW - DW)) \times 100$$

که در این رابطه FW: وزن تر برگ؛ DW: وزن خشک برگ؛ TW: وزن اشباع برگ می‌باشند.

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

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

که در این رابطه EC_1: هدایت الکتریکی اولیه و EC_2: هدایت الکتریکی ثانویه می‌باشند.

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، به خوبی پودر شده و درون فالکون ریخته شد و سپس ۲/۵ میلی‌لیتر اتانول ۷۰ درصد به آن

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]

اضافه شد. نمونه¬ها به مدت هفت روز در تاریکی نگهداری شدند، سپس یک میلی¬لیتر از روشناور به درون فالکون جدید انتقال داده شد و با آب مقطر به حجم دو میلی¬لیتر رسانده شد. مقدار یک میلی¬لیتر از فنل پنج درصد به آن اضافه و به خوبی هم زده شد. سپس، مقدار پنج میلی¬لیتر از اسید سولفوریک غلیظ به آن اضافه شد. نمونه¬ها به مدت ۳۰ دقیقه درون یخچال نگه¬داری شدند. جذب نمونه¬ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل philler scientific SU-6/00) در طول موج ۴۸۵ نانومتر اندازه¬گیری شد. این سنجش به روش فنول 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 بعد از خارج کردن گیاه از گلدان و تمیز کردن آن، به وسیله‌ی قیچی قسمت اصلی ریشه از شاخساره جدا گردیده و به وسیله‌ی خط‌کش طول گیاهان اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک، پس از خالی کردن گلدان‌ها و شست و شوی گیاهان، ریشه و شاخساره گیاه از هم جدا شدند و نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و توسط ترازوی دیجیتالی مدل Te313s توزین شدند. در نهایت جمع داده‌ها به‌صورت میانگین برای هر بوته محاسبه گردید. جهت تعیین سطح برگ در هر گلدان یک بوته انتخاب و برگ‌های آن شمارش شده و وزن تر آن اندازه‌گیری گردید و سپس برگ‌ها شماره‌گذاری 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 SASو Excel انجام گرفت. مقایسه میانگین داده‌ها بر اساس آزمون LSD در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد برهم‌کنش تنش نیکل و سلنیوم در سطح احتمال خطای 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 برهم‌کنش تنش نیکل و سلنیوم 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 گردید اما بر محتوای نسبی آب برگ و وزن خشک شاخساره تنها اثرات اصلی تنش نیکل و سلنیوم معنی‌دار گردید (جدول ۲).

محتوای نیکل ریشه

با افزایش سطوح تنش نیکل، میزان نیکل ریشه کلزا به‌تدریج افزایش یافت. در سطح ۱۰ میکرو مولار نیکل تنها با کاربرد ۱۰ میکرو مولار سلنیوم محتوای نیکل ریشه کاهش یافت و در سطح ۵۰ میکرومولار نیز سطوح ۱۰ و ۲۰ میکرومولار سلنیوم و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم 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 میکرو گرم بر گرم وزن خشک، در سطح کاربرد ۵۰ میکرو مولار نیکل و بدون کاربرد نانوسلنیوم بود که با سایر سطوح سلنیوم و نانو سلنیوم اختلاف معنی‌داری داشت. در شرایط عدم کاربرد نیکل هیچ‌گونه تجمع نیکل در ریشه کلزا مشاهده نگردید. همچنین در شرایط کاربرد نیکل کم‌ترین محتوای نیکل ریشه (۶۳/۵۰ میکرو گرم بر گرم وزن خشک) در سطح ۱۰ میکرو مولار نیکل به همراه ۱۰ میکرو مولار سلنیوم حاصل شد (شکل ۱-الف).

محتوای نیکل شاخساره

با افزایش سطوح تنش نیکل به تدریج محتوای نیکل شاخساره افزایش یافت و کاربرد سلنیوم و نانو سلنیوم در سطح ۵۰ میکرو

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]

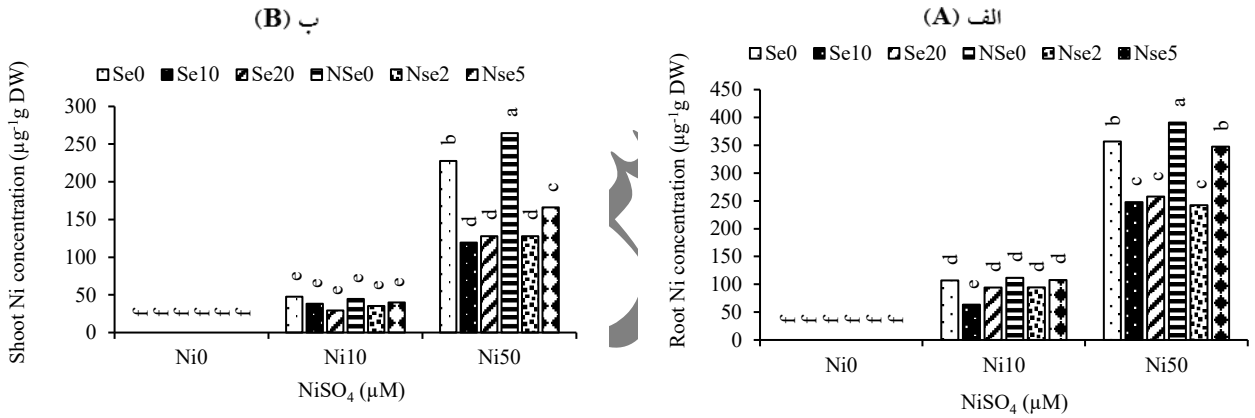
جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس اثر نیکل و سلنیوم بر محتوای نیکل و پتاسیم ریشه و شاخساره و نسبت نیکل ریشه به شاخساره گیاه کلزا

