نشریه فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۵، شماره ۷۴، مهر و آبان ۱۴۰۵ صفحه: ۴۳-۵۹
https://doi.org/10.22034/jispp.15.74.43

مقاله پژوهشی

تأثیر پرایمینگ بذر با نانوذرات کیتوزان بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم سائین تحت تنش شوری

هانیه سعادت و محمد صدقی*

گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

به‌منظور ارزیابی برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت گندم رقم سائین در پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان تحت تأثیر تنش شوری، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح شوری (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار) و چهار سطح نانوذرات کیتوزان (صفر (آب‌مقطر)، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی- حجمی (در اسید استیک یک درصد حل شده بودند)) بود. نتایج نشان داد که شوری درصد جوانه‌زنی و ضریب جوانه‌زنی کاهش داد، اما پرایمینگ بذر این صفات را بهبود بخشید، به نحوی‌که درصد جوانه‌زنی در تیمار با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد نسبت به شاهد (آب‌مقطر) حدود ۲۰ درصد افزایش نشان داد و مقدار ضریب جوانه‌زنی در پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد و بدون شوری در حدود ۸۶ نسبت به شاهد (آب‌مقطر) و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار افزایش داشت. شوری میانگین مدت جوانه‌زنی را افزایش داد، به‌طوری‌که بیش‌ترین میانگین مدت جوانه‌زنی (۱/۳۵۹ بذر در روز) در شوری ۱۵۰ میلی‌مولار بود. اثر اصلی نانوذرات کیتوزان و شوری بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز معنی‌دار ($P<0.01$) بود. فعالیت آنزیم پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز در تیمار با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار نسبت به شاهد به‌ترتیب در حدود ۴۹ و ۶۸ درصد افزایش نشان دادند. نتایج نشان داد پرایمینگ بذر با نانوذرات کیتوزان موجب تقویت شاخص‌های جوانه‌زنی و صفات بیوشیمیایی بذرهای گندم تحت تنش شوری شد و رشد گیاهچه را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز، شاخص‌های جوانه‌زنی، کلرید سدیم

مقدمه

افزایش جمعیت و تغییر شرایط آب‌وهوایی و تنش موجب شده است که امنیت غذایی به یکی از مهم‌ترین مسائل جهانی تبدیل شود (Lesk *et al.*, 2019). طبق، تحقیقات جمعیت جهان سالانه ۸۰ میلیون نفر افزایش می‌یابد و انتظار می‌رود که تا سال ۲۰۲۵ به بیش از ۸/۰ میلیارد و تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۹/۷ میلیارد نفر برسد (Kopittke *et al.*, 2019). بنابراین با افزایش جمعیت جهان، افزایش شاخص‌های رشد و عملکرد گیاه گندم

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱، اولین انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۰۸

* نویسنده مسئول، رایانامه: m_sedghi@uma.ac.ir

حق انتشار این مستند، متعلق به انجمن فیزیولوژی گیاهی ایران است. ۱۴۰۳ ©

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:
Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

به عنوان یک گیاه راهبردی جهت نیل به امنیت غذایی یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌رو است. گندم (*Triticum aestivum* L.) در آب‌وهوای مختلف رشد می‌کند (Abou-Zeid *et al*., 2021) و یکی از غلاتی است که امروزه بیشترین تولید را در جهان دارد. این گیاه منبع خوبی از مواد مغذی، به‌ویژه در مناطقی با منابع محدود است (Yaqoob *et al*., 2022) و به عنوان غذای اصلی در بسیاری از کشورها استفاده می‌شود. طبق گزارش‌ها، سطح زیرکشت گندم در استان اردبیل در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ حدود ۳۰۵/۸۱۰ هکتار بوده است (Agricultural Statistics, 2022-2023). سائین، رقم جدید گندم نان زمستانه سازگار با دیمزارهای سرد استان اردبیل و مناطق مستعد شمال غرب کشور است. این رقم جدید (Azar2/87Zhong 291) حاصل تلاقی رقم آذر ۲ به‌عنوان والد مادری (زمستانه و متحمل به تنش خشکی) با لاین 87Zhong 291 (تیپ رشد بینابین، پرمحصول، دانه درشت و مقاوم به زنگ زرد) بود، که به‌منظور تجمیع ژن‌های مفید در نتایج این دورگ در سال زراعی ۷۹-۱۳۷۸ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم مراغه انجام گردید (روستایی و همکاران، ۱۳۹۹). یکی از حساس‌ترین مراحل رشد گیاه که تحت تأثیر تنش‌های غیرزیستی قرار می‌گیرند، جوانه‌زدن بذر و استقرار گیاهچه است (Abeed *et al*., 2021) و تنش شوری به شدت مانع جوانه‌زنی بذر می‌شود. طبق برآوردها، تنش شوری به‌طور قابل توجهی تقریباً ۲۳٪ از زمین‌های کشاورزی و ۲۵ تا ۳۰٪ از مناطق آبیاری‌شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Karaca *et al*., 2022). عوامل متعددی مانند کاهش بارندگی، افزایش تبخیر سطحی، شیوه‌های کشاورزی و زراعی کنترل نشده و آبیاری با آب شور در ایجاد تنش شوری نقش دارند (Hualpa-Ramirez *et al*., 2024). رشدونمو گیاهان به‌طرق مختلفی از جمله کاهش مصرف آب و مواد معدنی، اختلال در فتوسنتز و تعادل اسمزی ناشی از تجمع یون‌های نمک در ریزوسفر تحت تأثیر تنش شوری قرار می‌گیرند (Dabravolski and Isayenkov, 2024). یون‌های نمک تعادل اکسایش-کاهش را در سلول‌های گیاهی مختل می‌کنند و باعث تنش یونی، اسمزی و اکسیداتیو می‌شوند (Zhou *et al*., 2024). شوری تولید اسمولیت‌ها و سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهان زراعی را تعدیل می‌کند (Kang *et al*., 2024). با این وجود، کارایی غلات به‌دلیل تنش شوری که تولید را محدود کرده و امنیت غذایی را تضعیف می‌کند، مختل می‌شود (Yan *et al*., 2024). گونه‌های فعال اکسیژن مولکول‌های واکنش‌پذیری هستند که تحت تنش شوری باعث ایجاد تنش اکسیداتیو، آسیب به پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک و در نهایت مرگ سلولی می‌شوند (Sheikhalipour *et al.,* 2021). سعادت و صدقی (۱۴۰۲b و ۱۴۰۳) گزارش کردند تنش شوری سبب کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی و صفات بیوشیمیایی در گیاه گندم می‌شود.

پرایمینگ بذر، اثرات نامطلوب تنش شوری بر گیاهان زراعی را کاهش می‌دهد (Yan *et al*., 2024). به‌عبارتی، پرایمینگ بذر یکی از راه کارهای مقابله با شرایط تنش غیرزیستی است (Monajjem *et al*., 2023). تحت شرایط محدودیت، پرایمینگ بذر ویژگی‌های فیزیکو- بیوشیمیایی محصولات غلات، از جمله گندم را در شرایط تنش‌زا افزایش می‌دهد (Choudhary *et al*., 2021). نانوپرایمینگ یک رویکرد جدید در فناوری‌های تیمار بذر است که شامل استفاده از نانومواد یا نانوفرمولاسیون‌های مختلف روی بذرها قبل از کاشت می‌شود (Nile *et al*., 2022). فناوری نانو با بهره‌گیری از ویژگی‌های منحصر به فرد ذرات نانومقیاس با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر، یک حوزه جدید و امیدوارکننده از بیوتکنولوژی در زمینه‌های مختلف، از جمله کشاورزی است. کاربرد نانومواد یک حوزه مطالعاتی نسبتاً جدید و نوظهور است که پتانسیل زیادی برای کاهش تنش گیاهان، چه زیستی و چه غیرزیستی دارد (Balusamy *et al*., 2022). پرایمینگ قبل از جوانه‌زنی، متابولیسم بذر، تولید RNA، آنتی‌اکسیدان‌ها و سنتز پروتئین را فعال می‌کند که در نتیجه جوانه‌زنی و نمو مناسب بذر را تضمین می‌کند (Feghhenabi *et al*., 2020). پرایمینگ بذر تولید سطوح پایین گونه‌های اکسیژن فعال را تحریک می‌کند که منعکس‌کننده پاسخ‌های دفاعی سریع سلولی است (Wojtyla *et al*., 2016) و می‌تواند به بذرها در ایجاد تحمل

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

متقاطع در برابر تنش‌های غیرزیستی مانند سمیت یونی، تنش شوری و تنش اسمزی کمک کند (Alhammad *et al*., 2023). تیمارهای پرایمینگ از ظهور رادیکال جلوگیری می‌کنند، اما جوانه‌زنی را افزایش می‌دهند و فرآیندهای مرتبط با جوانه‌زنی را آغاز می‌کنند (Saddiq *et al*., 2019).

