

Investigating the effect of nanoselenium in improving the physiological, biochemical and agronomic characteristics of spring rapeseed under water deficit stress at the end of the season

Mitra Rostami hir¹, Parisa Sheikhzadeh^{2*}, Saeed Khomarie³, Nasser Zare⁴

¹ Ph.D. Graduated of Agronomy, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran and

Lecturer at Ardabil University of Applied Sciences, Ardabil, Iran, E-mail: mitrarostami@ymail.com

² Corresponding Author, Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, E-mail: sheikhzadehmp@gmail.com

³ Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, E-mail: saeid.khomari@gmail.com

⁴ Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, E-mail: zarenasser@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:

Received: 2023-1-2

Revised:

Accepted: 2023-5-6

Keywords:

Catalase
Chlorophyll fluorescence
Nanoparticles
Relative water content
Water deficit stress

ABSTRACT

Background and objectives: Water deficit stress is one of the most common abiotic stresses that reduce the growth and yield of crops such as oilseed rape. The utilization of micronutrients in oilseed crops is one of the most useful and effective approach for improving the grain yield and plant adaptation under drought stress conditions. Accordingly, the aim of this study was to investigate the effect of foliar application of selenium nanoparticles on physiological, biochemical and agronomic characteristics of oilseed rape under the end season drought stress.

Materials and methods: In order to evaluate the effect of selenium nanoparticles on some physiological, biochemical and agricultural characteristics of oilseed rape under the end season drought stress, a split-plot experiment was conducted in a randomized complete block design (RCBD) with three replications at research farm station of University of Mohaghegh Ardabili in 2017-2018. The treatments were irrigation (normal irrigation and cutting irrigation at the flowering stage) as main plots and selenium nanoparticles foliar application ((0 (control), 25 and 50 mg l⁻¹) as sub-plots. The cultivar studied was Hayola 401. The measured traits included Chlorophyll a, Chlorophyll b, Total Chlorophyll, Carotenoid, F₀, F_m, F_v, F_v/F_m, relative water content, ion leakage, malondialdehyde, Catalase and grain yield. Analysis of variance and comparison of their means using by LSD test were done by the SAS software (version 9).

Results: According to the results, drought stress significantly reduced the amount of photosynthetic pigment, relative water content and grain yield while amount malondialdehyde, ion leakage and chlorophyll fluorescence increased under drought stress conditions. Foliar spraying of nanoselenium with a concentration of 50 mg/liter increased catalase enzyme activity (82%), relative leaf water content (29 %), total chlorophyll (64 %) and decreased electrical conductivity of materials leaked from leaves by 23% could reduce the negative effects of drought stress. so that the grain yield increased (45%) by spraying 50 mg/l selenium nanoparticles in under drought stress conditions. The most positive and significant correlations

were observed between grain yield and chlorophyll a, total chlorophyll (96** %).

Conclusion: The results of this study indicated that the using of molybdenum oxide nanoparticles under favorable irrigation conditions and drought stress could improve photosynthetic indices and biochemical traits. Foliar application of selenium nanoparticles, especially at 50 mg/l concentration, reduced the effects of drought stress by increasing the synthesis of chlorophyll and improving the process of photosynthesis and improved physiological and biochemical indices, thus improving the grain yield in favorable and unfavorable environmental conditions.

Cite this article: Rostami hir, M., Sheikhzadeh, P., Khomarie, S., Zare, N. 2023. Investigating the effect of nanoselenium in improving the physiological, biochemical and agronomic characteristics of spring rapeseed under water deficit stress at the end of the season. *Crop Production Journal*, 16 (3), 69-90.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejcp.2024.20922.2556

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



تولید گیاهان زراعی

شاپا چاپی: ۲۰۰۸-۷۳۹۸
شاپا الکترونیکی: ۲۰۰۸-۷۴۰۳



بررسی اثر نانوسلنیوم در بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و زراعی کلزای بهاره در شرایط تنش آبی انتهای فصل

میترا رستمی هیرا^۱، پریسا شیخزاده^{۲*}، سعید خماری^۳، ناصر زارع^۴

^۱ دانش‌آموخته دکتری دانشگاه محقق اردبیلی و مربی دانشگاه جامع علمی - کاربردی اردبیل، ایران، رایانامه: mitrarosrami@ymail.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، رایانامه: sheikhzadehmp@gmail.com

^۳ دانشیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، رایانامه: saeid.khomari@gmail.com

^۴ استاد گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، رایانامه: zarenasser@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	سابقه و هدف: تنش کم آبی یکی از رایج ترین تنش های غیرزیستی است که رشد و نمو و عملکرد گیاهان زراعی مانند کلزا را کاهش می دهد. استفاده از ریزمغذی ها در گیاهان دانه روغنی، به عنوان یکی از راهکارهای بسیار مفید و کارآمد در شرایط تنش خشکی است که ضمن افزایش عملکرد دانه، به افزایش مقاومت گیاه منجر می شود. بر همین اساس، این پژوهش با هدف بررسی اثر کاربرد برگی نانوسلنیوم بر برخی از صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و زراعی کلزای بهاره در شرایط تنش خشکی انتهای فصل انجام گرفت.
مقاله کامل علمی - پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲	
تاریخ ویرایش:	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۱۶	
واژه های کلیدی:	مواد و روش ها: به منظور بررسی تأثیر محلول پاشی نانوسلنیوم بر برخی خصوصیات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و زراعی کلزا تحت تنش خشکی انتهای فصل این آزمایش بصورت کرت های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی اجرا گردید. تیمارهای مورد مطالعه شامل آبیاری (آبیاری کامل و قطع آبیاری از مرحله گلدهی) به عنوان کرت اصلی و غلظت های نانوسلنیوم (صفر (شاهد)، ۲۵، ۵۰ میلی گرم در لیتر) به عنوان کرت فرعی که بر روی رقم هایولا ۴۰۱ انجام گرفت. صفات اندازه گیری شده شامل کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، کاروتنوئید، فلورسانس کلروفیل (فلورسانس حداقل، حداکثر و متغیر)، کارایی کوانتومی فتوسیستم II، محتوی نسبی آب برگ، میزان هدایت الکتریکی مواد نشت یافته از برگ ها، میزان مالون دی آلدئید، فعالیت آنزیم کاتالاز و عملکرد دانه بودند. تجزیه های آماری و مقایسه میانگین داده ها با استفاده از نرم افزار SAS انجام و مقایسه میانگین ها توسط آزمون حداقل اختلاف معنی دار (LSD) انجام گردید.
آنزیم کاتالاز	
تنش کم آبی	
فلورسانس کلروفیل	
محتوی نسبی آب برگ	
نانوذره	
	یافته ها: تنش کم آبی به طور معنی داری میزان رنگیزه های فتوستتزی، محتوی نسبی آب برگ و عملکرد دانه را کاهش و میزان مالون دی آلدئید برگ، نشت یونی و فلورسانس کلروفیل را افزایش داد. محلول پاشی نانوسلنیوم با غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر با افزایش فعالیت آنزیم

کاتالاز (۸۲ درصد)، محتوای نسبی آب برگ (۲۹ درصد)، کلروفیل کل (۶۴ درصد) و همچنین کاهش ۲۳ درصدی میزان هدایت الکتریکی مواد نشت شده از برگ‌ها، اثرات منفی تنش کم‌آبی را کاهش داد. به طوری که عملکرد دانه با محلول‌پاشی ۵۰ میلی‌گرم نانوسلنیوم به میزان ۴۵ درصد در شرایط تنش کم‌آبی، افزایش یافت. عملکرد دانه بیشترین همبستگی مثبت و معنی‌دار را بین صفات بررسی شده با کلروفیل a و کلروفیل کل (**۹۶٪) داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که نانوسلنیوم در شرایط آبیاری نرمال و قطع آبیاری شاخص‌های فتوسنتزی و صفات شیمیایی را بهبود می‌دهد. محلول‌پاشی نانوسلنیوم به خصوص در غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر از طریق افزایش سنتز کلروفیل و بهبود فتوسنتز اثرات تنش کم‌آبی را کاهش و با بهبود خصوصیات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی موجب افزایش عملکرد دانه در شرایط مساعد و نامساعد محیطی گردید.

استناد: رستمی هیر، م.، شیخ‌زاده، پ.، خماری، س.، زارع، ن. (۱۴۰۲). بررسی اثر نانوسلنیوم در بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و زراعی کلزای بهاره در شرایط تنش آبی انتهایی فصل. *مجله تولید گیاهان زراعی*، ۱۶ (۳)، ۹۰-۶۹.

DOI: 10.22069/ejcp.2024.20922.2556

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان



© نویسندگان.

