نشریه علمی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی، جلد نوزدهم، شماره ۱(۷۳)، بهار ۱۴۰۴، صفحه ۲۲-۱

مقاله پژوهشی DOI:

تاثیر کاربرد همزمان نانو ذرات سلنیوم و مولیبدن بر برخی ویژگی‌های زراعی و بیوشیمیایی کلزای بهاره در شرایط کمبود آب

میترا رستمی هیر[۱*]، پریسا شیخ‌زاده[۲] ، سعید خماری[۲] و ناصر زارع[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰

چکیده

محلول‌پاشی نانو ذرات عناصر غذایی، به‌عنوان یکی از راهکارهای بسیار مفید و کارآمد در شرایط تنش خشکی است که ضمن افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی، به افزایش عملکرد نیز منجر می شود. این پژوهش به‌منظور بررسی تاثیر کاربرد نانوسلنیوم و نانو اکسیدمولیبدن در بهبود شاخص‌های زراعی و صفات بیوشیمیایی کلزای بهاره (رقم هایولا ۴۰۱) به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، طراحی و با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی در سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ اجرا شد. عامل آبیاری شامل آبیاری معمول (عرف منطقه) و قطع آبیاری در مرحله گلدهی به‌عنوان کرت اصلی و عامل محلول‌پاشی با نانوسلنیوم و نانواکسید مولیبدن شامل عدم مصرف نانو ذرات به عنوان تیمار شاهد (محلول‌پاشی با آب خالص)، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن، ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم + ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم+ ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن، ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم+ ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم+ ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن که در کرت های فرعی قرار گرفتند. محلول‌پاشی در دو مرحله ۸-۶ برگی و مرحله پنجاه درصد گل‌دهی بود. نتایج نشان دادند تنش خشکی سبب کاهش میانگین ارتفاع بوته، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزاردانه، عملکرد دانه و درصد روغن دانه به‌ترتیب ۷/۸۴، ۱۹/۳، ۲۰/۱۵، ۲۸/۳۳، ۲۹/۷۹ و ۵/۰۲ درصد شد. محلول‌پاشی بوته‌ها با ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن + ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم سبب افزایش تعداد خورجین، وزن هزاردانه و عملکرد دانه به‌ترتیب به میزان ۶۶/۱۶، ۳۵/۷ و ۵۹/۴۷ درصد تحت تنش خشکی و افزایش ۶۲/۳۳، ۹/۷ و ۱۱/۹۶ درصدی در شرایط آبیاری معمول شده و همچنین کاهش معنی‌دار میزان مالون‌دی‌آلدهید و افزایش معنی‌دار میزان پرولین و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز شد. بنابراین، محلول‌پاشی بوته‌های کلزا با این غلظت از نانو ذرات برای کاهش اثرات مخرب تنش خشکی و بهبود عملکرد دانه مفید و موثر دیده شد.

واژگان کلیدی: آنزیم‌های آنتی اکسیدان، پرولین، کلزا، مالون‌دی‌آلدهید، نانو ذرات سلنیوم و مولیبدن.

۱- استادیار دانشگاه جامع علمی کاربردی، تهران، ایران.

۲- دانشیارگروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی،دانشکده کشاورزی ومنابع طبیعی،دانشگاه محقق اردبیلی،اردبیل، ایران.

۳- استادگروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی،دانشکده کشاورزی ومنابع طبیعی،دانشگاه محقق اردبیلی،اردبیل، ایران .

نگارنده مسئول m.rostami@uast.ac.ir

مقدمه

کلزا (*Brassica napus* L.) یکی از مهم‌ترین گیاهان دانه روغنی در جهان است که کاربردهای گسترده‌ای در بخش غذا، خوراک دام و صنعت دارد. (Xiao *et al*., 2022). مهم‌ترین جزء دانه کلزا، روغن است که بسته به نوع رقم ۴۰ تا ۵۰ درصد وزن دانه را تشکیل می‌دهد (Petrie *et al*., 2020). کیفیت روغن با ترکیب اسیدهای چرب آن تعیین می‌شود که بر پایداری، طعم و ارزش غذایی آن تأثیر می‌گذارد. دانشمندان، روغن کلزا را به دلیل سطح پایین اسیدهای چرب اشباع (~۷٪) و سطح بالای اسیدهای چرب غیراشباع (۶۰-۶۵٪)، یکی از سالم ترین روغن‌ها می‌دانندکه اثرات مفیدی بر سلامت انسان دارد (Sey *et al*., 2022). کلزا به دلیل داشتن صفاتی نظیر توانایی جوانه‌زنی و رشد در دماهای پایین و سازگاری نسبتاً خوب با شرایط آب و هوایی مختلف، امکان کشت به‌صورت بهاره و پاییزه را دارد (Bybordi, 2016).

خشکی یکی از مخرب‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که بر رشد، فیزیولوژی و عملکرد گیاهان زراعی تأثیر می‌گذارد (Dola *et al*., 2022). از حساس‌ترین مراحل به تنش خشکی در کلزا، مرحله گل‌دهی می‌باشد، به‌طوری که وقوع تنش خشکی در این مرحله بیشترین تاثیر را در کاهش عملکرد دارد. زیرا، موجب کاهش اکثر صفات وابسته به عملکرد نظیر تعداد خورجین در بوته، وزن هزاردانه و تعداد دانه در خورجین می‌گردد که در نهایت موجب کاهش عملکرد دانه می‌شود (Godarzi *et al*., 2017).

استفاده از نانو ذرات به صورت محلول‌پاشی به دلیل سطح وسیع و پتانسیل بالاتر برای ورود به برگ گیاه در هنگام تنش می‌تواند مفید باشد (Naumann *et al*., 2018). این ذرات، ابزار امیدوارکننده‌ای برای کشاورزی پایدار در شرایط متغیر آب و هوایی در نظر گرفته می‌شوند (Mittal *et al*., 2020).

در بین ذرات تعدیل‌کننده اثرات تنش خشکی در گیاهان، نقش سلنیوم در مکانیسم‌های پیچیده‌ای نظیر تنظیم گونه‌های فعال اکسیژن، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، جذب و توزیع عناصر ضروری (Feng and Wei, 2013)، جلوگیری از تخریب کلروفیل (Seppanen *et al*., 2003)، افزایش میزان آنتوسیانین‌ها (Hawrylak-Nowak, 2008)، کاهش پراکسیداسیون لیپدها و حفظ پایداری غشا (Yanez Barrientes *et al*., 2012) و افزایش میزان فتوسنتز و عملکرد گیاهان (Valladares *et al*., 2008) مشخص شده است.

کاربرد مولیبدن در شرایط تنش خشکی باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و پراکسیداز شده و از تخریب کلروفیل جلوگیری می‌کند. همچنین مولیبدن با تأثیر بر ساختار فسفوگلیکولیپیدی بر پایداری غشای تیلاکوئیدها مؤثر است (Han *et al*., 2020). گیاهان نیز مانند انسان به تغذیه متعادل نیاز دارند. متعادل کردن مواد مغذی در ریزمغذی‌ها دشوارتر از ایجاد تعادل بین درشت مغذی‌ها است، گیاهان برای تحقق حداکثر پتانسیل ژنتیکی به نسبت مشخصی از عناصر غذایی نیاز دارند. تعیین این نسبت بسیار مهمتر از غلظت واقعی عناصر به صورت منفرد است (Malvi, 2011). برخلاف ضروری بودن مولیبدن در تغذیه گیاه، سلنیوم برای گیاهان ضروری نیست. با این وجود، مطالعات قبلی نشان دادند که استفاده از غلظت‌های پایین سلنیوم می‌تواند رشد گیاه را تحریک کند (Rios *et al*., 2010).

مولیبدن (Mo) و سلنیوم (Se) هر دو از طریق انتقال دهنده‌های سولفات و فسفات منتقل می شوند. از این‌رو این آنیون ها به طور رقابتی با یکدیگر برهمکنش خواهند داشت (Ramos *et al*., 2011). وجود برهمکنش پیچیده‌ای بین سلنیوم و مولیبدن از لحاظ جذب و انتقال توسط زانگ و همکاران (Zhang *et al*., 2012) نیز گزارش شده است. بررسی اثرات متقابل سلنیوم و مولیبدن در گوجه فرنگی نشان داد که سلنیوم اثر منفی مولیبدن را تعدیل کرده و در مواردی نیز برهمکنش سلنیوم و مولیبدن اثراتی مجزا و مستقل بر روی صفات مورد بررسی داشته است (Goshehgir *et al*., 2010). مطالعه اثرات مولیبدن و سلنیوم روی کلم چینی (*Brassica campestris* L.ssp. *Pekinensis*) نشان داد که کاربرد سیلنیوم در غلظت بالاتر باعث کاهش غلظت Mo و جلوگیری از انتقال مولیبدن اضافی از ریشه به اندام هوایی می‌شود (Zhang *et al*., 2012). پژوهشگران با بررسی بر روی گیاه توتون (*Nicotiana tabacum* L.) تحت تنش کروم نشان دادند که هم‌افزایی سلنیوم و مولیبدن، اثر افزایشی بر رشد و عملکرد داشته و توانسته اثرات سمی کروم را با تعدیل جذب کروم و توزیع درون سلولی کاهش دهد (Qu *et al*., 2022).

