



Interaction Effects of Sulfur and Foliar Applied Selenium on Canola (*Brassica napus*) Growth Indices and Absorption of Two Nutrients

Fereydu Nourgholipour^{*1} , Maryam Mohammadi² ,
Hossein Mir Seyed Hosseini² and Reza Soleimani³

1- Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

2- Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3- Ilam Agricultural Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran

* Corresponding author, Email: nourfg@yahoo.com

(Received: 8 March 2025; Revised: 6 July 2025; Accepted: 15 July 2025)

Abstract

Background and Objective: Sulfur, as an essential nutrient, and selenium in low concentrations as a beneficial element, are important for increasing plant tolerance to environmental stresses. This study investigated the effects of sulfur and selenium application on the absorption of these elements and their interaction effects on the growth indices of canola.

Methods: The experiment was conducted in greenhouse conditions using a factorial design with three treatments and three replications. The treatments included elemental sulfur at two levels (zero and 20 mg kg⁻¹, inoculated with *Thiobacillus* inoculum) and two sources of selenium fertilizer (sodium selenate and selenite) at three levels (zero, two, and four mg L⁻¹) applied as foliar spray. The cultivated canola variety was Dalgan and grown for 5 months. The sulfur was in powder form which was added to the soil of the sulfur-containing treatments, along with *Thiobacillus* inoculum (with a population of 1×10⁸ cells per mL) two weeks before planting. Foliar application of selenium was carried out at the beginning of stem elongation.

Results: Results showed that selenium concentration in the grain was higher than in the shoot (0.395 vs. 0.251 mg kg⁻¹), but uptake in the shoot was higher than in the grain (2.52 vs. 1.2 µg pot⁻¹). Sulfur application significantly increased shoot dry weight (by 34%) and seed weight (by 89%) compared to the non-sulfur treatment. Selenium application from the selenate source, compared to selenite, resulted in higher selenium uptake in the shoot (2.71 vs. 2.33 µg pot⁻¹) and grain (1.39 vs. 1.01 µg pot⁻¹).

Conclusion: In the non-stress conditions of this experiment, applying selenium did not significantly increase canola grain yield. When applied from a selenate source at a concentration of 4 g L⁻¹, it did improve the concentration of selenium in the grain, making it suitable for grain enrichment purposes.

Keywords: Absorption, Concentration, Selenium, Shoot, Grain, Sulfur.

How to Cite: Nourgholipour, F., Mohammadi, M., Mir Seyed Hosseini, H., Soleimani, R., 2025. Interaction effects of sulfur and foliar applied selenium on canola (*Brassica napus*) growth indices and absorption of two nutrients. . J. Soil Plant Interact. 16(3), 1–21 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.16.3.21611>





تأثیر گوگرد و محلول پاشی سلیوم بر برخی شاخص های رشد و مقدار جذب این عناصر در کلزا

فریدون نورقلی پور^{۱*}، مریم محمدی^۲، حسین میر سید حسینی^۲ و رضا سلیمانی^۳

- ۱- موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
 - ۲- گروه علوم و مهندسی خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
 - ۳- مرکز تحقیقات کشاورزی ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران
- * مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: nourfg@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۴/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۲۴)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: کاربرد گوگرد به عنوان یک عنصر ضروری و سلیوم در غلظت کم به عنوان عنصری مفید به ویژه در افزایش تحمل گیاهان به تنش های محیطی، دارای اهمیت است. در این پژوهش اثر کاربرد گوگرد و سلیوم بر جذب این عناصر و برهمکنش آن ها بر شاخص های رشد گیاه کلزا بررسی شد.

روش ها: آزمایش در شرایط گلخانه و به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تیمار و در سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل گوگرد عنصری در دو سطح شامل صفر و ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم (تلقیح شده با باکتری تیوباسیلوس)، دو منبع کودی سلیوم (سلنات و سلنیت سدیم) در سه سطح کاربرد آن (صفر، دو و چهار میلی گرم بر لیتر) به صورت محلول پاشی، اعمال شد.

نتایج: بر اساس نتایج، غلظت سلیوم در دانه بیش تر از شاخصاره بود (۳۹۵/۰ در برابر ۲۵۱/۰ میلی گرم بر کیلوگرم) ولی مقدار جذب آن در شاخصاره بیش تر از دانه بود (۲/۵۲ در برابر ۱/۲ میکروگرم در گلدان). کاربرد گوگرد باعث افزایش معنی دار وزن خشک شاخصاره (۳۴ درصد) و وزن دانه کلزا (۸۹ درصد) نسبت به شرایط بدون کاربرد گوگرد شد. کاربرد سلیوم از منبع سلنات نسبت به سلنیت، باعث جذب مقدار بیش تر سلیوم در شاخصاره (۲/۷۱ در برابر ۲/۳۳ میکروگرم در گلدان) و دانه کلزا (۱/۳۹ در مقابل ۱/۰۱ میکروگرم در گلدان) شد.

نتیجه گیری کلی: در شرایط بدون تنش، کاربرد سلیوم باعث افزایش معنی دار عملکرد دانه کلزا نشد. هنگامی که سلنیم از منبع سلنات با غلظت ۴ گرم در لیتر محلول پاشی شد، غلظت سلیوم در دانه بهبود یافت و آن را برای اهداف غنی سازی دانه مناسب نمود.

واژه های کلیدی: شاخصاره، دانه، غلظت، جذب، سلیوم، گوگرد.



مقدمه

کلزا با نام علمی *Brassica napus* L. به دلیل سازگاری اقلیمی این گیاه و تفاوت زمانی فصل رشد آن با سایر دانه‌های روغنی و امکان کاربرد آن در تناوب زراعی با گیاهان دیگر از جمله غلات، سطح کشت بالایی را در جهان به خود اختصاص داده است (Frieß et al., 2020). این گیاه جزء گیاهان دانه روغنی با ۴۵-۴۰ درصد روغن است. روغن کلزا به دلیل ترکیب مناسب اسیدهای چرب غیراشباع و درصد کم اسیدهای چرب اشباع همانند زیتون، از جمله باکیفیت‌ترین روغن‌های خوراکی است (Botella-Martinez et al., 2023). بر اساس آمار جهانی، در سال ۲۰۲۴ تولید دانه کلزا در جهان حدود ۸۷/۴۴ میلیون تن بوده که در رده دوم گیاهان زراعی دانه روغنی پس از دانه سویا، قرار دارد (Statista, 2024). مساحت کشت این گیاه در سال ۲۰۲۳ حدود ۴۳/۴۵ میلیون هکتار بود (FAO, 2023). در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ سطح کشت این محصول در کشور حدود ۱۵۴ هزار هکتار بود (Anonymous, 2023). مصرف متعادل و مناسب عناصر غذایی می‌تواند سبب بهبود رشد و افزایش عملکرد دانه این گیاه گردد (Ren et al., 2016).

گوگرد چهارمین عنصر غذایی پرمصرف مورد نیاز گیاه کلزا پس از عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم است و به دلیل افزایش کاربرد کودهای بدون گوگرد و نیاز زیاد گیاهان روغنی، کمبود این عنصر در خاک‌های زراعی جهان رو به افزایش است (Sharma et al., 2024). به طور کلی گوگرد برای عملکرد مطلوب دانه در تمام گونه‌ها و ارقام کلزا ضروری بوده و نیاز این گیاه به گوگرد حدود سه برابر بیش‌تر از غلات می‌باشد (Canola Council of Canada, 2024). از آنجایی که گیاه کلزا و دانه‌های آن دارای مقدار زیادی پروتئین می‌باشند و از اسیدهای آمینه ساده گوگرددار تشکیل شده است، بنابراین، این عنصر نقش اساسی در سنتز پروتئین گیاه کلزا ایفا می‌کند. نقش مهم دیگر گوگرد، شرکت در ساختمان سولفولپیدها است که در غشای سلول وجود دارند و در واقع روغن گیاه را تشکیل می‌دهند (Sharma et al., 2024). محدوده کمبود و سمیت سلیوم برای گیاهان بسیار باریک

است. حد بحرانی تشخیص بین ضرورت و سمیت، میان جانداران و گونه‌ها نیز متفاوت بوده و وابسته به سطح کاربرد و منبع‌های مورد استفاده سلیوم است (Hawrylak- et al., 2015). سلیوم در مقادیر کم و کافی در گیاهان به عنوان آنتی اکسیدان عمل می‌نماید (Kumar et al., 2014) درحالی که در غلظت‌های زیاد به عنوان فعال‌کننده اکسیدان عمل می‌کند (Gupta and Gupta, 2017). گوگرد و سلیوم هر دو از عناصر گروه شانزدهم جدول تناوبی بوده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مشابهی دارند و اعتقاد بر آن است که در گیاهان، سلیوم از مسیرهای جذب و سپس آلی‌سازی گوگرد استفاده می‌کند (Gupta and Gupta, 2017). با توجه به شباهت سلیوم به گوگرد، مسیرهای متابولیکی گوگرد به اشتراک گذاشته می‌شود، بنابراین انتظار می‌رود اثر سلیوم بر رشد تا حد زیادی تحت اثر تغذیه با گوگرد قرار گیرد (Golob et al., 2016; Tian et al., 2017). تصور می‌شود که علت اصلی سمیت ناشی از سلیوم در بسیاری از گیاهان ادغام غیراختصاصی سلنو-آمینواسیدهای سلنوسیتین و سلنومتیونین به جای سیستمین و متیونین در پروتئین‌ها باشد (Lima et al., 2018). سمیت ناشی از سلیوم به طور مستقیم با نسبت گوگرد به سلیوم مرتبط است (White, 2015).

با توجه به نیاز گیاه کلزا به عنصر گوگرد و ضرورت برقراری تعادل در تغذیه گوگرد و سلیوم در کشت این گیاه و دانسته‌های اندک در مورد برهمکنش این عناصر بر رشد گیاه کلزا، پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر عنصر گوگرد بر ویژگی‌های کمی و کیفی گیاه کلزا در حضور منابع مختلف سلیوم انجام شد. با توجه به گزارش‌های ارائه شده در زمینه اثر سلیوم بر افزایش تحمل گیاه به تنش‌های محیطی، این آزمایش به منظور بررسی آثار آن در شرایط بدون تنش بر رشد گیاه کلزا انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های خاک

خاک مورد استفاده برای انجام این پژوهش (لایه ۰-۳۰ سانتی متر)

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده پیش از کشت

Table 1. Some physical and chemical properties of the soil before planting

شن	سیلت	رس	بافت خاک	درصد اشباع	گنجایش مزرعه	نیتروژن کل	واکنش	رسانایی الکتریکی	کربن آلی	کربنات کلسیم معادل
Sand	Silt	Clay	Soil texture	Saturation percentage	Field capacity	N _{Total}	pH	Electrical conductivity	Organic carbon	Calcium carbonate equivalent
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(dS m ⁻¹)	(%)	(%)
70	19	11	Sandy loam	30	14	0.04	7.88	0.65	0.37	4.43
گوگرد	فسفر	پتاسیم	سلنیوم	کادمیوم	سرب	آهن	روی	منگنز	مس	
S _{ava}	P _{ava}	K _{ava}	Se _{ava}	Cd	Pb _{ava}	Fe _{ava}	Zn _{ava}	Mn _{ava}	Cu _{ava}	
(mg kg ⁻¹)										
3.68	5.60	259	0.03	0.01	0.23	1.45	1	4.30	1	

بررسی در جدول (۱) ارائه شده است. مقدار سلنیوم قابل دسترس خاک برابر ۰/۰۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم بود که مقدار آن کم تر از محدوده آلودگی خاک برای این عنصر است (Bowie and Thornton, 1985). خاک انتخاب شده قلیایی، بدون محدودیت شوری، دارای کربن آلی خیلی کم، بافت لوم شنی و غلظت فسفر و گوگرد در دسترس کم بود. کمبود آهن و منگنز در دسترس نیز در خاک وجود داشت.