مقدمه

گیاهان در شرایط طبیعی تحت تاثیر تنش‌های مختلفی قرار می‌گیرند که از بین آنها، تنش کم‌آبی مهمترین تنش غیرزیستی و عامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی در بیشتر مناطق جهان است (۱). تنش کم‌آبی با کاهش محتوای نسبی آب برگ، سبب بسته شدن روزنه‌ها، اختلال در ساخت مواد فتوسنتزی و کاهش عملکرد می‌شود (۲). فتولیز آب از طریق تجزیه مولکول آب باعث تولید الکترون می‌گردد، اما در شرایط تنش کم‌آبی به دلیل اختلال در انتقال الکترون در فتوسیستم II، این الکترون‌های تولید شده، باعث تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌گردد (۳). گونه‌های فعال اکسیژن با خسارت به ماکرو مولکول‌های سلولی نظیر لیپیدها (پراکسیداسیون چربی‌ها) موجب تولید مالون‌دی‌آلدئید می‌گردند (۴). اغلب از محتوای مالون‌دی‌آلدئید و نشت الکترولیت‌ها به عنوان شاخص آسیب اکسیداتیو به غشای سلولی گیاه استفاده می‌شود (۵). پایداری غشای سلولی یکی از شاخص‌هایی است که میزان مقاومت به تنش کم‌آبی را در گیاهان نشان می‌دهد و از طریق اندازه‌گیری میزان نشت یونی، قابل ارزیابی می‌باشد (۶). فلورسانس کلروفیل می‌تواند توانایی گیاه در تحمل به تنش‌های محیطی، سالم بودن غشای تیلاکوئید، کارایی انتقال الکترون از فتوسیستم II به فتوسیستم I و میزان خسارتی که تنش به گیاه وارد می‌کند را به‌خوبی نشان دهد (۷). بر اساس گزارش پژوهشگران، ژنوتیپ‌هایی که در مواجهه با تنش کم‌آبی، محتوای نسبی آب برگ خود را حفظ کنند در مقابله با کم‌آبی، متحمل‌تر هستند. حفظ محتوای نسبی آب برگ می‌تواند شاخصی برای نشان دادن مقاومت و پایداری داخلی گیاه به تنش کم‌آبی باشد (۸).

سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه به‌عنوان یکی دیگر از راهکارهای گیاهان برای مقابله با تنش اکسیداتیو

ناشی از تنش خشکی است (۹). آنزیم کاتالاز از جمله آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی است که افزایش فعالیت آن سبب بهبود توانایی گیاه در پاکسازی گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود و به همین دلیل ارزیابی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در تشخیص تحمل به کم‌آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۰). در سال‌های اخیر استفاده از ریزمغذی‌ها ضمن افزایش کیفیت محصولات غذایی، تحمل گیاهان را در مقابله با بیماری‌ها و تنش کم‌آبی افزایش داده است (۱۱). کاربرد سلنیوم یکی از راهبردهای مطرح در افزایش تحمل گیاهان زراعی به تنش کم‌آبی می‌باشد. سلنیوم با افزایش رشد، کاهش آسیب ناشی از تنش‌های اکسیداتیو، افزایش محتوای کلروفیل، تنظیم وضعیت آب گیاه و افزایش تولید آنتی‌اکسیدان‌ها سبب بهبود تحمل گیاه به تنش کم‌آبی می‌شود (۱۲). این عنصر با افزایش سنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی، تثبیت کربن و سنتز و هیدرولیز نشاسته و ساکارز موجب بهبود فرآیند فتوسنتز و در نهایت منجر به افزایش عملکرد و اجزای عملکرد می‌گردد (۱۳).

استفاده از عناصر غذایی به شکل نانو ذرات، به دلیل سرعت بالای جذب آنها در کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، اندازه بسیارکوچک، ساختار و ویژگی‌های سطحی نانوذرات منجر به خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد می‌شود. به این ترتیب، نانوذرات سلنیوم به دلیل سمیت کم، فراهمی زیستی بالا و توانایی قوی در از بین بردن رادیکال‌های آزاد مورد توجه بیشتری قرار گرفتند (۱۴). محلول‌پاشی با نانوسلنیوم موجب افزایش میزان کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئید، افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز، افزایش محتوای نسبی آب و کاهش میزان مالون‌دی‌آلدئید گردید (۱۵، ۱۶، ۱۷).

با به کارگیری نانوسلنیوم در غلظت‌های متفاوت جهت انتخاب و توصیه غلظت مناسب انجام گردید.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی واقع در ۱۰ کیلومتری شمال شرق شهر اردبیل 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 در سال ۱۳۹۷، اجرا شد. اطلاعات خاک محل اجرای آزمایش در جدول ۱ و اطلاعات هواشناسی در طول زمان اجرای آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است.

تیمارهای آزمایشی شامل تنش کم‌آبی در دو سطح (آبیاری کامل و قطع آبیاری از مرحله گلدهی) در کرت‌های اصلی و محلول‌پاشی بوته‌های کلزای بهاره با غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم در سه سطح (صفر (شاهد)، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) در کرت‌های فرعی قرار گرفت. نانوسلنیوم (سایز ذرات: ۳۰ نانومتر، خلوص: ۹۹ درصد) مورد استفاده در این تحقیق از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان تهیه شد.

کلزا (*Brassica napus L.*) از مهم‌ترین دانه‌های روغنی در جهان بوده که با تولید سالانه ۲۲/۷ میلیون تن روغن، جایگاه دوم را بعد از سویا به خود اختصاص داده است (۱۸). دانه کلزا دارای ۴۵-۴۰ درصد روغن بوده و کنجاله آن با دارا بودن ۴۶/۵ درصد پروتئین، ۵/۳ درصد چربی و ۲/۱ درصد فسفر قابل جذب دارای ارزش غذایی فراوانی است (۱۹). تنش کم‌آبی، به‌ویژه در مرحله گلدهی عمده‌ترین عامل محدودکننده تولید و بهره‌وری کلزا در بسیاری از مناطق جهان است (۲۰). به‌طوری که وقوع تنش کم‌آبی در مرحله گلدهی و تشکیل خورجین‌ها موجب کاهش عملکرد دانه می‌شود (۲۱).

با در نظر گرفتن محدودیت منابع آبی و همچنین دیم بودن قسمت عمده‌ای از سطح زیر کشت کلزا، بررسی تغییرات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی به منظور بهبود مقاومت گیاهان در برابر تنش کم‌آبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین با توجه راهبرد استفاده از نانو کودها در جهت کاهش مصرف مواد شیمیایی در سیستم‌های زراعی و نقش موثر عنصر سلنیوم در تنظیم سازگاری در برابر تنش کم‌آبی، این پژوهش با هدف بررسی تعدیل اثرات مخرب کم‌آبی

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری

Table 1- Physical and chemical properties of the farm soil at the depth of 0-30 cm

هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	واکنش خاک (pH)	کربن‌آلی (درصد) Organic carbon (%)	نیتروژن (درصد) N (%)	فسفر (پی‌پی‌ام) p (ppm)	پتاسیم (پی‌پی‌ام) K (ppm)	رس (درصد) Clay (%)	سیلت (درصد) Silt (%)	شن (درصد) Sand (%)	بافت خاک (Soil Texture)
2.68	7.6	0.44	0.06	11.83	202.5	15.5	53.7	30.8	سیلتی لوم (Silt-loam)

کاربرد برگی در طی دو مرحله (در مرحله ۸-۶ برگی در ۲۴ خرداد ۱۳۹۷ و مرحله پنجاه درصد گلدهی در ۲۱ تیر ۱۳۹۷) با سم‌پاش پشته‌ی ۲۰ لیتری (با نازل تلسکوپ‌ی استیل و پاشش به‌صورت مه‌پاش) و به‌صورت دستی اعمال گردید. برای کالیبره کردن

کلیه کرت‌ها به‌طور یکنواخت تا مرحله گلدهی در شش مرحله آبیاری شدند. در مرحله ۵۰ درصد گلدهی در تیمارهای تنش کم‌آبی، آبیاری کرت‌ها قطع شد و در تیمار آبیاری کامل دو مرحله آبیاری دیگر تا پایان دوره رشدی انجام گرفت. نانوسلنیوم به‌صورت

بررسی اثر نانوسلنیوم در بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی... / میترا رستمی هیر و همکاران

سمپاش، ابتدا میزان مشخصی آب در سمپاش ریخته و در سطح یک مترمربع پاشش گردید؛ به طوری که بوته‌ها کاملاً خیس شوند. سپس میزان آب باقیمانده در سمپاش اندازه گیری و از کل آب ریخته شده، کم گردید تا میزان آب مورد استفاده برای محلول‌پاشی در یک متر مربع بدست آید.

جدول ۲- میانگین دما و مجموع بارندگی ماهانه در طول فصل رشد کلزا در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶

Table 2- Monthly average temperature and monthly total rainfall of the growing season, 2017/2018

ماه month	پارامترهای هواشناسی (Meteorological parameters)					
	میانگین حداقل دما (سانتی‌گراد) Minimum temperature (°C)	میانگین حداکثر دما (سانتی‌گراد) Maximum temperature (°C)	میانگین دما (سانتی‌گراد) Mean temperature (°C)	رطوبت نسبی (درصد) Average humidity (%)	مجموع بارندگی (میلی‌متر) Total Precipitation (mm)	مجموع ساعات آفتابی Total sunshine hours
March-April فروردین	0.9	16.2	7.9	42.4	11.0	159.4
April-May اردیبهشت	4.1	19.1	11.5	49.7	27.3	197.4
May-June خرداد	8.6	23.4	15.6	47.0	26.5	257.8
June-July تیر	11.5	28.5	21.1	40.7	4.2	358.4
July – August مرداد	13.7	24.9	19.0	54.2	11.2	226.7