کیتوزان یک بیوپلی‌ساکارید طبیعی است که به‌طور گسترده در کشاورزی استفاده می‌شود. این ماده به عنوان یک ماده پایه توسط سازمان علوم، غذای ایمن و پایداری اروپا (EFSA) ثبت شده است و به‌دلیل خواص آن به‌عنوان یک عامل ضدقارچ، ضدباکتری و محرک رشد، پرکاربردترین ماده در کشاورزی اکولوژیکی است (Roman-Doval *et al*., 2023). نانوذرات کیتوزان علاوه بر غیرسمی و زیست‌تخریب‌پذیر بودن، می‌توانند در مزارع کشاورزی به عنوان یک عامل دفاعی گیاه و محرک رشد گیاه مورد استفاده قرار گیرند (Ingle *et al*., 2022). نانوذرات کیتوزان علاوه بر قابلیت‌های ادعایی ضدسرطانی، ضدقارچی و آنتی‌اکسیدانی، ممکن است سیستم ایمنی گیاه را نیز تقویت کرده و به مدیریت عوامل تنش‌زای زیستی و غیرزیستی کمک کنند (Chun and Chandrasekaran, 2019). تحقیقات نشان داده است که غلظت پایین‌تر نانوذرات کیتوزان محتوای فنل‌های کل و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز) را در مقایسه با گیاهچه‌های شاهد در گیاه لوبیا افزایش داد (Abdel-Aziz, 2019). استفاده از کیتوزان سازوکارهای تحمل را در برابر تنش شوری در گیاهان مختلف از جمله لوبیا، برنج و سویا افزایش می‌دهد (سعادت و همکاران، ۱٤۰۲a؛ Saadat *et al*., 2024, 2025). براساس پژوهش‌های انجام‌شده با افزایش سطوح تنش شوری از شاخص‌های جوانه‌زنی و برخی از فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاسته شد، ولی تیمارهای پرایمینگ با سطوح مختلف کیتوزان سبب افزایش آن‌ها گردید (سعادت و همکاران، ۱٤۰۲a؛ Saadat *et al*., 2024, 2025). تحقیقات نشان داده است که پرایمینگ با نانوذرت کیتوزان درصد جوانه‌زنی و شاخص‌های بنیه بذر در گیاه سویا را افزایش می‌دهد (Steven *et al*., 2024). نانوذرات کیتوزان، سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز در گیاه گندم می‌شود (El-sharkawy *et al*., 2022). طبق گزارش‌ها، پرایمینگ با نانو کیتوزان در طول جوانه‌زنی و رشد گیاهچه، تحمل در مقابل تنش شوری را ایجاد کرده و رشد پایدار را تضمین می‌کند (Hameed *et al*., 2024). نتایج تحقیقی نشان می‌دهد که نانوذرات کیتوزان به دلیل جذب بیشتر روی سطح دانه‌های گندم، در غلظت‌های پایین‌تر، تأثیر مثبتی بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه گندم دارد (Li *et al*., 2019).

با وجود گزارش‌های متعدد در مورد تأثیرات مثبت پرایمینگ و نانوذرات کیتوزان بر گیاهان تحت تنش، چندین شکاف دانشی مهم وجود دارد که این پژوهش قصد دارد به آن بپردازد: ۱) پاسخ ویژه رقم بومی و مهم "سائین" به پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان تحت تنش شوری به خوبی شناخته نشده است. ۲) تعیین غلظت بهینه نانوذرات کیتوزان برای حصول حداکثر اثر در بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی و تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی این رقم نیازمند پژوهش است. ۳) مقایسه سیستماتیک کارایی نانوپرایمینگ با کیتوزان در مقابل روش متداول هیدروپرایمینگ در شرایط تنش شوری برای این گیاه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ٤) واکنش همزمان و کمّی آنزیم‌های کلیدی آنتی‌اکسیدان (مانند کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز) در گیاهچه‌های گندم رقم سائین در تعامل با تیمارهای پرایمینگ و سطوح مختلف شوری به وضوح مشخص نیست.

بنابراین، هدف اصلی از این پژوهش، ارزیابی دقیق تأثیر پرایمینگ بذر با غلظت‌های مختلف نانوذرات کیتوزان (۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد) در مقایسه با هیدروپرایمینگ بر شاخص‌های جوانه‌زنی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گندم رقم سائین تحت سطوح مختلف تنش شوری (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار) است. نتایج این مطالعه می‌تواند در تعیین بهترین تیمار پرایمینگ برای افزایش تحمل به شوری در این رقم راهبردی و دستیابی به استانداردهای کشاورزی پایدار مؤثر واقع شود.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت گندم رقم سائین در پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان تحت تأثیر تنش شوری آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در دانشگاه محقق اردبیلی در سال ١٤٠٤ با سه تکرار و چهار سطح شوری (صفر، ٥٠، ١٠٠ و ١٥٠ میلی‌مولار کلرید سدیم) (Saadat and Sedghi, 2025) و چهار سطح نانوذرات کیتوزان (شاهد (آب مقطر)، ٠/١، ٠/٢ و ٠/٥ درصد وزنی- حجمی) انجام گرفت. به منظور بهینه‌سازی غلظت‌های مورد استفاده در پرایمینگ بذر گندم غلظت‌های ٠/١، ٠/٢، ٠/٤، ٠/٥، ٠/٦ و ٠/٨ درصد وزنی- حجمی مورد آزمایش قرار گرفتند. پس از آزمون جوانه‌زنی استاندارد در دمای ٢٥ درجه سانتی‌گراد به مدت هشت روز (ISTA, 2008)، غلظت‌های بهینه ٠/١، ٠/٢ و ٠/٥ درصد وزنی- حجمی براساس بیش‌ترین درصد و سرعت جوانه‌زنی و بالاترین طول و وزن خشک گیاهچه انتخاب شدند. بذرهای گندم رقم سائین طبقه بذر گواهی‌شده تولید ١٤٠٣ از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل تهیه شد. نانوذرات کیتوزان طوسی رنگ با خلوص ٩٩٪، متوسط اندازه ذرات کمتر از ٥٠ نانومتر و سطح ویژه بیشتر از ٨٠ مترمربع بر گرم ساخت امریکا بود که از شرکت ایرانی پیشگامان نانو مواد ایران تهیه شد. قبل از پرایم کردن جهت ضدعفونی، بذرها به مدت ٥ دقیقه در محلول یک درصد هیپوکلریت سدیم غوطه‌ور و سپس سه بار با آب‌مقطر شسته شدند. برای تهیه محلول نانو ذرات کیتوزان، این نانو ذرات در اسید استیک یک درصد حل و سپس با آب‌مقطر رقیق و در روی هیتر به مدت ٢ ساعت در دمای ٩٠ درجه سانتی‌گراد با ١٤٠٠ دور قرار داده شدند و اسیدیته محلول با سدیم هیدروکسید ١ درصد تنظیم گردید (Li *et al*., 2008). ابتدا بذرها درون محلول‌های پرایمینگ و آب‌مقطر به‌مدت هشت ساعت در دمای ٢٥ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند (Farooq *et al*., 2022). بذرها در داخل ارلن‌های استریل قرار داده شده و به ازای هر گرم بذر، ١٠ میلی‌لیتر از محلول‌های پرایمینگ (شامل آب‌مقطر به عنوان هیدروپرایمینگ و محلول‌های نانوذرات کیتوزان در اسید استیک ١٪) به آن‌ها اضافه گردید. سپس، ارلن‌ها به مدت هشت ساعت در دمای ٢٥ درجه سانتی‌گراد و در شرایط سکون (همزدن استاتیک) قرار داده شدند. در طراحی این پژوهش، تیمار هیدروپرایمینگ (آب مقطر) به عنوان شاهد اصلی و مقایسه‌ای برای تمامی تیمارهای شیمیایی در نظر گرفته شد. از آنجا که کلیه تیمارهای نانوذرات کیتوزان در یک محیط حلال یکسان (اسید استیک ١٪) تهیه شدند، هر گونه تفاوت معنی‌دار بین این تیمارها و شاهد اصلی (آب‌مقطر) را می‌توان به اثر ترکیبی حلال و نانوذرات، و هر گونه تفاوت بین سطوح مختلف نانوذرات را می‌توان به‌طور خاص به غلظت نانوذرات نسبت داد. این رویکرد امکان مقایسه کارایی غلظت‌های مختلف نانوذرات را تحت شرایط یکسان فراهم می‌سازد. بعد از پرایمینگ، بذرها به‌وسیله آب مقطر شستشو و در دمای آزمایشگاه به مدت ٢٤ ساعت خشک شدند. سپس، آزمون جوانه‌زنی استاندارد روی بذرها انجام شد. آزمون جوانه‌زنی به روش پتری در سه تکرار ٢٥ بذری در دمای ٢٥ درجه سلسیوس به مدت هشت روز انجام گرفت (ISTA, 2013) و به هر پتری محلول شوری (کلرید سدیم) با سطوح مختلف به مقدار ٦ میلی‌لیتر اضافه گردید. سپس، پتری‌ها در داخل ژرمیناتور در دمای ٢٥ درجه سانتی‌گراد، ١٦ ساعت نور و هشت ساعت تاریکی قرار داده شد.

اندازه‌گیری شاخص‌های جوانه‌زنی: در پایان دوره جوانه‌زنی (هشت روز) تعداد کل بذرهای جوانه‌زده شمارش و یاداشت برداری جهت تعیین درصد جوانه‌زنی انجام شد. ضریب جوانه‌زنی از رابطه ١ (فتحی امیرخیز و همکاران، ١٣٩١) و میانگین مدت جوانه‌زنی از رابطه ٢ (Hoogenboom and Peterson *et al*., 1987) به دست آمد.