تیمارهای آزمایش

در این پژوهش اثر سطوح مختلف گوگرد [صفر (S0) و ۲۰ (S20) میلی گرم بر کیلوگرم]، سلنیوم (صفر، ۲ و ۴ میلی گرم بر لیتر) و منبع سلنیوم [سلنات سدیم (Na₂SeO₄) و سلنیت سدیم (Na₂SeO₃)] به صورت یک طرح کاملاً تصادفی در قالب فاکتوریل با سه تکرار مورد بررسی قرار گرفت. تعداد کل تیمارهای آزمایشی برابر ۳۶ عدد بود. در این آزمایش دو سطح صفر و ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم گوگرد به ترتیب با S0 و S20، سه سطح صفر، ۲ و ۴ میلی گرم بر لیتر سلنات با SA0 و SA2 و SA4، سه سطح صفر، ۲ و ۴ میلی گرم بر لیتر سلنیت به ترتیب با SI0، SI2 و SI4 در شکل‌ها نمایش داده شده است. رقم کلزای مورد استفاده در این پژوهش، دلگان (آزاد گرده افشان) بود که از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تهیه شد. کشت در

از ایستگاه تحقیقات اسماعیل آباد قزوین (۳۶°۱۵'۱۶" شمالی و ۴۹°۵۴'۱۹" شرقی، ارتفاع ۱۲۷۸ متر) با مقدار گوگرد در دسترس کم انتخاب شد. در این ایستگاه مقدار بارندگی سالیانه ۳۱۵ میلی متر و میانگین دمای سالیانه ۹ درجه سلسیوس است. بر اساس طبقه‌بندی آمریکایی، خاک به صورت coarse-loamy, mixed, mesic, Typic Xerorthents طبقه‌بندی شد. بافت خاک (Gee and Bauder, 1986)، درصد کربن آلی (Lindsay and Norvell, 1978)، کربنات کلسیم معادل (Loeppert and Rhoades, 1982)، pH و رسانایی الکتریکی (Suarez, 1996)، پتاسیم قابل دسترس (Sparks et al., 1996) و فسفر قابل دسترس خاک (Olsen and Sommers, 1982)، پیش از کشت اندازه‌گیری شد. عصاره‌گیری سولفات در خاک با روش مونو کلسیم فسفات (۵۰۰ میلی گرم بر لیتر) انجام شد و سپس با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل UNICO-2000 در طول موج ۴۲۰ نانومتر غلظت سولفات در عصاره‌ها اندازه‌گیری شد (Schulte and Eik, 1988). عصاره‌گیری سلنیوم قابل جذب خاک با روش آمونیوم بی‌کربنات DTPA (AB-DTPA) انجام شد (Soltanpour, 1980) و غلظت سلنیوم در نمونه‌ها توسط دستگاه ICP-AES (MPX- USA) قرائت شد.

نتایج برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد

که با وزن ۴ کیلوگرم در پلاستیک‌هایی توزین شده بود، افزوده شد. سپس کود درون همان پلاستیک با خاک مخلوط شد و در مرحله بعد در گلدان ریخته شد. در ادامه ۱۰ عدد بذر کلزا در هر گلدان کشت شد. آبیاری گلدان‌ها با آب مقطر انجام شد و در طول آزمایش، با توزین گلدان‌ها درصد رطوبت خاک در حدود ۷۵ درصد گنجایش مزرعه نگهداری شد. پس از استقرار گیاهان، تعداد بوته‌ها به ۴ عدد در هر گلدان کاهش داده شد.

ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در گیاه

۵ ماه پس از کاشت، در مرحله انتهایی رشد (رسیدگی فیزیولوژیک) با کد دورقمی رشد ۸۰ اجزای دانه از شاخساره تفکیک شد. نمونه‌های شاخساره، دانه و ریشه در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت خشک شد. وزن خشک دانه، شاخساره گیاه و ریشه جداگانه توزین شد. سطح برگ با کاربرد دستگاه تعیین سطح برگ مدل Leaf Area Cl – 202 اندازه‌گیری شد. شاخص سطح برگ از تقسیم سطح برگ به سطح سایه‌انداز (سطح گلدان) به دست آمد. اندازه‌گیری غلظت و جذب عناصر سلیوم و گوگرد در شاخساره و دانه انجام شد. غلظت گوگرد کل در نمونه‌های گیاهی (به روش هضم تر) بر اساس روش Brienza et al., (1995) انجام شد. برای تهیه عصاره گیاهی، مقدار ۰/۳ گرم نمونه گیاهی به دقت توزین شده و درون بالن ۵۰ میلی‌لیتری منتقل شد. سپس به آن ۲ میلی‌لیتر اسیدپرکلریک و ۴ میلی‌لیتر آب اکسیژنه افزوده شد. در نهایت قرائت با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Shimadzu UV-3100 در طول موج ۴۲۰ نانومتر انجام شد. عصاره‌گیری سلیوم کل در نمونه‌های گیاه با روش هضم تر با کاربرد پراکسید هیدروژن و اسید نیتریک انجام شد (Szeles, 2007). یک گرم از نمونه گیاهی به لوله‌های هضم شیشه‌ای افزوده شد. نمونه‌ها در ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک (۶۵ درصد) حل شده و برای یک شب نگهداری شد. در روز بعد نمونه‌ها در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه در یک سیستم بلوک هضم گرمادهی شدند. سپس ۳ میلی‌لیتر هیدروژن پراکسید (۳۰ درصد) به نمونه‌ها

شرایط گلخانه و به مدت ۵ ماه انجام شد. در طول دوره رشد، دمای گلخانه در محدوده ۲۰ تا ۲۲ درجه سلسیوس در ابتدای رشد بود و در انتهای دوره رشد (مرحله زایشی) به حدود ۲۴ تا ۲۸ درجه سلسیوس افزایش یافت. ساعات روشنایی با توجه به دوره رشد بین ۱۲ تا ۱۶ ساعت در روز بود. گوگرد استفاده‌شده به صورت پودری با درجه خلوص ۹۹ درصد بود که به همراه مایه تلقیح باکتری *هالوتیوباسیلوس نتوپولیتنس* (با جمعیت 1×10^8 سلول در هر میلی‌لیتر تهیه‌شده از مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور)، به مقدار ۳ میلی‌لیتر در هر گلدان دو هفته پیش از کشت به خاک افزوده شد. سلیوم نیز به صورت برگ‌پاشی در ابتدای ساقه‌دهی (کد ۳۰ از کد دورقمی رشد Bleiholder et al., 2001) مصرف شد.

کشت گلخانه‌ای

در کشت گلخانه‌ای از گلدان‌های پلاستیکی با قطر دهانه ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. در کف گلدان‌ها، کاغذ صافی گذاشته و سپس به هر گلدان ۴ کیلوگرم خاک الک‌شده با الک ۴ میلی‌متری (مش ۵) افزوده شد. مقدار نیتروژن مورد استفاده در این پژوهش ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از منبع اوره بود که ۵۰ درصد آن در مرحله پیش از کاشت، ۲۵ درصد آن پس از استقرار (۲۱ روز پس از کاشت) و ۲۵ درصد در انتهای ساقه‌دهی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به کمبود فسفر و آهن در نتایج تجزیه اولیه خاک (جدول ۱) سوپر فسفات تریپل به مقدار ۸۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک پیش از کاشت و آهن نیز به مقدار ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به صورت محلول از سکوسترین آهن (EDDHA NaFe) دارای ۵/۵ درصد آهن افزوده شد. برای این منظور، پیش از کشت با در نظر گرفتن تعداد کل گلدان‌ها و مقدار کود آهن در نظر گرفته شده برای هر کیلوگرم خاک، محلول اصلی تهیه شده و سپس به هر گلدان با توجه به وزن ۴ کیلوگرم خاک، محلول معادل آن افزوده شد. تیمارهای گوگرد و مایه تلقیح تیوباسیلوس پیش از کشت و تیمارهای سلیوم با توجه به نوع تیمار اعمال شد. کودهایی مانند نیتروژن، فسفر، آهن و گوگرد ابتدا به خاکی

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر گوگرد و سلنیم بر ویژگی‌های مورفولوژیک گیاه کلزا

Table 2. Analysis of variance of morphological characteristics of canola plant

منبع تغییر	درجه آزادی	وزن خشک شاخساره	وزن خشک ریشه	شاخص سطح برگ
Source of variation	df	Shoot dry weight	Root dry weight	Leaf area index
سطح گوگرد	1	115**	43.758**	0.001 ^{ns}
S level				
منبع سلنیم	1	0.751 ^{ns}	0.201 ^{ns}	0.145**
Se source				
سطح سلنیم	2	10.230**	0.637 ^{ns}	0.143**
Se level				
سطح گوگرد × منبع سلنیم	1	0.360 ^{ns}	0.057 ^{ns}	0.049*
Se source × S level				
سطح گوگرد × سطح سلنیم	2	1.810 ^{ns}	1.870**	0.354**
Se level × S level				
منبع سلنیم × سطح سلنیم	2	1.831 ^{ns}	0.502 ^{ns}	0.219**
Se source × Se level				
سطح گوگرد × منبع سلنیم × سطح سلنیم	2	5.250*	0.110 ^{ns}	0.066**
Se source × Se level × S level				
خطا	24	1.006	0.191	0.007
Error				
ضریب تغییرات	-	9.7	11.8	3.8
C.V.				

** و * به ترتیب نشان‌دهنده اثر معنی‌دار تیمارها در سطوح ۱ و ۵ درصد و ns بیانگر اثر غیرمعنی‌دار است.

** and * indicates the significant effect of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ns indicates no significant difference.

افزوده شد. هضم در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۹۰ دقیقه ادامه یافت. پس از خنک‌شدن، نمونه‌ها با آب دیونیزه به حجم کل ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. غلظت سلنیم عصاره‌ها با کاربرد دستگاه ICP-AES مدل MPX قرائت شد.

تحلیل آماری نتایج: تجزیه آماری نتایج به کمک نرم‌افزار SAS 9.4 (USA NC, SAS institute, Cary) و مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد به روش آزمون چنددامنه‌ای دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

وزن خشک شاخساره، وزن خشک ریشه و شاخص سطح برگ
با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) اثر برهمکنش

سطح گوگرد، منبع سلنیم و سطح سلنیم بر شاخص‌های وزن خشک شاخساره ($P < 0.05$) و شاخص سطح برگ ($P < 0.01$) معنی‌دار بود. همچنین اثر برهمکنش سطح گوگرد و سطح سلنیم بر شاخص وزن خشک ریشه معنی‌دار بود ($P < 0.01$).

