Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 39, No. 2, May.-June. 2025, p. 173-191

Investigation on Changes in Canola (*Brassica napus*) Growth Indices Due to Soil Application of Sulfur and Selenium

F. Nourgholipour[1*], M. Mohammadi[2], H. Mir Seyed Hosseini[2], R. Soleimani[3]

1- Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: nourfg@yahoo.com)
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, Ilam, Iran

Received: 28 March 2025
Revised: 18 May 2025
Accepted: 19 May 2025
Available Online: 19 May 2025

How to cite this article:
Nourgholipour, F., Mohammadi, M., Mir Seyed Hosseini, H., & Soleimani, R. (2025). Investigation on changes in canola (*Brassica napus*) growth indices due to soil application of sulfur and selenium. *Journal of Water and Soil*, *39*(2), 173-191. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92811.1476

Introduction

The global cultivation area of canola (*Brassica napus* L.) has expanded due to its adaptability to various climates and its distinct growing season compared to other oilseed crops. Additionally, its ability to be cropped in rotation with other plants, such as cereals, has contributed to its popularity. Canola has the largest cultivated area among oilseed crops in Iran. Proper consumption of nutrients is crucial for improving growth and increasing seed yield in canola plants. The use of sulfur as an essential nutrient, along with selenium in low concentrations as a beneficial nutrient, plays a significant role in enhancing plant tolerance to environmental stresses. Sulfur and selenium are both elements of group 16 of the periodic elements table and have similar physical and chemical properties, and it is believed that selenium utilizes the same pathways for sulfur immobilization and uptake in plants. Given the similarity of selenium to sulfur, sulfur metabolic pathways are shared, so the effect of selenium on growth is expected to be largely influenced by sulfur nutrition. This study aims to investigate the effects of sulfur and selenium application on nutrient absorption and their interaction on canola plant growth indices.

Materials and Methods

The experiment was conducted in greenhouse conditions as a factorial in a completely randomized design with 12 treatments and three replications. For cultivation, plastic pots with a diameter of 20 cm were utilized. Four kilograms of sieved soil were added to each pot. One hundred mg kg^{-1} of nitrogen from urea source was applied in the pre-planting stage and 100 mg of nitrogen was applied in two stages (after establishment on day 21 and then in the stem elongation before flowering stage). Triple superphosphate at a rate of 80 mg of phosphorus per kg of soil was added to the pots in powder form before planting and iron at a rate of 5 mg kg^{-1} in the form of iron chelate solution was added to the pots. The experimental treatments included elemental sulfur fertilizer at two levels of zero and 20 mg kg^{-1} (inoculated with *Thiobacillus* inoculum), two sources of selenium fertilizer (sodium selenate and selenite) at three levels of zero, 30, and 60 µg kg^{-1} in soil form before planting. The amount of sulfur and selenium available in the soil before planting was 3.8 and 0.025 mg kg^{-1}, respectively. The cultivated canola variety was Dalgan and grown in greenhouse conditions for 5 months. This cultivar is open-pollinated. The sulfur was in powder form with a purity of 99%, which was added to the soil of the sulfur-containing treatments, along with *Thiobacillus* inoculum (with a population of 1×10^8 cells per ml) two weeks before planting. After the seed growth and maturation period (5 months), at the final stage of growth (physiological maturity with a two-digit growth code of 80), the seed components were separated from the aerial parts. The dry weight of the seed and the aerial

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).
https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92811.1476

parts of the plant were weighed separately.

Results and Discussion

Sulfur application significantly increased shoot dry weight, root dry weight, leaf area, and canola grain weight compared to conditions without sulfur application (48.8% increase in shoot weight, 28.1% in root weight, 15.7% in leaf area, and 51.3% increase in grain weight). Grain weight had a correlation of 0.94^{**} with grain sulfur uptake and 0.9^{**} with shoot sulfur uptake. Therefore, the growth characteristics of roots, shoots, and sulfur concentration in shoots and seeds have a significant impact on grain weight. Application of selenium from selenate source resulted in higher selenium absorption in shoots and canola grain compared to selenite source. In grain, sulfur application increased selenium absorption from both sources. Grain sulfur uptake had a correlation of -0.42^{**} with seed selenium concentration, 0.94^{**} with seed weight, 0.86^{**} with shoot sulfur concentration, -0.43^{*} with shoot selenium concentration, 0.87^{**} with shoot sulfur uptake, 0.7^{**} with shoot weight, 0.69^{**} with leaf area, and 0.83^{**} with root weight. The highest grain selenium concentration was observed at the rate of 60 μg kg^{-1} from selenate source (0.48 mg kg^{-1}). If increasing the selenium concentration of the grain is desired for enrichment purposes (from 0.12 μg g^{-1} in the sulfur-free and selenium-free treatments), a sulfur treatment of 20 mg kg^{-1} and a selenate content of 60 μg kg^{-1} could be considered to achieve a concentration of 0.42 μg g^{-1}. This is because the grain weight of this treatment (3.87 g pot^{-1}) was closest to the high levels of grain weight in the sulfur treatment of 20 mg kg^{-1} and selenium-free condition (4.32 g pot^{-1}).

Conclusion

Grain selenium concentrations of 0.10-0.11 mg kg^{-1} and sulfur concentrations of 0.325-0.33% produced suitable canola yield. The highest canola grain weight was obtained with a concentration of 19.86 mg kg^{-1} sulfur and 0.0267 mg kg^{-1} selenium in the soil.

Acknowledgements

We would like to thank the Soil Science Department of the Agricultural College of the University of Tehran for providing the facilities to conduct this experiment.

Keywords: Concentration and uptake, Grain, Interaction, Root, Shoot

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۹، شماره ۲، خرداد-تیر ۱٤۰٤، ص. ۱۹۱-۱۷۳

بررسی تغییر برخی شاخص‌های رویشی گیاه کلزا در اثر کاربرد خاکی گوگرد و سلنیوم

فریدون نورقلی پور[۱*]- مریم محمدی[۲]- حسین میر سید حسینی[۲]- رضا سلیمانی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

چکیده

کلزا دارای بیشترین مساحت کشت از بین گیاهان زراعی دانه روغنی در ایران است. گوگرد چهارمین عنصر ضروری مورد نیاز گیاه کلزا بعد از نیتروژن، فسفر و پتاسیم است. عنصر سلنیوم به‌عنوان عنصر مفید برای گیاهان درنظر گرفته می شود. با توجه به شباهت سلنیوم به گوگرد، مسیرهای متابولیکی گوگرد به اشتراک گذاشته می‌شود، بنابراین انتظار می‌رود اثر سلنیوم بر رشد تا حد زیادی تحت اثر تغذیه با گوگرد قرار گیرد. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات شاخص‌های رشد اندام هوایی و دانه گیاه کلزا رقم دلگان با کاربرد گوگرد و سلنیوم اجرا شد. آزمایش در شرایط گلخانه، به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملا تصادفی و در سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل کود گوگرد عنصری در دو سطح صفر و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تلقیح شده با مایه تلقیح تیوباسیلوس، دو منبع کودی سلنیوم (سلنات و سلنیت سدیم) در سه سطح صفر، ۳۰ و ۶۰ میکروگرم سلنیوم بر کیلوگرم به‌صورت خاکی پیش از کشت بود. بر اساس نتایج، کاربرد گوگرد باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک شاخساره و دانه کلزا نسبت به شرایط عدم کاربرد گوگرد شد (۴۸/۸ درصد افزایش در شاخساره و ۵۱/۳ درصد افزایش در دانه). میانگین غلظت گوگرد شاخساره بیشتر از غلظت گوگرد دانه بود (۰/۷۲۸ درصد در مقابل ۰/۲۴۳ درصد). کاربرد سلنیوم از منبع سلنات در مقایسه با سلنیت، باعث جذب بیشتر سلنیوم در اندام هوایی (۲/۹۱۸ در مقابل ۲/۳۶ میکروگرم در گلدان) و دانه کلزا (۰/۸۶ میکروگرم در گلدان در مقابل ۰/۸ میکرو گرم در گلدان) شد. بیشترین میزان عملکرد دانه کلزا با غلظت ۱۹/۸۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم گوگرد و ۰/۰۲۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم سلنیوم در خاک به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: اندام هوایی، برهمکنش، جذب، دانه، ریشه، غلظت

مقدمه

کلزا با نام علمی *Brassica napus* L. به تیره شب بو یا چلیپاییان تعلق دارد. کشت این گیاه در جهان به‌دلیل سازگاری اقلیمی و تفاوت زمانی فصل رشد آن با سایر گیاهان دانه روغنی، همچنین امکان کاربرد آن در تناوب زراعی با گیاهان دیگر ازجمله غلات، افزایش یافته است (Frieß, Breckling, Pascher, & Schröder, 2020). دانه این گیاه دارای ۴۵-۴۰ درصد روغن است. روغن کلزا به‌دلیل ترکیب مناسب اسیدهای چرب غیراشباع و درصد پایین اسیدهای چرب اشباع همانند زیتون، جزء باکیفیت‌ترین روغن‌های خوراکی است (Botella-Martínez, Pérez-Álvarez, Sayas-Barberá, Navarro Rodríguez de Vera, Fernández-López, & Viuda-Martos, 2023). بر اساس آمار جهانی در سال ۲۰۲۳ میلادی میزان تولید دانه کلزا در جهان تقریباً ۹۱/۹ میلیون تن و مساحت کشت آن ۴۳/۵ میلیون هکتار بود که بعد از دانه سویا در رده دوم گیاهان زراعی دانه روغنی قرار دارد (Statista, 2024). در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ سطح کشت این محصول در ایران حدود ۱۵۴ هزار هکتار بود (Agricultural Statistics, 2023). مصرف متعادل و مناسب عناصر غذایی می‌تواند باعث بهبود رشد و افزایش عملکرد دانه این گیاه گردد

۱- مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: nourfg@yahoo.com)
۲- گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران
https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92811.1476

(Ren, Zou, Wang, Li, Cong, & Lu, 2016).

گوگرد چهارمین عنصر ضروری مورد نیاز گیاه کلزا بعد از نیتروژن، فسفر و پتاسیم است و به‌دلیل افزایش کاربرد کودهای بدون گوگرد و نیاز بالای گیاهان روغنی، کمبود این عنصر در خاک‌های زراعی جهان رو به افزایش است (Sharma, Cox, Oglesby, & Dhillon, 2024). به‌طورکلی 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). ازآنجایی‌که کلزا و دانه آن دارای مقدار زیادی پروتئین می‌باشند که از اسیدهای آمینه ساده گوگرددار تشکیل‌شده است، بنابراین، این عنصر نقش اساسی در سنتز پروتئین کلزا ایفا می‌کند. نقش مهم دیگر گوگرد، شرکت در ساختمان سولفولیپیدها است که در غشای سلول وجود دارند و درواقع روغن گیاه را تشکیل می‌دهند (Sharma *et al.*, 2024).

