



علوم و تحقیقات بذر ایران

سال یازدهم/ شماره چهارم/ ۱۴۰۳ (۵۲ - ۳۵)

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22124/jms.2024.8797



اثر پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم بر بهبود شاخص‌های عملکردی و محتوای روغن کاملینا (*Camelina sativa*) تحت تنش شوری

محمد حقانی‌نیا^۱، علی نجفی‌فر^۲، فریدون سلیمانی^۳، امیر میرزائی^۴، عبدالله جوانمرد^{۵*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴

چکیده

تنش شوری یکی از چالش‌های اساسی کشاورزی است که منجر به کاهش رشد و تولید محصولات زراعی می‌شود. اگرچه پرایمینگ بذر با نانوذرات به عنوان روشی نوین برای کاهش اثرات تنش‌های محیطی معرفی شده است، اطلاعات کمی در خصوص تأثیر نانوذرات منیزیم بر گیاه کاملینا (*Camelina sativa*) در شرایط تنش شوری وجود دارد. در این راستا، این پژوهش با هدف بررسی اثر پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم بر رشد، ویژگی‌های بیوشیمیایی و کیفیت بذر کاملینا تحت تنش شوری در گلخانه تحقیقاتی گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشگاه مراغه انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل برپایه طرح کاملاً تصادفی با سه سطح تنش شوری (۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار NaCl) و چهار غلظت نانوذرات منیزیم (۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) اجرا گردید. نتایج نشان داد که تنش شوری موجب کاهش نسبت پتاسیم به سدیم، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، محتوای روغن و تغییرات نامطلوب در ترکیب اسیدهای چرب شد. در مقابل، پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم، به‌ویژه در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، باعث بهبود نسبت پتاسیم به سدیم، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، افزایش محتوای ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی شد. این تیمار همچنین عملکرد دانه و محتوای روغن را به ترتیب ۱۶۸ و ۴۳ درصد افزایش داد و کیفیت روغن را با بهبود اسیدهای چرب غیراشباع و کاهش اسید پالمیتیک ارتقا بخشید. بطور کلی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم، به‌ویژه در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، می‌تواند ویژگی‌های کمی و کیفی بذر کاملینا را در شرایط شوری بهبود بخشد و با تکرار آن در شرایط مزرعه‌ای و آزمایشات منطقه‌ای به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای تعدیل اثرات شوری و ارتقای بهره‌وری تولید مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پرایمینگ بذر، تنش شوری، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، کاملینا، کیفیت روغن، نانوذرات

۱- پژوهشگر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران.
haghani72@gmail.com

۲- دانشیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران.
alinaajaffar@yahoo.com

۳- استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران.
fersolaimanii@gmail.com

۴- استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران.
amir.mirsaei53@gmail.com

۵- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.
a.javanmard@maragheh.ac.ir

*نویسنده مسئول

مقدمه

افزایش تنش‌های محیطی، به‌ویژه تنش شوری، یکی از چالش‌های اساسی در تولید پایدار محصولات کشاورزی است (Adil et al., 2022; Bazvand et al., 2024). گسترش اراضی شور به دلیل تغییرات اقلیمی و مدیریت نادرست منابع آب و خاک، تولید محصولات کشاورزی را در بسیاری از مناطق تحت تأثیر قرار داده و امنیت غذایی را با تهدید مواجه کرده است (Stasnik et al., 2024). این موضوع به‌ویژه در کشورهای خشک و نیمه‌خشک از اهمیت بیش‌تری برخوردار است (Ghasempour et al., 2024). تنش شوری موجب کاهش جذب آب و عناصر غذایی، اختلال در تعادل یونی و فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی می‌شود (Khoraki et al., 2024; Kokebie et al., 2020). همچنین، تنش شوری با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، آسیب‌های اکسیداتیو به سلول‌های گیاهی وارد می‌کند و در نتیجه، عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد (Naheed et al., 2021; Teimoori et al., 2023). بنابراین، پژوهشگران به دنبال راهکارهایی برای کاهش اثرات منفی این تنش‌ها هستند (Khan et al., 2020). در این راستا، استفاده از روش‌های جایگزین و مؤثر به‌جای کودهای شیمیایی که آسیب‌های زیست‌محیطی قابل توجهی دارند، مورد توجه قرار گرفته است (Alsamadany et al., 2024a; Haghaninia et al., 2024). روش‌های پایدار و ایمن‌تر مانند پرایمینگ بذر می‌توانند به‌عنوان راهکاری نوین و مناسب برای تعدیل اثرات منفی شوری و افزایش کارایی استفاده از منابع در کشاورزی مطرح شوند (Alhammad et al., 2023).

پرایمینگ بذر، به‌عنوان یکی از تکنیک‌های پیش‌درمانی، شامل آماده‌سازی بذر با استفاده از مواد مختلف پیش از کاشت است تا تحمل بذر با تنش‌های محیطی افزایش یابد (Bahcesular et al., 2020; Mahdy et al., 2020). این فرآیند با ایجاد تغییرات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی درون بذر، موجب افزایش سرعت جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاه و بهبود مقاومت آن به شرایط تنش‌زا می‌شود (Ghasempour et al., 2024; Mazhar et al., 2022; Subramanyam et al., 2019). پرایمینگ به‌ویژه در شرایط تنش‌های غیرزیستی مانند شوری، به گیاه کمک می‌کند تا با کاهش اثرات منفی

ROS و افزایش فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی، رشد و عملکرد بهتری داشته باشد (Ghasempour et al., 2024; Khan et al., 2020). اخیراً، پرایمینگ بذر با نانوذرات به‌عنوان رویکردی نوین و مؤثر برای بهبود جوانه‌زنی و مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی، به‌ویژه شوری، مورد توجه قرار گرفته است (Khan et al., 2020).

نانوذرات منیزیم (MgO) به‌عنوان یکی از نانوذرات فلزی با ویژگی‌های خاص، در سال‌های اخیر توجه زیادی در زمینه کشاورزی به خود جلب کرده‌اند (Mirrani et al., 2024). منیزیم یک عنصر ضروری برای رشد گیاهان است که نقش مهمی در فرایندهای فتوسنتزی، سنتز کلروفیل و انتقال انرژی در گیاهان ایفا می‌کند (Ali et al., 2020; Kanjana, 2024). با این حال، به دلیل تنش‌های محیطی مانند شوری، گیاهان قادر به جذب مؤثر عناصر غذایی از جمله منیزیم از خاک نمی‌شوند و این مشکل می‌تواند منجر به کاهش رشد و عملکرد گیاهان شود (Faiz et al., 2022; Amin et al., 2024; Mirrani et al., 2024). نانوذرات منیزیم به دلیل اندازه نانو و سطح بالای واکنش‌پذیری، قابلیت دسترسی بالاتری به گیاهان دارند و با افزایش فعالیت‌های بیوشیمیایی در گیاه، می‌توانند اثرات مثبتی بر کاهش آسیب‌های شوری داشته باشند (Fatemi et al., 2022; Ghassemi-Golezani and Farhangi-Abriz, 2021). این ویژگی‌ها، نانوذرات منیزیم را به یک گزینه مناسب برای بهبود جذب منیزیم و دیگر عناصر غذایی در شرایط تنش تبدیل کرده است (Amirfakhrian et al., 2024; Mirrani et al., 2024; Ali et al., 2024). در پژوهشی با ارزیابی اثر پرایمینگ بذر با نانوذرات سیلیکون در گیاه ذرت (*Zea mays* L.) تحت تنش شوری، محققان دریافتند تنش شوری پارامترهای رشد، قندهای محلول، فنل کل و پتاسیم ذرت را کاهش داد اما پرایمینگ بذر با نانوذرات سیلیکون با بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، قندهای محلول، پروتئین‌های محلول و نسبت پتاسیم به سدیم موانع رشد را در گیاهان تحت تنش کاهش داد (Alsamadany et al., 2024). در پژوهش دیگری محققان نشان دادند در گیاه کلزا (*Brassica napus*) تحت تنش خشکی، پرایمینگ بذر با نانواکسید کلسیم باعث افزایش درصد جوانه زنی، تعداد برگ، تعداد غلاف در شاخه، تعداد دانه در غلاف، وزن ۱۰۰ دانه و عملکرد دانه شد (Mazhar et al., 2022). علاوه بر این، پژوهشگران با بررسی اثرات تنش شوری و

پرایمینگ بذر با نانوذرات نقره بر آرنز مرواریدی (*Pennisetum glaucum* L.) اظهار داشتند تنش شوری منجر به آسیب اکسیداتیو شد، با این حال پرایمینگ بذر با نانوذرات نقره مقاومت گیاه را در برابر شوری افزایش داد و ویژگی‌های بیوشیمیایی مانند فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوای فنول و فلاونوئید را بهبود بخشید (Khan et al., 2020).

در کشور ایران به دلیل کمبود روغن خوراکی و وابستگی به واردات، کشت دانه‌های روغنی مقاوم به شرایط نامساعد از اهمیت بالایی برخوردار است. کاملینا (*Camelina sativa*) که به نام کتان کاذب نیز شناخته می‌شود، یکی از گیاهان دانه روغنی با ارزش از خانواده شب‌بوئیان (Brassicaceae) است (Haghaninia et al., 2023). کاملینا دارای محتوای بالای روغن با اسیدهای چرب مفید مانند لینولنیک و لینولئیک اسید است که هم در صنایع غذایی و هم در بیودیزل کاربرد دارد (Fatemeh et al., 2020). همچنین، این گیاه دارای آنتی‌اکسیدان‌هایی مانند توکوفرول است که به پایداری روغن آن کمک می‌کند (Sanehkoori et al., 2021; Huang et al., 2021; Stasnik et al., 2024). این گیاه دارای مزایای قابل توجهی از جمله مقاومت نسبی به شرایط نامساعد، نیاز پایین به آب و کود و توانایی رشد در خاک‌های فقیر است که آن را به گزینه‌ای مناسب برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل کرده است (Waraich et al., 2021; Forozan Bakyani et al., 2022). گزارش متیس و همکاران (Matthees et al., 2018) کاملینا تا ۸ دسی‌زیمنس شوری را تحمل کرده و در این سطح شوری، رشد گیاه به‌طور قابل توجهی کاهش نمی‌یابد. اما در سطوح بالاتر شوری، عملکرد گیاه به‌طور چشمگیری کاهش یافته، بطوری که در شوری ۳۵ دسی‌زیمنس، عملکرد گیاه حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، نتایج تحقیق کبیری و همکاران (Kabiri et al., 2024) نشان دادند که کاملینا توانایی تحمل شوری تا ۵۰ میلی‌مولار را دارد و تنش‌های اسمزی و شوری در این سطح تأثیر منفی قابل توجهی بر رشد گیاهچه‌ها نداشته‌اند. با این حال، با افزایش تنش شوری به ۱۵۰ میلی‌مولار، عملکرد گیاه به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. بنابراین، با توجه به آسیب‌پذیری گیاه کاملینا در برابر شوری‌های بالا، استفاده از روش‌هایی نظیر پرایمینگ با نانوذرات برای بهبود تحمل

گیاه به شوری و افزایش عملکرد آن در شرایط تنش شوری شدید ضروری است. این روش‌ها می‌توانند به تقویت مقاومت گیاه و افزایش تولید و کیفیت محصول در مناطق با تنش شوری کمک کنند. در نهایت، با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد گیاه کاملینا و پتانسیل اقتصادی آن، یافتن راه‌حل‌های مدیریتی مناسب برای بهبود کشت این گیاه می‌تواند نقشی مؤثر در افزایش تولید پایدار و تحقق اهداف توسعه پایدار کشور ایفا کند (Haghaninia et al., 2024a).