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

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	نیکل ریشه Root Ni	نیکل شاخساره Shoot Ni	پتاسیم ریشه Root K	پتاسیم شاخساره Shoot K
نیکل Ni	2	592214**	229909**	1272**	78.37**
سلنیوم Se	5	7565**	4935**	214.76**	54.30**
نیکل × سلنیوم Ni × Se	10	5363**	4279**	234.53**	154.58**
خطاEror	54	175.48	208.84	19.74	2.78
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	9.84	9.84	12.33	4.44

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 برهم‌کنش نیکل و سلنیوم بر محتوای نیکل ریشه (الف) و محتوای نیکل شاخساره (ب) در کلزا. نیکل (Ni) در سه سطح صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار از منبع سولفات نیکل و سلنیوم (Se) در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار از منبع سلنات سدیم و نانوسلنیوم (NSe) در غلظت‌های صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر بکار گرفته شد. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

Fig. 1. Mean comparisons of interaction effect of nickel and selenium 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, selenium (Se) at concentrations of 0, 10, and 20 µM from a sodium selenate source, and nanoselenium (NSe) at concentrations of 0, 2, and 5 mg/L. Means with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

مولار نیکل در مقایسه با شاهد موجب کاهش محتوای نیکل شاخساره شد اما در سطح ۱۰ میکرو مولار نیکل اختلاف معنی‌داری بین سطوح سلنیوم حاصل نشد (شکل ۱–ب). با کاربرد ۵۰ میکرو مولار نیکل و عدم کاربرد نانوسلنیوم بیشترین محتوای نیکل شاخساره (۲۶۴ میکرو گرم بر گرم وزن خشک) حاصل شد که با سایر سطوح آزمایشی اختلاف معنی‌داری داشت. در شرایط کاربرد نیکل کم‌ترین محتوای نیکل شاخساره (۲۹/۵۰ میکرو گرم بر گرم وزن خشک) در سطح ۱۰ میکرو مولار نیکل به همراه ۱۰ میکرو مولار سلنیوم حاصل شد. در سطح ۱۰ میکرو مولار نیکل، بین اثر سطوح مختلف سلنیوم و نانوسلنیوم بر

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثر نیکل و سلنیوم بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک و شاخص‌های رشد گیاه کلزا

Table 2. Analysis of variance of nickel (Ni) and selenium (Se) effects on some physiological characteristics and growth indices of canola

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	شاخص سبزینگی Chlorophyll index	درصد نشت الکترولیت‌های Percentage of electrolyte leakage	محتوای نسبی آب برگ Relative water content	محتوای قندهای محلول Soluble sugars	طول ریشه Root length	طول شاخساره Shoot length	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن خشک شاخساره Shoot dry weight	سطح برگ Leaf area
نیکل Ni	2	2751**	1972**	77.20*	0.16**	1444**	86.09**	1.81**	28.72**	29746980**
سلنیوم Se	5	33.57**	315**	146**	2.79**	35.17**	3.15 ns	0.37**	1.65**	1514974*
نیکل × سلنیوم Ni × Se	10	37.96**	25.20**	17.94ns	0.46**	25.94**	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، * و ** به ترتیب نبود اثر معنی‌دار، معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهد.

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

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]

محتوای نیکل شاخساره، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. در سطح ۵۰ میکرو مولار نیکل نیز کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم محتوای نیکل شاخساره را نسبت به عدم کاربرد آن‌ها کاهش داد و بین سطوح ۱۰ و ۲۰ میکرو مولار سلنیوم و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم اختلاف معنی‌داری حاصل نشد و همچنین کاربرد ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم نسبت به ۵ میلی‌گرم در لیتر از محتوای نیکل کم‌تری برخوردار بود (شکل ۱–ب).

در تحقیق حاضر میزان انباشتگی نیکل در ریشه بیشتر از شاخساره بود. در غلظت‌های بالای نیکل، این عنصر ممکن است در ریشه‌ها تجمع یابد. این امر به عنوان یک سازوکار دفاعی عمل می‌کند تا گیاه از انتقال بیش از حد نیکل به اندام‌های هوایی جلوگیری کند. نیکل در غلظت‌های پایین 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 زرد شدن (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 می‌باشد. 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 می‌باشد (Marschner, 2012; Sayadmanesh et al., 2015). آستانه سمیت نیکل در گیاه کلزا به طور دقیق در منابع علمی به صورت عددی مشخص نشده است، اما بر اساس مطالعات موجود، تجمع نیکل در برگ‌های کلزا از حد مجاز بیشتر شده و می‌تواند اثرات سمی داشته باشد. در یک مطالعه که اثر استفاده از پساب صنعتی بر تجمع عناصر سنگین از جمله نیکل در خاک و گیاه کلزا را بررسی کرده است، مشاهده شده که تجمع نیکل در گیاه کلزا تحت شرایط آبیاری با پساب صنعتی بین ۱۶ تا ۱۳۶ درصد افزایش یافته است و این تجمع در برگ‌های کلزا از حد مجاز بیشتر بوده است (Sayadmanesh et al., 2015). بنابراین تجمع نیکل بالاتر 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، به ویژه در مناطقی که پساب‌های صنعتی به عنوان منبع آبیاری استفاده می‌شوند.