سلنیوم با عدد اتمی۳۴ ، شصت و هفتمین عنصر فراوان در پوسته جامد زمین است که در مقادیر کم (در حدود ۰/۰۱ – ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و با میانگین ۰/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در اغلب خاک‌ها وجود دارد (Niaik & Dubey, 2016). در خاک‌هایی که مقدار سلنیوم خاک کمتر از ۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم است، محصولاتی تولید خواهند شد که مقدار سلنیوم آن‌ها برای تغذیه دام ناکافی خواهد بود (کمتر از ۰/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم محصول) (Bitterli, Bañuelos, & Schulin, 2010). ولی وقتی غلظت سلنیوم خاک بیشتر از ۵ میکروگرم بر کیلوگرم باشد، کاهش قابل‌ملاحظه وزن ماده خشک در ذرت و خردل هندی (*Brassica juncea*) ملاحظه خواهد شد. این مقدار در خاک برای گندم ۴ و برای برنج ۱۰ میکروگرم بر کیلوگرم خاک است (Moulick, Mukherjee, Das, Roy, Majumdar, *et al.*, 2024). در گیاه غلظت بیشتر از ۱۰۴/۸ میکروگرم بر گرم در گیاه خردل، ۷۶/۹ در ذرت و ۱۸/۹ میکروگرم در گرم ساقه گندم، باعث کاهش معنی‌دار رشد این گیاهان خواهد شد (Moulick *et al.*, 2024). با توجه به غلظت سلنیوم و نوع گونه‌ی گیاهی، این عنصر می‌تواند برای گیاهان مفید و یا سمی باشد (Abou Seeda, Yassen, Abou El-Nour, Gad Mervat, & Sahar, 2020). در بیشتر مطالعات شکل‌های سلنیت (IV, Selenite) و سلنات (VI, Selenate) را به‌عنوان غالب‌ترین و فراوان‌ترین شکل‌های سلنیوم برای جذب گیاهان مطرح کرده‌اند. تحرک و حلالیت گونه‌های سلنیوم در خاک و رسوبات به‌شدت وابسته به واکنش‌های جذب/واجذب، pH، پتانسیل اکسیداسیون–احیا، مقدار ترکیبات آلی و غیر آلی و فرآیندهای انحلال می‌باشد (Alfthan, Eurola, Ekholm, Root, Korkalainen, *et al.*, 2015). محدوده‌ی کمبود و سمیت سلنیوم برای موجودات زنده بسیار باریک است. خط بحرانی تشخیص بین ضرورت و سمیت، میان موجودات زنده و حتی بین گونه‌های مختلف نیز متفاوت بوده و وابسته به سطح کاربرد و اشکال مورداستفاده سلنیوم می‌باشد (Hawrylak-Nowak, Matrasses, & Pogorzelec, 2015). سلنیوم یک عنصر مفید برای گیاهان است، به‌طوری‌که در مقادیر کم و کافی به‌عنوان آنتی‌اکسیدان عمل می‌نماید (Kumar, Singh, Singh, Awasthi, *et al.*, 2014) درحالی‌که در غلظت‌های بالا به‌عنوان فعال‌کننده اکسیدان عمل می‌کند (Gupta & Gupta, 2017). مطالعات انجام‌گرفته نشان می‌دهد که سلنیوم اثر مثبتی بر افزایش تحمل گیاه به تنش‌های محیطی ازجمله شوری (با اثر بر مالون دی آلدئید (MDA) در اندام هوایی، پرولین، نشت الکترولیت و سطح پراکسید هیدروژن (Hussain, Ahmed, Akram, *et al.*, 2024)، خشکی (از طریق اثر بر ترکیبات بیوشیمیایی مختلف (Ahmad, Anjum, Skalicky, *et al.*, 2021) و دیگر عوامل محیطی دارد (Hawrylak-Nowak, Hasanuzzaman, & Matraszek-Gawron, 2018). ولی سؤال اینجاست که آیا این ترکیبات اثر مثبتی بر رشد گیاه کلزا در شرایط طبیعی رشد دارند (شرایط بدون تنش شوری و خشکی)؟

گوگرد و سلنیوم هر دو از عناصر گروه شانزدهم جدول تناوبی بوده و خواص فیزیکی و شیمیایی مشابهی دارند و اعتقاد بر آن است که سلنیوم از مسیرهای آلی سازی و جذب گوگرد در گیاهان استفاده می‌کند (Gupta & Gupta, 2017). با توجه به شباهت سلنیوم به گوگرد، مسیرهای متابولیکی گوگرد به اشتراک گذاشته می‌شود، بنابراین انتظار می‌رود اثر سلنیوم بر رشد تا حد زیادی تحت اثر تغذیه با گوگرد قرار گیرد (Golob, Gadzo, Stibilj, *et al.*, 2016; Tian, Hui, Thannhauser, Pan, & Li, 2017).

تصور می‌شود که علت اصلی سمیت ناشی از سلنیوم در بسیاری از گیاهان جایگزینی سلنو–آمینواسیدها به جای گوگرد در پروتئین‌ها باشد که این امر باعث تاخوردگی نادرست پروتئین (protein misfolding) می‌گردد (Lima, Pilon-Smits, & Schiavon, 2018). سمیت پیشنهادشده برای سلنیوم به‌طور مستقیم با نسبت گوگرد به سلنیوم مرتبط است (White, 2015). جذب سلنیوم توسط سلول‌های ریشه از ریزوسفر توسط ناقل‌های سولفات با میل ترکیبی بالا تسهیل می‌شود. نقش این ناقلین کم است اما سهم نسبی آنها زمانی که گیاهان گوگرد کافی برای رشد ندارند، به میزان زیادی افزایش می‌یابد (White, 2015).

با توجه به نیاز گیاه کلزا به گوگرد و ضرورت برقراری تعادل در تغذیه گوگرد و سلنیوم درکشت این گیاه و اطلاعات اندک در خصوص برهمکنش این عناصر بر رشد گیاه کلزا، این بررسی به‌منظور مشاهده اثر عنصر گوگرد بر خصوصیات کمی و کیفی گیاه کلزا در حضور شکل‌های مختلف سلنیوم انجام شد. با توجه به گزارش‌های ارائه‌شده در خصوص اثر سلنیوم بر افزایش تحمل گیاه به تنش‌های محیطی، این آزمایش به‌منظور بررسی اثرات آن در شرایط بدون تنش بر رشد گیاه کلزا انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های خاک

نمونه‌های خاک (عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر) از ایستگاه تحقیقات اسماعیل‌آباد قزوین (″۱۶′۱۵°۳۶ شمالی و ″۱۹′۵۴°۴۹ شرقی، ارتفاع ۱۲۷۸ متر) با مقدار گوگرد قابل‌دسترس پایین انتخاب گردید. در این ایستگاه مقدار بارندگی سالیانه ۳۱۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه ۹ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس طبقه‌بندی آمریکایی، خاک به‌صورت coarse-loamy, mixed, mesic, Typic Xerorthents طبقه‌بندی گردید. بافت خاک (Gee & Bauder, 1986)، درصد کربن آلی (Nelson & Sommers, 1996)، عناصر غذایی کم‌مصرف (Lindsay & Norvell, 1978)، کربنات کلسیم معادل (Loeppert & Suarez, 1996)، pH و هدایت الکتریکی (Rhoades, 1982)، پتاسیم قابل‌جذب (Sparks, Page, Helmke, *et al.*, 1996) و فسفر قابل‌جذب خاک (Olsen & Sommers, 1982)، پیش از کشت اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری سولفات در عصاره خاک با روش مونو کلسیم فسفات (۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل UNICO-2000 در طول‌موج ۴۲۰ نانومتر انجام گرفت (Schulte & Eik, 1988). اندازه‌گیری سلنیوم قابل‌جذب خاک با کاربرد روش آمونیوم بیکربنات DTPA انجام گرفت (Soltanpour & Workman, 1980). عصاره‌گیری با کاربرد محلول AB-DTPA انجام شد و با دستگاه ICP-AES مدل MPX قرائت نمونه‌ها صورت گرفت.

نتایج تجزیه خاک

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده‌شده در آزمایش در جدول ۱ ارائه‌شده است. مقدار سلنیوم قابل‌جذب خاک ۰/۰۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که مقدار آن کمتر از محدوده آلودگی خاک برای این عنصر می‌باشد (Bowie & Thornton, 1985). خاک انتخاب‌شده قلیایی، بدون محدودیت شوری، دارای کربن آلی خیلی کم، بافت سبک و مقدار فسفر و گوگرد قابل‌دسترس کم بود. کمبود آهن و منگنز قابل‌جذب نیز در خاک وجود دارد.

تیمارهای آزمایش

آزمایش در شرایط گلخانه و به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملا تصادفی (factorial CRD) با ۱۲ تیمار و در سه تکرار و با ۳۶ واحد آزمایشی (گلدان) در اتاق رشد پردیس کشاورزی دانشگاه تهران واقع در کرج انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل دو سطح گوگرد صفر و ۲۰ $mg\ kg^{-1}$ و دو منبع سلنیوم (سلنات سدیم ($Na_2\ Se\ O_4$) و سلنیت سدیم ($Na_2\ Se\ O_3$)) در سه مقدار سلنیوم شامل تیمار صفر، تیمار Se ۳۰ $\mu g\ kg^{-1}$ و تیمار ۶۰ $\mu g\ Se\ kg^{-1}$) انجام شد. سلنیوم به‌صورت خاکی پیش از کشت استفاده شد. کلزای کشت شده رقم دلگان و کشت در شرایط گلخانه‌ای به‌مدت ۵ ماه، انجام شد. گوگرد استفاده شده به صورت پودری با درجه خلوص ۹۹ درصد بود که به همراه مایه تلقیح باکتری تیوباسیلوس (با جمعیت 10^8 سلول در هر میلی‌لیتر) تهیه شده از مؤسسه تحقیقات خاک و آب کرج، دو هفته قبل از کشت به خاک تیمارهای حاوی گوگرد اضافه شد.

آماده سازی گلدان‌ها و کشت گیاهان

در کشت گلخانه‌ای از گلدان‌های پلاستیکی با قطر دهانه ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. به هر گلدان ۴ کیلوگرم خاک الک شده اضافه گردید و در کف گلدان‌ها، کاغذ صافی گذاشته و سپس با خاک پر شد. ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن از منبع اوره در مرحله پیش‌کشت و ۱۰۰ میلی‌گرم نیتروژن در دو مرحله شامل پس از استقرار در روز ۲۱ و سپس مرحله انتهای ساقه دهی-قبل گلدهی) مصرف شد. سوپر فسفات تریپل به مقدار ۸۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک پیش از کشت به‌صورت پودری و آهن نیز به مقدار ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌صورت محلول از کیلیت آهن به گلدان‌ها اضافه شد.

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده‌شده قبل از کشت

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

CCE کربنات کلسیم معادل	OC کربن آلی	EC قابلیت هدایت الکتریکی	pH اسیدیته	N_{Ttotal} نیتروژن	SP درصد اشباع	Soil texture بافت خاک	Clay رس	Silt سیلت	Sand شن
(%)		($dS\ m^{-1}$)		(%)	(%)			(%)	
4.43	0.37	0.65	7.88	0.041	30	Sandy loam	11	19	70
*Cu مس	Mn منگنز	Zn روی	Fe آهن	Pb سرب	Cd کادمیم	Se_{ava} سلنیوم	K_{ava} پتاسیم	P_{ava} فسفر	S_{ava} گوگرد
($mg\ kg^{-1}$)									
1	4.3	1	1.45	0.23	0.014	0.025	259	5.6	3.68

تیمارهای گوگرد و مایه تلقیح تیوباسیلوس و تیمارهای سلنیوم با توجه به نوع تیمار به گلدان‌ها اضافه شد. ۱۰ بذر در هر گلدان کشت شد. آبیاری گلدان‌ها با توزین آن‌ها و در حد ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه در طول دوره رشد صورت گرفت. پس از استقرار گیاهان، تعداد بوته‌ها به ۴ عدد در هر گلدان کاهش یافت. در طول دوره رشد، دمای گلخانه در محدوده ۲۰–۲۲ درجه سانتی‌گراد در ابتدای رشد بود و در انتهای دوره رشد (مرحله زایشی) به حدود ۲۴–۲۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. ساعات روشنایی با توجه به دوره رشد بین ۱۲ تا ۱۶ ساعت در روز بود.