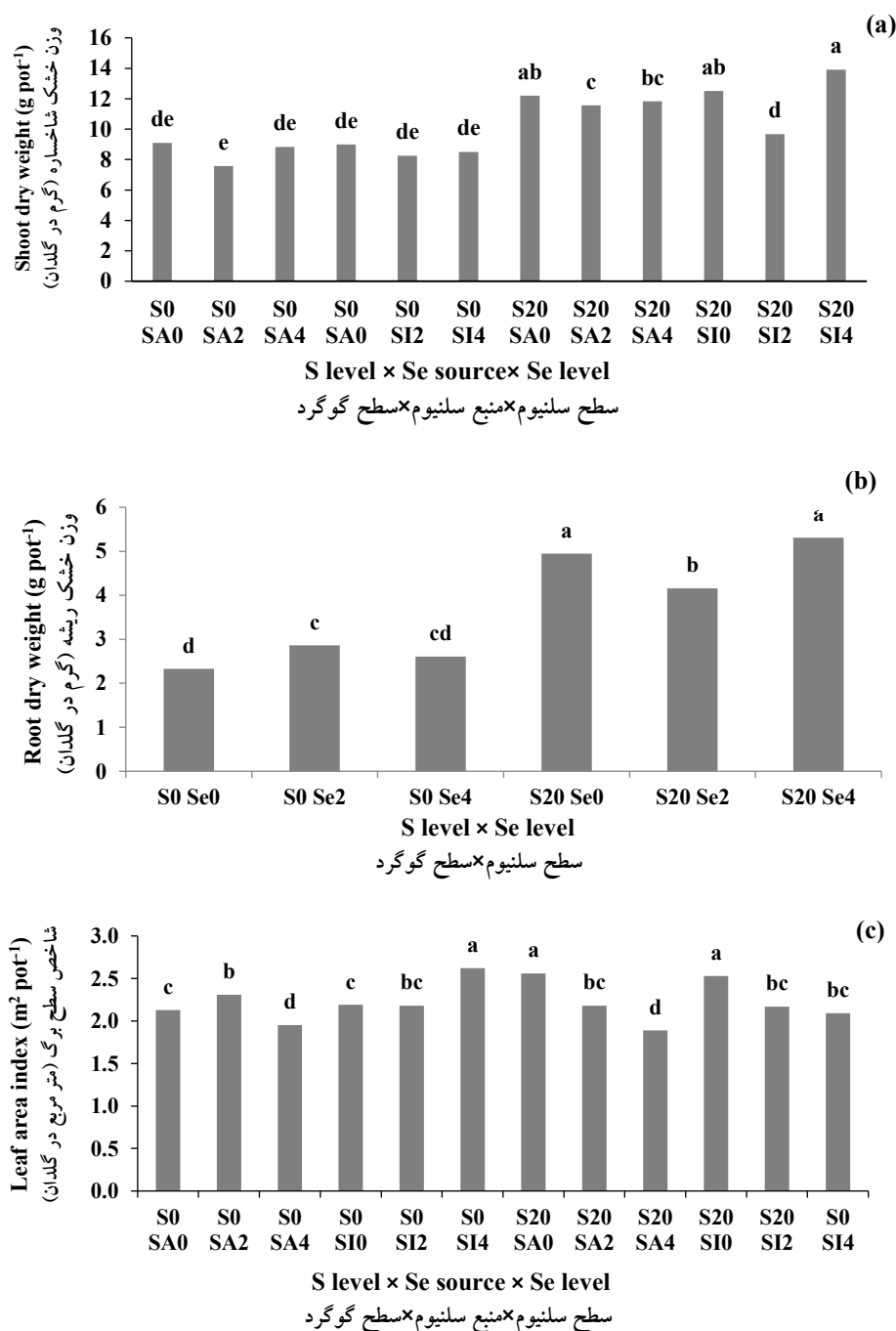
با توجه به نتایج (شکل ۱a)، کاربرد گوگرد باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک شاخساره کلزا نسبت به شرایط بدون کاربرد گوگرد شد (از ۹/۱ گرم به ۱۲/۲ گرم در گلدان معادل ۳۴ درصد افزایش). با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در خاک در تیمارهایی که گوگرد در آن‌ها استفاده شده بود با کاربرد گوگرد، مقدار گوگرد قابل دسترس خاک (در نمونه خاک پس از برداشت گیاه) به ۲۰/۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسید درحالی‌که مقدار آن در نمونه خاک شاهد (بدون گوگرد) ۸/۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم

یافت (Alizadeh et al., 2025).

از لحاظ وزن خشک شاخساره در سطح صفر گوگرد (S_0)، و با مصرف سلیوم، اختلاف معنی‌داری بین تیمارها با شاهد مشاهده نشد (شکل ۱، a). با کاربرد گوگرد (20 میلی گرم بر کیلوگرم)، کاربرد سلیوم در سطح 2 میلی گرم در لیتر از هر دو منبع سلیت و سلنات، باعث کاهش معنی‌دار وزن خشک شاخساره نسبت به تیمار دارای گوگرد و بدون سلیوم شد. مقدار کاهش در منبع سلیت بیش‌تر بود (از $12/2$ گرم در شاهد به $9/67$ گرم در تیمار سلیت، معادل $20/7$ درصد کاهش). در تیمار دارای گوگرد و 4 میلی گرم بر لیتر سلیت، وزن خشک شاخساره نسبت به تیمار شاهد (دارای گوگرد و بدون سلیوم) کاهش نیافت. وزن خشک شاخساره کلزا با جذب گوگرد شاخساره، بیش‌ترین همبستگی مثبت را داشت ($0/97^{**}$). همبستگی این شاخص با غلظت گوگرد شاخساره مثبت ($0/9^{**}$) با وزن خشک ریشه مثبت ($0/89^{**}$)، با غلظت و جذب گوگرد دانه مثبت ($0/64^{**}$) و با وزن دانه کلزا نیز مثبت ($0/63^{**}$) بود.

با توجه به نتایج (شکل ۱، b)، همانند وزن خشک شاخساره، وزن خشک ریشه نیز در تیمار کاربرد گوگرد نسبت به تیمار بدون گوگرد (S_0)، افزایش معنی‌دار یافت (از $2/33$ به $4/95$ گرم در گلدان معادل $12/4$ درصد افزایش). در تیمار صفر گوگرد (S_0) افزودن سلیوم (2 میلی گرم بر لیتر)، سبب افزایش وزن خشک ریشه شد. اما در تیمار مصرف گوگرد (S_{20})، کاربرد 2 میلی گرم بر لیتر سلیوم، سبب کاهش وزن خشک ریشه شد (از $4/95$ به $4/16$ گرم در گلدان معادل 19 درصد کاهش) ولی در تیمار 4 میلی گرم بر لیتر سلیوم، تفاوت معنی‌داری با شاهد نداشت. همانند وزن خشک شاخساره، کاهش رشد ریشه در سطح 2 میلی گرم بر لیتر سلیوم نیز مشاهده شد که این کاهش رشد ریشه می‌تواند بر رشد شاخساره و جذب عناصر ضروری برای رشد مؤثر باشد. وزن خشک ریشه بیش‌ترین همبستگی مثبت را با جذب گوگرد شاخساره کلزا داشت ($0/93^{**}$). همبستگی آن با غلظت گوگرد شاخساره مثبت ($0/91^{**}$)، با وزن خشک شاخساره مثبت ($0/89^{**}$)، با وزن دانه و غلظت گوگرد دانه مثبت

بود (نتایج ارائه نشد). بر اساس پژوهش Faizolah Zadeh Ardabili (2013) با عصاره گیر مونو کلسیم فسفات (500 میلی گرم در لیتر فسفر)، حد بحرانی گوگرد قابل دسترس خاک به روش تصویری کیت و نلسون در کشت گلخانه‌ای 21 میلی گرم بر کیلوگرم به دست آمد. در این پژوهش، حد بحرانی برای روش آب مقطر، کلرید کلسیم $0/01$ مولار و کلرور کلسیم $0/1$ مولار به ترتیب $16/5$ ، $17/14$ و $18/1$ میلی گرم بر کیلوگرم برای گیاه کلزا به دست آمد و با کاربرد 15 و 30 میلی گرم بر کیلوگرم گوگرد به خاک، وزن خشک کلزا به ترتیب $13/7$ و 22 درصد نسبت به شاهد بدون کاربرد گوگرد افزایش یافت. با توجه به این‌که در پژوهش حاضر از روش مونوکلسیم فسفات برای اندازه‌گیری گوگرد قابل دسترس خاک استفاده شد، مقدار گوگرد قابل دسترس خاک در تیمار شاهد (بدون گوگرد) کم‌تر از حد بحرانی ارائه‌شده برای این گیاه بود. گوگرد چهارمین عنصر غذایی موردنیاز کلزا است که برای رشد کافی و مناسب کلزا ضروری است. هر تن کلزا نسبت به گندم مقدار بیش‌تری گوگرد از خاک خارج می‌کند. مقدار کافی گوگرد به شکل سولفات در خاک به‌صورت قابل توجهی رشد رویشی و تولید ماده خشک را افزایش می‌دهد (Mohammad et al., 2024). این افزایش می‌تواند از راه افزایش مقدار کلروفیل و افزایش فعالیت فتوسنتزی در گیاه کلزا حاصل گردد (Chaudhary et al., 2023). اثر گوگرد در بهبود ویژگی‌های مورفولوژیک و رشد ریشه‌ها و معماری ریشه برای حفظ تعادل کلی گیاه لازم است (Abdekhalighi et al., 2023). از طرفی، افزایش عملکرد کلزا در اثر کاربرد گوگرد به افزایش نسبت شاخساره به ریشه، افزایش سطح برگ، وزن تازه برگ، کلروفیل و سرعت فتوسنتز و در عین حال کاهش سرعت تعرق نسبت داده شده است (Szatkowski et al., 2023). نتیجه این پژوهش با نتایج Soudthedlath et al. (2025) همخوانی داشت که کاربرد گوگرد در افزایش درصد روغن و عملکرد کلزا مناسب بوده و اثر مقادیر گوگرد بر عملکرد دانه در سطح یک درصد معنی‌دار بود. در همین مورد، نتایج پژوهشی نشان داد که با کاربرد گوگرد، طول ریشه افزایش و جذب آب و عناصر غذایی نیز بهبود



شکل ۱. اثر تیمارها بر وزن خشک شاخساره (a)، وزن خشک ریشه (b) و شاخص سطح برگ (c). دو سطح صفر و ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم گوگرد به ترتیب با S0 و S1 نشان داده شده اند. سه سطح صفر، ۲ و ۴ میلی گرم در لیتر سولفات به ترتیب با SA0، SA2 و SA4 و سه سطح صفر، ۲ و ۴ میلی گرم در لیتر سولنیت به ترتیب با SI0، SI2 و SI4 نشان داده شده اند. ستون های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی داری در سطح ۵ درصد آزمون دانکن ندارند.

Fig. 1. Effect of treatments on shoot dry weight (a), root dry weight (b) and leaf area index (c). Two levels of zero and 20 mg kg⁻¹ of sulfur are represented by S0 and S1, respectively. Three levels of zero, 2 and 4 mg L⁻¹ of selenate are represented by SA0, SA2 and SA4, respectively, and three levels of zero, 2 and 4 mg L⁻¹ of selenite are represented by SI0, SI2 and SI4, respectively. Columns with at least one common letter do not have significant differences at the 5% level of Duncan's test.

($0/71^{**}$) و با جذب گوگرد دانه نیز مثبت ($0/74^{**}$) بود. در شرایط بدون کاربرد گوگرد، شاخص سطح برگ کلزا در محلول پاشی ۴ میلی گرم بر لیتر از منبع سلنات به صورت معنی داری، نسبت به تیمار شاهد (بدون گوگرد و سلیوم) کاهش یافت (از $2/13$ به $1/95 \text{ cm}^2 \text{ pot}^{-1}$ معادل $9/2$ درصد کاهش) (شکل ۱، c). ولی محلول پاشی ۴ میلی گرم بر لیتر از منبع سلنیت به صورت معنی داری نسبت به تیمار شاهد (بدون گوگرد و سلیوم)، افزایش یافت (از $2/19$ به $2/62 \text{ cm}^2 \text{ pot}^{-1}$ معادل $16/4$ درصد افزایش). کاربرد گوگرد به تنهایی (20 میلی گرم بر کیلوگرم) باعث افزایش معنی دار سطح برگ شد (از $2/13$ به $2/56 \text{ pot}^{-1}$ معادل $20/2$ درصد افزایش). در تیمارهای دارای گوگرد، کاربرد سلیوم از هر دو منبع سلنات و سلنیت باعث کاهش معنی دار سطح برگ نسبت به تیمار شاهد (دارای گوگرد و بدون سلیوم) شد (شکل ۱، c). این کاهش در زمان کاربرد ۴ میلی گرم بر لیتر سلنات بیش تر بود (از $2/56$ به $1/89 \text{ cm}^2 \text{ pot}^{-1}$ معادل $35/4$ درصد کاهش). شاخص سطح برگ کلزا با غلظت سلیوم دانه و جذب سلیوم شاخساره دارای ضریب همبستگی برابر $-0/37^{**}$ و با جذب سلیوم دانه دارای ضریب همبستگی برابر $-0/56^{**}$ بود. در اثر برهمکنش بین سلیوم و برخی از عناصر غذایی از جمله گوگرد، قابلیت جذب سلیوم در خاک کاهش می یابد که سبب جذب کمتر سلیوم در گیاه می شود (Ren et al., 2023). به نظر می رسد که در سازوکار جذب، سلنات به عنوان یون همراه با یون سولفات عمل کرده و به شکل فعال به وسیله ناقل های سولفات به درون سلول های ریشه انتقال یافته و به شاخساره گیاه انتقال می یابد. اغلب، میزان سلیوم در بافت های گیاهی با تغییرات غلظت سلیوم خاک همبستگی معنی داری ندارد زیرا عوامل زیادی از جمله رقابت آنیونی، فراوانی شکل های شیمیایی سلیوم، pH، بافت خاک و کربن آلی بر فراهمی سلیوم در خاک اثرگذار هستند (Jiang et al., 2022). در این شرایط، میزان سلیوم گیاهان با افزودن سلنیت یا سلنات به خاک زیاد می شود. در یک پژوهش، مقایسه بین دو منبع سلنیت سدیم و سلنات سدیم انجام شد که نشان داد بیشترین غلظت سلیوم با