با وجود پژوهش‌های متعدد در زمینه استفاده از نانوذرات برای بهبود مقاومت گیاهان به شوری، خلأ تحقیقاتی قابل توجهی در خصوص استفاده از نانوذرات منیزیم به‌عنوان یک عامل مؤثر در پرایمینگ بذر کاملینا وجود دارد. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی و ارائه اطلاعات جدید در خصوص استفاده از نانوذرات منیزیم در پرایمینگ بذر کاملینا برای بهبود مقاومت به شوری و افزایش کمیت و کیفیت کاملینا طراحی شده است؛ رویکردی که می‌تواند راهکاری مؤثر و نوآورانه برای افزایش تولید روغن‌های گیاهی در ایران و کاهش وابستگی به واردات باشد. در این پژوهش، فرض بر این است که نانوپرایمینگ منیزیم، موجب بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی، کاهش تنش اکسیداتیو و در نهایت افزایش کمیت و کیفیت روغن کاملینا در شرایط شوری خواهد شد. از این‌رو، این تحقیق می‌تواند به‌عنوان یک نوآوری در کشاورزی پایدار با استفاده از فناوری نانو در مدیریت تنش‌های محیطی و افزایش بهره‌وری گیاهان روغنی در شرایط نامساعد شوری مورد توجه قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

طراحی آزمایش و تیمارها: این آزمایش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی (CRD) در سه تکرار مستقل با سه سطح تنش شوری ۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار NaCl و چهار سطح پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم (MgO) در غلظت‌های ۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر اجرا شد. هدف از این آزمایش، ارزیابی اثرات پرایمینگ بذر بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکرد گیاه کاملینا در شرایط تنش شوری بود.

شرایط گلخانه و محیط کشت: این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشگاه مراغه در بهار و تابستان سال ۱۴۰۲ انجام شد. شرایط

دسترس ۵/۶ میلی گرم بر کیلوگرم و پتاسیم ۴۰۴ میلی گرم بر کیلوگرم بود. در نهایت، در گلدان‌های ۷ لیتری با ارتفاع و عمق ۲۱ سانتی‌متر و قطر دهانه ۲۰ سانتی‌متر، ۱۰ بذر در عمق یک سانتی‌متری خاک کشت شد.

اعمال تنش شوری: برای اعمال تنش شوری، تمامی گیاهان ابتدا در شرایط بدون شوری (۰ میلی‌مولار NaCl) با استفاده از آب مقطر آبیاری شدند تا رشد اولیه آن‌ها در محیطی کاملاً غیرتنش‌زا انجام شود. سپس برای اجتناب از ایجاد تنش ناگهانی و تضمین سازگاری تدریجی گیاهان با شرایط شوری، افزایش شوری به صورت مرحله‌ای طراحی شد. در این روش، غلظت شوری در طی دو هفته و در چهار مرحله افزایش یافت. در هر مرحله، ۲۵ میلی‌مولار NaCl به غلظت محلول آبیاری اضافه شد، به طوری که تغییرات در فواصل زمانی هر سه روز یک‌بار انجام شد. این روند تا رسیدن به غلظت‌های نهایی ۱۰۰ میلی‌مولار و ۲۰۰ میلی‌مولار ادامه یافت. پس از دستیابی به غلظت‌های هدف، گیاهان با محلول‌های شوری تازه‌ساز و استاندارد به طور هفتگی آبیاری شدند. حجم محلول آبیاری در هر نوبت به دقت کنترل شد تا رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه حفظ شود و از ایجاد تنش‌های آبی جلوگیری گردد. به منظور پیشگیری از تجمع نمک در خاک و اثرات ثانویه آن، آبیاری‌ها همراه با شستشوی کنترل‌شده‌ی خاک انجام گرفت (Ghassemi-Golezani and Farhangi-Abriz, 2021).

نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری صفات بیوشیمیایی: نمونه‌برداری از برگ‌های گیاه برای اندازه‌گیری صفات بیوشیمیایی در زمان گلدهی صورت گرفت. بدین منظور، برگ‌های سالم و جوان از هر گلدان به طور تصادفی برداشت شد. سپس، نمونه‌ها فریز شده و در دمای منفی ۸۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند تا از تجزیه و تغییرات بیوشیمیایی جلوگیری شود (Haghaninia et al., 2024b).

ارزیابی غلظت سدیم و پتاسیم: به منظور اندازه‌گیری غلظت یون‌های سدیم و پتاسیم، ۰/۲ گرم ماده خشک اندام هوایی در کوره الکتریکی با دمای ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت چهار ساعت در کروزه چینی حرارت داده شد. خاکستر به دست آمده با پنج میلی‌لیتر اسید کلریدریک بدون تنش شستشو داده شد تا کاتیون‌ها آزاد شوند. سپس، عصاره با کاغذ صافی، صاف شد. در نهایت، برای اندازه‌گیری

محیطی گلخانه شامل دمای 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد در طول روز و 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد در شب، با رطوبت نسبی ۶۰-۷۰ درصد تنظیم گردید. نور طبیعی از طریق پنجره‌ها و سقف گلخانه تأمین شد و از آنجایی که در طول دوره کشت تابش کافی بود، نیازی به نوردهی مصنوعی نبود. **تهیه بذر و نانوذرات مورد استفاده:** بذرهای کاملینا از شرکت بیستون شفا، کرمانشاه، تهیه شدند. این بذرهای مطابق با استانداردهای بین‌المللی (ISTA (International Seed Testing Association) با درصد جوانه‌زنی حداقل ۹۰ درصد مورد ارزیابی قرار گرفتند. علاوه بر این، نانوذرات منیزیم برای پرایمینگ بذرهای شرکت نانوثانی مشهد تأمین گردید. طبق اطلاعات ارائه شده توسط این شرکت، نانو پودر مذکور دارای خلوص ۹۹ درصد، اندازه ذرات ۲۰ نانومتر، مساحت سطح ویژه ۲۰ مترمربع بر گرم و رنگ سفید است. مورفولوژی ذرات به صورت چندوجهی بوده و چگالی توده‌ای آن ۰/۱۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و چگالی حقیقی ۳/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب تعیین شده است.

پرایمینگ بذر: قبل از اعمال تیمارها، ابتدا بذرهای با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم ضدعفونی و سپس سه مرتبه با آب مقطر شستشو داده شدند. سپس بذرهای در محلول‌های نانوذرات منیزیم با غلظت‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور شدند. این فرآیند در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در شرایط تاریکی انجام شد تا از آسیب به جوانه‌زنی جلوگیری شود. بذرهای تیمار شده سپس در دمای معمول گلخانه (۲۵ درجه سانتی‌گراد) خشک شدند. برای آماده‌سازی محلول‌های نانوذرات، پودر منیزیم به دقت در آب دیونیزه حل شده و به غلظت‌های مورد نظر (۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) رسید. غلظت‌های مورد استفاده، براساس مطالعات پیشین و با هدف بررسی تأثیرات نانوذرات در سطوح مختلف، از غلظت پایه تا حداکثر غلظت‌های مورد بررسی در تحقیقات مشابه انتخاب شدند.

آماده‌سازی بستر و کاشت: خاک مورد استفاده از مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه تهیه و پس از هوادهی و خشک‌کردن در سایه از الک با مش ۲ میلی‌متر عبور داده شد. براساس نتایج تجزیه خاک، بافت خاک به صورت لوم رسی شنی با هدایت الکتریکی ۱/۲۲ دسی-زیمنس بر متر، اسیدیته ۷/۹، مواد آلی ۰/۷۷ درصد، غلظت کل نیتروژن ۰/۰۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم، فسفر قابل

یون‌های سدیم و پتاسیم در محلول حاصله، از دستگاه فلایم فتومتر استفاده شد (Khoraki and Farhoudi, 2020).

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی: فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) با استفاده از روش ابی (Aebi, 1984) و بر اساس تجزیه H_2O_2 اندازه‌گیری شد. برای این منظور، نمونه با بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH=7) و محلول H_2O_2 به غلظت ۳۰ میلی‌مولار مخلوط شد. کاهش جذب H_2O_2 در طول موج ۲۴۰ نانومتر به مدت یک دقیقه در دمای اتاق ثبت شد. علاوه بر این، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) بر اساس روش بائوچامپ و فریدویچ (Fridovich and Beauchamp, 1971) با استفاده از واکنش نورفتو (NBT) سنجیده شد. برای تهیه مخلوط واکنش، بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH=7.8)، EDTA، ریوفلاوین، و NBT به نمونه اضافه و مخلوط در معرض نور قرار گرفت. کاهش جذب NBT در طول موج ۵۶۰ نانومتر به عنوان فعالیت SOD در نظر گرفته شد. همچنین، به منظور اندازه‌گیری فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز (GPX) از روش شانس و ماهلی (Chance and Maehly, 1955) استفاده گردید. بطور خلاصه، نمونه با بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (pH=7) و H_2O_2 و گایاکول مخلوط شد و در نهایت، افزایش جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر ثبت شد.

اندازه‌گیری فنل کل و فلانویید کل: محتوای فنل کل به روش Folin-Ciocalteu اندازه‌گیری شد (Singleton and Rossi, 1965). بدین منظور، ۰/۵ گرم از برگ‌های تازه با ۱۰ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد استخراج و پس از سانتریفیوژ، ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره با ۲/۵ میلی‌لیتر معرف Folin-Ciocalteu و ۲ میلی‌لیتر کربنات سدیم ۷/۵ درصد مخلوط شد. نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق قرار گرفتند و جذب نوری در طول موج ۷۶۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، محتوای فنل کل با استفاده از منحنی استاندارد گالیک اسید محاسبه شد. محتوای فلاونویید کل به روش آلومینیوم کلرید اندازه‌گیری شد (Chang et al., 2002). بدین منظور، ۰/۵ میلی‌لیتر عصاره متانولی با ۲ میلی‌لیتر آب مقطر و ۰/۱۵ میلی‌لیتر محلول آلومینیوم کلرید ۵ درصد مخلوط گردید. پس از ۵ دقیقه، ۱ میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید ۱ مولار اضافه و حجم نهایی به ۵ میلی‌لیتر رسانده شد. در نهایت، جذب نوری در ۴۱۵ نانومتر خوانده شد.

اندازه‌گیری محتوای مالون‌دی‌آلدهید و پراکسید هیدروژن: برای اندازه‌گیری مالون‌دی‌آلدهید (MDA)، ابتدا نمونه گیاهی به طور کامل همگن شده و در محلول تولوئن-تتراهیدروفوران (THF) استخراج شدند. پس از سانتریفیوژ کردن نمونه، محلول رویی به همراه معرف توپولوکینون و اسید استیک یخ‌زده مخلوط و به مدت ۳۰ دقیقه در بن‌ماری ۹۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. سپس جذب رنگ در طول موج ۵۳۲ نانومتر اندازه‌گیری گردید (Heath and Packer, 1968). علاوه بر این، برای اندازه‌گیری میزان پراکسید هیدروژن، ابتدا بافت گیاهی به طور کامل همگن شده و در محلول تری‌کلرواستیک اسید (TCA) نرمال استخراج شد. سپس محلول حاصل سانتریفیوژ شده و به محلول رویی معرف کیتانیل و واکنش‌دهنده‌های مناسب اضافه گردید. پس از مخلوط شدن، مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه در دمای اتاق قرار داده شد. در نهایت، جذب در طول موج ۴۱۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Mukherjee and Choudhuri, 1983).

