



Interaction of salinity stress and chitosan nanoparticles on some biochemical and micronutrient properties of maize (*Zea mays* L.) leaves and roots

Seyedeh Nasrin Veqhar Mooavi¹, Sara Saadatmand^{2*}, Rashid Jamei³,
Reza Darvishzadeh⁴

¹Department of Biology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: nasrin.mousavi@srbiau.ac.ir

²Department of Biology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: s_saadatmand@srbiau.ac.ir

³Department of Biology, Faculty of Science, Urmia University, Urmia, Iran, Email: r.jamei@urmia.ac.ir

⁴Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran, Email: r.darvishzadeh@urmia.ac.ir

Article type:

Research article

Abstract

Given that maize yield declines under salinity, this study investigated the impact of this stress on the single-cross 201 maize cultivar and evaluated the role of chitosan nanoparticles as a moderating agent. To achieve this, the seeds were grown in pots, and at the four-leaf stage, different treatments were applied, including salinity stress at three levels: 0, 0.05, and 0.1 M, and a spray of 50 nm chitosan nanoparticles at concentrations of 0, 0.05, and 0.1 g/liter. The results indicated that the treatments studied significantly affected maize traits. Characteristics such as phenol, flavonoid, anthocyanin, DPPH radical scavenging, nitrogen, and zinc content were found to be considerably higher in maize leaves compared to their roots. In most traits, no significant statistical difference was observed between the studied treatments in the roots; however, a significant difference was found in the leaf averages. The levels of phenol, flavonoids, DPPH radical scavenging, and anthocyanins in maize leaves increased with chitosan nanoparticle spraying, but significantly decreased at higher salinity levels compared to the control. With the increase in salinity of both root and leaf tissues, the amount of chlorine increased while the content of iron decreased. The application of chitosan nanoparticles significantly improved this process. Given the optimal performance of chitosan nanoparticles and their minimal environmental risks, it is recommended to focus more on this issue in future studies and to conduct evaluations during the final stages of maize growth.

Article history

Received:28.07.2024

Revised:07.11.2024

Accepted:16.11.2024

Published:22.06.2025

Keywords

Environmental stress

Maize

Antioxidant activity

Phenol and flavonoid

Chitosan

Cite this article as: Veqhar Mooavi, S.N., Saadatmand, S., Jamei, R., Darvishzadeh, R. (2025). Interaction of salinity stress and chitosan nanoparticles on some biochemical and micronutrient properties of maize (*Zea mays* L.) leaves and roots *Journal of Plant Environmental Physiology*, 78: 53-68.



©The author(s)

Publisher: Islamic Azad University, Gorgan branch

DOI: <https://doi.org/10.71890/IPER.2025.1127477>

برهم کنش تنش شوری و نانوذره کیتوزان بر روی برخی از خصوصیات بیوشیمیایی و عناصر ریزمغذی برگ و ریشه ذرت (*Zea mays* L.)

سیده نسرین وقار موسوی^۱، سارا سعادت‌مند^{۲*}، رشید جامعی^۳، رضا درویش‌زاده^۴

^۱ دانشکده علوم و فناوری‌های هم‌گرا، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، رایانامه: nasrin.mousavi@srbiau.ac.ir

^۲ دانشکده علوم و فناوری‌های هم‌گرا، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، رایانامه: s_saadatmand@srbiau.ac.ir

^۳ گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، رایانامه: r.jamei@urmia.ac.ir

^۴ گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، رایانامه: r.darvishzadeh@urmia.ac.ir

نوع مقاله:	چکیده
مقاله پژوهشی	نظر به این‌که عملکرد ذرت تحت تأثیر شوری کاهش می‌یابد، در تحقیق حاضر اثر این تنش بر روی رقم سینگل کراس ۲۰۱ ذرت بررسی و نقش تعدیل‌کنندگی نانوذره کیتوزان ارزیابی شد. بدین منظور، بذور در گلدان‌هایی کشت شدند و در مرحله چهار برگی تیمارهای مختلف یعنی تنش شوری در سه سطح ۰، ۰/۰۵ و ۰/۱ مولار و اسپری نانو ذره کیتوزان ۵۰ nm با غلظت‌های ۰، ۰/۰۵ و ۰/۱ گرم بر لیتر اعمال گردید. نتایج نشان داد که تیمارهای مورد مطالعه اثر معنی‌داری بر صفات ذرت داشتند. صفاتی مانند فنل، فلاونوئید، آنتوسیانین، جاروب‌کنندگی رادیکال DPPH و محتوای نیتروژن و روی در برگ ذرت به شکل معنی‌داری بیشتر از ریشه آن بود. در اکثر صفات اختلاف آماری معنی‌داری بین تیمارهای مورد مطالعه در بافت ریشه مشاهده نشد، در حالی که در بافت برگ تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها وجود داشت. میزان فنل و فلاونوئید، درصد جاروب‌کنندگی رادیکال‌های آزاد DPPH و آنتوسیانین برگ ذرت با افزایش غلظت محلول‌پاشی نانوذره کیتوزان افزایش و با تشدید سطح شوری کاهش معنی‌داری نسبت به شاهد داشتند. همچنین با افزایش تنش شوری در هر دو بافت ریشه و برگ به‌وضوح میزان کلر افزایش و محتوای آهن کاهش یافت که استفاده از محلول‌پاشی نانوذره کیتوزان به طور معنی‌داری این روند را بهبود داد. با توجه به عملکرد مطلوب نانوذره کیتوزان و خطرات پایین زیست‌محیطی آن توصیه می‌گردد در مطالعات آتی به این موضوع توجه بیشتری شود و ارزیابی‌ها در مراحل انتهایی رشد ذرت نیز انجام گردد.
واژه‌های کلیدی:	
تنش محیطی	
ذرت	
فعالیت پاداکسندگی	
فنل و فلاونوئید	
کیتوزان	

استناد: وقار موسوی، سیده نسرین؛ سعادت‌مند، سارا؛ جامعی، رشید؛ درویش‌زاده، رضا. (۱۴۰۴). برهم‌کنش تنش شوری و

نانوذره کیتوزان بر روی برخی از خصوصیات بیوشیمیایی و عناصر ریزمغذی برگ و ریشه ذرت (*Zea mays* L.).