کاربرد سلنات سدیم حاصل شد. جذب و تحرک سلنیت در گیاه کمتر از سلنات است (Xu and Li., 2023). گوگرد به عنوان یک عنصر ضروری در بهبود رشد گیاه نقش دارد. اثر گوگرد در بهبود ویژگی های مورفولوژیک و رشد ریشه ها و معماری ریشه برای حفظ تعادل کلی گیاه لازم بوده و می تواند در بهبود رشد گیاه مؤثر باشد (Abdekhallegi et al., 2023). از طرفی، افزایش عملکرد کلزا در اثر کاربرد گوگرد به افزایش نسبت شاخساره به ریشه، افزایش سطح برگ، وزن تازه برگ، کلروفیل و سرعت فتوسنتز و در عین حال کاهش سرعت تعرق نسبت داده شده است (Szatkowski et al., 2023). نتیجه این پژوهش با نتایج Soudthelath et al. (2025) همخوانی داشت به طوری که کاربرد گوگرد بر عملکرد دانه در سطح یک درصد معنی دار بود. علاوه بر اثر مستقیم گوگرد بر غلظت گوگرد در گیاه، می توان به اثر آن بر کاهش موضعی pH خاک در ریزوسفر نیز اشاره کرد که می تواند منجر به افزایش حلالیت عناصر کم محلول در خاک های آهکی و در نهایت سبب افزایش جذب عناصر دیگر به وسیله ریشه گیاه گردد (Ma et al., 2024). به نظر می رسد که در پژوهش پژوهش حاضر، همین عامل باعث افزایش غلظت عناصر غذایی و وزن دانه شده است. علاوه بر این، گوگرد با افزایش رنگ دانه های فتوسنتزی (کاروتنوئید، کلروفیل کل، کلروفیل a و b) سبب افزایش عملکرد کلزا می شود (Rasheed et al., 2024). در همین راستا، نتایج پژوهشی نشان داد که با کاربرد گوگرد، طول ریشه افزایش و جذب آب و عناصر غذایی نیز بهبود یافت (Alizadeh et al., 2025).

اثر تیمارها بر غلظت و جذب عناصر گوگرد و سلیوم در شاخساره گیاه کلزا

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) اثر اصلی سه تیمار سطح گوگرد ($P<0.01$)، شکل سلیوم ($P<0.05$) و سطح سلیوم ($P<0.05$) بر شاخص درصد گوگرد شاخساره معنی دار بود. اثر اصلی تیمار سطح گوگرد ($P<0.01$) و نیز سطح سلیوم ($P<0.01$) بر مقدار جذب گوگرد شاخساره معنی دار بود.

جدول ۳. تجزیه واریانس ویژگی‌های غلظت و جذب عناصر در شاخساره گیاه کلزا

Table 3. Analysis of variance of concentration and uptake of nutrients in canola shoot

منبع تغییر	درجه آزادی	غلظت گوگرد	جذب گوگرد	غلظت سelenium	جذب سelenium
Source of variation	df	Sulfur concentration	Sulfur uptake	Selenium concentration	Selenium uptake
سطح گوگرد S level	1	2.03**	55301.8**	0.0807**	0.029ns
منبع سelenium Se source	1	0.0748*	1421.58ns	0.020**	1.259*
سطح سelenium Se level	2	0.064*	2824.18**	0.518**	56.459**
سطح گوگرد×منبع سelenium Se source×S level	1	0.003ns	330.18ns	0.003**	0.316ns
سطح گوگرد×سطح سelenium Se level×S level	2	0.0033ns	757.78ns	0.027**	0.105ns
منبع سelenium×سطح سelenium Se source×Se level	2	0.006ns	175.5ns	0.005**	0.412ns
سطح گوگرد×منبع سelenium×سطح سelenium Se source×Se level×S level	2	0.002ns	387.6ns	0.0008ns	0.532ns
خطا Error	24	0.0151	446.5	0.0003	0.175
ضریب تغییرات C.V.	-	15.3	24	7.2	16.6

** و * به ترتیب نشان‌دهنده اثر معنی‌دار تیمارها در سطوح ۱ و ۵ درصد و ns بیانگر اثر غیرمعنی‌دار است.

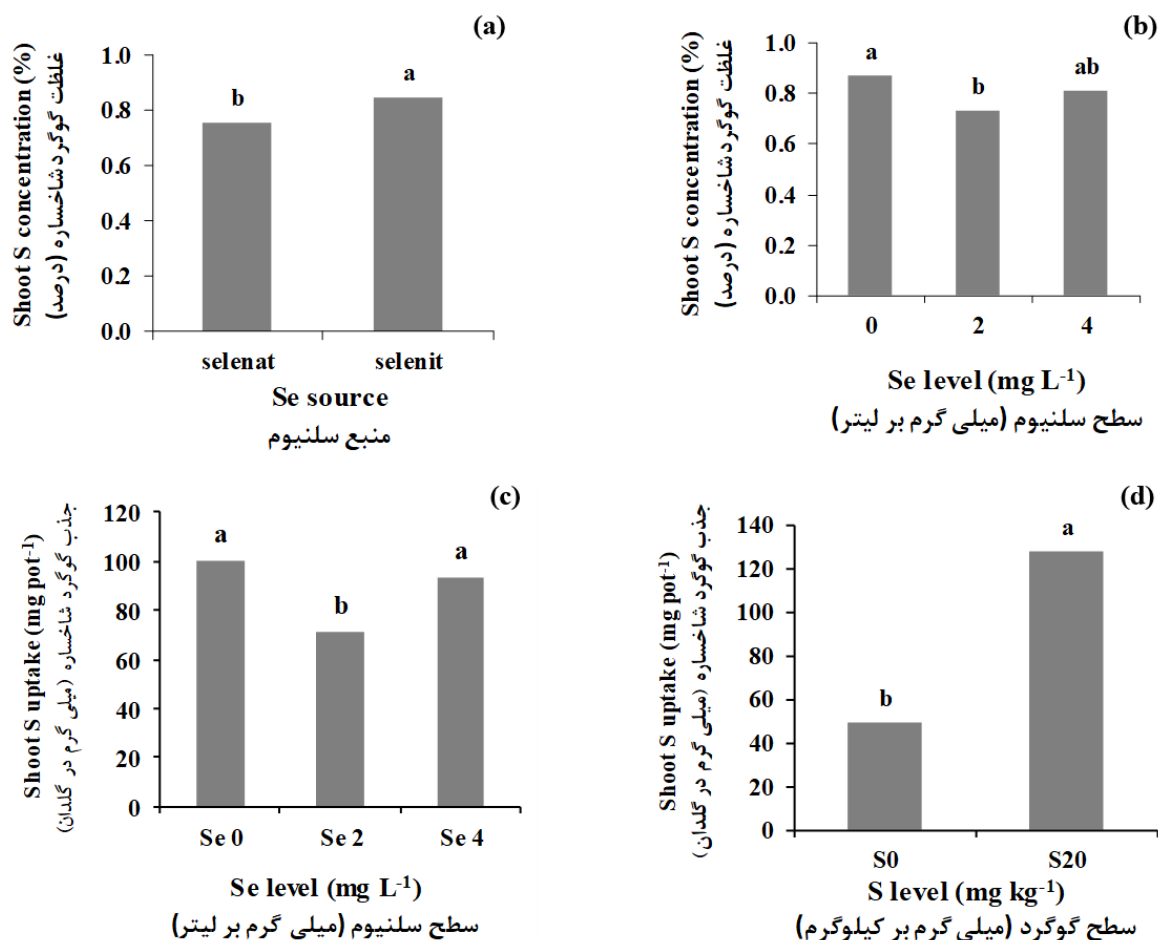
** and * indicates the significant effect of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ns indicates no significant difference.

برهمکنش‌های دوگانه سطح گوگرد×منبع سelenium ($P<0.01$)، سطح گوگرد×سطح سelenium ($P<0.01$) و منبع سelenium×سطح سelenium ($P<0.01$) بر غلظت سelenium شاخساره معنی‌دار بود ($P<0.01$). اثر منبع سelenium ($P<0.05$) و سطح سelenium ($P<0.01$) بر جذب سelenium شاخساره معنی‌دار بود. انتقال یون سلنات در گیاه با مکانیسم آپوپلاستی بوده و اغلب گیاهان، سelenium بیشتری در شاخساره نسبت به ریشه تجمع می‌دهند. بافت‌های گیاهی با رشد سریع، غلظت سelenium بیشتری دارند (de Souza Cardoso et al., 2022).

غلظت و جذب گوگرد در شاخساره گیاه کلزا

کاربرد گوگرد به مقدار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم باعث افزایش

معنی‌دار غلظت گوگرد شاخساره کلزا شد (از ۵۶۶/۰ درصد در تیمار شاهد به ۱۰۴/۰ درصد، معادل ۸۴ درصد افزایش). وزن خشک ریشه بیش‌ترین همبستگی را با جذب گوگرد شاخساره کلزا داشت ($r^{**}=0.93$). ضریب همبستگی آن با غلظت گوگرد شاخساره برابر $r^{**}=0.91$ ، با وزن خشک شاخساره برابر $r^{**}=0.89$ بود. وزن خشک شاخساره کلزا با جذب گوگرد شاخساره، بیش‌ترین همبستگی را داشت ($r^{**}=0.97$) و ضریب همبستگی این شاخص با غلظت گوگرد شاخساره برابر $r^{**}=0.90$ بود. با کاربرد سطح ۲ میلی‌گرم بر لیتر سelenium، غلظت گوگرد شاخساره نسبت به تیمار بدون سelenium، کاهش معنی‌دار یافت (۷۵۸/۰ نسبت به ۸۴۸/۰ درصد، معادل ۱۶/۱ درصد کاهش) (شکل ۲، a).



شکل ۲. اثر ساده تیمارها بر غلظت (a و b) و جذب گوگرد (c و d) شاخساره کلزا. دو سطح صفر و ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم گوگرد به ترتیب با S0 و S20 نشان داده شده‌اند. سه سطح صفر، ۲ و ۴ میلی گرم در لیتر سelenium به ترتیب با Se0، Se2 و Se4 نشان داده شده‌اند. ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن ندارند.

Fig. 2. Effect of treatments on sulfur concentration (a and b) and uptake (c and d) in canola shoots. Two levels of zero and 20 mg kg⁻¹ of sulfur are indicated by S0 and S20, respectively. Three levels of zero, 2 and 4 mg L⁻¹ of selenium are indicated by Se0, Se2 and Se4, respectively. Columns with at least one common letter have no significant difference at the 5% level of Duncan's test.