اندازه‌گیری درصد و عملکرد روغن: به منظور استخراج روغن موجود در بذور کاملینا، ۵ گرم از نمونه بذری هر تیمار به وسیله آسیاب به صورت کامل پودر و به آن ۲۵ میلی‌لیتر پترولیوم اتر به عنوان حلال اضافه شد. پس از آن، نمونه‌ها به شیکر منتقل و با سرعت ۱۶۰ دور در دقیقه به مدت هشت ساعت شیک شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شدند. در ادامه لایه رویی به وسیله کاغذ صافی فیلتر شده و جداسازی انجام گردید. لازم بذکر است که به منظور استخراج کامل روغن مراحل ذکر شده دو الی سه بار تکرار گردید (Haghaninia et al., 2024a). پس از اتمام فرآیند استخراج، حلال از روغن جدا و روغن استخراج شده در دمای اتاق خشک شد. درصد روغن با تقسیم وزن روغن استخراج‌شده بر وزن خشک بذر و ضرب آن در ۱۰۰ محاسبه شد. علاوه بر این، برای اندازه‌گیری عملکرد روغن، ابتدا وزن کل بذرها اندازه‌گیری شد. سپس درصد روغن که بیش‌تر محاسبه شده بود، به این مقدار اعمال گردید و عملکرد روغن به عنوان میزان روغن تولیدشده از بذرها گزارش شد (Haghaninia et al., 2024a).

سنجش ترکیبات روغن: برای شناسایی ترکیبات اسیدهای چرب موجود در روغن کاملینا از دستگاه کروماتوگرافی گازی مدل Agilent 5977A ساخت کشور

آمریکا متصل شده به طیف سنجی جرمی (GC-MS) و ستون HP-5MS (پنج درصد فنیل متیل پلی سیلوکسان، به طول ۳۰ متر، قطر داخلی ۰/۲۵ میلی‌متر و ضخامت ماده جاذب ۰/۲۵ میکرومتر) استفاده شد. همچنین، برای جداسازی ترکیبات از دستگاه نامبرده شده با آشکارساز یونیزاسیون شعله‌ای (FID) و ستون VF-5MS (به طول ۳۰ متر، قطر داخلی ۰/۲۵ میلی‌متر و ضخامت ماده جاذب ۰/۵۰ میکرومتر) استفاده شد. در نهایت، از نرم افزار Chemstation و مخلوط FAME (Supelco 37 Component FAME Mix Bellefonte, PA, USA) به عنوان رفرنس جهت شناسایی ترکیبات استفاده شد. کمی کردن ترکیبات روغن با استفاده از انتگرال‌گیری و محاسبه مساحت سطح زیر پیک انجام گردید (Haghaninia et al., 2024a).

اندازه‌گیری وزن هزار دانه و عملکرد دانه: به منظور برداشت نهایی، برای جلوگیری از آسیب به دانه‌ها و حفظ کیفیت آن‌ها، گیاهان بصورت دستی از پایه قطع شده و دانه‌ها از غلاف‌ها جدا گردید. پس از برداشت، دانه‌ها بلافاصله برای خشک شدن به آزمایشگاه منتقل شدند. دانه‌ها در شرایط محیطی و با رطوبت کم تا رسیدن به رطوبت متعادل و مناسب نگهداری شدند تا عملکرد دانه به‌طور دقیق اندازه‌گیری شود. همچنین، پس از برداشت گیاهان و جدا کردن دانه‌ها از خورجین، تعداد هزار دانه شمارش و وزن آن‌ها با ترازوی دیجیتال توزین و وزن هزاردانه در واحد گرم به دست آمد (Haghaninia et al., 2023).

برای تحلیل آماری و تجزیه داده‌ها در این تحقیق از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹،۳) استفاده شد. تمامی داده‌ها با استفاده از طرح کاملاً تصادفی (CRD) با سه سطح تنش شوری و چهار سطح پرایمینگ با نانوذرات منیزیم تجزیه و تحلیل شدند. در این راستا، برای مقایسه میانگین‌ها و شناسایی تفاوت‌های معنی‌دار بین تیمارها از آزمون مقایسه میانگین LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ استفاده گردید و نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار Excel 2013 رسم شدند.

نتایج و بحث

محتوای سدیم، پتاسیم، و نسبت پتاسیم به سدیم (K/Na)

محتوای سدیم، پتاسیم، و نسبت پتاسیم به سدیم (K/Na) به‌طور معناداری تحت تأثیر تنش شوری، پرایمینگ

بذر و اثر متقابل این دو فاکتور قرار گرفتند (جدول ۱). بیش‌ترین مقدار سدیم در تیمار تنش شوری ۲۰۰ میلی‌مولار بدون پرایمینگ مشاهده شد، در حالی که کم‌ترین مقدار آن در شرایط عدم تنش و پرایمینگ شده با ۳۰۰ میلی‌گرم MgO به‌دست آمد. از سوی دیگر، بیش‌ترین محتوای پتاسیم در شرایط بدون تنش شوری با پرایمینگ ۳۰۰ میلی‌گرم MgO مشاهده شد و کم‌ترین مقدار آن به تیمار تنش شوری ۲۰۰ میلی‌مولار بدون پرایمینگ اختصاص یافت (شکل ۱). علاوه بر این، بالاترین نسبت K/Na نیز در بذور پرایمینگ شده با ۳۰۰ میلی‌گرم MgO و در شرایط بدون تنش شوری مشاهده شد (شکل ۱). نتایج همچنین نشان داد که تنش شوری ۲۰۰ میلی‌مولار بدون پرایمینگ، محتوای سدیم را نسبت به شاهد ۵/۵ برابر افزایش داد. در مقابل، پرایمینگ با ۳۰۰ میلی‌گرم MgO در شرایط بدون تنش، موجب افزایش ۴۷/۲ درصدی محتوای پتاسیم نسبت به شاهد شد. علاوه بر این، پرایمینگ با نانوذرات منیزیم تأثیر مثبتی بر نسبت K/Na داشت؛ به‌طوری‌که این نسبت در تیمار عدم تنش پرایمینگ شده با ۳۰۰ میلی‌گرم MgO در مقایسه با تنش شوری ۲۰۰ میلی‌مولار بدون پرایمینگ ۸۴/۵ درصد و نسبت به شاهد ۱۰/۱ درصد افزایش یافت (شکل ۱). تنش شوری با افزایش جذب یون‌های سدیم و رقابت آن‌ها با یون‌های پتاسیم برای جایگاه‌های جذب در غشاهای سلولی، منجر به اختلال در تعادل یونی گیاه می‌شود (El-Badri et al., 2021). این وضعیت می‌تواند موجب کاهش نسبت K/Na و در نهایت اختلال در فرایندهای فیزیولوژیک، نظیر تنظیم اسمزی و فعالیت آنزیم‌ها شود (Alsaedi et al., 2019). محققان دیگری با ارزیابی اثر تنش شوری بر گیاه آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) گزارش کردند در شرایط شوری، سطوح بالای سدیم نه تنها با جذب پتاسیم، کلسیم و منیزیم تداخل می‌کند بلکه یکپارچگی غشاهای ریشه را مختل کرده و خاصیت انتخابی آن‌ها را تغییر می‌دهد. در مقابل، پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم اثرات مثبتی بر بهبود محتوای پتاسیم و نسبت K/Na در کاملینا نشان داد. این اثر ممکن است به نقش نانوذرات منیزیم در افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و بهبود سیستم دفاعی گیاه مرتبط باشد (Subramanyam et al., 2019). نانوذرات به دلیل سطح ویژه بالا و قابلیت نفوذپذیری بیش‌تر، می‌توانند با تأمین یون‌های منیزیم، توانایی گیاه را

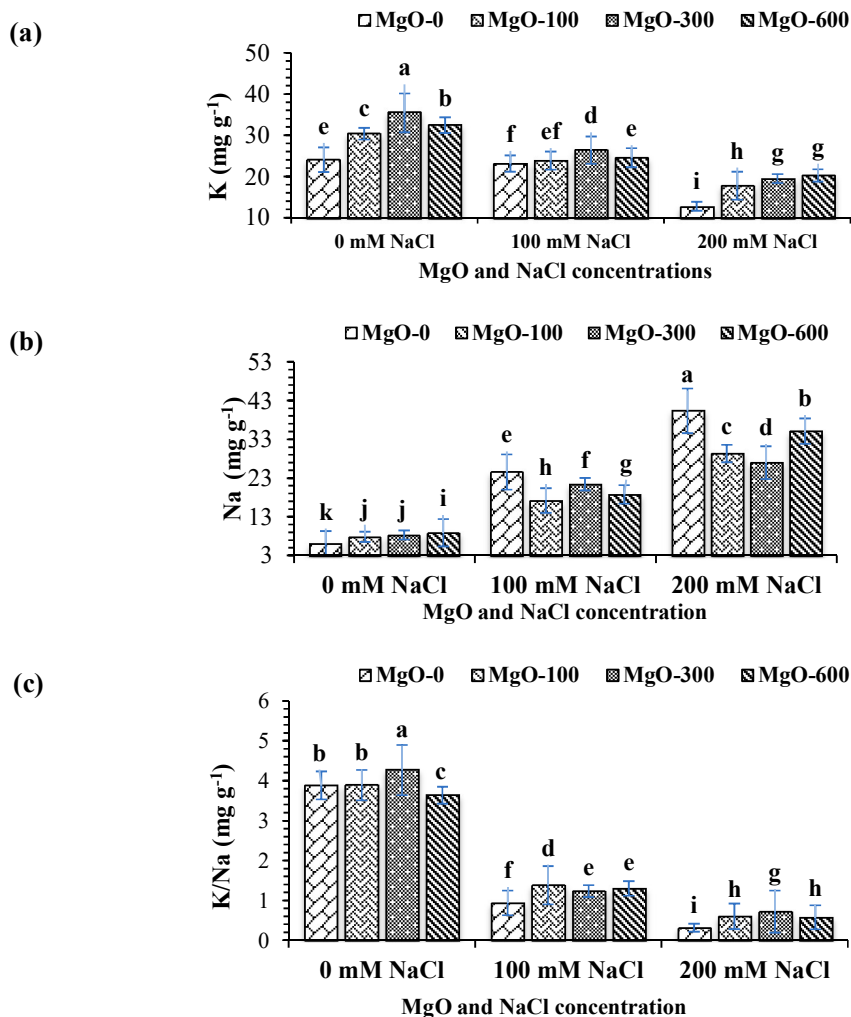
جدول ۱- تجزیه واریانس اثرات تنش شوری و پرایمینگ بذر بر صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در کاملینا

Table 1. Analysis of variance for the effects of salinity stress and seed priming on physiological and biochemical traits in *Camelina sativa*

منابع تغییرات Source of Variation	میانگین مربعات (MS)									
	محتوای پتاسیم K	محتوای سدیم Na	پتاسیم/سدیم K/Na	سوپراکسید دیسموتاز SOD	گایاکول پراکسیداز GPX	کاتالاز CAT	محتوای فنل Phenol	محتوای فلاونوئید Flavonoids	مالون-دی آلدئید MDA	پراکسید هیدروژن H ₂ O ₂
Salt stress تنش شوری	679.43**	2527.90**	51.08**	77.86**	2.43**	9.80**	2128.84**	808.99*	141.06**	21.45**
Seed priming پرایمینگ بذر	114.09**	74.45**	0.283**	0.923**	0.471*	2.52**	1557.36**	374.09**	1.44*	0.19**
پرایمینگ × تنش شوری	15.73**	58.42**	0.127**	0.134*	0.053**	0.173**	100.19**	32.78**	6.29**	1.03**
Salt stress × Seed priming										
Error خطا	0.449	0.340	0.004	0.044	0.011	0.163	2.16	3.83	0.294	0.016
CV (%) ضریب تغییرات (%)	2.77	1.66	3.60	4.56	8.23	7.91	2.71	3.96	6.59	4.09

ns غیر معنی دار، * و ** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد می باشند.

ns not significant, * and **: Significant at the 1% and 5% probability levels, respectively.