ویژگی‌های اندازه گیری شده گیاه

پس از سپری شدن دوره رشد و رسیدگی دانه‌ها (۵ ماه)، در مرحله انتهایی رشد (رسیدگی فیزیولوژیک با کد دورقمی رشد ۸۰) (Bleiholder, Weber, Lancashire, *et al.*, 2001) اجزای دانه از اندام هوایی تفکیک شد. وزن خشک دانه و اندام هوایی گیاه، جداگانه توزین شد. نمونه‌های دو قسمت اندام هوایی و دانه در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۷۲ ساعت خشک شد. وزن خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید. سطح برگ با کاربرد دستگاه تعیین سطح برگ مدل CI 202 Area Meter CID, Inc USA اندازه‌گیری شد. شاخص سطح برگ از تقسیم سطح برگ به سطح سایه‌انداز (سطح گلدان) به دست آمد. غلظت و جذب عناصر سلنیوم و گوگرد در شاخساره و دانه محاسبه شد. برای این منظور غلظت عنصر مربوطه در گرم وزن خشک شاخساره و دانه هر کدام به‌صورت جداگانه، محاسبه گردید. غلظت عناصر پرمصرف و ثانویه به‌صورت درصد و غلظت عناصر کم‌مصرف به صورت میلی‌گرم بر کیلوگرم محاسبه شد. همچنین میزان جذب هر عنصر، حاصل‌ضرب غلظت آن عنصر در عملکرد گیاه بود. مقدار گوگرد کل در نمونه‌های گیاهی به روش برینزا و همکاران (Brienza, Sartini, Neto, & Zagatto, 1995) در طول‌موج ۴۲۰ نانومتر قرائت شد. قرائت سلنیوم کل در نمونه‌های گیاه با روش هضم تر با کاربرد پراکسید هیدروژن و اسید نیتریک انجام شد (Szeles, 2007). میزان سلنیوم عصاره‌ها با دستگاه ICP-AES مدل MPX قرائت شد.

تحلیل آماری

برای تجزیه آماری نتایج از نرم‌افزار SAS 9.4 (SAS institute, Cary NC, USA) استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها در سطح ۵ درصد به روش آزمون دانکن برای نتایجی که اثرات تیمارها بر آن‌ها در جدول تجزیه واریانس معنی‌دار شده بود، انجام شد. رسم شکل‌ها با استفاده از نرم‌افزار اکسل انجام شد.

نتایج تجزیه نمونه خاک پیش از کشت، اثر تیمارهای آزمایش بر شاخص‌های رشدی، غلظت و جذب عناصر سلنیوم و گوگرد در اندام هوایی گیاه و نیز دانه کلزا، مورد بررسی قرار گرفت. غلظت عناصر در شاخساره و دانه کلزا، جداگانه قرائت شد.

نتایج و بحث

اثر تیمارهای آزمایش بر وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و شاخص سطح برگ

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) اثر اصلی سطح گوگرد و اثر اصلی سطح سلنیوم بر وزن خشک شاخساره ($P<0.05$) معنی‌دار بود. اثر متقابل سطح گوگرد × سطح سلنیوم × منبع سلنیوم بر وزن خشک ریشه ($P<0.01$) و شاخص سطح برگ ($P<0.01$) معنی‌دار بود. با توجه به نتایج (شکل ۱a)، کاربرد گوگرد (۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک شاخساره گیاه کلزا شد (۴۸/۸ درصد). در تیمارهایی که گوگرد در آنها استفاده شده بود، مقدار گوگرد قابل جذب خاک (در نمونه خاک پس از برداشت گیاه) به ۲۰/۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسید در حالی‌که مقدار آن در نمونه خاک شاهد (بدون گوگرد) ۸/۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. بر اساس مطالعات فیض اله زاده اردبیلی (Faizolah Zadeh Ardabili, 2013) با عصاره گیر مونو کلسیم فسفات (۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر فسفر)، حد بحرانی گوگرد قابل جذب خاک به روش تصویری کیت و نلسون در کشت گلخانه‌ای ۲۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد و با کاربرد ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گوگرد به خاک، وزن خشک کلزا به‌ترتیب ۱۳/۷ و ۲۲ درصد نسبت به شاهد بدون کاربرد گوگرد افزایش یافت. با توجه به این که در مطالعه فعلی از روش مونوکلسیم فسفات برای اندازه گیری گوگرد قابل جذب خاک استفاده شد، مقدار گوگرد قابل جذب خاک در تیمار شاهد (بدون گوگرد) کمتر از حد بحرانی ارائه شده برای این گیاه است. هر چه تجمع گوگرد در بافت گیاهی بیشتر باشد تخصیص این عنصر به وظایف ضروری گیاه از جمله اثر محافظتی در برابر تنش‌ها و همچنین تولید روغن افزایش می‌یابد. مقدار کافی گوگرد به شکل سولفات در خاک به‌صورت قابل‌توجهی رشد رویشی و تولید ماده خشک را افزایش می‌دهد (Mohammad, Al-Mohammad, & Mustafa, 2024). این افزایش می‌تواند از طریق افزایش مقدار کلروفیل و افزایش فعالیت فتوسنتزی در گیاه کلزا حاصل گردد (Chaudhary, Sindhu, Dhanker, & Kumari, 2023). کاربرد سلنیوم در سطح ۶۰ میکرو گرم در کیلوگرم خاک، باعث افزایش وزن خشک شاخساره نسبت به تیمار بدون سلنیوم شد (۹/۷ درصد) (شکل ۱b). اختلاف تیمار ۳۰ میکروگرم در کیلوگرم خاک، با تیمار شاهد معنی‌دارنبود. چون مسیر جذب سلنات و سلنیت به‌ترتیب از طریق ناقلین سولفات و فسفات انجام می شود، تفاوت در فعالیت این ناقلین می‌تواند بر مقدار جذب سلنیوم مؤثر باشد (Nie, Luo, Ma, *et al.*, 2024). نتایج تحقیقات روی اسفناج نیز افزایش عملکرد وزن خشک گیاه را با کاربرد ۱۰ و ۲۰

میلی‌گرم بر لیتر سلنیت سدیم نشان داد اما با افزایش به سطح ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر، اثر کاهشی داشت (Fouda, 2016). نتایج تحقیقات شارما و همکاران (Sharma, Bansel, & Dhillon, 2010) نشان داد که وزن ماده خشک در کلزای تیمار شده با سلنات سدیم در مراحل روزت و گلدهی در مقایسه با تیمارهای شاهد و کلزای تیمار شده با سلنیت سدیم، کاهش یافته بود. وزن خشک اندام هوایی کلزا با مقدار جذب گوگرد در شاخساره، بیشترین همبستگی را داشت (۰/۹**). همبستگی این شاخص با غلظت گوگرد شاخساره ۰/۷**، با وزن خشک ریشه ۰/۷۶**، با غلظت و جذب گوگرد دانه۰/۵۳** و ۰/۷** و با وزن دانه کلزا ۰/۸** و با جذب سلنیوم دانه ۰/۴۳* بود. پس غلظت گوگرد اندام هوایی و وضعیت رشد ریشه به نحو مؤثری بر این شاخص مؤثر بود.

با توجه به نتایج (شکل c۱)، وزن خشک ریشه در تیمارهای محتوی گوگرد بیشتر از تیمارهای بدون گوگرد بود (معادل ۲۸/۱ درصد افزایش). در شرایط بدون گوگرد بیشترین وزن خشک ریشه از تیمار ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنیت به‌دست آمد. ولی کاربرد گوگرد به مقدار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، همراه با کاربرد ۳۰ میکرو گرم بر کیلوگرم از منبع سلنات باعث تولید بیشترین وزن خشک ریشه شد که اختلاف آن با شاهد (دارای گوگرد و بدون سلنیوم) ۱۵ درصد بود. در تیمارهای دیگر محتوی گوگرد، کاربرد سلنیوم باعث کاهش وزن خشک ریشه شد. پس در زمان عدم استفاده از گوگرد می‌توان ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنیوم از منبع سلنیت را برای بهبود رشد ریشه مصرف نمود ولی سلنات مؤثر نخواهد بود. در شرایط کاربرد گوگرد، تأمین سلنیوم (۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم) برای افزایش رشد ریشه کلزا مؤثر خواهد بود. سلنیوم در مقایسه با عناصری چون سرب، کادمیوم، نیکل و کروم، عمدتا در اندام هوایی انباشته می‌شود تا اینکه در ریشه انباشته شود (Cabannes, Buchner, Broadley, & Hawkesford, 2011). وایت و همکاران (White, 2015) بیان کردند که جذب سلنات به وسیله ریشه‌ها و توزیع آن در گیاهان، بسیار سریع‌تر از سلنیت است. وزن خشک ریشه بیشترین همبستگی را با جذب گوگرد دانه و جذب گوگرد اندام هوایی کلزا داشت (۰/۹۳** و ۰/۸**). همبستگی آن با غلظت گوگرد شاخساره ۰/۷۶**، با وزن خشک اندام هوایی ۰/۷۶**، با وزن دانه ۰/۷۹** و با غلظت گوگرد دانه ۰/۷۳** و با سطح برگ ۰/۳۷* بود.

در شرایط بدون مصرف گوگرد، کمترین شاخص سطح برگ از مصرف سلنیوم از منبع سلنیت (۳۰ و ۶۰ میکروگرم در گلدان) مشاهده شد (۱۵/۷ درصد کاهش نسبت به تیمار بدون گوگرد و سلنیوم) و سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری با شاهد نداشتند. در شرایط کاربرد گوگرد، بیشترین مقدار شاخص سطح برگ از تیمار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گوگرد و بدون سلنیوم حاصل شد. کاربرد سلنیوم در تیمارهای محتوی گوگرد، باعث کاهش سطح برگ شد. شاخص سطح برگ کلزا با غلظت و جذب گوگرد دانه دارای همبستگی ۰/۶۹**، با وزن دانه ۰/۶۱**، با غلظت و جذب گوگرد شاخساره ۰/۴۶**، با وزن ریشه ۰/۳۷* و با سلنیوم دانه دارای همبستگی ۰/۳۷*- بود. پس همانند وزن خشک اندام هوایی و ریشه، اثر غلظت گوگرد اندام هوایی و وزن ریشه بر این شاخص (سطح برگ) مثبت است.