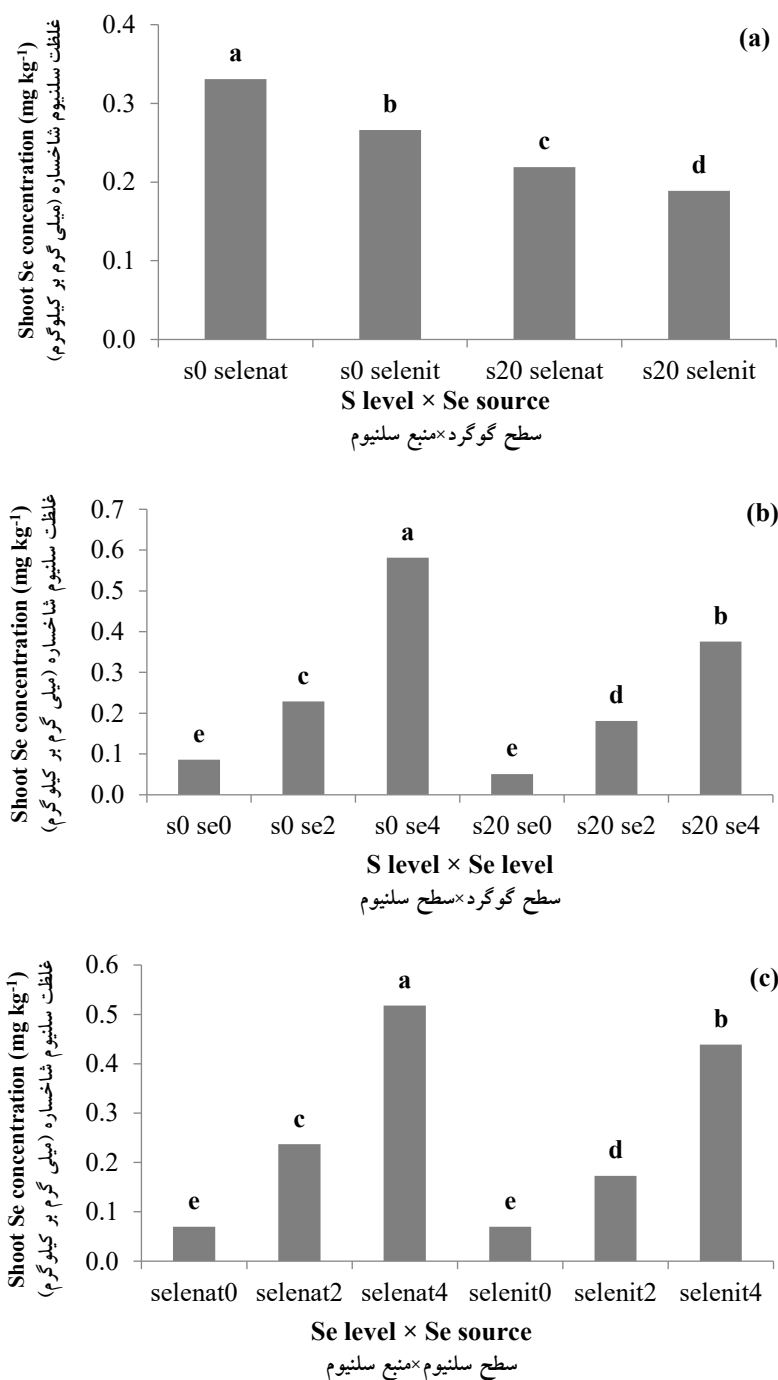
ریشه‌ها و شاخساره گیاهان به روش‌های متفاوتی برای دو منبع سelenit و سelenat مؤثر باشد. با توجه به نتایج (شکل ۲، c) اختلاف معنی‌دار بین سطوح گوگرد در جذب گوگرد توسط گیاه وجود داشت به‌طوری‌که با افزایش سطح گوگرد، میزان جذب گوگرد نیز افزایش یافت (از ۴۹/۱ میلی گرم در گلدان به ۱۲۷/۵ میلی گرم در گلدان). سطح سelenium نیز بر مقدار جذب گوگرد شاخساره مؤثر بود. کم‌ترین میزان جذب گوگرد مربوط به سطح ۲ میلی گرم بر لیتر بود. بین شاهد و سطح ۴ میلی گرم بر لیتر سelenium از لحاظ مقدار جذب گوگرد، اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۲، d).

ولی کاربرد سطح ۴ میلی گرم بر لیتر سelenium، کاهش معنی‌داری در غلظت گوگرد شاخساره کلزا ایجاد نکرد. با کاربرد منبع سelenat، غلظت گوگرد شاخساره کلزا به‌صورت معنی‌داری نسبت به کاربرد منبع سelenit کاهش یافت (۷۵/۸٪ نسبت به ۸۴/۸٪ معادل ۱۱/۹ درصد تفاوت در غلظت گوگرد دو منبع سelenium) (شکل ۲، b). در پژوهش Hawrylak-Nowak (2013) دو منبع مختلف سelenit و سelenat و مقدار مختلف آن‌ها به گونه متفاوتی بر غلظت گوگرد شاخساره اثر گذاشتند. نتایج آن‌ها نشان داد که وجود سelenium در محیط رشد (غلظت ۱۵ میلی مولار) می‌تواند بر تجمع و توزیع گوگرد بین

اثر برهمکنش دوگانه تیمارهای آزمایش بر غلظت و جذب سلنیوم شاخساره گیاه کلزا

با توجه به نتایج (شکل ۳، a) در تیمارهای محتوی سلنیوم از هر دو منبع سلنات و سلنیت، کاربرد گوگرد باعث کاهش معنی‌دار غلظت سلنیوم شاخساره کلزا شد (به ترتیب ۳۳/۸ درصد در سلنات و ۲۸/۹ درصد در سلنیت). در زمان کاربرد سلنات، غلظت سلنیوم بیش‌تر از زمان کاربرد سلنیت بود (چه در زمان کاربرد گوگرد و چه بدون کاربرد گوگرد). در تیمارهای محتوی سلنیوم، کاربرد گوگرد باعث کاهش معنی‌دار غلظت سلنیوم در شاخساره کلزا شد. به‌طور مثال در تیمار ۲ میلی گرم بر لیتر سلنیوم و بدون گوگرد، غلظت سلنیوم شاخساره ۰/۲۲۹ میلی گرم بر کیلوگرم و در تیمار ۲ میلی گرم بر لیتر سلنیوم و همراه با گوگرد، غلظت سلنیوم شاخساره ۰/۱۸۱ میلی گرم بر کیلوگرم بود (معادل ۲۰/۹۷ درصد کاهش). این کاهش در تیمار ۴ میلی گرم بر لیتر سلنیوم معادل ۳۵/۳ درصد بود (از ۰/۵۸۱ به ۰/۳۷۶ میلی گرم بر کیلوگرم) (شکل ۳، b). در پژوهش Liu et al. (2017) نیز کاربرد گوگرد باعث کاهش غلظت سلنیوم از هر دو منبع سلنات و سلنیت شد. هر چه تجمع گوگرد در بافت گیاهی بیش‌تر باشد (در نتیجه مصرف گوگرد)، آستانه مقاومت گیاه نسبت به سمیت سلنیوم بیش‌تر می‌شود، زیرا مقدار بیش‌تری از گوگرد به کارکردهای ضروری گیاه از جمله اثر محافظتی اختصاص داده می‌شود (Kikkert et al., 2013). با توجه به نتایج (شکل ۳، c) کاربرد سلنیوم از منبع سلنات باعث ایجاد غلظت بیش‌تر سلنیوم در شاخساره کلزا نسبت به منبع سلنیت شد و این تفاوت معنی‌دار در هر دو سطح سلنیوم استفاده‌شده، مشاهده شد. به‌طور مثال در تیمار ۲ میلی گرم بر لیتر سلنیوم و بدون گوگرد، غلظت سلنیوم شاخساره ۰/۲۲۹ میلی گرم بر کیلوگرم و در تیمار ۲ میلی گرم بر لیتر سلنات، غلظت سلنیوم شاخساره ۰/۲۳۷ میلی گرم بر کیلوگرم بود و در تیمار ۲ میلی گرم بر لیتر سلنیت، غلظت سلنیوم شاخساره ۰/۱۷۳ میلی گرم بر کیلوگرم بود (معادل ۲۷ درصد اختلاف). در سطح ۴ میلی گرم بر لیتر سلنیوم، این اختلاف ۱۵/۳ درصد بود. میزان سلنیوم در گیاهان تیمار شده با سلنات سدیم به دلیل تحرک

بیش‌تر آن نسبت به سلنیت سدیم بیش‌تر است. نتایج پژوهشگران نشان داد که کاربرد سلنیوم به شکل سلنات سدیم نسبت به سلنیت سدیم سبب افزایش قابل توجه میزان سلنیوم در شاخساره و ریشه گیاه کلزا می‌شود (Sharma, et al., 2010). میل ترکیبی بین گیرنده‌های سولفات و سلنات علت تفاوت بین سلنات و سلنیت است که سبب تسهیل در جذب و انتقال سلنیوم می‌شود (Zhang et al., 2003). همچنین غلظت سلنیوم در شاخساره با افزایش غلظت سلنیوم مصرفی متفاوت بود. غلظت سلنیوم در گیاهان کلزا بیش‌تر از گندم بود (۳ تا ۱۷ برابر). بر اساس توصیه سازمان بهداشت جهانی، نیاز روزانه یک فرد بالغ به سلنیوم در حدود ۵۰ میکروگرم بوده اما بیش‌تر گیاهان از نظر میزان سلنیوم فقیر هستند. در حالی که کلزا توانایی جذب سلنیوم خوبی از خود نشان داده است و همین مسئله ضرورت غنی‌سازی محصولات کشاورزی با سلنیوم را به خوبی مشخص می‌نماید. چون مسیر جذب سلنات و سلنیت به ترتیب از راه ناقلین سولفات و فسفات انجام می‌شود، تفاوت در فعالیت این ناقلین می‌تواند بر مقدار جذب سلنیوم مؤثر باشد (Kikkert and Edward Berkelaar, 2013). تفاوت در میزان انتقال سلنیوم از دو منبع در درون اندام گیاهی نیز می‌تواند باعث ایجاد تفاوت در غلظت و جذب سلنیوم در گیاه کلزا گردد. البته در گزارش آن‌ها به میزان جذب و انتقال از راه ریشه (نه محلول‌پاشی از راه برگ) اشاره شده است. در روش محلول‌پاشی، مقدار انتقال به میزان بارگذاری آوند آبکش و مقدار تنفس گیاه بستگی دارد. کاربرد سلنیوم از منبع سلنات باعث جذب مقدار بیش‌تر سلنیوم در شاخساره گیاه کلزا نسبت به منبع سلنیت شد (۲/۷۱ در برابر ۲/۳۳ میکروگرم در گلدان) که این اختلاف معنی‌دار بود (نتایج ارائه نشده است). بین سطوح سلنیوم مصرف‌شده و مقدار جذب آن توسط گیاه اختلاف معنی‌دار وجود داشت، به‌طوری‌که با افزایش سطح مصرف سلنیوم میزان جذب نیز افزایش پیدا کرد (از ۰/۷۴۶ میکروگرم در گلدان در شاهد به ۱/۸۷۷ در تیمار ۲ میلی گرم در لیتر و ۴/۹۳۸ میکروگرم در گلدان در تیمار ۴ میلی گرم در لیتر) (نتایج ارائه نشد). تفاوت بین سطح ۲ و ۴ میلی گرم در لیتر نیز معنی‌دار بود.



شکل ۳. اثر برهمکنش دوگانه سطح گوگرد × سطح سلینیوم (a و b) و سطح سلینیوم × منبع سلینیوم (c) بر غلظت سلینیوم در شاخساره گیاه کلزا. دو سطح صفر و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم گوگرد با s0 و s20 نشان داده شده‌اند. سه سطح صفر، ۲ و ۴ میلی‌گرم در لیتر سلینیوم به ترتیب با se0، se2 و se4 نشان داده شده‌اند. ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن ندارند.