با توجه به حساسیت گیاه کلزا به کمبود آب در مرحله گلدهی و تاثیر مثبت سلنیوم و مولیبدن در تعدیل اثرات تنش خشکی، هدف از این مطالعه بررسی تاثیر نانو سلنیوم و نانو مولیبدن و همچنین بررسی برهمکنش آنها بر صفات زراعی و بیوشیمیایی کلزا و تعیین غلظت موثر این نانو ذرات شرایط آبیاری معمول و قطع آبیاری بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش حاضر به منظور بررسی تاثیر کاربرد نانوسلنیوم، نانومولیبدن و برهمکنش این نانو ذرات بر شاخص‌های زراعی و صفات بیوشیمیایی کلزای بهاره در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی با مختصات 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 زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ اجرا شد. براساس داده‌های هواشناسی در طول زمان اجرای آزمایش میانگین حداقل و حداکثر دما به ترتیب ۷/۷ و ۲۲/۴ درجه سلسیوس و مجموع بارندگی ۸۰/۲ میلی‌متر بود. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ ارایه شده است.

آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. عامل‌های مورد مطالعه شامل: آبیاری در ۲ سطح (آبیاری معمول و قطع آبیاری در مرحله گلدهی) به‌عنوان کرت اصلی و محلول پاشی نانواکسیدمولیبدن و نانو سلنیوم در ۹ سطح (عدم مصرف نانو ذرات به‌عنوان تیمار شاهد، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن، ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم + ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانو سلنیوم+۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید مولیبدن، ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم+ ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم+ ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید مولیبدن) که در کرت‌های فرعی قرار گرفتند.

بذر مورد استفاده، رقم هایولا ۴۰۱ که از شرکت کشت و صنعت مغان تهیه شد. نانوسلنیوم

(سایز ذرات: ۱۰-۴۵ نانومتر، خلوص نانو ذرات: ۹۹/۹۹ درصد، مساحت سطح ویژه نانو ذرات سلنیوم: ۳۰-۵۰ متر مربع بر گرم) و نانواکسید مولیبدن (سایز ذرات : ۱۳-۸۰ نانو متر، خلوص: ۹۹/۹۴ درصد، رنگ نانو پودر: سفید-خاکستری روشن، وزن مولکولی: ۱۴۳/۹۴گرم بر مول) مورد استفاده در این تحقیق از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان تهیه شده بود. آماده‌سازی زمین با انجام عملیات دیسک، تسطیح و ایجاد جوی و پشته در اوایل فرودین انجام شد. در هر کرت ۶ خط کاشت به طول ۵ متر و با فاصله ۲۵ سانتی‌متر ایجاد گردید. کاشت بذرها در عمق ۱/۵ تا ۲ سانتی‌متر از سطح خاک و با فاصله ۴ سانتی-متر روی ردیف در بیست و دوم فروردین ماه در دو طرف پشته و به‌صورت دستی انجام شد و پس از سبز شدن و طی چند مرحله تنک به تراکم مطلوب ۸۰ بوته در متر مربع کاهش یافت. آبیاری کرت‌ها بلافاصله بعد از کاشت و به‌صورت نشتی انجام گردید. اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی آبیاری بسته به شرایط آب و هوایی و نیاز گیاه، تقریبا هر ۱۰ روز یکبار در مراحل دو برگی، مرحله توسعه گیاه، مرحله ساقه دهی و مرحله گلدهی به‌صورت مشترک انجام گردبد. در مرحله پنجاه درصد گلدهی (۲۱ تیر) برای تیمار تنش خشکی، قطع آبیاری تا انتهای دوره رشدی اعمال گردید. اما در تیمار آبیاری معمول، آبیاری تا پرشدن دانه و دو بار بیشتر از تیمار تنش انجام گردید. علف‌های هرز به‌صورت دستی در طول دوره رشدی در چندین نوبت وجین گردید.

محلول‌پاشی بوته‌ها با غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم و نانواکسید مولیبدن در دو مرحله (مراحل ۸-۶ برگی و ۵۰ درصد گل‌دهی) با سمپاش پشتی دستی انجام شد. برای افزایش و جلوگیری از جمع شدن محلول در یک نقطه و ایجاد برگ سوختگی، برای افزایش راندمان جذب و کارآیی محلول‌پاشی، محلول‌پاشی هنگام صبح از توین ۲۰ استفاده گردید.

برای اندازه‌گیری صفات بیوشیمیایی شامل فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز، میزان مالون‌دی آلدئید و پرولین، پس از اعمال تیمارهای تنش و محلول‌پاشی از برگ‌های جوان و توسعه یافته، نمونه‌برداری انجام گرفت. نمونه‌ها در فریزر و تحت دمای ۸۰- درجه سلسیوس تا زمان اندازه‌گیری صفات، نگهداری شدند و برای اندازه گیری عملکرد و اجزای عملکرد، در انتهای فصل رشد، در هر واحد آزمایشی ۲ ردیف کناری و ۰/۵ متر از ابتدا و انتهای هر ردیف به‌عنوان اثر حاشیه منظور گردید و نمونه‌برداری‌ها فقط از ۴ ردیف وسطی به‌طور تصادفی از ۱۰ بوته صورت گرفت. ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌ی جانبی (تعداد شاخه‌ی فرعی منتهی به خورجین)، تعداد خورجین در بوته و تعداد دانه در خورجین تعیین گردید. در زمان رسیدگی کامل، برای تعیین عملکرد دانه در واحد سطح دو خط کناری و ۵۰ سانتی‌متر از بالا و پایین هر کرت حذف گردید و از سطحی معادل یک مترمربع برداشت انجام شد.

روغن موجود در دانه با استفاده از دستگاه سوکسله و توسط حلال آلی هگزان استخراج شد (Joshi *et al.*, 1998). به این ترتیب که مقدار یک گرم از نمونه‌های آسیاب شده را داخل کاغذ صافی که توزین شده، ریخته و پس از خشک شدن در آون به همراه کاغذ وزن شد. سپس نمونه‌ها را در قسمت استخراج دستگاه قرار داده و حلال هگزان به آن اضافه شد. عمل عصاره‌گیری نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت ادامه یافت تا چربی آنها به‌طور

کامل گرفته شود. بعد از گرفته شدن چربی، نمونه‌ها از دستگاه خارج و به مدت ۲۴ ساعت در آون ۷۵ درجه سلسیوس قرار داده شد. پس از خشک شدن دوباره وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و با استفاده از فرمول زیر درصد روغن به‌دست آمد.

$$\text{Oil \%} = [(b - c) / (b - a)] \times 100$$

a- وزن کاغذ صافی مورد استفاده برای نمونه، b- وزن اولیه نمونه به همراه کاغذ صافی و c- وزن ثانویه نمونه به همراه کاغذ صافی

برای اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شامل کاتالاز و پراکسیداز، عصاره آنزیمی از نمونه‌های گیاهی تهیه گردید. برای تهیه عصاره آنزیمی از روش چنس و کوا (Chang and Koa, 1988) استفاده شد. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز براساس روش ارایه شده توسط ابی (Aebi, 1984) و فعالیت آنزیم پراکسیداز براساس روش ارایه شده توسط چانک و مهلی (Chance and Maehly, 1955) بر پایه تشکیل تتراگایاکول از گایاکول در حضور پراکسید هیدروژن و آنزیم گایاکول اندازه‌گیری شد. میزان پراکسید هیدروژن نمونه‌ها براساس منحنی استاندارد غلظت‌های مختلف پراکسید هیدروژن محاسبه شد (Sagisaka, 1976).

استخراج پرولین با استفاده از روش بیتس (Bates, 1973) و اندازه‌گیری میزان مالون دی‌الدهید بر اساس روش هیس و پاکر (Heath and Packer, 1968) انجام گردید.

کلیه تجزیه‌های آماری و مقایسه میانگین داده‌های حاصل، پس از اطمینان از معمول بودن داده‌ها، با نرم‌افزار SAS 9.1 انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ صورت گرفت.

نتایج و بحث

عملکرد و اجزای عملکرد

ارتفاع بوته: برطبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر آبیاری و محلول‌پاشی نانو ذرات در سطح احتمال یک درصد بر ارتفاع بوته، معتی‌دار ولی اثرمتقابل آبیاری × محلول‌پاشی نانو ذرات معنی‌دار نبود (جدول۲). با قطع آبیاری در مرحله گلدهی، ارتفاع بوته نسبت به شرایط آبیاری معمول ۷/۸۴ درصد کاهش یافت.

