Iranian Journal of Seed Research

Homepage: https://yujs.yu.ac.ir/jisr

ISSN: 2383-1480 (On-Line); 2383-1251 (Print)

Yasouj University

Mitigating the Adverse Impact of Salinity Stress on Germination of Wheat (*Triticum aestivum* cv. Sain) through Seed Priming with Chitosan Nanoparticles

Haniyeh Saadat [1]✉, and **Mohammad Sedghi** [2]

1. Corresponding author, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: t.saadat@uma.ac.ir
2. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: m_sedghi@uma.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 30 September 2025
Received in revised form 26 February 2026
Accepted 16 March 2026
Available online 20 March 2026

Keywords:
Germination Indicators
Proline
Protein
Sodium Chloride
Soluble Sugars

ABSTRACT

Objective: This study aimed to investigate the reduction of adverse effects of salinity stress on germination and related traits of wheat (*Triticum aestivum* cv. Sain) through seed priming with chitosan nanoparticles.

Method: The experiment was conducted as a factorial arrangement based on a completely randomized design with three replications at the University of Mohaghegh Ardabili in 2025. Treatments included four salinity levels (0, 50, 100, and 150 mM NaCl) and four levels of chitosan nanoparticles (0, 0.1, 0.2, and 0.5% weight/volume dissolved in 1% acetic acid).

Results: Germination percentage (GP) and plumule fresh weight (PFW) decreased at 150 mM salinity compared to the control (without salinity), but seed priming with 0.5% chitosan nanoparticles improved GP and PFW at the same salinity level by about 20% and 50%, respectively, compared to no chitosan application. Radicle fresh weight (RFW), radicle dry weight (RDW), plumule dry weight (PDW), seedling length vigor index (SLVI), and seedling weight vigor index (SWVI) in the 0.5% chitosan nanoparticle treatment without salinity increased by 77, 72, 83, 76, and 89%, respectively, compared to hydropriming under 150 mM salinity. With increasing salinity, proline content increased, but the application of 0.5% chitosan nanoparticles increased this trait by 32% compared to hydropriming. Protein content under no salinity and priming with 0.5% chitosan nanoparticles increased by about 76% compared to hydropriming under 150 mM salinity. Also, soluble sugar content in the treatment with 0.5% chitosan nanoparticles under 150 mM salinity increased by about 84% compared to hydropriming without salinity.

Conclusions: The results showed that the use of 0.5% chitosan nanoparticles improved germination indices and biochemical traits of wheat seeds under salinity stress.

Cite this article: Saadat, H., & Sedghi, M. (2026). Mitigating the adverse impact of salinity stress on germination of wheat (*Triticum aestivum* cv. Sain) through seed priming with chitosan nanoparticles *Iranian Journal of Seed Research*, *12*(2), 69-91. http://doi.org/10.61882/yujs.12.2.69

© The Author(s).
Publisher: Yasouj University.
DOI: http://doi.org/10.61882/yujs.12.2.69

Highlights

- Seed priming with 0.5% chitosan nanoparticles improved some germination indices of wheat (cv. Sain) seeds under salinity stress.
- Seed priming with 0.5% chitosan nanoparticles increased proline, protein, and soluble sugar contents in wheat (cv. Sain) seedlings.

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is an important cereal crop widely consumed globally as a valuable food (Igrejas & Branlard, 2020). Given the dramatically increasing human population worldwide and to meet food demands, wheat production should increase by more than 60% to feed the projected 9.6 billion world population by 2050 (Evlice & Zencirci, 2025). The major constraints in wheat productivity are abiotic stresses such as salinity. Although wheat is reported as a moderately salt-tolerant crop, its germination can be reduced under salinity stress. Nanotechnology is used for the management of nanoparticles for numerous purposes, playing a critical role in the food and agricultural sectors, enhancing food quality and safety, and improving human health through creative and innovative techniques. Biopolymer nanoparticles are widely regarded for their biodegradability, biocompatibility, and non-toxicity (Soni et al., 2023). Chitosan ((1 → 4)-2-amino-2-deoxy-β-d-glucose) is an abundant marine-based biopolymer (Kheiri et al., 2016). Chitosan nanoparticles are often generated via ionotropic gelation with sodium tripolyphosphate, a method regarded as safe, resulting in nanoparticles with varying sizes, stability, and biological properties, which affect their extensive applicability in agriculture. Chitosan is generally regarded as a low-toxicity material, though its toxicity may vary depending on its physicochemical properties and the experimental model used. It is a biodegradable and biocompatible polysaccharide that can create films that bind various substances. Nano-priming can be applied to improve seed germination and seedling establishment and enhance plant growth (Nile et al., 2022). Improving resistance to salinity is crucial because salinity is one of the major abiotic stresses that affect crop production in arid and semiarid areas (Hussain et al., 2019). In this study, we investigated the effect of chitosan nanoparticles on germination indicators and related traits in wheat seedlings under salinity stress.

Method

The experiment was conducted as a factorial arrangement based on a completely randomized design with three replications at the laboratory of the Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili in 2025. Experimental treatments included four salinity levels (0, 50, 100, and 150 mM NaCl) and four levels of chitosan nanoparticles (0, 0.1, 0.2, and 0.5% weight/volume), all of which were dissolved in 1% acetic acid. For priming, the seeds were immersed in chitosan nanoparticle solutions for 8 hours. Following priming, the seeds were washed with distilled water and dried. Subsequently, sodium chloride solution was added to each Petri dish for the germination test, which was

performed with three replications of 25 seeds each at a temperature of 25°C for a duration of 8 days. Thereafter, germination indices and biochemical traits were measured. Statistical analysis was performed using SAS software, and Duncan's test ($p \leq 0.05$) was used to compare the means.

Results

The results showed that salinity stress reduced germination rate, plumule fresh and dry weight, radicle fresh and dry weight, and seedling length and weight vigor index. Priming with different levels of chitosan nanoparticles, especially the 0.5% level, improved these traits. The highest allometry coefficient was observed with priming using 0.5% chitosan nanoparticles. The total protein content in the treatment with 0.5% chitosan nanoparticles without salinity showed an increase of about 76% compared to the control (distilled water) under 150 mM salinity. With increasing salinity, the amount of proline and soluble sugars increased, and the use of chitosan nanoparticles, especially at the 0.5% concentration, increased these traits.

Conclusions

The results showed that seed treatment with different levels of chitosan nanoparticles can reduce the harmful effects of salinity on some traits in wheat seedlings and improve seedling growth. The best result was achieved when 0.5% chitosan nanoparticles were used under saline conditions. Priming wheat seeds with chitosan nanoparticles significantly increased proline, protein, and soluble sugar content. Therefore, seed priming could be a promising pre-sowing strategy to enhance field emergence under stress conditions.

Author Contributions

Investigation, Haniyeh Saadat; resources, Haniyeh Saadat and Mohammad Sedghi; data curation, Haniyeh Saadat; writing—original draft preparation, Haniyeh Saadat; writing—review and editing, Haniyeh Saadat; supervision, Mohammad Sedghi; project administration, Haniyeh Saadat. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors are highly indebted to the Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, for providing research facilities and technical assistance during the research work.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

Financial support for this research was provided by the Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

پژوهش‌های بذر ایران

Homepage: https://yujs.yu.ac.ir/jisr

ISSN: 2383-1480 (On-Line); 2383-1251 (Print)

کاهش اثرات نامطلوب تنش شوری بر جوانه‌زنی گندم (*Triticum aestivum*) رقم سائین توسط پرایمینگ بذر با نانوذرات کیتوزان

هانیه سعادت [۱]✉، و محمد صدقی [۲]

۱. نویسنده مسئول، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: t.saadat@uma.ac.ir

۲. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: m_sedghi@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۲/۲۹

کلیدواژه‌ها:
پروتئین
پرولین
شاخص‌های جوانه‌زنی
قندهای محلول
کلریدسدیم

چکیده

هدف: این پژوهش با هدف بررسی کاهش اثرات نامطلوب تنش شوری بر جوانه‌زنی و صفات مرتبط با آن در گندم توسط پرایمینگ بذر با نانوذرات کیتوزان اجرا گردید.

روش پژوهش: آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار در دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۴ انجام شد. تیمارها شامل چهار سطح شوری (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار کلریدسدیم) و چهار سطح نانو ذرات کیتوزان (۰، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی- حجمی محلول در اسید استیک یک درصد) بود.

یافته‌ها: درصد جوانه‌زنی و وزن تر ساقه‌چه در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار نسبت به شاهد (بدون شوری) کاهش یافت، اما پرایمینگ بذر با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد، درصد جوانه‌زنی و وزن تر ساقه‌چه را در همان سطح از شوری به ترتیب در حدود ۲۰ و ۵۰ درصد نسبت به عدم کاربرد کیتوزان بهبود بخشید. وزن تر ریشه‌چه، وزن خشک ریشه‌چه، وزن خشک ساقه‌چه، شاخص طولی بنیه گیاهچه و شاخص وزنی بنیه گیاهچه در تیمار با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد و بدون شوری نسبت به هیدروپرایمینگ و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار به‌ترتیب ۷۷، ۷۲، ۸۳، ۷۶ و ۸۹ درصد افزایش نشان دادند. با افزایش شوری میزان پرولین افزایش یافت، ولی کاربرد نانوذرات کیتوزان با غلظت ۰/۵ درصد این صفت را ۳۲ درصد نسبت به هیدروپرایمینگ افزایش داد. میزان پروتئین در شوری صفر میلی‌مولار و پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد نسبت به هیدروپرایمینگ و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار ۷۶ درصد افزایش نشان داد. همچنین، میزان قندهای محلول در تیمار با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار نسبت به هیدروپرایمینگ و بدون شوری در حدود ۸۴ درصد افزایش نشان داد.

نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از نانوکیتوزان ۰/۵ درصد موجب تقویت شاخص‌های جوانه‌زنی و بیوشیمیایی بذرهای گندم تحت تنش شوری می‌شود.