رابطه ١: $GC = 1/MGT \times 100$

MGT: میانگین مدت زمان جوانه‌زنی

رابطه ٢: $MGT = \Sigma (Ni) / \Sigma N$

N: تعداد دفعات شمارش، Ni: تعداد بذر جوانه‌زده در روز D

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های‌آنتی‌اکسیدانی، تهیه عصاره

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

آنزیمی: به‌منظور تعیین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گندم، گیاهچه‌ها در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در داخل پتری درون ژرمیناتور به مدت ۹ روز رشد داده شدند. پس از باز شدن برگ‌های اولیه از هر تیمار پنج گیاهچه به صورت تصادفی انتخاب و بعد از قراردادن در فویل آلومینیومی، به فریزر با دمای ۷۲- درجه سانتی‌گراد منتقل شدند. به‌منظور استخراج عصاره آنزیمی، ۰/۵ گرم نمونه از هر تیمار توزین و در داخل هاون چینی (که از قبل در یخچال نگهداری شده بود) با استفاده از نیتروژن مایع هموژن گردید و بعد از آن ۵ میلی‌لیتر از بافر فسفات سرد (pH=۷/۵) حاوی ۰/۵ میلی‌مولار EDTA به هاون افزوده شد. سپس، هموژن‌ها به اپندورف‌های ۲ میلی‌لیتری منتقل شده و به مدت ۱۵ دقیقه با دمای ٤ درجه سلسیوس با سرعت ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ شدند. تمامی مراحل در روند تهیه عصاره آنزیمی در دمای ٤-۱ درجه سلسیوس انجام گرفت. جهت پیشگیری از انجماد و ذوب متوالی نمونه‌ها سوپرناتانت حاصل به سه قسمت تقسیم شد و تا زمان اندازه‌گیری آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در دمای ۲۰- درجه سلسیوس نگهداری شدند (Sairam *et al.*, 2002). پروتئین کل تمامی عصاره‌ها به روش برادفورد (Bradford, 1976) و با استفاده از آلبومین سرم گاوی (BSA) به عنوان استاندارد تعیین گردید.

سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT): سنجش فعالیت این آنزیم طبق روش (Aebi, 1984) و در حجم نهایی ۳ میلی‌لیتر انجام شد. مخلوط واکنش شامل ۱/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=۷)، ۰/۵ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۷/۵ میلی‌مولار و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. تغییرات جذب در طول‌موج ۲٤۰ نانومتر به مدت یک دقیقه ثبت شد. هر نمونه به عنوان یک تکرار بیولوژیک در سه تکرار فنی (Technical replicate) اندازه‌گیری شد. فعالیت آنزیم بر اساس میکرومول پراکسید هیدروژن تجزیه‌شده در دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین ($\mu mol\ H_2O_2\ min^{-1}\ mg^{-1}$ protein) بیان شد.

سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD): فعالیت این آنزیم براساس روش Hemeda و Klein (۱۹۹۰) و در حجم نهایی ۱ میلی‌لیتر ارزیابی شد. مخلوط واکنش شامل ۲۵۰ میکرولیتر بافر فسفات ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=۷)، ۲۵۰ میکرولیتر گایاکول ۱۰ میلی‌مولار، ۳٤ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۷۰ میلی‌مولار، ٤٤٦ میکرولیتر آب‌مقطر و ۲۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. افزایش جذب در طول‌موج ٤۷۰ نانومتر ثبت شد. هر نمونه در سه تکرار فنی سنجیده و فعالیت آنزیم بر حسب واحد تغییر جذب در دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین ($\Delta A\ min^{-1}$ protein mg^{-1}) گزارش شد.

سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD): فعالیت آنزیم براساس روش Giannopolitis و Ries (۱۹۷۷) و در حجم نهایی ۳/۱ میلی‌لیتر مورد سنجش قرار گرفت. مخلوط واکنش شامل بافر ۰/۱ مول در لیتر فسفات (pH=۷/۸) به میزان ۳ میلی‌لیتر که حاوی ۱/۳ میکرومول در لیتر ریبوفلاوین، متیونین به میزان ۱۳ میلی‌مول در لیتر، نیتروبلو تترازولیوم به میزان ٦۳ میکرومولار و عصاره آنزیمی به میزان ۰/۱ میلی‌لیتر بود. نمونه بلانک در تاریکی به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفت و نمونه‌های شاهد و عصاره آنزیمی در محفظه نوری با دو لامپ فلورسنت ۲۰W به مدت ۱۵ دقیقه و ۱۰۰ دور در دقیقه بر روی شیکر گذاشته شد. سپس، جذب در طول‌موج ٥٦۰ نانومتر خوانده شد.

هر تیمار در سه تکرار فنی اندازه‌گیری شد. یک واحد فعالیت SOD به مقدار آنزیمی تعریف شد که باعث مهار ۵۰٪ از احیای نیتروبلو تترازولیوم (NBT) در شرایط آزمایش می‌شود و فعالیت براساس واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین (Unit mg^{-1} protein) بیان گردید.

سنجش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX): سنجش فعالیت APX براساس روش (Nakano and Asada, 1981) و در حجم نهایی ۱ میلی‌لیتر انجام گردید. برای اندازه‌گیری فعالیت این آنزیم ۲۵۰ میلی‌مولار بافر فسفات با اسیدیته ۷، ۰/۱ میلی‌مولار EDTA، ۵ میلی‌مولار آسکوربات، ۰/۳ میلی‌مولار پراکسید هیدروژن در حمام یخ با یکدیگر مخلوط شدند. سپس، بلافاصله ۰/۵ میکرولیتر از عصاره

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

آنزیمی به آن افزوده شد. کاهش در جذب به‌دلیل اکسیداسیون آسکوربات در طول‌موج ۲۹۰ نانومتر و ۲۰ ثانیه بعد از اضافه کردن پراکسید هیدروژن به‌وسیله اسپکتروفتومتر ثبت گردید. هر نمونه در سه تکرار فنی خوانده شد و فعالیت آنزیم بر حسب میکرومول آسکوربات اکسید شده در دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین ($\mu mol\ ascorbate\ min^{-1}\ mg^{-1}\ protein$) بیان گردید.

آنالیز آماری داده‌ها: پس از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو- ویلک در نرم‌افزار SPSS، داده‌ها با استفاده از آزمون تحلیل واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) در نرم‌افزار SAS نسخه ۹/٤ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند تا معناداری اثرات اصلی تیمارهای پرایمینگ و شوری و همچنین اثر متقابل آن‌ها تعیین گردد. در مواردی که اثر متقابل دو فاکتور در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود، به منظور مقایسه دقیق‌تر میانگین‌ها، داده‌ها به صورت جداگانه در قالب طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از آزمون تحلیل واریانس یکطرفه (One-way ANOVA) تجزیه شدند. مقایسه میانگین‌ها در هر دو حالت با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام پذیرفت. همچنین، برای تسهیل در مقایسه‌های جزئی در بین سطوح اثرات متقابل معنی‌دار، از دستور Slice در محیط نرم‌افزار SAS بهره گرفته شد. در نهایت، برای ترسیم نمودارها از نرم‌افزار Excel 2018 استفاده شد.

نتایج

درصد جوانه‌زنی: در این تحقیق، اثر ساده نانوذرات کیتوزان و شوری بر درصد جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آن‌ها غیرمعنی‌دار بود (جدول ۱). کاربرد نانوذرات کیتوزان ۰/۱ و ۰/۲ درصد و هیدرو پرایمینگ توانست درصد جوانه‌زنی افزایش دهد، اما تأثیر پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد بیشتر از سطوح دیگر نانوذرات کیتوزان و هیدروپرایمینگ بود (شکل 1a). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که درصد جوانه‌زنی در پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد نسبت به شاهد (آب‌مقطر) حدود ۱۹ درصد افزایش نشان داد. با افزایش شوری درصد جوانه‌زنی کاهش یافت. به‌طوری‌که درصد جوانه‌زنی در شوری ۱۵۰ میلی‌مولار نسبت به شاهد (بدون شوری) حدود ۲۰ درصد کاهش نشان داد (شکل 1b).

ضریب جوانه‌زنی: در این تحقیق، اثر ساده نانوذرات کیتوزان و شوری بر ضریب جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). طبق برش‌دهی اثر پرایمینگ در هر چهار سطح شوری (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار) و اثر شوری در هر چهار سطح پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان (صفر، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد) بر ضریب جوانه‌زنی معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که ضریب جوانه‌زنی در تیمار با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد و بدون شوری نسبت به شاهد (آب‌مقطر) و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار در حدود ۸٦ درصد افزایش نشان داد (جدول ۲ و ٤).

میانگین مدت جوانه‌زنی: در این تحقیق، اثر ساده نانوذرات کیتوزان و شوری و اثر متقابل آن‌ها بر میانگین مدت جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). طبق برش‌دهی اثر پرایمینگ در هر چهار سطح شوری (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار) و اثر شوری در هر چهار سطح پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان (صفر، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد) بر میانگین مدت جوانه‌زنی معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که میانگین مدت جوانه‌زنی در تیمار با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد و بدون شوری نسبت به شاهد (آب‌مقطر) و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار در حدود ۸۷ درصد کاهش داشت (جدول ۲ و ٤). البته غلظت ۰/۱ و ۰/۲ نانوذرات کیتوزان بر میانگین مدت جوانه‌زنی تأثیر داشت.