OS-30p، (OPTI-SCIENCES, USA)، می‌سازان رنگیزه‌های فتوستتزی (کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئید) بر اساس روش لیچتلمر (۱۹۸۷)، محتوای نسبی آب برگ به روش هالودی و همکاران (۱۹۹۲) و هدایت الکتریکی مواد نشت یافته از برگ‌ها به روش ایستا (۲۰۱۷) اندازه‌گیری گردید (۲۲، ۲۳، ۲۴). برای اندازه‌گیری صفات بیوشیمیایی بوته‌های کلزا، نمونه‌برداری یک هفته بعد از محلول‌پاشی در مرحله گلدهی انجام گرفت. نمونه‌های شاهد و تیمار در فریزر و تحت دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد تا زمان اندازه‌گیری صفات، نگهداری شدند. برای تهیه عصاره آنزیمی از روش چانگ و کوا (۱۹۸۸) استفاده شد (۲۵). به این منظور، ابتدا ۰/۸ گرم ماده تر گیاهی از هر نمونه در داخل نیتروژن مایع و با استفاده از هاون چینی به‌طور کامل پودر شده و سپس شش میلی‌لیتر بافر استخراج (Tris-HCl) ۰/۰۵ مولار (pH=۷)،

میزان آب به‌دست آمده، ملاک عمل جهت محلول‌پاشی کرت‌ها برحسب سطحی که داشتند، قرار گرفت. جهت افزایش راندمان جذب نانوسلنیوم، محلول‌پاشی هنگام صبح انجام گردید تا رطوبت نسبی هوا بالاتر باشد و همچنین از توئین-۲۰ برای افزایش کارایی محلول‌پاشی و جلوگیری از برگ سوختگی استفاده گردید. جهت اعمال تیمار عدم کاربرد نانوسلنیوم (غلظت صفر) از آب مقطر استفاده شد. در طول فصل رشد، آفت و بیماری در مزرعه مشاهده نشد، بنابراین از آفت‌کش استفاده نگردید اما برای کنترل علف‌های هرز در چند مرحله و جین به‌صورت دستی انجام شد. یک هفته بعد از محلول‌پاشی در مرحله گلدهی یا سه هفته بعد از آخرین آبیاری، میزان فلورسانس کلروفیل (فلورسانس حداقل، فلورسانس حداکثر، فلورسانس متغیر و حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II) با استفاده از دستگاه فلورومتر (مدل

نتایج و بحث

میزان کلروفیل a، b و کلروفیل کل: تجزیه واریانس داده‌های مورد بررسی نشان داد که اثر سطوح آبیاری و نانوسلنیوم بر میزان کلروفیل a، b و کلروفیل کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. میزان کلروفیل a در سطح احتمال یک درصد و کلروفیل کل در سطح احتمال پنج درصد به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر برهمکنش تیمارهای آبیاری و نانوسلنیوم قرار گرفت، اما این برهمکنش برای محتوای کلروفیل b معنی‌داری نبود (جدول ۳). بررسی اثرات متقابل کلی تیمارهای آزمایشی بر کلروفیل a و کلروفیل کل (جدول ۶)، نشان داد که قطع آب در مرحله گلدهی باعث کاهش معنی‌دار کلروفیل a و کلروفیل کل گردید. به‌نظر می‌رسد کاهش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی در اثر تنش کم‌آبی، ناشی از افزایش فعالیت انواع گونه‌های فعال اکسیژنی و تخریب رنگیزه‌های فتوسنتزی و همچنین مصرف گلوتامات (پیش‌ساز سنتز کلروفیل) در مسیر سنتز پرولین باشد (۲۸، ۲۹). کاهش میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل را در شرایط تنش کم‌آبی در ذرت و لوبیا گزارش کرده‌اند که مطابق با نتایج این پژوهش است (۳۰، ۲۸).

نتایج حاصل از برش‌دهی (جدول ۴) نشان داد که هم در شرایط آبیاری کامل و هم در تنش کم‌آبی، کلروفیل a و کلروفیل کل به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم قرار گرفت. تحت شرایط تنش، بیشترین میزان این رنگیزه‌ها با کاربرد برگی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم مشاهده شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و تیمار شاهد بود. کاربرد غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم در شرایط آبیاری کامل، میزان کلروفیل a را نسبت به تیمار شاهد به‌ترتیب ۸ و ۱۵ درصد و میزان کلروفیل کل را

MgCl₂ سه میلی مولار و EDTA یک میلی مولار) به آن اضافه شد. محلول به مدت ۲۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه و دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفوژ (مدل Eppendorf, Germany) گردید. سپس، محلول رویی برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های کاتالاز مورد استفاده قرار گرفت. برای اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم کاتالاز از روش ابی (۱۹۸۴) استفاده گردید، ابتدا مخلوط واکنش شامل سه میلی‌لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی مولار (pH=۷)، ۱۰ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۱۵ میلی مولار و ۵۰ میکرولیتر عصاره بود. پس از اضافه کردن عصاره، کاهش جذب در طول موج ۲۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Biorad, Smart Spec, USA) اندازه‌گیری شد (۲۶). از محلول بلانک (جذب زمینه) برای صفر کردن دستگاه اسپکتروفتومتر استفاده گردید. محلول جذب زمینه شامل تمام مواد واکنش به‌جز عصاره آنزیمی استخراج شده بود. میزان مالون‌دی‌آلدئید نیز با روش هس و پاکر (۱۹۶۸) اندازه‌گیری شد (۲۷).

برای تعیین عملکرد دانه در واحد سطح، در مرحله رسیدگی کامل بعد از حذف ردیف‌های انتهایی و نیم‌متر از ابتدا و انتهای هر کرت به‌عنوان حاشیه، برداشت در ۲۰ مرداد ۱۳۹۷ در مساحتی به ابعاد یک مترمربع از هر کرت آزمایشی انجام و عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید. آزمون نرمال بودن داده‌ها و کلیه تجزیه‌های آماری داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) و در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت و در صورت معنی‌دار بودن اثرات متقابل، برش‌دهی انجام و نمودار نیز با بهره‌گیری از نرم‌افزار Excel رسم گردید.

بررسی اثر نانوسلنیوم در بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی... / میترا رستمی هیر و همکاران

به ترتیب ۱۴ و ۲۱ درصد افزایش داد (جدول ۶). در حالی که در شرایط تنش کم آبی محلول پاشی بوته های کلزای بهاره، با غلظت های ۲۵ و ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم باعث افزایش میزان کلروفیل a به ترتیب به میزان ۳۷ و ۵۹ درصد و کلروفیل کل به میزان ۴۲ و ۶۴ درصد نسبت به شرایط عدم کاربرد نانوسلنیوم گردید (جدول ۶). تنش کم آبی همچنین موجب شد تا میزان کلروفیل b، ۲۸ درصد کاهش یابد (جدول ۵).

جدول ۴- میانگین مربعات حاصل از تجزیه واریانس برش دهی اثر سطوح مختلف نانوسلنیوم در هر سطح آبیاری

Table 4- The mean of squares of the interaction slicing for different selenium nanoparticles levels at each irrigation levels

سطوح آبیاری Irrigation levels	درجه آزادی df	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل کل Total chlorophyll	حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II F _v /F _m	هدایت الکتریکی EC	فعالیت آنزیم کاتالاز Catalase enzyme activity	عملکرد دانه grain yield
آبیاری کامل Normal irrigation	2	0.0941**	0.3002**	0.00458**	0.262**	35.57**	113664**
تنش کم آبی water deficit stress	2	0.4868**	0.955**	0.0119**	0.0403**	157.35**	327934**

*, **, and ns are significant at a probability level of 5%, 1% and non-significant, respectively.

موثر است (۳۴). افزایش میزان رنگیزه های فتوسنتزی در اثر کاربرد سلنیوم در بادام زمینی و گوجه گیلاسی با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد (۱۴، ۱۶).
کاروتنوئید: مطابق با جدول تجزیه واریانس، تیمارهای آبیاری و محلول پاشی با نانوسلنیوم تأثیر معنی داری بر محتوای کاروتنوئید برگ های کلزا در سطح احتمال یک درصد داشتند ولی اثر متقابل آبیاری x نانوسلنیوم بر این صفت معنی دار نبود (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده ها نشان داد که قطع آبیاری در مرحله گلدهی موجب کاهش معنی دار میزان کاروتنوئید گردید که این کاهش نسبت به شرایط آبیاری کامل، ۲۲ درصد بود (جدول ۵). محلول پاشی با نانوسلنیوم، سبب افزایش معنی دار میزان کاروتنوئید در مقایسه با تیمار عدم کاربرد نانوسلنیوم گردید. با افزایش غلظت نانوسلنیوم از ۲۵ به ۵۰ میلی گرم در لیتر میزان کاروتنوئید برگ ها به طور معنی داری افزایش یافت به طوری که بیشترین میانگین محتوای کاروتنوئید با کاربرد غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم

تنش کم آبی سبب کاهش میزان کلروفیل b شد. اما محلول پاشی بوته های کلزا با غلظت های ۲۵ و ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم سبب شد تا کلروفیل b به طور معنی داری (به ترتیب به میزان ۴۷ و ۵۹ درصد) نسبت به تیمار شاهد افزایش یابد، محلول پاشی با غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم علی رغم داشتن بیشترین میزان کلروفیل b، اختلاف معنی داری با کاربرد غلظت ۲۵ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم نداشت (جدول ۵). به نظر می رسد سلنیوم به واسطه افزایش فعالیت آنتی اکسیدانی ضمن حفظ ساختار کلروپلاست در برابر آسیب های اکسیداتیو با محافظت از آنزیم های کلروپلاستی، سنتز رنگیزه های فتوسنتزی را افزایش می دهد (۳۱). همچنین سلنیوم با افزایش جذب منیزیم و آهن، سبب افزایش سنتز کلروفیل می شود (۳۲). عنصر منیزیم اتم مرکزی مولکول کلروفیل بوده و به صورت مستقیم در سنتز کلروفیل دخالت دارد (۳۳). اما آهن به شکل غیرمستقیم با کنترل تشکیل دلتا-آمینو لولینیک اسید به عنوان پیش ساز در بیوسنتز کلروفیل

شدن توسط اکسیژن‌های فعال و تخریب ساختار آن نسبت داد (۳۶). کاهش میزان کاروتنوئید در اثر تنش کم‌آبی در گلرنگ نیز گزارش شده است (۳۷). سلنیوم با بهبود متابولیسم گیاه در شرایط عادی و کاهش رادیکال‌های آزاد در شرایط تنش می‌تواند سبب افزایش کاروتنوئید شود (۳۸). کاربرد نانوسلنیوم در شرایط آبیاری و تنش کم‌آبی سبب افزایش کاروتنوئید در توت‌فرنگی و گندم نیز شده است که با نتایج این پژوهش هم‌راستا می‌باشد (۱۷، ۳۹).