جنبه‌های نوآوری

- پرایمینگ بذر گندم رقم سائین با استفاده از نانوکیتوزان ۰/۵ درصد سبب بهبود برخی شاخص‌های جوانه‌زنی بذر تحت شرایط شوری گردید.
- پرایمینگ بذر گندم رقم سائین با نانوکیتوزان ۰/۵ درصد، پرولین، پروتئین و میزان قندهای محلول گیاهچه را افزایش داد.

استناد: سعادت، هانیه؛ و صدقی، محمد (۱۴۰۴). کاهش اثرات نامطلوب تنش شوری بر جوانه‌زنی و صفات مرتبط با آن در گندم (*Triticum aestivum*) رقم سائین توسط پرایمینگ بذر با نانوذرات کیتوزان. *پژوهش‌های بذر ایران*، ۱۲(۲)، ۹۱-۶۹. http://doi.org/10.61882/yujs.12.2.69

ناشر: دانشگاه یاسوج.

© نویسندگان.

CC BY

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات اصلی در سراسر جهان است که بخش قابل توجهی از کالری روزانه بخش بزرگی از جمعیت جهان را تأمین می‌کند (ایگرجاس و برانلارد[1]، ۲۰۲۰). به‌همین دلیل، حفظ تولید پایدار آن برای امنیت غذایی ضروری است. با این حال، کشت گندم با مشکلاتی همراه است. تنش شوری، یکی از بزرگ‌ترین عوامل تنش‌زای غیرزیستی که بر عملکرد گندم تأثیر می‌گذارد، حدود ۲۰ درصد از زمین‌های آبیاری شده و ۷ درصد از مساحت زمین‌های جهان تحت تأثیر شوری قرار دارند که منجر به کاهش قابل توجه عملکرد می‌شود (آرورا[2]، ۲۰۱۹). تنش شوری یک عامل محیطی مهم است که رشد و نمو گیاهان را با چالش‌هایی مواجه می‌کند (علی[3] و همکاران، ۲۰۲۳). شوری مسئول بیش از ۵۰ درصد از تلفات محصولات کشاورزی در سراسر جهان است (راکگوتو[4] و همکاران، ۲۰۲۲). یکی از تأثیرات اولیه تنش شوری بر گیاهان، مهار رشد است (اومارا[5] و همکاران، ۲۰۲۲). این کمبود آب، همراه با تنش اسمزی ناشی از نمک‌های اضافی، گسترش سلول و رشد کلی گیاه را کاهش می‌دهد. در نتیجه، گیاهان دچار توقف و کاهش رشد می‌شوند (هوانگ[6] و همکاران، ۲۰۲۳). در واقع، تنش شوری اثرات منفی شدیدی بر جوانه‌زنی بذر که بحرانی‌ترین مرحله است، می‌گذارند و به‌طور مستقیم رشد و عملکرد بعدی محصولات کشاورزی را مهار می‌کنند. شوری به دلیل سمیت یون‌ها که مانع از تقسیم سلولی می‌شوند، متغیرهای جوانه‌زنی را مختل می‌کند. همچنین جذب آب توسط بذر را کاهش می‌دهد (الهنداوی[7] و همکاران، ۲۰۱۹). تنش شوری با تولید گونه‌های فعال اکسیژن در سلول‌های گیاهی، از قبیل پراکسید هیدروژن و رادیکال‌های سوپراکسید شده در نهایت موجب آسیب اکسیداتیو به اجزای سلولی مانند لیپیدها، پروتئین‌ها و DNA می‌شوند. این تنش اکسیداتیو ناشی از شوری، عملکرد طبیعی سلولی را مختل کرده و می‌تواند منجر به مرگ سلولی شود (حسین[8] و همکاران ۲۰۲۲). نتایج تحقیقی نشان داد که تنش شوری به طور قابل توجهی درصد جوانه‌زنی، شاخص جوانه‌زنی، شاخص بنیه گیاهچه، طول ساقه‌چه و ریشه‌چه را در گندم کاهش داد (ظفر[9] و همکاران، ۲۰۲۴). سعادت و صدقی (۲۰۲۴b) در گیاه گندم نشان داده‌اند که تنش شوری سبب کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی و صفات بیوشیمیایی می‌شود.

جوانه‌زنی بذر مرحله اساسی و حیاتی در چرخه رشد گیاه است، زیرا نقش مهمی در سازگاری گیاهچه‌ها با شرایط محیطی مختلف ایفا می‌کند (رحمان[10] و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به این واقعیت، روش‌های مختلف پرایمینگ به‌طور گسترده برای جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه‌ها استفاده می‌شود. پرایمینگ بذر یکی از پرکاربردترین روش‌هایی است که جوانه‌زنی بذر و متغیرهای ریخت‌شناسی را افزایش می‌دهد و رشد و نمو گیاه را چه در شرایط تنش و چه در شرایط عادی بهبود می‌بخشد (رحمان و همکاران، ۲۰۲۰). نانوپرایمینگ می‌تواند در بهبود جوانه‌زنی و همزمان‌سازی جوانه‌زنی اعمال شود. پرایمینگ بذر با نانومواد می‌تواند جوانه‌زنی بذر را افزایش داده و رشد رویشی اولیه و ویژگی‌های بیوشیمیایی را در گونه‌های مختلف گیاهی بهبود بخشد (واکیواص[11] و همکاران، ۲۰۱۹).

کیتوزان یک پلی‌ساکارید طبیعی است که از دِاستیلاسیون کیتین (موجود در پوسته سخت‌پوستان و دیواره قارچ‌ها) بدست می‌آید (مالربا و سرانا[12]، ۲۰۱۶). ساختار شیمیایی آن زنجیره‌هایی از D-گلوکوزامین و N - استیل-D- گلوکوزامین است که از طریق پیوند β (1→4) به هم متصل‌اند. گروه‌های عاملی مهم در این پلیمر: گروه‌های آمین که در محیط اسیدی پروتون‌دار شده و بار مثبت می‌گیرند، گروه‌های هیدروکسیل که قابلیت تشکیل پیوند هیدروژنی دارند. وقتی کیتوزان در ابعاد نانو (۱۰–

[1] Igrejas and Branlard
[2] Arora
[3] Ali
[4] Rakgotho
[5] Omara
[6] Huang
[7] El-Hendawy
[8] Hossen
[9] Zafar
[10] Rhaman
[11] Waqas
[12] Malerba and Cerana

۱۰۰ نانومتر) ساخته می‌شود، سطح ویژه، واکنش‌پذیری و بار سطحی آن به شدت افزایش می‌یابد (ادو[1] و همکاران، ۲۰۲۴). کیتوزان، به‌عنوان ترکیبی غیرسمی و سازگار با محیط‌زیست با خصوصیات ضدباکتریایی، پاداکسیدانی و کلات‌کننده، محبوبیت زیادی در کشاورزی پیدا کرده است و استفاده از آن به‌عنوان نانو، محافظت در برابر تنش‌های غیرزیستی مانند تنش شوری در گیاه گندم را فراهم می‌کند (عابدین[2] و همکاران، ۲۰۲۳). ساختار کیتوزان را می‌توان به راحتی اصلاح کرد تا جذب را در بذر افزایش داده و آزادسازی برخی از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه را کند نماید، در نتیجه پاسخ‌های مثبتی را در گیاهان در شرایط عادی و تحت تنش ایجاد کند. با این حال، اثربخشی آن بر اساس غلظت، ساختار، روش کاربرد، نوع گیاه و مرحله رشد متفاوت است (صادقی‌پور[3]، ۲۰۲۱). نانوکیتوزان، باعث افزایش نفوذپذیری غشای سلولی بذر شده و تبادل یون‌ها و آب آسان‌تر اتفاق می‌افتد (سالی[4] و همکاران، ۲۰۲۶)، همچنین باعث افزایش آنزیم‌های هیدرولیز کننده مثل آمیلاز و پروتئاز می‌شود (گوان[5] و همکاران، ۲۰۰۹). نانوذرات به عنوان بازدارنده رادیکال‌های آزاد عمل کرده و از آسیب اکسیداتیو جلوگیری می‌کنند و باعث تحریک تقسیم سلولی در بافت مریستمی و ریشه‌زایی قوی‌تر می‌شود (گورو[6] و همکاران، ۲۰۲۵). همچنین، باعث فعال‌سازی مسیرهای پیامرسانی دفاعی و رشدی، تنظیم بیان ژن‌های پاداکسیدانی که تنش جوانه را کاهش می‌دهد و افزایش سنتز پروتئین‌های مربوط به جوانه‌زنی و متابولیسم اولیه می‌شود (سالی و همکاران، ۲۰۲۶). در واقع، نانوذرات کیتوزان، نتایج امیدوارکننده‌ای در افزایش رشد، بهره‌وری و مقاومت به تنش گیاه نشان داده‌اند که تا حدودی با تحریک سامانه‌های پاداکسیدانی و دفاعی، تنظیم تعادل اسمزی، افزایش دسترسی به آب و مواد مغذی و جذب یا القای تغییرات در متابولیت و حتی در سطح انجام می‌شود (داوود[7] و همکاران، ۲۰۲۴).