در پژوهشی روی گیاه گشنیز Tagharobiyan et al. (2016) مشاهده نمودند بیشترین انباشتگی فلز نیکل در ریشه گیاه گشنیز رخ داده بود. به بیان آن‌ها، دیواره‌های سلولی ریشه حاوی پلی‌ساکاریدها و ترکیباتی مانند پکتین هستند که می‌توانند یون‌های نیکل را به خود جذب کرده و از انتقال آن به بخش‌های داخلی گیاه جلوگیری کنند. پژوهش Davoodi et al. (2018) نشان داد بیشترین مقدار نیکل در شاخساره گیاه ریحان (۵/۵۲ پی‌پی‌ام) در غلظت ۱۵۰ پی‌پی‌ام 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 به صورت 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 سلنیوم می‌تواند جذب نیکل را کاهش دهد. این اثر ممکن است به‌دلیل رقابت بین این دو عنصر برای جذب از طریق ریشه باشد. سلنیوم ممکن است در جذب نیکل اختلال ایجاد کند و باعث کاهش انتقال نیکل به ریشه‌ها و اندام‌های هوایی شود (Hasanuzzaman et al., 2022). با مطالعه روی گیاه گندم Gajewska et al. (2006) مشاهده نمودند سلنیوم به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان طبیعی در گیاهان عمل می‌کند و می‌تواند در برابر سمیت نیکل از گیاه محافظت کند. سلنیوم از طریق تشکیل کمپلکس‌های غیرآلی با فلزات سنگین و خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن سمیت این عناصر را کاهش می‌دهد. همچنین در برخی موارد، سلنیوم می‌تواند با تشکیل ترکیبات پایدار با نیکل، از تجمع بیش از حد نیکل در ریشه‌ها و شاخساره جلوگیری کند. به عبارتی، سلنیوم 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 میکرو مولار سلنیوم و پس از آن ۲ میلی‌گرم در لیتر

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]

نانوسلنیوم، موجب کاهش نیکل در ریشه و شاخساره گردید. اما غلظت‌های بالاتر سلنیوم و نانوسلنیوم نتوانستند اثر کاهشی بر محتوای نیکل ریشه و شاخساره نسبت به سطوح ۱۰ میکرو مولار سلنیوم و پس از آن ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم داشته باشند.

محتوای پتاسیم ریشه

با افزایش سطوح تنش نیکل، به‌تدریج محتوای پتاسیم ریشه گیاه کلزا به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بیشترین محتوای پتاسیم ریشه، در سطح تنش ۵۰ میکرو مولار نیکل و کاربرد ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم با میانگین ۵۸/۲۱ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک حاصل شد که با سطح کاربرد ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم اختلاف معنی‌داری نشان نداد و کم‌ترین محتوای پتاسیم ریشه نیز، در شرایط عدم کاربرد نیکل و عدم کاربرد نانوسلنیوم با میانگین ۲۵/۵۷ میلی‌گرم 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 میلی‌گرم بر گرم وزن خشک، در سطح عدم کاربرد نیکل و کاربرد ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و کم‌ترین آن با میانگین ۲۳/۶۸ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک، از تیمار عدم کاربرد نیکل و عدم کاربرد سلنیوم حاصل شد و 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 تعامل آن با سامانه‌های انتقال یونی گیاه مربوط می‌شود. نیکل می‌تواند موجب ایجاد اختلال در تعادل یونی گیاه شود و به ویژه با تغییر در عملکرد پمپ‌های یونی و کانال‌های غشایی، جذب پتاسیم را تحت تأثیر قرار دهد. تنش نیکل باعث افزایش تولید گونه‌های 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). مشاهدات Aqeel et al. (2021) نشان داد با افزایش سطوح نیکل و کادمیوم از میزان پتاسیم در شاخساره و ریشه گیاه ماش کاسته شد. در تحقیق حاضر مشاهده شد با افزایش سطوح تنش نیکل به میزان پتاسیم ریشه افزوده شد. افزایش پتاسیم در ریشه گیاه 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 اثرات مضر نیکل کمک کرده و باعث افزایش انباشت پتاسیم شده است.

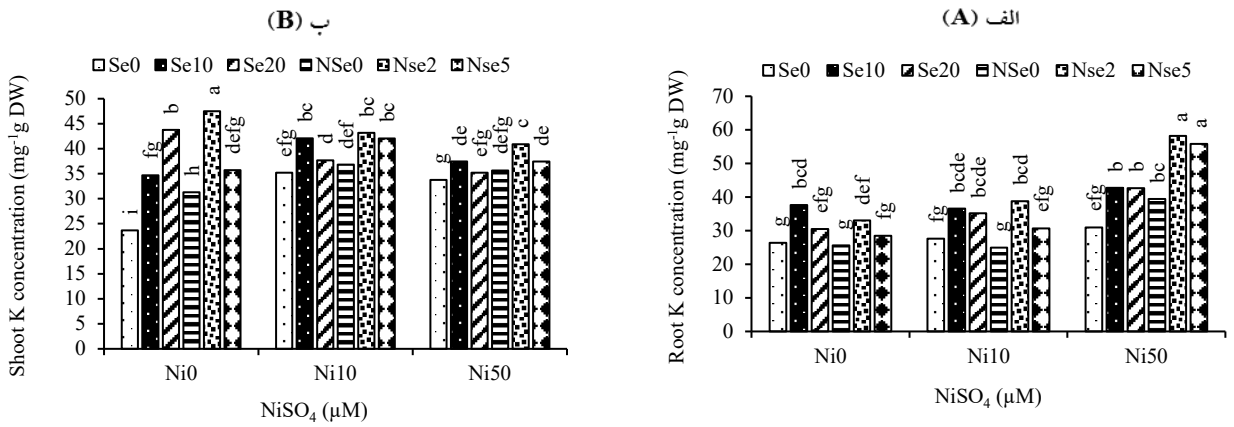
سلنیوم با کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تنش‌های محیطی، به حفظ یکپارچگی و عملکرد غشاهای سلولی کمک می‌کند. این موضوع از تخریب کانال‌ها و پمپ‌های یونی جلوگیری کرده و جذب پتاسیم را افزایش می‌دهد. در نتیجه، گیاه می‌تواند تعادل یونی خود را بهتر حفظ کرده و پتاسیم بیشتری جذب کند (Madaan and Mudgal, 2011). به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که نانوسلنیوم به دلیل اندازه کوچک و پایداری بالا، اثر بهتری نسبت به سلنیوم بر انباشتگی پتاسیم در شاخساره کلزا داشت. این امر 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 نانو سلنیوم موجب بهبود شاخص سبزینگی برگ گردید. در سطح عدم کاربرد تنش نیکل و ۱۰ میکرو مولار سلنیوم، بیشترین شاخص سبزینگی برگ و در سطح ۵۰ میکرو مولار نیکل و ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، کم‌ترین شاخص سبزینگی برگ حاصل شد که اختلاف بین آن‌ها ۱/۱ برابر، برآورد گردید (شکل ۳-الف). اثر بهبوددهندگی سلنیوم نسبت به عدم کاربرد سلنیوم تنها در شرایط عدم تنش نیکل مشاهده گردید.