حاصل گردید که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشت. کاربرد غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، میزان کاروتنوئید را نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی به ترتیب ۱۹ و ۳۸ درصد افزایش داد (جدول ۵). در بین رنگیزه‌های فتوسنتزی، کاروتنوئیدها علاوه بر مشارکت در فتوسنتز، به عنوان آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی نیز عمل کرده و از سلول در مقابل رادیکال‌های آزاد محافظت می‌کنند (۳۵). کاهش کاروتنوئید در اثر کم‌آبی را می‌توان به اکسید

جدول ۵- مقایسه میانگین محتوای نسبی آب برگ، میزان کلروفیل b، کاروتنوئید، فلورسانس کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ و میزان مالون‌دی‌آلدئید برگ‌های کلزا تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و نانوسلنیوم

Table 4. Mean comparison of the RWC, chlorophyll b, Carotenoid, chlorophyll fluorescence, RWC and MDA of oilseed rape leaves under irrigation and selenium nanoparticles (Nano-Se) treatments

تیمارها Treatments	کلروفیل b (میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) Chlorophyll b (mg g ⁻¹ Fw)	کاروتنوئید (میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) Carotenoid (mg g ⁻¹ Fw)	فلورسانس حدافل (F ₀)	فلورسانس حداکثر (F _m)	فلورسانس متغیر (F _v)	محتوی نسبی آب برگ (درصد) RWC (%)	مالون‌دی‌آلدئید (میکرومول بر گرم وزن‌تر) (MDA) (μmol g ⁻¹ Fw)
آبیاری کامل Normal Irrigation	0.770 ^a	1.177 ^a	155.5 ^b	931.1 ^a	775 ^a	75.43 ^a	0.530 ^b
تنش کم‌آبی water deficit stress	0.553 ^b	0.921 ^b	173.1 ^a	808 ^b	634 ^b	59.29 ^b	0.716 ^a
LSD	0.079	0.058	12.06	89.13	77.22	4.09	0.0749
شاهد Control	0.488 ^b	0.882 ^c	184.3 ^a	748.3 ^b	564 ^c	59.48 ^c	0.734 ^a
۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم 25 mg L ⁻¹ Nano-Se	0.718 ^a	1.051 ^b	165.3 ^b	906.1 ^a	740.8 ^b	65.78 ^b	0.609 ^b
۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم 50 mg L ⁻¹ Nano-Se	0.778 ^a	1.214 ^a	143.3 ^c	954.7 ^a	810.8 ^a	76.83 ^a	0.526 ^c
LSD	0.09	0.088	7.54	55.29	61.45	5.65	0.0453

در هر ستون میانگین‌هایی که در یک حرف مشترک هستند، براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌داری باهم ندارند.

In each column, means with similar letter are not significantly different based on the LSD test at 5% probability level

محلول‌پاشی نانوسلنیوم فقط برای صفت حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شده است. نتایج حاصل از تجزیه واریانس برش‌دهی نشان داد که هم در شرایط آبیاری کامل و هم در شرایط قطع آبیاری، حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II به‌طور معنی‌داری تحت‌تأثیر

فلورسانس کلروفیل: نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با نانوسلنیوم نشان داد که آبیاری و محلول‌پاشی بر میزان فلورسانس حداقل، فلورسانس حداکثر، فلورسانس متغیر و حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۳). اثر متقابل آبیاری ×

معنی داری نسبت به شاهد نشان داد. اما افزایش غلظت نانوسلنیوم از ۲۵ به ۵۰ میلی گرم در لیتر به طور معنی داری سبب افزایش میزان فلورسانس متغیر گردید. با کاربرد غلظت های ۲۵ و ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم میزان فلورسانس حداکثر به ترتیب ۲۱ و ۲۸ درصد و میزان فلورسانس متغیر به ترتیب به میزان ۹ و ۱۳ درصد افزایش نشان داد (جدول ۵).

در شرایط آبیاری کامل و اعمال تنش کم آبی، با کاربرد غلظت های مختلف نانوسلنیوم، کارایی کوانتومی فتوسیستم II به طور معنی داری افزایش یافت به طوری که تحت این شرایط بیشترین کارایی کوانتومی فتوسیستم II با کاربرد ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم حاصل شد که به طور معنی داری بیشتر از تیمار شاهد و تیمار کاربرد غلظت ۲۵ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم بود (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین برش دهی نشان داد که در شرایط تنش کم آبی، غلظت ۲۵ و ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم اختلاف معنی داری ندارند (جدول ۶). مطابق با نتایج کسب شده، محلول پاشی بوته های کلزا با غلظت های مختلف نانوسلنیوم توانسته است خسارت های ناشی از تنش کم آبی را بر این صفت جبران نماید به طوری که بین تیمار کاربرد غلظت ۲۵ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم در شرایط تنش کم آبی با تیمار عدم کاربرد در شرایط آبیاری کامل اختلاف معنی داری مشاهده نمی شود. به نظر می رسد نانوسلنیوم با جلوگیری از تخریب کلروفیل، افزایش میزان رنگیزه های فتوسنتزی (جدول ۶)، کاهش فلورسانس حداقل، افزایش فلورسانس حداکثر و متغیر (جدول ۵)، سبب افزایش کارایی کوانتومی فتوسیستم II شده است.

غلظت های مختلف نانوسلنیوم قرار گرفت (جدول ۴). نتایج نشان داد که قطع آبیاری سبب افزایش معنی دار میزان فلورسانس حداقل به میزان ۱۱ درصد و کاهش فلورسانس حداکثر و فلورسانس متغیر به ترتیب ۱۳ و ۶ درصد شد (جدول ۵). کارایی کوانتومی فتوسیستم II نشان دهنده ظرفیت جذب انرژی القایی توسط برگ می باشد و پایین بودن آن نشان دهنده کارایی کمتر فتوسیستم II است (۷). فلورسانس حداقل و فلورسانس حداکثر مولفه های تعیین کننده کارایی کوانتومی فتوسیستم II هستند به طوری که افزایش فلورسانس حداقل و کاهش فلورسانس حداکثر سبب مختل شدن فعالیت فتوسیستم II و در نهایت کاهش کارایی آن می شوند (۴۰). در آزمایشی روی ارقام لوبیا چیتی در شرایط کمبود آب، میزان فلورسانس حداقل در شرایط تنش کم آبی نسبت به آبیاری کامل به میزان ۳۳ درصد افزایش یافت (۴۱).

علی رغم کاهش فلورسانس حداکثر، فلورسانس متغیر و کارایی کوانتومی فتوسیستم II و افزایش میزان فلورسانس حداقل در اثر تنش کم آبی، محلول پاشی بوته های کلزا با نانوسلنیوم باعث بهبود وضعیت این شاخص ها شده است. بیشترین میزان فلورسانس حداقل در تیمار عدم محلول پاشی و کمترین آن در تیمار کاربرد غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم مشاهده شد (جدول ۵). محلول پاشی غلظت های ۲۵ و ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم به ترتیب باعث کاهش ۱۰ و ۲۲ درصدی فلورسانس حداقل نسبت به شاهد شد (جدول ۵). فلورسانس حداکثر نیز تحت تاثیر محلول پاشی نانوسلنیوم قرار گرفت و افزایش

جدول ۶- تاثیر تیمارهای تنش کم آبی و محلول پاشی با نانوسلنیوم بر کلروفیل a، کلروفیل کل، حداکثر کارایی

کوانتومی فتوسیستم II، هدایت الکتریکی، فعالیت آنزیم کاتالاز و عملکرد دانه در کلزای بهاره

Table 5. The effects of water deficit stress and Selenium nanoparticles treatments on chlorophyll a, total chlorophyll, Fv/Fm, EC, Catalase enzyme activity and grain yield of oilseed rape

تیمار Treatment	کلروفیل a (میلی گرم بر گرم وزن تر) Chlorophyll a (mg g ⁻¹ Fw)	کلروفیل کل (میلی گرم بر گرم وزن تر) Total chlorophyll (mg g ⁻¹ Fw)	حداکثر کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II Fv/Fm	هدایت الکتریکی (میکرو زیمنس بر سانتی متر) EC (μS cm ⁻¹)	فعالیت آنزیم کاتالاز تغییرات جذب بر میلی گرم پروتئین در دقیقه Catalase enzyme activity (OD mg protein/min)
شاهد Control	2.29 ^c (c)	2.89 ^c (b)	0.790 ^c (c)	44.18 ^{cd} (a)	9.33 ^e (b)
آبیاری کامل Normal Irrigation	۲۵ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم 25 mg L ⁻¹ Nano Se	3.31 ^b (a)	0.832 ^b (b)	40.69 ^{de} (ab)	13.35 ^d (ab)
۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم 50 mg L ⁻¹ Nano Se	2.65 ^a (a)	3.52 ^a (a)	0.868 ^a (a)	36.09 ^e (b)	16.28 ^{cd} (a)
شاهد Control	1.36 ^f (c)	1.73 ^e (c)	0.707 ^d (b)	61.86 ^a (a)	17.55 ^c (c)
تنش کم آبی water deficit stress	۲۵ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم 25 mg L ⁻¹ Nano Se	2.46 ^d (b)	0.800 ^c (a)	52.07 ^b (b)	26.02 ^b (b)
۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم 50 mg L ⁻¹ Nano Se	2.15 ^d (a)	2.84 ^c (a)	0.828 ^b (a)	47.75 ^{bc} (b)	31.96 ^a (a)

میانگین‌ها با حروف مشابه تفاوت معنی داری در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD ندارند. حروف بیرون پرانتز مقایسه میانگین اثرات متقابل کلی و حروف درون پرانتز مقایسه میانگین به روش برش‌دهی را نشان می‌دهد.