فیزیولوژی محیطی گیاهی، ۷۸: ۵۳-۶۸.

مقدمه

Al-Tawaha and Al-Ghzawi, 2013; Zhang et al., 2021)، اما نانوکیتوزان به دلیل نسبت سطح به حجم بالا و در نتیجه نفوذپذیری بیشتر و توانایی ایجاد فعل و انفعالات بیشتر، می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر روی این محصولات داشته باشد (Bandara et al., 2020). سازوکار عمل نانوذره کیتوزان در کاهش اثرات مضر تنش شوری در گیاه ذرت به‌طور کامل شناخته نشده است. نانوذره کیتوزان با آزاد کردن نیتریک اکسید باعث بهبود رشد ذرت در برابر تنش شوری می‌گردد (Oliveira et al., 2016). نتایج Al-Tawaha و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که شوری اثرات منفی بر رشد اندام هوایی و ریشه ذرت دارد، در حالی‌که محلول‌پاشی کیتوزان رشد گیاه را بهبود می‌بخشد و اثرات نامطلوب حاصل از شوری را تعدیل می‌نماید. در یک مطالعه مشخص شد که نانوذره کیتوزان بر بسیاری از شاخص‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه بامیه اثر می‌گذارد و در غلظت ۰/۴ گرم بر لیتر عملکرد بهتری در بهبود سطوح مختلف تنش شوری دارد (Yousefi et al., 2022). در گیاه لوبیا گزارش شده است که نانوذره کیتوزان در غلظت‌های مختلف، جوانه‌زنی و رشد رویشی گیاهان رشد کرده تحت شرایط شوری را افزایش می‌دهد (Zayed et al., 2017). همچنین، محلول‌پاشی نانوذره مذکور در گیاه دارویی *Catharanthus roseus* L. منجر به افزایش رشد و فعالیت آنزیم‌های پاداکسنده تحت شرایط تنش شوری شد (Hassan et al., 2021). علاوه بر تنش شوری، تأثیر مثبت نانوذرات کیتوزان توانست اثرات نامطلوب تنش خشکی را در برخی از گیاهان زراعی دیگر نظیر گندم (Behboudi et al., 2019a) و جو (Behboudi et al., 2018) کاهش دهد.

همان‌طور که اشاره گردید نانوذره کیتوزان و اجزای آن اثرات مفیدی بر روی گونه‌های مختلف گیاهی دارد. با این حال، تاکنون نقش آن‌ها بر روی

ذرت (*Zea mays* L.) یکی از گیاهان مهم اقتصادی از خانواده غلات است و به‌عنوان غذای انسان، خوراک دام و یک محصول صنعتی استفاده می‌شود (Arzhang et al., 2024). مطابق با آمارنامه رسمی ایران در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰، ذرت دانه‌ای و علوفه‌ای به‌ترتیب در ۱۵۹ و ۳۸۵ هزار هکتار از اراضی کشور کشت گردد و میزان تولید آن به‌ترتیب برابر با ۱۱۳۵۹۱۰ و ۱۸۴۳۰۹۰۶ تن بود (Ministry of Jihad Agriculture, 2023). ذرت گرچه به‌عنوان یک گیاه C4، توانایی تحمل به سطوح متوسط تنش شوری را دارد، اما این تنش طیف وسیعی از تغییرات را در گیاه ایجاد کرده و در نهایت موجب کاهش عملکرد ذرت می‌شود (Sabagh et al., 2021). در یک مقیاس ملی، حدود ۳۱ درصد از آب‌های زیرزمینی و ۲۰ درصد از آب‌های سطحی مصرفی در بخش کشاورزی ایران دارای شوری‌های بالاتر از میانگین هستند که تهدیدی برای عملکرد گیاهان زراعی در داخل کشور می‌باشد (Rahimian and Gholami, 2022). در سطح جهانی نیز گرچه اکنون ۲۰ درصد از تمام زمین‌های کشاورزی متأثر از شوری هستند اما پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد تا سال ۲۰۵۰، حدود ۵۰ درصد از زمین‌های کشاورزی دنیا تحت تأثیر تنش شوری قرار گیرد (Sen et al., 2020). کیتوزان یک ماکرومولکول بیولوژیکی طبیعی و دومین پلی ساکارید فراوان بعد از سلولز است که از استیل‌زدایی کیتین به دست می‌آید. با پیشرفت در فناوری نانو و طی سالیان اخیر نانوذرات مبتنی بر کیتوزان مورد توجه محققان بخش کشاورزی قرار گرفته است (Hidangmayum & Dwivedi, 2022). در تحقیقات قبلی نشان داده شده است که کیتوزان به صورت کلی اثرات منفی تنش شوری را در گیاهان زراعی و دارویی کاهش می‌دهد (Ma et al., 2012;)

ذرت تحت سطوح مختلف تنش شوری و در مراحل اولیه رشد گیاه به خوبی شناخته نشده است. بر این اساس، هدف از آزمایش حاضر، تعیین اثرات سطوح مختلف تنش شوری در ذرت و بررسی نقش مثبت محلول پاشی نانوذره کیتوزان و غلظت های متفاوت آن در تعدیل آثار تنش شوری بود.

