



## Improvement of Photosynthetic and Biochemical Indices and Cold Tolerance in Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L. var *napus*) by Selenium Nanoparticles Application in the Rosette stage

Parisa Sheikhzadeh<sup>1</sup> | Gholam Behzad<sup>2</sup> | Nasser Zare<sup>3</sup> | Mitra Rostamihir<sup>4</sup>

1. Corresponding author, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: [P\\_sheikhzadeh@uma.ac.ir](mailto:P_sheikhzadeh@uma.ac.ir)
2. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran. E-mail: [gh.behzad@uma.ac.ir](mailto:gh.behzad@uma.ac.ir)
3. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: [nzare@uma.ac.ir](mailto:nzare@uma.ac.ir)
4. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili University and University of Applied Sciences and Technology, Ardabil, Iran. E-mail: [m.rostami@uast.ac.ir](mailto:m.rostami@uast.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received 9 March 2022

Received in revised form

19 November 2022

Accepted 6 December 2022

Published online 12 June 2024

#### Keywords:

*Antioxidant enzymes*

*Chlorophyll fluorescence*

*Foliar application*

*Oilseeds*

*Winter survival*

### ABSTRACT

**Objective:** Due to the injuries caused by cold and frost in temperate and cold regions, utilizing strategies that increase cold tolerance to enhance the winter survival and establishment of seedlings is imperative.

**Methods:** To investigate the effects of selenium nanoparticles application on photosynthetic and biochemical indices and cold tolerance of oilseed rape, an experiment was carried out based on a randomized complete blocks design with three replications at the research farm station of the University of Mohaghegh Ardabili in 2018. The treatments consisted of foliar application of selenium nanoparticles (0 [control], 25, and 50 mg L<sup>-1</sup>) applied at the 6-8 leaves stage.

**Results:** The results demonstrated that selenium nanoparticle application significantly increased the RWC, photosynthetic pigments, antioxidant enzyme activity, winter survival, and grain yields. The highest RWC, maximal fluorescence (F<sub>m</sub>), highest photochemical efficiency of photosystem II (F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>), and variable fluorescence (F<sub>v</sub>), proline content, and the activity of catalase and peroxidase enzymes were obtained with the foliar application of 50 mg L<sup>-1</sup> selenium nanoparticles. Selenium nanoparticles application significantly increased the winter survival of oilseed rape plants by about 7.18 to 8.94 percent, by improving the F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>, the activity of the antioxidant enzymes, and proline content. Foliar application of 25 and 50 mg L<sup>-1</sup> selenium nanoparticles resulted in about 28.10 and 34.19 percent increase in grain yield of oilseed rape as compared to the control (no spraying) treatment, respectively.

**Conclusion:** In general, the results demonstrated that applying 50 mg L<sup>-1</sup> selenium nanoparticles had positive and significant effects on the photosynthetic and biochemical characteristics of winter oilseed rape, which resulted in the increased cold tolerance of the oilseed rape plants.

**Cite this article:** Sheikhzadeh, P., Behzad, Gh., Zare, N., & Rostamihir, M. (2024). Improvement of Photosynthetic and Biochemical Indices and Cold Tolerance in Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L. var *napus*) by Selenium Nanoparticles Application in the Rosette stage. *Journal of Crops Improvement*, 26 (2), 213-233.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2022.340264.2692>





## بهبود شاخص‌های فتوسنتزی، بیوشیمیایی و تحمل به سرمای کلزا پاییزه با کاربرد نانوسلنیوم در مرحله روزت

پریسا شیخ‌زاده<sup>۱</sup> | غلام بهزاد<sup>۲</sup> | ناصر زارع<sup>۳</sup> | میترا رستمی هیر<sup>۴</sup>

۱. نویسنده مسئول، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: [P\\_sheikhzadeh@uma.ac.ir](mailto:P_sheikhzadeh@uma.ac.ir)
۲. گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: [gh.behzad@uma.ac.ir](mailto:gh.behzad@uma.ac.ir)
۳. گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: [nzare@uma.ac.ir](mailto:nzare@uma.ac.ir)
۴. گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی و دانشگاه جامع علمی-کاربردی، اردبیل، ایران. رایانامه: [m.rostami@uast.ac.ir](mailto:m.rostami@uast.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

**هدف:** با توجه به صدمات ناشی از سرما و یخبندان در مناطق معتدل و سرد، استفاده از راه‌کارهای افزایش‌دهنده تحمل به سرما برای افزایش بقای زمستانی و استقرار گیاهچه‌ها اهمیت دارد.

**روش پژوهش:** به منظور بررسی تأثیر کاربرد نانوسلنیوم در بهبود شاخص‌های فتوسنتزی، صفات بیوشیمیایی و افزایش تحمل به سرمای کلزای پاییزه، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۹۸-۱۳۹۷ انجام گرفت. تیمارهای آزمایشی شامل محلول‌پاشی غلظت‌های نانوسلنیوم (صفر (شاهد)، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) در مرحله ۸-۶ برگی بود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد محلول‌پاشی بوته‌های کلزا با غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم موجب افزایش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ، رنگیزه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، بقای زمستانه بوته‌ها و عملکرد دانه گردید. بیش‌ترین محتوای نسبی آب برگ، فلورسانس بیشینه (Fm)، حداکثر کارایی کواتومی فتوسینتسم II (Fv/Fm)، فلورسانس متغیر (Fv)، محتوای پرولین و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در بوته‌های محلول‌پاشی شده با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم به‌دست آمد. نانوسلنیوم از طریق افزایش میزان Fv/Fm، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و میزان اسیدآمینو پرولین، موجب افزایش درصد زنده‌مانی بوته‌های کلزا به میزان ۷/۱۸ تا ۸/۹۴ درصد شد. محلول‌پاشی بوته‌های کلزا با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم سبب افزایش عملکرد دانه به ترتیب به میزان ۲۸/۱۰ و ۳۴/۱۹ درصد در مقایسه با تیمار شاهد (بدون محلول‌پاشی) شد.

### کلیدواژه‌ها:

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

بقای زمستانه

دانه‌های روغنی

فلورسانس کلروفیل

محلول‌پاشی

**نتیجه‌گیری:** به‌طور کلی نتایج نشان داد که کاربرد نانوسلنیوم با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر تأثیر مثبت و معنی‌داری بر صفات بیوشیمیایی و شاخص‌های فتوسنتزی کلزا داشت که این موضوع سبب شد تا تحمل به سرما در بوته‌های کلزا افزایش یابد.

**استناد:** شیخ‌زاده، پریسا؛ بهزاد، غلام؛ زارع، ناصر؛ رستمی هیر، میترا (۱۴۰۳). بهبود شاخص‌های فتوسنتزی، بیوشیمیایی و تحمل به سرمای کلزا پاییزه با کاربرد نانوسلنیوم در مرحله روزت. *به زراعی کشاورزی*، ۲۶ (۲)، ۲۳۳-۲۱۳. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2022.340264.2692>



## ۱. مقدمه

کلزا یکی از مهم‌ترین محصولات دانه روغنی در سراسر جهان است که ۱۳ درصد از مصرف سرانه جهانی روغن را به خود اختصاص داده است (چن<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). کلزا به دلیل داشتن صفات و ویژگی‌هایی مانند ترکیب مناسب اسیدهای چرب، توانایی جوانه‌زنی و رشد در دماهای پایین و سازگاری نسبتاً خوب این گیاه با شرایط آب‌وهوایی مختلف، امکان کشت به صورت بهاره و پاییزه را دارد (بابی‌بوری، ۱۳۹۵). تولید و عملکرد کلزای پاییزه معمولاً بیش‌تر از کلزای بهاره است. بالا بودن عملکرد آن به دلیل استقرار مناسب گیاهچه در پاییز، طولانی‌بودن دوره رشد رویشی و استفاده بهتر از نزولات جوی می‌باشد به همین دلیل کشت کلزا بیش‌تر به صورت پاییزه انجام می‌شود (پاسبان اسلام، ۱۳۹۲).

در مناطقی با زمستان‌های سرد و سخت بوته‌های کلزای سبز شده فرصت کافی برای رشد در طی دوره قبل از یخبندان را ندارند و رشد کم بوته‌ها باعث خسارت سرما به گیاهچه‌ها در طی این دوره می‌شود. اولین بخشی که در اثر سرما آسیب می‌بیند غشای پلاسمایی است و حفظ یکپارچگی آن دلیل اصلی ماندگاری گیاه در این شرایط است (تاکاهاشی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). سرما باعث تغییر در ترکیب لیپیدی غشای سلولی، مقدار و عملکرد آنزیم‌ها، تجمع کربوهیدرات‌ها، اسیدهای آمینه و پروتئین‌های محلول در سلول می‌شود (لوندورف<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). کاهش میزان کلروفیل، مسدود شدن انتقال الکترون، کاهش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی و تولید گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن (ROS)<sup>۴</sup> از اختلالات اصلی سرما می‌باشد (جلیلیان و همکاران، ۱۳۹۶).

از آنجایی که در مناطق معتدل و سرد امکان بروز صدمات ناشی از سرما و یخبندان وجود دارد، استفاده از راه‌کارهای افزایش‌دهنده تحمل به سرما برای افزایش بقای زمستانی و استقرار مناسب گیاهچه‌ها می‌تواند از اهمیت به‌سزایی برخوردار باشد. با توجه به نقش مثبت سلنیوم در کاهش اثرات منفی تنش‌های محیطی، پژوهش حاصل به‌منظور بررسی تأثیر کاربرد نانوسلنیوم در مرحله روزت در شرایط مزرعه، با هدف ارائه راه‌کاری کاربردی و اقتصادی برای کشاورزان منطقه جهت حفاظت از گیاهچه‌های کلزا در برابر سرمای زمستانه انجام گردید.

## ۲. پیشینه پژوهش

مقاومت گیاهان به سرما، از عوامل مهمی است که سبب بقای گیاه در زمستان می‌شود. گیاهان متحمل به سرما از طریق افزایش میزان آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و هم‌چنین ترکیبات غیر آنزیمی از جمله کاروتنوئیدها و فلاونوئیدها از اثرات مخرب تنش اکسیداتیو ناشی از سرما، می‌کاهند (رضایی<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). بررسی گونه‌های مقاوم و حساس به تنش سرما در کلزا نشان داد که در گونه مقاوم، میزان آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و متابولیت‌هایی مانند پرولین افزایش می‌یابد (لی<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). فلورسانس کلروفیل یک روش غیرتخریبی برای تخمین جریان الکترون و عملکرد سیستم فتوسنتزی در اثر عوامل نامساعد محیطی مانند سرماست (ژائو<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). یکی دیگر از صفاتی که می‌توان به‌عنوان معیار تحمل به سرما در مرحله گیاهچه‌ای در نظر گرفت، میزان پرولین و کارایی فتوسیستم II می‌باشد (جلیلیان و همکاران، ۱۳۹۶). بررسی بقای زمستانی بوته‌ها یکی دیگر از روش‌های ارزیابی

1. Chen
2. Takahashi
3. Leuendorf
4. Reactive Oxygen Species
5. Rezaie
6. Lei
7. Zhao

گیاهان برای مقاومت به سرماست. این روش در مقایسه با سایر روش‌های آزمایشگاهی ساده و کم‌خرج است و از قابلیت تکرارپذیری بیش‌تر و خطای آزمایشی کم‌تری برخوردار است (منیری‌فر و صادق‌زاده، ۱۳۹۳). از آنجاکه سرما خسارت‌های قابل‌توجهی را به گیاهچه‌ها در فصل پاییز و زمستان وارد می‌نماید، بنابراین استقرار مطلوب گیاهچه‌ها در مزرعه در پاییز و توانایی زنده‌مانی آن‌ها دو عامل مهم تأثیرگذار گزارش شده است (قاسمی گل‌غزانی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۸). در این راستا روش‌های مقاوم‌سازی به سرما اهمیت به‌سزایی دارد. امروزه استفاده از عناصر غذایی کم‌مصرف (ریزمغذی‌ها) به‌عنوان یکی از راه‌کارهای افزایش مقاومت گیاهان زراعی به شرایط نامساعد محیطی و بهبود صفات فیزیولوژیکی و زراعی گیاهان تحت این شرایط به‌شمار می‌آید (خلیلی محله و رشدی، ۱۳۸۷).