شکل ۱- اثر متقابل تنش شوری و پرایمینگ با نانوذرات دی اکسید منیزیم (MgO) بر محتوای پتاسیم (a)، محتوای سدیم (b)، و نسبت پتاسیم به سدیم (c) در کاملینا

حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Figure 1. Interactive effect of salinity stress and seed priming with magnesium dioxide nanoparticles (MgO) on potassium (K) content (a), sodium (Na) content (b), and potassium to sodium (K/Na) ratio (c) in *Camelina Sativa*. Different letters indicate significant differences at the 5% probability level based on the LSD test.

در مقابله با استرس اکسیداتیو ناشی از تنش شوری افزایش دهند (Mahdy *et al.*, 2020). پژوهشگران دیگری با بررسی اثر پرایمینگ بذر با نانوذرات سیلیکون در ذرت (*Zea mays* L) تحت تنش شوری مشاهده کردند پرایمینگ بذر موجب بهبود محتوای پتاسیم و نسبت پتاسیم به سدیم شد و این امر را به القای مکانیسم‌های دفاعی پیشگیرانه در گیاه از طریق فعال‌سازی مسیرهای سیگنال‌دهی مرتبط با تولید ترکیبات تنظیم‌کننده تنش و افزایش ظرفیت نگهداری آب در سلول‌ها نسبت دادند (Alsamadany *et al.*, 2024).

محتوای فنل و فلاونوئید

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تنش شوری، پرایمینگ بذر، و اثرات متقابل آن‌ها بر محتوای فنل و فلاونوئید کاملاً معنی‌دار بود (جدول ۱). بیش‌ترین مقادیر فنل و فلاونوئید در تیمار شوری ۱۰۰ میلی‌مولار همراه با پرایمینگ ۳۰۰ میلی‌گرم MgO مشاهده شد، در حالی که کم‌ترین مقادیر این ترکیبات به تیمار شاهد تعلق داشت (جدول ۲). مقایسه تیمارهای تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار و بدون تنش شوری نشان داد که تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار موجب افزایش محتوای فنل و فلاونوئید به میزان ۶۸/۸ درصد و ۳۷/۶ درصد شده است. همچنین، پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم نقش مؤثری در افزایش این ترکیبات

ایفا کرد و بیش‌ترین تأثیر در تیمار پرایمینگ با ۳۰۰ میلی‌گرم MgO مشاهده شد. به‌طور خاص، پرایمینگ با ۳۰۰ میلی‌گرم MgO در شرایط تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار توانست محتوای فنل و فلاونوئید را به‌ترتیب ۱۷۹/۱ درصد و ۸۷/۲ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد (جدول ۲). تنش شوری معمولاً باعث تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) می‌شود که به استرس اکسیداتیو منجر می‌شود. گیاهان برای کاهش این اثرات زیان‌بار، ترکیبات آنتی‌اکسیدانی نظیر فنل‌ها و فلاونوئیدها را تولید می‌کنند که نقش حیاتی در به دام انداختن ROS و محافظت از غشاهای سلولی ایفا می‌کنند (Bahcesular *et al.*, 2020; Ghasempour *et al.*, 2024). آزمایش‌های انجام شده بر گیاهان دیگر مانند سویا (*Glycine max* L.) نشان داده که تنش شوری موجب افزایش محتوای فنل‌ها و فلاونوئیدها می‌شود که بخشی از سازوکار دفاعی گیاه در برابر آسیب‌های اکسیداتیو است (Kokebie *et al.*, 2024). علاوه بر این، پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم نیز تأثیر بسزایی در افزایش تولید فنل و فلاونوئید نشان داد. نانوذرات منیزیم از طریق فراهم‌آوری تدریجی یون‌های منیزیم، افزایش دسترسی به عناصر غذایی و فعال‌سازی مسیرهای سیگنال‌دهی دفاعی، این ترکیبات را تقویت نمایند (Ali *et al.*, 2024; Ahmad *et al.*, 2023). محققان در گیاه شاهدانه (*Cannabis sativa* L.) گزارش

جدول ۲- مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش شوری و پرایمینگ بذر بر صفات فنول، فلاونوئید، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

(سوپراکسید دیسموتاز، گایاکول پراکسیداز، کاتالاز) و غلظت مالون‌دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن در کاملینا

Table 2. Mean comparison of the interactive effects of salinity stress and seed priming on Phenolic content, Flavonoids content, Antioxidant Enzyme Activities (Superoxide Dismutase (SOD), Guaiacol Peroxidase (GPX), Catalase (CAT)), and Malondialdehyde (MDA) and Hydrogen Peroxide (H₂O₂) levels in *Camelina sativa*

تیمارها Treatments		محتوای فنل Phenol content (mg g FW ⁻¹)	محتوای فلاونوئید Flavonoids content (mg g FW ⁻¹)	فعالیت سوپراکسید دیسموتاز SOD (μmol min ⁻¹ mg ⁻¹ protein)	فعالیت گایاکول پراکسیداز GPX (μmol min ⁻¹ mg ⁻¹ protein)	فعالیت کاتالاز CAT (μmol min ⁻¹ mg ⁻¹ protein)	محتوای مالون-دی‌آلدئید MDA (nmol g ⁻¹ FW)	محتوای پراکسید هیدروژن H ₂ O ₂ (nmol g FW)
تنش شوری (میلی‌مولار) Salinity stress (mM)	پرایمینگ بذر-نانواکسید منیزیم Seed priming-MgO (mg L ⁻¹)							
0 mM NaCl	MgO-0	26.54j	33.89i	1.78i	0.59h	0.69j	4.54hi	1.26k
	MgO-100	44.35h	39.41h	2.22h	0.87g	1.71g	5.16h	2.40i
	MgO-300	33.94i	46.88f	2.49gh	0.86g	1.03i	3.86i	1.81j
	MgO-600	49.79g	42.38g	2.57g	1.04f	1.38h	6.22g	2.37i
100 mM NaCl	MgO-0	56.13e	49.66ef	4.85ef	1.25e	2.18e	11.28b	4.19c
	MgO-100	67.35b	57.77b	6.61b	1.74ab	3.11b	9.13de	2.81h
	MgO-300	74.11a	62.37a	6.92a	1.84a	3.42a	7.89f	3.07g
	MgO-600	65.17c	53.67cd	6.75ab	1.59c	2.42d	8.48ef	3.58e
200 mM NaCl	MgO-0	52.83f	52.06de	4.59f	1.09f	1.87fg	12.06a	4.73a
	MgO-100	58.46d	48.77f	6.28c	1.15ef	2.01ef	9.80cd	3.77d
	MgO-300	65.99bc	55.31bc	5.30d	1.61bc	2.69c	9.82cd	3.33f
	MgO-600	60.35d	51.79de	5.11de	1.40d	2.25de	10.44c	4.41b
LSD		2.11	2.81	0.303	0.148	0.234	0.778	0.184

حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Different letters indicate significant differences at the 5% probability level based on the LSD test.

کردند پرایمینگ با نانوذرات منیزیم با افزایش دسترسی به عناصر معدنی و فعال سازی مسیرهای آنتی اکسیدانی، تولید محتوای فنل و فلاونوئید را تحت تنش شوری تقویت نموده و اثرات تنش را تعدیل کرد (Ghasempour et al., 2024).

فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی شامل سوپراکسید دیسموتاز، گایاکول پراکسیداز و کاتالاز تحت تأثیر معنی دار تنش شوری، پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم و اثر متقابل این دو فاکتور قرار گرفت (جدول ۱). بیشترین فعالیت این آنزیم ها در تیمار تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار همراه با پرایمینگ ۳۰۰ میلی گرم MgO مشاهده شد، در حالی که کمترین فعالیت آنزیم های مذکور مربوط به تیمار شاهد بود (جدول ۲). بررسی ها نشان داد که فعالیت آنزیم های SOD، GPX و CAT در تیمار شوری ۱۰۰ میلی مولار با پرایمینگ ۳۰۰ میلی گرم MgO به ترتیب ۲۸۸/۷، ۲۱۰/۹ و ۳۹۵/۶ درصد بیش تر از تیمار شاهد بود (جدول ۲). علاوه بر این، تیمار شوری ۱۰۰ میلی مولار پرایمینگ شده با ۳۰۰ میلی گرم MgO در مقایسه با تنش شوری ۲۰۰ میلی مولار بدون پرایمینگ، فعالیت آنزیم های مذکور را به ترتیب ۵۰/۸، ۶۸/۸ و ۸۲/۹ درصد افزایش داد (جدول ۲). در شرایط شوری، افزایش غلظت یون های سدیم و کلر موجب ایجاد عدم تعادل یونی و تولید بیش از حد گونه های فعال اکسیژن می شود که می تواند منجر به آسیب به غشاهای سلولی، پروتئین ها و DNA شود (Naheed et al., 2021). در این شرایط، سیستم آنتی اکسیدانی گیاهان از جمله آنزیم های سوپراکسید دیسموتاز، گایاکول پراکسیداز و کاتالاز به عنوان یک خط دفاعی عمل کرده و با کاهش ROS، از گیاه در برابر استرس اکسیداتیو محافظت می کنند (Moradbeygi et al., 2020; Haghaninia et al., 2024b). همچنین، فعالیت بیش تر این آنزیم ها در تیمارهای پرایمینگ شده با نانوذرات نشان می دهد که MgO می تواند نقش موثری در تقویت مکانیسم های دفاعی گیاه ایفا کند. نانوذرات منیزیم به عنوان یک منبع قابل دسترسی از یون های Mg می توانند در تثبیت ساختار کلروپلاست ها و حفظ فتوسنتز موثر باشند، که این موضوع می تواند به کاهش تولید ROS و بهبود پاسخ های آنتی اکسیدانی منجر شود (Faiz et al., 2022; Kanjana et al., 2020).

ممکن است از طریق فعال سازی مسیرهای پیام رسانی ROS، بیان ژن های مربوط به آنتی اکسیدان ها را تقویت کنند (Moradbeygi et al., 2020; Singh et al., 2023). مطابق با یافته های حاضر، پژوهشگران گزارش کردند تحت تنش شوری، استفاده از پرایمینگ با نانوذرات روی (Zinc nanoparticles) منجر به افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی در ذرت (*Zea mays* L.) شد و اثرات مضر ROS را کاهش داد (Alhammad et al., 2023).