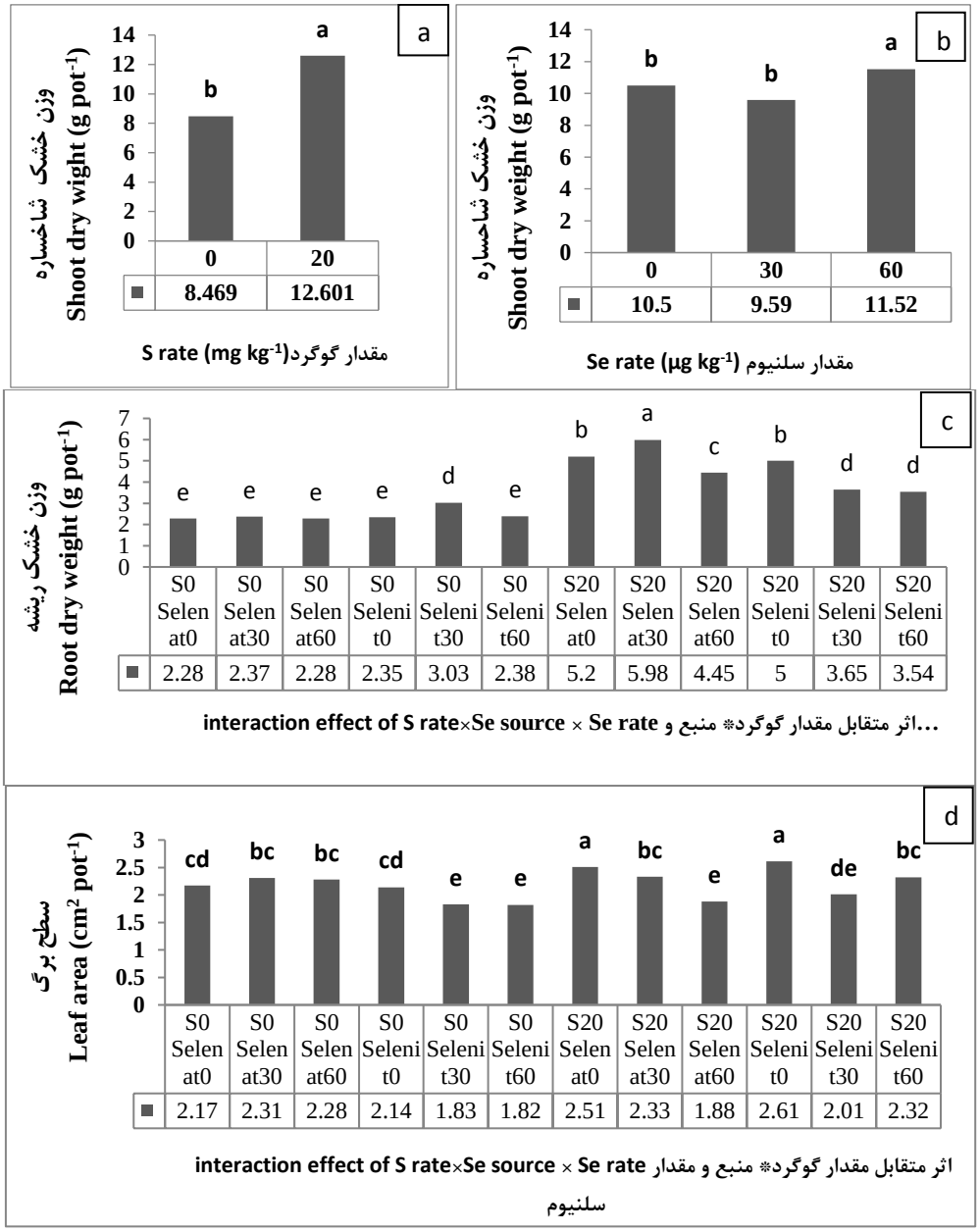
جدول ۲- تجزیه واریانس ویژگی‌های رشدی گیاه کلزا

Table 2- Analysis of variance of growth characteristics of canola plant

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	شاخص سطح برگ Leaf area index	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن خشک شاخساره Shoot dry weight
سطح گوگرد S rate	1	0.255**	40.24**	153.594**
شکل سلنیوم Se form	1	0.1001*	2.331**	1.979ns
سطح‌سلنیوم Se rate	2	0.224**	1.1334**	11.186**
سطح‌گوگرد*شکل سلنیوم Se form* S rate	1	0.407**	5.538**	4.23ns
سطح‌گوگرد*سطح‌سلنیوم S rate* Se rate	2	0.081*	0.594*	3.556ns
شکل سلنیوم*سطح‌سلنیوم Se rate *Se form	2	0.205**	0.242ns	0.149ns
سطح‌گوگرد*شکل سلنیوم*سطح‌سلنیوم S rate*Se rate*Se form	2	0.1247**	1.146**	0.267ns
خطا Error	24	0.0174	0.149	1.220
ضریب تغییرات C.V. (٪)	-	6.1	11.0	10.5

علامت ** و * بیانگر معنی‌داری تیمارها در سطح ۱ و ۵ درصد و ns بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها

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



شکل ۱- اثر تیمارها بر وزن خشک شاخساره، وزن خشک‌ریشه و شاخص سطح برگ

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن)

Figure 1- Effect of treatments on shoot dry weight, root dry weight and leaf area index

Columns with at least one common letter do not have significant differences at the 5% level of Duncan's test

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

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) اثر متقابل دو گانه سطح گوگرد× سطح سلنیوم ($P<0.01$) و منبع سلنیوم × سطح سلنیوم ($P<0.05$) بر شاخص غلظت گوگرد اندام هوایی کلزا، معنی‌دار بود. اثر متقابل دو گانه سطح گوگرد× سطح سلنیوم ($P<0.01$) بر مقدار جذب گوگرد اندام هوایی کلزا، معنی‌دار بود.

اثر تیمارهای آزمایش بر غلظت و جذب گوگرد اندام هوایی گیاه کلزا

کاربرد گوگرد به مقدار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم باعث افزایش معنی دار غلظت گوگرد اندام هوایی کلزا شد (معادل ۸۵ درصد افزایش) (شکل a۲). در شرایط مصرف گوگرد، کاربرد هر دو سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنیوم، باعث کاهش غلظت گوگرد اندام هوایی کلزا نسبت به شاهد شد (به‌ترتیب ۲۳/۲ و ۱۸/۴ درصد). این امر می‌تواند ناشی از

اثر متقابل بین سلنیوم و گوگرد در گیاه باشد. در شرایط بدون کاربرد گوگرد استفاده از سلنیوم در سطح ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم، باعث کاهش معنی‌دار غلظت گوگرد اندام هوایی گیاه شد (۶۳/۴ درصد) ولی در سطح ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم، غلظت گوگرد را کاهش نداد. با کاربرد هر دو منبع سلنیوم، غلظت گوگرد اندام هوایی نسبت به تیمار بدون گوگرد کاهش یافت (در هر دو سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنیوم). مقدار کاهش غلظت گوگرد در سطح ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنیوم از منبع سلنیت بیشتر از منبع سلنات بود (شکل b۲). در مطالعات هاوریلاک–نواک (Hawrylak-Nowak, 2013) دو منبع مختلف سلنیت و سلنات و مقدار مختلف آنها به نحو متفاوتی بر غلظت گوگرد گیاه کاهو اثر گذاشتند. نتایج آنها نشان داد که وجود سلنیوم در محیط رشد (غلظت ۱۵ میلی‌مولار) می‌تواند بر تجمع و توزیع گوگرد بین ریشه‌ها و اندام‌های هوایی کاهو به روش‌های متفاوتی برای دو منبع سلنیت و سلنات مؤثر باشد. غلظت گوگرد اندام هوایی با شاخص وزن خشک ریشه دارای همبستگی **۰/۷۶، با وزن شاخساره **۰/۷۱ با سطح برگ *۰/۴۷، با غلظت سلنیوم شاخساره **۰/۶۴–، با جذب سلنیوم شاخساره *۰/۳۶–، با غلظت گوگرد دانه **۰/۷۹، با غلظت سلنیوم دانه *۰/۵۲–، با وزن دانه **۰/۸۴، غلظت سلنیوم شاخساره **۰/۶۴– و همبستگی آن با جذب گوگرد دانه **۰/۸۶ بود. با توجه به نتایج (شکل c۱) با کاربرد گوگرد جذب گوگرد توسط گیاه افزایش یافت (از ۵۱/۶ میلی‌گرم در گلدان به ۱۴۲/۶ میلی‌گرم در گلدان). هم در تیمار عدم کاربرد گوگرد و هم در زمان استفاده از گوگرد، کاربرد سلنیوم باعث کاهش جذب گوگرد در اندام هوایی شد. جذب گوگرد اندام هوایی با شاخص وزن خشک ریشه دارای همبستگی **۰/۸، با وزن شاخساره **۰/۹ با سطح برگ *۰/۴۶، با غلظت گوگرد شاخساره **۰/۹۴ با غلظت سلنیوم شاخساره *۰/۴–، با غلظت گوگرد دانه **۰/۷۴، با وزن دانه **۰/۹، جذب گوگرد دانه **۰/۸۷ بود.

اثر تیمارهای آزمایش بر غلظت و جذب سلنیوم اندام هوایی گیاه کلزا

در خاک استفاده شده در این ازمایش مقدار سلنیوم خاک پس از برداشت در منبع سلنیت ۰/۰۳۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در منبع سلنات ۰/۰۳۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. مقدار سلنیوم خاک در سطوح ۰، ۳۰ و ۶۰ میکروگرم در کیلوگرم سلنیوم استفاده شده نیز به‌ترتیب ۰/۰۲۵، ۰/۰۴۱ و ۰/۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود.

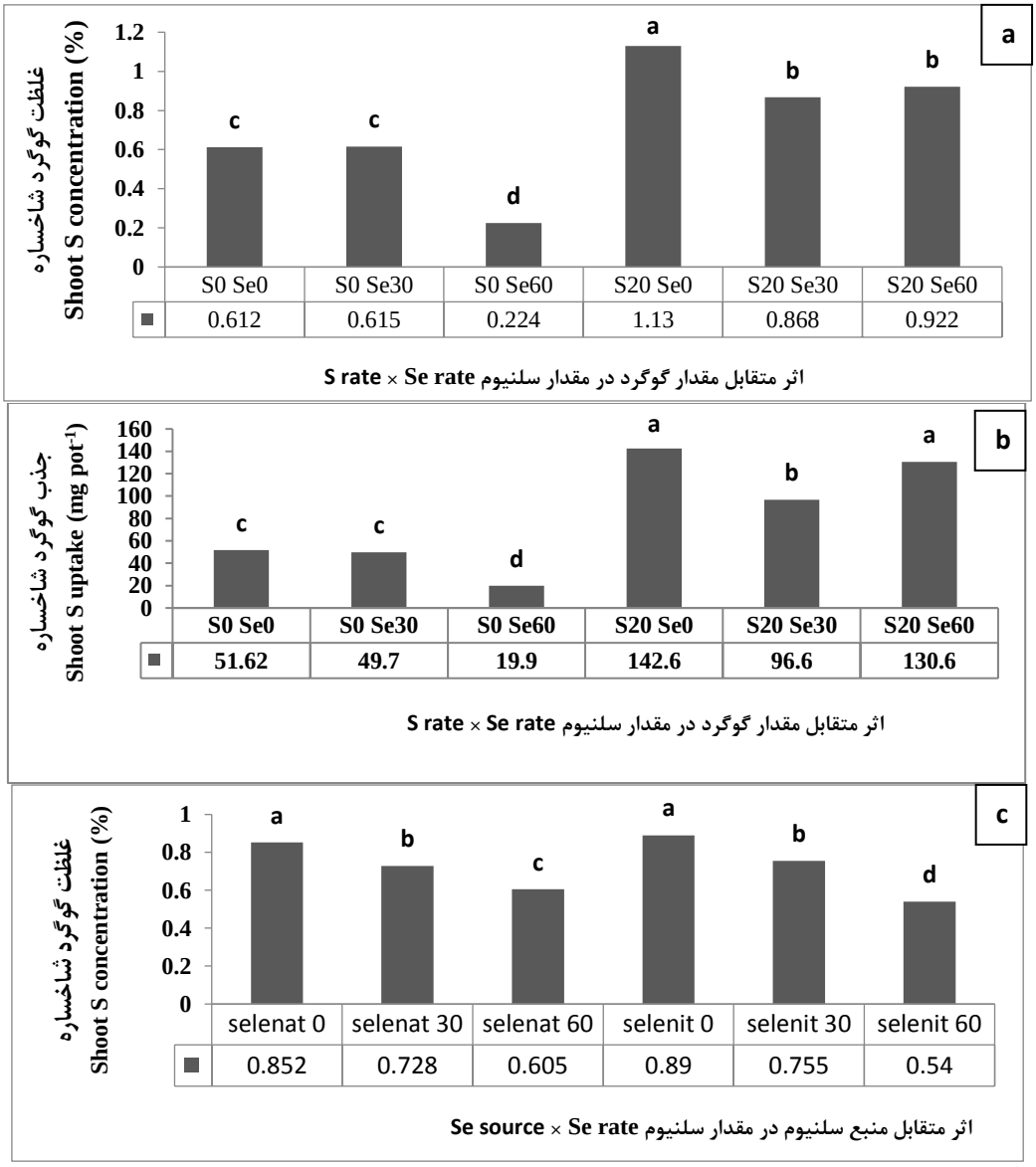
جدول ۳- تجزیه واریانس خصوصیات غلظت و جذب عناصر در شاخساره گیاه کلزا