مواد و روش ها

نحوه اجرای آزمایش: بذر ذرت مورد استفاده در مطالعه حاضر رقم سینگل کراس ۲۰۱ بود که از بخش تحقیقات ذرت و گیاهان علوفه ای مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر و نهال کشور تهیه شدند. جهت کشت ابتدا بذور با آب ژاول سه درصد به مدت پنج دقیقه ضد عفونی و شستشو داده شدند. سپس ده عدد بذر با فاصله یکسان در عمق پنج سانتی متری خاک و در گلدان هایی که با نسبت ۲ به ۱ از ماسه و پرلیت پر شده بودند، کشت شدند. گلدان های مورد استفاده دارای ارتفاع ۱۵ سانتی متر و قطر ۱۲ سانتی متر بودند. از زمان کاشت، آبیاری به صورت یک روز در میان و با استفاده از محلول هوگلند $\frac{1}{8}$ قدرت تا رسیدن به ظرفیت زراعی انجام گرفت. از مرحله دو برگگی الی چهار برگگی آبیاری از محلول هوگلند $\frac{1}{2}$ قدرت و بعد از مرحله چهار برگگی از محلول هوگلند تمام قدرت استفاده شد. همچنین از همین مرحله رشدی تیمارهای مورد مطالعه یعنی تنش شوری در سه سطح ۰، ۰/۰۵ و ۰/۱ مولار و اسپری نانو ذره کیوزان nm ۵۰ با غلظت های ۰، ۰/۰۵ و ۰/۱ گرم بر لیتر اعمال گردید. سطوح تیمارها بر پایه مطالعات (Farooq et al., 2015; Badshah et al., 2023; Soni et al., 2023) با کمی تغییر انتخاب شدند. ابتدا نانوذره کیتوزان از مرحله چهار برگگی روی برگ های گیاه اسپری شد. دو الی سه روز بعد از شروع اسپری نانوذره، غلظت های شوری در محلول هوگلند به خاک

گلدان به صورت یک روز در میان افزوده شد یعنی یک روز پس از اعمال تنش شوری، روز بعد شست-وشوی خاک با آب مقطر انجام گرفت. لازم به توضیح است که نانوذره مورد مطالعه قبلاً توسط دستگاه اولتراسونیک که در آب دیونیزه حل شده بود تهیه شد. آزمایش فوق در اتاق کشت و رطوبت کافی و دمای بین ۲۸ تا ۳۰ درجه سانتی گراد و دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی انجام گرفت. پس از اعمال تیمارهای مختلف، ارزیابی صفات بیوشیمیایی و عناصر ریزمغذی در دو بافت ریشه و برگ یادداشت برداری شدند.

استخراج عصاره گیاهی: برای استخراج عصاره گیاهی مقدار یک گرم از بافت تازه برگ یا ریشه با استفاده از نیتروژن مایع در هاون چینی به پودر نرم تبدیل شد. به پودر حاصل چهار میلی لیتر حلال استخراج، متشکل از ۸۵ درصد متانول و ۱۵ درصد استیک اسید اضافه گردید. پس از مخلوط کردن، نمونه ها برای انجام عمل استخراج به مدت ۲۴ ساعت در یخچال با دمای چهار درجه سانتی گراد نگهداری شدند. سپس بخش روشناور نمونه ها داخل تیوپ های دو میلی لیتری ریخته شده و در ۱۰۰۰۰ g به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند. بعد از سانتریفیوژ، بخش روشناور نمونه ها جداسازی و در داخل تیوپ های ۱/۵ میلی لیتری ریخته شدند. نمونه ها در این مرحله جهت انجام اندازه گیری های مورد نظر در یخچال با دمای ۲۰- درجه سانتی گراد نگهداری شدند.

اندازه گیری فلاونوئید کل: مقدار فلاونوئید کل با روش آلومینیوم کلراید اندازه گیری شد. بدین منظور، به ۱۵۰ میکرو لیتر عصاره استخراج شده به ترتیب ۱۷۰۰ میکرو لیتر اتانول ۳۰ درصد، ۱۵۰ میکرو لیتر نیتريت سدیم ۰/۵ میلی مولار و ۱۵۰ میکرو لیتر کلرید آلومینیوم ۰/۳ میلی مولار اضافه و بلافاصله بهم زده شد. پس از گذشت پنج دقیقه، ۱۰۰ میکرو لیتر محلول

هیدروکسید سدیم یک میلی‌مولار اضافه گردید. پس از ۱۰ الی ۱۵ دقیقه، میزان جذب با دستگاه اسپکتروفتومتر UV/Vis (Agilent 8453, USA) در طول موج ۵۱۰ نانومتر ثبت شد. سپس مقدار فلاونوئید کل برحسب میلی‌گرم کوئرستین بر گرم بیان شد (Li et al., 2009).

اندازه‌گیری فنل کل: میزان فنل کل در عصاره با روش فولین-سینگلتن با کمی تغییر (Singleton and Rossi, 1965) و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. ابتدا ۰/۱ گرم اسید گالیک با متانول به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس محلول ۱۰ درصد فولین و کربنات سدیم ۷/۵ درصد تهیه گردید. محلول به دست آمده به مدت یک ساعت در تاریکی در دمای اتاق نگه داری شد و بعد از آن میزان جذب با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت گردید. محتوای فنل کل با استفاده از منحنی استاندارد اسید گالیک محاسبه گردید.