[1] Edo
[2] Abdeen
[3] Sadeghipour
[4] Sali
[5] Guan
[6] Guru
[7] Dawood

استفاده از نانوذرات کیتوزان برای افزایش فرآیند جوانه‌زنی بذر و افزایش رشد گیاهچه گندم (لی[8] و همکاران، ۲۰۱۹) و برنج (دیویا[9] و همکاران، ۲۰۱۹) گزارش شده است. استفاده از کیتوزان سازوکارهای تحمل را در برابر تنش شوری در دیگر غلات دانه‌ای از جمله برنج افزایش می‌دهد (سعادت و همکاران، ۲۰۲۳c). همچنین، با افزایش سطوح تنش شوری از شاخص‌های جوانه‌زنی و برخی از فعالیت آنزیم‌های پاداکسیدانی کاسته شد، ولی تیمارهای پرایمینگ با سطوح مختلف کیتوزان سبب افزایش آن‌ها گردید (سعادت و صدقی، ۲۰۲۴a: سعادت و همکاران، ۲۰۲۳a: ۲۰۲۳c). تحقیقات نشان داده است که پرایمینگ با نانوذرت کیتوزان درصد جوانه‌زنی و شاخص‌های بنیه بذر را افزایش می‌دهد (استیون[10] و همکاران، ۲۰۲۴). طبق گزارش‌ها پرایمینگ با نانو کیتوزان در طول جوانه‌زنی و رشد گیاهچه، تحمل در برابر تنش شوری را ایجاد کرده و رشد پایدار را تضمین می‌کند (حامید[11] و همکاران، ۲۰۲۴). نانوذرات کیتوزان، سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز در گیاه گندم می‌شود (الشارکاوی[12] و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین، نتایج تحقیقی نشان می‌دهد که نانوذرات کیتوزان به دلیل جذب بیشتر، در غلظت‌های پایین‌تر، تأثیر مثبتی بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه گندم دارد (لی و همکاران، ۲۰۱۹). در کل، مطالعات در مورد پاسخ بذر گندم به پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان در طول جوانه‌زنی و رشد گیاهچه محدود است. چون تحقیقات زیادی در این مورد انجام نگرفته است.

هدف از انجام این تحقیق، بررسی تأثیر نانو ذرات کیتوزان بر شاخص‌های جوانه‌زنی و صفات بیوشیمیایی گیاهچه گندم در واکنش به تنش شوری و نقش پرایمینگ بذر با سطوح مختلف نانو ذرات کیتوزان در رفتار جوانه‌زنی بذر گندم بود.

[8] Li
[9] Divya
[10] Steven
[11] Hameed
[12] Elsharkawy

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی پرایمینگ بذر با نانوذرات بر جوانه‌زنی و صفات مرتبط با آن در گندم رقم سائین تحت تنش شوری آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و چهار سطح شوری (۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار کلریدسدیم) و چهار سطح نانوذرات کیتوزان (۰، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی- حجمی محلول در اسید استیک یک درصد بود) (به‌ترتیب ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵گرم از این مواد را برداشته و به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده می‌شود) در دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۴ انجام گرفت. بذرهای گندم رقم سائین طبقه بذر گواهی شده تولید ۱۴۰۳ از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل تهیه شد. نانوذرات کیتوزان طوسی رنگ با خلوص ۹۸/۵٪، متوسط اندازه ذرات کمتر از ۷۰ نانومتر و سطح ویژه بیشتر از ۸۰ متر مربع بر گرم ساخت امریکا (شرکت NanoComposix) بود که از شرکت ایرانی پیشگامان نانو مواد ایران تهیه شد. بذرها قبل از پرایم برای ضدعفونی، به مدت ۵ دقیقه در محلول یک درصد هیپوکلریت سدیم غوطه‌ور و سپس ۳ بار با آب مقطر شسته شدند. ابتدا بذرها درون محلول‌های پرایمینگ و آب مقطر به‌مدت ۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس قرار داده شدند (فاروق[1] و همکاران، ۲۰۲۲). بعد از پرایمینگ، بذرها به‌وسیله آب مقطر شستشو و در دمای آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت خشک گردیدند. سپس، آزمون جوانه‌زنی استاندارد روی بذرها انجام شد. آزمون جوانه‌زنی در پتری در سه تکرار ۲۵ بذری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت ۸ روز انجام گرفت (ایستا[2]، ۲۰۱۳) و به هر پتری محلول شوری (کلرید سدیم) با سطوح مختلف به مقدار ۶ میلی‌لیتر اضافه گردید. سپس، پتری‌ها در داخل ژرمیناتور با دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس قرار داده شد. معیار جوانه‌زنی یک بذر، خروج ریشه‌چه به میزان حداقل ۲ میلی‌متر (اندازه‌گیری به‌وسیله‌ی خط‌کش) از پوسته بذر در نظر گرفته شد. برای خشک کردن ساقه‌چه و ریشه‌چه از آون با دمای ۷۲ درجه‌ی سلسیوس استفاده شد. برای اندازه‌گیری وزن تر و خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه از ترازو با دقت یک‌هزارم استفاده شد. برای محاسبه درصد جوانه‌زنی از رابطه ۱ (امیدی[3] و همکاران، ۲۰۱۴)، ضریب آلومتری از از رابطه ۲ (ابراهیمی[4] و همکاران، ۲۰۱۳)، شاخص طولی بنیه گیاهچه و شاخص وزنی بنیه گیاهچه از رابطه ۳ و ۴ (عبدوالباکی و اندرسون[5]، ۱۹۷۳) استفاده شد.

رابطه ۱: $GP^{6} = (N/M) \times 100$

N: تعداد بذر جوانه‌زده، M: تعداد کل بذور،

رابطه۲: $AC^{7} = RDW/PDW$

RDW: وزن خشک ریشه‌چه، PDW: وزن خشک ساقه‌چه

رابطه ۳: $SLVI^{8} = SL\ (mm) \times GP/100$

GP: درصدجوانه‌زنی، SL: طول گیاهچه

رابطه ۴: $SWVI^{9} = SDW\ (g) \times GP/100$

GP: درصدجوانه‌زنی، SDW: وزن خشک گیاهچه

محتوای پروتئین: برای استخراج پروتئین کل از ساقه‌چه از روش برادفورد[10] (۱۹۷۶) استفاده شد. جهت تهیه معرف پروتئین برادفورد ۱۰۰ میلی‌گرم کوماسی برلیانت بلوجی در ۵۰ میلی‌لیتر اتانول ۹۵٪ به مدت زمان حداقل یک ساعت حل و پس از آن، ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید فسفریک ۸۵٪ قطره قطره به آن اضافه شد و با آب مقطر حجم محلول به ۱۰۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. برای حذف ذرات معلق، محلول از کاغذ صافی واتمن شماره ۲ عبور داده شد. در نهایت ۵ میلی‌لیتر معرف برادفورد همراه با ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره پروتئینی مخلوط و میکسر شد. جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۹۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت گردید. عدد حاصل براساس میلی‌گرم برگرم وزن نمونه بذری محاسبه گردید.

محتوای پرولین: سنجش میزان پرولین براساس روش بیتس[11] و همکاران (۱۹۷۳) انجام گردید. در این

[1] Farooq
[2] ISTA
[3] Omidi
[4] Ebrahimi
[5] Abdul-Baki and Anderson
[6] Germination Percentage
[7] Allometry Coefficient
[8] Seedling Length Vigor Index
[9] Seedling Weight Vigor Index
[10] Bradford
[11] Bates

روش ۰/۵ گرم از ریشه‌چه با ۵ میلی‌لیتر محلول ۳ درصد اسید سولفوسالیسیلیک مخلوط گردید. پس از صاف کردن با صافی از مخلوط همگن حاصل، ۲ میلی‌لیتر برداشته شد و بعد از اضافه کردن ۲ میلی‌لیتر معرف اسید نین‌هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسید استیک خالص در بن‌ماری به مدت یک ساعت با دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. سپس نمونه‌ها به حمام آب یخ منتقل و بعد از اضافه کردن ۴ میلی‌لیتر تولوئن، مقدار جذب در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت گردید و مقدار پرولین با استفاده از منحنی استاندارد پرولین و بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر نمونه به‌دست آمد.

محتوای قندهای محلول: میزان قندهای محلول به روش فنل سولفوریک (کوچرت[1]، ۱۹۷۸) و براساس هیدرولیز اسیدی قندهای محلول و ایجاد ترکیب فورفورال که با فنل تولید یک کمپلکس رنگی می‌کند، اندازه‌گیری شد. در این روش، ۰/۵ گرم از برگچه با ۵ میلی‌لیتر آب مقطر به‌وسیله هاون خوب ساییده گردید. پس از صاف کردن، از عصاره گیاهی حاصل ۲ میلی‌لیتر برداشته شد و بعد از افزودن ۱ میلی‌لیتر فنل (۵٪ وزنی- حجمی) و ۳ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۹۸٪، لوله‌ها به مدت ۱ ساعت به حال خود رها شدند تا رنگ ظاهر و تثبیت شود. پس از ظهور رنگ، میزان جذب در طول موج ۴۸۵ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری و با استفاد از منحنی استاندارد قند گلوکز، میزان قند در برگچه تحت تیمار بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه گردید.

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS 9.1 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام گردید.

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی: در این پژوهش، اثر ساده نانوذرات کیتوزان و شوری بر درصد جوانه‌زنی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار و برهمکنش آن‌ها غیرمعنی‌دار بود (جدول ۱). با افزایش شوری (شوری ۱۵۰ میلی‌مولار) درصد جوانه‌زنی به‌ترتیب ۲۰، ۱۷ و ۱۱ درصد نسبت به شاهد (بدون شوری)، شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار کاهش یافت (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی (۸۸/۷۵ درصد) در پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد و کم‌ترین مقدار آن (۷۱/۴۲ درصد) در شاهد بدون کیتوزان مشاهده شد (جدول ۲). البته تأثیر غلظت ۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی-حجمی نانوذرات کیتوزان بر درصد جوانه‌زنی نیز موثر بود (جدول ۲).