محتوای مالون دی آلدئید و پراکسید هیدروژن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که محتوای مالون دی-آلدئید (MDA) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) تحت تأثیر معنی دار تنش شوری، پرایمینگ و اثرات متقابل این دو عامل قرار گرفتند (جدول ۱). بیشترین میزان MDA و H_2O_2 در شرایط تنش شوری ۲۰۰ میلی مولار بدون پرایمینگ مشاهده شد. به علاوه، کمترین میزان MDA در شرایط عدم تنش و با پرایمینگ بذر با ۳۰۰ میلی گرم MgO، و کمترین میزان H_2O_2 در تیمار شاهد به ثبت رسید (جدول ۲). بر اساس این نتایج، در شرایط تنش شوری ۲۰۰ میلی مولار، محتوای MDA و H_2O_2 نسبت به شرایط عدم تنش شوری به ترتیب ۱۱۴/۲ و ۱۰۴/۱ درصد افزایش یافتند. در عین حال، پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم باعث کاهش محتوای این ترکیبات در گیاهان تحت تنش شوری شد. تیمار پرایمینگ ۳۰۰ میلی گرم MgO در شرایط عدم تنش شوری، محتوای MDA و H_2O_2 را به ترتیب ۶۷/۹ و ۶۱/۷ درصد در مقایسه با تنش شوری ۲۰۰ میلی مولار بدون پرایمینگ کاهش داد (جدول ۲). تنش شوری با افزایش تولید رادیکال های آزاد و تشکیل پراکسید های مختلف، باعث ایجاد استرس اکسیداتیو در گیاهان می شود که یکی از نتایج آن افزایش میزان مالون دی آلدئید و پراکسید هیدروژن است (Forozan Bakyani et al., 2022). این ترکیبات به عنوان شاخص هایی از آسیب های ناشی از اکسیداسیون در سلول ها شناخته می شوند و افزایش آن ها نشان دهنده آسیب به غشاهای سلولی و کاهش توانایی گیاه در مقابله با استرس های محیطی است (Huang et al., 2021; Haghaninia et al., 2023). این نتایج با مطالعه مشابه که نشان داد تنش شوری موجب افزایش میزان MDA و H_2O_2 در گیاه کاملینا شد، هم راستا است (Bazvand et al., 2024). با این حال، استفاده از

پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم توانست به‌طور مؤثری اثرات منفی شوری را کاهش دهد. همسو با این نتایج، محققان نشان دادند که پرایمینگ بذر با نانوذرات می‌تواند به‌طور مؤثری میزان تولید رادیکال‌های آزاد را در گیاه ارزن مروریدی (*Pennisetum glaucum* L.) کاهش داده و در نتیجه میزان MDA و H_2O_2 را کاهش دهد (Khan et al., 2020).

محتوای روغن و عملکرد روغن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تنش شوری، پرایمینگ بذر و اثر متقابل تنش شوری و پرایمینگ بر محتوای روغن و عملکرد روغن کاملینا در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیش‌ترین درصد و عملکرد روغن کاملینا در شرایط عدم تنش شوری پرایمینگ شده با ۳۰۰ میلی‌گرم MgO به‌دست آمد و کم‌ترین مقادیر در شرایط تنش شوری ۲۰۰ میلی‌مولار بدون پرایمینگ مشاهده شد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، تنش شوری درصد و عملکرد روغن را کاهش داد. به‌طور خاص، در شرایط بدون تنش، محتوای روغن ۲۷/۸ درصد و عملکرد روغن ۱۱۷/۶ درصد نسبت به تنش شوری ۲۰۰ میلی‌مولار افزایش یافت. با این حال، پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم موجب افزایش درصد و عملکرد روغن شد و بهترین نتایج با ۳۰۰ میلی‌گرم MgO بدست آمد. پرایمینگ با ۳۰۰ میلی‌گرم MgO در شرایط عدم تنش شوری موجب بهبود ۴۳/۴ و ۲۸۵/۳ درصدی در محتوای روغن و عملکرد روغن کاملینا نسبت به شرایط تنش شوری ۲۰۰ میلی‌مولار بدون پرایمینگ گردید (شکل ۲). تنش شوری باعث افزایش غلظت نمک‌ها در محیط ریشه گیاهان می‌شود که این امر موجب ایجاد فشار اسمزی در بافت‌های گیاهی و در نهایت کاهش جذب آب و مواد مغذی می‌شود

(El Sabagh et al., 2020). این اثر منجر به کاهش فرآیندهای فیزیولوژیک مانند فتوسنتز، تنفس، و سنتز پروتئین می‌گردد که همگی بر کمیت و کیفیت روغن اثرگذارند (Ghassemi-Golezani and Ghassemi, 2018). در تطابق با نتایج حاصل شده از این پژوهش، محققان با بررسی تنش شوری بر کمیت و کیفیت سویا (*Glycine max* L.) گزارش کردند تنش شوری به‌طور مستقیم بر غشاء سلولی تأثیر گذاشته و باعث تغییرات در ساختار و عملکرد آن می‌شود که منجر به اختلال در جذب و انتقال مواد مغذی ضروری برای گیاه شده که به تبع آن می‌تواند کاهش شدید در محتوای روغن و عملکرد روغن را در پی داشته باشد (Sadak et al., 2020). با این وجود، پرایمینگ با نانوذرات منیزیم منجر به افزایش محتوای روغن و عملکرد روغن شد. نانوذرات می‌توانند باعث افزایش جذب عناصر معدنی ضروری مانند نیتروژن و فسفر شوند که این امر به نوبه خود موجب بهبود فرآیندهای متابولیک گیاه و افزایش ذخایر انرژی در گیاه می‌شود که به بهبود محتوای روغن و عملکرد روغن منجر می‌گردد (Haghaninia et al., 2024a; Batool et al., 2021). علاوه بر این، نانوذرات منیزیم ممکن است با تقویت فرآیندهای متابولیکی گیاه مانند فتوسنتز و تنفس، به بهبود شرایط رشد گیاه در شرایط تنش شوری کمک کنند (Fatemi et al., 2022). این نتایج با یافته‌های قبلی در زمینه استفاده از نانوذرات به‌عنوان یک عامل بهبوددهنده در شرایط تنش شوری همخوانی دارد که گزارش شد پرایمینگ با نانوذرات می‌تواند با افزایش میزان فتوسنتز، بهبود ظرفیت جذب کربن دی‌اکسید، و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تنش شوری موجب بهبود کمیت و کیفیت روغن کلزا (*Brassica napus* L.) در شرایط تنش شد (El-Badri et al., 2021).

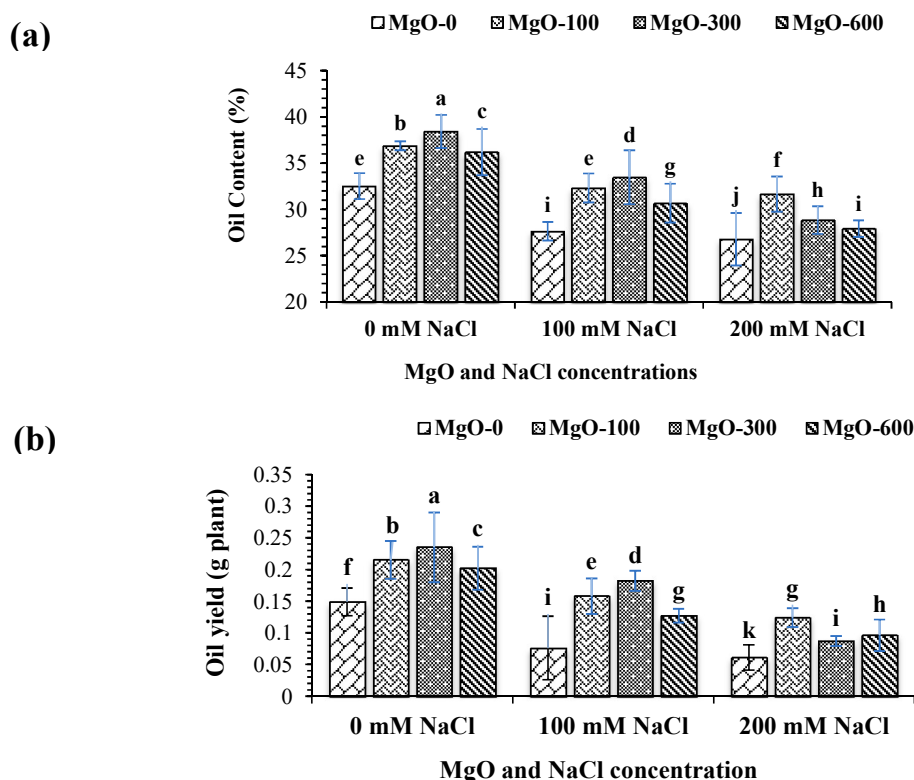
جدول ۳- تجزیه واریانس اثرات تنش شوری و پرایمینگ بذر بر صفات کمی و کیفی در کاملینا

Table 3. Analysis of variance for the effects of salinity stress and seed priming on quantitative and qualitative traits in *Camelina sativa*

منابع تغییرات Source of Variation	وزن هزار دانه Thousand grain weight	عملکرد دانه Seed yield	محتوای روغن Oil content	عملکرد روغن Oil yield	پالمیتیک اسید Palmitic acid	لینولنیک اسید Linolenic acid	اولئیک اسید Oleic acid	لینولئیک اسید Linoleic acid	ایکوزانویک اسید Eicosanoic acid
تنش شوری Salt stress	0.150*	0.223**	216.91**	0.047**	2.856**	537.79**	103.04**	440.74**	21.60*
پرایمینگ بذر Seed priming	0.154**	0.074**	57.41*	0.013**	0.283**	112.94**	3.51*	1.05**	2.73**
پرایمینگ × تنش شوری Salt stress × Seed priming	0.017**	0.008**	5.30**	0.001**	0.018**	14.17**	1.11**	5.49**	0.612**
خطا Error	0.0005	0.0002	0.096	0.00001	0.005	0.252	0.029	0.034	0.021
CV (%)	2.23	2.82	0.917	2.95	1.48	1.37	1.20	0.760	1.739

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

ns not significant, * and **: Significant at the 1% and 5% probability levels, respectively.



شکل ۲- اثر متقابل تنش شوری و پرایمینگ با نانوذرات دی اکسید منیزیم (MgO) بر محتوای روغن (a) و عملکرد روغن (b) در کاملینا.

حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Figure 2. Interactive effect of salinity stress and seed priming with magnesium oxide nanoparticles (MgO) on oil content (a), and oil yield (b) in *Camelina sativa*. Different letters indicate significant differences at the 5% probability level based on the LSD test.