اندازه‌گیری فعالیت پاداکسندگی: فعالیت جاروب‌کنندگی رادیکال پایدار ۲ و ۲- دی فنیل ۱- پیکرویل هیدرازیل (DPPH_{sc}) بر پایه روش معرفی شده توسط Brand-Williams و همکاران (۱۹۹۵) با اندکی تغییر اندازه‌گیری شد. به طور خلاصه، ۵۰ میکرولیتر از عصاره با ۲ میلی‌لیتر محلول متانولی DPPH (۰/۰۰۴ درصد) مخلوط گردید. جذب مخلوط بعد از ۳۰ دقیقه آنکوباسیون در دمای اتاق و طول موج ۵۱۷ نانومتر خوانده شد. درصد جاروب‌کنندگی نمونه‌ها مطابق با رابطه زیر برآورد شد که در آن A_{Sample} جذب مخلوط واکنش حاوی عصاره و A_{Blank} جذب مخلوط واکنش بدون عصاره است.

$$DPPH_{SC}: 1 - \frac{A_{Sample}}{A_{Blank}} \times 100$$

اندازه‌گیری آنتوسیانین: حدود ۰/۱ گرم بافت گیاه تازه را در هاون چینی با 10 ml متانول اسیدی کاملاً سائیده و عصاره در لوله آزمایش سر پیچ‌دار ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ و جذب محلول روئی در طول موج ۵۵۰ nm اندازه‌گیری شد. غلظت با استفاده از رابطه $A = \epsilon bc$ و با در نظر گرفتن ضریب خاموشی (ϵ) 33000 سانتی‌متر بر مول و نتایج بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر ارائه شد. در رابطه فوق، A میزان جذب، b عرض کوت و c غلظت محلول مورد نظر می‌باشد (Nadernejad et al., 2013).

اندازه‌گیری آسکوربیک اسید: جهت اندازه‌گیری آسکوربیک اسید از روش یدومتربیک استفاده شد. بدین منظور، ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر، ۱۰ میلی‌لیتر عصاره گیاه و ۲/۵ میلی‌لیتر نشاسته را در داخل بشر ریخته و با محلول ید در یدورپتاسیم تا ظهور رنگ خاکستری تیترو گردید. مقدار ید مصرفی را در فرمول زیر قرار داده و مقدار اسید آسکوربیک به صورت درصد محاسبه شد (Arya et al., 2000).

$$\text{مقدار مصرفی ید در یدور پتاسیم} \times \frac{8}{100} = \text{درصد اسید آسکوربیک}$$

اندازه‌گیری نیتروژن: جهت اندازه‌گیری نیتروژن در اندام‌ها ابتدا اندام‌های گیاهی به روش هضم تر، هضم شدند. عصاره‌های هضم شده و عصاره بلانک ۱۰ برابر با آب مقطر رقیق شده و میزان ۰/۲ میلی‌لیتر از عصاره‌های رقیق شده و استانداردها به لوله‌های آزمایش منتقل شدند. سپس سه میلی‌لیتر محلول مخلوط شماره یک به آن اضافه گردد و کاملاً به هم زده شدند. پس از اطمینان از اختلاط کامل پنج میلی‌لیتر محلول مخلوط شماره دو به آن افزوده و کاملاً به هم زده شد تا همگن شوند. بعد از گذشت

دو ساعت مقدار جذب کمپلکس تشکیل شده با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۶۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. در نهایت، غلظت نیتروژن بر حسب میلی گرم در کیلوگرم و ماده خشک گیاهی و همچنین درصد آن با روابط زیر محاسبه گردید (Kalra et al., 1998).

$$N \left(\frac{mg}{kg} \right) = (a - b) \times \frac{df \times v}{w}$$

$$N \% = \frac{N \left(\frac{mg}{kg} \right)}{10000}$$

در روابط فوق، a: غلظت نیتروژن در عصاره (میلی گرم در لیتر)، b: غلظت نیتروژن در بلانک (میلی گرم در لیتر)، v: حجم نهایی عصاره هضم شده، df: درجه رقیق‌سازی و w: وزن نمونه گیاه می‌باشند. **اندازه‌گیری کلر:** میزان کلر با استفاده از دستگاه Chloride Analyzer (مدل Sherwood) اندازه‌گیری شد. این دستگاه بر اساس تیتراسیون اتوماتیک یون‌های کلر موجود در نمونه می‌باشد که توسط یون‌های نقره‌ای حاصل از الکترودهای متصل به دستگاه به صورت کلرید نقره رسوب پیدا می‌کنند. مقدار ۰/۵ میلی لیتر از عصاره‌ی تهیه شده برای اندازه‌گیری عناصر به محلول بافر اسیدی تزریق شده و الکترودهای دستگاه آنالیزور کلر در داخل آن قرار داده شد (Munns and Tester, 2008).