Fig. 3. The interaction effect of sulfur level × selenium level (a and b) and selenium level × selenium source (c) on selenium concentration in canola shoot. Two levels of zero and 20 mg kg⁻¹ of sulfur are indicated by s0 and s20. Three levels of zero, 2 and 4 mg L⁻¹ of selenium are indicated by se0, se2 and se4, respectively. Columns with at least one common letter have no significant difference at the 5% level of Duncan's test.

جدول ۴. تجزیه واریانس صفات اندازه گیری شده در دانه کلزا

Table 4. Analysis of variance of measured traits in canola seed

منبع تغییر	درجه آزادی	غلظت گوگرد	جذب گوگرد	وزن دانه	غلظت سلیوم	جذب سلیوم
Source of variation	df	Sulfur concentration	Sulfur uptake	Grain weight	Selenium concentration	Selenium uptake
سطح گوگرد S level	1	0.2214**	684.9**	19.82**	0.005**	1.95**
منبع سلیوم Se source	1	0.0003 ^{ns}	8.066 ^{ns}	3.552**	0.0001**	1.28**
سطح سلیوم Se level	2	0.0048 ^{ns}	14.48**	0.318*	0.831**	6.799**
سطح گوگرد × منبع سلیوم Se source × S level	1	0.01289**	13.79 ^{ns}	0.232 ^{ns}	0.00003 ^{ns}	0.0136 ^{ns}
سطح گوگرد × سطح سلیوم Se level × S level	2	0.00867*	11.27 ^{ns}	0.324*	0.0006**	0.258**
منبع سلیوم × سطح سلیوم Se source × Se level	2	0.00277 ^{ns}	24.26 ^{ns}	1.65**	0.0002**	0.9662**
سطح گوگرد × منبع سلیوم × سطح سلیوم Se source × Se level × S level	2	0.0037 ^{ns}	14.28 ^{ns}	0.353*	0.00008**	0.086**
خطا Error	24	0.002	3.79	0.063	0.00001	0.0127
ضریب تغییرات C.V.	-	15	22	8.1	0.84	9.4

** و * به ترتیب نشان دهنده اثر معنی دار تیمارها در سطوح ۱ و ۵ درصد و ns بیانگر اثر غیرمعنی دار است.

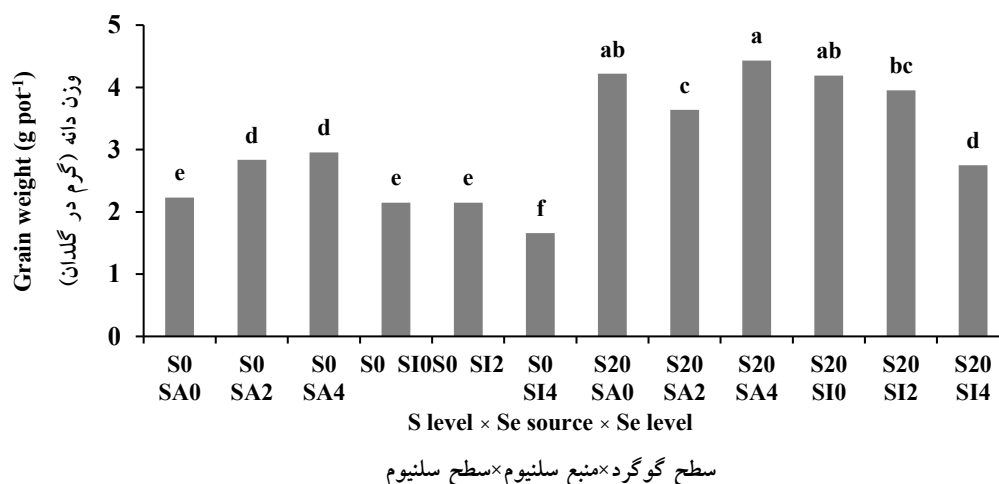
** and * indicates the significant effect of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ns indicates no significant difference.

در پروتئین را محدود می کنند. ایجاد این محدودیت از مسیر تبدیل سلیوم به سلنوامینواسیدهای غیرپروتئینی محلول انجام می گیرد. غلظت های کم سلیوم سبب افزایش فتوسنتز، نفوذپذیری سلولی و تحریک واکنش های اکسیداتیو هم شده و سبب بهبود رشد گیاه می شود (Liu et al., 2022). توانایی انباشتگی و تحمل به مقادیر زیاد سلیوم ارتباط زیادی با سازوکارهای سلیوم در بین گیاهان دارد (Niazy, 2021).

اثر تیمارهای آزمایش بر وزن دانه، غلظت و جذب عناصر گوگرد و سلیوم در دانه کلزا

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۴)، اثر برهمکنش سه تیمار (مقدار گوگرد × سطح سلیوم × منبع سلیوم) بر

غنی سازی تولیدات کشاورزی با سلیوم، یک راهکار برای افزایش کیفیت این محصولات با هدف بهبود و ارتقای تغذیه در انسان است. سلیوم، عنصری ضروری برای انسان بوده و مهم ترین راه تأمین آن برای بدن انسان، محصولات گیاهی هستند. عنصر سلیوم برای گیاهان ضروری محسوب نمی شود اما شواهدی وجود دارد که این عنصر نقش های فیزیولوژیک مختلفی در برخی از گیاهان دارد. پس از ورود به گیاه، سلیت یا سلنات می تواند جایگزین گروه سولفیدریل در پروتئین های دارای گوگرد شوند. پژوهش ها نشان داده است که سلیوم با شرکت در فرآیندهای آسمیلاسیون گوگرد، نقش ویژه ای در تشکیل آمینواسیدهای گوگردی دارد (Mohammadi and Ghahfarokhi, 2023). گیاهان دارای توانایی ذخیره سلیوم، واکنش های سلنوامینواسیدها



شکل ۴. اثر برهمکنش سطح گوگرد × منبع سelenium × سطح سelenium بر وزن دانه کلزا. دو سطح صفر و ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم گوگرد به ترتیب با S0 و S1 نشان داده شده‌اند. سه سطح صفر، ۲ و ۴ میلی گرم در لیتر سلفات به ترتیب با SA0، SA2 و SA4 و سه سطح صفر، ۲ و ۴ میلی گرم در لیتر سولنیت به ترتیب با SI0، SI2 و SI4 نشان داده شده‌اند. ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد آزمون دانکن ندارند.

Fig. 4. Interaction effect of sulfur level × selenium source × selenium level on canola grain weight. Two levels of zero and 20 mg kg⁻¹ of sulfur are represented by S0 and S1, respectively. Three levels of zero, 2 and 4 mg L⁻¹ of selenate are represented by SA0, SA2 and SA4, respectively, and three levels of zero, 2 and 4 mg L⁻¹ of selenite are represented by SI0, SI2 and SI4, respectively. Columns with at least one common letter do not have significant differences at the 5% level of Duncan's test.

اثر تیمارهای آزمایش بر وزن دانه کلزا

با توجه به نتایج (شکل ۴) در هر یک از تیمارهای بدون گوگرد، مقدار وزن دانه کم‌تر از تیمارهای دارای گوگرد بود. در تیمار شاهد بدون گوگرد و سelenium، افزودن گوگرد باعث افزایش وزن دانه از ۲/۲۳ به ۴/۲۲ گرم در گلدان افزایش یافت (۸۹ درصد افزایش). در تیمارهای بدون گوگرد افزودن سelenium از منبع سلفات باعث افزایش وزن دانه شد. تفاوت دو سطح ۲ و ۴ میلی گرم بر لیتر در این منبع با شاهد (بدون گوگرد و سelenium) معنی‌دار بود (افزایش از ۲/۲۳ به ۲/۸۴ و ۲/۹۶ گرم در گلدان به ترتیب در تیمار ۲ و ۴ میلی گرم بر لیتر سلفات) ولی تفاوت بین دو سطح سلفات معنی‌دار نبود. ولی در منبع سولنیت، کاربرد ۴ میلی گرم بر لیتر سelenium، باعث کاهش معنی‌دار وزن دانه شد (از ۲/۱۵ به ۱/۶۶ گرم در گلدان معادل ۲۲/۸ درصد کاهش) (شکل ۴). در زمان کاربرد گوگرد، کاربرد سلفات در سطح ۲ میلی گرم بر لیتر، باعث کاهش معنی‌دار وزن دانه نسبت به شاهد (دارای گوگرد و بدون

شاخص وزن دانه کلزا، معنی‌دار بود ($P < 0.05$). برهمکنش سطح گوگرد × منبع سelenium و برهمکنش سطح گوگرد × سطح سelenium بر غلظت گوگرد دانه معنی‌دار بود (به ترتیب $P < 0.01$ و $P < 0.05$). اثر اصلی سطح گوگرد ($P < 0.01$) و نیز اثر اصلی سطح سelenium ($P < 0.01$) بر جذب گوگرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۴). اثر برهمکنش سه گانه سطح گوگرد × سطح سelenium × منبع سelenium بر غلظت سelenium دانه معنی‌دار بود ($P < 0.01$). اثر برهمکنش سه تیمار بر شاخص جذب سelenium دانه نیز، معنی‌دار بود ($P < 0.01$). در بافت‌های گیاهی به دلیل مشابهت ویژگی‌های عملکردی، گوگرد ارتباط نزدیکی با سelenium دارد. سلفوآمینواسیدها به ویژه سلفوتیونین و سلفوسیتئین دارای سelenium و گوگرد بوده و ضمن ورود به ترکیبات پروتئینی، نقش همراهی دو عنصر ذکر شده در بافت‌های گیاهی را به خوبی نشان می‌دهند (Boldrin et al., 2016).

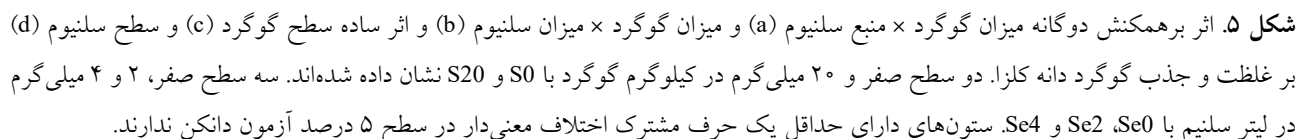
سلنیت و سلنات، غلظت گوگرد دانه کلزا افزایش یافت ولی مقدار افزایش در تیمار محتوی سلنیت ۱۳/۵ درصد بیش تر از سلنات بود (۳۶۲/۰ درصد در برابر ۳۱۹/۰ درصد).