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]



شکل ۲. مقایسه میانگین برهم‌کنش نیکل و سلنیوم بر محتوای پتاسیم ریشه (الف) و محتوای پتاسیم شاخساره (ب) در کلزا. نیکل (Ni) در سه سطح صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار از منبع سولفات نیکل و سلنیوم (Se) در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار از منبع سلنات سدیم و نانوسلنیوم (NSe) در غلظت‌های صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر بکار گرفته شد. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

Fig. 3. 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, selenium (Se) at concentrations of 0, 10, and 20 µM from a sodium selenate source, and nanoselenium (NSe) at concentrations of 0, 2, and 5 mg/L. Means with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

در سطح تنش پایین (۱۰ میکرو مولار نیکل)، شاخص سبزینگی برگ افزایش یافت، اما در تنش شدیدتر (۵۰ میکرو مولار نیکل)، کاهش قابل‌توجهی مشاهده شد. این روند نشان می‌دهد که نیکل در غلظت پایین ممکن است به‌عنوان یک عنصر ریزمغذی عمل کرده و متابولیسم فتوسنتزی را تحریک کند، اما در غلظت‌های بالا، اثر سمی آن غالب شده و منجر به کاهش ساخت و پایداری کلروفیل می‌گردد. غلظت پایین نیکل برای فعالیت برخی از آنزیم‌های گیاهی به‌ویژه آنزیم اوره‌آز ضروری است. همچنین در غلظت‌های کم، نیکل باعث بهبود فرآیندهای فتوسنتزی از طریق افزایش تولید کلروفیل و تسهیل جذب آهن و عناصر غذایی می‌گردد (Gopal and Nautiyal, 2012). در تحقیق حاضر مشاهده می‌شود در سطح ۱۰ میکرو مولار نیکل کاهش قابل توجهی در شاخص کلروفیل برگ ایجاد نگردید و احتمالاً اثر مثبت بر شاخص سبزینگی داشته است.

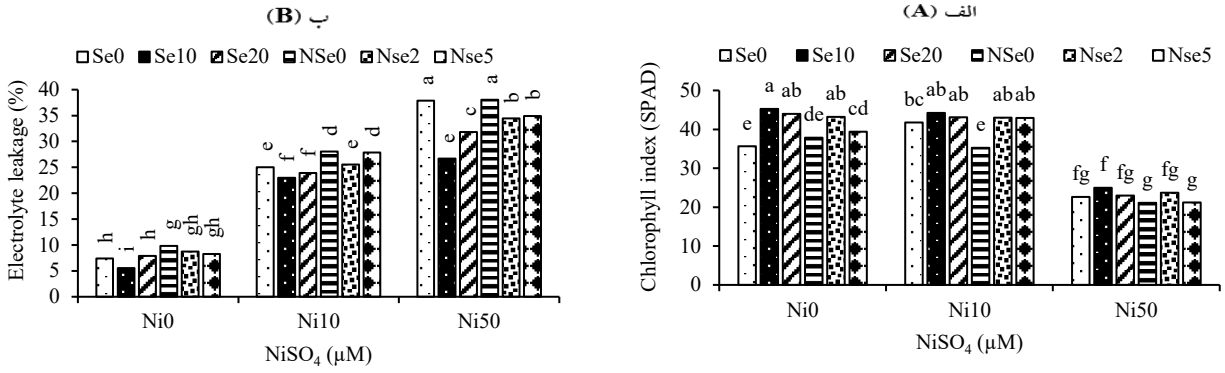
کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم در این مطالعه توانست شاخص سبزینگی برگ را بهبود بخشد، اما این اثر به‌شدت به سطح تنش نیکل وابسته بود. در شرایط عدم تنش نیکل، سلنیوم عملکرد بهتری نسبت به عدم کاربرد آن نشان داد و موجب افزایش شاخص سبزینگی شد. این نتیجه احتمالاً به‌دلیل نقش سلنیوم به‌عنوان آنتی‌اکسیدان و تقویت‌کننده 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، بیوسنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی را افزایش می‌دهد، اما با افزایش غلظت سلنیوم، این عنصر آنزیم‌های بیوسنتزکننده کلروفیل را مهار کرده و از این طریق تأثیر منفی بر سنتز کلروفیل می‌گذارد.