فعالیت آنزیم کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز: در این تحقیق، اثر ساده نانوذرات کیتوزان و شوری بر فعالیت آنزیم کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار و اثر متقابل نانوذرات کیتوزان و شوری بر این صفات غیرمعنی‌دار بود (جدول ۱). پرایمینگ نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد بیشتر از سطوح نانوذرات کیتوزان ۰/۱ و ۰/۲ درصد و

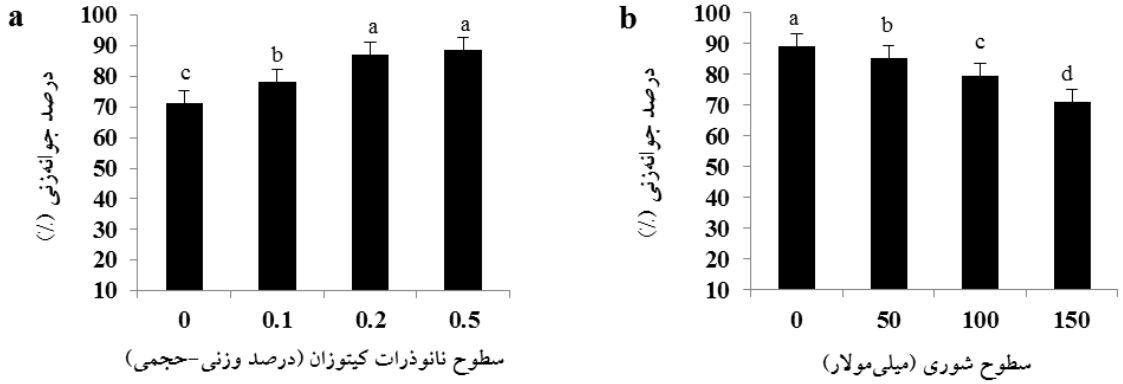
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

جدول ۱- تجزیه واریانس اثر نانوذرات کیتوزان و شوری بر صفات فیزیولوژیکی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت گندم

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		درصد جوانه‌زنی	ضریب جوانه‌زنی	میانگین مدت جوانه‌زنی	کاتالاز	پراکسیداز	سوپراکسید دیسموتاز	آسکوربات پراکسیداز
کیتوزان	۳	۷۸۰/۳۱**	۱۹۹۸۶۸/۲۵**	۰/۹۲۸۸**	۰/۳۴۶۸۴۷**	۰/۱۵۳۹**	۰/۱۸۷۰۵**	۱۹/۱۲۸**
شوری	۳	۷۳۸/۹۲**	۸۹۴۰۱/۴۷**	۰/۴۳۶۷**	۰/۰۱۴۳۶۰**	۰/۰۴۸۷**	۰/۰۱۷۹۶**	۲/۵۷۴**
کیتوزان×شوری	۹	۱۰/۵۵ ns	۵۷۲۱/۱۲*	۰/۰۵۳۱**	۰/۰۰۰۴۱۱ns	۰/۰۰۸۶**	۰/۰۰۰۷۵ ns	۰/۳۱۹**
خطای آزمایشی	۳۲	۱۳/۹۸	۲۰۱۰/۸۳	۰/۰۱۳۹	۰/۰۰۲۶۵۴	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۲۹۹	۰/۰۹۸
ضریب تغییر (٪)		۴/۵۹۹	۱۵/۹۲۷	۲۴/۰۹۱	۱۴/۹۰۷	۴/۶۹۸	۹/۲۰۶	۹/۵۱۹

ns، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ درصد



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر ساده نانوذرات کیتوزان (a) و تنش شوری (b) بر درصد جوانه‌زنی در گندم. حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر حسب آزمون دانکن است.

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوذرات کیتوزان و شوری بر ضریب جوانه‌زنی و میانگین مدت جوانه‌زنی گیاهچه گندم (برش پرایمینگ در هر سطح شوری)

تیمار شوری (میلی‌مولار)	پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان (درصد وزنی- حجمی)							
	ضریب جوانه‌زنی				میانگین مدت جوانه‌زنی (بذر در روز)			
	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۵	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۵
۰	۱۷۸/۰۰^{d}	۲۸۴/۶۷^{c}	۴۴۷/۰۰^{b}	۵۶۳/۰۰^{a}	۰/۵۶۸^{a}	۰/۳۵۹^{b}	۰/۲۲۸^{c}	۰/۱۷۹^{d}
۵۰	۱۵۷/۳۳^{d}	۲۶۵/۰۰^{c}	۴۱۶/۰۰^{b}	۴۹۱/۰۰^{a}	۰/۶۴۵^{a}	۰/۳۸۶^{b}	۰/۲۴۴^{c}	۰/۲۰۷^{d}
۱۰۰	۱۱۵/۰۰^{c}	۲۰۶/۰۰^{b}	۳۴۷/۳۳^{a}	۳۳۳/۳۳^{ab}	۰/۸۹۹^{a}	۰/۵۰۵^{b}	۰/۲۹۲^{d}	۰/۳۰۴^{c}
۱۵۰	۷۷/۰۰^{c}	۱۱۶/۰۰^{b}	۲۶۵/۰۰^{a}	۲۴۳/۰۰^{ab}	۱/۳۵۹^{a}	۰/۸۶۹^{b}	۰/۳۷۸^{d}	۰/۴۱۳^{c}

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر حسب آزمون دانکن است.

هیدروپرایمینگ بود. فعالیت آنزیم کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد نسبت به شاهد (آب‌مقطر) به‌ترتیب ۷۳ و ۳۸ درصد افزایش نشان دادند (شکل ۲a و ۲c). شوری فعالیت آنزیم کاتالاز و

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوذرات کیتوزان و شوری بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گیاهچه گندم (برش پرایمینگ در هر سطح شوری)

تیمار شوری (میلی‌مولار)	پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان (درصد وزنی- حجمی)							
	پراکسیداز (واحد میلی‌گرم بر پروتئین در دقیقه)				آسکوربات پراکسیداز (واحد میلی‌گرم بر پروتئین در دقیقه)			
	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۵	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۵
۰	۰/٤۹۰^{d}	۰/۷۲۰^{c}	۰/۸۰۲^{b}	۰/۹۲۰^{a}	۱/٦۷۷^{c}	۲/۱۰۷^{bc}	۲/۷۰۰^{b}	٤/۹۱۹^{a}
۵۰	۰/٦۸۱^{d}	۰/۷۲٤^{c}	۰/۸۰۹^{b}	۰/۹۳۳^{a}	۱/۷۲۳^{d}	۲/۳۸۰^{c}	۳/۳۲۱^{b}	٤/۹۵۲^{a}
۱۰۰	۰/۷۳۷^{cd}	۰/۷٦۸^{c}	۰/۸٦۱^{b}	۰/۹٤۷^{a}	۰/۸۰٦^{d}	۲/۷۲۰^{c}	۳/٦٤۰^{b}	۵/۰۰۹^{a}
۱۵۰	۰/۷۹۱^{c}	۰/۸۵۷^{b}	۰/۹۲۹^{ab}	۰/۹۵۸^{a}	۳/۱۸۰^{c}	۳/۵٦۷^{bc}	۳/۷۹۳^{b}	۵/۲۰٤^{a}

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر حسب آزمون دانکن است.

جدول ٤- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوذرات کیتوزان و شوری بر ضریب جوانه‌زنی و میانگین مدت جوانه‌زنی گیاهچه گندم (برش پرایمینگ در هر سطح شوری)

پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان (درصد وزنی- حجمی)	سطوح شوری (میلی‌مولار)							
	ضریب جوانه‌زنی				میانگین مدت جوانه‌زنی (بذر در روز)			
	۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
۰	۱۷۸/۰۰^{a}	۱۵۷/۳۳^{b}	۱۱۵/۰۰^{c}	۷۷/۰۰^{d}	۰/٦۵۸^{d}	۰/٦٤۵^{c}	۰/۸۹۹^{b}	۱/۳۵۹^{a}
۰/۱	۲۸٤/٦۷^{a}	۲٦۵/۰۰^{ab}	۲۰٦/۰۰^{b}	۱۱٦/۰۰^{c}	۰/۳۵۹^{cd}	۰/۳۸٦^{c}	۰/۵۰۵^{b}	۰/۸٦۹^{a}
۰/۲	٤٤۷/۰۰^{a}	٤۱٦/۰۰^{b}	۳٤۷/۳۳۳^{c}	۲٦۵/۰۰^{d}	۰/۲۲۸^{cd}	۰/۲٤٤^{c}	۰/۲۹۲^{b}	۰/۳۷۸^{a}
۰/۵	۵٦۳/۰۰^{a}	٤۹۱/۰۰^{b}	۳۳۳/۳۳^{c}	۲٤۳/۰۰^{d}	۰/۱۷۹^{d}	۰/۲۰۷^{c}	۰/۳۰٤^{b}	۰/٤۱۳^{a}

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر حسب آزمون دانکن است.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوذرات کیتوزان و شوری بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان گیاهچه گندم (برش پرایمینگ در هر سطح شوری)