اندازه‌گیری آهن و روی: میزان ۰/۲ گرم از ماده خشک گیاهی توزین و به هر کدام چهار میلی لیتر اسید نیتریک ۶۵ درصد اضافه شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار داده شدند. در مرحله بعد، به مدت ۵ الی ۶ ساعت در آون ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته تا NO₂ تبخیر گردد. بعد از خنک شدن، نمونه‌ها با کاغذ صافی، صاف شده و با آب مقطر به حجم ۱۰ میلی لیتر رسانده شدند و سپس جذب عنصر روی در طول موج ۲۱۳/۹ نانومتر و جذب عنصر آهن

در طول موج ۲۴۸/۳ نانومتر خوانده شد. جهت محاسبه میزان این دو عنصر باید منحنی استاندارد رسم گردد. برای تهیه استاندارد عنصر روی از غلظت‌های ۰/۵، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ نیترات روی استفاده گردید. در حالی که جهت تهیه استاندارد عنصر آهن از غلظت‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ کلرید آهن استفاده شد. در نهایت، جذب آن‌ها به همراه نمونه‌ها توسط دستگاه جذب اتمی خوانده شد (Kalra et al., 1998). **تحلیل آماری:** پس از اندازه‌گیری و جمع‌بندی داده‌ها و همچنین آگاهی از نرمال بودن توزیع اشتباهات آزمایشی، تجزیه واریانس (ANOVA) به صورت فاکتوریل سه عاملی و در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) در نرم‌افزار آماری SAS 9.4 انجام گرفت. از آزمون چند دامنه‌ای دانکن (DMRT) برای مقایسه میانگین تیمارها استفاده گردید. در نهایت، نمودار مقایسه میانگین هر صفت با استفاده از برنامه Excel ترسیم شد.

نتایج

نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده عوامل مورد مطالعه یعنی شوری، نانوذره و بافت گیاه در سطح احتمال یک درصد بر میزان تمام صفات اندازه‌گیری شده ذرت معنی‌دار بود (جدول ۱). علاوه بر این، برهم‌کنش شوری × نانوذره × بافت به‌غیر از فعالیت جاروب‌کنندگی رادیکال DPPH و آسکوربیک اسید برای سایر صفات به شدت معنی‌دار گشت. همچنین، اکثر اثرات متقابل دوجانبه نیز بر بروز صفات ذرت تأثیر معنی‌داری داشتند که جزئیات هر کدام در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: نتایج تجزیه واریانس اثرات عوامل مورد مطالعه بر صفات بیوشیمیایی و عناصر ریزمغذی ذرت

منابع تغییرات	میانگین مربعات										درجه آزادی	منابع تغییرات
	Zn	Fe	N	Cl	AA	AC	DPPH	Fla	Phe			
شوری	۲۰۴۰/۳ ^{ns}	۷۷/۵۴ ^{ns}	۰/۰۳۸ ^{ns}	۲۲/۲۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۹ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۷ ^{ns}	۶۲/۳۳ ^{ns}	۱/۰۴۶ ^{ns}	۳۱/۳۳ ^{ns}	۲	۲	شوری
نانوذره	۱۷۶۲/۵ ^{ns}	۲۹۸/۵ ^{ns}	۰/۰۳۰۶ ^{ns}	۱۰/۸۳ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۷۳ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۱ ^{ns}	۴۷۴/۵ ^{ns}	۲/۰۵۹ ^{ns}	۵۴/۱۲ ^{ns}	۲	۲	نانوذره
بافت	۴۷۸۹۲ ^{ns}	۱۰۴۳ ^{ns}	۱/۸۷۹ ^{ns}	۲۱/۶۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۱۹۴ ^{ns}	۱۲۵۸۳ ^{ns}	۳۷/۸۹ ^{ns}	۱۱۶۵/۵ ^{ns}	۱	۱	بافت
شوری × نانوذره	۱۵۵/۵ ^{ns}	۹۸/۵۰ ^{ns}	۰/۰۲۱ ^{ns}	۱/۷۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۱۶ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۳ ^{ns}	۲/۳۳۹ ^{ns}	۰/۲۱۴ ^{ns}	۳/۱۰ ^{ns}	۴	۴	شوری × نانوذره
شوری × بافت	۸۲۹/۷ ^{ns}	۱۴/۴۶ ^{ns}	۰/۰۴۲ ^{ns}	۰/۹۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۴ ^{ns}	۱۰۵/۱ ^{ns}	۰/۸۰۳ ^{ns}	۱۸/۹۹ ^{ns}	۲	۲	شوری × بافت
نانوذره × بافت	۱۲۸۲/۵ ^{ns}	۱۲/۱۱ ^{ns}	۰/۱۳۶ ^{ns}	۰/۲۳۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۰۰۳ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۲ ^{ns}	۶۹۳/۷ ^{ns}	۱/۹۸۷ ^{ns}	۴۷/۱۷ ^{ns}	۲	۲	نانوذره × بافت
شوری × نانوذره × بافت	۲۰۲۰/۴ ^{ns}	۷/۶۶ ^{ns}	۰/۰۱۶ ^{ns}	۱/۳۲۶ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۰۲ ^{ns}	۱/۵۳۴ ^{ns}	۰/۲۱۳ ^{ns}	۳/۳۶ ^{ns}	۴	۴	شوری × نانوذره × بافت
خطای آزمایشی	۴۹/۳۷	۱/۶۸۱	۰/۰۰۰۳۸	۰/۲۸۲	۰/۰۰۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۰۰۰۲	۷/۸۸۹	۰/۰۲۰۳	۰/۸۲۳	۳۶	۳۶	خطای آزمایشی
ضریب تغییرات (%)	۱۷/۳۲	۱۱/۹۱	۱۸/۱۳	۲۱/۳۹	۱۷/۴۸	۱۸/۳۳	۱۶/۲۴	۱۵/۹۸	۱۶/۵۸			ضریب تغییرات (%)

ns و * به ترتیب غیرمعنی داری و معنی داری در سطح احتمال پنج و یک درصد می باشد.