عناصر کم‌مصرف، عناصری هستند که برای رشد طبیعی گیاه به مقدار کم موردنیاز هستند و در بسیاری از واکنش‌های بیوشیمیایی گیاه دخالت دارند (عقیقی شاهوردی و همکاران، ۱۳۹۶). سلنیوم (Se) یکی از مهم‌ترین ریزمغذی‌هاست که نقش مهمی در حفظ سلامتی انسان‌ها دارد، این عنصر در گیاهان به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان عمل می‌کند (چاوهان<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۹؛ لاپاز<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۹).

سلنیوم از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و پراکسیداز موجب خنثی‌شدن رادیکال‌های آزاد می‌شود و با کاهش پراکسیداسیون لیپیدی، تحمل گیاه را نسبت به شرایط نامساعد محیطی افزایش می‌دهد (لو<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). این عمل به‌نوبه خود موجب افزایش پایداری غشای سلولی، افزایش محتوای نسبی آب برگ و کاهش روند تخریب رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌گردد (ایلمیک<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). کاربرد سلنیوم موجب افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و کاروتنوئید در گوجه‌فرنگی (خاوری‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۹)، افزایش محتوای پرولین و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در سیب‌زمینی (جرم<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۷) و همچنین افزایش فلورسانس بیشینه در کلم بروکلی (قاسمی<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۶) شده است.

پژوهش‌ها نشان داد که محلول‌پاشی سلنیوم از طریق افزایش محتوای کلروفیل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و همچنین کاهش تولید رادیکال‌های آزاد و ممانعت از پراکسیداسیون لیپیدی غشا باعث افزایش مقاومت گیاهچه‌های گندم در مقابل سرما می‌شود (چو<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۰).

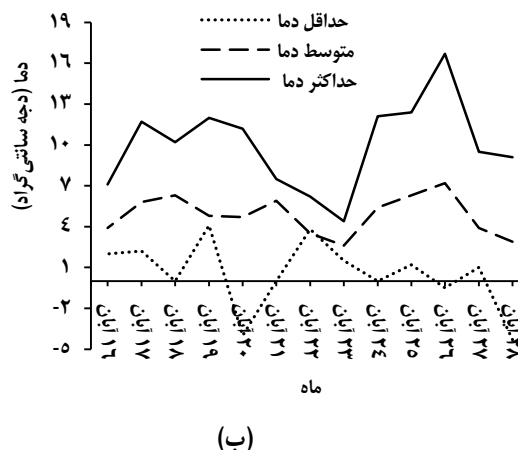
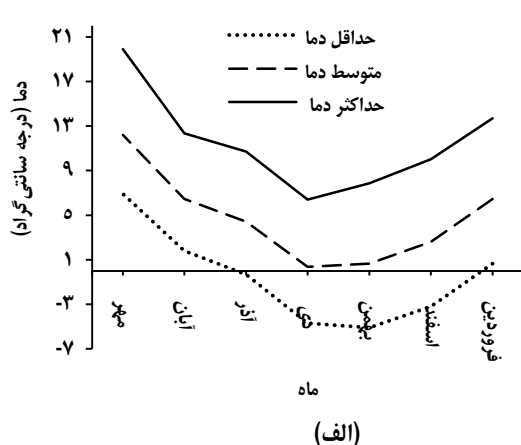
### ۳. روش‌شناسی پژوهش

آزمایش حاضر به‌منظور بررسی تأثیر کاربرد نانوسلنیوم بر شاخص‌های فتوسنتزی و صفات بیوشیمیایی کلزای پاییزه در مرحله روزت در سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی (با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۸ درجه و ۲۳ دقیقه عرض جغرافیایی و به ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا) با شرایط آب‌وهوایی نیمه‌خشک سرد اجرا شد. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی در جدول (۱) و دمای منطقه در بازه زمانی محلول‌پاشی تا نمونه‌برداری در شکل (۱) ارائه شده است.

1. Ghassemi-Golezani
2. Chauhan
3. Lapaz
4. Lu
5. Elemike
6. Germ
7. Ghasemi
8. Chu

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه در عمق ۳۰ سانتی‌متری

بافت خاک	اسیدیتته	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	پتاسیم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	فسفر (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	نیترژن	کربن رس	سیلت	شن
لومی رسی	۷/۹	۲/۶۸	۲۰۲/۵	۱۱/۸۳	۰/۰۶	۰/۴۴	۵۳/۷۵	۳۰/۸



شکل ۱. دمای منطقه آزمایش در بازه زمانی کاشت تا اندازه‌گیری بقای زمستانه (الف) و محلول‌پاشی نانوسلنیوم تا نمونه‌برداری (ب)

آزمایش به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار روی کلزای پاییزه رقم هیبرید گارو انجام گردید. به دلیل مرسوم بودن کشت این رقم در منطقه، بذرهای کلزا از مدیریت جهاد کشاورزی شهرستان اردبیل تهیه شد. تیمار مورد مطالعه شامل محلول‌پاشی با نانوسلنیوم در سه سطح (شاهد؛ محلول‌پاشی با آب مقطر، غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. نانوسلنیوم (سایز ذرات: ۴۵-۱۰ نانومتر، خلوص نانوذرات: ۹۹/۹۹ درصد، مساحت سطح ویژه نانو ذرات سلنیوم: ۵۰-۳۰ مترمربع بر گرم) مورد استفاده در این پژوهش از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان تهیه شده بود. آماده‌سازی زمین با انجام عملیات دیسک، تسطیح و ایجاد جوی و پشته در اوسط شهریورماه انجام شد. هر کرت شامل شش خط کاشت به طول پنج متر بودند. کاشت بذرها در عمق دو سانتی‌متر از سطح خاک در (۲۰ شهریورماه ۱۳۹۷) در دو طرف پشته و به صورت دستی انجام گردید. فاصله بین ردیف‌های کاشت ۲۵ سانتی‌متر و فاصله بذور روی ردیف چهار سانتی‌متر با تراکم ۷۰ بوته در مترمربع و میزان بذر مصرفی ۷ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد. تراکم مطلوب در بذور هیبرید نسبت به ارقام آزاد گرده‌افشان (غیرهیبرید) کم‌تر می‌باشد. در پژوهش حاضر با توجه به وجود سرمای شدید در فصل زمستان در منطقه و احتمال از بین رفتن تعداد زیادی از بوته‌ها در فصل زمستان در بعضی از سال‌ها، تراکم کاشت کمی بیش‌تر از حد معمول در نظر گرفته شد. آبیاری کرت‌ها بلافاصله بعد از کاشت و به صورت نشتی در جوی‌های ایجادشده بین ردیف‌های کاشت انجام گردید. آبیاری در مراحل بعدی بسته به شرایط آب‌وهوایی و نیاز گیاه، انجام گرفت. هم‌چنین در طول دوره رشدی وجین علف‌های هرز به صورت دستی انجام شد. در مرحله شش تا هشت‌برگی در تاریخ ۱۷ آبان‌ماه ۱۳۹۷ محلول‌پاشی بوته‌ها با نانوسلنیوم با سمپاش پشتی دستی انجام شد. برای افزایش کارایی محلول‌پاشی و جلوگیری از جمع‌شدن محلول در یک نقطه و ایجاد برگ‌سوختگی، از توپین ۲۰ استفاده گردید. برای افزایش راندمان جذب نانوسلنیوم، محلول‌پاشی هنگام صبح انجام شد تا رطوبت نسبی هوا بالاتر

باشد. یک هفته بعد از اعمال تیمار، محلول‌پاشی نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری‌های صفات بیوشیمیایی و همچنین شاخص‌های فتوسنتزی انجام شد. میزان فلورسانس کلروفیل شامل فلورسانس کمینه ( $F_0$ )، فلورسانس بیشینه ( $F_m$ )، فلورسانس متغیر ( $F_v$ ) و حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II ( $F_v/F_m$ ) با استفاده از دستگاه فلورسانس کلروفیل (مدل OPTI-SCIENCES, USA, OS-30p) اندازه‌گیری شد. میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئید با استفاده از روش لیچنتالر<sup>۱</sup> (۱۹۸۷) تعیین و محتوای نسبی آب برگ با استفاده از روش هالیدی<sup>۲</sup> (۱۹۹۲) محاسبه شد.

برای اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شامل کاتالاز و پراکسیداز، عصاره آنزیمی از نمونه‌های گیاهی تهیه گردید. برای تهیه عصاره آنزیمی از روش چانگ و کوا<sup>۳</sup> (۱۹۸۸) استفاده شد. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز براساس روش ارائه‌شده توسط ابی<sup>۴</sup> (۱۹۸۴) و فعالیت آنزیم پراکسیداز براساس روش ارائه‌شده توسط چانس و مهلی<sup>۵</sup> (۱۹۵۵) بر پایه تشکیل تتراگایاکول از گایاکول در حضور پراکسید هیدروژن و آنزیم گایاکول پراکسیداز اندازه‌گیری شد. میزان پراکسید هیدروژن نمونه‌ها براساس منحنی استاندارد غلظت‌های مختلف پراکسید هیدروژن محاسبه شد (ساگیساکا<sup>۶</sup>، ۱۹۷۶).

اندازه‌گیری میزان پرولین با استفاده از روش بس و همکاران<sup>۷</sup> (۱۹۷۳) صورت گرفت، به این ترتیب که یک گرم بافت برگی در ۱۰ میلی‌لیتر سولفوسالسیلک‌اسید ۳ درصد ساییده و محلول حاصل از کاغذ صافی عبور داده شد و با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ گردید. سپس به دو میلی‌لیتر از عصاره حاصل، دو میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین که ۱/۲۵ گرم پودر اسید نین‌هیدرین را در ۳۰ میلی‌لیتر اسیداستیک گلاسیال حل نموده و سپس ۲ میلی‌لیتر اسیدفسفریک ۶ مولار با آن اضافه کرده و سپس دو میلی‌لیتر اسیداستیک گلاسیال خالص اضافه گردید. لوله‌ها به مدت یک ساعت در حمام آب گرم قرار داده شد و سپس ۴ میلی‌لیتر تولوئن به هر یک از لوله‌ها اضافه و به مدت ۱۵ تا ۲۰ ثانیه توسط دستگاه ورتکس خوب به هم زده شد. پس از تشکیل دو فاز جداگانه، فاز رنگی بالایی با دقت جدا و جذب آن با دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل یو وی ۲۱۰۰ ساخت یونیکو<sup>۸</sup> آمریکا) با طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد. غلظت پرولین برحسب میکروگرم بر گرم بافت تازه برگ با استفاده از منحنی استاندارد تعیین شد.