درصد نشت الکترولیت‌ها

با افزایش سطوح تنش نیکل به‌تدریج بر درصد نشت الکترولیت‌ها در کلزا افزوده شد و به‌طور کلی سلنیوم در سطح ۱۰ میکرو مولار

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]



شکل ۳. مقایسه میانگین برهم‌کنش نیکل و سلنیوم بر شاخص سبزینگی برگ (الف) و درصد نشت الکترولیت برگ (ب) در کلزا. نیکل (Ni) در سه سطح صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار از منبع سولفات نیکل و سلنیوم (Se) در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار از منبع سلنات سدیم و نانوسلنیوم (NSe) در غلظت‌های صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر بکار گرفته شد. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

Fig. 4. Mean comparisons of interaction effect of nickel and selenium on Chlorophyll 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, selenium (Se) at concentrations of 0, 10, and 20 µM from a sodium selenate source, and nanoselenium (NSe) at concentrations of 0, 2, and 5 mg/L. Means with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

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 میکرو مولار نیکل و عدم کاربرد سلنیوم و کم‌ترین آن (۵/۵۴ درصد) نیز از تیمار عدم کاربرد نیکل و ۱۰ میکرو مولار سلنیوم به دست 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 طریق 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 اکسیژن فعال و در نتیجه کاهش اکسیداسیون چربی‌های غشاء سلولی می‌شود (Ríos et al., 2009). بنابراین در این پژوهش، کاهش درصد نشت الکترولیت‌ها را می‌توان به تأثیر سلنیوم (غلظت ۱۰ میکرو مولار) 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 عدم تنش نیکل و کم‌ترین میزان این صفت نیز، در زمان کاربرد ۵۰ میکرو مولار نیکل (۷۸/۵۵ درصد) به دست 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 به واسطه پراکسیداسیون لیپید شود و موجب کاهش شدید آب در ساقه‌ها از طریق محدودکردن حرکت آب از ریشه‌ها به بخش‌های هوایی در گیاهان شوند. محققان گزارش کردند که کاهش درصد آب برگ تحت غلظت‌های بالای نیکل می‌تواند 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). مشاهدات Izadi et

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]

(2021) .al نشان داد در سلول‌های برگ گیاه تربچه سمیت فلزات سنگین می‌تواند نفوذپذیری غشا پلاسمایی را تحت تأثیر قرار دهد که سبب کاهش در محتوای آب بافت می‌شود. به‌ویژه در مورد غلظت بالای نیکل که تأثیر آن در برهم‌کنش با تعادل آبی گزارش شده است.

در بین سطوح سلنیوم، کاربرد ۱۰ میکرو مولار سلنیوم بیشترین محتوای نسبی آب برگ را ایجاد نمود و با دیگر سطوح کاربرد سلنیوم در یک گروه آماری قرار گرفت و کم‌ترین محتوای نسبی آب برگ نیز در سطوح عدم 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 از طریق جذب فعال آب شده و عملکرد را افزایش دهد (Nawaz et al., 2014). سلنیوم با افزایش تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از آسیب به غشاهای سلولی جلوگیری می‌کند. سلنیوم می‌تواند از طریق کاهش جذب سدیم و افزایش جذب پتاسیم، تعادل یونی داخل 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 این تحقیق ، سلنیوم و نانوسلنیوم با کاهش اثرات تنش نیکل، موجب بهبود نسبی محتوای آب برگ شدند. با این حال، تنش شدید نیکل (۵۰ میکرو مولار) همچنان اثر غالبی بر کاهش روابط آبی گیاه داشت و این نشان می‌دهد که کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم نمی‌تواند به‌طور کامل اثرات منفی تنش‌های شدید را خنثی کند.

محتوای قندهای محلول شاخساره

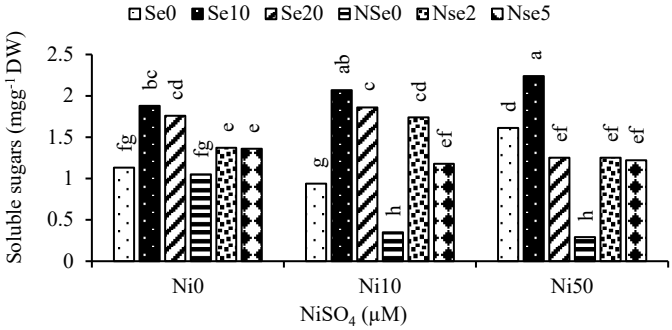
با افزایش نیکل به کار برده شده به محتوای قندهای محلول شاخساره افزوده شد. بیشترین محتوای قندهای محلول شاخساره، در شرایط کاربرد ۵۰ میکرومولار نیکل و ۱۰ میکرو مولار سلنیوم و کم‌ترین آن نیز، از تیمار کاربرد ۵۰ میکرو مولار تنش نیکل و عدم کاربرد نانوسلنیوم به دست آمد. کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم در سطوح عدم کاربرد نیکل و ۱۰ میکرو مولار نیکل موجب افزایش محتوای قندهای محلول شاخساره نسبت به سطح شاهد (عدم کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم) گردید اما در شرایط کاربرد ۵۰ میکرو مولار نیکل تنها با کاربرد ۱۰ میکرو مولار سلنیوم محتوای قندهای محلول شاخساره افزایش یافت (شکل ۴).

با کاهش انتقال آب به برگ‌ها و اختلال در سرعت تعرق 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 در گیاه گشنیز نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان قندهای محلول 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 مربوط به تحقیقی در گیاه جو نشان داد که میزان کربوهیدرات محلول و نامحلول در گیاهان رشد یافته 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 طریق افزایش قندهای محلول در برگ‌ها، به حفظ تعادل اسمزی سلول‌ها کمک می‌کند. قندهای محلول به‌عنوان اسمولیت‌ها در داخل سلول‌ها عمل می‌کنند و مانع از خروج آب از سلول می‌شوند، که این امر به حفظ آب درون سلولی کمک می‌کند و باعث افزایش مقاومت گیاه به تنش می‌شود (Ríos et al., 2009).

کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم در شرایط عدم تنش نیکل و تنش ملایم (۱۰ میکرو مولار نیکل) موجب افزایش محتوای قندهای محلول شد. با این حال، در شرایط تنش شدید (۵۰ میکرو مولار

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]



شکل ۴. مقایسه میانگین برهم‌کنش نیکل و سلنیوم بر محتوای قندهای محلول شاخساره در کلزا. نیکل (Ni) در سه سطح صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار از منبع سولفات نیکل و سلنیوم (Se) در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار از منبع سلنات سدیم و نانوسلنیوم (NSe) در غلظت‌های صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر بکار گرفته شد. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

Fig. 6. 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, selenium (Se) at concentrations of 0, 10, and 20 µM from a sodium selenate source, and nanoselenium (NSe) at concentrations of 0, 2, and 5 mg/L. Means with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

نیکل)، تنها کاربرد ۱۰ میکرو مولار سلنیوم توانست موجب افزایش محتوای قندهای محلول شود. این تفاوت اثر در شرایط تنش بالا احتمالاً به دلیل تأثیرات متقابل 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 شـد. به بیان آن‌ها سلنیوم با خاصیت آنتی‌اکسیدانی خود از آسیب به ساختارهای سلولی جلوگیری می‌کند. به‌نظر می‌رسد گیاه کلزا در غیاب سلنیوم، نتواسته است با افزایش میزان قندهای محلول در شرایط تنش نیکل، سبب تنظیم اسمزی شود، ولی با کاربرد خارجی سلنیوم و نانوسلنیوم، هم‌زمان با تنش نیکل، منجر به افزایش این صفت شد که خود می تواند در افزایش مقاومت به تنش، مؤثر باشد.

طول ریشه و شاخساره

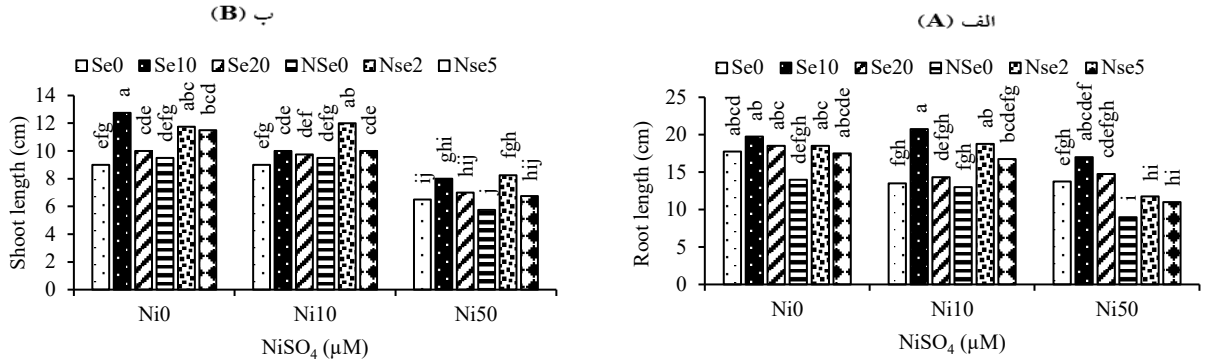
با افزایش تنش نیکل از سطح ۱۰ میکرو مولار نیکل به ۵۰ میکرو مولار نیکل، از طول ریشه کاسته شد اما تنش ۱۰ میکرو مولار نیکل اثر کاهش بر طول ریشه نسبت به عدم تنش نیکل ایجاد نکرد. همچنین کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم موجب افزایش طول ریشه شد. در تنش شدید (۵۰ میکرو مولار نیکل) کاربرد سلنیوم اثر بهتری بر طول ریشه نسبت به نانوسلنیوم نشان داد. بیشترین طول ریشه ، در شرایط کاربرد ۱۰ میکرو مولار نیکل و ۱۰ میکرو مولار سلنیوم و کم‌ترین آن، از تیمار

کاربرد ۵۰ میکرو مولار تنش نیکل و عدم کاربرد نانوسلنیوم به دست آمد. در هر سه سطح تنش نیکل، کاربرد ۱۰ میکرو مولار 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 سطح شاهد، افزایش داد (شکل ۵-ب). بیشترین طول شاخساره، در شرایط عدم کاربرد تنش نیکل و ۱۰ میکرو مولار سلنیوم و کم‌ترین آن، از تیمار کاربرد ۵۰ میکرو مولار تنش نیکل و عدم کاربرد نانوسلنیوم به دست آمد. در سطوح ۱۰ و ۵۰ میکرومولار تنش نیکل کاربرد نانوسلنیوم اثر بهتری بر طول شاخساره نسبت به سلنیوم نشان دادند.