مطالعات اخیر نشان داد که غلظت بالای شوری می‌تواند به غشاهای سلولی آسیب برساند، فعالیت آنزیم‌ها را مختل کند و با اختلال در ساختارهای سلولی، زنده‌مانی جنین را به خطر بیندازد و در نهایت مانع فرآیند جوانه‌زنی شود (اوکارلی[2] و همکاران، ۲۰۲۰). تنش اسمزی ناشی از سمیت یون‌ها با کاهش جذب آب در مرحله آبنوشی موجب کاهش درصد جوانه‌زنی می‌شود (عمر[3] و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، یون‌های کلر و سدیم اضافی جذب شده با ایجاد سمیت یونی بر فرآیندهای متابولیک در بذرهای جوانه زده از طریق تنفس، هیدرولیز عناصر غذایی و تولید انرژی تاثیر منفی می‌گذارد (ناصر[4] و همکاران، ۲۰۲۲). در در این پژوهش قرار گرفتن مستقیم بذرها در معرض غلظت مختلف نانوذرات کیتوزان درصد جوانه‌زنی را افزایش داد که ممکن است به دلیل جذب و استفاده از نانوذرات توسط بذر باشد. به‌عنوان مثال، یافته‌های سعادت و صدقی (۲۰۲۴a) و سعادت و همکاران (۲۰۲۳a) نشان می‌دهد که استفاده از کیتوزان تحت تنش شوری می‌تواند در پرایمینگ بذرهای مختلف مفید باشد. عبدالهی‌پور و حقیقی[5] (۲۰۱۹) اظهار کردند که پرایمینگ در شرایط تنش شوری با نرم کردن پوسته بذر موجب افزایش درصد جوانه‌زنی می‌شود. در واقع، پرایمینگ بذر با فعال کردن 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 (بهراسمانی[6] و همکاران، ۲۰۲۳). نتایج تحقیقی نشان می‌دهد که نانوذرات کیتوزان به دلیل جذب بیشتر

[1] Kochert
[2] Uçarlı
[3] Omar
[4] Naseer
[5] Abdolahipour and Haghighi
[6] Bahrasemani

روی سطح دانه‌های گندم، تأثیر مثبتی بر جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه گندم دارد (لی و همکاران، ۲۰۱۹). کاهش درصد جوانه‌زنی تحت تنش شوری و افزایش آن طی پرایمینگ با کیتوزان در گیاهان مختلف نیز گزارش شده است (سعادت و همکاران، ۲۰۲۴: سعادت و همکاران، ۲۰۲۳b: ۲۰۲۳c). همچنین، تحقیقات نشان داده است که پرایمینگ با نانوذرت کیتوزان درصدجوانه‌زنی در گیاه سویا را افزایش می‌دهد (استیون و همکاران، ۲۰۲۴).

جدول ۱. تجزیه واریانس اثر شوری و نانوذرات کیتوزان روی صفات مورد مطالعه در گیاهچه گندم

Table 1. Analysis of variance for the effect of salinity and chitosan nanoparticles on studied traits in wheat Seedling

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی D. F.	Mean of square میانگین مربعات					
		درصد جوانه‌زنی Germination percentage	ضریب آلومتری Allometry coefficient	وزن تر ساقه‌چه Plumule fresh weight	وزن تر ریشه‌چه Radicle fresh weight	وزن خشک ساقه‌چه Plumule dry weight	وزن خشک ریشه‌چه Radicle dry weight
کیتوزان نانوذرات Chitosan nanoparticles (ChNP)	3	780.31**	0.077*	13.392**	5.718**	0.1662**	0.052470**
شوری Salinity (S)	3	738.92**	0.018 ns	8.741**	5.043**	0.0824**	0.006103**
برهمکنش ChNP×S	9	10.55 ns	0.007 ns	0.223 ns	0.254*	0.0057*	0.000537*
خطا Error (E)	32	13.98	0.017	0.336	0.114	0.0027	0.000230
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		4.599	23.209	15.372	14.672	18.125	12.416

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱.

ns, * and ** indicating not significant, the significant differences at 5 and 1 percent probability levels.

جدول ۱. ادامه

Table 1. Continued

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی D. F.	Mean of square میانگین مربعات				
		شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling length vigor index	شاخص وزنی بنیه گیاهچه Seedling weight	پرولین Proline	قندهای محلول Soluble sugars	پروتئین Protein
کیتوزان نانوذرات Chitosan nanoparticles (ChNP)	3	306.86**	39.038**	277.511**	8.231**	19.034**
شوری Salinity (S)	3	185.40**	17.473**	29.114**	0.999**	5.663**
برهمکنش ChNP×S	9	10.76**	1.419**	0.177	0.291**	0.616**
خطا Error (E)	32	1.844	0.268	1.564	0.069	0.194
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)		9.298	14.872	4.536	20.461	14.181

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱.

ns, * and ** indicating not significant, the significant differences at 5 and 1 percent probability levels.

جدول ۲. مقایسه میانگین تأثیر شوری و نانوذرات کیتوزان روی صفات مطالعه شده در گندم

Tabel 2. Mean comparison for the effect of salinity and chitosan nanoparticles on studied traits in wheat

شوری (میلی‌مولار) Salinity (mM)	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	ضریب آلومتری Allometry Coefficient	وزن تر ساقه‌چه Plumule fresh weight (g)	پرولین Proline (µm g^{-1} FW)
0	89.25^{a}	0.409^{a}	4.797^{a}	25.619^{c}
50	85.25^{b}	0.422^{a}	4.048^{b}	27.176^{b}
100	79.50^{c}	0.451^{a}	3.4548^{c}	28.208^{b}
150	71.17^{d}	0.497^{a}	2.793^{d}	29.275^{a}
نانوذرات کیتوزان (درصد وزنی-حجمی) Chitosan nanoparticles (W/V%)				
0	71.42^{c}	0.469^{ab}	2.507^{d}	22.827^{d}
0.1	78.08^{b}	0.344^{c}	3.416^{c}	24.810^{c}
0.2	86.92^{a}	0.429^{bc}	4.197^{b}	28.961^{b}
0.5	88.75^{a}	0.537a	4.972^{a}	33.680^{a}

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون دانکن است.

The different letters in each column indicate a significant difference at 5% probability level based on Duncan's test.

ضریب آلومتری: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده پرایمینگ نانوذرات کیتوزان روی ضریب آلومتری در سطح احتمال پنج درصد و اثر ساده شوری غیرمعنی‌دار بود (جدول ۱). با افزایش شوری (شوری ۱۵۰ میلی‌مولار) ضریب آلومتری به‌ترتیب ۱۸، ۱۵ و ۹ درصد نسبت به شاهد (بدون شوری)، شوری ۵۰ و۱۰۰ میلی‌مولار افزایش یافت. هر چند بین سطوح مختلف شوری تفاوت معنی‌دار دیده نشد (جدول ۲). کاربرد سطوح مختلف نانوذرات کیتوزان توانست ضریب آلومتری را افزایش دهد. اما تأثیر پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد بیشتر از سطوح دیگر و هیدرو پرایمینگ بود (جدول ۲). بیش‌ترین ضریب آلومتری (۰/۵۳۷) مربوط به تیمار با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد بود (جدول ۲). ضریب آلومتری از نسبت وزن خشک ریشه‌چه به وزن خشک ساقه‌چه به‌دست می‌آید، که مقاومت به شرایط تنش شوری را نشان می‌دهد. پس افزایش وزن خشک ریشه‌چه نسبت به وزن خشک ساقه‌چه طی پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان موجب افزایش ضریب آلومتری می‌شود. این امر نشان می‌دهد که میزان افزایش وزن خشک ساقه‌چه در مقایسه با وزن خشک ریشه‌چه کمتر است و به بیانی دیگر وزن خشک ریشه‌چه کمتر تحت تأثیر تیمارهای آماده سازی بذر با آب مقطر و سطوح مختلف نانوذرات کیتوزان قرارگرفته است. افزایش ضریب آلومتری طی پرایمینگ با کیتوزان تحت تنش شوری در گیاه سویا نیز گزارش شده است (سعادت و همکاران، ۲۰۲۴).

وزن تر و خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده نانوذرات کیتوزان و شوری روی وزن تر و خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه در سطح احتمال یک درصد و برهمکنش آن‌ها روی وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه و وزن تر ریشه‌چه در سطح احتمال پنج معنی‌دار بود (جدول ۱). کاربرد نانوذرات کیتوزان ۰/۱ و ۰/۲ درصد و هیدرو پرایمینگ توانست وزن تر و خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه افزایش دهد. اما تاثیر پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد بیشتر از سطوح دیگر نانوذرات کیتوزان و هیدرو پرایمینگ بود. شوری وزن تر ساقه‌چه را کاهش داد، به‌طوری‌که کم‌ترین وزن تر ساقه‌چه (۲/۷۹۳ گرم) در شوری ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهده شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین وزن تر ساقه‌چه (۴/۹۷۲ گرم) در پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد و کم‌ترین آن (۲/۵۰۷ گرم) در شاهد (آب مقطر) مشاهده شد (جدول ۲). همچنین، نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین وزن خشک ریشه‌چه (۰/۲۵۵گرم)، وزن خشک ساقه‌چه (۰/۵۵۲ گرم) و وزن تر ریشه‌چه (۳/۹۸۰ گرم) در پرایمینگ با نانوذرات

کیتوزان ۰/۵ درصد و بدون شوری و کم‌ترین آن‌ها به‌ترتیب ۰/۰۴۱، ۰/۰۹۴و ۰/۸۹۶ گرم در شاهد (آب مقطر) با شوری ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهده شد (جدول ۳). شوری با کاهش سنتز و فعالیت آنزیم‌های هیدرولیز کننده ذخایر بذر سبب کاهش وزن تر و خشک گیاهچه می‌شود (کائور[1] و همکاران، ۲۰۲۲). سعادت و صدقی (۲۰۲۴b) کاهش وزن تر و خشک گیاهچه گندم تحت تنش شوری را گزارش کرده‌اند که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. در این تحقیق، استفاده از هیدروپرایمینگ (آب مقطر) و سطوح مختلف نانوذرات کیتوزان به‌ویژه غلظت ۰/۵ درصد، با اثرات نامطلوب تنش شوری مقابله کرده و وزن تر و خشک گیاهچه و حفاظت از انسجام غشاهای سلولی گندم را افزایش داد. همچنین، افزایش وزن تر و خشک گیاهچه گندم می‌تواند به علت افزایش فعالیت میتوزی و تعداد سلول‌ها در ریشه‌چه و ساقه‌چه باشد که سبب افزایش تجمع ماده خشک سلولی می‌شود (احمدوند[2] و همکاران، ۲۰۲۳). افزایش وزن تر و خشک گیاهچه طی پرایمینگ با کیتوزان تحت تنش شوری در گیاهان مختلف نیز گزارش شده است (سعادت و صدقی، ۲۰۲۴a: سعادت و همکاران، ۲۰۲۳c: ۲۰۲۳d).