برای تعیین درصد بقای زمستانه یا درصد زنده‌مانی بوته‌ها، پس از استقرار کامل گیاهچه‌ها و قبل از بارش برف و وقوع یخبندان و بعد از طی شدن فصل زمستان و یخبندان، تعداد بوته‌های مستقرشده در واحد سطح در هر واحد آزمایشی شمارش شد و درصد بقای زمستانی با استفاده از رابطه عاصفا<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۴) محاسبه گردید. به‌منظور بررسی عملکرد دانه در زمان رسیدگی کامل، در هر واحد آزمایشی دو ردیف کناری و ۰/۵ متر از ابتدا و انتهای هر ردیف به‌عنوان اثر حاشیه منظور گردید و برداشت از چهار ردیف وسطی از سطحی معادل یک مترمربع برداشت انجام شد و عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید.

کلیه تجزیه‌های آماری و مقایسه میانگین داده‌های حاصل، پس از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، با نرم‌افزار SAS

1. Lichtenthaler
2. Holaday
3. Chang & Koa
4. Aebi
5. Chance & Maehly
6. Sagisaka
7. Bates
8. UNICO
9. Assefa

(نسخه 9.1) تجزیه گردید. ضرایب همبستگی پیرسون<sup>۱</sup> بین صفات با استفاده از نرم‌افزار SPSS محاسبه گردید. برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن<sup>۲</sup> در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد. رسم شکل و نمودارها با بهره‌گیری از نرم‌افزار Excel انجام پذیرفت.

#### ۴. یافته‌های پژوهش

براساس داده‌های هواشناسی (شکل ۱-الف)، میانگین دمای حداقل در ماه‌های دی، بهمن و اسفند زیر صفر می‌باشد. کاهش قابل توجه دما در این ماه‌ها، شرایط مناسبی را برای ارزیابی تحمل به سرما فراهم نمود. هم‌چنین در فاصله زمانی محلول‌پاشی تا نمونه‌برداری، دما در روزهای ۲۰ و ۲۶ آبان‌ماه زیر صفر بوده است (شکل ۱-ب).

#### ۴.۱. میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی

براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) میزان کلروفیل‌های a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئید به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمار نانوسلنیوم قرار گرفتند. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، میزان کلروفیل a، b و کلروفیل کل بوته‌های محلول‌پاشی با غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم (۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) به‌طور معنی‌داری نسبت به بوته‌های شاهد (عدم کاربرد نانوسلنیوم) بیش‌تر بود. با افزایش غلظت نانوسلنیوم از ۲۵ به ۵۰ میلی‌گرم در لیتر، میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، b و کلروفیل کل افزایش یافت و بیش‌ترین میزان این رنگیزه‌ها در بوته‌های محلول‌پاشی‌شده با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم حاصل گردید، اما بین غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم از نظر آماری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۳). کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم موجب شد تا میزان کلروفیل a، b و کلروفیل کل به‌ترتیب در حدود ۳۱/۲۸، ۶۴ و ۴۰/۷۸ درصد نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد سلنیوم) افزایش یابد (جدول ۳). کاربرد غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم موجب شد تا میزان کاروتنوئید برگ‌های کلزا نسبت به تیمار شاهد افزایش یابد. در بین غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم بیش‌ترین میزان کاروتنوئید مربوط به بوته‌های تیمار شده با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم بود که به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار شاهد بود. اگرچه کاربرد ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم موجب افزایش ۳۴/۹۷ درصدی میزان کاروتنوئیدهای برگ‌های کلزا گردید اما بین تیمار شاهد و غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم از نظر آماری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۳).

#### جدول ۲. تجزیه واریانس محتوای کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ‌های کلزای پاییزه تحت تأثیر نانوسلنیوم

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل
بلوک	۲	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۰۵ ns	۰/۰۰۸**
نانوسلنیوم	۲	۰/۲۹۵**	۰/۱۹۱**	۰/۹۴۱**
خطا	۴	۰/۰۱۸	۰/۰۰۳	۰/۰۱۳
ضریب تغییرات (درصد)		۳/۰۸	۴/۹	۳/۶۲

ns، \* و \*\*: به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و غیر معنی‌دار می‌باشند.

1. Pearson correlation coefficient
2. Duncan's multiple range test

## جدول ۳. مقایسه میانگین کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئید در برگ‌های کلزای پاییزه تحت تأثیر نانوسلنیوم

تیمارها	کلروفیل a (میلی گرم بر گرم وزن تر)	کلروفیل b (میلی گرم بر گرم وزن تر)	کلروفیل کل (میلی گرم بر گرم وزن تر)	کاروتنوئید (میلی گرم بر گرم وزن تر)
شاهد (صفر)	۱/۷۹ b	۰/۷۵ b	۲/۵۵ b	۱/۸۳ b
۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم	۲/۳۱ a	۱/۱۲ a	۳/۴۳ a	۲/۴۷ ab
۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم	۲/۳۵ a	۱/۲۳ a	۳/۵۹ a	۳/۰۱ a

در هر ستون میانگین‌هایی که در یک حرف مشترک هستند فاقد تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

کاهش فتوسنتز در اثر سرما ممکن است به تجزیه رنگیزه‌های فتوسنتزی نسبت داده شود، به‌نظر می‌رسد یکی از دلایل افزایش محتوای کلروفیل برگ، تأثیر مثبت سلنیوم بر افزایش جذب منیزیم و آهن باشد که این موضوع موجب افزایش سنتز کلروفیل می‌گردد، علاوه بر این، سلنیوم در بازسازی فراساختار کلروپلاست و سازماندهی مجدد تیلاکوئیدها و استروما شرکت کند و منجر به افزایش اندازه کلروپلاست شود (فنگ<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). هم‌چنین سلنیوم با افزایش در محتوای کاروتنوئید می‌تواند سبب افزایش کلروفیل شود، زیرا کاروتنوئیدها، کلروفیل را از تخریب اکسیداسیون نوری حفاظت می‌کنند (خادمی‌آستانه و همکاران، ۱۳۹۶؛ قاسمی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). کاربرد سلنیوم با کاهش تنش اکسیداتیو و جلوگیری از تخریب رنگیزه‌ها، سبب افزایش میزان کاروتنوئیدها می‌شود (هاوریلک-نواک<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). میزان کاروتنوئید برگ‌های گوجه‌فرنگی (ابوالقاسمی و حقیقی، ۱۳۹۶) و گندم (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۰) با کاربرد سلنیوم افزایش یافت که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

از آنجایی که بین محتوای کلروفیل برگ و تحمل به سرما همبستگی مثبتی وجود دارد، می‌توان از این صفت به‌عنوان شاخصی برای نشان دادن تحمل به سرما استفاده کرد (بذل و همکاران ۱۳۹۴؛ جان‌محمدی و همکاران، ۱۳۹۱)، بنابراین افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی با کاربرد نانوسلنیوم نشان‌دهنده بهبود تحمل بوته‌های کلزا به سرما است.

## ۲.۴. محتوای نسبی آب برگ

محتوای نسبی آب برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح مختلف محلول‌پاشی با نانوسلنیوم قرار گرفت (جدول ۴). میانگین محتوای نسبی آب برگ بوته‌های شاهد به‌طور معنی‌داری کمتر از محتوای نسبی آب برگ بوته‌های محلول‌پاشی شده با نانوسلنیوم بود. بیش‌ترین محتوای نسبی آب برگ در بوته‌های محلول‌پاشی شده ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با محتوای نسبی آب برگ بوته‌های محلول‌پاشی شده ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم نداشت. با کاربرد غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم محتوای نسبی آب برگ به‌ترتیب در حدود ۳/۶۴ و ۵ درصد نسبت به بوته‌های شاهد افزایش یافت (شکل ۲). به‌نظر می‌رسد سلنیوم از طریق کاهش پراکسیداسیون لیپیدها (فنگ<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۳؛ آجیبوسو و آدنواگا<sup>۵</sup>، ۲۰۱۲) و هم از طریق افزایش جذب آب به‌دلیل توسعه ریشه‌ها موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ می‌شود (سان<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۰). نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش با نتایج ساجدی و مدنی (۱۳۹۶) در گیاه جو و دهقانی بیدگلی (۱۳۹۸) در گیاه گون پنبه‌ای همخوانی دارد.

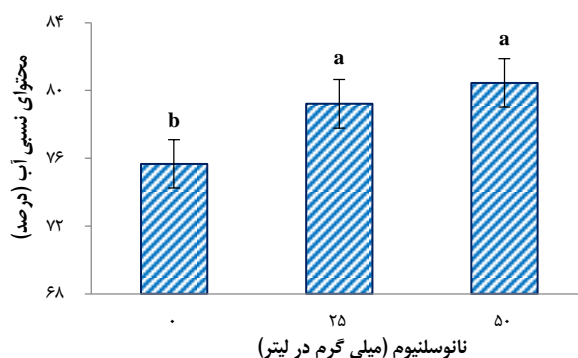
1. Feng
2. Ghasemi
3. Hawrylak-Nowak
4. Feng
5. Ajiboso & Adenuga
6. Sun



جدول ۴. تجزیه واریانس صفات محتوای نسبی آب برگ و فلورسانس کلروفیل برگ‌های کلزای پاییزه تحت تأثیر نانوسلنیوم

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		محتوای نسبی آب برگ	F <sub>0</sub>	F <sub>m</sub>	F <sub>v</sub>
بلوک	۲	۱/۵۴ <sup>ns</sup>	۸۰/۷ <sup>ns</sup>	۲۴۳۴/۱ <sup>ns</sup>	۳۳۵۹/۳ <sup>ns</sup>
نانوسلنیوم	۲	۱۸/۵۱ <sup>**</sup>	۲۲۱/۴۴ <sup>*</sup>	۱۶۵۹۱/۴ <sup>*</sup>	۲۰۵۱۷/۶ <sup>*</sup>
خطا	۴	۰/۸۹	۲۳/۷	۲۱۹۰/۷	۱۹۳۴/۰۷
ضریب تغییرات (درصد)		۲/۲۱	۳/۱۹	۶/۴۶	۷/۶۹
					۲/۴۷

ns، \* و \*\* به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و غیر معنی‌دار می‌باشند.