در تیمار بدون گوگرد و بدون سلنیوم، غلظت گوگرد دانه ۲۰۸/۰ درصد بود که با کاربرد گوگرد و بدون سلنیوم به ۳۲۷/۰ درصد رسید (۵۷/۲ درصد افزایش). در شرایط بدون کاربرد گوگرد، محلول پاشی دو سطح ۲ و ۴ میلی گرم بر لیتر سلنیوم، اثر معنی داری بر غلظت گوگرد دانه نداشت (شکل ۵، a و b). ولی در شرایط کاربرد گوگرد، محلول پاشی مقدار ۲ میلی گرم بر لیتر سلنیوم، باعث افزایش غلظت گوگرد دانه شد (از ۳۲۷/۰ درصد به ۳۸۸/۰ درصد معادل ۱۸/۷ درصد افزایش). در سطح ۴ میلی گرم بر لیتر سلنیوم، اثر معنی دار بر غلظت گوگرد دانه نداشت (۳۰۷/۰ در مقابل ۳۲۷/۰ درصد) (شکل ۵، a و b). با کاربرد گوگرد (۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم)، مقدار جذب گوگرد دانه از ۴/۴۷ میلی گرم در گلدان در تیمار شاهد (بدون گوگرد) به ۱۳/۱۹ میلی گرم در گلدان، افزایش یافت (۹۵ درصد افزایش) (شکل ۵، c). کاربرد ۴ میلی گرم بر لیتر سلنیوم، مقدار جذب گوگرد دانه را به صورت معنی داری نسبت به سطح ۲ میلی گرم بر لیتر سلنیوم، کاهش داد (۲۱/۱ درصد کاهش) (شکل ۵، d). ضرایب همبستگی غلظت گوگرد دانه با جذب گوگرد دانه برابر 0.95^{**} ، با غلظت گوگرد شاخساره برابر 0.81^{**} ، با وزن دانه برابر 0.75^{**} ، با وزن خشک ریشه برابر 0.71^{**} و با وزن شاخساره برابر 0.63^{**} بود. همبستگی غلظت گوگرد دانه با این شاخص ها به صورت مثبت بود. ضرایب همبستگی جذب گوگرد دانه با غلظت گوگرد دانه برابر 0.95^{**} ، با غلظت گوگرد شاخساره برابر 0.81^{**} ، با وزن دانه برابر 0.9^{**} ، با وزن خشک ریشه برابر 0.74^{**} ، با وزن شاخساره برابر 0.74^{**} بود. همبستگی جذب گوگرد دانه با این شاخص ها نیز مثبت بود. علاوه بر اثر مستقیم گوگرد بر غلظت گوگرد در گیاه، می توان به اثر آن بر کاهش موضعی pH خاک در ریزوسفر نیز اشاره کرد که منجر به افزایش حلالیت عناصر کم محلول در خاک های آهکی و در نهایت سبب افزایش جذب

سلنیوم) شد (۳/۶۴ در مقایسه با ۴/۲۲ معادل ۱۳/۷ درصد کاهش). ولی در سطح کاربرد ۴ میلی گرم بر لیتر این ترکیب، کاهش به وجود نیامد. در زمان کاربرد ۴ میلی گرم بر لیتر از منبع سلنیت همراه با کاربرد گوگرد، مقدار وزن دانه به صورت معنی داری نسبت به شاهد (دارای گوگرد و بدون سلنیوم) کاهش یافت (از ۴/۱۹ به ۲/۷۵ گرم در گلدان معادل ۳۴/۴ درصد کاهش) (شکل ۴). پس در شرایطی مشابه این آزمایش و بدون کاربرد گوگرد، کاربرد سلنیوم از منبع سلنات در هر دو سطح ۲ و ۴ میلی گرم بر لیتر می تواند باعث بهبود وزن دانه شود. با توجه به تفاوت غیر معنی دار بین دو سطح، ترجیحاً سطح ۲ میلی گرم بر لیتر قابل پیشنهاد است. ولی در زمان کاربرد گوگرد هیچ یک از دو منبع سلنیوم باعث افزایش معنی دار وزن دانه نشد (شکل ۴). وزن دانه کلزا، بیش ترین همبستگی را با جذب گوگرد دانه داشت (0.9^{**}). ضرایب همبستگی آن با غلظت گوگرد دانه برابر 0.75^{**} ، با غلظت گوگرد شاخساره برابر 0.73^{**} ، با وزن خشک ریشه 0.71^{**} ، با جذب گوگرد شاخساره برابر 0.69^{**} ، با وزن خشک شاخساره برابر 0.63^{**} و با جذب سلنیوم دانه برابر 0.35^{**} بود. بنابراین به نظر می رسد غلظت و جذب گوگرد در دانه بیش ترین اثر را بر شاخص وزن دانه داشته باشد. حتی غلظت گوگرد شاخساره نیز بر شاخص وزن دانه مؤثر بود. ولی شاخص وزن خشک ریشه نسبت به شاخص وزن خشک شاخساره، همبستگی بیشتری با وزن دانه داشت که نشان از اهمیت ریشه در تولید دانه مناسب در گیاه کلزا دارد. عملکرد کلزا تابع اجزای عملکرد از جمله وزن دانه است. در تایید نتایج پژوهش حاضر، اثر مثبت محلول پاشی سلنیوم در مقایسه با بدون محلول پاشی بر وزن دانه کلزا گزارش شده است (Mohtashami et al., 2023). همچنین در بررسی آثار محلول پاشی و بذرمال سلنیوم مشخص شد که آثار مثبت سلنیوم بیشتر مربوط به مهار آنتی اکسیدان ها در گیاه بود (Mohtashami et al., 2021).

اثر تیمارهای آزمایش بر درصد و جذب گوگرد دانه

بر اساس نتایج (شکل ۵)، با افزودن گوگرد به تیمارهای محتوی



۱۷

سلنیوم گیاهان با افزودن سلنیت یا سلنات به خاک زیاد می‌شود. در یک پژوهش، مقایسه بین دو منبع سلنیت سدیم و سلنات سدیم انجام شد که نشان داد بیشترین غلظت سلنیوم با کاربرد سلنات سدیم حاصل شد. جذب و تحرک سلنیت در گیاه کمتر از سلنات است (Xu and Li., 2023). در بافت‌های گیاهی به دلیل مشابهت ویژگی‌های عملکردی، گوگرد ارتباط نزدیکی با سلنیوم دارد. سلنوآمینواسیدها به‌ویژه سلنومتیونین و سلنوسیتستین دارای سلنیوم و گوگرد بوده و ضمن ورود به ترکیبات پروتئینی، نقش همراهی دو عنصر ذکرشده در بافت‌های گیاهی را به‌خوبی نشان می‌دهند (Boldrin et al., 2016). در تایید نتایج پژوهش حاضر، اثر مثبت محلول‌پاشی سلنیوم در مقایسه با بدون محلول‌پاشی بر وزن دانه کلزا گزارش شده است (Mohtashami et al., 2023). همچنین در بررسی آثار محلول‌پاشی و بذرمال سلنیوم مشخص شد که آثار مثبت سلنیوم بیشتر مربوط به مهار آنتی‌اکسیدان‌ها در گیاه بود (Mohtashami et al., 2021). غلظت سلنیوم دانه در تیمار سلنات، بیش‌تر از تیمار سلنیت بود و کاربرد گوگرد، باعث کاهش غلظت سلنیوم از هر دو منبع شد. این نتایج نشان می‌دهد که منبع سلنات، مناسب‌تر از منبع سلنیت برای افزایش غلظت سلنیوم دانه است. نتایج مشابه این در گیاه کاهو در چین نیز مشاهده شد که مقدار جذب سلنیوم در سلنات بیش‌تر از منبع سلنیت بود (Li et al., 2022).

نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های این پژوهش می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که در شرایط بدون کاربرد گوگرد، کاربرد سلنیوم از منبع سلنات در هر دو سطح ۲ و ۴ میلی‌گرم بر لیتر، باعث بهبود وزن دانه شد. کاربرد سلنیوم از منبع سلنات باعث جذب مقدار بیش‌تر سلنیوم در شاخساره و دانه کلزا نسبت به منبع سلنیت شد. با افزایش سطح مصرف سلنیوم، میزان جذب نیز افزایش پیدا کرد. جذب سلنیوم در شاخساره کلزا اثر مثبتی بر جذب سلنیوم دانه کلزا داشت. در دانه، کاربرد ۴ میلی‌گرم بر لیتر سلنیوم، مقدار جذب گوگرد دانه را به‌صورت معنی‌داری نسبت به سطح ۲ میلی‌گرم بر

عناصر دیگر به‌وسیله ریشه گیاه می‌گردد (Ma et al., 2024). به نظر می‌رسد در پژوهش حاضر همین عامل باعث افزایش غلظت عناصر غذایی، وزن دانه و افزایش عملکرد کلزا شده است. علاوه بر این، گوگرد با افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی (کاروتنوئید، کلروفیل کل، کلروفیل a و b) سبب افزایش عملکرد کلزا می‌شود (Rasheed et al., 2024).

محلول‌پاشی سلنیوم به‌ویژه در زمانی که رشد برگ‌ها به حد مناسبی رسیده است اثر منفی بر جذب گوگرد ندارد زیرا جذب گوگرد پیش از محلول‌پاشی و از خاک انجام شده است. عنصر سلنیوم برای گیاهان ضروری محسوب نمی‌شود اما شواهدی وجود دارد که این عنصر نقش‌های فیزیولوژیک مختلفی در برخی از گیاهان دارد. پژوهش‌ها نشان داده است که سلنیوم با شرکت در فرآیندهای آسیمیلاسیون گوگرد، نقش ویژه‌ای در تشکیل آمینواسیدهای گوگردی دارد (Mohammadi and Ghahfarokhi, 2023). توانایی انباشتگی و تحمل به مقادیر زیاد سلنیوم ارتباط زیادی با سازوکارهای سلنیوم در بین گیاهان دارد (Niazy, 2021). یکی از موارد مهم در بحث غنی‌سازی عنصر سلنیوم، باریک بودن مرز بین کمبود و سمیت سلنیوم و وابستگی آن به شکل‌های شیمیایی سلنیوم است. در هر صورت، سلنیوم و گوگرد هم مانند سایر عناصر، در سطوح بالا اثر منفی بر رشد گیاه دارند. به‌نظر می‌رسد که در سازوکار جذب، سلنات به عنوان یون همراه با یون سولفات عمل کرده و به شکل فعال بوسیله ناقل‌های سولفات به درون سلول‌های ریشه انتقال یافته و به بخش‌های هوایی گیاه انتقال می‌یابد. اغلب، میزان سلنیوم در بافت‌های گیاهی با تغییرات غلظت سلنیوم خاک همبستگی معنی‌داری ندارد زیرا عوامل زیادی از جمله رقابت آنیونی، فراوانی شکل‌های شیمیایی سلنیوم، pH، بافت و کربن آلی بر فراهمی سلنیوم در خاک اثرگذار هستند (Jiang et al., 2022). با توجه به این‌که محلول‌پاشی سلنیوم پیش از مرحله گل‌دهی انجام شد، سلنیوم علاوه بر جذب از راه ریشه، از راه برگ نیز به دانه‌ها منتقل شده است. به نظر می‌رسد مقدار جابجایی از اندام برگ و ساقه به دانه در تیمار سلنات بیش‌تر از سلنیت بوده است. در این شرایط، میزان

تشکر و سپاسگزاری

از گروه خاکشناسی پردیس کشاورزی دانشگاه تهران و موسسه تحقیقات خاک و آب کرج، بابت امکانات ارائه شده برای اجرای این آزمایش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

تضاد منافع

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

لیتر سلنیوم، افزایش داد. برای رشد بهینه و تولید بیش‌تر دانه و روغن در گیاه کلزا، فراهم کردن مقدار مناسب گوگرد در اولویت قرار دارد. نتایج نشان داد که کاربرد سلنیوم از منبع سلنات با غلظت ۴ میلی‌گرم بر لیتر، باعث افزایش غلظت این عنصر در دانه برای در نظر گرفتن شرایط غنی‌سازی دانه گردید. میانگین غلظت و جذب گوگرد شاخساره، بیش‌تر از غلظت و جذب گوگرد دانه بود. پژوهش‌های دیگری درباره اثر روش‌های مختلف کاربرد گوگرد و سلنیوم بر کلزا به‌ویژه در شرایط تنش‌های محیطی نقش این عناصر را در فیزیولوژی گیاه کلزا بیشتر مشخص می‌نماید.