Table 3- Analysis of variance of concentration and absorption of nutrients in canola shoot

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	جذب سلنیوم Se uptake	غلظت سلنیوم Se concentration	جذب گوگرد S uptake	غلظت گوگرد S concentration
سطح گوگرد S rate	1	0.09^{ns}	0.081**	61794.8**	2.1603**
شکل سلنیوم Se form	1	2.804**	0.0202**	225.04^{ns}	0.000003^{ns}
سطح‌سلنیوم Se rate	2	66.63**	0.518**	2106.9**	0.268**
سطح‌گوگرد*شکل سلنیوم Se form* S rate	1	0.049^{ns}	0.0027**	264.3^{ns}	0.0002^{ns}
سطح‌گوگرد*سطح‌سلنیوم S rate* Se rate	2	0.038^{ns}	0.027**	3190.1**	0.150**
شکل سلنیوم*سطح‌سلنیوم Se rate *Se form	2	0.748^{ns}	0.005**	107.17^{ns}	0.0096*
سطح‌گوگرد*شکل سلنیوم*سطح‌سلنیوم S rate*Se rate*Se form	2	0.008^{ns}	0.0008^{ns}	8.18^{ns}	0.004^{ns}
خطا Error	24	0.259	0.0003	215.4	0.003
ضریب تغییرات C.V. (٪)	-	19	7.2	17.9	6.9

علامت ** و * بیانگر معنی‌داری تیمارها در سطح ۱ و ۵ درصد و ns بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها

** and * indicates the significance of the treatments at the 1 and 5 percent levels, and ^{ns} indicates no significant difference between the treatments



شکل ۲- اثر متقابل تیمارها بر غلظت و جذب گوگرد اندام هوایی کلزا

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن)

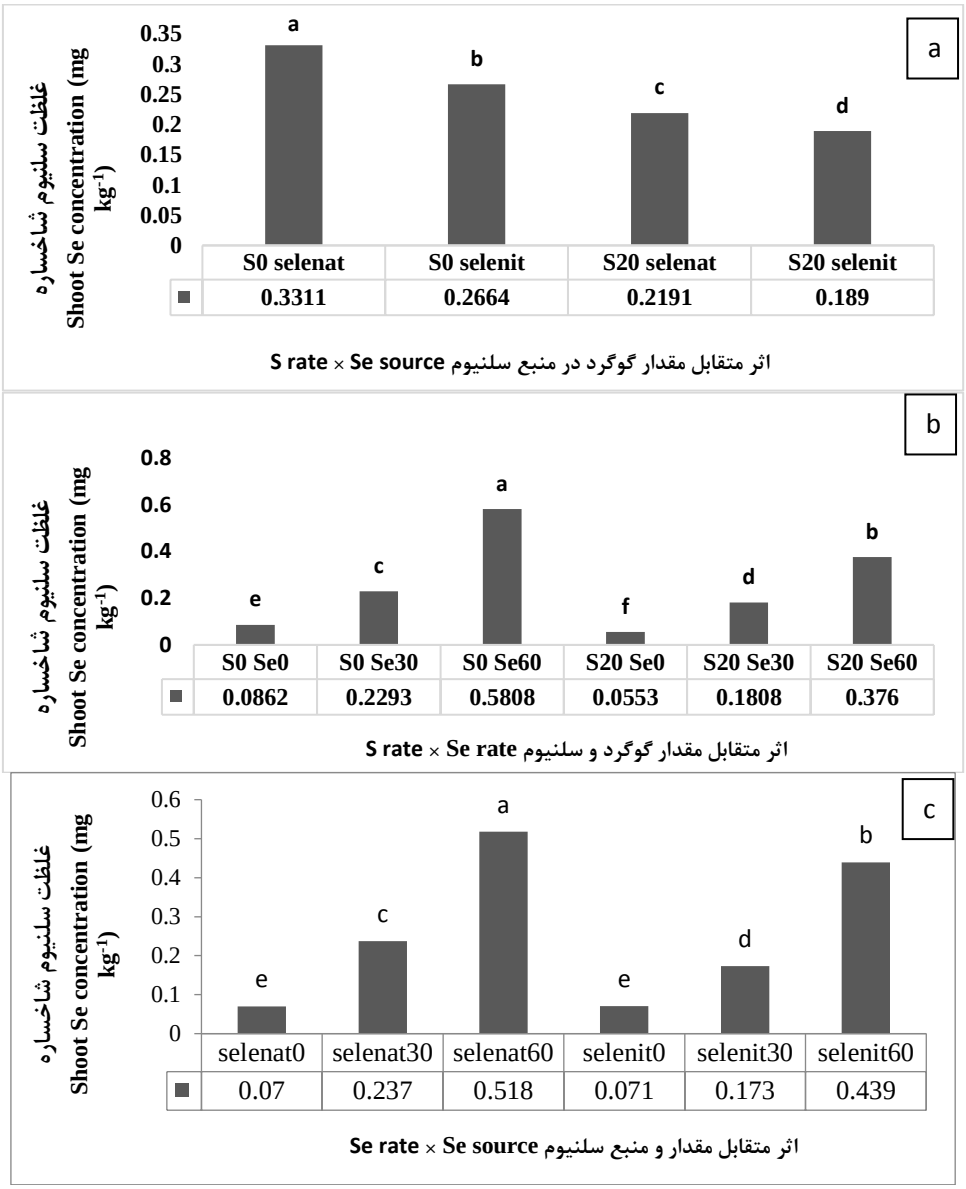
Figure 2- Effect of treatments on sulfur concentration and uptake in rapeseed shoots

Columns with at least one common letter have no significant difference at the 5% Duncan test level

با توجه به نتایج (شکل ۳a) در زمان کاربرد سلنات مقدار غلظت سلنیوم بیشتر از زمان کاربرد سلنیت بود (چه در زمان کاربرد گوگرد و چه بدون کاربرد گوگرد). در تیمارهای محتوی سلنیوم از هر دو منبع سلنات و سلنیت، کاربرد گوگرد باعث کاهش معنی‌دارغلظت سلنیوم اندام هوایی کلزا شد (به‌ترتیب ۳۳/۸ درصد در سلنات و ۲۸/۹ درصد در سلنیت). در تیمارهای محتوی سلنیوم، کاربرد گوگرد باعث کاهش معنی‌دار غلظت سلنیوم اندام هوایی کلزا شد. در مطالعات کیکرت و همکاران (Kikkert, Hale, & Berkelaar, 2013) کاربرد سولفات در خاک باعث کاهش جذب سلنیوم در اندام هوایی کلزا شد. به‌طور مثال در تیمار ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنیوم و بدون گوگرد، غلظت سلنیوم اندام هوایی ۰/۲۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در تیمار ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنیوم و همراه با گوگرد، غلظت سلنیوم اندام هوایی ۰/۱۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (معادل ۲۰/۹۶ درصد کاهش). این کاهش در تیمار ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنیوم معادل ۳۵/۳ درصد بود (از ۰/۵۸۱ به ۰/۳۷۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) (شکل b۳). در مطالعات لیو و همکاران (Liu, Yang, Deng, *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 می گردد، زیرا مقدار بیشتری از گوگرد را برای تخصیص به عملکردهای ضروری گیاه از جمله اثر محافظتی در اختیار دارد (Kikkert *et al.*, 2013).

با توجه به نتایج (شکل ۳c) کاربرد سلنیوم از منبع سلنات باعث ایجاد غلظت بیشتر سلنیوم در اندام هوایی کلزا نسبت به منبع سلنیت شد و این تفاوت معنی‌دار در هر دو سطح سلنیوم استفاده شده مشاهده شد. به‌طور مثال در تیمار ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنات و بدون گوگرد، غلظت سلنیوم اندام هوایی ۰/۲۳۷ میلی‌گرم بر کیلو گرم و در تیمار ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنیت دارای گوگرد، غلظت سلنیوم اندام هوایی ۰/۱۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (معادل ۲۷ درصد کاهش غلظت). در تیمار ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم 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 منبع سلنات سدیم، نسبت به سلنیت سدیم سبب افزایش قابل توجه میزان سلنیوم در شاخه و ریشه گیاه کلزا می‌شود (Sharma *et al.*, 2010).



شکل ۳- اثر ات متقابل سطوح گوگرد و سلنیوم بر غلظت سلنیوم در اندام هوایی گیاه کلزا

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن)

Figure 3- Effect of sulfur levels on selenium concentration in rapeseed shoots

Columns with at least one letter in common have no significant difference at the 5% Duncan test level

میل ترکیبی بین گیرنـده‌های سولفات و سلنات علت تفاوت بین سلنات و سلنیت است که سبب تسهیل در جذب و انتقال سلنیوم می‌شود (Zhang, Pan, Chen, & Hu, 2003). در بررسی انجام گرفته به وسیله کیکرت و برکلار (Kikkert & Berkelaar, 2013) نیز غلظت سلنیوم در تیمار سلنیت و سلنات در گیاهان کلزا و نیز گندم متفاوت بود. غلظت سلنیوم در اندام هوایی با افزایش غلظت سلنیوم مصرفی متفاوت بود. غلظت سلنیوم در گیاهان کلزا بیشتر از گندم بود (۳ تا ۱۷ برابر). چون مسیر جذب سلنات و سلنیت به‌ترتیب از طریق ناقلین سولفات و فسفات انجام می‌شود، تفاوت در فعالیت این ناقلین می‌تواند بر مقدار جذب سلنیوم از دو منبع مؤثر باشد (Kikkert & 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. در گزارش کیکرت و برکلار (Kikkert & Berkelaar, 2013) نیز به میزان جذب و انتقال از طریق ریشه اشاره شده است. در روش محلول پاشی، مقدار انتقال سلنیوم به میزان بارگزاری آوند آبکش و مقدار تنفس گیاه بستگی دارد. غلظت سلنیوم شاخساره با غلظت گوگرد دانه دارای همبستگی **۰/۴۷-، با غلظت سلنیوم دانه **۰/۹۶، با جذب سلنیوم دانه **۰/۸۱، با جذب گوگرد دانه **۰/۴۳-، با غلظت گوگرد شاخساره **۰/۶۴-، با جذب سلنیوم شاخساره **۰/۹۲ و با جذب گوگرد شاخساره دارای همبستگی *۰/۴- بود.

کاربرد سلنیوم از منبع سلنات باعث جذب مقدار بیشتر سلنیوم در اندام هوایی کلزا نسبت به منبع سلنیت شد (۲/۹۱۸ در مقابل ۲/۳۶ میکروگرم در گلدان) که این اختلاف معنی‌داربود (نتایج ارائه نشد). بین سطوح سلنیوم مصرف شده و مقدار جذب آن توسط گیاه اختلاف معنی‌دار وجود داشت، به‌طوری‌که با افزایش سطح مصرف سلنیوم میزان جذب نیز افزایش پیدا کرد (از ۰/۷۱۱ میکروگرم در گلدان در شاهد به ۱/۹۳۹ در تیمار ۳۰ میکروگرم در کیلوگرم و ۵/۲۶۵ میکروگرم در گلدان در تیمار ۶۰ میکروگرم در کیلوگرم). تفاوت بین سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم در کیلوگرم نیز از لحاظ جذب سلنیوم اندام هوایی کلزا معنی‌دار بود. همبستگی جذب سلنیوم شاخساره با غلظت سلنیوم شاخساره **۰/۹۲، با غلظت سلنیوم دانه **۰/۹۴، با جذب سلنیوم دانه **۰/۹۳ و با غلظت گوگرد شاخساره *۰/۳۶- بود.