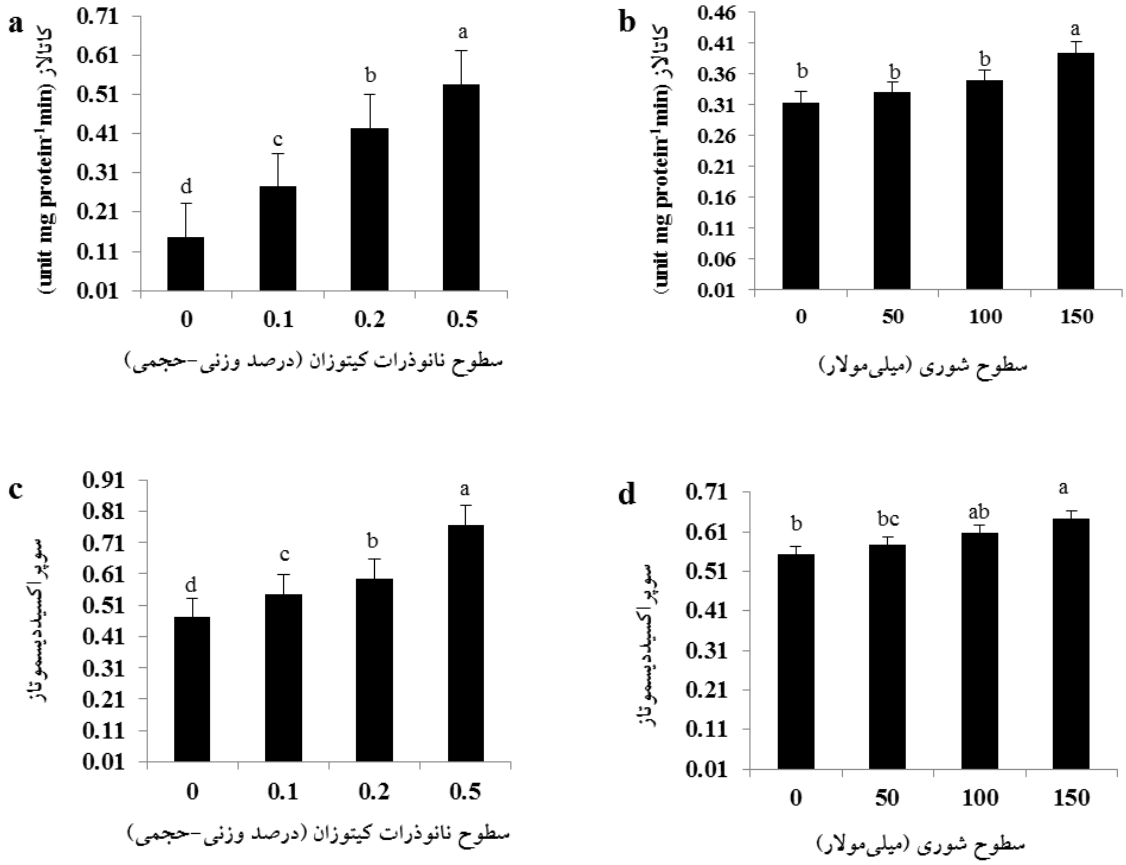
پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان (درصد وزنی- حجمی)	سطوح شوری (میلی‌مولار)							
	پراکسیداز (واحد میلی‌گرم بر پروتئین در دقیقه)				آسکوربات پراکسیداز (واحد میلی‌گرم بر پروتئین در دقیقه)			
	۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
۰	۰/٤۹۰^{d}	۰/٦۸۱^{c}	۰/۷۳۷^{b}	۰/۷۹۱^{a}	۱/٦۷۷^{c}	۱/۷۲۳^{b}	۰/۸۰٦^{d}	۳/۱۸۰^{a}
۰/۱	۰/۷۲۰^{cd}	۰/۷۲٤^{c}	۰/۷٦۸^{b}	۰/۸۵۷^{a}	۲/۱۰۷^{cd}	۲/۳۸۰^{c}	۲/۷۲۰^{b}	۳/۵٦۷^{a}
۰/۲	۰/۸۰۲^{cd}	۰/۸۰۹^{c}	۰/۸٦۱^{b}	۰/۹۲۹^{a}	۲/۷۰۰^{d}	۳/۳۲۱^{c}	۳/٦٤۰^{b}	۳/۷۹۳^{a}
۰/۵	۰/۹۲۰^{bc}	۰/۹۳۳^{abc}	۰/۹٤۷^{ab}	۰/۹۵۸^{a}	٤/۹۱۹^{cd}	٤/۹۵۲^{c}	۵/۰۰۹^{b}	۵/۲۰٤^{a}

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد برحسب آزمون دانکن است.

سوپراکسید دیسموتاز را افزایش داد. به‌طوری‌که، فعالیت آنزیم کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در شوری ۱۵۰ میلی‌مولار

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر ساده نانوذرات کیتوزان (a و c) و تنش شوری (b و d) بر آنزیم کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در گندم. حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر حسب آزمون دانکن است.

نسبت به شاهد (بدون شوری) به‌ترتیب ۲۰ و ۱٤ درصد افزایش نشان دادند (شکل ۲b و ۲d).

فعالیت آنزیم پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز: در این تحقیق، اثر ساده نانوذرات کیتوزان و شوری و اثر متقابل آن‌ها بر فعالیت آنزیم پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). طبق برش‌دهی اثر پرایمینگ در هر چهار سطح شوری (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار) و اثر شوری در هر چهار سطح پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان (صفر، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد) بر فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز معنی‌دار بود. پرایمینگ با سطوح نانوذرات کیتوزان ۰/۱ و ۰/۲ درصد و هیدرو پرایمینگ توانست روی فعالیت آنزیم پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز تأثیر بگذارد، اما تأثیر نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد بیشتر از سطوح نانوذرات کیتوزان ۰/۱ و ۰/۲ درصد و هیدروپرایمینگ بود. به‌طوری‌که، فعالیت آنزیم پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز در تیمار با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار نسبت به شاهد (آب‌مقطر و بدون شوری) به‌ترتیب در حدود ٤۹ و ٦۸ درصد افزایش نشان دادند (جدول ۳ و ۵).

بحث

در این تحقیق، درصد جوانه‌زنی تحت تنش شوری کاهش و میانگین مدت جوانه‌زنی افزایش یافت که با نتایج سعادت و صدقی (۱٤۰۲b) روی گیاه گندم تحت تنش شوری تطابق داشت. با این حال، نانوذره کیتوزان به‌خوبی توانست آثار منفی حاصل از تنش مذکور را تعدیل نماید و به رشد گیاه گندم کمک کند و این می‌تواند به این دلیل باشد که یون‌های نمک کمتری تجمع یافته و شاخص‌های تنش اکسیداتیو کمتری

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

وجود داشته است. کاهش درصد جوانه‌زنی در گندم تحت شوری می‌تواند با تأثیر تنش بر نفوذپوذیری غشا، افزایش تنفس بذر و کاهش انرژی اولیه ضروری بذر برای جوانه‌زنی ارتباط داشته باشد (نظری و همکاران، ۱۳۹۹). تنش شوری با کاهش جذب آب، پتانسیل آبی را کاهش داده و افزایش تجمع بالای سدیم و کلر باعث کاهش درصد جوانه‌زنی می‌شود (Nawaz *et al.*, 2022). تحت تنش شوری میانگین مدت جوانه‌زنی افزایش یافت که نشان می‌دهد بذرهای در مدت زمان بیشتری جوانه زدند. شوری از طریق عبور از عرض غشای سلولی داخل سیتوپلاسم سلول شده و با تجمع یون‌ها در سیتوپلاسم موجب تجمع و سمیت و محدودیت در جذب بعضی از عناصر مورد نیاز می‌گردد و در نتیجه میانگین مدت زمان جوانه‌زنی را افزایش می‌دهد (عموآقایی، ۱۳۸۸). پرایمینگ بذر با فعال‌کردن برخی آنزیم‌ها در بذر درصد جوانه‌زنی افزایش داده و دسترسی به مواد مغذی را آسان‌تر می‌کند. در نهایت بذرهای پرایم شده زودتر جوانه‌زده و تنش را بیشتر تحمل می‌کند (Bahrasemani *et al.*, 2024) و پرایمینگ با شکسته‌شدن پروتئین‌ها و قندها بر اثر آنزیم‌ها و واکنش‌های هیدرولیزکننده میانگین مدت جوانه‌زنی کاهش داد (Bittebcourt *et al.*, 2004). پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان به ویژه غلظت ۰/۵ درصد به‌طور قابل توجهی عملکرد جوانه‌زنی را تحت تنش شوری افزایش داد و منجر به ضریب جوانه‌زنی بالاتر و میانگین مدت جوانه‌زنی پایین‌تر در مقایسه با بذرهای پرایم‌نشده و پرایم‌شده با سطوح پایین‌تر نانوذرات کیتوزان شد. کاهش میانگین مدت جوانه‌زنی در این پژوهش می‌تواند به علت افزایش سرعت تقسیم سلولی در بذرهای پرایم‌شده با نانوذرات کیتوزان باشد که در اثر سنتز DNA، RNA و سنتز پروتئین در طی پرایمینگ بذر تعداد زیاد از مراحل فیزیولوژیکی در طول جوانه‌زنی کامل شده و بذر می‌تواند جوانه بزند (Foti *et al.*, 2008). از آنجایی که، ضریب جوانه‌زنی عکس میانگین مدت جوانه‌زنی است، کاهش میانگین مدت جوانه‌زنی در طول پرایمینگ با هیدرو (آب مقطر) و سطوح مختلف نانوذرات کیتوزان به‌ویژه نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد باعث افزایش ضریب جوانه‌زنی طی پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان می‌شود. در واقع، در این تحقیق، به‌نظر می‌رسد که هیدرو پرایمینگ با بهبود فرآیندهای متابولیکی مربوط به شاخص‌های جوانه‌زنی و نانوذرات کیتوزان با تأثیر بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بر فرآیند فیزیولوژیکی جوانه‌زنی تأثیر گذاشته و موجب بهبود استقرار گیاهچه‌ها می‌شود. نانوذرات کیتوزان جوانه‌زنی بذر، جذب و انتقال آب، فعال‌سازی پروتئین‌های کانال‌های آبی و افزایش جذب مواد مغذی در گیاه را بهبود می‌بخشند (El-sharkawy *et al.*, 2022). سعادت و همکاران (۱۴۰۱b، ۱۴۰۲a) روی گیاه لوبیا و برنج و Saadat و Sedghi (۲۰۲۴) روی گیاه سویا نشان دادند که پرایمینگ بذر با کیتوزان به‌طور قابل توجهی درصد جوانه‌زنی، ضریب جوانه‌زنی را افزایش و میانگین مدت جوانه‌زنی را در شرایط شور بهبود بخشید و بر پتانسیل تکنیک‌های پرایمینگ در افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌های غیرزیستی تأکید کردند. همچنین، افزایش درصدجوانه‌زنی طی پرایمینگ با نانوذرت کیتوزان در گیاه سویا نیز گزارش شده است (Steven *et al.*, 2024).

افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، محافظت بهتری در برابر تنش شوری و کاهش آسیب اکسیداتیو ایجاد می‌کند (Thabet and Alqudah, 2023). یافته‌های مطالعه ما نشان می‌دهد پرایمینگ بذر گندم با نانوذرات کیتوزان سطوح بالاتری از آنتی‌اکسیدان‌ها را نشان می‌دهد. فعالیت‌های آنزیمی در مقایسه با بذرهای غیرپرایم‌شده هنگام قرار گرفتن در معرض تنش، نشان می‌دهد که پرایمینگ توانایی گیاهان را برای فعال کردن و حفظ فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی افزایش می‌دهد و در نتیجه دفاع مؤثری در برابر آسیب‌های ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن در طول تنش شوری ایجاد می‌کند. نتایج ما اثرات مثبت پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان در گیاهچه‌های گندم را از نظر تحمل تنش شوری نشان می‌دهد. در واقع، استفاده از نانوذرات کیتوزان در این تحقیق، توانست فعالیت آنزیم‌هایی کاتالاز، پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز را افزایش دهد. این آنزیم‌ها از گیاهان در برابر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

پراکسیداسیون غشای پلاسمایی ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن محافظت می‌کنند (Sharma *et al*., 2020) به عبارتی، توانایی آنتی‌اکسیدان‌ها در حذف رادیکال‌های آزاد و جلوگیری از پراکسیداسیون لیپیدها و در نتیجه محافظت از غشای سلولی، با افزایش سطح آنتی‌اکسیدان‌ها مرتبط است (El-Shazoly *et al.*, 2025). آنزیم کاتالاز از مهم‌ترین آنزیم‌های پاک‌کننده پراکسید هیدروژن در شرایط تنش شوری است (Gomes *et al.*, 2021). سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز نقش حیاتی در سم‌زدایی گونه‌های فعال اکسیژن دارند. سوپراکسید دیسموتاز، رادیکال‌های سوپراکسید را به پراکسید هیدروژن و اکسیژن مولکولی تبدیل می‌کند. با کاهش سطح رادیکال‌های سوپراکسید، سوپراکسید دیسموتاز به کاهش آسیب‌های ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن کمک می‌کند. علاوه‌براین، آنزیم پراکسیداز به‌طور موثری پراکسید هیدروژن را با استفاده از آن به‌عنوان یک عامل اکسیدکننده در واکنش‌های مختلف سم‌زدایی می‌کند. پراکسیدازها با استفاده از قدرت کاهنده سوبستراها، پراکسید هیدروژن را به آب تبدیل می‌کنند و به‌طور مؤثر اثرات مضر آن را خنثی می‌کنند (Ikram *et al*., 2022). کاهش گونه‌های فعال اکسیژن توسط نانوذرات ممکن است منجر به افزایش قابل توجه سطح آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شود. این امر ممکن است به افزایش تحمل در برابر عوامل تنش‌زا مانند شوری کمک کند (Khan *et al.*, 2021). استفاده از نانومواد مختلف می‌تواند نانوحفره‌هایی ایجاد کند که جذب آب را تسهیل می‌کنند، مکانیسم گونه‌های فعال اکسیژن آنتی‌اکسیدانی را در بذرها فعال می‌کنند و رادیکال‌های هیدروکسیل را برای شل‌کردن دیواره‌های سلولی افزایش می‌دهند و با تحریک آمیلاز و افزایش جوانه‌زنی بذر، هیدرولیز سریع نشاسته را القا می‌کنند (Khalaki *et al.*, 2021). یکی از دلایل افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان طی پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان می‌تواند نشان از ضعیف بودن این گیاه نسبت به تنش شوری باشد، که طی آن تنش اکسیداتیو و نشت الکترولیت افزایش یافته و موجب شده است که فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان جهت مقابله با شرایط نامطلوب شوری افزایش یابد. طبق گزارش‌ها، تیمار بذر با نانو ذرات کیتوزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از جمله آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز را در گندم افزایش می‌دهد (El-sharkawy *et al.*, 2022). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان طی پرایمینگ با کیتوزان تحت تنش از جمله شوری توسط Saadat و Sedghi (۲۰۲٤، ۲۰۲۵) روی گیاه نخود و سویا (Saadat *et al.*, 2023; سعادت و همکاران، ۱٤۰۲a) روی گیاه لوبیا و برنج مختلف گزارش شده است. سعادت و صدقی (۱٤۰۳) اظهار کردند که شوری باعث اقزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان از جمله کاتالاز در گندم می‌شود. به‌طورکلی، می‌توان گفت با اینکه پرایمینگ معمولی (مانند هیدروپرایمینگ)، باعث افزایش شاخص‌های جوانه‌زنی و بهبود فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاهچه تحت تنش شوری می‌شود. اما، پرایمینگ با نانوذرات (مانند نانوذرات کیتوزان)، به‌دلیل افزایش جذب عناصر غذایی (نانو ذرات به دلیل اندازه بسیار کوچک و سطح فعال بالا، می‌توانند جذب مواد مغذی را تسهیل کرده و اثرات منفی تنش را کاهش دهند (Razavizadeh *et al.*, 2023) و افزایش فعالیت آنزیم‌ها (نانوذرات می‌توانند با فعال‌سازی آنزیم‌های مهم در گیاه، بهبود فرایندهای متابولیکی را تسهیل کنند و در نتیجه عملکرد گیاه را بهبود بخشند) (صمدی فیروزآباد و همکاران، ۱٤۰۳) نسبت به پرایمینگ معمولی برتری دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به وضوح نشان داد که تنش شوری، کاهش معنی‌دار در درصد و ضریب جوانه‌زنی و افزایش میانگین مدت جوانه‌زنی را در گندم رقم سائین به همراه داشت. این افت شاخص‌های رشد، با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (کاتالاز، پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز) همراه بود که نشان‌دهنده بروز تنش اکسیداتیو به‌عنوان یکی از پیامدهای اصلی شوری است. در مقابل، کاربرد روش پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان، اثرات نامطلوب شوری را به‌طور قابل‌توجهی تعدیل نمود. این تیمار موجب بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی گردید. مکانیسم این بهبود، عمدتاً از

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

طریق تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و کاهش سطح گونه‌های فعال اکسیژن صورت پذیرفت. در میان سطوح مختلف نانوذرات، تیمار ۰/۵ درصد به‌عنوان مؤثرترین سطح شناسایی شد که به‌طور معنی‌داری باعث بهبود شاخص‌های رشدی و القای قوی‌ترین پاسخ آنزیمی در مقایسه با تیمارهای ۰/۱ درصد، ۰/۲ درصد و هیدروپرایمینگ گردید. بر این اساس، پرایمینگ بذر با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد را می‌توان به‌عنوان یک راهکار عملی و امیدبخش برای ارتقای تحمل به شوری در گندم رقم سائین در مرحله حساس جوانه‌زنی توصیه کرد.

ملاحظات و پیشنهادها

با توجه به طراحی این پژوهش، اگر چه تیمار هیدروپرایمینگ به عنوان شاهد اصلی مورد استفاده قرار گرفت، اما به منظور تفکیک دقیق‌تر اثر ذرات از حلال، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تیمار شاهد حلال (محلول اسید استیک ۱٪ بدون نانوذرات) نیز منظور گردد. این کار درک بهتری از مکانیسم عمل خالص نانوذرات کیتوزان ارائه خواهد داد. تکرار این آزمایش در شرایط گلخانه‌ای و مزرعه‌ای نیز برای تأیید نهایی این یافته‌ها پیشنهاد می‌شود.

منابع

روستایی، مظفر، حسنپور، حسنی، زادحسن، مقصود، صادق‌زاده اهری، اسماعیل، صادق‌زاده، داود، اسلامی، بهزاد، سلیمانی، رسول، عابدی اصل، کاظم، روحی، غلامرضا، خلیل‌زاده، ابراهیم، حق‌پرست، غلامرضا، آقائی سربرزه، رضا، رجبی، مصطفی، احمدی، رحمان، بابایی ملک، مسعود، قاسمی، تقی، افشاری، معرفت، روح پرور، فرزاد، کیا، رامین، مرادی، شهریار، هوشیار، محمود، خیرگو، رحیم، طباطبایی، معصومه، یاسایی، نصرت‌اله، عطاحسینی، محسن، سرکاری، سید محمود، دالوند، صمد، محفوظی، سیروس، و سرحد، بهرامی (۱۳۹۹). سائین رقم جدید گندم نان زمستانه سازگار با دیم‌زارهای سرد استان اردبیل و مناطق مستعد شمال غرب. *نشریه علمی یافته‌های تحقیقاتی در گیاهان زراعی و باغی*، ۹(۱)، ۲۷- ۳۷. DOR: 10.22092/rafhc.2021.116738.1109

سعادت، طیبه، صدقی، محمد، سیدشریفی، رئوف، و فرزانه، سلیم (۱۴۰۱a). تأثیر کیتوزان بر شاخص‌های جوانه‌زنی لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L.) رقم صدری در شرایط تنش شوری. *پژوهش‌های بذر ایران*، ۹(۲)، ۱۵۱-۱۶۲. DOR: 10.29252/yujs.9.2.151

سعادت، طیبه، صدقی، محمد، سید شریفی، رئوف، و فرزانه، سلیم (۱۴۰۱b). تأثیر پرایمینگ با سطوح مختلف کیتوزان، روی برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L.) تحت تنش شوری. *فن آوری تولیدات گیاهی*، ۱۴(۲)، ۸۹-۷۵. DOR: 10.22084/PPT.2023.26100.2075

سعادت، هانیه، سلطانی، الیاس، و صدقی، محمد (۱۴۰۲a). تأثیر پرایمینگ بذر با کیتوزان بر ویژگی‌های جوانه‌زنی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهچه‌های برنج (*Oryza sativa* L.) تحت تنش شوری. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۲(۵۴)، ۲۳۹-۲۵۸. http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1728-fa.html