شاخص طولی و وزنی بنیه گیاهچه: در این تحقیق، تأثیر ساده نانوذرات کیتوزان و شوری و برهمکنش آن‌ها بر شاخص طولی و وزنی بنیه گیاهچه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان با غلظت ۰/۱ و ۰/۲ درصد توانست روی شاخص طولی و وزنی بنیه گیاهچه تأثیر بگذارد، اما تأثیر غلظت ۰/۵ درصد نانوذرات کیتوزان بیشتر بود. به‌طوری‌که بیش‌ترین شاخص طولی و وزنی بنیه گیاهچه به‌ترتیب ۲۷/۵۲۰ و ۷/۹۳۳ مربوط به تیمار با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد و سطح بدون شوری و کم‌ترین مقدار شاخص طولی بنیه گیاهچه (۶/۶۹۸) و شاخص وزنی بنیه گیاهچه (۰/۸۶۷) در شاهد (آب مقطر) و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار به‌دست آمد (جدول ۳). شاخص بنیه گیاهچه یکی از مهم‌ترین خصوصیاتی است که افزایش مقدار آن نشان‌دهنده بهبود کیفیت و قدرت جوانه‌زنی بذر است. کاهش درصد جوانه‌زنی و طول گیاهچه در شرایط تنش شوری موجب کاهش شاخص‌های طولی و وزنی بنیه گیاهچه گندم می‌شود (سعادت و همکاران، ۲۰۲۴a: ۲۰۲۳c). بنابراین، کاهش درصد جوانه‌زنی و طول گیاهچه در هر تنشی منجر به کاهش بنیه گیاهچه خواهد شد. همچنین، کاهش بنیه بذر ناشی از کاهش تقسیم سلولی، افزایش تنفس و از دست دادن یکپارچگی غشای سلولی در اثر افزایش پراکسیداسیون لیپید (از طریق نشت محتویات سلول به محیط اطراف) است (تائو[3] و همکاران، ۲۰۱۸). در این پژوهش، پرایمینگ بذر با نانوذرات کیتوزان، شاخص‌های بنیه بذر را تحت تأثیر قرار داد، که به دلیل تأثیر نانوذرات کیتوزان بر طول و وزن گیاهچه است. به همچنین، افزایش فعالیت آنزیم‌های پاداکساینده با حذف گونه‌های فعال اکسیژن در گیاه و با حفاظت از گیاهچه‌ها در مقابل پراکسیداسیون لیپیدی و صدمات اکسیداتیو فسفولیپیدغشایی سبب حفظ بنیه بذر می‌شود (سعادت و صدقی، ۲۰۲۴a). نتایج آزمایشی نشان داد که شاخص بنیه بذر گندم تحت تنش شوری کاهش یافت (سعادت و صدقی، ۲۰۲۴b). افزایش شاخص‌های طولی و وزنی بنیه گیاهچه طی پرایمینگ با کیتوزان تحت تنش شوری در گیاهان مختلف نیز گزارش شده است (سعادت و صدقی، ۲۰۲۴a: سعادت و همکاران، ۲۰۲۳c: ۲۰۲۳d). همچنین، تحقیقات نشان داده است که پرایمینگ با نانوذرت کیتوزان شاخص‌های بنیه بذر در گیاه سویا را افزایش می‌دهد (استیون و همکاران، ۲۰۲۴). عبارت دیگر، نانوذرات کیتوزان با بهبود شاخص‌های رشد گیاهچه و درصد جوانه‌زنی سبب افزایش شاخص بنیه گیاهچه در گندم شد. پرایمینگ بذر با نانوذرات کیتوزان به دلیل فعال شدن آنزیم‌های تجزیه‌کننده، ترمیم متابولیک و ایجاد متابولیت‌های تقویت کننده جوانه‌زنی موجب تسریع جوانه‌زنی بذر و در نهایت افزایش شاخص بنیه گیاهچه می‌شود (اقبال[4] و همکاران، ۲۰۲۱).

[1] Kaur
[2] Ahmadvand

[1] Tao
[2] Iqbal

جدول ۳. مقایسه میانگین برهمکنش کیتوزان و شوری روی صفات مطالعه شده در گندم

Tabel 3. Mean comparison for the interaction of chitosan and salinity on studied traits in wheat.

شوری Salinity (mM)	پیش‌تیمار Priming	وزن تر ریشه‌چه Radicle fresh weight (g)	وزن خشک ریشه‌چه Radicle dry weight (g)	وزن خشک ساقه‌چه Plumlue dry weight (g)	شاخص طولی بنیه گیاهچه Seedling length vigor index	شاخص وزنی بنیه گیاهچه Seedling Weight vigor index	قندهای محلول Soluble sugars ($mgg^{-1}FW$)
0	هیدروپرایمینگ Hydropriming	1.847^{def}	0.076^{hi}	0.159^{hij}	11.772^{f}	1.841^{gh}	0.563^{f}
	نانو کیتوزان ۰/۱٪ Nano Chitosan 0.2%	2.953^{b}	0.098^{gh}	0.343^{dec}	14.829^{de}	3.808^{de}	0.740^{ef}
	نانو کیتوزان ۰/۲٪ Nano Chitosan 0.4%	3.033^{b}	0.166^{cd}	0.478^{ab}	21.797^{b}	6.079^{b}	0.906^{def}
	نانو کیتوزان ۰/۵٪ Nano Chitosan 0.5%	3.980^{a}	0.255^{a}	0.552^{a}	27.520^{a}	7.933^{a}	1.907^{c}
50	هیدروپرایمینگ Hydropriming	1.676^{f}	0.060^{ijk}	0.137^{ij}	10.667^{fg}	1.4671^{hi}	0.647^{ef}
	نانو کیتوزان ۰/۱٪ Nano Chitosan 0.2%	2.320^{cd}	0.089^{gh}	0.305^{defg}	12.777^{ef}	3.277^{ef}	0.797^{def}
	نانو کیتوزان ۰/۲٪ Nano Chitosan 0.4%	2.853^{bc}	0.152^{de}	0.384^{cd}	18.298^{c}	4.827^{c}	0.950^{def}
	نانو کیتوزان ۰/۵٪ Nano Chitosan 0.5%	3.773^{a}	0.221^{b}	0.429^{bc}	23.725^{b}	6.083^{b}	2.030^{c}
100	هیدروپرایمینگ Hydropriming	1.317^{g}	0.048^{jk}	0.119^{j}	8.326^{gh}	1.135^{hi}	0.760^{def}
	نانو کیتوزان ۰/۱٪ Nano Chitosan 0.2%	2.007^{de}	0.082^{hi}	0.246^{fgh}	10.636^{fg}	$2.499f^{g}$	0.887^{def}
	نانو کیتوزان ۰/۲٪ Nano Chitosan 0.4%	2.107^{de}	0.132^{ef}	0.301^{defg}	15.570^{d}	3.7037^{e}	1.117^{de}
	نانو کیتوزان ۰/۵٪ Nano Chitosan 0.5%	2.943^{b}	0.189^{c}	0.339^{cdef}	18.068^{c}	4.630^{cd}	2.527^{b}
150	هیدروپرایمینگ Hydropriming	0.896^{g}	0.041^{k}	0.094^{j}	6.698^{h}	0.867^{i}	0.853^{edef}
	نانو کیتوزان ۰/۱٪ Nano Chitosan 0.2%	1.523^{f}	0.074^{hij}	0.177^{hij}	h 8.119^{h}	1.697^{ghi}	1.013^{def}
	نانو کیتوزان ۰/۲٪ Nano Chitosan 0.4%	1.797^{def}	0.110^{fg}	0.218^{ghi}	12.212^{f}	2.564^{fg}	1.266^{d}
	نانو کیتوزان ۰/۵٪ Nano Chitosan 0.5%	1.723^{def}	0.162^{d}	0.271^{efg}	12.633^{ef}	3.304^{ef}	3.560^{a}

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون دانکن است.

The different letters in each column indicate a significant difference at 5% probability level based on Duncan's test.