ترکیبات روغن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تنش شوری، پرایمینگ بذری، و اثرات متقابل تنش شوری × پرایمینگ بر ترکیبات روغن کاملینا معنی دار شدند (جدول ۳). بیشترین میزان پالمیتیک اسید در شرایط تنش شوری ۲۰۰ میلی مولار بدون پرایمینگ مشاهده شد. در حالی که بیشترین مقادیر اسید لینولنیک، اسید لینولئیک و اسید اولئیک در شرایط عدم تنش و با پرایمینگ ۳۰۰ میلی گرم MgO ثبت گردید و بیشترین میزان اسید ایکوزانویک هم با پرایمینگ ۳۰۰ میلی گرم MgO در شرایط تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار به دست آمد (جدول ۴). علاوه بر این، اسید پالمیتیک در شرایط تنش شوری ۲۰۰ میلی مولار بدون پرایمینگ نسبت به تیمار شاهد ۳۰/۸ درصد افزایش داشت. همچنین، محتوای اسید لینولنیک، اسید اولئیک و اسید لینولئیک در شرایط عدم تنش شوری با پرایمینگ ۳۰۰ میلی گرم MgO نسبت به تنش شوری ۲۰۰ میلی مولار

بدون پرایمینگ به ترتیب ۷۱/۳، ۶۸/۷ و ۷۶/۱ درصد افزایش نشان دادند. از طرفی، اسید ایکوزانویک با پرایمینگ ۳۰۰ میلی گرم MgO در شرایط تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار در مقایسه با شاهد ۳۸/۷ درصد بهبود یافت (جدول ۴). در شرایط تنش شوری، افزایش غلظت یونهای سدیم در سلولها موجب اختلال در ساختار غشای سلولی می شود. این امر به دلیل تغییر در ترکیب فسفولیپیدهای غشای سلولی، که معمولاً به عنوان جزء اصلی غشاهای سلولی در گیاهان شناخته می شود، رخ می دهد (Mohamed *et al.*, 2020). این تغییرات می توانند منجر به کاهش محتوای اسیدهای چرب غیراشباع و افزایش اسیدهای چرب اشباع مانند پالمیتیک اسید شوند که به عنوان یک مکانیسم محافظتی برای حفظ یکپارچگی غشا در برابر تنشهای فیزیکی عمل می کند (Ghassemi- Golezani and Farhangi-Abri, 2018). گزارشات متعدد، تنش شوری می تواند با تغییر در فعالیت

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش شوری و پرایمینگ بذر بر ترکیبات اسیدهای چرب روغن در کاملینا ساتیوا
 Table 4. Mean comparison of the interactive effects of salinity stress and seed priming on fatty acid composition of
Camelina sativa oil

تیمارها Treatments		اسید پالمیتیک Palmitic acid (%)	اسید لینولنیک Linolenic acid (%)	اسید اولئیک Oleic acid (%)	اسید لینولئیک Linoleic acid (%)	اسید ایکوزانویئیک Eicosanoic acid (%)
تنش شوری (میلی مولار) Salinity stress (Mm)	پرایمینگ بذر-ناتواکسیدمنیزیم Seed priming-MgO (mg L ⁻¹)					
0 Mm NaCl	MgO-0	4.25i	37.25e	13.91f	24.11e	7.79g
	MgO-100	4.43h	44.25b	14.62d	29.86ab	8.51e
	MgO-300	4.34hi	45.26a	17.01a	30.04a	8.09f
	MgO-600	4.59g	40.92c	16.84ab	29.67b	8.25f
100 Mm NaCl	MgO-0	5.16b	33.29h	11.79i	19.79g	7.63gh
	MgO-100	4.71f	41.53c	14.43de	24.04e	9.42b
	MgO-300	4.78ef	39.33d	16.36c	28.59c	10.73a
	MgO-600	4.93cd	34.46g	16.69b	25.87d	9.20c
200 Mm NaCl	MgO-0	5.56a	26.41k	10.02j	17.15i	6.68j
	MgO-100	4.84de	32.35i	14.32e	19.71gh	7.02i
	MgO-300	5.03c	35.28f	12.22h	23.59f	7.58h
	MgO-600	5.23b	29.44j	12.55g	19.52h	8.83d
LSD		0.102	0.721	0.247	0.265	0.207

حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Different letters indicate significant differences at the 5% probability level based on the LSD test.

پرایمینگ شده با ۳۰۰ میلی گرم MgO به دست آمد، در حالی که کم‌ترین وزن هزار دانه و عملکرد دانه در شرایط تنش شوری ۲۰۰ میلی مولار بدون پرایمینگ با نانوذرات مشاهده شد (شکل ۳). نتایج نشان داد که تنش شوری اثر منفی بر وزن هزار دانه و عملکرد دانه کاملینا داشت، به‌طوری‌که در شرایط عدم تنش، وزن هزار دانه و عملکرد دانه در مقایسه با تنش شوری ۱۰۰ میلی مولار به ترتیب ۳/۸ و ۲۸/۴ درصد و در مقایسه با تنش شوری ۲۰۰ میلی-مولار ۲۴/۵ و ۷۴/۶ درصد بهبود یافتند. علاوه بر این، پرایمینگ با ۳۰۰ میلی گرم MgO در شرایط عدم تنش شوری وزن هزار دانه و عملکرد دانه را ۴۲/۱ و ۱۶۸/۴ درصد نسبت به تنش شوری ۲۰۰ میلی مولار بدون پرایمینگ بهبود بخشید (شکل ۲). تنش شوری می‌تواند از طرق مختلف بر وزن هزار دانه و عملکرد دانه کاملینا تأثیر بگذارد. نخستین تأثیر منفی آن، کاهش جذب آب است که منجر به کاهش فشار ترگر سلولی و اختلال در فرآیندهای متابولیک می‌شود. این امر باعث کاهش نرخ فتوسنتز، کاهش تولید مواد آلی و در نتیجه کاهش عملکرد گیاه می‌شود (Adil *et al.*, 2022). همچنین، در شرایط شوری گیاهان مجبورند برای حفظ تعادل آب در بافت‌های خود از مکانیسم‌های مختلفی مانند کاهش فشار اسمزی استفاده کنند که این مکانیسم‌ها می‌توانند به‌طور موقت عملکرد گیاه را حفظ کنند، اما در بلندمدت به کاهش رشد و عملکرد گیاه منجر می‌شوند (Zafar *et al.*, 2024; Sen *et al.*, 2022). مطالعات مشابه نیز نشان داده‌اند که تنش شوری

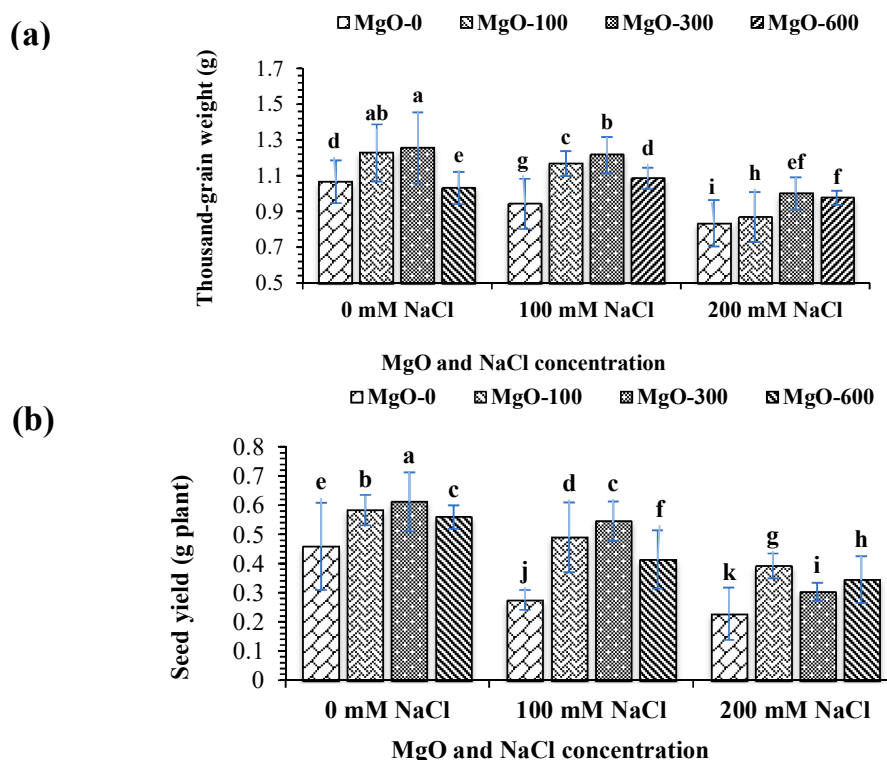
آنزیم‌های دخیل در مسیرهای سنتزی اسیدهای چرب، از جمله فسفاتیدیل کلین و فسفاتیدیل اتانول آمین، باعث تغییر در ترکیب اسیدهای شود که این اختلالات متابولیکی معمولاً منجر به افزایش نسبت اسیدهای چرب اشباع و کاهش اسیدهای چرب غیراشباع می‌گردد (Khademian *et al.*, 2019; El Sabagh *et al.*, 2020). پرایمینگ با نانوذرات منیزیم می‌تواند با تأثیر بر فعالیت آنزیم‌های دخیل در مسیرهای سنتزی اسیدهای چرب، ترکیب اسیدهای چرب را بهبود بخشد (Ghassemi-Golezani and Farhangi-Abri, 2021). که این افزایش فعالیت آنزیم‌های مرتبط با تولید اسیدهای چرب غیراشباع می‌تواند موجب افزایش محتوای اولئیک اسید و لینولئیک اسید در روغن کاملینا شود (Batool *et al.*, 2021). نتایج مطالعات مشابه حاکی از آن است که پرایمینگ بذر با نانوذرات می‌تواند به بهبود ترکیب اسیدهای چرب در گیاهان تحت تنش شوری منجر شود. به عنوان مثال، محققان نشان دادند که پرایمینگ بذر با نانوذرات در شرایط تنش شوری منجر به افزایش اسیدهای چرب غیراشباع در کلزا (*Brassica napus* L.) شد (El-Badri *et al.*, 2021).

وزن هزار دانه و عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تنش شوری، پرایمینگ بذر، و اثرات متقابل این دو عامل بر وزن هزار دانه و عملکرد دانه کاملینا معنی‌دار بودند (جدول ۳). بیش‌ترین وزن هزار دانه و عملکرد دانه در شرایط عدم تنش شوری

جوانه‌زنی حتی در شرایط تنش‌زا می‌شود که در نهایت بهبود عملکرد را در پی دارد (Kanjana *et al.* 2020; Mahdy *et al.*, 2020). بطور مشابه، کاربرد نانوذرات منیزیم با بهبود جذب آب و مواد مغذی در ریشه‌ها و بهبود فرآیندهای فتوسنتزی، توانست رشد و عملکرد دانه آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) را در شرایط تنش تقویت کند (Fatemi *et al.*, 2022). همچنین، در مطالعه دیگری پرایمینگ بذر موجب افزایش وزن هزار دانه و عملکرد دانه کلزا (*Brassica napus* L.) شد و آن را به بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و کاهش سطح شاخص‌های تنش نسبت دادند (Mazhar *et al.*, 2020).

باعث تجمع یون‌های سمی مانند Na^+ و Cl^- در ریشه‌ها و بافت‌های گیاهی می‌شود که این یون‌ها می‌توانند جذب سایر عناصر مغذی مهم مانند K^+ و Ca^{2+} را مختل و تأثیرات منفی بر وزن هزار دانه و عملکرد دانه کاملینا بگذارند (Teimoori *et al.*, 2023; Stasnik *et al.*, 2024). با این وجود، پرایمینگ با نانوذرات منیزیم تأثیرات مثبت قابل توجهی بر وزن هزار دانه و عملکرد دانه کاملینا داشت. پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم موجب افزایش سرعت جوانه‌زنی و بهبود رشد اولیه گیاهان می‌شود (Gautam *et al.*, 2023)، این فرایند به دلیل افزایش ذخیره انرژی در بذر و تحریک فعالیت‌های متابولیک اولیه، باعث تسهیل



شکل ۳- اثر متقابل تنش شوری و پرایمینگ با نانوذرات دی‌اکسید منیزیم (MgO) بر وزن هزار دانه (a) و عملکرد دانه (b) کاملینا.

حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Figure 3. Interactive effect of salinity stress and seed priming with magnesium oxide nanoparticles (MgO) on thousand grain weight (a), grain yield (b), oil content (c), and oil yield (d) in *Camelina sativa*.