References

منابع مورد استفاده

1. Abdekhallegi, S., Mohammadi, K., Pasari, B., Rokhzadi, A., 2024. Improving the seed yield and quality of canola by using sulfur, strigolactone, and growth promoting microorganisms. *Rhizosphere* 30, 100914. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2024.100914>.
2. Anonymous, 2023. Agricultural Statistics, Volume 1 (Crops). Statistics Center, Information and Communication Technology, Economic Planning Deputy, Ministry of Agricultural Jihad. Tehran, Iran. (In Persian)
3. Alizadeh, R., Jalali, M., Valizadeh-Rad, K., Etesami, H., 2025. Enhancing water deficit tolerance in canola (*Brassica napus* L.) through the synergistic application of nano-silicon and sulfur. *BMC Plant Biol.* 25, 486–498. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06535-5>.
4. Bleiholder, H., Weber, E., Lancashire, P., Feller, C., Buhr, L., Hess, M., Klose, R., 2001. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants, BBCH Monograph. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry. pp:32-37. doi: 10.5073/20180906-074619.
5. Boldrin, F., de Figueiredo, M.A., Yang, Y., Luo, H., Giri, S., Hart, J.J., Faquin, V., Guilherme, L.R., Thannhauser, T.W., Li, L., 2016. Selenium promotes sulfur accumulation and plant growth in wheat (*Triticum aestivum*). *Physiol. Plant.* 158(1), 80–91. <https://doi.org/10.1111/ppl.12465>.
6. Botella-Martínez, C., Pérez-Álvarez, J.Á., Sayas-Barberá, E., Navarro Rodríguez de Vera, C., Fernández-López, J., Viuda-Martos, M., 2023. Healthier oils: a new scope in the development of functional meat and dairy products: A review. *Biomol.* 13(5), p.778. <https://doi.org/10.3390/biom13050778>.
7. Bowie, S.H.U., Thornton, I., 1985. Principles of Environmental Geochemistry. *Environmental Geochemistry and Health: Report to the Royal Society's British National Committee for Problems of the Environment*, pp. 5–33. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5265-2_2.
8. Brienza, S.M.B., Sartini, R.P., Neto, J.G., Zagatto, E.A.G., 1995. Crystal seeding in flow-injection turbidimetry: determination of total sulfur in plants. *Anal. Chim. Acta.* 308(1-3), 269–274. [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(94\)00249-L](https://doi.org/10.1016/0003-2670(94)00249-L).
9. Chaudhary, S., Sindhu, S.S., Dhanker, R., Kumari, A., 2023. Microbes-mediated sulphur cycling in soil: Impact on soil fertility, crop production and environmental sustainability. *Microbiol. Res.* 271, 127340. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127340>.
10. De Souza Cardoso, A.A., de Lima Gomes, F.T., Antonio, J.R.R., Guilherme, L.R.G., Liu, J., Li, L., de Souza Silva, M.L., 2022. Sulfate availability and soil selenate adsorption alleviate selenium toxicity in rice plants. *Environ. Exp. Bot.* 201, 104971. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104971>.
11. Faizolah zadeh Ardabili M., 2013. Comparison of absorbable sulfur measurement methods in relation to its absorption by canola and obtaining the best N/S ratio in canola. Final Report, No: 83.96. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. (In Persian with English abstract).
12. FAO, 2023. Crops and Livestock Products. Rape or Colza Seed. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
13. Frieß, J.L., Breckling, B., Pascher, K., Schröder, W., 2020. Case Study 2: Oilseed Rape (*Brassica napus* L.). *Gene Drives at Tipping Points: Precautionary Technology Assessment and Governance of New Approaches to Genetically Modify Animal and Plant Populations*, pp. 103–145. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38934-5_5.
14. Gee, G., Bauder, J., 1986. Particle-size Analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and*

Mineralogical Methods. SSSA and ASA, Madison, WI, pp. 383–411.

15. Golob, A., Gadzo, D., Stibilj, V., Djikic, M., Gavric, T., Kreft, I., Germ, M., 2016. Sulphur interferes with selenium accumulation in Tartary buckwheat plants. *Plant Physiol. Biochem.* 108, 32–36. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.001>.
16. Gupta, M., Gupta, S., 2017. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Front. Plant Sci.* 7, 2074. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074>.
17. Hashem, H.A., Hassanein, R.A., Bekheta, M.A., El-Kady, F.A., 2013. Protective role of selenium in canola (*Brassica napus* L.) plant subjected to salt stress. *Egypt. J. Exp. Biol.* 9(2), 199–211.
18. Hawrylak-Nowak, B., 2013. Comparative effects of selenite and selenate on growth and selenium accumulation in lettuce plants under hydroponic conditions. *Plant Growth Regul.* 70, 149–157. <https://doi.org/10.1007/s10725-013-9788-5>.
19. Hawrylak-Nowak, B., Matraszes, R., Pogorzelec, M., 2015. The dual effects of two inorganic selenium forms on the growth, selected physiological parameters and macronutrients accumulation in cucumber plants. *Acta Physiol. Plant.* 37, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1788-9>.
20. Jiang, T., Yu, T., Qi, H., Li, F., Yang, Z., 2022. Analysis of phosphorus and sulfur effect on soil selenium bioavailability based on diffusive gradients in thin films technique and sequential extraction. *Chemosphere*, 302, 134831. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134831>.
21. Kikkert, J., Berkelaar, E., 2013. Plant uptake and translocation of inorganic and organic forms of selenium. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 65, 458–465. <https://doi.org/10.1007/s00244-013-9926-0>.
22. Kumar, A., Singh, R.P., Singh, P.K., Awasthi, S., Chakrabarty, D., Trivedi, P.K., Tripathi, R.D., 2014. Selenium ameliorates arsenic induced oxidative stress through modulation of antioxidant enzymes and thiols in rice (*Oryza sativa* L.). *Ecotoxicol.* 23, 1153–1163. <https://doi.org/10.1007/s10646-014-1257-z>.
23. Lima, L.W., Pilon-Smits, E.A., Schiavon, M., 2018. Mechanisms of selenium hyperaccumulation in plants: A survey of molecular, biochemical and ecological cues. *Biochim. Biophys. Acta (BBA)-General Subjects*, 1862(11), 2343–2353. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2018.03.028>.
24. Lindsay, W.L., Norvell, W.A., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42, 421–428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>.
25. Liu, X., Yang, Y., Deng, X., Li, M., Zhang, W., Zhao, Z., 2017. Effects of sulfur and sulfate on selenium uptake and quality of seeds in rapeseed (*Brassica napus* L.) treated with selenite and selenate. *Environ. Exp. Bot.* 135, 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.12.005>.
26. Liu, H., Xiao, C., Qiu, T., Deng, J., Cheng, H., Cong, X., Cheng, S., Rao, S., Zhang, Y., 2022. Selenium regulates antioxidant, photosynthesis, and cell permeability in plants under various abiotic stresses: A review. *Plants*. 12(1), 44–56. <https://doi.org/10.3390/plants12010044>.
27. Loeppert, R.H., Suarez, D.L., 1996. Carbonate and gypsum. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods*, SSSA and ASA, Madison, WI, pp. 437–474.
28. Ma, B.L., Herath, A., Smith, D.L., 2024. Assessing critical plant sulfur concentration and nitrogen to sulfur ratio in spring canola production. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 187(6), 711–724. <https://doi.org/10.1002/jpln.202400096>.
29. Mohammad, B.A.J., Al-Mohammad, M.H., Mustafa, S.B., 2024. Effect of nitrogen and sulfur fertilizers on growth and yield of canola. In: *IOP Conference Series: Earth Environ. Sci.* 1371(5), 1–9. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1371/5/052066>.
30. Mohammadi, M., Mosleh Ghahfarokhi, Z., 2023. Impact of nitrogen and sulfur applications on seed yield, protein, oil content, and fatty acid composition of canola (*Brassica napus* L.). *ACS Agric. Sci. Tech.* 3(10), 906–910. <https://doi.org/10.1021/acsagascitech.3c00188>.
31. Mohtashami, R., Movahhedi Dehnavi, M., Balouchi, H., Farajee, H., 2023. Improving physiological and biochemical responses of dryland canola by selenium foliar application and supplemental irrigation. *Acta Physiol. Plant.* 45(3), 47–55. <https://doi.org/10.1007/s11738-023-03532-9>.
32. Nelson, D., Sommers, L., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A. and Loeppert, R.H. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. SSSA and ASA, Madison, WI, pp. 961–1010.
33. Niazy, M.M., 2021. A rhizo-filtration-based approach with selenium for biofortification of oil canola (*Brassica napus*). *Egypt. J. Appl. Sci.* 36(9), 276–288. <https://doi.org/10.21608/ejas.2021.231926>.
34. Olsen, S.R., Sommers, L.E., 1982. Phosphorus. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 403–430.
35. Rasheed, M.U., Lihong, W., Mahmood, A., Rehman, H.U., Javaid, M.M., Ali, B., Ishfaq, F., Ameen, M., Hassan, M.U., Hashem, A., Almutairi, K.F., 2025. Impact of nitrogen, sulphur, and foliar applied thiourea on growth, oil yield, and fatty acid profile of canola. *Polish J. Environ. Stud.* 34(3), 2337–2347. <https://doi.org/10.15244/pjoes/186399>.

36. Ren, L., Jiang, W., Geng, J., Yu, T., Ji, G., Zhang, X., Wang, X., Wang, H., 2023. Sulfur levels regulate the absorption and utilization of selenite in rapeseed (*Brassica napus*). Environ. Exp. Bot. 213, 105454. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105454>.
37. Rhoades, J., 1982. Soluble salts. In: Page A.L. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, SSSA and ASA, Madison, WI, pp. 167–179.
38. Schulte, E.E., Eik, K., 1988. Recommended sulfates-S test. In: Dahnke, W.C. (Ed.). Recommended Chemical Soil Test Procedures for The North Central Region. North Dakota Agric. Stn. Bull. 499. pp. 17–20.
39. Sharma, R.K., Cox, M.S., Oglesby, C., Dhillon, J.S., 2024. Revisiting the role of sulfur in crop production: a narrative review. J. Agric. Food Res. 15, 101013. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101013>.
40. Sharma, S., Bansel, A., Dhillon, S., Dhillon, S., 2010. Comparative effects of selenate and selenite on growth and biochemical composition of rapeseed (*Brassica napus* L.). Plant Soil. 329, 339–348. doi:10.1007/s11104-009-0162-3.
41. Soltanpour, P.N., Workman, S.M., 1980. Use of NH_4HCO_3 -DTPA soil test to assess availability and toxicity of selenium to alfalfa plants. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 11(12), 1147–1156.
42. Soudthelath, K., Ariyasu, T., Manabe, R., Zhang, L., Rai, H., Koizuka, N., Nakamura, S.I., Maruyama-Nakashita, A., 2025. Seed glucosinolates in rapeseed (*Brassica napus*) provide sulfur nutrition required for early seedling growth under sulfur limitation. Soil Sci. Plant Nutr. 71(2), 155–162. <https://doi.org/10.1080/00380768.2024.2445042>.
43. Sparks, D.L., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., Soltanpour, P., Tabatabai, M., Johnston, C., Sumner, M., 1996. Methods of Soil Analysis. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
44. Szatkowski, A., Antoszkiewicz, Z., Purwin, C., Jankowski, K.J., 2024. Oilseed Radish: Nitrogen and Sulfur Management Strategies for Seed Yield and Quality—A Case Study in Poland. Agric. 14(5), 755–769. <https://doi.org/10.3390/agriculture14050755>.
45. Szeles, E. 2007. Studying of Change of Selenium-Speciation in Soil and Plant Samples from a Long-Term Field Experiment. PhD Thesis, Debrecen University, Hungary. <https://dea.lib.unideb.hu/server/api/core/bitstreams/6216ad4c-e794-410c-8e48-9a4b4c299438/content>.
46. Tian, M., Hui, M., Thannhauser, T.W., Pan, S. and Li, L., 2017. Selenium-induced toxicity is counteracted by sulfur in broccoli (*Brassica oleracea* L. var. italica). Front. Plant sci. 8, 1425. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01425>.
47. White, P.J. 2015. Selenium accumulation by plants. Annal. Bot. 117, 217–235. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv180>.
48. Xu, Y., Li, Y., 2023. Effects of sodium selenite on the rhizosphere environment, growth, and physiological traits of oilseed rape (*Brassica napus* L.). Agron. 13(10), 2508. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102508>.
49. Zhang, Y., Pan, G., Chen, J., Hu, Q., 2003. Uptake and transport of selenite and selenite by soybean seedlings of two genotypes. Plant Soil. 253, 437–443. <https://doi.org/10.1023/A:1024874529957>.