پرولین: طبق جدول تجزیه واریانس اثر ساده نانوذرات کیتوزان و شوری بر مقدار پرولین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود و برهمکنش نانوذرات کیتوزان و شوری بر این صفت غیر معنی‌دار شد (جدول ۱). طبق نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که با افزایش سطوح شوری به مقدار پرولین افزوده می‌شود. به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار آن (۲۹/۲۷۵ میکرومول بر گرم وزن تر) در شوری ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهد شد (جدول ۲). براساس نتایج مقایسه میانگین بیش‌ترین مقدار پرولین (۳۳/۶۸۰ میکرومول بر گرم وزن تر) در پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد بود (جدول ۲). پرایمینگ با با نانوذرات کیتوزان با غلظت ۰/۱ و ۰/۲ درصد و هیدرو پرایمینگ نیز اثر مثبتی بر پرولین داشتند (جدول ۲)، به‌طوری‌که بعد از نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد، نانوذرات کیتوزان با غلظت ۰/۱ و ۰/۲ درصد بیش‌ترین مقدار پرولین را نشان دادند (جدول ۲). پرولین به عنوان یک محافظ اسمزی، به تثبیت ساختارهای سلولی و محافظت از غشاها در مقابل اثرات منفی تنش‌های شوری کمک می‌کند (قوش[1] و همکاران، ۲۰۲۲). پرایمینگ بذر با نانو ذرات کیتوزان ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد محتوای پرولین را به ترتیب ۸، ۲۱ و ۳۲ درصد نسبت به شاهد (بذرهای تیمار شده با آب مقطر) افزایش داد. به نظر می‌رسد در گیاهچه‌های گندم پرولین یک سازوکار دفاعی در برابر تنش اکسیداتیو عمل کرده و با افزایش سطوح نانوذارت کیتوزان افزایش می‌یابد. همچنین، القای بیوسنتز پرولین و کاهش بیوسنتز پروتئین موجب افزایش پرولین در نتیجه تیمار با نانوذارت کیتوزان می‌شود (هیدانگمایو[2] و همکاران، ۲۰۱۹). از لحاظ ژنتیکی افزایش پرولین ناشی از کاربرد نانو ذرات کیتوزان، احتمالا با تنظیم بالادست، ژن‌های بیوسنتز پرولین مانند گلوتامیل کیناز و گلوتامات -۵- سمی آلدئید دهیدروژناز مرتبط باشد که موجب سنتز پرولین از گلوتامات می‌شود (علی و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، افزایش تجمع پرولین در تیمارهای نانوذرات کیتوزان ممکن است به عنوان یک سازوکار دفاعی یا تحمل بالاتر در برابر تنش شوری، علیرغم مهار رشد، با محافظت از گیاه در برابر آسیب‌های ناشی از اکسیژن منفرد و رادیکال‌های آزاد ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن اضافی، عمل کند. پرایمینگ باعث فعال‌سازی مسیر بیوسنتز پرولین می‌شود در مسیر بیوشیمیایی، پرولین از گلوتامات سنتز می‌شود که در آن دو آنزیم (P5CR و P5CS) دخالت دارد (کوبالا[3] و همکاران، ۲۰۱۵). پرایمینگ موجب افزایش بیان ژن‌های P5CS و P5CR می‌شود، بنابراین مسیر سنتز فعال‌تر و تولید پرولین بیشتر می‌گردد. همچنین، آنزیم (Proline ProDH(dehydrogenase که پرولین را تجزیه می‌کند (سزپسی و سزلوسی[4]، ۲۰۱۸)، در اثر پرایمینگ مهار می‌شود. کاهش فعالیت آن سبب تجمع پرولین و ادامه اثر حفاظتی در مراحل اولیه رشد می‌شود. علاوه بر این، پرایمینگ با نانو ذرات کیتوزان موجب افزایش تحریک پاسخ پاداکسیدانی در سلول شده (سعادت و همکاران، ۲۰۲۳c)، رادیکال‌های آزاد مهار کرده، مسیر حفاظت اسمزی و تنظیم یونی بصورت سریع‌تر فعال شده و این‌ها همه موجب تجمع بیشتر پرولین نسبت به پرایمینگ معمولی می‌شود. در این مطالعه، شوری محتوای پرولین را افزایش داد، که با مشاهدات مشابه گزارش شده توسط سعادت و صدقی (۲۰۲۵a) روی گیاه گندم مطابقت دارد. افزایش پرولین طی پرایمینک با کیتوزان تحت تنش شوری در گیاه لوبیا (سعادت و همکاران، ۲۰۲۴) و سویا (سعادت و صدقی، ۲۰۲۴a) نیز گزارش شده است. بنابراین، اثرات نانوذرات کیتوزان بر محتوای پرولین گندم می‌تواند پتانسیل اسمز سلولی را تنظیم کرده و اثرات نامطلوب شوری را کاهش دهد.

محتوای قندهای محلول: اثر ساده نانوذرات کیتوزان و شوری و برهمکنش آن‌ها بر محتوای قندهای محلول را به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر قرار دادند (جدول ۲). طبق نتایج مقایسات میانگین بیش‌ترین میزان قندهای محلول (۳/۵۶۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار و کمترین

[1] Ghosh
[2] Hidangmayum
[3] Kubala
[4] Szepesi and Szőllősi

آن (۰/۵۶۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در شاهد و بدون حضوری شوری مشاهده شد (جدول ۳). البته سطوح نانوذرات کیتوزان با غلظت ۰/۱ و ۰/۲ درصد و هیدرو پرایمینگ نیز در میزان قندهای محلول موثر بود (جدول ۳). قندها برای عملکردهای بی‌شماری مانند تولید متابولیت‌های عملکردی، بیوسنتز بیوپلیمرها، تولید انرژی و متابولیسم در گیاهان حیاتی هستند. علاوه بر ارزش غذایی، آن‌ها به عنوان تنظیم‌کننده‌های پاسخ به تنش، رشد و نمو گیاهچه عمل می‌کنند (اوهارا[1] و همکاران، ۲۰۱۳). به طور کلی، قندها با عمل به عنوان محافظت کننده‌های اسمزی در شرایط تنش غیرزیستی، پایداری غشا را تضمین کرده رادیکال‌های آزاد را پاک‌سازی می‌کنند و محافظت از غشا را در شرایط تنش شوری فراهم می‌کنند. تجمع قندها در شرایط شوری از ساز و کارهای افزایش تحمل گیاه به شرایط شوری است. افزایش سطح قند در گیاهان می‌تواند ناشی از تجزیه پلی‌ساکاریدها به کربوهیدرات‌های محلول باشد؛ بنابراین، سطح قندهای محلول در شرایط تنش افزایش می‌یابد (باخوم[2] و همکاران، ۲۰۲۲). مطابق با این، میزان قندهای محلول در بذرهای پرایم‌شده با سطوح مختلف نانو ذرات کیتوزان تحت تنش شوری بیشتر بود. سطوح مختلف نانو ذرات کیتوزان تحت تنش شوری با افزایش قندهای محلول، تنظیم اسمزی و حفظ پتانسیل آب سلول سبب کاهش اثرات نامطلوب تنش شوری روی گیاهان می‌شود. همچنین، افزایش قندهای محلول در گندم تیمار شده با نانو ذرات کیتوزان تحت تنش شوری را می‌توان به عوامل مختلفی از جمله مانع شدن از تبدیل کربوهیدرات‌های نامحلول به قندهای محلول، افزایش انتقال ساکارز، کاهش نسبت ساکارز به نشاسته و مهار تجزیه نشاسته برای تنظیم اسمزی در طول کمبود آب نسبت داد (رئیسی‌ساداتی[3] و همکاران، ۲۰۲۲). افزایش محتوای قندهای محلول تحت تنش شوری توسط سعادت و صدقی (۲۰۲۵a) در گیاه گندم نیز گزارش شده است. همچنین، مطالعات مختلف روی گیاهان متفاوت نشان داده است که کاربرد کیتوزان تحت تنش شوری محتوای قندهای محلول را افزایش می‌دهد (سعادت و همکاران، ۲۰۲۴; سعادت و صدقی، ۲۰۲۴a).

پروتئین: جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده نانوذرات کیتوزان، تنش شوری و برهمکنش آن‌ها بر محتوای پروتئین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). طبق نتایج مقایسه میانگین بیش‌ترین محتوای پروتئین (۵/۷۷۰ میلی‌گرم در گرم) در پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد و بدون شوری و کمترین محتوای پروتئین (۱/۳۶۰ میلی‌گرم در گرم) در شاهد با شوری ۱۵۰ میلی‌مولار حاصل شد (جدول ۳). پرایمینگ با سطوح نانوذرات کیتوزان با غلظت ۰/۱ و ۰/۲ درصد و هیدرو پرایمینگ نیز اثر مثبتی بر محتوای پروتئین داشت، به‌طوری‌که بعد از نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد، نانوذرات کیتوزان ۰/۱ و ۰/۲ درصد و هیدرو پرایمینگ بیش‌ترین محتوای پروتئین را نشان دادند (جدول ۳). کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها ذخایر غذایی اصلی هستند که بطور عمده برای مرحله دوم جوانه‌زنی مورد نیاز هستند و منجر به رشد بهتر گیاهچه می‌شوند. پروتئین‌ها منبع حیاتی کربن، نیتروژن، اسیدهای آمینه و انرژی برای رشد گیاهچه هستند (بیولی[4] و همکاران، ۲۰۱۲). آنزیم‌های مختلف که خود پروتئینی هستند، بسیاری از فرآیندهای بیوشیمیایی حیاتی مانند تنفس، تنظیم مسیرهای متابولیکی، بیوسنتز ماکرومولکول‌ها و توسعه ساختارهای زیرسلولی را در جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه انجام می‌دهند. با این حال، هیدرولیز آنزیمی لیپیدها، کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها و انتقال بیشتر متابولیت‌های آن‌ها به شدت به در دسترس بودن آب بستگی دارد (علی و همکاران، ۲۰۱۷). نتایج این پژوهش، کاهش محتوای پروتئین محلول را تحت شرایط تنش شوری نشان داد، اما این پدیده با کاربرد نانوذرات کیتوزان افزایش یافت. کاهش محتوای پروتئین بذرهای گندم طی تنش شوری، احتمالا به دلیل افزایش فعالیت آنزیمی آنزیم‌های پروتئولیتیک مشاهده شده در طول