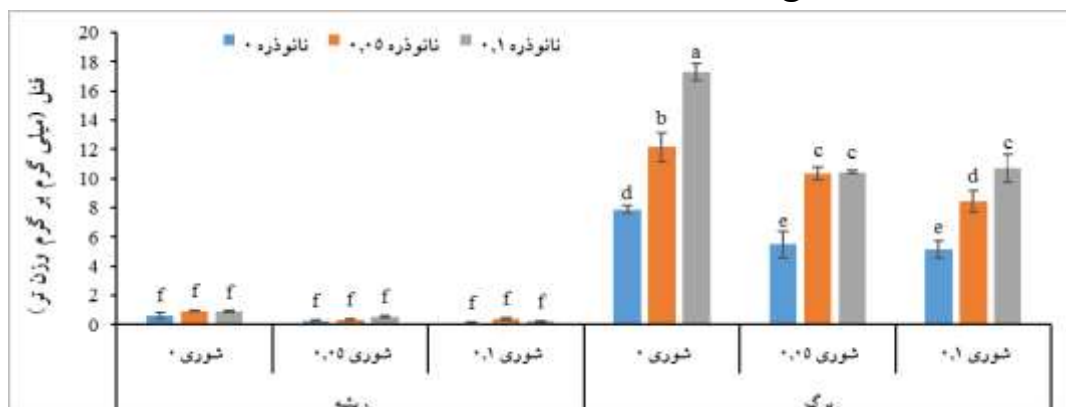
Phe: فنل، Fla: فلاونوئید، DPPH: خواص پاداکسیدگی، AC: آنتوسیانین، AA: آسکوربیک اسید، Cl: کلر، N: نیتروژن، Fe: آهن و Zn: روی

بود. در بافت ریشه اختلاف آماری معنی داری بین تیمارهای مورد مطالعه وجود نداشت، در حالی که در

همان طور که انتظار می رفت، میزان فنل کل و فلاونوئید کل در برگ ذرت بسیار بیشتر از ریشه آن

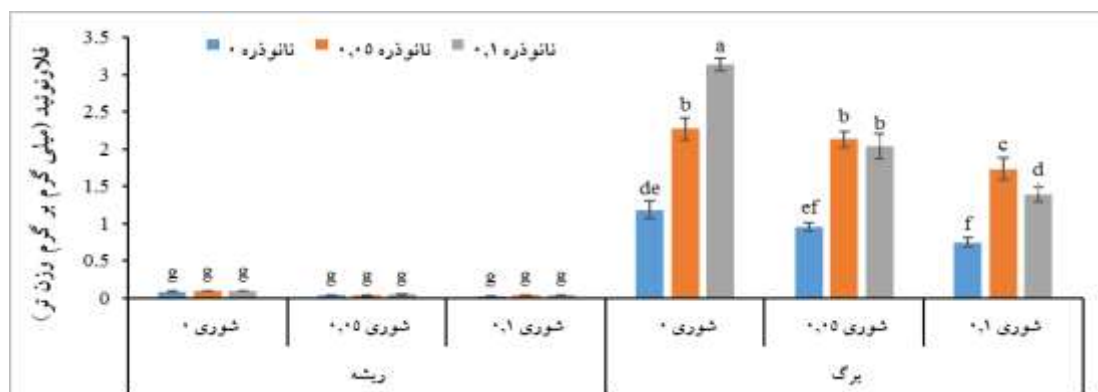
محلول‌پاشی نانوذره کیتوزان در هر دو غلظت در مقایسه با عدم محلول‌پاشی سبب افزایش محتوای فنل کل (شکل ۱) و فلاونوئید کل (شکل ۲) ذرت گردید.

بافت برگ تفاوت معنی‌داری بین میانگین‌ها مشاهده شد. بالاترین میزان فنل و فلاونوئید کل به شرایط عدم شوری و نانوذره کیتوزان با غلظت ۰/۱ گرم بر لیتر اختصاص داشت. در سایر سطوح تنش شوری نیز



شکل ۱: مقایسه میانگین سطوح مختلف تنش شوری و نانوذره کیتوزان از نظر میزان فنل در بافت برگ و ریشه ذرت.

میانگین‌ها با حروف نامشابه اختلاف آماری معنی‌دار از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن دارند.



شکل ۲: مقایسه میانگین سطوح مختلف تنش شوری و نانوذره کیتوزان از نظر میزان فلاونوئید در بافت برگ و ریشه ذرت.

میانگین‌ها با حروف نامشابه اختلاف آماری معنی‌دار از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن دارند.

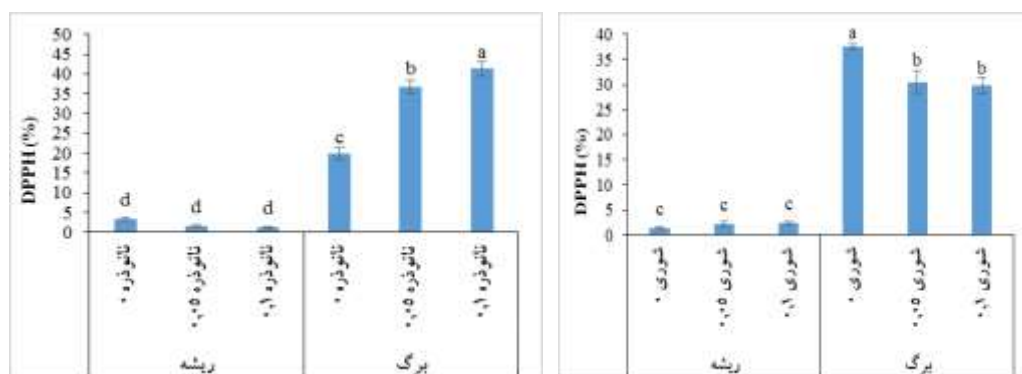
این صفت در بافت ریشه ذرت قابل مشاهده نبودند (شکل ۳).