انجام محلول‌پاشی بوته‌ها با غلظت های مختلف نانواکسیدمولیبدن و نانوسلنیوم به‌طور جداگانه و همزمان، منجر به افزایش معنی‌دار میزان ارتفاع بوته گردید، به‌طوری که محلول‌پاشی با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید مولیبدن، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، مصرف توام غلظت‌های ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید مولیبدن، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن، ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن و همچنین مصرف توام غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم +۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن ترتیب باعث افزایش ۷/۸۴ ،۹/۵۵، ۱۰/۲۲، ۱۸/۲۸، ۱۹/۱۱، ۱۶/۲۴، ۲۴/۰۳ و ۱۹/۴۷ درصدی ارتفاع بوته نسبت به تیمار شاهد شد. اگرچه مصرف تمامی غلظت‌ها سبب افزایش ارتفاع بوته گردید، ولی بیشترین تاثیر مربوط به تیمار مصرف توام غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن بود (جدول۳).

نتایج تحقیقات پژوهشگران نشان داد که کاربرد نانواکسیدمولیبدن و نانوسلنیوم در گیاه با افزایش شاخص سبزینگی و محتوای آب برگ

سبب افزایش توان فتوسنتزی گیاه و در نتیجه افزایش رشد رویشی گیاه می‌شود (Michel *et al*., 2020). افزایش ارتفاع بوته در اثر محلول‌پاشی با نانواکسید مولیبدن توسط داشادی و رسایی (Dashadi and Rasaei, 2020) در نخود و در اثر محلول‌پاشی با نانوسلنیوم در گندم توسط اکرام و همکاران (Ikram *et al*., 2020) گزارش شده‌است. با توجه به تاثیر مثبت هریک از این نانو ذرات در افزایش ارتفاع بوته، هم‌افزایی و بیشتر شدن اثرات مثبت آنها دور از انتظار نیست.

تعداد شاخه جانبی: برطبق نتایج حاصل از تحقیق که در جدول ۲ آورده شده، شاخه جانبی به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی با نانو ذرات در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت اما، اثرمتقابل آبیاری × نانو ذرات بر روی این صفت معنی‌دار نبود. تنش خشکی انتهای فصل موجب کاهش معنی‌دار تعداد شاخه جانبی در حدود ۲۵/۵۸ درصد در کلزای بهاره گردید (جدول۲).

کاهش تعداد شاخه فرعی در اثر تنش خشکی در نتیجه کاهش تولید مواد فتوسنتزی و کاهش رشد رویشی مشاهده می‌گردد. مطابق با پژوهش حاضر کاهش تعداد شاخه جانبی در اثر تنش خشکی در لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) نیز گزارش شده است (Semida *et al*., 2023).

کاربرد نانو ذرات باعث افزایش تعداد شاخه جانبی گردید و بیشترین آن با میانگین ۱۰/۵۰ با مصرف توام غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سلنیوم و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن مشاهده شد که با تیمارهای۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم + ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم +۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو اکسید مولیبدن و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم +۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول۳).

احمد و همکاران (Ahmad *et al*., 2020) با بررسی محلول‌پاشی برگی سلنیوم در شرایط تنش و عدم تنش به این نتیجه رسیدند که محلول‌پاشی سلنیوم به‌طور معنی‌داری تعداد شاخه در بوته را در هر دو شرایط تنش و عدم تنش افزایش می‌دهد. مطابق با نتایج این پژوهش، افزایش تعداد شاخه جانبی در اثر محلول پاشی با مولیبدن تحت شرایط تنش خشکی در ماش (*Vigna radiata* L.) نیز گزارش شده است (Hayyawi *et al*., 2020).

تعداد خورجین در بوته: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی با نانو ذرات و نیز اثرمتقابل آبیاری × محلول‌پاشی نانو ذرات در سطح احتمال یک درصد بر تعداد خورجین در بوته معنی‌دار بود (جدول۲). تنش خشکی سبب کاهش ۱۹/۳ درصدی تعداد دانه در خورجین گردید (جدول۴).

کاهش تعداد خورجین در بوته می‌تواند به علت کاهش طول دوره زایشی در اثر تنش خشکی باشد (Shirani Rad *et al*., 2013). محلول‌پاشی نانو ذرات سبب افزایش تعداد خورجین در بوته در تمامی تیمارهای مورد بررسی شد، به‌طوری که تعداد خورجین در بوته در شرایط تنش خشکی با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن، ۳۴ درصد بیشتر از تیمار شاهد در شرایط آبیاری معمول بود (جدول۴). افزایش کارایی مصرف نیترژن، تولید و عرضه مواد فتوسنتزی در اثر کاربرد نانوکلات مولیبدن (Manjili *et al*., 2014) و افزایش رنگریزه‌های فتوسنتزی و بهبود فرآیندهای

فتوسنتزی در اثر کاربرد سلنیوم (Han-Wens *et al*. 2010) از دلایل احتمالی تاثیر این نانو ذرات بر تعداد خورجین در بوته عنوان شده است.

در پژوهش داشادی و رسایی (Dashadi and Rasaei, 2020) افزایش تعداد غلاف در نخود در اثر مصرف مولیبدن و در پژوهش سمیدا و همکاران (Semida *et al*. 2023) افزایش تعداد غلاف در لوبیا در اثر کاربرد سلنیوم گزارش شده است که مطابق با نتایج پژوهش حاضر می‌باشد.

تعداد دانه در خورجین: صفت تعداد دانه در خورجین به‌طور معنی‌داری تحت‌تاثیر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با نانو ذرات در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت ولی اثرمتقابل آبیاری × نانو ذرات بر روی این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۲). تنش خشکی انتهای فصل موجب کاهش معنی‌دار تعداد دانه در خورجین به میزان ۲۰/۱۵ درصد گردید (جدول۳). عقیم شدن دانه‌های گرده و اختلال در فتوسنتز و انتقال مواد به دانه از دلیل کاهش تعداد دانه در خورجین در اثر تنش خشکی می‌باشد (Bheemanahalli *et al*., 2022). مطابق با پژوهش حاضر، کاهش تعداد دانه در خورجین در اثر تنش خشکی در سویا نیز گزارش شده است (Heidarzade *et al*., 2016).

در بوته‌های محلول‌پاشی نشده با نانو ذرات (شاهد)، تعداد دانه در خورجین به‌طور معنی‌داری کمتر از بوته‌های محلول‌پاشی شده با نانو ذرات بود. درحالی که محلول‌پاشی بوته‌ها با غلظت‌های ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید مولیبدن،۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید مولیبدن، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم +۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم +۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو اکسیدمولیبدن،۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم +۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم+۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن سبب افزایش معنی‌دار تعداد دانه در خورجین شد که این افزایش به‌ترتیب در حدود به‌ترتیب در حدود ۲۰/۲۶ ، ۱/۰۴، ۱۵/۴۶، ۲۵/۹۰، ۲۶/۱۱، ۲۱/۸۳، ۴۰/۶۳ و ۳۱/۲۳ درصد نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی بود (جدول۳).

محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید مولیبدن اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت اما مصرف توام این نانو ذرات با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم +۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن اثر افزایشی داشته و توانسته بیشترین تعداد دانه در خورجین را تولید کند. هر کدام از نانو ذرات مورد استفاده به دلایلی سبب افزایش تعداد دانه در خورجین می‌شوند، از این دلایل می‌توان به تاثیر نانواکسیدمولیبدن در غلظت پایین بر تشکیل گل و جوانه‌زنی دانه گرده (Eshghi *et al*., 2010) و تاثیر نانو سلنیوم بر رنگریزه‌های فتوسنتزی و تأخیر در پیری گل‌ها (Rady *et al*., 2021) اشاره کرد.

وزن هزاردانه: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها گویای این مطلب بود که سطوح آبیاری، محلول‌پاشی با نانو ذرات در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آبیاری × محلول‌پاشی در سطح احتمال پنج درصد بر صفت وزن هزاردانه معنی‌دار بود (جدول ۲).

تنش خشکی ایجاد شده در اثر قطع آبیاری موجب کاهش ۲۸/۳۳ درصدی وزن هزاردانه در تیمار شاهد شرایط تنش خشکی نسبت به تیمار شاهد شرایط آبیاری معمول گردید (جدول۴). تأثیر تنش خشکی بر میزان کلروفیل، فرآیندهای

فتوسنتزی و به تبع آن کاهش میزان کربوهیدرات و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه می‌تواند یکی از مهمترین دلایل کاهش وزن هزاردانه باشد (Gonzalez *et al*., 2010). بیشترین وزن هزاردانه با میانگین ۴/۰۸ گرم در مصرف توام ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن در شرایط آبیاری معمول به دست آمد، که به طور معنی‌داری بیشتر از سایر تیمارها بود (جدول۴). بین تیمار مصرف توام ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن در شرایط تنش خشکی و تیمار شاهد در شرایط آبیاری معمول اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول۴).