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]



شکل ۵. مقایسه میانگین برهم‌کنش نیکل و سلنیوم بر طول ریشه (الف) و طول شاخساره (ب) در کلزا. نیکل (Ni) در سه سطح صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار از منبع سولفات نیکل و سلنیوم (Se) در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار از منبع سلنات سدیم و نانوسلنیوم (NSe) در غلظت‌های صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر بکار گرفته شد. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

Fig. 7. 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, selenium (Se) at concentrations of 0, 10, and 20 µM from a sodium selenate source, and nanoselenium (NSe) at concentrations of 0, 2, and 5 mg/L. Means with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

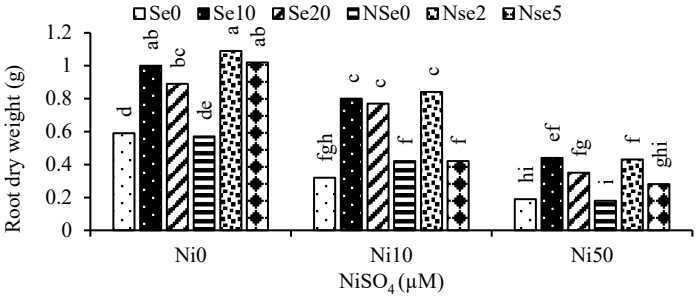
کاهش طول ریشه و شاخساره در نتیجه حضور فلزات سنگین می‌تواند به‌دلیل تأثیر بازدارنده این فلزات بر رشد طولی ریشه و کاهش جذب مواد معدنی باشد (Aghili et al., 2009). همچنین فلزات سنگین با اختلال در عمل هورمون‌هایی مانند اکسین، کاهش در رشد گیاه را در پی دارند. با مطالعه روی گیاه گشنیز گزارش شد که طول ریشه و شاخساره این گیاه 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، به‌طوریکه این کاهش در تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب ۱۶ و ۳۳ درصد به‌دست آمد (Shaker Koohi et al., 2021).

اثر بهبوددهنده سلنیوم بر رشد گیاهان، چه در شرایط تنش و چه در شرایط غیر تنش موضوع پژوهش‌های متعدد بوده است از جمله بررسی‌ها در گندم بهاره نشان داد سلنیوم مانع کاهش رشد گیاهان در اثر کمبود آب گردید (Madaan and Mudgal, 2011). این محققین چنین نتیجه‌گیری کردند که غلظت‌های کم سلنیوم به‌دلیل افزیش رنگدانه‌های فتوسنتزی، افزایش تثبیت کربن و همچنین سنتز و هیدرولیز نشاسته و ساکارز موجب افزایش ارتفاع گیاه می‌شود. سلنیوم در غلظت‌های پایین 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 سلنیوم با افزایش میزان رشد ریشه، می‌تواند منجر به ایجاد اثر رقت گردد و میزان تجمع نیکل در ریشه کاهش یابد. در این پژوهش نیز سلنیوم از تجمع نیکل در ریشه‌ها 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 سلنیوم و نانوسلنیوم، به ترتیب، وزن خشک ریشه را نسبت به سطح شاهد، افزایش داد (شکل ۶). بیشترین وزن خشک ریشه ، در شرایط عدم کاربرد تنش نیکل و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و کم‌ترین آن، از تیمار کاربرد ۵۰ میکرو مولار تنش نیکل و عدم کاربرد نانوسلنیوم به دست آمد.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]



شکل ۶. مقایسه میانگین برهم‌کنش نیکل و سلنیوم بر وزن خشک ریشه در کلزا. نیکل (Ni) در سه سطح صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار از منبع سولفات نیکل و سلنیوم (Se) در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار از منبع سلنات سدیم و نانوسلنیوم (NSe) در غلظت‌های صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر بکار گرفته شد. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

Fig. 8. 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, selenium (Se) at concentrations of 0, 10, and 20 µM from a sodium selenate source, and nanoselenium (NSe) at concentrations of 0, 2, and 5 mg/L. Means with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

در سطوح عدم کاربرد 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)، از سطح عدم تنش نیکل به دست آمد و کم‌ترین میزان این صفت نیز، در زمان کاربرد ۵۰ میکرو مولار نیکل (۱/۷۱ گرم) به دست آمد که نسبت به یکدیگر اختلاف ۱/۶ برابری نشان دادند. در بین سطوح سلنیوم، کاربرد ۱۰ میکرو مولار سلنیوم بیشترین وزن خشک شاخساره را ایجاد نمود و کم‌ترین وزن خشک شاخساره نیز در سطوح عدم 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 به‌دنبال آن فعالیت‌های رشدی گیاه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین، عدم گسترش مناسب سیستم ریشه‌ای باعث کاهش سطح جذب‌کننده مواد غذایی، تغییر در ساختار غشای یاخته‌ای و کاهش جذب محتوای آب می‌شود که این امر در نهایت موجب کاهش رشد در سایر قسمت‌های گیاه و از جمله کاهش زیست توده گیاه می‌شود. به‌طورکلی ایجاد تغییر در مورفولوژی ریشه در اثر افزایش غلظت نیکل و تغییر ساختار ریشه باعث کاهش جذب مواد غذایی شده و کاهش رشد و وزن خشک گیاه را به‌دنبال دارد (Fuentes et al., 2006).

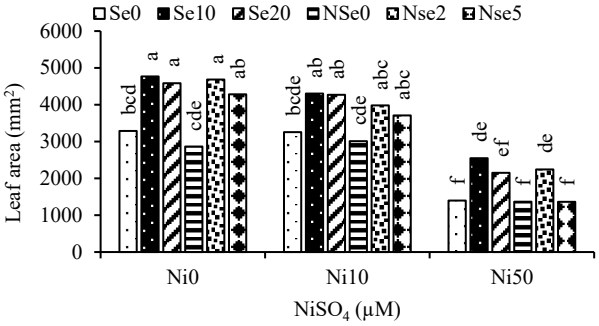
سلنیوم با افزایش کارایی فرآیندهای فتوسنتزی و شاخص سبزینگی برگ، به تولید بیشتر مواد آلی در گیاه کمک می‌کند. در برخی مطالعات نشان داده‌شده که گیاهانی که تحت تأثیر سلنیوم قرار می‌گیرند، افزایش قابل توجهی در سطح کلروفیل و سرعت فتوسنتز دارند که مستقیماً بر روی وزن خشک اثر می‌گذارد (Liu et al., 2023). در گزارش 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 پایین نقش بسزایی در کاهش اثرات مضر شوری از طریق 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 شد اما کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم سبب افزایش سطح برگ نسبت به سطوح عدم کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم شد. در سطح