The means with the same letter(s) are not significantly different according to LSD test ($p \leq 0.05$). The letters outside the parentheses show the comparison of overall mean interactions and the letters inside the parentheses show the mean comparison by slicing method.

محتوای نسبی آب برگ (RWC): محتوای نسبی آب برگ، به‌طور معنی‌داری تحت‌تاثیر تیمار آبیاری و محلول‌پاشی با نانوسلنیوم قرار گرفت اما اثر متقابل آبیاری × نانوسلنیوم بر این صفت معنی‌دار نشد (جدول ۳). بیشترین میانگین محتوای نسبی آب برگ با انجام آبیاری کامل بوته‌های کلزا و کمترین آن با اعمال تنش کم‌آبی در مرحله گلدهی مشاهده گردید به‌طوری‌که اعمال تنش کم‌آبی در زمان گلدهی باعث کاهش ۲۱ درصدی محتوای نسبی آب برگ کلزای بهاره شد (جدول ۵). با افزایش غلظت نانوسلنیوم به

موسوی‌فر و همکاران (۲۰۱۸) ضمن گزارش وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین کارایی کوانتومی فتوسیستم II و میزان کلروفیل a و b بیان نمودند که هرگونه آشفتگی مانند تغییر در میزان کلروفیل a و b، منجر به کاهش عملکرد کوانتومی فتوسیستم II می‌گردد (۴۲). افزایش فلورسانس حداکثر، فلورسانس متغیر و کارایی کوانتومی فتوسیستم II و همچنین کاهش فلورسانس حداقل در اثر کاربرد نانوسلنیوم در توت‌فرنگی و گوجه‌فرنگی گزارش شده است که مطابق با نتایج پژوهش حاضر است (۴۳، ۱۷).

آب گیاه از راه تعرق در شرایط تنش کم‌آبی، باعث چروکیده شدن غشای سلول و تخریب آن می‌شود (۴۸). از طرف دیگر، افزایش میزان گروه‌های فعال اکسیژنی از عوامل مهم پراکسیداسیون لیپیدی است که نتیجه آن افزایش نفوذپذیری غشای سلول‌ها و افزایش نشت الکترولیت‌ها می‌باشد (۴۹). افزایش هدایت الکتریکی در اثر تنش کم‌آبی در ذرت نیز گزارش شده است (۵۰).

در شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری، با انجام محلول‌پاشی بوته‌های کلزا با نانوسلنیوم، میزان هدایت الکتریکی مواد نشت یافته از برگ‌ها کاهش یافت (جدول ۶). در بین تیمارهای مورد مطالعه، کمترین میزان نشت الکترولیت‌ها به ترتیب در شرایط آبیاری کامل با کاربرد غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و بیشترین آن در شرایط قطع آبیاری در تیمار عدم محلول‌پاشی مشاهده گردید (جدول ۶). در شرایط آبیاری نرمال بین غلظت ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد اما در شرایط تنش کم‌آبی، میزان هدایت الکتریکی مواد نشت یافته در تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر با اختلاف معنی‌داری کمتر از سایر تیمارها بود (جدول ۶). کاربرد غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم در شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری به ترتیب سبب کاهش هدایت الکتریکی به میزان ۱۸ و ۲۲ درصد شد (جدول ۶). پایداری غشای سلولی به عنوان شاخصی برای تحمل به تنش کم‌آبی می‌باشد (۵۱). بنابراین حفظ پایداری غشاها در شرایط تنش کم‌آبی، نشان‌دهنده سازوکارهای کنترلی گیاه در تحمل گیاه به تنش کم‌آبی است. به نظر می‌رسد سلنیوم از طریق بهبود تعادل تغذیه‌ای و افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی، نشت الکترولیت‌ها را کاهش می‌دهد (۵۲). کاهش ۴۲ درصدی نشت الکترولیت در

۵۰ میلی‌گرم در لیتر، محتوای نسبی آب برگ در مقایسه با شاهد ۲۹ درصد افزایش یافت (جدول ۵). در اثر تنش کم‌آبی به دلیل کاهش رطوبت خاک و به تبع آن کاهش پتانسیل آب برگ، محتوای نسبی آب برگ کاهش یافته که این موضوع باعث محدودیت در رشد و ایجاد تغییرات مهم فیزیولوژیکی و متابولیکی در گیاه می‌گردد (۴۴) کاهش محتوای نسبی آب برگ در اثر تنش کم‌آبی در گلرنگ نیز گزارش شده است (۴۵). سلنیوم، با بهبود تقسیم سلولی در سلول‌های نوک ریشه، باعث افزایش رشد و توسعه سیستم ریشه‌ای می‌گردد؛ به همین دلیل در گیاهان تیمار شده با این عنصر، جذب آب بیشتر شده و محتوای نسبی آب برگ افزایش می‌یابد (۴۶). همسو با یافته‌های ما در این تحقیق، افزایش محتوای نسبی آب برگ، تحت تاثیر نانوسلنیوم در توت فرنگی و لوبیا نیز گزارش شده است (۱۷، ۴۷).

هدایت الکتریکی مواد نشت یافته از برگ‌ها: اثر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با نانوسلنیوم بر صفت هدایت الکتریکی مواد نشت یافته از برگ در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آبیاری \times نانوسلنیوم بر این صفت در سطح احتمال پنج معنی‌دار گردید (جدول ۳). هم‌چنین از جدول تجزیه واریانس به‌روش برش‌دهی چنین برمی‌آید که میزان هدایت الکتریکی مواد نشت یافته از برگ هم در شرایط آبیاری کامل و هم در شرایط قطع آبیاری به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم قرار می‌گیرد (جدول ۴). قطع آبیاری از مرحله گلدهی تا انتهای فصل موجب افزایش معنی‌دار نشت الکترولیت‌ها در برگ‌های کلزای بهاره گردید. تنش کم‌آبی آخر فصل موجب شد تا میزان نشت الکترولیت‌ها به بیرون از سلول در برگ‌های کلزا به میزان ۴۰ درصد افزایش یابد (جدول ۶). از دست دادن

چربی‌ها سبب کاهش میزان مالون‌دی‌آلدئید می‌شود (۴۷). در پژوهش حاضر نیز کاربرد نانوسلنیوم از طریق افزایش محتوای کارتنوئید (جدول ۵) و کاهش نشت الکترولیت (جدول ۶) سبب کاهش میزان مالون‌دی‌آلدئید گردید. کاهش میزان مالون‌دی‌آلدئید در اثر کاربرد نانوسلنیوم در لوبیا و توت‌فرنگی مشاهده شده است که مطابق با یافته‌های پژوهش حاضر است (۴۷، ۱۷).

فعالیت آنزیم کاتالاز: برطبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر آبیاری، محلول‌پاشی با نانوسلنیوم در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آبیاری × محلول‌پاشی در سطح احتمال پنج درصد بر فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار بود (جدول ۳). براساس نتایج تجزیه واریانس به‌روشنی (جدول ۴)، کاربرد غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم، هم در شرایط آبیاری کامل و هم در شرایط قطع آبیاری، اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز داشت. میانگین فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط تنش کم‌آبی با ۸۸ درصد افزایش، نزدیک دو برابر بیشتر از زمانی بود که بوته‌ها بطور کامل آبیاری شده بودند (جدول ۶). افزایش میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در اثر تنش کم‌آبی در پژوهش‌های متعددی گزارش شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در گندم و سویا اشاره کرد (۴۹، ۵۳).

در شرایط آبیاری کامل بین غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد، اما میزان فعالیت آنزیم کاتالاز با کاربرد این غلظت‌ها به ترتیب به میزان ۴۳ و ۷۴ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (جدول ۶). اما در شرایط تنش کم‌آبی، محلول‌پاشی نانوسلنیوم با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر ضمن داشتن اختلاف معنی‌دار با هم‌دیگر و با شاهد به ترتیب سبب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز به میزان ۴۸ و ۸۲ درصد شد (جدول ۶).