[1] O'Hara
[2] Bakhou
[3] Raeisi Sadati
[4] Bewley

روند جوانه‌زنی بذر است (گوپتا[1] و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، کاهش پروتئین تحت تنش به واکنش پروتئین با رادیکال‌های آزاد، تفاوت در اسیدهای آمینه، افزایش فعالیت تخریب پروتئین، کاهش سنتز پروتئین و تجمع اسیدهای آمینه آزاد نسبت داده شده است (دئوبی[2] و همکاران، ۲۰۱۹). کاهش پروتئین تحت تنش شوری در گیاه گندم توسط الهنداوی و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش شده است. محتوای پروتئین‌های محلول، این تصور را تأیید می‌کند که کیتوزان بطور عمده بر جوانه‌زنی بذر در مرحله اولیه جذب آب تأثیر می‌گذارد (سعادت و صدقی، ۲۰۲۵b; ۲۰۲۴a). تحقیقات مختلف نشان داده است که پرایمینگ با کیتوزان تحت تنش شوری محتوای پروتئین را در گیاهچه سویا و لوبیا افزایش می‌دهد (سعادت و همکاران، ۲۰۲۳b; سعادت و صدقی، ۲۰۲۴a). پرایمینگ از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌ها در محور جنینی، انتقال ترکیباتی از قبیل پروتئین‌ها و اسیدهای آمینه را به سمت محور جنینی افزایش می‌دهد (احمدوند و همکاران، ۲۰۲۳). در کل، تعدیل‌های ناشی از نانوپرایمینگ در ویژگی‌های بیوشیمیایی، سمیت یونی را خنثی کرده و بر پارامترهای رشد از جمله جوانه‌زنی نهایی، قدرت و شاخص جوانه‌زنی تأثیر مثبت گذاشت.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که تنش شوری موجب کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی گیاهچه گندم شد و با افزایش شدت تنش شوری، محتوای کل پروتئین کاهش و محتوای پرولین و قندهای محلول افزایش یافت. پرایمینگ با نانوذرات کیتوزان ۰/۵ درصد در افزایش قابلیت جوانه‌زنی و مقابله با تنش شوری، در برخی از صفات جوانه‌زنی موثرتر از پرایمینگ با سطوح نانوذرات کیتوزان ۰/۱ و ۰/۲ درصد عمل کرده و اثرات منفی حاصل از تنش شوری را کاهش داد. همچنین، پرایمینگ بذر گندم با سطوح نانوذرات کیتوزان روند افزایشی محتوای پرولین و میزان قندهای محلول را در پی داشت. نانوذرات کیتوزان از طریق بهبود فرآیندهای بیوشیمیایی مختلف مورد مطالعه، به تنش شوری کمک کرده و رشد را بهبود می‌بخشند. بنابراین، به نظر می‌رسد استفاده از نانوپرایمینگ می‌تواند یک تیمار پیش از کاشت مؤثر برای گیاه گندم باشد تا توانایی آن‌ها را در مقابله با اثرات نامطلوب ناشی از تنش شوری بهبود بخشد.

[1] Gupta
[2] Dubey

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: دکتر هانیه سعادت، دکتر محمد صدقی تهیه گزارش پژوهش: دکتر هانیه سعادت تحلیل داده‌ها: دکتر هانیه سعادت

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شده است.

سپاسگزاری

بدینوسیله از مسئولین دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی به خاطر حمایت مالی/ حمایت معنوی/ همکاری در اجرای پژوهش حاضر تشکر و قدردانی می‌گردد.

References منابع

Abdeen, S.A., Hefni, H.H. & Mady, A.H.J. (2023). Foliar application of chitosan zinc oxide nanoparticles on wheat productivity and water use efficiency under deficit irrigation water. *Journal of Central European Agriculture*, *24*(2), 476–490. https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.2.3639

Abdolahipour, B. & Haghighi, M. (2019). The effect of pine wood vinegar on germination, growth and physiological characteristics, and uptake of elements in Basil. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, *10*(2), 11–24. [In Persian]. http://dx.doi.org/10.29252/ejgcst.10.2.11

Abdul-Baki, A.A. & Anderson, J.D. (1973). Vigor determination in soybean by multiple criteria. *Crop Science*, *13*, 630-633. https://doi.org/10.2135/cropsci1973.0011183X001300060013x

Ahmadvand, B., Sharifzadeh, F. & Mirabzadeh Ardakani, M. (2023). The effect of hydro and osmo priming treatments on germination traits enhancement of *Sesamum indicum* L var. shevin seeds under drought stress. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, *11*(4), 1-16. https://doi.org/10.22092/ijsst.2022.359726.1446 [In Persian].

Ali, L.G., Nulit, R., Ibrahim, M.H. & Yien, C.Y.S. (2021). Efficacy of KNO_3, SiO_2 and SA priming for improving emergence, seedling growth and antioxidant enzymes of rice (*Oryza sativa*), under drought. *Scientific Reports*, *11*, 3864. https://doi.org/10.1038/s41598-021-83434-3

Ali, Q., Daud, M.K., Haider, M.Z., Ali, S., Rizwan, M., Aslam, N., Noman, A., Iqbal, N., Shahzad, F., Deeba, F., Ali, I., &, Zhu, S.J. (2017). Seed priming by sodium nitroprusside improves salt tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) by enhancing physiological and biochemical parameters. *Plant Physiology and Biochemistry*, *119*, 50-58. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.08.010

Ali. F., Bano, A., Hassan, T.U., Nazir, M. & Khan, R.T. (2023). Plant growth promoting rhizobacteria induced modulation of physiological responses in rice under salt and drought stresses. *Pakistan Journal of Botany*, *55*(2), 447–52. http://dx.doi.org/10.30848/PJB2023-2(23)

Arora, N.K. (2019). Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. *Environmental Sustainability*, *2*, 95–96. https://doi.org/10.1007/s42398-019-00078-w

Bahrasemani, S., A. Seyedi, S.H. Fathi. & M. Jowkar. (2023). The seed priming using putrescine improves, germination indices and seedlings morphobiochemical responses of Indigo (I*ndigofera tinctoria*) under salinity stress. *Journal of Medicinal Plants and By-Products, 13*(1), 179-188. https://doi.org/10.22034/JMPB.2023.128870

Bakhoum, G.S.H., Sadak, M.S.H. & Tawfik, M.M. (2022). Chitosan and chitosan nanoparticle effect on growth, productivity and some biochemical aspects of *Lupinus termis* L. plant under drought conditions. *Egyptian Journal of Chemistry*, *65*(5), 537-549. https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.97832.4563

Bates, L.S., Waldern, R.P. & Tear, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, *39*, 205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Bewley, J.D., Bradford, K. & Hilhorst, H. (2012). *Seeds: physiology of development, germination and dormancy*. Springer Press Inc., New York. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4

Bradford, M. (1976). Arapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein day binding. *Analytical Biochemistry*, *72*, 248-254. https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3

Dawood, M.G., El-Awadi, M.E. & Sadak, M.S. (2024). Chitosan and its nanoform regulates physiological processes and antioxidant mechanisms to improve drought stress tolerance of Vicia faba plant. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *24*(3), 5696–5709. https://doi.org/10.1007/s42729-024-01934-3

Divya, K., Vijayan, S., Nair, S.J. & Jisha, M.S. (2019). Optimization of chitosan nanoparticle synthesis and its potential application as germination elicitor of *Oryza sativa* L. *International Journal of Biological Macromolecules*, *124*, 1053–1059. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.185

Dubey, A.K., Kumar, N., Kumar, A., Ansari, M.A., Ranjan, R., Gautam, A., Sahu, N., Pandey, V., Behera, S.K. & Mallick, S. (2019). Over-expression of *CarMT* gene modulates the physiological performance and antioxidant defense system to provide tolerance against drought stress in *Arabidopsis thaliana* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *171*, 54-65. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.050

Ebrahimi, O., Esmaili, M.M., Sabori, H. & Tahmasebi, A. (2013). Effects of salinity and drought stress on germination two spices of (*Agropyron elongatum*, *Agropyron desertrum*). *Desert Ecosystem Engineering Journal*, *1*(1), 31–38. [In Persian]

Edo, G.I., Yousif, E. & Al-Mashhadani M.H. (2024). Chitosan: An overview of biological activities, derivatives, properties, and current advancements in biomedical applications. *Carbohydrate Research*, *542*, 109199. https://doi.org/10.1016/j.carres.2024.109199

El-Hendawy, S., Elshafei, A., Al-Suhaibani, N., Alotabi, M., Hassan, W. & Dewir, Y.H. (2019). Assessment of the salt tolerance of wheat genotypes during the germination stage based on germination ability parameters and associated SSR markers. *Journal of Plant Interactions*, *14*(1), 151–163. https://doi.org/10.1080/17429145.2019.1603406

Elsharkawy, 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*(3), 304. https://doi.org/10.3390/jof8030304

Evlice, A.K. & Zencirci, N. (2025). *Securing Wheat Cultivation for Global Food Safety*. In: Zencirci, N. (eds.), Empowering Wheat Cultivation with GIS, Digital Approaches and Artificial Intelligence, pp. 1–13.

Farooq, T., Un Nisa, Z., Hameed, A., Ahmed, T. & Hameed, A. (2022). Priming with copper-chitosan nanoparticles elicit tolerance against PEG-induced hyperosmotic stress and salinity in wheat. *BMC Chemistry*, *16*, 23. https://doi.org/10.1186/s13065-022-00813-1

Ghosh, U.K., Islam, M.N., Siddiqui, M.N., Cao, X. & Khan. M.A.R. (2022). Proline, a multifaceted signalling molecule in plant responses to abiotic stress: understanding the physiological mechanisms. *Plant Biology*, *24*, 227- 239. https://doi.org/10.1111/plb.13363

Guan, Y.J., Hu, J., Wang, X.J. & Shao, C.X. (2009). Seed priming with chitosan improves maize germination and seedling growth in relation to physiological changes under low temperature stress. *Journal of Zhejiang University Science B*, *10*, 427–433. https://doi.org/10.1631/jzus.B0820373

Gupta, S., Schillaci, M., Walker, R., Smith, P.M., Watt, M. & Roessner, U. (2021). Alleviation of salinity stress in plants by endophytic plant-fungal symbiosis: Current knowledge, perspectives and future directions. *Plant and Soil*, *461*, 219-244. https://doi.org/10.1007/s11104-020-04618-w

Guru, G.R., Ramteke, P.W., Veres, C. & Vágvölgyi, C. (2025). Potential impacts of nanoparticles integration on micropropagation efficiency: current achievements and prospects. *Frontiers in Plant Science*, *7*(16), 1629548. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1629548