جدول ٤- تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده در دانه کلزا

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

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	جذب سلنیوم Se uptake	غلظت سلنیوم Se concentration	وزن دانه Grain weight	جذب گوگرد S uptake	غلظت گوگرد S concentration
سطح گوگرد S rate	1	**0.351	0.013**	15.406**	324.99**	0.069**
شکل سلنیوم Se form	1	0.032ns	0.002**	0.016ns	19.47**	0.022**
سطح‌سلنیوم Se rate	2	**2.92	0.327**	0.568*	32.93**	0.0136**
سطح‌گوگرد*شکل سلنیوم Se form* S rate	1	*0.065	0.0004**	0.334ns	3.92ns	0.0027**
سطح‌گوگرد*سطح‌سلنیوم S rate* Se rate	2	*0.034	0.0017**	0.407ns	13.79**	0.001**
شکل سلنیوم*سطح‌سلنیوم Se rate *Se form	2	0.008ns	0.0005**	0.026ns	5.024*	0.0061**
سطح‌گوگرد*شکل سلنیوم*سطح‌سلنیوم S rate*Se rate*Se form	2	0.023ns	0.00009*	0.106ns	3.171ns	0.003**
خطا Error	24	0.009	0.00002	0.121	1.226	0.00005
ضریب تغییرات C.V.(٪)	-	11.7	1.6	10.8	13.6	2.8

علامت ** و * بیانگر معنی‌داری تیمارها در سطح ۱ و ۵ درصد و ns بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار بین تیمارها

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

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

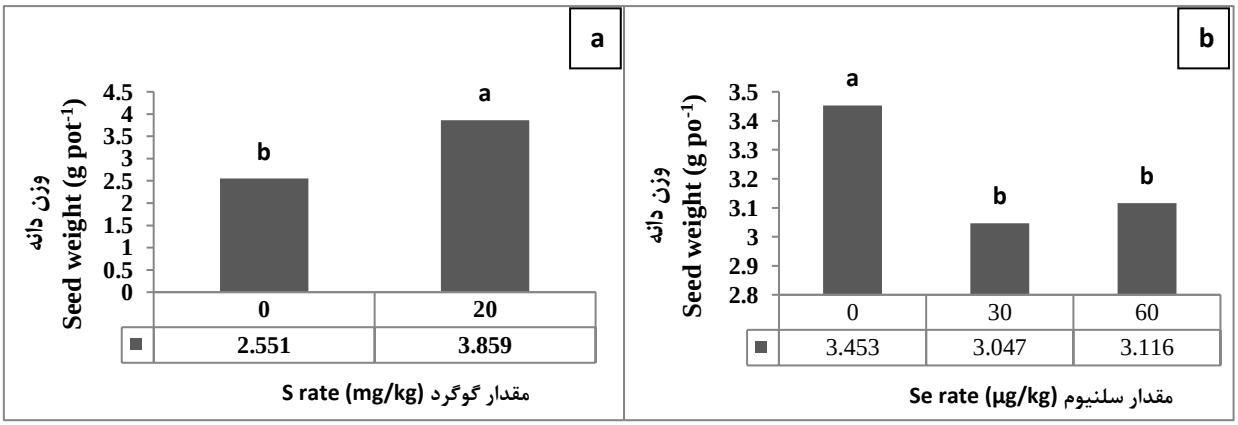
با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۴)، اثر اصلی مقدار گوگرد و اثر اصلی سطح سلنیوم بر شاخص وزن دانه کلزا، معنی‌دار بود (به‌ترتیب $P<0.01$ و $P<0.05$). اثر متقابل سه گانه سطح گوگرد× منبع سلنیوم× سطح سلنیوم بر غلظت گوگرد دانه معنی‌دار بود ($P<0.01$). اثر متقابل سطح گوگرد × سطح سلنیوم ($P<0.01$) و نیز اثر متقابل سطح سلنیوم × منبع سلنیوم ($P<0.05$) بر جذب گوگرد دانه، معنی‌دار بود (جدول ۴). اثر متقابل سه گانه سطح گوگرد× سطح سلنیوم × منبع سلنیوم بر غلظت سلنیوم دانه معنی‌دار بود ($P<0.05$). اثر متقابل سطح گوگرد × سطح سلنیوم ($P<0.05$) و اثر متقابل سطح گوگرد × منبع سلنیوم ($P<0.05$) بر شاخص جذب سلنیوم دانه معنی‌دار بود.

اثر تیمارهای آزمایش بر وزن دانه کلزا

با توجه به نتایج (شکل a۴) افزودن گوگرد باعث افزایش وزن دانه از ۲/۵۵۱ گرم در گلدان به ۳/۸۵۹ گرم در گلدان شد (۵۱/۳ درصد افزایش). کاربرد سلنیوم در هر دو سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم در کیلوگرم، باعث کاهش وزن دانه کلزا نسبت به تیمار شاهد شد (به‌ترتیب ۱۱/۸ و ۹/۸ درصد) (شکل b۴). وزن دانه با غلظت گوگرد دانه دارای همبستگی **۰/۷۷، با جذب گوگرد دانه **۰/۹۴، با غلظت گوگرد شاخساره **۰/۸۴، جذب گوگرد شاخساره **۰/۹، با سطح برگ **۰/۶۱، با وزن ریشه ۰/۷۹ و با وزن شاخساره دارای همبستگی **۰/۸ بود. به این ترتیب مشاهده می‌گردد که ویژگی‌های رشدی ریشه، اندام هوایی و غلظت گوگرد هم در اندام هوایی و دانه بر شاخص وزن دانه بسیار مؤثر است.

اثر تیمارهای آزمایش بر غلظت و جذب گوگرد دانه کلزا

بر اساس نتایج (شکل a۵) در شرایط بدون کاربرد گوگرد، کاربرد سلنیوم از منبع سلنیت و در هر دو سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم، باعث کاهش غلظت گوگرد دانه کلزا نسبت به تیمار شاهد (بدون گوگرد و سلنیوم) شد. مقدار کاهش غلظت در سطح ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم بیشتر بود. ولی کاربرد سلنیوم از منبع سلنات و در هر دو سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم، باعث افزایش غلظت گوگرد دانه کلزا شد. تفاوت دو سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم در این منبع از بابت غلظت گوگرد دانه معنی‌دار نبود. در تیمار بدون گوگرد و بدون سلنیوم، غلظت گوگرد دانه ۰/۲۱۷ درصد بود که با کاربرد گوگرد و بدون سلنیوم به ۰/۳۳ درصد رسید (۵۲/۱ درصد افزایش). با افزودن گوگرد به تیمارهای محتوی سلنیت و سلنات، غلظت گوگرد دانه کلزا افزایش یافت ولی مقدار افزایش در تیمار محتوی سلنات بیشتر از سلنیت بود. به‌طور مثال در تیمار گوگرد۲۰ و سلنات ۳۰، غلظت گوگرد دانه ۰/۳۱۸ درصد و در تیمار گوگرد۲۰ و سلنیت ۳۰، غلظت گوگرد دانه ۰/۲۶ درصد بود. اثر کاربرد گوگرد به تنهایی در افزایش غلظت گوگرد دانه بیشتر از کاربرد همزمان گوگرد و سلنیوم بود. در شرایط کاربرد گوگرد، کمترین غلظت گوگرد دانه از تیمار سلنیت ۶۰ بدست آمد. در شرایط بدون گوگرد نیز این تیمار (سلنیت۶۰) کمترین غلظت گوگرد دانه را داشت (۰/۱۰۸ درصد).

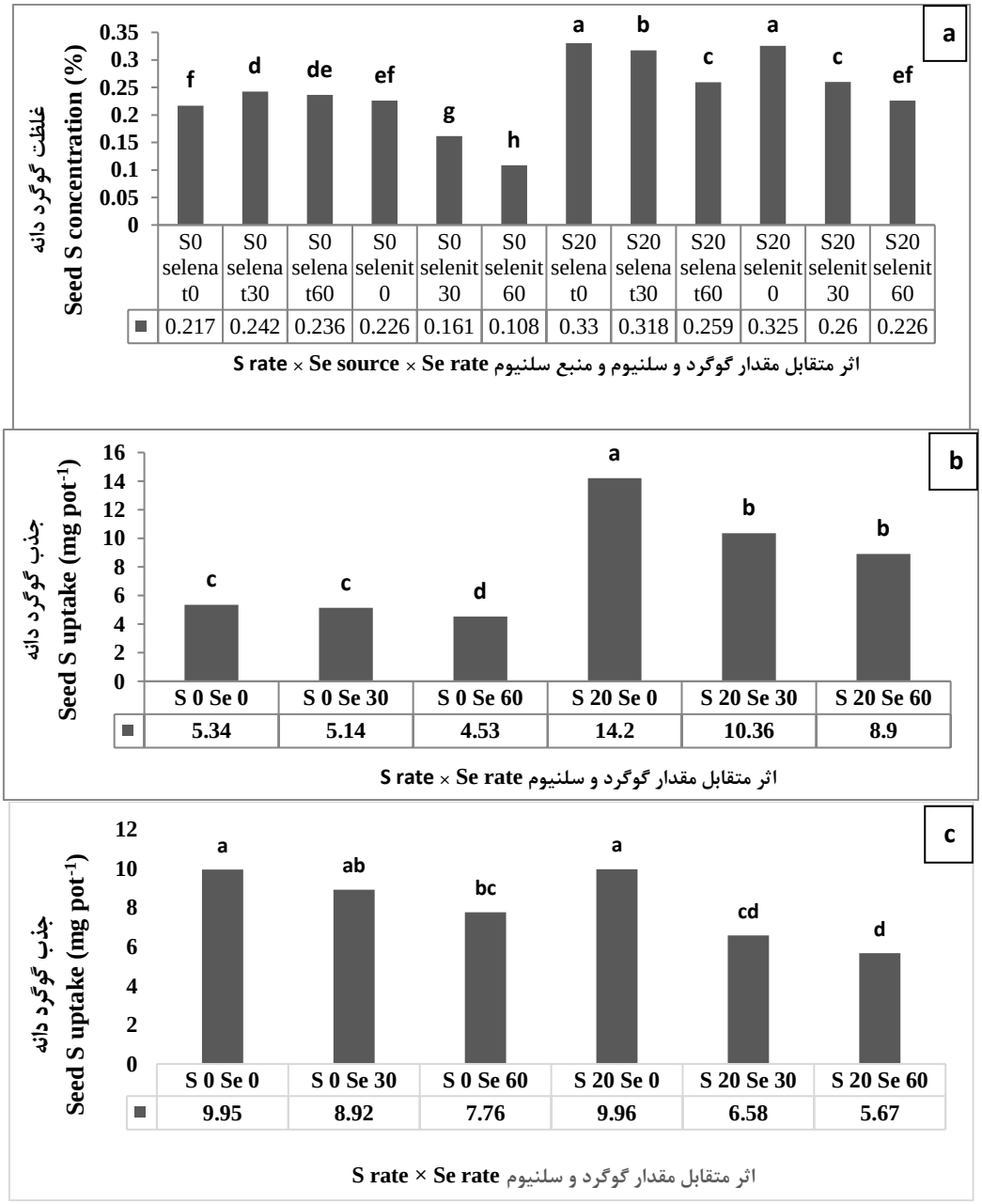


شکل ٤– اثرات اصلی سطوح گوگرد و سلنیوم بر وزن دانه کلزا

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن)

Figure 4– Effects of sulfur level, and selenium level on canola grain weight

Columns with at least one letter in common have no significant difference at the 5% Duncan test level



شکل ۵- اثرات متقابل سطوح مختلف گوگرد و سلنیوم بر غلظت و جذب گوگرد دانه کلزا

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن)