بالا بودن وزن هزار دانه در اثر کاربرد سلنیوم، به دلیل بالا بودن آسمیلات و انتقال مواد به دانه‌ها می‌باشد (Ramos *et al*., 2011). که با نتایج تحقیقات نواز و همکاران (Nawaz *et al*., 2015) در گیاه گندم و پژوهش حاضر مطابقت دارد. افزایش معنی‌دار وزن هزار دانه در اثر استفاده از مولیبدن در سویا (Heidarzade *et al*., 2016) و عدس (Nasar and Shah, 2017) نیز گزارش شده است که با یافته‌های این تحقیق مطابقت دارد.

عملکرد دانه در واحد سطح: تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که صفت عملکرد دانه به طور معنی‌داری تحت‌تاثیر تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی نانو ذرات و اثر متقابل آبیاری × محلول‌پاشی نانو ذرات در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۲). عملکرد دانه نیز تحت تاثیر تنش خشکی کاهش یافت، به طوری‌که میزان عملکرد دانه در مقایسه میانگین تیمار شاهد شرایط آبیاری معمول با تیمار شاهد شرایط تنش، کاهش ۲۹/۸ درصدی را نشان داد (جدول۴).

کمبود آب در مرحله گلدهی با تأثیر منفی بر تشکیل خورجین و وزن هزاردانه (جدول۴)، موجب کاهش عملکرد دانه در کلزا شد. محلول‌پاشی نانو ذرات در شرایط آبیاری معمول و همچنین تنش خشکی موجب افزایش عملکرد دانه کلزا گردید؛ به‌طوری‌که بیشترین عملکرد دانه (۲۸۳۰/۳ کیلوگرم در هکتار) مربوط به بوته‌های محلول‌پاشی شده با غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن + ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم در شرایط آبیاری معمول مشاهده گردید، که اختلاف معنی‌داری با تیمار ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن در این شرایط نداشت (جدول۴).

مقایسه میانگین داده نشان داد که محلول‌پاشی بوته‌های کلزای بهاره در جبران اثرات تنش خشکی موثر است، به‌طوری که مصرف توام غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن علاوه بر جبران خسارت تنش خشکی سبب شد تا عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد در شرایط آبیاری معمول بوده و در مقایسه با آن از رشد ۱۱/۹۶ درصدی برخوردار باشد (جدول۴).

افزایش عملکرد می‌تواند ناشی از تاثیر مثبت نانواکسید مولیبدن و نانوسلنیوم در افزایش ارتفاع بوته (جدول۳)، افزایش تعداد خورجین در بوته (جدول۴)، افزایش تعداد دانه در خورجین (جدول۳) و وزن هزاردانه (جدول۴) باشد. حیاوی و همکاران (Hayyawi *et al*., 2020) نیز افزایش عملکرد دانه در ماش را اثر محلول‌پاشی مولیبدن را در نتیجه افزایش در برخی از اجزای عملکرد مانند تعداد غلاف در بوته، طول غلاف و تعداد دانه

در هر غلاف عنوان کردند. شجاع و همکاران (Shoja *et al*., 2018) گزارش کردند که محلول پاشی با سلنیوم، باعث افزایش در طول خورجین، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن دانه و بیوماس شد که این تغییرات در نهایت موجب افزایش عملکرد دانه کلزا گردید. همچنین مصرف سلنیوم به‌صورت محلول‌پاشی با افزایش آنتی‌اکسیدان‌ها و کاهش فعالیت رادیکال‌های آزاد در گندم موجب بهبود پتانسیل آبی گیاه و در نهایت افزایش عملکرد دانه در شرایط معمول و تنش کمبود آب گردید (Dadnia, 2018) که منطبق با نتایج پژوهش حاضر می‌باشد.

روغن دانه: براساس تجزیه واریانس داده های مربوط به صفت درصد روغن، تاثیر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با عناصر نانو ذرات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، ولی اثر متقابل آبیاری × محلول‌پاشی بر صفت مذکور معنی‌دار نبود (جدول۲). بیشترین درصد روغن در شرایط آبیاری معمول مشاهده شد؛ به‌طوری که در اثر قطع آبیاری، درصد روغن به‌میزان ۵/۰۲ درصد نسبت به تیمار آبیاری معمول کاهش یافت (جدول۳). کاهش مقدار روغن دانه به‌دلیل تنش خشکی ممکن است ناشی از کوتاه شدن دوره پر شدن دانه و کاهش وزن دانه‌ها باشد (Ghassemi-golezani and Lotfi, 2013). همچنین، کاهش دسترسی به کربوهیدرات‌ها برای سنتز روغن نیز از دلایل کاهش درصد روغن عنوان شده است (Ashrafi and Razmjoo, 2014).

به‌واسطه محلول‌پاشی توام بوته‌ها با غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، درصد روغن کلزا نسبت به سایر تیمارهای آزمایش افزایش یافت. هرچند این تیمار اختلاف معنی‌داری با درصد روغن دانه‌های حاصل از بوته‌های محلول‌پاشی شده با غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن + ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و همچنین۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم + ۵۰ میلی‌گرم نانواکسیدمولیبدن نداشت، ولی موجب افزایش ۹/۴۶ درصدی صفت مذکور نسبت به تیمار شاهد گردید (جدول ۳).

در تحقیقات مشابه، تاثیر مثبت سلنیوم و مولیبدن بر افزایش درصد روغن گزارش شده است. افزایش درصد روغن دانه تحت تاثیر محلول‌پاشی سلنیوم در بادام‌زمینی (Hussein *et al*. 2019) و سویا (Jalalizand and Goli, 2021) و افزایش درصد روغن در اثر محلول‌پاشی مولیبدن در گلرنگ (Arabporian *et al*. 2013) و بادام‌زمینی (Hirpara *et al*. 2019) نیز گزارش شده است.

صفات بیوشیمیایی

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان: تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی حاکی از اثر معنی‌دار تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی نانو ذرات و اثر متقابل آبیاری × محلول‌پاشی در سطح احتمال یک درصد بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز بود (جدول۲).

اعمال تنش خشکی انتهای فصل میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز به‌طور معنی‌داری نسبت به شرایط آبیاری معمول افزایش داد. بالاترین میانگین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در شرایط تنش و کمترین آن در شرایط آبیاری معمول حاصل شد. تنش خشکی سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گردید، به طوری‌که فعالیت آنزیم کاتالاز و

پراکسیداز به ترتیب در حدود ۸۸/۱ و ۵۱/۹ درصد افزایش یافت (جدول۴).

تنش خشکی با تجمع بیش از حد رادیکال‌های آزاد سبب تخریب ساختمان لیپیدها و پروتئین‌ها شده و فعالیت بسیاری از آنزیم‌ها را مهار می‌کند. این رادیکال‌ها با تخریب کلروفیل، کاهش یکپارچگی غشاء و کاهش فعالیت فتوسنتزی بر عملکرد گیاه موثر هستند (Das *et al*., 2014). آنتی‌اکسیدان‌هایی مانند کاتالاز و پراکسیداز جهت مقابله با رایکال‌های آزاد بسیار مهم و ضروری هستند (Ighodaro and Akinloye, 2018). افزایش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز در اثر تنش خشکی در گندم (Wu *et al*., 2017) و برنج (Nasrin *et al*., 2020) گزارش شده است که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد.

محلول‌پاشی نانواکسیدمولیبدن و نانوسلنیوم میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز را به‌طور معنی‌داری افزایش داد و میزان این افزایش با توجه به غلظت‌های مختلف نانو ذرات و شرایط آبیاری متفاوت بود (جدول۴). بر اساس نتایج مقایسه میانگین بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار محلول‌پاشی توام غلظت‌های ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید مولیبدن و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم در شرایط تنش خشکی (قطع آبیاری) مشاهده گردید که اختلاف معنی‌داری با تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید مولیبدن و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم نداشت و کمترین آن در تیمار عدم محلول‌پاشی و آبیاری معمول مشاهده می‌گردد (جدول۴).

در شرایط قطع آبیاری بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز در مصرف توام نانو ذرات با غلظت‌های ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید مولیبدن و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم مشاهده شد که با تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن + ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول۴). تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید مولیبدن با کمترین تاثیر در افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در مقایسه با سایر غلظت‌های نانو ذرات، اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نداشت (جدول۴). محققان خواص ضد پیری سلنیوم را به کاهش پراکسیداسیون چربی‌ها و افزایش فعالیت پراکسیداز نسبت می‌دهند (Xue *et al*., 2001). افزایش میزان آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در اثر مصرف سلنیوم در ذرت (Chilimba *et al*., 2012) و همچنین در جو (Yan *et al*., 2011) مشاهده شده است.

مولیبدن از کوفاکتورهای مورد نیاز برای سنتز اسیدآبسیزیک می‌باشد. با توجه به نقش اسیدآبسیزیک در فعال کردین سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و افزایش تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر کاتالاز و پراکسیداز (Leng *et al*., 2021)، انتظار می‌رود با افزایش مولیبدن، میزان سنتز آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی افزایش یابد. مطابق با نتایج پژوهش حاضر، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در اثر کاربرد مولیبدن در برنج (Imran *et al*., 2020) و نخود (Sutuliene *et al*., 2022) مشاهده شده است.