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

Hidangmayum, A., Dwivedi, P., Katiyar, D. & Hemantaranjan, A. (2019). Application of chitosan on plant responses with special reference to abiotic stress. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *25*(2), 313–326. https://doi.org/10.1007/s12298-018-0633-1

Hossen, M.S., Karim, M.F., Fujita, M., Bhuyan, M.H.M.B., Nahar, K. & Masud, A.A.C. (2022). Comparative physiology of Indica and Japonica rice under salinity and drought stress: an intrinsic study on osmotic adjustment, oxidative stress, antioxidant defense and methylglyoxal detoxification. *Stresses, 2*(2), 156–178. https://doi.org/10.3390/stresses2020012

Huang, S., Gill, S., Ramzan, M., Ahmad, M.Z., Danish, S. & Huang, P. (2023). Uncovering the impact of AM fungi on wheat nutrient uptake, ion homeostasis, oxidative stress, and antioxidant defense under salinity stress. *Scientific Reports*, *13*, 8249. https://doi.org/10.1038/s41598-023-35148-x

Hussain, S., Shaukat, M., Ashraf, M., Zhu, C., Jin. Q. & Zhang. J. (2019). *Salinity Stress in Arid and Semi-Arid Climates: Effects and Management in Field Crops*. In Climate Change and Agriculture. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.87982

Igrejas, G. & Branlard, G. (2020). *The Importance of Wheat*. In: Igrejas, G., Ikeda, T.M. & Guzman, C. (eds.), Wheat Quality for Improving Processing and Human Health, Springer, 1-7. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34163-3_1

Iqbal, S., Hussain, S., Abdul Qayyaum, M., Ashraf, M., & Saifullah. (2021). *The Response of Maize Physiology under Salinity Stress and Its Coping Strategies*. In Plant Stress Physiology. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.92213

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

Kaur, S., Suhalia, A., Sarlach, R. S., Mohd, S., Pritpal, S., Gomti, G., Anureet, B. & Achla, S. (2022). Uncovering the Iranian wheat landraces for salinity stress tolerance at early stages of plant growth. *Cereal Research Communications*, *50*, 895–904. https://doi.org/10.1007/s42976-022-00245-6

Kheiri, A., Jorf, S.A.M., Malihipour, A., Saremi, H. & Nikkhah. M. (2016). Application of chitosan and chitosan nanoparticles for the control of Fusarium head blight of wheat (*Fusarium graminearum*) in vitro and greenhouse. *International Journal of Biological Macromolecules*, *93*, 1261–1272. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.09.072

Kochert, G. (1978). *Carbohydrate Determination by Phenol-Sulfuric Acid Method*. In: Hellebust, J.A. & Craige, J.S. (eds.), Physiological and Biochemical Methods, pp. 95–97.

Kubala, S., Garnczarska, M. & Wojtyla, L. (2015). Deciphering priming-induced improvement of rapeseed (*Brassica napus* L.) germination through an integrated transcriptomic and proteomic approach. *Plant Science*, *231*, 94-113. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.11.008

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

Malerba, M. & Cerana, R. (2016). Chitosan effects on plant systems. *Journal of Cell Science and Molecular Biology*, *17*(7), 996. https://doi.org/10.3390/ijms17070996

Naseer, M.N., Rahman, F.U., Hussain, Z., Khan, I.A., Aslam, M.M., Aslam, A., Waheed, H., Khan, A.U. & Iqbal, S. (2022). Effect of salinity stress on germination, seedling growth, mineral uptake and chlorophyll contents of three *Cucurbitaceae* species. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, *65*, e22210213. https://doi.org/10.1590/1678-4324-2022210213

Nile, S.H., Thiruvengadam, M. & Wang, Y. (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

O'Hara, L.E., Paul, M.J. & Wingler, A. (2013). How do sugars regulate plant growth and development? New insight into the role of trehalose-6-phosphate. *Molecular Plant*, *6*(2), 261–274. https://doi.org/10.1093/mp/sss120

Omar, H.S., Al Mutery, A., Osman, N.H., Reyad, N.E.H.A. & Abou-Zeid, M.A. (2021). Genetic diversity, antifungal evaluation and molecular docking studies of Cu-chitosan nanoparticles as prospective stem rust inhibitor candidates among some Egyptian wheat genotypes. *PLoS ONE*, *16*, e0257959. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257959

Omara, A. E.-D., Hafez, E. M., Osman, H. S., Rashwan, E., El-Said, M. A. A., Alharbi, K., Abd El-Moneim, D., & Gowayed, S. M. (2022). Collaborative impact of compost and beneficial rhizobacteria on soil properties, physiological attributes, and productivity of wheat subjected to deficit irrigation in salt affected soil. *Plants*, *11*(7), 877. https://doi.org/10.3390/plants11070877

Omidi, H., Leyla, J. & Hasanali, N. 2014. *Seeds of Medicinal Plants and Crops*. Natural Resources and Environment, 269-189.

Raeisi Sadati, S.Y., Jahanbakhsh Godehkahriz, S., Ebadi, A. & Sedghi, M. (2022). Zinc oxide nanoparticles enhance drought tolerance in wheat via physio-biochemical changes and stress genes expression. *Iranian Journal of Biotechnology*, *20*(1), 12-24. https://doi.org/10.30498/ijb.2021.280711.3027 [In Persian]

Rakgotho, T., Ndou, N., Mulaudzi, T., Iwuoha, E., Mayedwa, N. & Ajayi, R.F. (2022). Green-synthesized zinc oxide nanoparticles mitigate salt stress in sorghum bicolor. *Agriculture*, *12*(5), 597. https://doi.org/10.3390/agriculture12050597

Rhaman, M.S., Rauf, F., Tania, S.S. & Khatun, M. (2020). Seed priming methods: Application in field crops and future perspectives. *Asian Journal of Research in Crop Science*, *25*(2), 8-19. https://doi.org/10.9734/ajrcs/2020/v5i230091

Saadat, H. & Sedghi, M. (2024a). 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/10.1134/S1021443724605858

Saadat, H. & Sedghi, M. (2024b). The effect of salicylic acid on germination indices in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Seed Research*, 13 (4), 1-16. [In Persian].

Saadat, H. & Sedghi, M. (2025a). Effect of seed priming with salicylic acid on germination and biochemical traits of bread wheat (*Triticum aestivum* cv. Sain) under salinity stress .*Iranian Journal of Seed Research*, *11*(2), 111-124. https://doi.org/10.61882/yujs.11.2.111 [In Persian].

Saadat, H. & Sedghi, M. (2025b).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., Seyed Sharifi, R. & Farzaneh, S. (2023a). 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

Saadat, H., Sedghi, M., Seyed Sharifi, R. & Farzaneh, S. (2023b). The effect of priming with different levels of chitosan on physiological and biochemical traits in French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under salinity stress. *Plant Production Technology*, *14(2),* 75–89. https://doi.org/10.22084/PPT.2023.26100.2075 [In Persian].

Saadat, H., Soltani, E. & Sedghi, M. (2023c). The effect of seed priming with chitosan on germination characteristics and activity of antioxidant enzymes in rice seedlings (*Oryza sativa* L.) under salinity stress. *Journal of Plant Process and Function*, *12*(54), 239–258. [In Persian].

Saadat, T., Sedghi, M., Seyed Sharifi, R. & Farzaneh, S. (2023d). Effect of chitosan on germination indices of common bean (*Phaseolus vulgaris*) (cv. Sedri) seeds under salt stress. *Iranian Journal of Seed Research*, 9(2): 151-162. https://doi.org/10.61186/yujs.9.2.151 [In Persian].

Saadat, T., Sedghi, M., Seyed Sharifi, R. & Farzaneh, S. (2024). The effect of chitosan priming characteristics on germination indices and biochemical bean seeds (*Phaseolus vulgaris* cv. Sadri) under salinity stress. *Iranian Journal of Seed Research*, *10*(2), 21-36. https://doi.org/10.61186/yujs.10.2.21 [In Persian].

Sadeghipour, O. (2021). Chitosan application improves nickel toxicity tolerance in soybean. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *21*(3), 2096–2104. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00505-0

Sali, S., Thampi, M. & Jisha, M.S. (2026). Chitosan-based nanocomposites: A sustainable frontier in plant growth regulation and postharvest preservation. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, *141*, 103026. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.103026

Soni, A.T., Rookes, J.E. & Arya, S.S. (2023). Chitosan nanoparticles as seed priming agents to alleviate salinity stress in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Polysaccharides*, *4*(2), 129–141. https://doi.org/10.3390/polysaccharides4020010

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*(10), 1290. https://doi.org/10.3390/plants13101290

Szepesi, Á. & Szőllősi, R. (2018). Chapter 17 - Mechanism of proline biosynthesis and role of proline metabolism enzymes under environmental stress in plants. *Plant Metabolites and Regulation under Environmental Stress*, *11*, 337-353. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812689-9.00017-0

Tao, Q., Lv, Y., Mo, Q., Bai, M., Han, Y. & Wang, Y. (2018). Impacts of priming on seed germination and seedling emergence of *Cleistogenes songorica* under drought stress. *Seed Science and Technology*, *46*(2), 239-258. https://doi.org/10.15258/sst.2018.46.2.06

Uçarlı, C. (2020). *Effects of Salinity on Seed Germination and Early Seedling Stage.* In Abiotic Stress in Plants. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.93647.

Waqas, M., Korres, N.E., Khan, M.D., Nizami, A.S., Deeba, F., Ali, I. & Hussain, H. (2019). *Advances in the Concept and Methods of Seed Priming*. In: Hasanuzzaman, M., Fotopoulos, V. (eds.), Priming and Pretreatment of Seeds and Seedlings, pp. 11–41. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8625-1

Zafar, S., Khan, S., Ibrar, D. & Khan. M. K. (2024). Application of zinc nanoparticles as seed priming agent improves growth and yield of wheat seedlings grown under salinity stress by enhanced antioxidants activities and gas exchange attributes. *Cereal Research Communications*, *52*, 1551–1564. https://doi.org/10.1007/s42976-024-00499-2