Figure 5- Effect of treatments on sulfur concentration and absorption in canola seed

Columns with at least one common letter do not have significant differences at the 5% Duncan test level

غلظت گوگرد دانه دارای همبستگی *۰/۴۸- با غلظت سلنیوم دانه، **۰/۷۷ با وزن دانه، **۰/۹۲ با جذب گوگرد دانه، **۰/۷۹ با غلظت گوگرد شاخساره، **۰/۴۷- با غلظت سلنیوم شاخساره، **۰/۷۴ با جذب گوگرد شاخساره، **۰/۵۳ با وزن شاخساره، **۰/۶۹ با سطح برگ و **۰/۷۳ با وزن ریشه بود. با کاربرد گوگرد (۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، مقدار جذب گوگرد دانه از ۵/۳۴ میلی‌گرم در گلدان در تیمار شاهد (بدون گوگرد) به ۱۴/۲ میلی‌گرم در گلدان، افزایش یافت (۱۶۶ درصد افزایش) (شکل b۵). هم در شرایط کاربرد گوگرد و هم در شرایط بدون گوگرد، استفاده از سلنیوم باعث کاهش جذب گوگرد دانه شد. در شرایط بدون کاربرد گوگرد، کاربرد ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنیوم، مقدار جذب گوگرد دانه را به‌صورت معنی‌داری نسبت به سطح ۳۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنیوم، کاهش داد (۱۱/۹ درصد کاهش) (شکل b۵). جذب گوگرد دانه با کاربرد سطح ۳۰ میکرو گرم بر کیلوگرم سلنیوم از منبع سلنات نسبت به شاهد کاهش نیافت ولی در سطح ۶۰ میکرو گرم بر

کیلوگرم از این منبع نسبت به تیمار شاهد کاهش معنی‌دار یافت (۲۲ درصد کاهش). در هر دو سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنیوم از منبع سلنیت، کاهش جذب گوگرد دانه نسبت به شاهد مشاهده شد (شکل c۵). اثر منفی سلنیت بر جذب گوگرد دانه کلزا بیشتر از منبع سلنات بود. جذب گوگرد دانه دارای همبستگی **۰/۴۲- با غلظت سلنیوم دانه، **۰/۹۴ با وزن دانه، **۰/۸۶ با غلظت گوگرد شاخساره، *۰/۴۳- با غلظت سلنیوم شاخساره، **۰/۸۷ با جذب گوگرد شاخساره، **۰/۷ با وزن شاخساره، ۰/۶۹ با سطح برگ و **۰/۸۳ با وزن ریشه بود.

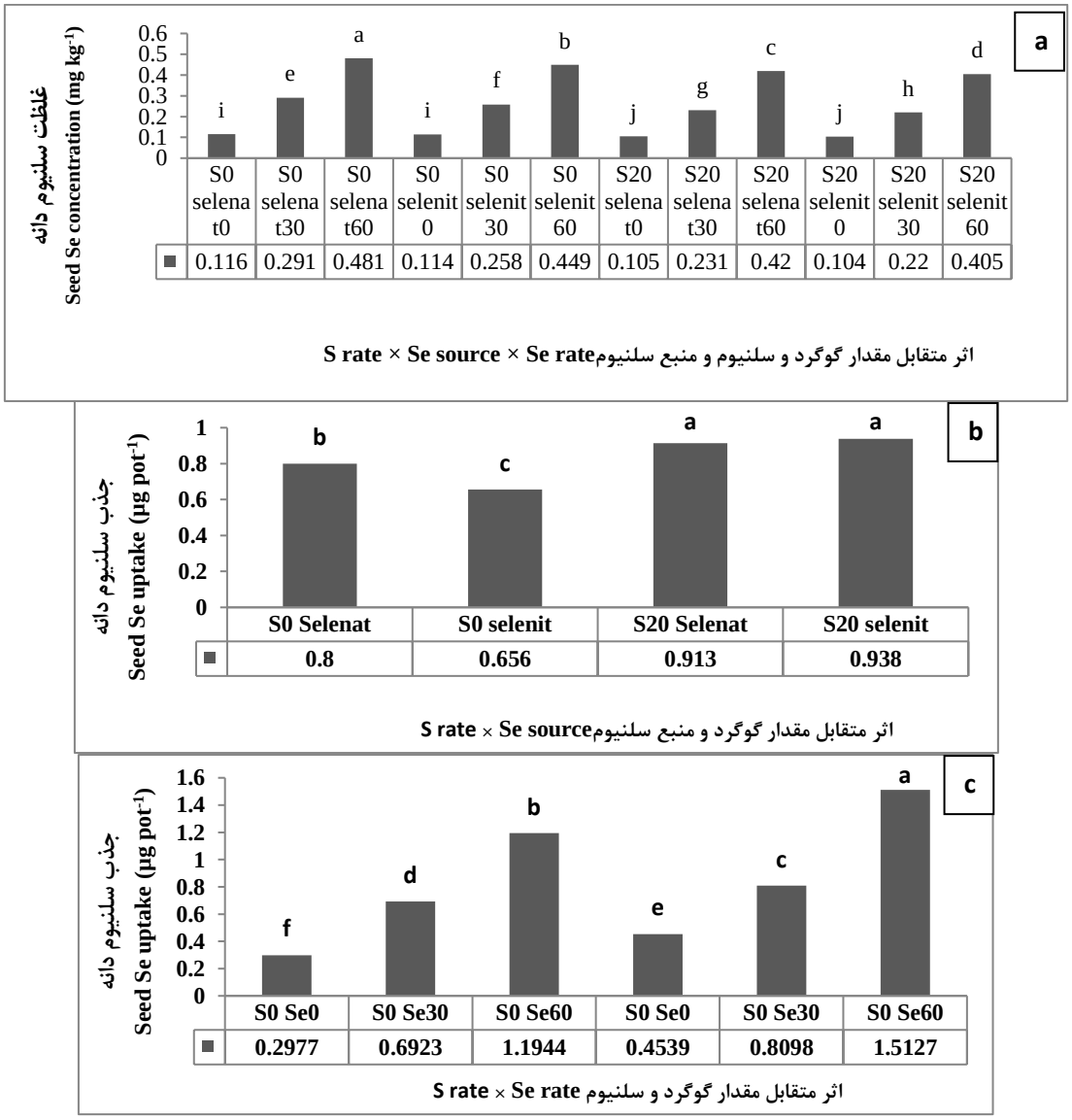
اثر کاربرد گوگرد و سلنیوم بر غلظت و جذب سلنیوم دانه کلزا

با توجه به نتایج (شکل a۶) در زمان عدم کاربرد گوگرد و یا در زمان کاربرد گوگرد، با افزایش سطح سلنیوم استفاده شده، غلظت سلنیوم دانه نیز افزایش یافت. در هر سطح سلنیوم استفاده شده، غلظت سلنیوم دانه در تیمارهای محتوی گوگرد، کمتر از تیمارهای بدون گوگرد بود. پس برای کاهش اثرات غلظت زیاد سلنیوم می‌توان از گوگرد استفاده نمود. در تیمار ۳۰ از سلنات، کاربرد گوگرد، غلظت سلنیوم دانه را ۲۰/۷ درصد کاهش داد (از ۰/۲۹ به ۰/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم). به نظر می رسد مقدار جابجایی از اندام برگ و ساقه به دانه در تیمار سلنات بیشتر از سلنیت بوده است. بیشترین غلظت سلنیوم دانه مربوط به سطح ۶۰ از منبع سلنات بود (۰/۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم). در تیمارهای بدون گوگرد، غلظت سلنیوم دانه در تیمار سلنیت به‌صورت معنی‌داری کمتر از منبع سلنات بود (۰/۴۰۴ در مقابل ۰/۴۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) (شکل a۶). در بررسی انجام گرفته به‌وسیله لیو و همکاران (Liu, Zhao, Hu, Zhao, Guo, 2016)، غلظت سلنیوم دانه در تیمار محتوی سلنات بیشتر از تیمار محتوی 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 بررسی اکانایاک و همکاران (Ekanayake, Vial, 2015) در گیاه عدس در کانادا نیز (Schatz, McGee, & Thavarajah, مشاهده شد که مقدار جذب سلنیوم در سلنات بیشتر از منبع سلنیت بود. غلظت سلنیت دانه عدس در زمان کاربرد سلنیوم بین ۱/۴-۰/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در گیاه شاهد ۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود (مقدار سلنیوم خاک پیش از کشت ۸۴-۶۳ میکروگرم بر کیلوگرم بود). بانوالوس و همکاران (Bañuelos, Walse, Yang, *et al.*, 2012) غلظت سلنیوم دانه را برای گیاه کلزا ۲-۱/۸ میکروگرم بر گرم وزن خشک دانه بدست آوردند. سلنیوم بیشتر در کوتیلدون و ریشه جنین دانه کلزا تجمع یافته بود. در بررسی انجام گرفته به‌وسیله هاشم و همکاران (Hashem, Hassanein, Bekheta, & El-Kady, 2013)، محلول پاشی سلنیوم در کلزا، موجب افزایش مقدار سلنیوم در دانه و در نتیجه روغن استحصال شده از آن شد. نتایج مطالعه لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2017) نیز نشان داد که بذر کلزای تیمار شده با سلنیت یا سلنات، بیش از ۹۹ درصد Se را در کنجاله دانه کلزا انباشته کرد. این به این دلیل است که Se جذب شده در گیاهان عمدتاً به شکل گونه‌های آلی وجود دارد. پس از ورود به گیاه، سلنیت یا سلنات می‌تواند جایگزین گروه سولفیدریل در پروتئین‌های حاوی گوگرد شود. اجزای اصلی روغن کلزا لیپیدها هستند که تجمع سلنیوم را مشکل می‌کند. مقادیر کمی از Se موجود در روغن کلزا نیز در صورت پخت با دمای بالا، تبخیر می شود (Liu *et al.*, 2017).

غلظت سلنیوم دانه با غلظت گوگرد دانه دارای همبستگی **۰/۴۸- ، با جذب سلنیوم دانه **۰/۹، با جذب گوگرد دانه **۰/۴۲-، با غلظت گوگرد شاخساره **۰/۵۲-، با غلظت سلنیوم شاخساره **۰/۹۶، با جذب سلنیوم کاه **۰/۹۴ و با سطح برگ **۰/۳۷ - بود.

در شرایط عدم مصرف گوگرد، مقدار جذب سلنیوم از منبع سلنات ۲۲ درصد بیشتر از منبع سلنیت بود (۰/۸ میکرو گرم در گلدان در برابر ۰/۶۵۶ میکروگرم در گلدان) (شکل b۶). کاربرد گوگرد به مقدار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مقدار جذب سلنیوم دانه کلزا را نسبت به شرایط عدم مصرف گوگرد افزایش داد. در شرایط کاربرد گوگرد، جذب سلنیوم دانه در دو منبع تفاوت معنی‌داری با هم نداشت (۰/۹۳۸ در مقابل ۰/۹۱۳ میکروگرم در گلدان).

با افزایش سطح سلنیوم مصرف شده از ۳۰ به ۶۰ میکروگرم در کیلوگرم، جذب سلنیوم دانه نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت و این افزایش معنی‌داربود (از ۰/۲۹۸ میکروگرم در گلدان در تیمار شاهد به ۰/۶۹۳ میکروگرم در گلدان در تیمار ۳۰ میکروگرم در کیلوگرم و ۱/۱۹ میکروگرم در گلدان در تیمار ۶۰ میکروگرم در کیلوگرم) (شکل c۶). تفاوت سطح ۳۰ و ۶۰ میکروگرم در کیلوگرم نیز باهم معنی‌دار بود. مقدار جذب سلنیوم دانه در تیمارهای دارای گوگرد نسبت به شرایط عدم مصرف گوگرد افزایش یافت. چرا که در شرایط کاربرد گوگرد مقدار وزن دانه نیز افزایش یافت. جذب سلنیوم دانه با غلظت سلنیوم دانه دارای همبستگی **۰/۹، با غلظت سلنیوم شاخساره **۰/۸۱، جذب سلنیوم شاخساره ***۰/۹۳ و با وزن شاخساره *۰/۴۳ بود.