مالون دی‌آلدهید: براساس نتایج تجزیه واریانس، تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با نانو ذرات اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر میزان مالون‌دی‌آلدهید داشتند، ولی اثر متقابل آبیاری × محلول‌پاشی نانو ذرات بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول۲). بیشترین میزان مالون دی‌آلدهید در شرایط تنش خشکی مشاهده شد

که نشان‌دهنده افزایش پراکسیداسیون لیپیدهای غشا در شرایط تنش می‌باشد. با قطع آبیاری در مرحله گلدهی مقدار مالون‌دی‌آلدهید نسبت به شرایط آبیاری معمول ۳۴/۷۹ درصد افزایش یافت (جدول۳).

افزایش محتوی مالون‌دی‌آلدهید در شرایط تنش خشکی، نشان‌دهنده افزایش مقدار پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء توسط گونه‌های فعال اکسیژن می‌باشد (Sajedi *et al*., 2017). وجود همبستگی منفی و معنی‌دار بین میزان مالون‌دی آلدهید و پایداری غشای سلولی (**۹۰٪-) در توت فرنگی و در شرایط تنش خشکی نیز گزارش شده است (Marivani *et al*., 2019). انجام محلول‌پاشی بوته‌ها با غلظت‌های مختلف نانو ذرات، منجر به کاهش معنی‌دار مقدار مالون‌دی‌آلدهید درکلزا گردید، به‌طوری که محلول‌پاشی غلظت‌های ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانو اکسیدمولیبدن، ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسید مولیبدن، ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، مصرف توام غلظت‌های ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن، مصرف توام غلظت‌های ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن، مصرف توام غلظت‌های ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن و همچنین مصرف توام غلظت‌های ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو اکسیدمولیبدن به‌ترتیب باعث کاهش ۱۹/۷۱، ۱۴/۴۸، ۱۵/۳۸، ۲۹/۴۰، ۳۰/۹۰، ۲۵/۵۳، ۴۰/۱۶ و ۳۳/۲۹ درصدی میزان مالون‌دی‌آلدهید شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین کاهش متعلق به تیمار مصرف توام غلظت‌های ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم و ۲۵ میلی گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن می‌باشد که به‌طور معنی‌داری کمتر از سایر تیمارهای مورد مطالعه است (جدول۳).

سلنیوم و مولیبدن با افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز (جدول۴)، پراکسید شدن غشا را کاهش می‌دهد. کاهش پراکسیداسیون غشا با کاهش نشت یونی همراه خواهد شد و در نهایت باعث افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی می‌گردد. کاهش میزان مالون‌دی‌آلدهید در اثر کاربرد مولیبدن در گندم (Wu *et al*., 2014) و نیز کاهش آن در اثر کاربرد سلنیوم در جو (Sajedi and Madani, 2017) مشاهده شده است که مطابق با نتایج پژوهش حاضر می‌باشد.

پرولین: نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمار آبیاری، محلول‌پاشی با نانو ذرات و اثرمتقابل آبیاری × محلول‌پاشی بر میزان پرولین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). با اعمال تنش خشکی انتهای فصل، میزان اسیدآمینه پرولین برگ‌های کلزای بهاره به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، به‌طوری که میانگین اسید آمینه از ۰/۰۰۴۰۴۸ میکروگرم بر گرم وزن تر در تیمار شاهد شرایط آبیاری معمول به ۰/۰۲۰۳۸ میکروگرم بر گرم وزن تر در تیمار شاهد شرایط قطع آبیاری تغییر یافت (جدول۴).

افزایش غلظت پرولین در گیاهانی‌که تحت تنش قرارگرفته‌اند، نوعی سازگاری برای غلبه بر شرایط تنش می‌باشد. پرولین با تنظیم اسمزی، ساختار پروتئین‌ها و غشای سلولی را تثبیت می‌کند و به عنوان یک عامل محافظ برای آنزیم ها، پاک‌کننده رادیکال‌های آزاد و آنتی اکسیدان

نیز عمل می‌کند (Kavi Kishor and Sreenivasulu, 2014). افزایش تدریجی میزان پرولین در گیاهان در شرایط کم آبی باعث بهبود مقاومت گیاهان می‌شود (Nguyen *et al*., 2020). افزایش میزان پرولین در اثر تنش خشکی سبب اختصاص سهمی از کربوهیدرات تولیدی به ساختار مواد آلی مؤثر در تنظیم اسمزی مانند پرولین شده که این امر می‌تواند یکی از دلایل کاهش رشد گیاه در اثر تنش باشد (Masoumzadeh *et al*. 2012). افزایش میزان پرولین در سویا (Nguyen *et al*., 2020) و ذرت (Saha *et al*., 2019) در شرایط تنش خشکی گزارش شده است.

انجام محلول‌پاشی برگ‌های کلزای بهاره با نانواکسیدمولیبدن و نانوسلنیوم موجب افزایش معنی‌دار میزان پرولین گردید؛ بیشترین محتوای پرولین در محلول‌پاشی توام نانواکسیدمولیبدن و نانوسلنیوم با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سلنیوم و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن با میانگین ۰/۰۳۵۰۴ میکروگرم بر گرم وزن‌تر در شرایط تنش خشکی و کمترین این مقدار با میانگین ۰/۰۲۰۳۸ میکروگرم بر گرم وزن‌تر در تیمار عدم محلول‌پاشی و شرایط آبیاری معمول به دست آمد (جدول۴).

نتیجه‌گیری کلی

با اعمال تنش خشکی انتهای فصل مقدار صفات ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های فرعی، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، روغن دانه و عملکرد در واحد سطح کاهش یافته و صفات مالون‌دی‌آلدهید، کاتالاز، پراکسیداز و پرولین افزایش یافت. در شرایط آبیاری معمول و تنش خشکی انجام محلول پاشی با نانوسلنیوم و نانواکسید مولیبدن موجب افزایش ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های فرعی، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه و عملکرد دانه شد و میزان پراکسیداز، کاتالاز و پرولین را افزایش و سبب کاهش میزان مالون‌دی‌آلدهید گردید. با افزایش غلظت نانو اکسید مولیبدن از ۲۵ به ۵۰ میلی‌گرم در لیتر، تاثیر این نانوذره کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد نانواکسید مولیبدن در غلظت پایین مؤثرتر می‌باشد، ولی با افزایش غلظت نانوسلنیوم از ۲۵ به ۵۰ تاثیر مثبت این نانوذره افزایش یافت. هم در شرایط آبیاری معمول و هم در شرایط تنش خشکی، تیمارهایی از نانو ذرات که به صورت ترکیبی استفاده شده بودند، اثرات بیشتری نسبت به استفاده مجزای هریک از ذرات داشتند که نشان دهنده هم‌افزایی این نانو ذرات می‌باشد.

محلول‌پاشی توام غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم با بیشترین تاثیر مثبت در صفات مورد بررسی، با کاهش خسارت‌های ناشی از تنش خشکی، موجب بهبود عملکرد و اجزای عملکرد دانه و صفات بیوشیمیایی کلزای بهاره در هر دو شرایط تنش خشکی بدون تنش گردید و میزان تأثیر نانوسلنیوم با افزایش غلظت در مقایسه با نانواکسیدمولیبدن بیشتر بود.

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

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

بافت خاک Soil texture	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	نیتروزن N (ppm)	فسفر P(ppm)	پتاسیم K (ppm)	کربن آلی Organic carbon	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (ds/m^{-1})
سیلتی-لوم (Silt-	30.8	53.7	15.5	0.06	11.83	202.5	0.44	7.9	2.68

جدول ۲- تجزیه واریانس تاثیر تیمارهای آبیاری، نانواکسید مولیبدن و نانوسلنیوم بر صفات زراعی و بیوشیمیایی کلزا

Table 2- Analysis of variance the effects of irrigation, molybdenum oxide and selenium nanoparticles treatments on agronomic and biochemical traits of oilseed rape

منابع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Bush height	تعداد شاخه فرعی Number of branches	تعداد خورجین Pods per plant	تعداد دانه در خورجین Grains per pod	وزن هزار دانه 1000-seed weight	عملکرد دانه Seed yield
بلوک Block)	2	2.907	0.4146	13.008	0.9812	0.0037	973.38
آبیاری Irrigation (I)	1	929.1^{**}	105.84^{**}	5387^{**}	359.34^{**}	4.03^{**}	4238081^{**}
خطای اصلی Error a	2	10.27	1.721	9.626	9.797	0.027	18692.01
نانو ذرات Nanoparticles	8	260.03^{**}	6.232^{**}	1446.2^{**}	38.685^{**}	0.217^{**}	387656^{**}
آبیاری × نانو ذراتI× NP	8	11.89^{ns}	0.421^{ns}	31.905^{**}	8.635^{ns}	0.059^{*}	68511^{**}
خطای فرعی Error b	32	7.44	1.337	9.195	4.779	0.022	6917.97
ضریب تغییرات C.V. (%)	-	6.8	13.21	8.15	9.49	4.06	4.47

*، ** و ns: به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و غیرمعنی‌دار می‌باشند.