Different letters indicate significant differences at the 5% probability level based on the LSD test

نانوذرات منیزیم، به‌ویژه در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، توانست اثرات منفی شوری را کاهش دهد. این تیمار موجب بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی سوپراکسید دیسموتاز، گایاکول پراکسیداز و کاتالاز، افزایش محتوای ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی و کاهش پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید شد که به کاهش آسیب‌های اکسیداتیو

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با هدف بررسی اثر پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم بر صفات کمی و کیفی بذر کاملینا تحت شرایط تنش شوری انجام شد. تنش شوری تأثیر منفی بر رشد، عملکرد دانه و روغن گیاه داشته و موجب افزایش اسیدهای چرب اشباع شد. با این حال، پرایمینگ بذر با

شرایط گلخانه‌ای به‌عنوان یک روش نوین و مؤثر می‌تواند اثرات منفی تنش شوری را کاهش دهد و به بهبود صفات کمی و کیفی کمک کند. این روش می‌تواند در شرایط مزرعه‌ای و آزمایشات منطقه‌ای نیز تکرار شود و سپس به‌عنوان راهکاری مؤثر در راستای کشاورزی پایدار و مقاوم به شوری، به‌ویژه در شرایط تغییرات اقلیمی و تنش‌های محیطی، مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

نگارندگان این مقاله از همکاری مسئولین گلخانه و آزمایشگاه مرکزی دانشگاه مراغه تقدیر و تشکر می‌نمایند.

ناشی از تنش شوری اشاره دارد. همچنین، پرایمینگ بذر با نانوذرات منیزیم منجر به بهبود نسبت پتاسیم به سدیم در گیاه گردید و توان گیاه در مقابله با استرس‌های شوری و حفظ تعادل یونی را تقویت کرد. در همین راستا، این تیمار باعث بهبود وزن هزار دانه، عملکرد دانه، محتوای روغن، عملکرد روغن و افزایش درصد اسید لینولنیک، اسید لینولئیک، اسید اولئیک و کاهش درصد اسید پالمیتیک شد. این تغییرات در اسیدهای چرب غیراشباع مانند اسید لینولنیک، اسید لینولئیک و اسید اولئیک که از جنبه‌های تغذیه‌ای و صنعتی حائز اهمیت هستند، کیفیت روغن بذر را بهبود بخشید. در مجموع، نتایج این تحقیق تأکید دارد که استفاده از نانوذرات منیزیم در پرایمینگ بذر کاملینا در

منابع

- Adil, M., Bashir, S., Bashir, S., Aslam, Z., Ahmad, N., Younas, T., Asghar, R. M. A., Alkahtani, J., Dwiningsih, Y. and Elshikh, M.S. 2022. Zinc oxide nanoparticles improved chlorophyll contents, physical parameters, and wheat yield under salt stress. *Frontiers in plant science*, 13, p.932861. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.932861> (**Journal**)
- Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. *Methods in Enzymology*, 105, 121-126. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3) (**Book**)
- Ahmad, Z., Warraich, E.A., Iqbal, M. A., Barutcular, C., Alharby, H., Bamagoos, A., Cig, F. and El Sabagh, A. 2021. Foliage applied silicon ameliorates drought stress through physio-morphological traits, osmoprotectants and antioxidant metabolism of camelina (*Camelina sativa* L.) genotypes. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 20(4), pp.43-57. <https://doi.org/10.24326/asphe.2021.4.4> (**Journal**)
- Alhammad, B.A., Ahmad, A., Seleiman, M. F. and Tola, E. 2023. Seed priming with nanoparticles and 24-epibrassinolide improved seed germination and enzymatic performance of *Zea mays* L. in salt-stressed soil. *Plants*, 12(4), p.690. <https://doi.org/10.3390/plants12040690> (**Journal**)
- Ali, S., Ulhassan, Z., Shahbaz, H., Kaleem, Z., Yousaf, M. A., Ali, S., Sheteiwy, M. S., Waseem, M., Ali, S. and Zhou, W. 2024. Application of magnesium oxide nanoparticles as a novel sustainable approach to enhance crop tolerance to abiotic and biotic stresses. *Environmental Science: Nano*, 11(8), pp.3250-3267. <https://doi.org/10.1039/D4EN00417E> (**Journal**)
- Alsaedi, A., El-Ramady, H., Alshaal, T., El-Garawany, M., Elhawat, N. and Al-Otaibi, A. 2019. Silica nanoparticles boost growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrients uptake. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, pp.1-10. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.008> (**Journal**)
- Alsamadany, H., Alharby, H. F., Ahmad, Z., Al-Zahrani, H. S., Alzahrani, Y.M. and Almaghamisi, A. 2024. Improving alkaline stress tolerance in maize through seed priming with silicon nanoparticles: a comprehensive investigation of growth, photosynthetic pigments, antioxidants, and ion balance. *Silicon*, 16(5), pp.2233-2244. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02833-5> (**Journal**)
- Amin, M. A. A., Abu-Elsaoud, A.M., Nowwar, A.I., Abdelwahab, A.T., Awad, M. A., Hassan, S. E. D., Boufahja, F., Fouda, A. and Elkelish, A. 2024. Green synthesis of magnesium oxide nanoparticles using endophytic fungal strain to improve the growth, metabolic activities, yield traits, and phenolic compounds content of *Nigella sativa* L. *Green Processing and Synthesis*, 13(1), p.20230215. <https://doi.org/10.1515/gps-2023-0215> (**Journal**)
- Amirfakhrian, Z., Abdossi, V., Mohammadi Torkashvand, A., Weisany, W. and Ghanbari Jahromi, M. 2024. Co-applied magnesium nanoparticles and biochar modulate salinity stress via regulating yield, biochemical attribute, and fatty acid profile of *Physalis alkekengi* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(22), pp.31806-31817. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33329-3> (**Journal**)
- Bahcesular, B., Yildirim, E. D., Karaçocuk, M., Kulak, M. and Karaman, S. 2020. Seed priming with melatonin effects on growth, essential oil compounds and antioxidant activity of basil (*Ocimum basilicum*

- L.) under salinity stress. *Industrial Crops and Products*, 146, p.112165. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112165> **(Journal)**
- Bates, L. S., Waldren, R. P. and Teare, I. D. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39(1), 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060> **(Journal)**
- Batool, S. U., Javed, B., Sohail, Zehra, S.S., Mashwani, Z. U. R., Raja, N. I., Khan, T., ALHaithloul, H. A. S., Alghanem, S. M., Al-Mushhin, A. A. and Hashem, M. 2021. Exogenous applications of bio-fabricated silver nanoparticles to improve biochemical, antioxidant, fatty acid and secondary metabolite contents of sunflower. *Nanomaterials*, 11(7), p.1750. <https://doi.org/10.3390/nano11071750> **(Journal)**
- Bazvand, F., Eisvand, H. R., Daneshvar, M., Rahimi-Moghaddam, S. and Paravar, A. 2024. Can exogenous application of putrescine and priming modulate salinity stress in *Camelina sativa* L. *Industrial Crops and Products*, 222, p.119711. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119711> **(Journal)**
- Beauchamp, C. and Fridovich, I. 1971. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical biochemistry*, 44(1), pp.276-287. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8) **(Journal)**
- Chance, B. and Maehly, A. C. 1955. Assay of catalases and peroxidases. **(Book)**
- Chang, C. C., Yang, M. H., Wen, H. M. and Chern, J. C. 2002. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of food and drug analysis*, 10(3). <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748> **(Journal)**
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. T. and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350-356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017> **(Journal)**
- El Sabagh, A., Hossain, A., Barutçular, C., Iqbal, M. A., Islam, M. S., Fahad, S., Sytar, O., Çig, F., Meena, R. S. and Erman, M. 2020. Consequences of salinity stress on the quality of crops and its mitigation strategies for sustainable crop production: an outlook of arid and semi-arid regions. *Environment, climate, plant and vegetation growth*, pp.503-533. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_20 **(Journal)**
- El-Badri, A. M., Batool, M., Wang, C., Hashem, A. M., Tabl, K. M., Nishawy, E., Kuai, J., Zhou, G. and Wang, B. 2021. Selenium and zinc oxide nanoparticles modulate the molecular and morpho-physiological processes during seed germination of *Brassica napus* under salt stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 225, p.112695. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112695> **(Journal)**
- Faiz, S., Yasin, N. A., Khan, W. U., Shah, A. A., Akram, W., Ahmad, A., Ali, A., Naveed, N. H. and Riaz, L. 2022. Role of magnesium oxide nanoparticles in the mitigation of lead-induced stress in *Daucus carota*: modulation in polyamines and antioxidant enzymes. *International Journal of Phytoremediation*, 24(4), pp.364-372. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1949263> **(Journal)**
- Fatemeh, R., Hadi, A. and Latifeh, P. 2020. Effects of foliar application of ZnO nanoparticles on secondary metabolite and micro-elements of camelina (*Camelina sativa* L.) under salinity stress. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 16(4), pp.54-69. **(Journal)**
- Fatemi, A., Moaveni, P., Daneshian, J., Mozafari, H. and Ghaffari, M. 2022. Magnesium nanoparticles improve grain yield, oil percentage, physiological, and biochemical traits of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under drought stress. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 24(3), pp.665-678. <http://jast.modares.ac.ir/article-23-44376-en.html> **(Journal)**
- Forozan Bakyani, M. R., Alinia, M., Abdolreza Kazemeini, S., Abadia Bayona, J. and Dadkhodaie, A. 2022. Foliar application of melatonin improves the salt tolerance, ion and redox homeostasis and seed oil fatty acid profile in *Camelina sativa*. <https://doi.org/10.3390/plants11223113> **(Journal)**
- Gautam, A., Sharma, P., Ashokhan, S., Yaacob, J. S., Kumar, V. and Guleria, P. 2023. Inhibitory impact of MgO nanoparticles on oxidative stress and other physiological attributes of spinach plant grown under field condition. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 29(12), pp.1897-1913. <https://doi.org/10.1007/s12298-023-01391-9> **(Journal)**
- Ghasempour, S., Ghanbari Jahromi, M., Mousavi, A. and Iranbakhsh, A. 2024. Seed priming with cold plasma, iron, and manganese nanoparticles modulates salinity stress in hemp (*Cannabis sativa* L.) by improving germination, growth, and biochemical attributes. *Environmental Science and Pollution Research*, pp.1-13. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35590-y> **(Journal)**
- Ghassemi-Golezani, K. and Farhangi-Abriz, S. 2018. Changes in oil accumulation and fatty acid composition of soybean seeds under salt stress in response to salicylic acid and jasmonic acid. *Russian Journal of Plant Physiology*, 65, pp.229-236. <https://doi.org/10.1134/S1021443718020115> **(Journal)**
- Ghassemi-Golezani, K. and Farhangi-Abriz, S. 2021. Biochar-based metal oxide nanocomposites of magnesium and manganese improved root development and productivity of safflower (*Carthamus*