با افزایش سطح تنش شوری در برگ ذرت، میزان آنتوسیانین به شکل معنی‌داری افزایش یافت. بیشترین محتوای آنتوسیانین در سطح شاهد شوری و محلول‌پاشی نانوذره کیتوزان با غلظت ۰/۱ گرم بر لیتر مشاهده شد. در حالی‌که در همین سطح شوری، محلول‌پاشی نانوذره با غلظت ۰/۰۵ گرم بر لیتر سبب

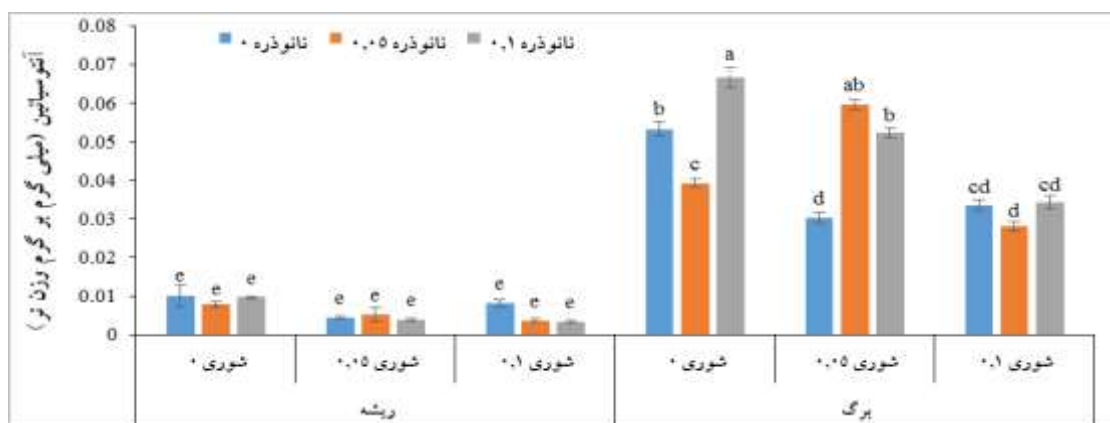
گرچه برهم‌کنش هر سه عامل مورد مطالعه بر جاروب‌کنندگی رادیکال DPPH معنی‌دار نبود اما اثرات متقابل دو جانبه شوری × بافت و همچنین نانوذره × بافت معنی‌دار گردید. با افزایش غلظت محلول‌پاشی نانوذره کیتوزان و نیز سطح تنش شوری به‌ترتیب افزایش و کاهش معنی‌دار در درصد جاروب‌کنندگی رادیکال‌های آزاد DPPH برگ ذرت مشاهده شد. چنین تفاوت‌هایی به خاطر پایین بودن

آنتوسیانین برگ نسبت به عدم محلول پاشی شد، اما این محلول پاشی‌ها در شوری ۰/۰۵ مولار اختلافی با عدم محلول پاشی نداشتند. همانند اکثر صفات، میزان آنتوسیانین در بافت ریشه ذرت نسبت به برگ بسیار پایین بود (شکل ۴).

کاهش آنتوسیانین برگ گردید. علی‌رغم این‌که اعمال محلول پاشی نانوذره کیتوزان در هر دو غلظت در شوری ۰/۰۵ مولار موجب افزایش در محتوای



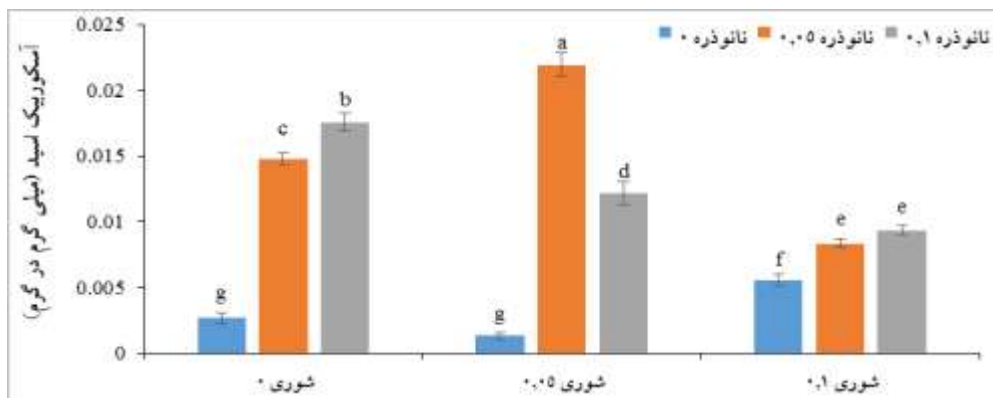
شکل ۳: مقایسه میانگین سطوح مختلف تنش شوری و نانوذره کیتوزان از نظر محتوای روی در بافت برگ و ریشه ذرت. میانگین‌ها با حروف نامشابه اختلاف آماری معنی‌دار از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن دارند.



شکل ۴: مقایسه میانگین سطوح مختلف تنش شوری و نانوذره کیتوزان از نظر محتوای آنتوسیانین در بافت برگ و ریشه ذرت. میانگین‌ها با حروف نامشابه اختلاف آماری معنی‌دار از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن دارند.