شکل ۲. میانگین محتوای نسبی آب برگ کلزای پاییزه تحت تأثیر نانوسلنیوم

### ۳.۴. فلورسانس کلروفیل

اثر نانوسلنیوم روی فلورسانس کمینه (F<sub>0</sub>)، فلورسانس بیشینه (F<sub>m</sub>)، فلورسانس متغیر (F<sub>v</sub>) و حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II (F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>) معنی‌دار به‌دست آمد (جدول ۴). کاربرد غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم موجب کاهش F<sub>0</sub> در برگ‌های کلزای پاییزه شد. بیش‌ترین میزان فلورسانس کمینه در تیمار عدم محلول‌پاشی (شاهد) حاصل شد که به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از میزان فلورسانس کمینه برگ‌های تیمار شده با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم بود. اگرچه کاربرد غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم سبب کاهش میزان فلورسانس کمینه در حدود ۶/۶ درصد در مقایسه با تیمار عدم محلول‌پاشی گردید، اما از نظر آماری تفاوت معنی‌داری بین تیمار شاهد و کاربرد ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم وجود نداشت. کم‌ترین میزان فلورسانس کمینه با محلول‌پاشی برگ‌های کلزای پاییزه با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم حاصل شد که میزان این کاهش در حدود ۱۰/۵ درصد در مقایسه با تیمار شاهد بود (جدول ۵). میانگین فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر و حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II برگ‌های کلزای محلول‌پاشی شده به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمار شاهد بود (جدول ۵). با افزایش غلظت نانوسلنیوم از ۲۵ به ۵۰ میلی‌گرم در لیتر میزان F<sub>v</sub>، F<sub>m</sub> و F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub> در برگ‌های کلزا افزایش یافت. به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر و حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II در بوته‌های محلول‌پاشی شده با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم به‌دست آمد، اما تفاوت معنی‌داری با میزان F<sub>v</sub>، F<sub>m</sub> و F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub> بوته‌های محلول‌پاشی شده با غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم نداشت. کاربرد غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم موجب شد تا میزان فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر و حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II برگ در گیاه کلزای پاییزه به‌ترتیب در حدود ۱۸/۱۵ و ۲۱/۸۶ درصد، ۲۶/۳۳ و ۳۲/۶۴ درصد و ۸/۱۱ و ۹/۴۶ درصد نسبت به تیمار عدم کاربرد نانوسلنیوم افزایش یابد (جدول ۵).

جدول ۵. مقایسه میانگین میزان فلورسانس کلروفیل برگ‌های کلزای پاییزه تحت تأثیر نانوسلنیوم

تیماها	فلورسانس کمینه	فلورسانس بیشینه	فلورسانس متغیر	حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II
شاهد (صفر)	۱۶۲ a	۶۳۹ b	۴۷۷/۷ b	۰/۷۴ b
۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم	۱۵۱/۳ ab	۷۵۵ a	۶۰۳/۵ a	۰/۸ a
۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم	۱۴۵ b	۷۷۸/۷ a	۶۳۳/۶ a	۰/۸۱ a

در هر ستون میانگین‌هایی که در یک حرف مشترک هستند، فاقد تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

به بخشی از انرژی نورانی که به‌وسیله رنگیزه‌های فتوسنتزی جذب نشده و در طول موج بلندتری بازتاب می‌شوند فلورسانس کلروفیل گفته می‌شود. میزان فلورسانس کلروفیل می‌تواند نشان‌دهنده توانایی گیاه در تحمل به تنش‌های محیطی، سالم‌بودن غشای تیلاکوئید و کارایی انتقال الکترون از فتوسیستم II به فتوسیستم I می‌باشد (بکر<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸). زمانی که مراکز واکنش فتوسیستم II بسته باشند، فلورسانس افزایش پیدا می‌کند و سرعت واکنش‌های فتوشیمیایی کاهش می‌یابد. هرچه سیستمی، الکترون بیش‌تری را پذیرش کند،  $F_m$  بالاتر و کارایی بیش‌تری خواهد داشت (افشار محمدیان و همکاران، ۱۳۹۷). کاهش دما سبب افزایش میزان فلورسانس کمینه و کاهش فلورسانس بیشینه می‌شود (حسینی و همکاران، ۱۳۹۳)، اما کاربرد غلظت‌های مختلف سلنیوم می‌تواند تا حدی از تخریب کلروپلاست‌ها جلوگیری کند، میزان فلورسانس کلروفیل را کاهش و محتوای کلروفیل‌ها را افزایش دهد (فیلک<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۰). فلورسانس متغیر ( $F_v$ ) نشان‌دهنده وضعیت انتقال الکترون از بخش فتوسیستم به کوئینون<sup>۳</sup> A می‌باشد (شیبا<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۴).  $F_v/F_m$  نیز نشان‌دهنده حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II برای تبدیل انرژی نورانی به انرژی شیمیایی است و به‌عنوان شاخص مهمی برای نشان دادن اختلال فتوشیمیایی و بازدارندگی نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد (بکر<sup>۵</sup>، ۲۰۰۸). با توجه به وجود رابطه مستقیم بین حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II و بقای زمستانه می‌توان از این صفت به‌عنوان یک روش مؤثر در تعیین میزان خسارت به فرایند فتوسنتزی و به‌ویژه فتوسیستم II استفاده کرد (نباتی و همکاران، ۱۳۹۷). سووچینا<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۲۰) نیز گزارش دادند که میزان بقای زمستانه در گیاهان ارتباط معنی‌داری با عملکرد کوانتومی دارند، تغییرات مربوط به فلورسانس کلروفیل و عملکرد فتوسیستم II، می‌تواند نقش کلیدی در توانایی گیاهان برای زنده‌ماندن در شرایط زمستانی داشته باشد. کاهش کارایی کمپلکس تجزیه‌کننده آب در اثر کاهش دما، نقش عمده‌ای در کاهش میزان انتقال الکترون به پذیرنده‌های الکترون فتوسیستم II دارد و منجر به ایجاد اختلال در فعالیت زنجیره انتقال الکترون می‌شود (پاییزی و شریعتی، ۱۳۹۰).

اختلال در انتقال الکترون از فتوسیستم II به فتوسیستم I دلیل کاهش نسبت  $F_v/F_m$  در شرایط تنش عنوان شده است (افشار محمدیان و همکاران، ۱۳۹۷). بنابراین هر عاملی که بتواند باعث افزایش انتقال الکترون شده و عملکرد فتوسیستم II را افزایش دهد، بر میزان بقای زمستانه مؤثر خواهد بود. سلنیوم با افزایش تولید کلروفیل و کاروتنوئید (جدول ۳)، کاهش فلورسانس کمینه و افزایش فلورسانس بیشینه باعث افزایش حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II شده است (جدول ۵). هم‌چنین شباهت ساختاری سلنیوم با گوگرد باعث فعال‌شدن خوشه آهن-گوگرد در کلروپلاست

1. Baker
2. Filek
3. Quinone
4. Xia
5. Baker
6. Swoczyna

می‌شود و به این ترتیب نقش مهمی در زنجیره انتقال الکترون دارد (فنگ<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). شلبی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۱) افزایش  $F_v/F_m$  را در خیار در اثر کاربرد سلنیوم گزارش کردند که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

#### ۴.۴. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در خنثی‌سازی اثرات تنش اکسیداتیو مؤثر است و با کاهش خسارت‌های سلولی یا تعدیل آن‌ها، مهم‌ترین عامل تحمل سرما و مقابله با آن در گیاهان محسوب می‌شود (کازمی شاهدشتی<sup>۳</sup> و امیری<sup>۴</sup>، ۲۰۱۸).

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داده که میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمار نانوسلنیوم قرار گرفت (جدول ۶). میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز بوته‌های محلول‌پاشی‌شده با نانوسلنیوم به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از بوته‌های محلول‌پاشی‌نشده (تیمار شاهد) بود. کاربرد هر دو غلظت نانوسلنیوم سبب شد تا میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی افزایش یابد. به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و آنزیم‌های پراکسیداز در غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد، اما اختلاف معنی‌داری بین غلظت‌های به‌کاررفته از نظر آماری مشاهده نشد (جدول ۷). کاربرد غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم سبب شد تا میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز به‌ترتیب در حدود ۸/۲۱ و ۷/۴۶ درصد و میزان فعالیت آنزیم کاتالاز به‌ترتیب در حدود ۱۰/۵۸ و ۱۷/۳۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یابد (جدول ۷).

جدول ۶. تجزیه واریانس صفات بیوشیمیایی، بقای زمستانه بوته‌ها و عملکرد دانه کلزای پاییزه تحت تأثیر نانوسلنیوم

میانگین مربعات						درجه آزادی	منابع تغییرات
عملکرد دانه	بقای زمستانه	پروپیلین	پراکسید هیدروژن	فعالیت آنزیم پراکسیداز	فعالیت آنزیم کاتالاز		
۲۴۶۷/۱ ns	۰/۴۵۲ ns	۰/۰۰۰۰۶**	۰/۰۰۰۰۵ ns	۰/۰۰۰۰۰۰۶ ns	۰/۰۰۰۰۰۲	۲	بلوک
۶۴۴۱۴۹/۸**	۵۱/۶۲۹*	۰/۰۰۲۷**	۰/۰۰۱۱**	۰/۰۰۰۱**	۰/۰۰۰۰۳**	۲	نانوسلنیوم
۱۴۴۷/۴۴	۵/۶۴۶	۰/۰۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۰۱	۴	خطا
۱/۲۴	۲/۵۸	۰/۳۸	۳/۷	۰/۵۶	۲/۷۹		ضریب تغییرات (درصد)

ns و \*\* به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و غیر معنی‌دار می‌باشند.

جدول ۷. مقایسه میانگین صفات بیوشیمیایی برگ‌ها و عملکرد دانه در کلزای پاییزه تحت تأثیر نانوسلنیوم

عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	پروپیلین (میکروگرم بر گرم وزن تر)	پراکسید هیدروژن (میکرومول بر گرم وزن تر)	فعالیت آنزیم پراکسیداز (واحد در میلی‌گرم پروتئین)	فعالیت آنزیم کاتالاز (واحد در میلی‌گرم پروتئین)	غلظت‌های نانوسلنیوم
۲۵۴۰/۶۷ c	۰/۷۳۷ c	۰/۱۲۲ a	۰/۱۳۴ b	۰/۱۰۴ b	شاهد (صفر)
۳۲۵۴/۶۷ b	۰/۸۰۸ b	۰/۱۰۳ b	۰/۱۴۵ a	۰/۱۱۵ a	۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم
۳۴۰۹/۳۳ a	۰/۹۲۴ a	۰/۰۸۳ c	۰/۱۴۴ a	۰/۱۲۲ a	۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم

در هر ستون میانگین‌هایی که در یک حرف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

1. Feng
2. Shalaby
3. Kazemi Shahandashti
4. Maali Amiri

سلیوم با دارا بودن خصوصیت آنتی‌اکسیدانی می‌تواند تنش‌های اکسیداتیو را از طریق بهبود فعالیت‌های آنزیمی و غیرآنزیمی و نیز کاهش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن فعال کاهش دهد (برادلی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۰). هم‌چنین سلیوم جزء مهم آنزیم گلوکاتیون پراکسیداز است که در مکانیسم‌های دفاع داخل سلولی علیه تنش اکسیداتیو از طریق جلوگیری از تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن شرکت می‌کند (بلادل<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). یافته‌ها نشان می‌دهد که سلیوم ممکن است به‌عنوان یک محرک برای فعال کردن مسیرهای دفاعی عمل کند و به‌طور مستقیم در خاموش کردن  $O_2^{2-}$  و  $OH^-$  در سلول گیاهی نقش داشته باشد (نواز<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). مصرف سلیوم، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز را در سورگوم (عباس<sup>۴</sup>، ۲۰۱۲) و گندم (رادی<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۲۰) به‌طور معنی‌داری افزایش داد. با توجه به تأییدتأیید افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در اثر کاربرد سلیوم در پژوهش‌های متعدد، انتظار می‌رود کاربرد سلیوم با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سبب افزایش تحمل به سرما گردد. لی<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۹) نیز ضمن تأیید تأثیر مثبت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند کاتالاز و پراکسیداز، بر افزایش تحمل به سرما گزارش کردند که میزان آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در بوته‌های متحمل به سرما بیش‌تر از بوته‌های حساس می‌باشد که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

#### ۵.۴. پراکسید هیدروژن

اثر سطوح مختلف محلول پاشی نانوسلیوم بر محتوای پراکسید هیدروژن معنی‌دار بود (جدول ۶). میزان پراکسید هیدروژن برگ بوته‌های محلول پاشی شده با نانوسلیوم به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از بوته‌های شاهد بود. کم‌ترین محتوای پراکسید هیدروژن در تیمار کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلیوم مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری کم‌تر از تیمار کاربرد ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلیوم و تیمار عدم کاربرد بود (جدول ۷). محلول پاشی بوته‌های کلزا با غلظت ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلیوم موجب شد تا میزان پراکسید هیدروژن برگ‌های کلزا به‌ترتیب در حدود ۱۶/۶۶ و ۳۰/۸۳ درصد در مقایسه با تیمار عدم کاربرد نانوسلیوم کاهش یابد (جدول ۷).