شکل ٦- اثر متقابل تیمارها بر غلظت سلنیوم دانه کلزا

ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن

Figure 6- Effect of treatments on selenium concentration in canola seed

Columns with at least one letter in common have no significant difference at the 5% Duncan test level.

نتیجه‌گیری

کاربرد گوگرد سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک شاخساره، وزن خشک ریشه، سطح برگ و دانه کلزا نسبت به شرایط عدم کاربرد گوگرد شد (۴۸/۸ درصد افزایش در شاخساره، ۲۸/۱ درصد در ریشه، ۱۵/۷ درصد در سطح برگ و ۵۱/۳ درصد افزایش در وزن دانه). وزن دانه با جذب گوگرد دانه دارای همبستگی **۰/۹۴ و با جذب گوگرد شاخساره **۰/۹ بود. کاربرد سلنیوم از منبع سلنات باعث جذب مقدار بیشتر سلنیوم در اندام هوایی و دانه کلزا نسبت به منبع سلنیت شد. در دانه، کاربرد گوگرد باعث افزایش جذب سلنیوم از هر دو منبع شد. درصورتی‌که افزایش غلظت سلنیوم دانه برای موارد غنی‌سازی مدنظر باشد می‌توان کاربرد ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گوگرد و ۶۰ میکروگرم بر کیلوگرم سلنات را در نظر گرفت که نزدیک‌ترین مقدار وزن دانه به تیمار ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گوگرد و بدون سلنیوم بود. استفاده از گوگرد به‌دلیل اثر آنتاگونیستی آن بر غلظت سلنیم، اثرگذار بود.

سپاسگزاری

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

تشکر و قدردانی می‌گردد.

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

تضاد منافع

References

1. Abou Seeda, M.A., Yassen, A.A., Abou El-Nour, E.A.A., Gad Mervat, M., & Sahar, M. (2020). The essentiality of selenium for plants, and their role in plant physiology. A review. *Middle East Journal of Agriculture Research*, *9*(1), 149-170. https://doi.org/10.36632/mejar/2020.9.1.15
2. Agricultural Statistics. (2023). *Agricultural Statistics*, Volume 1 (crops) 2023. Statistics Center, Information and Communication Technology, Economic Planning Deputy, Ministry of Agricultural Jihad. Tehran, Iran.
3. Ahmad, Z., Anjum, S., Skalicky, M., Waraich, E.A., Muhammad Sabir Tariq, R., Ayub, M.A., Hossain, A., Hassan, M.M., Brestic, M., Sohidul Islam, M., & Habib-Ur-Rahman, M. (2021). Selenium alleviates the adverse effect of drought in oilseed crops camelina (*Camelina sativa* L.) and canola (*Brassica napus* L.). *Molecules*, *26*(6), 1699. https://doi.org/10.3390/molecules26061699
4. Alfthan, G., Eurola, M., Ekholm, P., Ven €al €ainen, E.-R., Root, T., Korkalainen, K., Hartikainen, H., Salminen, P., Hietaniemi, V., Aspila, P., & Aro, A. (2015). Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: from deficiency to optimal selenium status of the population. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, *31*, 142 e 147. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.04.009
5. Bañuelos, G.S., Walse, S.S., Yang, S.I., Pickering, I.J., Fakra, S.C., Marcus, M.A., & Freeman, J.L. (2012). Quantification, localization, and speciation of selenium in seeds of canola and two mustard species compared to seed-meals produced by hydraulic press. *Analytical Chemistry*, *84*(14), 6024-6030. https://doi.org/10.1021/ac300813e
6. Bitterli, C., Bañuelos, G.S., & Schulin, R. (2010). Use of transfer factors to characterize uptake of selenium by plants. *Journal of Geochemical Exploration*, *107*(2), 206-216. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.09.009
7. 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*.
8. 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. *Biomolecules*, *13*(5), 778. https://doi.org/10.3390/biom13050778
9. 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
10. 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. *Analytica Chimica Acta*, *308*(1-3), 269-274. https://doi.org/10.1016/0003-2670(94)00249-L
11. Cabannes, E., Buchner, P., Broadley, M.R., & Hawkesford, M.J. (2011). A comparison of sulfate and selenium accumulation in relation to the expression of sulfate transporter genes in Astragalus species. *Plant Physiology*, *157*(4), 2227-2239. https://doi.org/10.1104/pp.111.183897
12. Canola council of Canada. (2024). Sulphur. Canola encyclopedia, nutrient management. https://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/fertility/sulphur/.
13. 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. *Microbiological Research*, *271*, 127340. https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127340
14. Ekanayake, L.J., Vial, E., Schatz, B., McGee, R., & Thavarajah, P. (2015). Selenium fertilization on lentil (*Lens culinaris* Medikus) grain yield, seed selenium concentration, and antioxidant activity. *Field Crops Research*, *177*, 9-14. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.002
15. 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). https://doi.org/10.29252/aums.8.3.281
16. 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
17. Fouda, K.F. (2016). Quality parameter and chemical composition of spinash plant as affected by mineral fertilization and selenite foliar application. *Egyptian Journal of Soil Science*, *56*(1), 149-167.

https://doi.org/10.21608/ejss.2016.347
18. 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, 383-411. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15
19. 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 Physiology and Biochemistry*, *108*, 32 e 36. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.001
20. Gupta, M., & Gupta, S. (2017). An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science*, *7*, 2074. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074
21. 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. *Egyptian Journal of Experimental Biology*, *9*(2), 199–211.
22. Hawrylak-Nowak, B. (2013). Comparative effects of selenite and selenate on growth and selenium accumulation in lettuce plants under hydroponic conditions. *Plant Growth Regulation*, *70*, 149-157. https://doi.org/10.1007/s10725-013-9788-5
23. Hawrylak-Nowak, B., Hasanuzzaman, M., & Matraszek-Gawron, R. (2018). Mechanisms of selenium-induced enhancement of abiotic stress tolerance in plants. *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*, 269-295. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_12
24. Hawrylak-Nowak, B., Matrasses, 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 Physiologia Plantarum*, *37*, 1 e 13. https://doi.org/10.1007/s11738-015-1788-9
25. Hussain, S., Ahmed, S., Akram, W., Ahmad, A., Yasin, N.A., Fu, M., Li, G., & Sardar, R. (2024). The potential of selenium to induce salt stress tolerance in *Brassica rapa*: Evaluation of biochemical, physiological and molecular phenomenon. *Plant Stress*, *11*, 100331. https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100331
26. Kikkert, J., & Berkelaar, E. (2013). Plant uptake and translocation of inorganic and organic forms of selenium. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, *65*, 458-465. https://doi.org/10.1007/s00244-013-9926-0
27. Kikkert, J., Hale, B., & Berkelaar, E. (2013). Selenium accumulation in durum wheat and spring canola as a function of amending soils with selenite, selenate and or sulphate. *Plant and Soil*, *372*, 629-641. https://doi.org/10.1007/s11104-013-1773-2
28. 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.). *Ecotoxicology*, *23*, 1153 e11 6 3. https://doi.org/10.1007/s10646-014-1257-z
29. Lima, L.W., Pilon-Smits, E.A., & Schiavon, M. (2018). Mechanisms of selenium hyper accumulation in plants: A survey of molecular, biochemical and ecological cues. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, *1862*(11), 2343-2353. https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2018.03.028
30. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society American Journal*, *42*, 421-428. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x
31. 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. *Environmental and Experimental Botany*, *135*, 13-20. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.12.005
32. Liu, X., Zhao, Z., Hu, C., Zhao, X., & Guo, Z. (2016). Effect of sulphate on selenium uptake and translocation in rape (*Brassica napus* L.) supplied with selenate or selenite. *Plant and Soil*, *399*, 295-304. https://doi.org/10.1007/s11104-015-2699-7
33. Loeppert, R.H., & Suarez, D.L. (1996). Carbonate and Gypsum. In: Sparks, D. L. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods, SSSA and ASA, Madison, W. I.; 437-474. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c15
34. 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 and Environmental Science*, 1371(5), 052066). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1371/5/052066
35. Moulick, D., Mukherjee, A., Das, A., Roy, A., Majumdar, A., Dhar, A., Pattanaik, B.K., Chowardhara, B., Ghosh, D., Upadhyay, M.K., & Yadav, P. (2024). Selenium–An environmentally friendly micronutrient in agro-ecosystem in the modern era: An overview of 50-year findings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *270*, 115832. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115832
36. Nelson, D., & Sommers, L. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks D.L. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods. SSSA and ASA, Madison, W. I, pp. 961-1010. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34
37. Nie, X., Luo, D., Ma, H., Wang, L., Yang, C., Tian, X., & Nie, Y. (2024). Different effects of selenium speciation on selenium absorption, selenium transformation and cadmium antagonism in garlic. *Food Chemistry*, *443*, 138460. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138460
38. Niaik, M.M., & Dubey, S.K. (2016). Marine pollution and microbial remediation. Springer.

39. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. In Page A. L. et al. (Eds.), Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties of Phosphorus. 2nd ed. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp. 403-430. https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c24
40. Ren, T., Zou, J., Wang, Y., Li, X.K., Cong, R.H., & Lu, J.W. (2016). Estimating nutrient requirements for winter oilseed rape based on QUEFTS analysis. *The Journal of Agricultural Science*, *154*(3), 425-437. https://doi.org/10.1017/s0021859615000301
41. 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, 167-179. https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c10
42. Schulte, E.E., & Eik, K. (1988). Recommended sulfates-S test. PP: 17-20. In: W. C. Dahnke (ed.). Recommended chemical soil test procedures for the north central region. North Dakota Agricultural experiment Station Bulletin no 499, North Dakota State University. Fargo, ND. https://doi.org/10.34107/yhpn9422.0492
43. Sharma, R.K., Cox, M.S., Oglesby, C., & Dhillon, J.S. (2024). Revisiting the role of sulfur in crop production: a narrative review. *Journal of Agriculture and Food Research*, *15*, 101013. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101013
44. 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 and Soil*, *329*, 339–348. https://doi.org/10.1007/s11104-009-0162-3
45. Soltanpour, P.N., & Workman, S.M. (1980). Use of NH_4 HCO_3-DTPA soil test to assess availability and toxicity of selenium to alfalfa plants. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, *11*(12), 1147-1156. https://doi.org/10.1080/00103628009367111
46. 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. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3
47. Statista., (2024). Worldwide oilseed production in 2024/2025, by type (in million metric tons). https://www.statista.com/statistics/267271/worldwide-oilseed-production-since-2008/.
48. Szeles, E. (2007). Studying of Change of Selenium-Speciation in Soil and Plant Samples from a long-term field experiment. Doctoral Thesis University of Debrecen, https://dea.lib.unideb.hu/server/api/core/bitstreams/6216ad4c-e794-410c-8e48-9a4b4c299438/content.
49. Tian, M., Hui, M., Thannhauser, T.W., Pan, S., & Li, L., (2017). Selenium-induced toxicity is counteracted by sulfur in broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*). *Frontiers in Plant Science*, *8*, 1425. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01425
50. White, P.J. (2015). Selenium accumulation by plants. *Annals of Botany*, *117*, 217-235. https://doi.org/10.1093/aob/mcv180
51. Zhang, Y., Pan, G., Chen, J., & Hu, Q. (2003). Uptake and transport of selenite and selenite by soybean seedlings of two genotypes. *Plant and Soil*, *253*, 437–443.