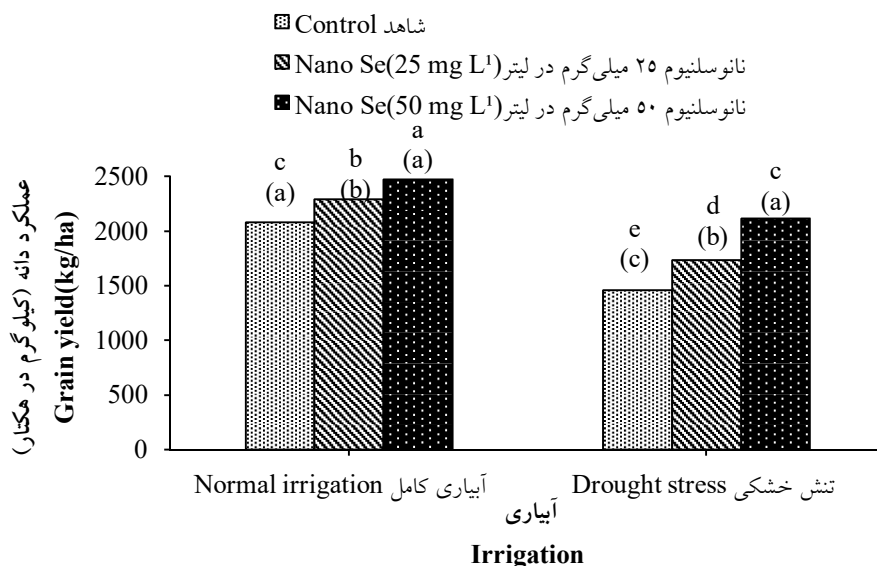
اثر کاربرد سلنیوم در گندم نیز گزارش شده که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد (۵۱).

محتوی مالون‌دی‌آلدئید: براساس تجزیه واریانس داده‌های مربوط به محتوای مالون‌دی‌آلدئید، این صفت به طور معنی‌داری تحت‌تاثیر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با نانوسلنیوم قرار داشت، ولی اثر متقابل آبیاری × نانوسلنیوم بر این صفت معنی‌دار نگردید (جدول ۳). قطع آبیاری باعث افزایش معنی‌دار میزان مالون‌دی‌آلدئید نسبت به شرایط آبیاری کامل گردید که این افزایش به میزان ۳۵ درصد بود (جدول ۵). اسیدهای چرب غیراشباع حساس‌ترین بخش غشا به اکسید شدن و تخریب توسط تنش اکسیداتیو هستند. در اثر تخریب این اسیدها به وسیله اکسیژن واکنش‌گر ترکیباتی نظیر مالون‌دی‌آلدئید تولید می‌شود که برای سلول، مسمومیت ایجاد می‌کند. تجمع مالون‌دی‌آلدئید در شرایط تنش موجب افزایش نفوذپذیری غشای پلاسمایی و نشت یونی می‌شود (۴). افزایش تولید مالون‌دی‌آلدئید در اثر تنش کم‌آبی در سویا و گندم نیز گزارش شده است (۴۹، ۵۳).

با وجود افزایش میزان محتوای مالون‌دی‌آلدئید برگ‌ها در اثر تنش کم‌آبی، انجام محلول‌پاشی بوته‌ها با نانوسلنیوم در هر دو غلظت، منجر به کاهش معنی‌دار مقدار مالون‌دی‌آلدئید برگ‌های کلزای بهاره گردید. افزایش غلظت نانوسلنیوم در کاهش میزان مالون‌دی‌آلدئید برگ‌ها تاثیر معنی‌داری داشت به طوری که کمترین میزان در تیمار محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم مشاهده گردید. با محلول‌پاشی بوته‌های کلزا با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم میزان مالون‌دی‌آلدئید نسبت به تیمار شاهد به ترتیب به میزان ۱۷ و ۲۸ درصد کاهش یافت (جدول ۵). محلول‌پاشی بوته‌ها با نانوسلنیوم از طریق کاهش و ممانعت از بروز آسیب‌های اکسیداتیو و جلوگیری از پراکسیداسیون

عملکرد دانه: اثر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی نانوسلنیوم در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل این دو تیمار در سطح احتمال پنج درصد بر صفت عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج برش‌دهی (جدول ۴) نشان داد هم در شرایط آبیاری کامل و هم قطع آبیاری انتهای فصل، کاربرد غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم، اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه کلزا داشت. عملکرد دانه با قطع آبیاری در مرحله گلدهی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت به‌طوری‌که قطع آبیاری سبب کاهش ۳۰ درصدی عملکرد دانه در مقایسه با شرایط آبیاری کامل گردید (شکل ۱).

همان‌طور که تنش خشکی سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر کاتالاز می‌شود، محلول‌پاشی نانوسلنیوم نیز سبب افزایش میزان فعالیت آنزیم کاتالاز می‌شود (۱۷). برخی از عناصر مانند سلنیوم می‌توانند به عنوان جذب‌کننده رادیکال‌های آزاد عمل کرده و بر حذف ROS موثر باشند، همچنین به عنوان یک آنتی‌اکسیدان عمل کرده و ضمن بهبود فعالیت آنزیم‌هایی نظیر کاتالاز، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاهان را افزایش دهند (۵۴). افزایش میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در اثر کاربرد نانوسلنیوم در بادام‌زمینی و گوجه گیلاسی گزارش شده است که همسو با پژوهش حاضر است (۱۴، ۱۶).



شکل ۱- تاثیر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با نانوسلنیوم بر عملکرد دانه در کلزا

میانگین‌ها با حروف مشابه تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD ندارند. حروف بیرون پرانتز مقایسه میانگین اثرات متقابل کلی و حروف درون پرانتز مقایسه میانگین به روش برش‌دهی را نشان می‌دهد.

Figure 1- The effects of irrigation and foliar application of selenium nanoparticles treatments on grain yield of oilseed rape.

The means with the same letter(s) are not significantly different according to LSD test ($p \leq 0.05$). The letters outside the parentheses show the comparison of overall mean interactions and the letters inside the parentheses show the mean comparison by slicing method.

جدول ۷- ضرایب همبستگی صفات اندازه‌گیری شده

Table 7- Correlation coefficients of measured traits

Traits	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.Cholorophyll a	1												
2.Cholorophyll b	0.87**	1											
3.Total chlorophyll	0.98**	0.93**	1										
4.Carotenoid	0.91**	0.89**	0.93**	1									
5.F ₀	-0.81**	-0.79**	-0.83**	-0.91**	1								
6.F _m	0.86**	0.88**	0.89**	0.92**	-0.88**	1							
7.F _v	0.87**	0.88**	0.89**	0.93**	-0.91**	0.99**	1						
8.F _v /F _m	0.88**	0.87**	0.90**	0.92**	-0.93**	0.97**	0.98**	1					
9.RWC	0.88**	0.90**	0.91**	0.88**	-0.80**	0.80**	0.81**	0.81**	1				
10.EC	-0.94**	-0.85**	-0.94**	-0.90**	-0.80**	-0.83**	-0.84**	-0.85**	-0.89**	1			
11.Catalase activity	-0.25 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	-0.21 ^{ns}	-0.11 ^{ns}	-0.12 ^{ns}	0.32 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.09 ^{ns}	-0.21 ^{ns}	0.28 ^{ns}	1		
12.MDA	-0.94**	-0.89**	-0.95**	-0.95**	0.80**	-0.90**	-0.91**	-0.91**	-0.87**	0.94**	0.16 ^{ns}	1	
13.Grain yield	0.96**	0.87**	0.96**	0.89**	-0.84**	0.82**	0.84**	0.85**	0.91**	-0.92**	-0.21 ^{ns}	-0.92**	1

ns, * and **: Not significant at 5%, and significant at 5% and 1% probability levels, respectively. /5 احتمال 5 درصد، 1 درصد و غیر معنی‌دار در سطح احتمال 5/5، NS و **، به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد، 1 درصد و غیر معنی‌دار در سطح احتمال 5/5.

با غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم در شرایط آبیاری کامل و تنش کم آبی به ترتیب موجب افزایش ۱۹ و ۵۴ درصدی عملکرد دانه نسبت به شاهد گردید (شکل ۱).

کارآمدی آنتی اکسیدانها در حفاظت از فرآیندهای فتوسنتزی، عامل موثری در افزایش عملکرد دانه در شرایط تنش کم آبی عنوان شده است (۵۳). نانوسلنیوم می تواند از طریق تعادل یونی و اسمزی در سلول، افزایش رنگدانه های فتوسنتزی، کاهش سطح گروه های فعال اکسیژن و فعال شدن آنتی اکسیدانها در افزایش بهره وری گیاه موثر باشد (۱۴). در پژوهش حاضر نیز کاربرد نانوسلنیوم با افزایش میزان کلروفیل، افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز، کاهش میزان نشت الکترولیتها و افزایش پایداری غشای سلولی (جدول ۶) و بهبود پتانسیل آبی (جدول ۵) سبب افزایش عملکرد دانه (شکل ۱) در شرایط آبیاری کامل و تنش کم آبی شده است. افزایش عملکرد دانه با کاربرد نانوسلنیوم در بادام زمینی و گندم نیز گزارش شده است (۱۴، ۱۵).