سرما سبب افزایش گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند پراکسید هیدروژن ( $H_2O_2$ ) در گیاهان می‌شود، افزایش گونه‌های فعال اکسیژن در گیاهان نشان‌دهنده بروز تنش اکسیداتیو به‌عنوان یک تنش ثانویه است و تجمع آن در سطح سلولی زیان‌آور است (ویو<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). تنش اکسیداتیو از طریق پراکسیداسیون چربی‌ها و پروتئین‌ها سبب خسارت به غشای سلولی و کاهش محتوای کلروفیل برگ (جدول ۳) می‌گردد (بای‌بوردی و همکاران، ۱۳۹۵). به‌نظر می‌رسد سلیوم با افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و پراکسیداز (جدول ۷)، موجب خنثی‌شدن رادیکال‌های آزاد از جمله پراکسید هیدروژن می‌شود (لو<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در پژوهش حاضر، کاهش میزان پراکسید هیدروژن را توجیه می‌کند. کاهش میزان پراکسید هیدروژن در اثر کاربرد سلیوم در گندم (لابانوفسکا<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۱۲) و سورگوم (جاناگویرامان<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۱۰) نیز مشاهده شده است.

1. Broadley
2. Beladel
3. Nawaz
4. Abbas
5. Rady
6. Lei
7. Wu
8. Lu
9. Labanowska
10. Djanaguiraman

#### ۴.۶. اسیدآمینه پرولین

افزایش محتوای اسیدآمینه پرولین یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های تحمل به تنش‌های زیستی و غیرزیستی می‌باشد، هرچه میزان پرولین در گیاهان تحت تأثیر تنش‌های محیطی مانند سرما بیش‌تر باشد، می‌تواند میزان آسیب وارده به گیاه را کاهش داده و تحمل گیاه را در مقابل سرما افزایش دهد (ساسانی و همکاران، ۱۳۹۲). محتوای اسیدآمینه پرولین به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح نانوسلنیوم قرار گرفت (جدول ۶). محتوای اسیدآمینه پرولین بوته‌های محلول‌پاشی‌شده با نانوسلنیوم به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از بوته‌های شاهد بود. با افزایش غلظت نانوسلنیوم محتوای اسیدآمینه پرولین نیز افزایش معنی‌داری یافت. بیش‌ترین محتوای اسیدآمینه پرولین با کاربرد غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم حاصل شد که به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از محتوای پرولین بوته‌های محلول‌پاشی‌شده با غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و بوته‌های محلول‌پاشی‌نشده (شاهد) بود. کاربرد غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم به‌ترتیب باعث افزایش ۹/۵۵ و ۲۵/۳۶ درصدی محتوای اسیدآمینه پرولین نسبت به بوته‌های شاهد شد (جدول ۷).

به‌نظر می‌رسد سلنیوم با افزایش میزان پرولین در القای تحمل به سرما و زنده‌مانی بوته‌های کلزا مؤثر باشد (هاوریلک-نواک<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰). تأثیر سلنیوم بر میزان پرولین می‌تواند به‌دلیل تأثیر آن بر یکی از آنزیم‌های متابولیسم پرولین به‌نام آنزیم  $\gamma$ -glu amyl kinase ( $\gamma$ -GK) باشد (عباس<sup>۲</sup>، ۲۰۱۲). افزایش میزان پرولین در اثر کاربرد سلنیوم در جو (آکبولوت و چاکیر<sup>۳</sup>، ۲۰۱۰) و نعناع (ناظریه<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۸) مشاهده شده است که مطابق با پژوهش حاضر می‌باشد. پرولین یک اسیدآمینه حیاتی است که به‌عنوان تنظیم‌کننده اسمزی، تثبیت‌کننده ساختارهای پروتئینی، حذف‌کننده رادیکال‌های آزاد و بازدارنده پراکسیداسیون لیپیدی در گیاهان عمل می‌کند (مادبو<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). پرولین با حفظ پتانسیل اسمزی سلول نقش عمده‌ای در مقابله با شرایط نامساعد محیطی مانند سرما دارد (ژائو<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). براساس گزارش جلیلیان و همکاران (۱۳۹۶) از میزان پرولین می‌توان به‌عنوان معیار تحمل به سرما در گیاهان استفاده کرد. نتایج پژوهش ساسانی و همکاران (۱۳۹۲) نیز گویای وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین بقای زمستانه و انباشت پرولین در ارقام گندم بود.

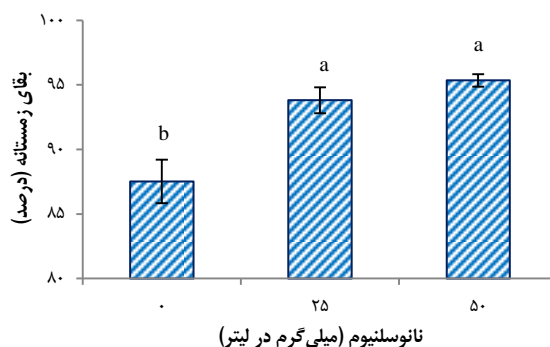
#### ۴.۷. بقای زمستانه

درصد بقای زمستانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمار نانوسلنیوم قرار گرفت (جدول ۶). درصد بقای بوته‌های محلول‌پاشی‌شده با نانوسلنیوم به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از بوته‌های محلول‌پاشی‌نشده (تیمار شاهد) بود. کاربرد غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم به‌ترتیب باعث افزایش ۷/۱۹ و ۸/۹۵ درصدی بقای زمستانه بوته‌ها نسبت به بوته‌های شاهد شد (شکل ۳). بیش‌ترین درصد زنده‌مانی در بوته‌های محلول‌پاشی‌شده با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم (۹۵/۳۵ درصد) مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نداشت (شکل ۳).

درصد بقای زمستانه بوته‌ها در مزرعه، معیار مناسبی برای ارزیابی تحمل ارقام پاییزه کلزا نسبت به شرایط سرمای زمستان می‌باشد. بقای زمستانه و تحمل به سرما رابطه مستقیمی با فلورسانس کلروفیل (نباتی و همکاران، ۱۳۹۷)، میزان

1. Hawrylak-Nowak
2. Abbas
3. Akbulut & Cakir
4. Nazerieh
5. Madebo
6. Zhao

انباشت پرولین (ساسانی و همکاران، ۱۳۹۲) و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و پراکسیداز (لی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹) دارد، بنابراین می‌توان از این صفات به‌عنوان شاخصی برای بررسی میزان تحمل به سرما استفاده کرد.



شکل ۳. میانگین درصد بقای زمستانه بوته‌های کلزای پاییزه تحت تأثیر نانوسلنیوم

در پژوهش حاضر نیز کاربرد سلنیوم با افزایش حداکثر کارایی کوانتومی فتوسنتز II (جدول ۵)، افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز و افزایش محتوای اسیدآمینو پرولین (جدول ۷)، موجب افزایش درصد بقای زمستانه بوته‌های کلزا گردید. به‌نظر می‌رسد سلنیوم با افزایش توان فتوسنتزی گیاه و تولید بوته‌های قوی‌تر و همچنین مهار گونه‌های فعال اکسیژن بر میزان تحمل بوته‌ها به سرما و در نتیجه بقای زمستانه مؤثر است. لازم به ذکر است که بخشی از کاهش میزان بقای زمستانه در تیمارهای موردارزیابی در پژوهش حاضر ممکن است ناشی از تراکم کاشت زیاد باشد.

#### ۸.۴. عملکرد دانه

نانوسلنیوم عملکرد دانه را به‌طور معنی‌داری تحت‌تأثیر قرار داد (جدول ۶). عملکرد دانه در بوته‌های محلول‌پاشی شده با غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از عملکرد دانه در بوته‌های شاهد بود. به‌طوری‌که محلول‌پاشی بوته‌های کلزا با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم سبب افزایش عملکرد دانه به‌ترتیب به میزان ۲۸/۱۰ و ۳۴/۱۹ درصد شد (جدول ۷). با افزایش غلظت نانوسلنیوم، عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان عملکرد دانه در محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده گردید که به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمارهای شاهد و غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم بود (جدول ۷). افزایش عملکرد دانه بیانگر افزایش قدرت تولید در بوته‌های تحت تأثیر نانوسلنیوم می‌باشد. محلول‌پاشی بوته‌ها با نانوسلنیوم سبب می‌شود تا گیاه شرایط رشدی بهتری داشته و سریع‌تر رشد کنند و قبل از شروع سرمای زمستان بوته‌های قوی‌تر و متحمل‌تری تولید کنند (گوهریان و همکاران، ۱۳۹۹). به‌نظر می‌رسد نانوسلنیوم با افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (جدول ۷) و رنگیزه‌های فتوسنتزی (جدول ۳) موجب افزایش بقای زمستانه در بوته‌های کلزا (شکل ۳) گردیده که این موضوع در نهایت سبب افزایش عملکرد دانه (جدول ۷) شد. افزایش عملکرد دانه در اثر محلول‌پاشی با نانوسلنیوم در عدس (تواراچه<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۵) نیز گزارش شده است که مطابق با نتایج پژوهش حاضر می‌باشد. لازم به توضیح است که مقادیر کم عملکرد دانه کلزا در تیمارهای موردارزیابی در پژوهش حاضر ممکن است ناشی از تراکم کاشت زیاد و خسارت سرمازدگی باشد.