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

ادامه جدول ۲

Table 2- Continued

منابع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	روغن دانه Seed oil	فعالیت آنزیم کاتالاز Catalase enzyme	فعالیت آنزیم پراکسیداز Peroxidas enzyme	مالون‌دی آلدهید MDA	محتوای پرولین Proline content
بلوک Block)	2	2.388	0.6664	50.477	0.00133	0.00000032
آبیاری Irrigation (I)	1	59.51^{**}	3295.8^{**}	1229.5^{**}	0.3627^{**}	0.006416^{**}
خطای اصلی Error a	2	3.610	9.911	6.132	0.000743	0.0000036
نانو ذرات Nanoparticles	8	7.523^{**}	318.7^{**}	655.5^{**}	0.4612^{**}	0.00004^{**}
آبیاری × نانو ذراتI× NP	8	1.835^{ns}	40.98^{**}	35.354^{**}	0.00162^{ns}	0.000022^{**}
خطای فرعی Error b	32	1.22	3.810	4.532	0.000854	0.0000030
ضریب تغییرات C.V. (%)	-	2.78	8.13	7.79	5.28	1.79

*، ** و ns: به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و غیرمعنی‌دار می‌باشند.

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

.

جدول ۳- مقایسه میانگین ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، تعداد دانه در خورجین، روغن دانه و میزان مالون‌دی‌آلدهید تحت‌تاثیر تیمارهای آبیاری، نانوسلنیوم و نانواکسید مولیبدن در کلزا

Table 3- Mean comparison of Bush height, Number of branches, Seeds per pod, Seed oil and MDA affected by irrigation and selenium and molybdenum oxide nanoparticles of oilseed rape

تیمارها Treatments	ارتفاع بوته Bush height	تعداد شاخه فرعی Number of branches	تعداد دانه در خورجین Seeds per pod	روغن دانه Seed oil (%)	مالون دی آلدهید MDA (µmol g^{-1} Fw)
آبیاری معمول Normal irrigation	105.5^{a}	10.14^{a}	25.61^{a}	40.80^{a}	0.4712^{b}
تنش خشکی Drought stress	97.51^{b}	7.34 ^{b}	20.45^{b}	38.70^{b}	0.6351^{a}
شاهد (صفر) Control (0)	89.18^{d}	6.88 ^{c}	19.15^{d}	37.92^{e}	0.7204^{a}
۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن 25(mg l^{-1} molybdenum nanooxide (Nano-Mo)	97.16^{c}	8.30 ^{bc}	23.03^{bc}	39.30^{cde}	0.5784^{c}
۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن 50(mg l^{-1}) molybdenum nanooxide (Nano-Mo)	97.70 ^{c}	8.65^{b}	19.35^{d}	38.77^{de}	0.6161^{bc}
۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم 25(mg l^{-1}) Nanoselenium (Nano- Se)	98.30 ^{c}	7.83^{bc}	22.11^{bc}	39.76^{bcd}	0.6096^{bc}
۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم 50(mg l^{-1}) Nanoselenium (Nano- Se)	105.4 ^{b}	9.05^{ab}	24.11^{bc}	40.42^{abc}	0.5086^{de}
۲۵ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم + ۲۵ میلی گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن 25(mg l^{-1}) Nano- Se + 25(mg l^{-1}) Nano-Mo	106.2 ^{b}	9.2 ^{ab}	24.17^{bc}	40.83^{ab}	0.4978^{e}
۲۵ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم+ ۵۰ میلی گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن 25(mg l^{-1}) Nano- Se + 50(mg l^{-1}) Nano-Mo	103.8 ^{b}	9.07^{ab}	23.33^{bc}	40.25^{abc}	0.5365^{d}
۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم+ ۲۵میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن 50(mg l^{-1}) Nano- Se + 25(mg l^{-1}) Nano-Mo	110.6 ^{a}	10.53^{a}	26.93^{a}	41.51^{a}	0.4301^{f}
۵۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم+ ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانواکسیدمولیبدن 50(mg l^{-1}) Nano- Se + 25(mg l^{-1}) Nano-Mo	106.5 ^{b}	9.20^{ab}	25.13^{ab}	39.01^{cde}	0.4806^{e}

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده اختلاف معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

The different letters in each column indicate a significant difference by the Duncan test at the 5% level.

جدول۴- مقایسه میانگین برهمکنش تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی با نانواکسید مولیبدن و نانوسلنیوم بر تعداد خورجین در بوته، وزن هزار دانه ،عملکرد دانه، فعالیت آنزیم کاتالاز، آنزیم پراکسیداز و پرولین

Table 4- Comparison of average irrigation and foliar application of nanoselenium and molybdenum nanooxide treatments on the pods per plant, 1000 Seed weight, Seed yield, Catalase enzyme activity, Peroxidas enzyme activity and praline

آبیاری irrigation	محلول پاشی با نانو ذرات Application nanoparticles mg.L^{-1}		تعداد خورجین در بوته Pods per plant	وزن هزار دانه 1000-Seed weight (g)	عملکرد دانه در بوته Seed yield per plant(g))	فعالیت آنزیم کاتالاز Catalase activity unit/mg protein)	فعالیت آنزیم پراکسیداز Peroxidas activity unit/mg protein)	پر..لین Praline (µg/gDW)
	نانو اکسید مولیبدن nano oxide	نانو سلنیوم nano selenium						
آبیاری معمول Normal irrigation	0	0	88.9^{g}	3.71^{bcd}	2084.6f	9.33^{l}	12.36^{k}	0.00408^{e}
	25	0	108.56$_{d}$	3.94^{ab}	2787^{a}	13.23^{ij}	15.76^{kj}	0.0055^{e}
	50	0	100.51^{f}	3.93^{ab}	2217.6^{def}	10.78^{jk}	13.89^{k}	0.0047^{e}
	0	25	115.6^{c}	3.82^{abc}	2292.3^{de}	13.35^{ij}	19.03^{ij}	0.00456^{e}
	0	50	129.61^{b}	3.92^{ab}	2473.6^{bc}	16.28^{hi}	27.1^{fg}	0.00489^{e}
	25	25	127.43^{c}	4.01^{a}	2599.6^{b}	17.4^{gh}	24.96^{fgh}	0.00642^{e}
	50	25	119.83^{c}	3.97^{ab}	2356.3^{cd}	21.02^{fg}	21.16^{hi}	0.00470^{e}
	25	50	144.31^{a}	4.08^{a}	2830.3^{a}	23.65^{ef}	37.32^{c}	0.00585^{e}
	50	50	124.93^{bc}	3.94^{ab}	2500.6^{bc}	20.52^{fg}	31.31^{ed}	0.00649^{e}
تنش خشکی Drought stress	0	0	71.71^{h}	2.66^{g}	1463.6^{j}	17.55^{hg}	18.78^{ij}	0.02038^{d}
	25	0	91.23^{g}	3.42^{ef}	1806^{gh}	29.92^{d}	23.71^{gh}	0.02589^{c}
	50	0	86.03^{g}	3.31^{f}	1595^{ij}	18.02^{gh}	21.16^{hi}	0.0242^{c}
	0	25	86.86^{g}	3.39^{ef}	1736^{hi}	26.02^{e}	23.99^{gh}	0.0241^{c}
	0	50	109.61^{d}	3.44^{def}	2121.6^{f}	34.62^{c}	37.28^{c}	0.02895^{b}
	25	25	104.6^{def}	3.58^{cdef}	2104^{f}	34.55^{c}	31.85^{d}	0.02893^{b}
	50	25	102.55^{f}	3.48^{def}	1907.6^{g}	38.33^{b}	27.88^{ef}	0.02443^{c}
	25	50	119.16^{c}	3.61^{cde}	2334de	44.18^{a}	54.07^{a}	0.03504^{a}
	50	50	107.48^{cd}	3.52^{def}	2126.6^{ef}	43^{a}	49.98^{b}	0.03158^{b}

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده اختلاف معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

The different letters in each column indicate a significant difference by the Duncan test at the 5% level