سعادت، هانیه، و صدقی، محمد (۱۴۰۳). تأثیر پرایمینگ بذر با اسید سالیسیلیک روی جوانه‌زنی و صفات بیوشیمیایی گیاهچه گندم نان (*Triticum aestivum* L.) رقم سائین تحت تنش شوری. پژوهش‌های بذر ایران، ۱۱(۲)، ۱۱۱-۱۲۴. DOR: 10.61186/yujs.11.2.111

سعادت، هانیه، و صدقی، محمد (۱۴۰۲b). تأثیر اسید سالیسیلیک بر شاخص‌های جوانه‌زنی گیاهچه گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تنش شوری. *تحقیقات بذر*، ۱۳(٤)، ۱۶-۱. DOR: 10.71544/jsr.2024.1122233

صمدی فیروزآباد، بصیر، قیاسی، مهدی، و امیرنیا، رضا (۱۴۰۳). تأثیر پرایمینگ بذر و محلول‌پاشی و به‌صورت معمولی و نانو بر عملکرد کمی و کیفی گیاه گلرنگ. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۶(۱)، ۱۲۴-۱۰۹. DOR: 10.22059/jci.2023.358846.2827

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

عموآقایی، ریحانه (۱۳۸۸). تأثیر برخی تنظیم‌کننده‌های رشد در تحریک جوانه‌زنی بذر کما Ferula ovina Boiss. *مجله زیست‌شناسی گیاهی*، ۲۴ (۲)، ۳۹-۵۰.

فتحی امیرخیز، کیوان، امیدی، حشمت، حشمتی، سیاوش، و جعفرزاده، لیلا (۱۳۹۱). بررسی تأثیر تسریع‌کننده‌ها بر بنیه بذر و خصوصیات جوانه‌زنی گیاه دارویی سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) تحت تنش شوری. *نشریه پژوهش‌های زراعی ایران*،۱۰(۳)، ۲۹۹-۳۱۰. DOR: 10.22067/GSC.V10I2.16170

نظری، رکسانا، پارسا، سهیل، توکل افشاری، رضا، و محمودی، سهراب (۱۳۹۹). بررسی اثر پرایمینگ بذر با اسید سالیسیلیک بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌کسیدان و پراکسیداسیون چربی در بذور زوال یافته سویا (*Glycine max* (L.) Merrill, William variety). *علوم و فناوری بذر ایران*، ۹(۱)، ۷۰-۵۷. DOR: 10.22034/ijsst.2018.116566.1149

Abdel-Aziz, H. (2019). Effect of priming with chitosan nanoparticles on germination, seedling growth and antioxidant enzymes of broad beans. *Catrina-the International Journal of Environmental Sciences, 18*, 81-86. https://doi.org/10.21608/CAT.2019.28609

Abeed, A. H., Eissa, M. A., & Abdel-Wahab, D. A. (2021). Effect of exogenously applied jasmonic acid and kinetin on drought tolerance of wheat cultivars based on morpho-physiological evaluation. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21*, 131-144. https://doi.org/10.1007/s42729-020-00348-1

Abou-Zeid, H. M., Ismail, G. S. M., & Abdel-Latif, S. A. (2021). Influence of seed priming with ZnO nanoparticles on the salt-induced damages in wheat (*Triticum aestivum* L.) plants. *Journal of Plant Nutrition, 44*(5). https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1849288

Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods in Enzymology, 105*, 121-126. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3

Alhammad, B. A., Ahmad, A., Seleiman, M. F., & 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*, 690. https://doi.org/10.3390/plants12040690

Bahrasemani, S., Seyedi, A., Fathi, S. H., & Jowkar, M. (2024). The seed priming using putrescine improves, germination indices and seedlings morphobiochemical responses of Indigo (*Indigofera tinctoria*) under salinity stress. *Journal of Medicinal plants and By-products, 13*(1), 179-188. https://doi.org/10.22034/JMPB.2023.128870

Balusamy, S. R., Rahimi, S., Sukweenadhi, J., Sunderraj, S., Shanmugam, R., Thangavelu, L., Mijakovic, I., & Perumalsamy, H. (2022). Chitosan, chitosan nanoparticles and modified chitosan biomaterials, a potential tool to combat salinity stress in plant. *Carbohydrate Polymers, 284*(15), 119189. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119189

Bittebcourt, M. L. C., Dais, D. C. F. S., Dias, L. A. S., & Araujo, E. F. (2004). Effect of priming on asparagus seed germination and vigor under water and temperature stress. *Seed Science and Technologym, 32*, 607-616. https://doi.org/10.15258/sst.2004.32.2.29

Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry, 72*(7), 248-254. https://doi.org/10.1006/abio.1976.9999

Choudhary, S. K., Kumar, V., Singhal, R. K., Bose, B., Chauhan, J., Alamri, S., & Sabagh, A. E. (2021). Seed priming with $Mg(NO_3)_2$ and $ZnSO_4$ salts triggers the germination and growth attributes synergistically in wheat varieties. *Agronomy, 11*(11), 2110. https://doi.org/10.3390/agronomy11112110

Chun, S, & Chandrasekaran, M. (2019). Chitosan and chitosan nanoparticles induced expression of pathogenesis-related proteins genes enhances biotic stress tolerance in tomato. *International Journal of Biological Macromolecules, 15*, 948-954. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.167

Gomes, D. G., Pelegrino, M. T., Ferreira, A. S., Bazzo, H. B., Zucareli, C., B Seabra, A. B., & Oliveira, H. C. (2021). Seed priming with copper-loaded chitosan nanoparticles promotes early growth and enzymatic antioxidant defense of maize (*Zea mays* L.) seedlings. *Chemical Technology and Biotechnology, 96*(8), 2176-2184. https://doi.org/10.1002/jctb.6738

Dabravolski, S. A. & Isayenkov, S. V. (2024). The physiological and molecular mechanisms of silicon action in salt stress amelioration. *Plants, 13*(4), 525. https://doi.org/10.3390/plants13040525

El-sharkawy, M. M., Omara, R. I., Mostafa, Y. S., Alamri, S. A., Hashem, M., Alrumman, S. A., & Ahmad, A. A. (2022). Mechanism of wheat leaf rust control using chitosan nanoparticles and salicylic acid. *Journal of Fungi, 8*, 304. https://doi.org/ 10.3390/jof8030304

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

El-Shazoly, M. R., Othman, A. A., Zaheer, M. S., AlHossainy. A. F., Dalia, A., &Abdel-Wahab, D. A. (2025). Zinc oxide seed priming enhances drought tolerance in wheat seedlings by improving antioxidant activity and osmoprotection. *Scientific Reports, 15*, 3863. https://doi.org/10.1038/s41598-025-86824-z

Farooq, F., Rashid, N., Ibrar, D., Hasnain, Z., Ullah, R., & Nawaz, M. (2022). Impact of varying levels of soil salinity on emergence, growth and biochemical attributes of four *Moringa oleifera* landraces. *Plos One, 17*, e0263978. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263978

Feghhenabi, F., Hadi, H., Khodaverdiloo, H., & Van Genuchten, M. T. (2020). Seed priming alleviated salinity stress during germination and emergence of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agricultural Water Management, 231*, 106022. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106022

Foti, R., Abureni, K., Tigere, A., Gotosa, J., & Gere, J. (2008). The efficacy of different seed priming osmotica on the establishment of maize (*Zea mays* L.) caryopses. *Journal of Arid Environments, 72*, 1127-1130. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.11.008

Giannopolitis, C. N, & Ries, S. K. (1977). Superoxide dismutase. I. Occurrence in higher plants. *Journal of Plant Physiology, 59*(2), 309-314. https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309

Hameed, A., Maqsood, W., & Hameed, A. (2024). Chitosan nanoparticles encapsulating curcumin counteract salt-mediated ionic toxicity in wheat seedlings: An ecofriendly and sustainable approach. *Environmental Science and Pollution Research, 31*, 8917-8929. https://doi.org/10.1007/s11356-023-31768-y

Hemeda, H. M, & Klein, B. P. (1990). Effects of naturally occurring antioxidants on peroxidase activity of vegetable extracts. *Journal of Food Science, 55*, 184-185. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb06048.x

Hoogenboom, G, & Peterson, C. M. (1987). Shoot growth rate of soybean as affected by drought stress. *Agronomy Journal, 79*(4), 598-607. https://doi.org/10.1590/2317-1545v41n4214988

Hualpa-Ramirez, E., Carrasco-Lozano, E. C., Madrid-Espinoza, J., Tejos, R., Ruiz-Lara, S., Stange, C., & Norambuena, L. (2024). Stress salinity in plants: New strategies to cope with in the foreseeable scenario. *Plant Physiology and Biochemistry, 208*, 108507. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108507

Ikram, M., Raja., N. I., Mashwani, Z. U. R., Omar, A. A., Mohamed, A. H., & Satti, S. H. (2022). Phytogenic selenium nanoparticles elicited the physiological, biochemical, and antioxidant Defense System Amelioration of Huanglongbing-infected 'Kinnow' Mandarin plants. *Nanomaterials, 12*, 356. https://doi.org/ 10.3390/nano12030356

Ingle, P. U., Biswas, J. K., Mondal, M., Rai, M. K., Senthil Kumar, P., & Gade, A. K. (2022). Assessment of in vitro antimicrobial efficacy of biologically synthesized metal nanoparticles against pathogenic bacteria. *Chemosphere, 291*, 132676. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132676

ISTA. (2008). International Rules for Seed Testing. Bassersdorf, Switzerland: The International Seed Testing Association (ISTA).

ISTA. (2013). International Rules for Seed Testing. Bassersdorf, Switzerland: The International Seed Testing Association (ISTA).