1. Lei

2. Thavarajah

#### ۹.۴. همبستگی ساده صفات

همبستگی بین صفات اندازه‌گیری شده براساس میانگین در جدول (۸) درج شده است. همبستگی کلیه صفات به غیر از صفت فلورسانس کمینه با کاروتنوئید معنی‌دار می‌باشد. عملکرد دانه با رنگیزه‌های فتوسنتزی، فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر، حداکثر کارایی کوآنتومی فتوسیستم II، محتوای نسبی آب برگ، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و بقای زمستانه رابطه مثبت و معنی‌داری و با فلورانس کمینه و میزان پراکسید هیدروژن همبستگی منفی و معنی‌داری دارد. عملکرد دانه بیش‌ترین همبستگی را با رنگیزه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل داشت (جدول ۸). دلیل همبستگی مثبت و معنی‌دار عملکرد با میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی در سطح احتمال یک درصد اثر مستقیم و مثبت میزان کلروفیل کل بر عملکرد دانه می‌تواند به‌عنوان بهترین معیار جهت بهبود عملکرد دانه مطرح باشد. کلروفیل برگ از مهم‌ترین شاخص‌های نشان‌دهنده فشار محیطی وارد بر گیاه می‌باشد و غلظت آن بیانگر قدرت منبع و یکی از عوامل کلیدی در تعیین سرعت فتوسنتز و تولید ماده خشک می‌باشد (شیری و چوگان، ۱۳۹۷). لو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش کردند که افزایش تحمل به سرما را در اثر کاربرد سلنیوم به‌شدت با بهبود ظرفیت فتوسنتزی مرتبط است که هم‌راستا با نتایج پژوهش حاضر است.

جدول ۸. ضرایب همبستگی صفات اندازه‌گیری شده

صفات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
۱- کلروفیل a															
۲- کلروفیل b	۰/۹۷**														
۳- کلروفیل کل	۰/۹۹**	۱													
۴- کاروتنوئید	۰/۸۲**	۰/۸۵**	۰/۸۴**												
۵- فلورسانس کمینه	-۰/۷۳*	-۰/۷۰*	-۰/۷۲*	-۰/۶۱ ns											
۶- فلورسانس بیشینه	۰/۷۹*	۰/۷۲*	۰/۷۶*	۰/۸۶**	-۰/۷۰**										
۷- فلورسانس متغیر	۰/۸۰**	۰/۷۳*	۰/۷۸*	۰/۸۶**	-۰/۷۵**	۰/۹۹**									
۸- کارایی فتوسیستم II	۰/۸۶**	۰/۷۹*	۰/۸۳**	۰/۸۳**	-۰/۸۴**	۰/۹۶**	۰/۹۸**								
۹- محتوای نسبی آب	۰/۸۸**	۰/۸۴**	۰/۸۷**	۰/۸۴**	-۰/۸۲**	۰/۹۲**	۰/۹۳**	۰/۹۵**							
۱۰- آنزیم کاتالاز	۰/۸۶**	۰/۸۸**	۰/۸۷**	۰/۸۶*	-۰/۷۵*	۰/۸۷**	۰/۸۸**	۰/۹۲**	۰/۹۱**						
۱۱- آنزیم پراکسیداز	۰/۹۶**	۰/۹۳**	۰/۹۶**	۰/۷۸*	-۰/۷۱*	۰/۷۸**	۰/۸۰*	۰/۸۳**	۰/۸۴**	۰/۷۷*					
۱۲- پراکسید هیدروژن	-۰/۸۴**	-۰/۸۶**	-۰/۸۸**	-۰/۸۸**	-۰/۸۵**	-۰/۸۵**	-۰/۸۸**	-۰/۹۱*	-۰/۹۳**	-۰/۸۶**	-۰/۷۸*				
۱۳- پرولین	۰/۸۲**	۰/۸۸**	۰/۸۵**	۰/۹۱**	-۰/۷۵*	۰/۷۴*	۰/۷۶*	۰/۷۹*	۰/۸۳**	۰/۸۹**	۰/۷۴*	-۰/۹۶**			
۱۴- بقای زمستانه	۰/۸۴**	۰/۸۹**	۰/۸۷**	۰/۷۵*	-۰/۷۴*	۰/۶۸*	۰/۷۰*	۰/۷۵*	۰/۷۵**	۰/۹۴**	۰/۸۶**	۰/۸۳**	-۰/۸۰*		
۱۵- عملکرد دانه	۰/۹۸**	۰/۹۷**	۰/۹۸**	۰/۸۹**	-۰/۷۷*	۰/۸۶**	۰/۸۷**	۰/۹۱**	۰/۹۱**	۰/۹۵**	۰/۹۵**	۰/۹۱**	-۰/۹۱**	۰/۸۸**	۰/۹۱**

ns و \*\* به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و غیر معنی‌دار.

همبستگی بین بقای زمستانه با صفاتی مانند رنگیزه‌های فتوسنتزی، فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر، حداکثر کارایی کوآنتومی فتوسیستم II، محتوای نسبی آب برگ، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوای اسیدآمین پرولین و عملکرد دانه مثبت و معنی‌دار و با صفات با فلورانس کمینه و میزان پراکسید هیدروژن منفی و معنی‌دار بود. بقای زمستانه بیش‌ترین همبستگی را با میزان فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدان کاتالاز نشان داد (جدول ۸).

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در فرایند تحمل سرما بسیار دارای اهمیت می‌باشند، سیستم دفاعی آنتی‌اکسیداتیو یکی از زمینه‌های امیدبخش در پژوهش‌های مرتبط با سرمازدگی بوده و پژوهش‌گران می‌توانند با تغییر در میزان فعالیت

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، سبب افزایش کارایی دفاع آنتی‌اکسیداتیو و در نهایت افزایش تحمل گیاه به یخ‌زدگی شوند (انجم<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۰). کرمی و همکاران (۱۳۹۵) گزارش دادند که افزایش معنی‌دار و همزمان الگوی فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز، درجه تحمل ژنتیکی نخود به سرما را افزایش داده و یا این‌که سبب بهبود گیاه پس از اعمال تنش می‌شود که مطابق با نتایج پژوهش حاضر می‌باشد.

## ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

محلول‌پاشی نانوسلنیوم تأثیر مثبت و معنی‌داری بر کلیه صفات موردبررسی داشت. بیش‌ترین افزایش در محتوای نسبی آب برگ، فلورسانس بیشینه ( $F_m$ )، حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II ( $F_v/F_m$ )، فلورسانس متغیر ( $F_v$ )، محتوای اسید آمینه پرولین و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در بوته‌های محلول‌پاشی‌شده با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم به‌دست آمد. در شرایط عدم کاربرد نانوسلنیوم میزان آسیب به غشا بالا بود که به‌صورت افزایش میزان پراکسید هیدروژن بروز یافت. بالاترین میزان فلورسانس کمینه ( $F_0$ ) در شرایط شاهد مشاهده گردید. میزان کلروفیل  $a$ ،  $b$  و کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ‌های محلول‌پاشی‌شده با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم افزایش یافت. هم‌چنین غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم منجر به بیش‌ترین محتوای نسبی آب برگ،  $F_m$ ،  $F_v/F_m$ ،  $F_v$ ، محتوای اسید آمینه پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کم‌ترین میزان پراکسید هیدروژن و  $F_0$  گردید. به‌نظر می‌رسد نانوسلنیوم با کنترل آسیب‌های اکسیداتیو و جلوگیری از تخریب کلروفیل و غشاهای سلولی سبب افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی، افزایش کارایی کوانتومی فتوسیستم II و بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شده و در نهایت موجب افزایش درصد زنده‌مانی بوته‌های کلزا و افزایش عملکرد محصول گردید. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین صفات به‌ویژه عملکرد دانه با محتوای کلروفیل برگ و هم‌چنین بقای زمستانه با فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نیز، تأثیر مثبت نانوسلنیوم را در افزایش تحمل بوته‌های کلزا به سرما تأیید می‌کند. به‌طور کلی کاربرد برگی نانوسلنیوم به‌ویژه با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر در مرحله روزهت، شاخص‌های فتوسنتزی را بهبود بخشید و موجب تحریک فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی در بوته‌های کلزای پاییزه گردید که این موضوع سبب افزایش تحمل به سرما و تولید عملکرد زیاد در بوته‌های کلزا شد. بنابراین می‌توان محلول‌پاشی نانوسلنیوم با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر در مرحله ۶-۸ برگی (در فصل پاییز) را به‌عنوان یک تکنیک مفید برای افزایش تحمل به سرما و حفاظت گیاهچه‌های کلزا از آسیب‌های دمای پایین در مراحل اولیه رشد به کشاورزان مناطق سردسیر توصیه کرد.

## ۷. تشکر و قدردانی

از معاونت محترم پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی به‌منظور تأمین بخشی از هزینه‌های پژوهش حاضر، تشکر و قدردانی می‌گردد.

## ۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.



## ۹. منابع

- ابوالقاسمی، رضا و حقیقی، مریم (۱۳۹۶). بررسی تغییرات گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای تیمار شده با عنصر مفید به شکل فلزی و نانو فلزی. *فرایند و کارکرد گیاهی*، ۱۹(۶)، ۱۶۲-۱۵۳.
- افشار محمدیان، منصور؛ امیدی پور، مطهره و جمال امیدی، فاطمه (۱۳۹۷). اثر سطوح مختلف تنش خشکی بر شاخص‌های فلورسانس کلروفیل دو رقم لوبیا. *پژوهش‌های گیاهی*، ۳۱(۳)، ۵۱۱-۵۲۵.
- بای‌وردی، احمد (۱۳۹۵). تأثیر ژئولیت و محلول‌پاشی سلنیوم و سیلیسیم بر عملکرد، اجزای عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک کلزا تحت شرایط تنش شوری. *پژوهش‌های زراعی ایران*، ۱۴(۱)، ۱۵۴-۱۷۰.
- بذل، شیوا؛ کریمی، روح‌الله؛ ارشادی، احمد؛ شاه‌دماغلو، علیرضا و رسولی، موسی (۱۳۹۴). اثر کاربرد برگی متیل‌جاسمونات بر تحمل به سرمای دانه‌های خیار گلخانه‌ای رقم نگین. *به‌زراعی کشاورزی*، ۱۷(۲)، ۴۴۱-۴۵۵.
- پاسبان اسلام، بهمن (۱۳۹۲). اثر تاریخ کاشت‌های مختلف بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام کلزای پاییزه. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۴۴(۱)، ۸-۱.
- پاییزی، مرضیه و شریعتی، منصور (۱۳۹۰). بررسی اثر تنش دمای پایین بر عملکرد فتوسیستم II در جلبک *Dunaliella salina* با استفاده از کینتیک فلوروسنس کلروفیل a. *مجله سلول و بافت*، ۲(۴)، ۳۹۵-۴۰۵.
- جان‌محمدی، محسن؛ توکل افشاری، رضا؛ محفوظی، سیروس؛ عزیززاده، هوشنگ؛ کامل، مسعود و خیای، مجید (۱۳۹۱). ارتباط بین نمو فنولوژیک، شاخص‌های فیزیولوژیک و تحمل به انجماد در گندم و چاودار زمستانه تحت شرایط مزرعه در مناطق معتدل و سرد. *مجله تولید گیاهان زراعی*، ۳(۲)، ۱۱۵-۱۳۷.
- جلیلیان، مهدی؛ دهداری، مسعود؛ امیری فهلیانی، رضا و موحدی دهنوی، محسن (۱۳۹۶). بررسی تحمل به سرما در ارقام مختلف چغندر قند (*Beta vulgaris* L.) در مرحله گیاهچه‌ای. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۰(۳)، ۴۷۵-۴۹۰.
- حسینی، زبیده؛ پیردشتی، همت‌الله، یاسر، یعقوبیان؛ زمان نوری، محمد (۱۳۹۳). کاربرد تکنیک فلورسانس کلروفیل برای شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به سرمای هوا و آب در گیاه برنج (*Oryza sativa* L.). *مجله سلول و بافت*، ۲(۵)، ۱۹۵-۲۰۶.
- خادمی آستانه، رزیتا؛ طباطبائی، سید جلال و بلندنظر، صاحبعلی (۱۳۹۶). تأثیر سلنیوم بر روی عملکرد و ویژگی‌های رویشی کلم تکمه‌ای کشت‌شده در هیدروپونیک. *علوم باغبانی*، ۳۱(۱)، ۱۶۷-۱۷۹.
- خاوری‌نژاد، رمضانعلی؛ گوشه‌گیر، زینب و سعادت‌مند، سارا (۱۳۸۹). بررسی اثرات برهمکنش سلنیوم و مولیبدن بر محتوی رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *فیزیولوژی محیطی گیاهی*، ۵(۱۷)، ۲۳-۱۴.
- خلیلی محله، جواد و رشدی، محسن (۱۳۸۷). اثر محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف بر خصوصیات کمی و کیفی ذرت سیلویی ۷۰۴ در خوی. *نهال و بذر*، ۲۴(۲)، ۲۸۱-۲۹۳.
- دهقانی بیدگلی، رضا (۱۳۹۸). بررسی اثر نانوذره سلنیوم بر جوانه‌زنی و برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک گون پنبه‌ای (*Astragalus gossypinus* Fisher) در محیط کشت MS. *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۲۶(۴)، ۱۰۵۵-۱۰۶۸.
- ساجدی، نورعلی و مدنی، حمید (۱۳۹۶). بهبود برخی صفات فیزیولوژیک، عملکرد و اجزای عملکرد گندم و جو با استفاده از سلنیوم در شرایط دیم. *اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۱۱(۴۱)، ۳۰-۱۷.
- ساسانی، شهریار؛ توکل افشاری، رضا و محفوظی، سیروس (۱۳۹۲). ارتباط تجمع برخی متابولیت‌ها با سازوکارهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی تحمل سرما و انجماد در گندم نان. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۴۴(۲)، ۳۲۷-۳۴۵.
- شیری، محمدرضا و چوکان، رجب (۱۳۹۶). ارزیابی تحمل به تنش خشکی هیبریدهای ذرت دانه‌ای. *پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی*، ۹(۲۱)، ۸۹-۹۹.
- عابدینی، معصومه؛ قره باغی، میثم و مرادخانی، سکینه (۱۴۰۰). تأثیر کاربرد ریشه‌ای و برگی سلنیوم بر برخی پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تنش شوری. *فیزیولوژی محیطی گیاهی*، ۱۶(۶۲)، ۹۵-۱۰۸.

- عقیقی شاهوردی، مهدی؛ امیدی، حشمت و طباطبایی، سید جلال (۱۳۹۶). اثر محلول‌پاشی سلینیوم، بور و آهن بر برخی صفات فیزیولوژیک و گلیکوزیدهای استویا (*Stevia rebaudiana* Bertoni) تحت تنش شوری. *تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران*، ۳۳(۶)، ۱۰۳۳-۱۰۱۷.
- کرمی‌معلم، سمانه؛ معالی امیری، رضا؛ وفایی، هوتن و نظیری، یاسمن (۱۳۹۵). ارزیابی فعالیت برخی از آنزیم‌های دفاعی نخود (*Cicer arietinum* L.) تحت تنش سرما. *مجله بیوتکنولوژی کشاورزی*، ۸(۴)، ۸۵-۹۸.
- گوهریان، علیرضا؛ شیرانی‌راد، امیرحسین؛ معاونی، پیام؛ مظفری، حمید و ثانی، بهزاد (۱۳۹۹). محلول‌پاشی سلینیوم و روی به‌منظور بهبود عملکرد و اجزای عملکرد ژنوتیپ‌های کلزا در شرایط تاریخ‌های کشت رایج و تأخیری. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۳۰(۲)، ۱۵۷-۱۷۶.
- منیری‌فر، حسن و صادق‌زاده، محمد ابراهیم (۱۳۹۳). بررسی تحمل به سرما در تعدادی از اکوتیپ‌های یونجه (*Medicago sativa* L.) تحت شرایط مزرعه. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۷(۱)، ۹۳-۱۰۳.
- نباتی، جعفر؛ نظامی، احمد؛ حسن‌فرد، علیرضا و حقیقت شیشوان، ژاله (۱۳۹۷). بررسی روند تغییرات عوامل فلورسانس کلروفیل در طی تنش یخ‌زدگی در دو توده باقلا (*Vicia faba* L.). *پژوهش‌های حیوانات ایران*، ۹(۲)، ۱۵۰-۱۳۹.

## References

- Abbas, S. M. (2012). Effects of low temperature and selenium application on growth and the physiological changes in sorghum seedlings. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*, 8(1), 268-286.
- Abedini, M., Garebaghi, M., & Moradkhani, S. (2021). The effect of root and foliar application of selenium on some physiological and biochemical responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stress. *Journal of Plant Plant Environmental Physiology*, 16(62), 95-108. (In Persian).
- Abolghasemi, R., & Haghighi, M. (2018). Study of changes in greenhouse tomatoes treated with beneficial elements in the form of metal and nanometals. *Journal of Plant Process and Function*, 6(19), 153-162. (In Persian).
- Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, 105, 121-126. [https://doi.org/10.1016/s0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/s0076-6879(84)05016-3).
- Afshar Mohamadian, M., Omidipour, M., & Jamal Omid, F. (2018). Effect of different drought stress levels on chlorophyll fluorescence indices of two bean cultivars. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 31(3), 511-525. (In Persian).
- Aghighi Shahverdi, M., Omid, H., & Tabatabaei, S. J. (2018). Effect of foliar application of selenium, boron and iron on some physiological traits and glycosides of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) under salinity stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 33(6), 1017-1033. (In Persian).
- Ajiboso, S. O., & Adenuga, G. A. (2012). The influence of zinc and selenium on some biochemical responses of *Vigna unguiculata* and *Zea mays* to water deficit condition and rehydration. *An International Journal of the Nigerian Society for Experimental Biology*, 24(3), 108-115.
- Akbulut, M., & Cakir, S. (2010). The effects of Se phytotoxicity on the antioxidant systems of leaf tissues in barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(2-3), 160-166.
- Anjum, N. A., Umar, S., & Chan, M. T. (2010). Ascorbate-glutathione pathway and stress tolerance in plants. *Springer Dordrecht Heidelberg*, 265-291. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9404-9>.
- Assefa, Y., Roozeboom, K., & Stamm, M. (2014). Winter canola yield and survival as a function of environment, genetics, and management. *Crop Science*, 54(5), 2303-2313 <https://doi.org/10.2135/CROPSCI2013.10.0678>.
- Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 89-113.
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, L. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207.
- Bazl, S., Karimi, R., Ershadi, A., Shahbodaghlo, A., & Rasouli, M. (2015). Effect of foliar application of methyl jasmonate in cold tolerance improvement of greenhouse-grown cucumber cv. 'Negin' seedlings. *Journal of Crops Improvement (Journal of Agriculture)*, 17(2), 441-455. (In Persian).
- Beladel, B., Nedjimi, B., Mansouri, A., Tahtat, D., Belamri, M., Tchanchane, A., Khelfaoui, F., & Benamar, M. E. A. (2013). Selenium content in wheat and estimation of the Selenium daily intake in different regions of Algeria. *Journal Applied Radiation and Isotopic*, 71(1), 7-10. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.09.009>.

- Broadley, M. R., Alcock, J., Alford, J., Cartwright, P., Foot, I., Fairweather-Tait, S. J., Hart, D. J., Hurst, R., Knott, P., McGrath, S. P., Meacham, M. C., Norman K., Mowat, H., Scott P., Stroud, J. L., Tovey, M., Tucker, M., White, P. J., Young, S. D., & Zhao, F. J. (2010). Selenium biofortification of high-yielding winter wheat (*Triticum aestivum* L.) by liquid or granular Se fertilization. *Plant and Soil*, 332(1), 5-18.
- Bybordi, A. (2016). Effect of zeolite and solubility of selenium, silicon on yield, yield components and some physiological properties of canola under stress conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 14(1), 169-170. (In Persian).
- Chance, B., & Maehly, A. C. (1955). Assay of catalases and peroxidase. *Methods in Enzymology*, 2, 764-775. [http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879\(55\)02300-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0076-6879(55)02300-8).
- Chang, C. J., & Koa, C. H. (1988). H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> metabolism during senescence of rice leaves changes in enzyme activities in light and darkness. *Plant Growth Regulation*, 25, 11-15.
- Chauhan, R., Awasthi, S., Srivastava, S., Dwivedi, S., Pilon-Smits, E. A. H., Dhankher, O. P., & Tripathi, R. D. (2019). Understanding selenium metabolism in plants and its role as a beneficial element. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(2), 1937-1958. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1598240>.
- Chen, Y., Jia, X., Sun, F., Jiang, S., Liu, H., Liu, Q., & Kong, B. (2020). Using a stable pre-emulsified canola oil system that includes porcine plasma protein hydrolysates and oxidized tannic acid to partially replace pork fat in frankfurters. *Meat Science*, 160, 107968. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107968>.
- Chu, J., Yao, X., & Zhang, Z. (2010). Responses of wheat seedlings to exogenous selenium supply under cold stress. *Biological trace element research*, 136, 355-363. <https://doi.org/10.1007/s12011-009-8542>
- Dehghani Bidgoli, R. (2019). Effect of selenium nanoparticles (Se NPs), in the germination and some morphophysiological characteristics of (*Astragalus gossypinus Fisher*) in MS culture medium. *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, 26(4), 1068-1055. (In Persian)
- Djanaguiraman, M., Prasad, P. V. V., & Seppanen, M. (2010). Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage under high-temperature stress by enhancing its antioxidant defense system. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), 999-1007. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.09.009>.
- Elemike, E., Euzoh, I. M., Onwudiwe, D. C., & Babalola, O. O. (2019). The role of nanotechnology in the fortification of plant nutrients and improvement of crop production. *Applied Sciences*, 9(3), 1-32. <https://doi.org/10.3390/app9030499>.
- Feng, R., Wei, C., & Tu, M. S. (2013). The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. *Environmental and Experimental Botany*, 87, 58-68.
- Filek, M., Gzyl-Malcher, B., Zembala, M., Bednarska, E., Laggner, P., & Kriechbaum, M. (2010). Effect of selenium on characteristics of rape chloroplasts modified by cadmium. *Plant Physiology*, 167(1), 28-33. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.07.003>.
- Germ, M., Kreft, I., Stibilj, V., & Urbanc-Berčič, O. (2007). Combined effects of selenium and drought on photosynthesis and mitochondrial respiration in potato. *Plant Physiology and Biochemistry*, 45(2), 162-167. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.01.009>.
- Ghasemi, Y., Ghasemi, K., Pirdashti, H., & Asgharzadeh, R. (2016). Effect of selenium enrichment on the growth, photosynthesis and mineral nutrition of broccoli. *Notulae Scientia Biologicae*, 8(2), 199-203. <https://doi.org/10.15835/nsb.8.2.9804>.
- Ghassemi-Golezani, K., Khomari, S., Valizadeh, M., & Alyari, H. (2008). Effects of seed vigor and the duration of cold acclimation on freezing tolerance of winter oilseed rape. *Seed Science and Technology*, 36(3), 767-775. <https://doi.org/10.15258/sst.2008.36.3.26>.
- Goharian, A., Shirani Rad, A., moaveni, P., Mozafari, H., & Sani, B. (2020). Foliar Application of Selenium and Zn to Improve the Yield and Yield Components of Rapeseed Genotypes under Conventional and Delayed Sowing Dates. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 30(2), 157-176. (In Persian).
- Hasani, Z., Pirdashti, H., Yaghoubian, Y., & Zaman Nouri, M. (2014). Application of chlorophyll fluorescence technique to evaluate the tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes to cold temperature and water. *Journal of Cell and Tissue (JCT)*, 5(2), 195-206. (In Persian).
- Hawrylak-Nowak, B. (2015). Selenite is more efficient than selenate in the alleviation of salt stress in lettuce plants. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 57(2), 49-54. <https://doi.org/10.1515/abcsb-2015-0023>.