- tinctorius* L.) under salt stress. *Rhizosphere*, 19, p.100416. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100416> **(Journal)**
- Gogna, M., Choudhary, A., Mishra, G., Kapoor, R. and Bhatla, S.C. 2020. Changes in lipid composition in response to salt stress and its possible interaction with intracellular Na^+ - K^+ ratio in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 178, p.104147. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104147> **(Journal)**
- Haghaninia, M., Javanmard, A., Kahrizi, D., Bahadori, M. B. and Machiani, M.A. 2024a. Optimizing oil quantity and quality of camelina (*Camelina sativa* L.) with integrative application of chemical, nano and bio-fertilizers under supplementary irrigation and rainfed condition. *Plant Stress*, 11, p.100374. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100374> **(Journal)**
- Haghaninia, M., Javanmard, A., Mahdavinia, G. R., Shah, A. A. and Farooq, M. 2023. Co-application of biofertilizer and stress-modulating nanoparticles modulates the physiological, biochemical, and yield responses of camelina (*Camelina sativa* L.) under limited water supply. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(4), pp.6681-6695. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-0152> **(Journal)**
- Haghaninia, M., Rasouli, F., Javanmard, A., Mahdavinia, G., Azizi, S., Nicoletti, R., Murariu, O. C., Tallarita, A. V. and Caruso, G. 2024b. Improvement of physiological features and essential oil content of thymus vulgaris after soil amendment with chitosan nanoparticles under chromium toxicity. *Horticulturae*, 10(6), p.659. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10060659> **(Journal)**
- Heath, R. L. and Packer, L. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125(1), 189-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1) **(Journal)**
- Huang, P., He, L., Abbas, A., Hussain, S., Hussain, S., Du, D., Hafeez, M. B., Balooch, S., Zahra, N., Ren, X. and Rafiq, M. 2021. Seed priming with sorghum water extract improves the performance of camelina (*Camelina sativa* (L.) crantz.) under salt stress. *Plants*, 10(4), p.749. <https://doi.org/10.3390/plants10040749> **(Journal)**
- Kabiri, R., Shamsaddin-Saied, M. and Hasanzadeh-Tajaroogh, B. 2024. Assessment of germination indices and early growth of Camelina (*Camelina sativa*) seedlings in response to osmotic and salinity stresses. *Iranian J. Seed Res.* 11(1), 21-41. <https://doi.org/10.61186/yujs.11.1.21> (In Persian) **(Journal)**
- Kanjana, D. 2020. Foliar application of magnesium oxide nanoparticles on nutrient element concentrations, growth, physiological, and yield parameters of cotton. *Journal of Plant Nutrition*, 43(20), pp.3035-3049. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1799001> **(Journal)**
- Khan, I., Raza, M. A., Awan, S. A., Shah, G. A., Rizwan, M., Ali, B., Tariq, R., Hassan, M.J., Alyemeni, M. N., Brestic, M. and Zhang, X. 2020. Amelioration of salt induced toxicity in pearl millet by seed priming with silver nanoparticles (AgNPs): The oxidative damage, antioxidant enzymes and ions uptake are major determinants of salt tolerant capacity. *Plant physiology and biochemistry*, 156, pp.221-232. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.09.018> **(Journal)**
- Khoraki, M. and Farhoudi, R. 2020. Effect of halopriming on germination and seedling growth of single cross 704 corn seeds under salinity stress condition, *Iranian Journal of Seed Sciences and Research*, 7(4), pp. 447-461. <https://doi.org/10.22124/jms.2020.4642> (In Persian) **(Journal)**
- Kokebie, D., Enyew, A., Masresha, G., Fentie, T. and Mulat, E., 2024. Morphological, physiological, and biochemical responses of three different soybean (*Glycine max* L.) varieties under salinity stress conditions. *Frontiers in Plant Science*, 15, p.1440445. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1440445> **(Journal)**
- Mahdy, A. M., Sherif, F. K., Elkhatab, E. A., Fathi, N. O. and Ahmed, M. H. 2020. Seed priming in nanoparticles of water treatment residual can increase the germination and growth of cucumber seedling under salinity stress. *Journal of Plant Nutrition*, 43(12), pp.1862-1874. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1750647> **(Journal)**
- Matthees, H. L., Thom, M. D., Gesch, R. W. and Forcella, F. 2018. Salinity tolerance of germinating alternative oilseeds. *Industrial Crops and Products*, 113, pp.358-367. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.042> **(Journal)**
- Mazhar, M. W., Ishtiaq, M., Maqbool, M. and Akram, R. 2022. Seed priming with Calcium oxide nanoparticles improves germination, biomass, antioxidant defence and yield traits of canola plants under drought stress. *South African Journal of Botany*, 151, pp.889-899. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.11.017> **(Journal)**
- Mirrani, H. M., Noreen, Z., Usman, S., Shah, A. A., Mahmoud, E. A., Elansary, H. O., Aslam, M., Waqas, A. and Javed, T. 2024. Magnesium nanoparticles extirpate salt stress in carrots (*Daucus carota* L.)

- through metabolomics regulations. *Plant Physiology and Biochemistry*, 207, p.108383. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108383> **(Journal)**
- Mohamed, I. A., Shalby, N., El-Badri, A., Saleem, M. H., Khan, M. N., A. Nawaz, M., Qin, M., Agami, R. A., Kuai, J., Wang, B. and Zhou, G. 2020. Stomata and xylem vessels traits improved by melatonin application contribute to enhancing salt tolerance and fatty acid composition of *Brassica napus* L. plants. *Agronomy*, 10(8), p.1186. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081186> **(Journal)**
- Moradbeygi, H., Jamei, R., Heidari, R. and Darvishzadeh, R., 2020. Investigating the enzymatic and non-enzymatic antioxidant defense by applying iron oxide nanoparticles in *Dracocephalum moldavica* L. plant under salinity stress. *Scientia Horticulturae*, 272, p.109537. <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2020.109537> **(Journal)**
- Mukherjee, S. P. and Choudhuri, M. A. 1983. Implications of water stress-induced changes in the levels of endogenous plant hormones and leaf growth in soybeans. *Physiologia Plantarum*, 58(2), 307-313. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1983.tb04162.x> **(Journal)**
- Naheed, R., Aslam, H., Kanwal, H., Farhat, F., Gamar, M. I. A., Al-Mushhin, A. A., Jabborova, D., Ansari, M. J., Shaheen, S., Aqeel, M. and Noman, A. 2021. Growth attributes, biochemical modulations, antioxidant enzymatic metabolism and yield in *Brassica napus* varieties for salinity tolerance. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(10), pp.5469-5479. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.021> **(Journal)**
- Saadat, H. and Sedghi, M. 2024. The effect of priming on seed germination indices and antioxidant enzyme activity in chickpea seedlings (*Cicer arietinum* L.) under salinity stress. *Iranian Journal of Seed Sciences and Research*, 11(1), pp. 15-29. <https://doi.org/10.22124/jms.2024.8036> (In Persian) **(Journal)**
- Sadak, M. S., Abd El-Hameid, A. R., Zaki, F. S., Dawood, M. G. and El-Awadi, M.E. 2020. Physiological and biochemical responses of soybean (*Glycine max* L.) to cysteine application under sea salt stress. *Bulletin of the National Research Centre*, 44, pp.1-10. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0259-7> **(Journal)**
- Sanekhoori, F. H., Pirdashti, H. and Bakhshandeh, E. 2021. Quantifying water stress and temperature effects on camelina (*Camelina sativa* L.) seed germination. *Environmental and Experimental Botany*, 186, p.104450. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104450> **(Journal)**
- Sen, A., Islam, M. M., Zaman, E., Ghosh, U. K., Momtaz, M. B., Islam, M. A., Urmi, T. A., Mamun, M. A. A., Rahman, M. M., Kamal, M.Z.U. and Rahman, G.M. 2022. Agro-Morphological, yield and biochemical responses of selected wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes to salt stress. *Agronomy*, 12(12), p.3027. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123027> **(Journal)**
- Singh, A., Rajput, V. D., Sharma, R., Ghazaryan, K. and Minkina, T. 2023. Salinity stress and nanoparticles: Insights into antioxidative enzymatic resistance, signaling, and defense mechanisms. *Environmental Research*, p.116585. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116585> **(Journal)**
- Singleton, V. L. and Rossi, J.A. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*, 16(3), pp.144-158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144> **(Journal)**
- Stasnik, P., Vollmann, J., Großkinsky, D. K. and Jonak, C. 2024. Leaf carbohydrate metabolic enzyme activities are associated with salt tolerance and yield stability in the climate-resilient crop *Camelina sativa*. *Plant Stress*, 14, p.100629. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100629> **(Journal)**
- Subramanyam, K., Du Laing, G. and Van Damme, E. J. 2019. Sodium selenate treatment using a combination of seed priming and foliar spray alleviates salinity stress in rice. *Frontiers in plant science*, 10, p.116. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00116> **(Journal)**
- Teimoori, N., Ghobadi, M. and Kahrizi, D. 2023. Improving the growth characteristics and grain production of camelina (*Camelina sativa* L.) under salinity stress by silicon foliar application. *Agrotechniques in Industrial Crops*, 3(1), pp.1-13. <https://doi.org/10.22126/atic.2023.8681.1081> **(Journal)**
- Waraich, E. A., Ahmad, M., Soufan, W., Manzoor, M. T., Ahmad, Z., Habib-Ur-Rahman, M. and Sabagh, A.E. 2021. Seed priming with sulfhydryl thiourea enhances the performance of *Camelina sativa* L. under heat stress conditions. *Agronomy*, 11(9), p.1875. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091875> **(Journal)**
- Zafar, S., Hasnain, Z., Danish, S., Battaglia, M. L., Fahad, S., Ansari, M. J. and Alharbi, S. A. 2024. Modulations of wheat growth by selenium nanoparticles under salinity stress. *BMC Plant Biology*, 24(1), p.35. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04720-6> **(Journal)**



Influence of seed priming with magnesium nanoparticles on enhancing performance indicators and oil content of camelina (*Camelina sativa*) under salinity stress

Mohammad Haghaninia¹, Ali Najafifar², Freidoon Soleimani³, Amir Mirzaei⁴, Abdollah Javanmard^{*5}

Received: December 2, 2024

Accepted: February 2, 2025

Abstract

Salinity stress is a major agricultural challenge, leading to reduced growth and productivity in crop plants. While seed priming with nanoparticles has emerged as a novel approach to mitigate environmental stress effects, limited information is available regarding the impact of magnesium nanoparticles on camelina (*Camelina sativa*) under salinity stress. This study aimed to investigate the influence of seed priming with magnesium nanoparticles on growth, biochemical traits, and seed quality of camelina under salinity stress. The experiment was conducted as a factorial in a completely randomized design with three salinity levels (0, 100, and 200 mM NaCl) and four concentrations of magnesium nanoparticles (0, 100, 300, and 600 mg/L). Results showed that salinity stress reduced the potassium-to-sodium ratio, thousand-seed weight, seed yield, oil content, and caused unfavorable changes in fatty acid composition. In contrast, seed priming with magnesium nanoparticles, particularly at a concentration of 300 mg/L, improved the potassium-to-sodium ratio, enhanced antioxidant enzyme activities, increased phenolic and flavonoid contents, and decreased lipid peroxidation. This treatment also boosted seed yield and oil content by 168% and 43%, respectively, and improved oil quality by increasing unsaturated fatty acids and reducing palmitic acid content. Overall, the findings suggest that seed priming with magnesium nanoparticles, especially at 300 mg/L, can enhance the quantitative and qualitative traits of camelina seeds under salinity stress and serve as an effective strategy to mitigate salinity stress and improve crop productivity.

Keywords: Antioxidant activity; Camelina; Nanoparticles; Oil quality; Salinity stress; Seed priming

How to cite this article

Haghaninia, M., Najafifar, A., Soleimani, F., Mirzaei, A. and Javanmard, A. 2025. Influence of seed priming with magnesium nanoparticles on enhancing performance indicators and oil content of camelina (*Camelina sativa*) under salinity stress. Iranian Journal of Seed Science and Research, 11(4): 35-52. (In Persian) (Journal)

DOI: [10.22124/jms.2024.8797](https://doi.org/10.22124/jms.2024.8797)

COPYRIGHTS

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to the Iranian Journal of Seed Science and Research

The content of this article is distributed under Iranian Journal of Seed Science and Research open access policy and the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY4.0) License. For more information, please visit <http://jms.guilan.ac.ir/>

1. Researcher, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Ilam Province, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran. haghanii72@gmail.com
2. Research Associate Professor, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Ilam Province, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran. alinajafifar@yahoo.com
3. Research Assistant Professor, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Ilam Province, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran. fersolaimanii@gmail.com
4. Research Assistant Professor, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Ilam Province, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran. amir.mirsaei53@gmail.com
5. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran. a.javanmard@maragheh.ac.ir

*Corresponding author: a.javanmard@maragheh.ac.ir