Kang, S. M., Shaffique, S., Injamum-Ul-Hoque, M., Alomrani, S. O., Park, Y. S., & Lee, I. J. (2024). Foliar treatment with melatonin modulates photosynthetic and antioxidant responses in *Silybum marianum* L. under salt stress. *Scientia Horticulturae, 325*, 112664. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112664

Karaca, C., Aslan, G. E., Buyuktas, D., Kurunc, A., Bastug, R., & Navarro, A. (2022). Effects of salinity stress on drip irrigated tomatoes grown under mediterranean-type greenhouse conditions. *Agronomy, 13*(1), 36. https://doi.org/10.3390/agronomy13010036

Khalaki, M. A., Moameri, M., Lajayer, B. A., & Astatkie, T. (2021). Influence of nano-priming on seed germination and plant growth of forage and medicinal plants. *Plant Growth Regulation, 93*, 13-28. https://doi.org/10.1007/s10725-020-00670-9

Khan, M. N., Li, Y., Khan, Z., Chen, L., Liu, J., Hu, J., Wu, H., & Li, Z. (2021). Nanoceria seed priming improves salt tolerance in rapeseed. through modulating ROS homeostasis and α-amylase activities. *Journal of Nanobiotechnology, 19*, 276. https://doi.org/10.1186/s12951-021-01026-9

Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., & Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International, 132*, 105078. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078

Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2019). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature, 529*, 84-87. https://doi.org/10.1038/nature16467

Li, B., Wang, X., Chen, R., Huangfu, W., & Xie, G. L. (2008). Antibacterial activity of chitosan solution against *Xanthomonas* pathogenic bacteria isolated from *Euphorbia pulcherrima*. *Carbohydrate Polymers, 72*, 287-292. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.08.012

Li, R., He, J., Xie, H., Wang, W., Bose, S. K., Sun, Y., Hu, J., & Heng Yin, H. (2019). Effects of chitosan nanoparticles on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Biological Macromolecules, 126*, 91-100. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.118

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

Monajjem, S., Soltani, E., Zainali, E., Esfahani, M., Ghaderi-Far, F., Chaleshtori, M. H., & Rezaei, A. (2023). Seed priming improves enzymatic and biochemical performances of rice during seed germination under low and high temperatures. *Rice Science, 30*(4), 335-347. https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.03.012

Nakano, Y, & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxides in Spanish chloroplasts. *Plant and Cell Physiology, 22*, 867-880. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232

Nawaz, M., Hassan, M. U., Chattha, M. U., Mahmood, A., Shah, A. N., Hashem, M., Alamri, S., Batool, M., Rasheed, A., Thabit, M. A., Alhaithloul, H. A. S., & Qari, S. H. (2022). Trehalose: A promising osmo-protectant against salinity stress-physiological and molecular mechanisms and future prospective. *Molecular Biology Reports, 49*(12), 11255-11271. https://doi.org/10.1007/s11033-022-07681-x

Nile, A., Sun, M., Venkidasamy, B., & Xiao, J. (2022). Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture—Recent developments and future perspectives. *Journal of Nanobiotechnology, 20*, 254. https://doi.org/10.1186/s12951-022-01423-8

Razavizadeh, R., Adabavazeh, F., & Mosayebi, Z. (2023). Titanium dioxide nanoparticles improve element uptake, antioxidant properties, and essential oil productivity of *Melissa officinalis* (L.) seedlings under in vitro drought stress. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(43), 98020-98033. https://doi.org/10.1007/s11356- 023-29384-x.

Roman-Doval, R., Torres-Arellanes, S. P., Tenorio-Barajas, A. Y., Gomez-Sanchez, A., & ValenciaLazcano, A. A. (2023). Chitosan: Properties and its application in agriculture in context of molecular weight. *Polymers, 15*, 2867. https://doi.org/10.3390/polym15132867

Saadat, H, & Sedghi, M. (2025). The Effect of seed priming with chitosan on physiological and biochemical characteristics of Pea (*Pisum sativum* L.) seedlings under rapid aging test. *Russian Journal of Plant Physiology, 72*, 119. https://doi.org/10.1134/S1021443725600606

Saadat, H, & Sedghi, M. (2024). The effect of seed priming with chitosan on the improvement of physiological and biochemical traits of Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) under salinity stress. *Russian Journal of Plant Physiology, 71*, 187. https://doi.org/101134/S1021443724605858

Saadat, H., Sedghi, M., Seyed Sharifi, R., & Farzaneh, S. (2023). Expression of gibberellin synthesis genes and antioxidant capacity in common bean (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Sadri) seeds induced by chitosan under salinity. *Iranian Journal of Plant Physiology, 13*(4), 4715-4728. https://doi.org/10.30495/IJPP.2023.1978837.1460

Saddiq, M. S., Iqbal, S., Afzal, I., Ibrahim, A. M., Bakhtavar, M. A., Hafeez, M. B., Jahanzai, B., & Maqbool M. M. (2019). Mitigation of salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings through physiological seed enhancements. *Journal of Plant Nutrition, 42*(10), 1192-204. https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1609509

Sairam, R. K., Rao, K. V., & Srivastava, G. C. (2002). Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyteconcentration. *Plant Science, 163*, 1037-1046. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00278-9

Sharma, A., Soares, C., Sousa, B., Martins, M., Kumar, V., & Shahzad, B. (2020). Nitric oxide-mediated regulation of oxidative stress in plants under metal stress: A review on molecular and biochemical aspects. *Physiologia Plantarum, 168*(2), 318-344. https://doi.org/10.1111/ppl.13004

Sheikhalipour, M., Esmaielpour, B., Gohari, G., Haghighi, M., Jafari, H., Farhadi, H. Kulak, M., & Kalisz, A. (2021). Salt stress mitigation via the foliar application of chitosan-functionalized selenium and anatase titanium dioxide nanoparticles in stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni). *Molecules, 26*(13), 4090. https://doi.org/10.3390/molecules26134090

Steven, S., Islam, M. S., Ghimire, A., Methela, N. J., Kwon, E. H., Yun, B. W., Lee, I. J., Kim, S. H., & Kim, Y. (2024). Chitosan-GSNO Nanoparticles and silicon priming enhance the germination and seedling growth of Soybean (*Glycine max* L.). *Plants, 13*, 1290. https:// doi.org/10.3390/plants13101290

Thabet, S. G, & Alqudah, A. M. (2023). New genetic insights into improving barley cope with salt stress via regulating mineral accumulation, cellular ion homeostasis, and membrane trafficking. *Environmental and Experimental Botany, 208*, 105252. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105252

Wojtyla, L., Lechowska, K., Kubala, S., & Garnczarska, M. (2016). Molecular processes induced in primed seeds increasing the potential to stabilize crop yields under drought conditions. *Journal of Plant Physiology, 203*, 116-126. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.04.008

Yan, N., Cao, J., Wang, J., Zou, X., Yu, X., Zhang, X., & Si, T. (2024). Seed priming with graphene oxide improves salinity tolerance and increases productivity of peanut through modulating multiple physiological processes. *Journal of Nanobiotechnology, 22*(1), 565. https://doi.org/10.1186/s12951-024-02832-7

Yaqoob, N., Jain, V., Atiq, Z., Sharma, P., Ramos-Meza, C. S., Shabbir, M. S., & Tabash, M. I. (2022). The relationship between staple food crops consumption and its impact on total factor productivity: Does green economy matter? *Environmental Science and Pollution Research, 29*, 69213-69222. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22150-5

Zhou, H., Shi, H., Yang, Y., Feng, X., Chen, X., Xiao, F., & Guo, Y. (2024). Insights into plant salt stress signalling

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

and tolerance. *Journal of Genetics and Genomics, 51*(1), 16-34. https://doi.org/10.1016/j.jgg.2023.08.007

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

The effect of chitosan nanoparticle priming on physiological traits and antioxidant enzyme activity in wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. saein under salinity stress

Haniyeh Saadat and Mohammad Sedghi*

Agriculture Department, Faculty of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Abstract

In order to evaluate some physiological characteristics and antioxidant enzyme activity of wheat in priming with chitosan nanoparticles (CNPs) under the influence of salinity stress, a factorial experiment was conducted based on a completely randomized design with 3 replications. Treatments were accelerated at four salinity levels (0, 50, 100, and 150 mM) and four CNPs levels (control (distilled water), 0/1, 0.2, and 0.5% weight volume, all of which had been dissolved in 1% acetic acid). The results showed that salinity stress reduced germination percentage (GP) and germination coefficient (GC). But priming improved these traits. So that the germination percentage (GP) in the treatment with CNPs 0.5% compared to the control (distilled water) showed an increase of about 20. The amount of germination coefficient (GC) in priming with CNPs 0.5 and without salinity compared to the control (distilled water) and 150 mM salinity showed a decrease of about 86. Salinity increased the mean germination time (MGT), so that the highest (1.359 seeds per day) was observed at a salinity of 150 mM. The main effect of CNPs and salinity on the activities of catalase and superoxide dismutase enzymes was significant ($P<0.01$). The activity of peroxidase and ascorbate peroxidase enzymes in CNPs 0.5% treatment and salinity of 150 mM compared to the control showed an increase of about 49 and 68%, respectively. The results showed that seed priming with CNPs caused strengthening of the germination indices and biochemical traits in wheat and increased seedling growth.

Keywords: Ascorbate peroxidase, Germination Indicators, Peroxidase, Sodium Chloride

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.22034/jispp.15.74.43]

Received: Oct. 01, 2025; Revised: Nov. 07, 2025; Accepted: Feb. 10, 2026; Published Online: Oct. 30, 2026
*Corresponding Author: m_sedghi@uma.ac.ir

Copyright © 2025 Iranian Society of Plant Physiology, Published by Isfahan University of Technology press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.