- Hawrylak-Nowak, B., Matraszek, R., & Szymańska, M. (2010). Selenium modifies the effect of short-term chilling stress on cucumber plants. *Biological trace element research*, 138(1), 307-315. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8613-5>.
- Holaday, A. S., Ritchie, S. W., & Nguyen, H. T. (1992). Effects of water deficit on gas-exchange parameters and ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase activation in wheat. *Environmental and experimental botany*, 32(4), 403-410. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(92\)90053-5](https://doi.org/10.1016/0098-8472(92)90053-5).
- Jalilian, M., Dehdari, M., Amiri Fahlani, R., & Movahedi Dehnovi, M. (2017). Study of cold tolerance of different sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivars at seedling growth stage. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 10(3), 475-490. (In Persian).
- Janmohammadi, M., Tavakol Afshari, R., Mahfouzi, S., Alizadeh, H., Kamel, M., & Khiavi, M. (2010). Relationship among phenological development, physiological indices and freezing tolerance in winter wheat and rye under field conditions in moderate and cold regions. *Electronic Journal of Crop Production*, 3(2), 115-137. (In Persian).
- Karami, S., Maali-Amiri, R., Vafaei, H., Naziri, Y. (2017). Evaluation of some defense enzyme activities in chickpea plants under cold stress. *Agricultural Biotechnology Journal*, 8(4), 85-98. (In Persian).
- Kazemi-Shahandashti, S. S., & Maali-Amiri, R. (2018). Global insights of protein responses to cold stress in plants: Signaling, defense, and degradation. *Journal of Plant Physiology*, 226, 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.03.022>.
- Khademi astaneh, R., Tabatabaie, S. J., & Bolandnazar, S. A. (2017). Effect of Se on yield and vegetative characteristics of Brussels sprouts in hydroponics. *Journal of Horticultural Science*, 31(1), 167-179. (In Persian).
- Khalili Mahaleh, J., & Roshdi, M. (2008). Effect of foliar application of micronutrients on quantitative and qualitative characteristics of 704 silage corn in Khoy. *Seed and Plant*, 24(2), 281-293. (In Persian).
- Khavarinezhad, R. A., Goshehgir, Z., & Saadatmand, S. (2010). The effects of Selenium-Molybdenum interaction on contents of photosynthetic pigments in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) *Journal of Plant Environmental Physiology*, 5(1), 14-23. (In Persian).
- Labanowska, M., Filek, M., Kościelniak, J., Kurdziel, M., Kulis, E., & Hartikainen, H. (2012) The effects of short-term selenium stress on Polish and Finnish wheat seedlings-EPR, enzymatic and fluorescence studies. *Journal of Plant Physiology*, 169(3), 275-284. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2011.10.012>.
- Lapaz, A. D. M., Santos, L. F. D. M., Yoshida, C. H. P., Heinrichs, R., Campos, M., & Reis, A. R. D. (2019). Physiological and toxic effects of selenium on seed germination of cowpea seedlings. *Bragantia*, 78(4), 498-508. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20190114>.
- Lei, Y. A. N., Shah, T., Cheng, Y., Yan, L. U., Zhang, X. K., & Zou, X. L. (2019). Physiological and molecular responses to cold stress in rapeseed (*Brassica napus* L.). *Journal of Integrative Agriculture*, 18(12), 2742-2752. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62147-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62147-1).
- Luo, H., Du, B., He, L., Zheng, A., Pan, S., & Tang, X. (2019). Foliar application of sodium selenate induces regulation in yield formation, grain quality characters and 2-acetyl-1-pyrroline biosynthesis in fragrant rice. *BMC Plant Biology*, 19(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2104-4>.
- Leuendorf, J. E., Frank, M., & Schmülling, T. (2020). Acclimation, priming and memory in the response of *Arabidopsis thaliana* seedlings to cold stress. *Scientific reports*, 10(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56797-x>.
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148(11), 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).
- Lu, N., Wu, L., & Shi, M. (2020). Selenium enhances the vase life of *Lilium longiflorum* cut flower by regulating postharvest physiological characteristics. *Scientia Horticulturae*, 264, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109172>.
- Madebo, M. P., Luo, S. M., Wang, L., Zheng, Y. H., & Jin, P. (2021). Melatonin treatment induces chilling tolerance by regulating the contents of polyamine,  $\gamma$ -aminobutyric acid, and proline in cucumber fruit. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(11), 3060-3074. [https://doi.org/10.1016/s2095-3119\(20\)63485](https://doi.org/10.1016/s2095-3119(20)63485).
- Monirifar, H., & Sadegzadeh, M. B. (2014). Evaluation of cold tolerance in some alfalfa (*Medicago sativa* L.) ecotypes under field conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 7(1), 93-103. (In Persian).
- Nabati, J., Nezami, A., Hasanfard, A. R., & Haghghat Sheshvan, Zh. (2018). The trend of changes in chlorophyll fluorescence parameters in two *Vicia faba* ecotypes during freezing stresses. *Iranian Journal Pulses Research*, 9(2), 139-150. (In Persian).

- Nazerieh, H., Ardebili, Z. O., & Iranbakhsh, A. (2018). Potential benefits and toxicity of nano selenium and nitric oxide in peppermint. *Acta agriculturae Slovenica*, 111(2), 357-368.
- Nawaz, F., Naeem, M., Ashraf, M. Y., Tahir, M. N., Zulfiqar, B., Salahuddin, M., Shabbir, R. N., & Aslam, M. (2016). Selenium supplementation affects physiological and biochemical processes to improve fodder yield and quality of maize (*Zea mays* L.) under water deficit conditions. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1438.
- Paeizi, M., & Shariati, M. (2012). Effect of cold stress on PSII efficiency of Dunaliella using chlorophyll fluorescence kinetics. *Journal of Cell and Tissue*, 2(4), 395-405. (In Persian).
- Pasan Eslam, B. (2013). Effects of planting dates on yield and yield components of fall rape oilseed cultivars. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 44(1), 1-8. (In Persian).
- Rady, M., Semida, W. M., El-Mageed, T. A. A., Howladar, S. M., & Shaaban, A. (2020). Foliage applied selenium improves photosynthetic efficiency, antioxidant potential and wheat productivity under drought stress. *International Journal of Agriculture and Biology*, 24, 1293-1300. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1562>
- Rezaie, R., Mandoulakani, B. A., & Fattahi, M. (2020). Cold stress changes the antioxidant defense system, phenylpropanoid contents and expression of genes involved in their biosynthesis in *Ocimum basilicum* L. *Scientific Reports*, 10(1), 1-10.
- Sagisaka, S. (1976). The occurrence of peroxide in a perennial plant *Populus gelrica*. *Plant Physiology*, 57, 308-309. <https://doi.org/10.1104/pp.57.2.308>.
- Sajedi, N., & Madani, H. (2017). Improvement of some physiological traits, yield and yield components of wheat and barley by using sodium selenate and sodium selenite in dryland conditions. *Journal of Crop Ecophysiology*, 41(1), 17-30. (In Persian).
- Sasani, S., Tavakkol Afshari, R., & Mahfoozi, S. (2013). Low-temperature acclimation and the correlation of vernalization requirement with accumulation of some compatible solutes and physiological mechanisms in bread wheat. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 44(2), 327-345. (In Persian).
- Shalaby, T. A., Abd-Alkarim, E., El-Aidy, F., Hamed, E.S., Sharaf-Eldin, M., El-Ramady, H., Bayoumi, Y., & Reis, A. R. (2021). Nano-selenium, silicon and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> boost the growth and productivity of cucumber under combined salinity and heat stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 212, 1-9.
- Shiri, M., & Choukan, R. (2017). Evaluation of Maize Hybrids Tolerance to Drought Stress. *Journal of Crop Breeding*, 9(21), 89-99. (In Persian).
- Sun, H. W., Ha, J., Liang, J. H. S., & Kang, W. (2010). Protective role of selenium on garlic growth under cadmium stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41(10), 1195-1204. <https://doi.org/10.1080/00103621003721395>.
- Swoczyna, T., Mojski, J., Baczevska-Dabrowska, A. H., Kalaji, H. M., & Elsheery, N. I. (2020). Can we predict winter survival in plants using chlorophyll fluorescence? *Photosynthetica*, 58(2), 433-442. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.181>.
- Takahashi, D., Kawamura, Y., & Uemura, M. (2013). Changes of detergent-resistant plasma membrane proteins in oat and rye during cold acclimation: association with differential freezing tolerance. *Journal of proteome research*, 12(11), 4998-5011.
- Thavarajah, D., Thavarajah, P., Vial, E., Gebhardt, M., Lacher, C., Kumar, S., & Combs, G.F. (2015). Will selenium increase lentil (*Lens culinaris* Medik) yield and seed quality? *Frontiers in Plant Science*, 6, 356-364. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00356>.
- Wu, Y., Wei, W., Pang, X., Wang, X., Zhang, H., Dong, B., Xing, Y., & Li, X. (2014). Comparative transcriptome profiling of a desert evergreen shrub, *Ammopiptanthus mongolicus*, in response to drought and cold stresses. *BMC Genomics*, 15(1), 1-16.
- Xia, J., Li, Y., & Zou, D. (2004). Effects of salinity stress on PSII in *Ulva lactucaas* probed by chlorophyll fluorescence measurements. *Aquatic Botany*, 80(2), 129-137.
- Zhao, Y., Han, Q., Ding, C., Huang, Y., Liao, J., Chen, T., Feng, S., Zhou, L., Zhang, Z., Chen, Y., Yuan, S., & Yung, M. (2020). Effect of low temperature on chlorophyll biosynthesis and chloroplast biogenesis of rice seedlings during greening. *International journal of molecular sciences*, 21(4), 1390-1413. <https://doi.org/10.3390/ijms21041390>.