References منابع مورد استفاده

- Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*. 105: 121–126.
- Ahmad, Z., E.A. Waraich, C. Barutcular, H. Alharby, A. Bamagoos, F.E. Kizilgeci, F. Ozturk, A. Hossain, Y. Bayoumi, and A. El Sabagh. 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.
- Arabporian, P., H. Madani, and J. M Sinaki. 2013. Effect of polyamine, boron and molybdenum growth stimulant spray before flowering on yield and indices of safflower growth. *New Finding in Agriculture*. *7*(2): 241-251. (In Persian)
- Ashrafi, E., and J. Razmjoo. 2014. Effect of seed hydropriming and irrigation regimes on grain, biological yield, harvest index, oil and protein content of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars. *Applied Field Crops Research*. *27*(103): 61-68. (In Persian)
- Bates, L.S. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil*. 39: 205-207.
- Bheemanahalli, R., P. Ramamoorthy, S. Poudel, S. Samiappan, N. Wijewardane, and K.R. Reddy. 2022. Effects of drought and heat stresses during reproductive stage on pollen germination, yield, and leaf reflectance properties in maize (*Zea mays* L.). *Plant Direct*. 6(8): 434-448.
- 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, and A.C. Maehly .1955. Assay of catalases and peroxidase. *Methods in Enzymology*. 2: 764-775.
- Chang, C.J., and C.H. Koa. 1988. H_2O_2 metabolism during senescence of rice leaves changes in enzyme activities in light and darkness. *Plant Growth Regulation*. 25: 11-15.
- Chilimba, A.D.C., S.D. Young, C.R. Black, M.C. Meacham, J. Lammel, and M.R. Broadley. 2012. Agronomic biofortification of maize with selenium (Se) in Malawi. *Field Crops Research*. 125: 118-128.
- Dadnia, M. R. 2018. Wheat response to selenium under normal irrigation and water deficit conditions. *Journal of Crop Ecophysiology*. 12(1): 21-36. (In Persian)
- Dashadi, M., and A. Rasaei. 2020. Investigation of different levels of molybdenum and nitrogen on yield and yield components of chickpea cultivars. *Crop Physiology Journal*. 46: 81-96. (In Persian)
- Dola, D.B., M.A. Mannan, U. Sarker, M.A.A. Mamun, T. Islam, S. Ercisli, M.H. Saleem, B. Ali, and R.A. Marc. 2022. Nano-iron oxide accelerates growth, yield, and quality of Glycine max seed in water deficits. *Frontiers in Plant Science*. 13:992535-992547.
- Eshghi, S., J.A.T. Da Silva, and R. Ranjbar. 2010. Molybdenum and boron affect pollen germination of strawberry and fertile and infertile flowers of pomegranate. *Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology*. 4(2): 148-150.
- Feng, R., C. Wei, and M.S. Tu. 2013. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. *Environmental and Experimental Botany*. 87: 58–68.

- Ghassemi-Golezani, K., and R. Lotfi. 2013. Influence of water stress and pod position on oil and protein accumulation in soybean grains. *International Journal of Agronomy and Plant Production*. 4(9): 2341-2345.
- Godarzi, A., F. Bazrafshan, M. Zare, H. Faraji, and A.R. Safahani Langeroodi. 2017. Studying the effect of drought stress on yield and physiological characteristics in genotypes of canola (*Brassica napus* L.). *Helix*. 8: 1250-1258.
- Gonzalez. A., V. Bermejo, and B.S. Gimeno. 2010. Effect of different physiological traits on grain yield in barley grown under irrigated and water deficit conditions. *Journal of Agricultural Science.* 148: 319-328.
- Goshehgir, Z., R. KhavariNezhad, and S. Saadatman. 2010. The effects of selenium-molybdenum interaction on contents of photosynthetic pigments in tomato. *Journal of Plant Environmental Physiology*. 5(17): 14-23. (In Persian)
- Han, Z., X. Wei, D. Wan, W. He, X. Wang, and Y. Xiong. 2020. Effect of molybdenum on plant physiology and cadmium uptake and translocation in rape (*Brassica napus* L.) under different levels of cadmium stress. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 17(7): 2355-2372.
- Han-Wens, S., H. Jing, and K. Wei-Jun. 2010. Protective role of selenium on garlic growth under cadmium stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41: 195-204.
- Hawrylak-Nowak, B. 2008. Enhanced selenium content in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) by foliar fertilization. *Vegetable Crops Research Bulletin*. 69: 63-72.
- Hayyawi, N.J.H., M.H. Al-Issawi, A. Alrajhi, and H. Rihan. 2020. Molybdenum induces growth, yield, and defence system mechanisms of the Mung Bean (*Vigna radiata* L.) under water stress conditions. *International Journal of Agronomy*. 1-10.
- Heath, R.L., and L. Packer. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*.125: 189-198.
- Heidarzade, A., M. Esmaeili, M. Bahmanyar, and R. Abbasi. 2016. Response of soybean (*Glycine max*) to molybdenum and iron spray under well-watered and water deficit conditions. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*. 4(1): 37-46.
- Hirpara, D.V., H.L. Sakarvadia, A.S. Jadeja, L.C. Vekaria, H.P. Ponkia. 2019, Response of boron and molybdenum on groundnut (*Arachis hypogaea* L.) under medium black calcareous soil. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 8(5): 671-677.
- Hussein, H.A., O.M. Darwesh, B.B. Mekki. 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.
- Ighodaro, O.M., and O.A. Akinloye.2018. First line defence antioxidants-superoxide dismutase, catalase and glutathione peroxidase: Their fundamental role in the entire antioxidant defence grid. *Alexandria Journal of Medicine*. 54(4): 287-293.
- Ikram, M., N.I. Raja, B. Javed, M. Hussain, M. Ehsan, K. Malik, T. Sultana, and A. Akram. 2020. Foliar applications of bio-fabricated selenium nanoparticles to

improve the growth of wheat plants under drought stress. *Green Processing and Synthesis*. 9(1):706-714.

- Imran, M., X. Sun, S. Hussain, U. Ali, M.S. Rana, F. Rasul, S. Shaukat, and C. Hu. 2020. Molybdenum application regulates oxidative stress tolerance in winter wheat under different nitrogen sources. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 20(4):1827-1837.
- Jalalizand, F., and M. Goli. 2021. Optimization of microencapsulation of selenium with gum Arabian/Persian mixtures by solvent evaporation method using response surface methodology (RSM): soybean oil fortification and oxidation indices. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 15(1):495-507.
- Joshi, N.L., P.C. Mali, and A. Sexena. 1998. Effect of nitrogen and sulphur application on yield and fatty acid composition of mustard (*Brassica juncea* L.). *Journal of Oil Agronomy and Crop Science*.180: 59-63.
- Kavi Kishor, P.B., and N. Sreenivasulu, 2014. Is proline accumulation per se correlated with stress tolerance or is proline homeostasis a more critical issue? *Plant Cell Environ*. 37 (2): 300-311.
- Leng, Y., Y. Li, Y.H. Ma, L.F. He, and S.W. Li. 2021. Abscisic acid modulates differential physiological responses of roots, stems, and leaves in mung bean seedlings to cadmium stress. *Environmental Science and Pollution Research*. 28(5): 6030-6043.
- Malvi, U.R. 2011. Interaction of micronutrients with major nutrients with special reference to potassium. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences.* 24(1): 106-109.
- Manjili, M.J., S. Bidarigh, and E. Amiri, 2014. Study the effect of foliar application of nano chelate molybdenum fertilizer on the yield and yield components of peanut. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences Botany*. 5(1):67-71.
- Marivani, F., N. Ghaderi, and T. Javadi. 2019. Evaluation of lipid peroxidation and antioxidant reaction of strawberry to drought stress and dust. *Plant Productions*. 42(4): 535-550. (In Persian)
- Masoumzadeh, B.M., A.A. Imani, and S. Khayamaim. 2012. Salinity stress effect on proline and chlorophyll rate in four Beet cultivars. *Journal of Sugar Beet*. 3: 5453–5456. (In Persian)
- Michel, D.C., I.C.F. Vasques, G.D.C.R. Araújo, J.L. Castro, L.L.R. Assis, R.H.C.L. Reis, M.L. Souza Silva, and V. Faquim. 2020. Influence of molybdenum doses in inoculation and mineral fertilization in cowpea beans. *Bioscience Journal*. 36(1): 102-112.
- Mittal, D., G. Kaur, P. Singh, K. Yadav, and S.A. Ali. 2020. Nanoparticle-based sustainable agriculture and food science: Recent advances and future outlook. *Frontiers in Nanotechnology.* 2: 579954-579992.
- Nasar, J., and Z. Shah. 2017. Effect of iron and molybdenum on yield and nodulation of lentil. *ARPN Journal in Agricultural and Biological Sciences*. 12(11): 332-339.
- Nasrin, S., S. Saha, H.H. Begum, and R. Samad. 2020. Impacts of drought stress on growth, protein, proline, pigment content and antioxidant enzyme activities in rice (*Oryza sativa* L. var.). *Dhaka University Journal of Biological Sciences*. 29(1): 117-123.