همبستگی ساده بین صفات: بررسی نتایج همبستگی صفات (جدول ۷) نشان داد که عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی داری با میزان رنگیزه های فتوسنتزی (کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئید)، فلورسانس حداکثر، فلورسانس متغیر، حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II و محتوای نسبی آب برگ دارد و با صفات فلورسانس حداقل، میزان هدایت الکتریکی، میزان مالون دی آلدئید ارتباط منفی و معنی دار دارد (جدول ۷). بالاترین همبستگی مثبت و معنی دار (۰/۹۶) بین عملکرد دانه و میزان کلروفیل a و کلروفیل کل مشاهده شد. وجود این رابطه مثبت و معنی دار نشان می دهد که افزایش میزان رنگیزه های فتوسنتزی در افزایش عملکرد دانه کلزا نقش داشته است (جدول ۷). از دلایل عمده کاهش ماده خشک در بسیاری از گیاهان، کاهش سطوح

کاهش عملکرد دانه تحت تنش کم آبی می تواند ناشی از بسته شدن روزنه ها، کاهش ورود دی اکسید کربن به داخل برگ، کاهش محتوای نسبی آب برگ و کاهش فتوسنتز (۲) و همچنین کاهش طول دوره گلدهی و پر شدن دانه باشد (۵۵). مرحله گلدهی در کلزا از نظر نیاز گیاه به آب از مراحل بحرانی می باشد و ایجاد تنش در این مرحله به دلیل اثر نامناسب بر میزان جذب آسمیلاتها موجب کاهش عملکرد دانه می شود (۲۱). در پژوهش حاضر نیز کاهش کلروفیل کل و کاهش حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II (شکل ۱) به دلیل کاهش فراهمی مواد پرورده سبب کاهش عملکرد دانه کلزا در شرایط تنش خشکی شده است. کاهش عملکرد دانه تحت تاثیر تنش کم آبی در گلرنگ و ذرت نیز گزارش شده است که مطابق با نتایج پژوهش حاضر می باشد (۴۵، ۳۰).

محلول پاشی بوته های کلزای بهاره با نانوسلنیوم در شرایط آبیاری کامل و تنش کم آبی موجب افزایش معنی دار عملکرد دانه کلزا در مقایسه با تیمار شاهد گردید، به طوری که بیشترین عملکرد دانه در هر دو شرایط مربوط به بوته های محلول پاشی شده با غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم بود که به طور معنی داری عملکرد دانه بیشتری در مقایسه با تیمار شاهد و غلظت ۲۵ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم داشتند (شکل ۱). در بین تیمارهای مورد مطالعه کمترین میزان عملکرد دانه مربوط به تیمار عدم محلول پاشی (شاهد) در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی بود. اگرچه تنش کم آبی موجب کاهش معنی دار عملکرد دانه گردید، اما بین عملکرد دانه حاصل از بوته های محلول پاشی شده با غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم در شرایط تنش کم آبی و تیمار شاهد در شرایط آبیاری کامل اختلاف معنی داری مشاهده نشد. این موضوع نشان می دهد نانوسلنیوم توانسته اثرات منفی ناشی از تنش کم آبی را بر عملکرد کاهش داده و حتی جبران کند. محلول پاشی بوته های کلزای بهاره

آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدئید مؤثر بوده و ضمن جلوگیری از تخریب رنگیزه‌های فتوستتزی، افزایش حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II و افزایش محتوای نسبی آب برگ سبب بهبود فرایند فتوستتز شده و در نهایت به افزایش عملکرد دانه کلزا منجر گردیده است. در میان غلظت‌های مورد بررسی، غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم هم در شرایط آبیاری کامل و قطع آبیاری، تاثیر بیشتری روی صفات مورد بررسی داشته به طوری که میزان افزایش این صفات در شرایط تنش کم‌آبی بیشتر از شرایط آبیاری کامل بود. با توجه به اینکه عملکرد دانه بیشترین همبستگی مثبت و معنی‌دار را با صفات محتوای کلروفیل a، کلروفیل کل و حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II دارد، می‌توان اظهار داشت که کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم بیشترین کارایی را در سنتز و جلوگیری از تخریب رنگیزه‌های فتوستتزی به ویژه در شرایط کم‌آبی دارد. به‌طور کلی با توجه به اثربخشی بیشتر غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، محلول‌پاشی این غلظت برای کاهش خسارت ناشی از تنش کم‌آبی و بهبود عملکرد دانه تحت شرایط مساعد و نامساعد محیطی، مناسب شناخته شد.

فتوستتز کننده و مصرف بیش از حد انرژی در جهت برقراری تعادل اسمزی و حفظ آماس سلولی است (۵۶). همبستگی مثبت و معنی‌دار عملکرد دانه با کلروفیل کل (۰/۹۶) و محتوای نسبی آب (۰/۹۱) نیز بر این موضوع تأکید می‌کند. عملکرد دانه با فعالیت آنزیم کاتالاز و میزان مالون‌دی‌آلدئید همبستگی منفی نشان داد (جدول ۷). افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز و میزان مالون‌دی‌آلدئید بیانگر وقوع تنش می‌باشد که نتیجه آن کاهش عملکرد دانه خواهد بود (۱۳). بیشترین همبستگی منفی و معنی‌دار (۰/۹۵-) را صفت مالون‌دی‌آلدئید با میزان کلروفیل کل و کاروتنوئید دارد. وجود همبستگی بین کاهش رنگیزه‌های فتوستتزی و محتوای نسبی آب برگ با افزایش تجمع مالون‌دی‌آلدئید نیز گزارش شده است (۵۷).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد اعمال تنش کم‌آبی در مرحله گلدهی از طریق کاهش میزان رنگیزه‌های فتوستتزی، افزایش میزان فلورسانس کلروفیل، کاهش محتوای نسبی آب برگ، تخریب غشای سلولی و نشست الکترولیت‌ها، موجب کاهش عملکرد دانه می‌شود. انجام محلول‌پاشی بوته‌های کلزای بهاره با غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم در کاهش خسارات ناشی از تنش کم‌آبی، از طریق افزایش فعالیت

References

1. Akbari, S., Kafi, M. & Rezvan Beidokhti, S. (2016). The effects of drought stress on yield, yield components and antioxidant of two garlic (*Allium sativum* L.) ecotypes with different planting densities. *Journal of Agroecology*, 8, 95-106. [In Persian]
2. Perdomo, J.A., Capó-Bauçà, S., Carmo-Silva, E. & Galmés J. (2017). Rubisco and rubisco activase play an important role in the biochemical limitations of photosynthesis in rice, wheat, and maize under high temperature and water deficit. *Frontiers in plant science*, 8, 490-505.
3. Brevedan, R.E. & Egli, D.B. (2003). Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. *Crop Science*, 43, 2083-2088.
4. Dai, H.P., Zhang, P.P., Lu, C., Jia, G.L., Ren, X.M., Chen, J., Wei, A.Z., Feng, B.L. & Zhang S.Q. (2011). Leaf senescence and reaction oxygen species metabolism of Broomcornmillet (*Panicum miliaceum* L.) under drought condition. *Australian Journal of Crop Science*, 5(12), 1655-1660.

5. De oliveira, V. P., Lima, M. D. R., da Silva, B. R. S., Batista, B. L. & da Silva Lobato, A. K. (2019). Brassinosteroids confer tolerance to salt stress in Eucalyptus urophylla plants enhancing homeostasis, antioxidant metabolism and leaf anatomy. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38, 557-573.
6. Li, Y., Zhao, H., Duan, B., Korpelainen, H. & Li, C. (2011). Effect of drought and ABA on growth, photosynthesis and antioxidant system of *Cotinus coggygia* seedlings under two different light conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 71(1), 107-113.
7. Baker, N.R. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 89-113.
8. Rashidi, S.H., Shirani Rad, A.M., Ayene Band, A., Javidfar, F. & Lak, S.H. (2012). Study of relationship between drought stress tolerances with some physiological parameters in canola genotypes *Brassica napus* L. *Annals of Biological Research*, 3(1), 564-569. [In Persian]
9. Aslezaem, F., Niknam, V., Ebrahimzadeh, H. & Sharifi, G. (2018). Comparative study of drought stress and salicylic acid effects on different accessions of saffron (*Crocus Sativus* L.). *Journal of Plant Research*, 31, 554-569. [In Persian]
10. Lata, C. & Prasad, M. (2011). Role of DREBs in regulation of abiotic stress responses in plants. *Journal of experimental botany*, 62(14), 4731-4748.
11. Dimkpa, C.O. & Bindraban, P.S. (2016). Micronutrients fortification for efficient agronomic production. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 1-26.
12. Ahmad, Z., Waraich, E.A., Barutcular, C., Alharby, H., Bamagoos, A., Kizilgeci, F.E., Ozturk, F., Hossain, A., Bayoumi, Y. & El Sabagh, A. (2020). Enhancing drought tolerance in *Camelina sativa* L. and canola (*Brassica napus* L.) through application of selenium. *Pakistan Journal of Botany*, 52(6), 1927-1939.
13. Bybordi, A. (2016). Effect of zeolite, selenium and silicon on yield, yield components and some physiological traits of canola under salt stress conditions. *Iranian J Field Crops Research*, 14(1), 154-170. [In Persian]
14. Hussein, H.A., Darwesh, O.M. & Mekki, B.B. (2019). Environmentally friendly nano-selenium to improve antioxidant system and growth of groundnut cultivars under sandy soil conditions. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 18(1), 101080.
15. El Lateef Gharib, F.A., Zeid, I.M., Ghazi, S.M. & Ahmed, E.Z. (2019). The response of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) plants to foliar application of sodium selenate and selenium nanoparticles (SeNPs). *Journal Nanomater Mol Nanotechnol*, 8(4), 1-15.
16. Neysanian, M., Iranbakhsh, A., Ahmadvand, R. & Ebadi, M. (2021). Investigation of the effect of selenium nanoparticles on drought stress tolerance in cherry tomato plant. *Iranian Plant and Biotechnology*, 16(3), 17-41. [In Persian]
17. Zahedi, S.M., Moharrami, F., Sarikhani, S. & Padervand, M. (2020). Selenium and silica nanostructure-based recovery of strawberry plants subjected to drought stress. *Scientific Reports*, 10(1), 17672-17680.
18. Wu, W., Ma, B.L. & Whalen, J.K. (2018). Enhancing rapeseed tolerance to heat and drought stresses in a changing climate perspectives for stress adaptation from root system architecture. *Advances in agronomy*, 151, 187-157.
19. Moradyanfar, H. (2008). Canola is a valuable and profitable plant. *Journal of Farm*, 29, 32-33. [In Persian]
20. Raman, H., Raman, R., Mathews, K., Diffey, S. & Salisbury, P. (2020). QTL mapping reveals genomic regions for yield based on an incremental tolerance index to drought stress and related