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]



شکل ۷. مقایسه میانگین برهم‌کنش نیکل و سلنیوم بر سطح برگ در کلزا. نیکل (Ni) در سه سطح صفر، ۱۰ و ۵۰ میکرومولار از منبع سولفات نیکل و سلنیوم (Se) در غلظت‌های صفر، ۱۰ و ۲۰ میکرومولار از منبع سلنات سدیم و نانوسلنیوم (NSe) در غلظت‌های صفر، ۲ و ۵ میلی‌گرم در لیتر بکار گرفته شد. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد.

Fig. 16. 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, selenium (Se) at concentrations of 0, 10, and 20 µM from a sodium selenate source, and nanoselenium (NSe) at concentrations of 0, 2, and 5 mg/L. Means with at least one similar letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

عدم اعمال تنش نیکل و ۱۰ میکرو مولار سلنیوم، بیشترین سطح برگ حاصل شد که با سطوح عدم اعمال تنش نیکل و ۲۰ میکرو مولار سلنیوم و سطح عدم اعمال تنش نیکل و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم در یک گروه آماری قرار گرفتند. در سطح ۵۰ میکرو مولار نیکل و ۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، کم‌ترین سطح برگ حاصل شد. همچنین مشاهده می‌شود که در هر سه سطح تنش نیکل کاربرد ۱۰ میکرو مولار سلنیوم نسبت به سایر سطوح سلنیوم بیشترین سطح برگ در کلزا را نشان داد (شکل ۷).

سطح برگ یک پارامتر 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 بگذارد و منجر به کاهش محتوای کلروفیل شود، که در نهایت باعث محدود شدن رشد برگ‌ها می‌گردد. این تأثیر منفی می‌تواند رشد گیاه را محدود کند و سطح برگ‌ها را کاهش دهد. در شکل ۳ مشاهده شد با افزایش سطوح تنش نیکل از شاخص کلروفیل برگ کاسته شد و پس از آن با کاهش فتوسنتز، تولید انرژی و مواد غذایی برای ساخت برگ‌های جدید کاهش می‌یابد و در نتیجه سطح کل برگ‌ها کاهش پیدا می‌کند (Helaoui et al., 2022). سلنیوم با افزایش فعالیت آنزیم‌ها و بهبود متابولیسم مواد غذایی نظیر 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 سلنیوم با افزایش فعالیت فتوسنتزی از طریق 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 بالای آن سمی است و منجر به کلروز و نکروزه شدن گیاهان می‌گردد. براساس نتایج مشخص شد که با افزایش سطوح نیکل، صفات مورد بررسی به استثنای محتوای نیکل ریشه و شاخساره کاهش یافتند و کاربرد ۱۰ میکرو مولار سلنیوم و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم توانست تا حدودی اثر تنش نیکل را کاهش دهد. با افزایش سطوح نیکل، محتوای نیکل ریشه و شاخساره در گیاه کلزا افزایش یافت. وجود سلنیوم و نانوسلنیوم تا حدودی، سبب کاهش جذب این عنصر در سطوح بالای تنش توسط گیاه و انباشتگی آن‌ها در شاخساره گردیده است. تنش نیکل، شاخص کلروفیل برگ و محتوای نسبی آب برگ کلزا را کاهش اما درصد نشت الکترولیت‌ها و محتوای قندهای محلول شاخساره را

نسخه پیش از انتشار

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]

افزایش داد. سلنیوم و نانوسلنیوم، 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 سلنیوم و نانوسلنیوم به‌ویژه در غلظت‌های ۱۰ میکرو مولار سلنیوم و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم سبب بهبود صفات بررسی شده گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم جهت مقابله با تنش می‌تواند با بهبود خصوصیات بیوشیمیایی مانند محتوای نسبی آب برگ و محتوای قندهای محلول برگ موجب بهبود شرایط اسمزی در گیاه شود و شرایط رشد را بهبود بخشد. به‌طور کلی تیمار کاربرد ۱۰ میکرو مولار سلنیوم و ۲ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم نسبت به سطوح دیگر، بیشترین تأثیر را بر بهبود صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک داشت و اثر تعدیل‌کنندگی نیکل را نشان داد. لذا کاربرد سلنیوم و نانوسلنیوم در محیط رویشی گیاه کلزا، می‌تواند تا حدودی منجر به کاهش آثار سمیت این فلزسنگین، در شرایط آلودگی به تنش نیکل باشد.

تشکر و سپاسگزاری

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

تضاد منافع

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

منابع مورد استفاده

References

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.: Int. J. 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., et al., 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 chlopophyll, 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

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]

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., Zulfiqar, 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 flavida* 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. Nanomedicine 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. Sustainable 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

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]

improvement. Agronomy 11(9), 1776. https://doi.org/10.3390/agronomy11091776.
36. Rang Zan, N., Golsoltani, M., Lajmirorak 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 H_2O_2 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., Gavrilescu, 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, ZQ. (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 Koohi, S., Nasrollehzadeh, 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. Sustainable Prod. 31(2), 199–215. https://doi.org/10.22034/saps.2021.13158. (In Persian with English abstract).
47. Tagharobiyan, 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.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-11-11]