- Naumann, G., L. Alfieri, K. Wyser, L. Mentaschi, R.A. Betts, and H. Carrao. 2018. Global changes in drought conditions under different levels of warming. *Geophysical Research Letters*. 45(7): 3285–3296.
- Nawaz, F., M.Y. Ashraf, R. Ahmad, E.A. Waraich, and M.A. Bukhari. 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.
- Nguyen, T.T.Q., L.T.H. Trinh, H.B.V. Pham, T.V. Le, T.K.H. Phung, S.H. Lee, and J.J. Cheong. 2020. Evaluation of proline, soluble sugar and ABA content in soybean (*Glycine max* L.) under drought stress memory. *AIMS Bioengineering*. 7(3):114-123.
- Petrie, J.R., X.R. Zhou, A. Leonforte, J. McAllister, P. Shrestha, Y. Kennedy, and S.P. Singh. 2020. Development of a *Brassica napus* (Canola) crop containing fish oil-like levels of DHA in the seed oil. *Frontiers in Plant Science.* 11: 727-742.
- Qu, L., W. Jia, Z. Dai, Z. Xu, M. Cai, W. Huang, and J.Xu. 2022. Selenium and molybdenum synergistically alleviate chromium toxicity by modulating Cr uptake and subcellular distribution in *Nicotiana tabacum* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 248: 114312- 11425.
- Rady, M.M., E.S.M. Desoky, S.M. Ahmed, E.F. Ali, S.M. Arnaout, and E. Selem. 2021. Foliar nourishment with nano-selenium dioxide promotes physiology, biochemistry, antioxidant defenses, and salt tolerance in *Phaseolus vulgaris*. *Plants.* 10(6): 1189-1209.
- Ramos, S.J., M.A. Rutzke, R.J. Hayes, V. Faquin, G. Luiz Roberto, and L. Li. 2011. Selenium accumulation in lettuce germplasm. *Planta*. 233: 649-660.
- Rios, J.J., B. Blasco, M.A. Rosales, E. Sanchez-Rodriguez, R. Leyva, L.M. Cervilla, L. Romero, and J.M. Ruiz. 2010. Response of nitrogen metabolism in lettuce plants subjected to different doses and forms of selenium. *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 90: 1914-1919.
- Sagisaka, S. 1976. The occurrence of peroxide in a perennial plant Populas gelrica. *Plant Physiology*. 57: 308-309.
- Saha, S., H.H. Begum, and S. Nasrin. 2019. Effects of drought stress on growth and accumulation of proline in five rice varieties (*Oryza Sativa* L.). *Journal of the Asiatic Society of Bangladesh, Science*. 45(2): 241-247.
- Sajedi, M., M. Asnaashari, M. Jafari, and A. Moshtaghi. 2017. Physiological, morphological and biochemical characteristics of four edible fig and two capri fig cultivars in response to drought stress. *Plant Production.* 40(3): 101-112. (In Persian)
- Sajedi, N, and H. Madani. 2017. Improvement of some physiological traits, yield and yield components of wheat and barley by using sodium selenate and sodium selenite in dry land conditions. *Journal of Crop Ecophysiology*. 41(1): 17-30. (In Persian)
- Semida, W.M., T.A. Abd El-Mageed, M.A. Gyushi, S.A. Abd El-Mageed, M.M. Rady, A. Abdelkhalik, and M.T. Abdelhamid. 2023. Exogenous selenium improves physio-biochemical and performance of drought-stressed *Phaseolus vulgaris* seeded in saline soil. *Soil Systems.* 7(3): 67-86.

- Seppanen, M., M. Turakainen, and H. Hartikainen. 2003. Selenium effects on oxidative stress in potato. *Plant Science*. 165: 311-319.
- Sey, A.A., T.H. Pham, V. Kavanagh, S Kaur, M. Cheema, L. Galagedara, and R. Thomas. 2020. Canola produced under boreal climatic conditions in Newfoundland and Labrador have a unique lipid composition and expeller press extraction retained the composition for commercial use. *Journal of Advanced Research*. 24: 423–434.
- Shirani Rad, A.H., A. Abbasian, and H. Aminpanah. 2013. Evaluation of rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivarsfor resistance against water deficit stress. *Bulgarian Journal of Agricultural Science.* 19(2): 266-273.
- Shoja, T., M. Majidian, and M. Rabiee. 2018. Effects of zinc, boron and sulfur on grain yield, activity of some antioxidant enzymes and fatty acid composition of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Acta Agriculturea Slovenica.* 111: 73-84.
- Sutuliene, R., L. Rageliene, P. Duchovskis, and J. Miliauskiene. 2022. The effects of nano-copper, molybdenum, boron, and-silica on pea growth, antioxidant properties, and mineral uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 22(1):801-814.
- Valladares, A., E. Flores, and A. Herrero. 2008. Transcription activation by Ntca and 2 oxoglutarate of three genes involved in heterocyst differentiation in the cyanobacterium Anabaena Sp. *Journal of Bacteriology.* 190(1): 6126-6133.
- Wu, S., C. Hu, Q. Tan, Z. Nie, and X. Sun, 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.
- Wu, S., C. Hu, Q. Tan, and X. Sun. 2017. Nitric oxide mediates molybdenum-induced antioxidant defense in wheat under drought stress. *Frontiers in Plant Science*. 8: 1-11.
- Xiao, Z., Y. Pan, C. Wang, X. Li, Y. Lu, Z. Tian, and H. Wang. 2022. Multi-functional development and utilization of rapeseed: Comprehensive analysis of the nutritional value of rapeseed sprouts. *Foods.* 11(6): 778-792.
- Xue, T., H. Hartikainen, and V. Piironen. 2001. Antioxidative and growth promoting effect of selenium in senescing lettuce. *Plant Soil*. 237: 55-61.
- Yan, J., F. Wang, H. Qin, G. Chen, N. Eviatar, T. Fahima, and J. Cheng. 2011. Natural variation in grain selenium concentration of wild barley, *Hordeum spontaneum*, populations from Israel. *Biological Trace Element Research*. 142: 773-786.
- Yanez Barrientes, E., C. Rodriguez, and K. Wrobel. 2012. Impact of cadmium and selenium exposure on trace elements, fatty acids and oxidative stress in Lepidium sativum. *Journal of the Mexican Chemical Society*. 56: 03-09.
- Zhang, M., C. Hu, X. Zhao, Q. Tan, X. Sun, and N. Li. 2012. Impact of molybdenum on Chinese cabbage response to selenium in solution culture. *Soil Science and Plant Nutrition*. 58(5): 595-603.

Research Article DOI:

Effect of Integrated Application of Selenium and Molybdenum Nanoparticles on some Agronomic and Biochemical Characteristics of Spring Rapeseed under Water Deficit Stress

Mitra Rostami hir [1*], Parisa Sheikhzadeh[2], Saeid Khomari[2], and Nasser Zare[3]

Received: September 2023, Revised: 21 February 2024, Accepted: 29 June 2024

Abstract

Foliar spraying of nanoparticles is one of the most useful and efficient solutions in drought stress conditions, which increases the plant's tolerance to drought stress and increases yield. This study was to investigate the effect of foliar application of nano selenium and nano molybdenum on some agricultural and biochemical indices of spring rapeseed (Hyola 401) under drought stress. The experiment was carried out as a split-plot experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications at research farm station of University of Mohaghegh Ardabili in cropping years of 2016-2017. The irrigation factor includes normal irrigation and and irrigation stoping at flowering stage as the main plot and the foliar spraying with nanoselenium and nano-oxide molybdenum, including not using nanoparticles as a control treatment (spraying solution with pure water), 25 mg.L^{-1} nano-oxide molybdenum, 50 mg.L^{-1} of nano-oxide molybdenum, 25 mg.L^{-1} nano selenium, 50 mg.L^{-1} nano selenium, 25 mg.L^{-1} nano-oxide molybdenum + 25 mg.L^{-1} nano selenium, 50 mg.L^{-1} nano molybdenum + 25 mg.L^{-1} nano selenium, 25 mg.L^{-1} nano-oxide molybdenum + 50 mg.L^{-1} nano selenium and 50 mg.L^{-1} nano-oxide molybdenum + 50 mg.L^{-1} nano selenium) were set as subplots. Foliar spraying of rapeseed plants was done at both vegetative and flowering stages. Drought stress decreased the average height of the bush, the number of pods per plant, the number of seeds per pod, the weight of 1000 seeds, yield of seeds and Percentage of seed oil by 7.84%, 19.3%, 20.15%, 28.33%, 29.79% and 5.02% respectively. Foliar spraying of plants with 25 mg.L^{-1} nano-oxide molybdenum + 50 mg. L^{-1} nano-selenium increased the number of pod, 1000-seed weight, and seed yield by 66.16, 35.7, and 59.47 percent, respectively, under drought stress and increased 62.7, 33. 9 and 11.96% in normal irrigation conditions also caused a significant decrease in the amount of malondialdehyde and a significant increase in the amount of proline and activity of catalase and peroxidase enzymes. Therefore, foliar spraying of rapeseed plants with this concentration of nanoparticles was found to be useful and effective for reducing the destructive effects of drought stress and improving seed yield.

Key words: Antioxidant enzymes, Malondialdehyde, Proline, rapeseed, Selenium and molybdenum nanoparticles.

1 Assistant Professor at University of Applied Sciences and Technology, Tehran, Iran.
2- Associate Professor, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
3- Professor, Department of Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
**Corresponding Authors: m.rostami@uast.ac.ir*