- agronomic traits in canola. *Crop and Pasture Science*, 71(6), 562-577.
21. Raeisi, M.R., Shahbazi, E. & Shafeinia, A. (2021). Assessment of yield and yield components of doubled-haploid lines of rapeseed under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(4), 1077-1092. [In Persian]
 22. Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148(11), 350-382.
 23. 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.
 24. ISTA. (2017). International Rules for Seed Testing. International Seed Testing Association, Bassersdorf, Switzerland.
 25. Chang, C.J. & Koa, C.H. (1988). H₂O₂ metabolism during senescence of rice leaves changes in enzyme activities in light and darkness. *Plant Growth Regulation*, 25, 11-15.
 26. Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, 105, 121-126.
 27. Heath, R.L. & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125(1), 189-198.
 28. Sadeghipour, O. & Aghaei, P. (2012). Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to exogenous application of salicylic acid (SA) under water stress conditions. *Advances in Environmental Biology*, 6(3), 1160-1168.
 29. Ramak, M., Khavari Nejad, R., Hidari Sharifabad, H., Rafiee, M. & Khademi, K. (2014). The effect of water stress on dry weight and photosynthetic pigments in two sainfoin species. *Plant Breeding and Genetic Research*, 14(2), 80-91. [In Persian]
 30. Ghassemi, A., Farzaneh, S. & Moharramnejad, S. (2021). Effect of ascorbic acid foliar application on grain yield and morphophysiological traits in corn under water deficit stress. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(4), 177-188. [In Persian]
 31. Feng, R., Wei, C. & Tu, S. (2013). The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. *Environmental and Experimental Botany*, 87, 58-68.
 32. Nawaz, F., Ashraf, M.Y., Ahmad, R., Waraich, E.A., Shabbir, R.N. & Bukhari, M.A. (2015). Supplemental selenium improves wheat grain yield and quality through alterations in biochemical processes under normal and water deficit conditions. *Food Chemistry*, 175, 350-357.
 33. Ding, Y.C., Chang, C.R., Luo, W., Wu, Y.S., Ren, X.L., Wang, P. & Xu, G.H. (2008). High potassium aggravates the oxidative stress induced by magnesium deficiency in rice leaves. *Pedosphere*, 18(3), 316-327.
 34. Marschner, H. (1995). Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd Ed., Academic Press, New York, USA.
 35. Farooq, M., Basra, S.M.A., Wahid, A., Cheema, Z.A., Cheema, M.A. & Khaliq, A. (2008). Physiological role of exogenously applied glycine betaine in improving drought tolerance of fine grain aromatic rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 194(5), 325-333.
 36. Wang, L., Fan, L., Loescher, W., Duan, W., Liu, G., Cheng, J., Luo, H. & Li, S. (2010). Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under heat stress and accelerates recovery in grapevine leaves. *BMC Plant Biology*, 10(34), 1-10.
 37. Abbasi, A., Sayadiazar, Z. & Lotfi, R. (2021). Evaluation of biochemical and physiological changes of safflower (*carthamus tinctorius* L.) With the application of zinc and iron nanoparticles under different moisture conditions. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 9(2), 237-258. [In Persian]
 38. Feng, R.W. & Wei, C.Y. (2012). Antioxidative mechanisms on selenium accumulation in *Pteris vittata* L., a potential selenium phytoremediation plant. *Plant Soil Environ*, 58, 105-110.

39. El-Saadony, M.T., Saad, A.M., Najjar, A.A., Alkhatib, F.M., Shafi, M.E., Selem, E., Desoky, E.S., Fouda, S.E., El-Tahan, A.M. & Hassan, M.A. (2021). The use of biological selenium nanoparticles to suppress *Triticum aestivum* L. crown and root rot diseases induced by Fusarium species and improve yield under drought and heat stress. *Saudi Journal Biological Science*, 28(8), 4461-4471.
40. Paknejad, F., Nasri, M., Tohidi Moghadam, H.R., Zahedi, H. & Jami Alahmad, M. (2007). Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters chlorophyll content and grain yield of wheat cultivars. *Journal Biological Science*, 7(6), 841-847.
41. Soheili movahhed, S., esmaeili, M., jabbari, F., Khorramdel, S & Fouladi, A. (2017). Effects of water deficit on relative water content, chlorophyll fluorescence indices and seed yield in four pinto bean genotypes. *Journal of Crop Production*, 10(1), 169-190. [In Persian]
42. Moosavifar, B., Khazaei, H. & Kafi, M. (2018). The effect of drought stress on some photosynthetic characteristics of kochia (*Kochia scoparia* L.) in a greenhouse trial. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 11(3), 603-614. [In Persian]
43. Liu, J., Zhu, X., Chen, X., Liu, Y., Gong, Y., Yuan, G., Liu, J. & Chen, L. (2020). Defense and inhibition integrated mesoporous nanoselenium delivery system against tomato gray mold. *Environmental Science: Nano*, 7(1), 210-217.
44. Heidari, N., Pouryousef, M. & Tavakoli, A. (2015). Effects of drought stress on photosynthesis, its parameters and relative water content of anise (*Pimpinella anisum* L.). *Journal of Plant Research*, 27(5), 829-839. [In Persian]
45. Pasban Eslam, B. (2020). Some eco-physiological and agronomic responses of several salinity tolerant safflower varieties to water deficit stress. *Science and Sustainable Production*, 30(2), 145-155. [In Persian]
46. Kuznetsov, V.V., Kholodova, V.P., Kuznetsov, V.V. & Yagodin B.A. (2003). Selenium regulates the water status of plants exposed to drought. *Doklady Biological Sciences*, 390(1), 266-268.
47. Rady, M.M., Desoky, E.S., Ahmed, S.M., Majrashi, A., Ali, E.F., Arnaout, S.M. & Selem, E. (2021). Foliar nourishment with nano-selenium dioxide promotes physiology, biochemistry, antioxidant defenses, and salt tolerance in phaseolus vulgaris. *Plants*, 10(6), 1189-1209.
48. Waraich, E.A., Ahmad, R. & Ashraf, M.Y. (2011). Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. *Australian Journal of Crop Science*, 5(6), 764-777.
49. Wu, S., Hu, C., Tan, Q., Nie, Z. & Sun, X. (2014). Effects of molybdenum on water utilization, antioxidative defense system and osmotic-adjustment ability in winter wheat (*Triticum aestivum*) under drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 83, 365-74.
50. Lu, Y., Li, Y., Zhang, J., Xiao, Y., Yue, Y., Duan, L., Zhang, M. & Li, Z. (2013). Overexpression of Arabidopsis molybdenum cofactor sulfurase gene confers drought tolerance in maize. *Plos One*, 8(1), 1-12.
51. Hasan, M.M., Alharbi, B.M., Alhaithloul, H.A., Alghanem, S.M., Al-Mushhin, A., Jahan, M., Corpas, F., Fang, X.W. & Soliman, M.H. (2021). Spermine-mediated tolerance to selenium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) depends on endogenous nitric oxide synthesis. *Antioxidants*, 10(11), 1835-1857.
52. Karimi, R., Ghabooli, M., Rahimi, J. & Amerian, M. (2020). Effects of foliar selenium application on some physiological and phytochemical parameters of *Vitis vinifera* L. Cv. Sultana under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, 43(14), 2226-2242.
53. Bahrololomi, S., Raeini Sarjaz, M. & Pirdashti, H. (2019). The effect of drought stress on the activity of antioxidant enzymes, malondialdehyde,

- soluble protein and leaf total nitrogen contents of soybean (*Glycine max* L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(1),17-28. [In Persian]
54. Tang, H., Liu, Y., Gong, X., Zeng, G., Zheng, B., Wang, D., Sun, Z., Zhou, L. & Zeng, X. (2015). Effects of selenium and silicon on enhancing antioxidative capacity in ramie (*Boehmeria nivea* L.) under cadmium stress. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 9999-10008.
55. Faraji, A., Latifi, N., Soltani, A. & Shirani Rad, A. H. (2009). Seed yield and water use efficiency of canola (*Brassica napus* L.) as affected by high temperature stress and supplemental irrigation. *Agricultural water management*, 96(1), 132-140.
56. Kabiri, R., Farahbakhsh, H. & Nasibi, F. (2012). Effect of drought stress and its interaction with salicylic acid on black cumin (*Nigella sativa*) germination and seedling growth. *World Applied Sciences Journal*, 18, 520-527.
57. Fahim, S., Ghanbari, A., Naji, A.M., Shokohian, A.A. & Maleki Lajayer, H. (2022). Impact of drought stress on morphological and physiological traits in some Iranian grape cultivars. *Plant Process and Function*, 47, 249-266. [In Persian]