۰/۰۵ گرم بر لیتر تحت شوری ۰/۰۵ مولار حاصل گردید. جالب توجه است که در شوری صفر و ۰/۱ مولار، محلول پاشی نانوذره کیتوزان در غلظت ۰/۱ گرم بر لیتر تأثیر بهتری نسبت به غلظت‌های دیگر نشان داد (شکل ۶).

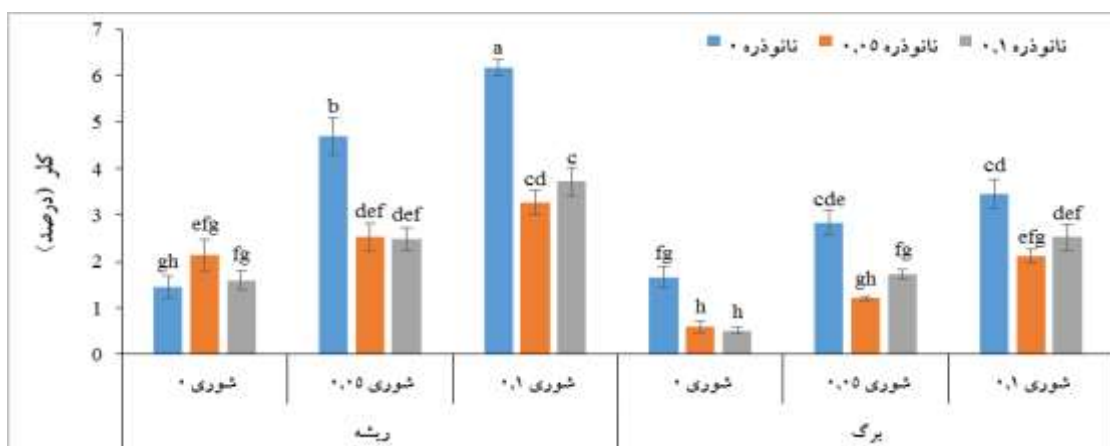
نظر به این‌که از میان برهم‌کنش‌های مختلف تنها اثر متقابل شوری $\times$ نانوذره بر محتوای آسکوربیک اسید معنی‌دار گردید، لذا شکل ۵ تنها مقایسه میانگین این برهم‌کنش را نشان می‌دهد. بیشترین میزان آسکوربیک اسید با اعمال نانوذره کیتوزان در غلظت



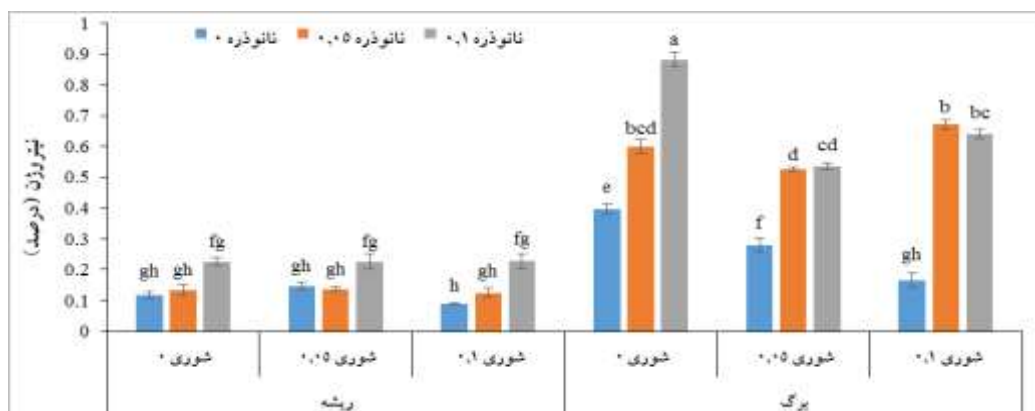
شکل ۵: مقایسه میانگین سطوح مختلف تنش شوری و نانوذره کیتوزان از نظر محتوای آسکوربیک اسید در ذرت. میانگین‌ها با حروف نامشابه اختلاف آماری معنی‌دار از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن دارند.

برگ ذرت تقریباً بیش از دو برابر ریشه آن بود. محلول‌پاشی نانوذره کیتوزان در دو غلظت مورد مطالعه تحت هر سه سطح شوری منجر به افزایش معنی‌دار درصد نیتروژن نسبت به عدم محلول‌پاشی گردید. بالاترین درصد نیتروژن در محلول‌پاشی ۰/۱ گرم بر لیتر نانوذره کیتوزان و شوری صفر مشاهده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، اعمال محلول‌پاشی مختلف در بافت ریشه ذرت آنچنان تغییری نسبت به عدم محلول‌پاشی ایجاد نکرد (شکل ۷).

نتایج مقایسه میانگین تیمارها برای میزان کلر نشان داد که عدم استفاده از نانوذره تحت شوری ۰/۱ مولار و ۰/۰۵ مولار به ترتیب بیشترین محتوای کلر را در هر دو بافت برگ و ریشه در پی داشت. کمترین میزان کلر نیز مربوط به برگ ذرت بود که در شوری صفر و تحت محلول‌پاشی نانوذره اتفاق افتاد. گرچه میزان کلر در بافت ریشه به نسبت بیشتر از بافت برگ ذرت بود اما ترتیب تیمارها تقریباً در هر دو بافت یکسان می‌باشد (شکل ۶). برخلاف کلر، میزان نیتروژن در



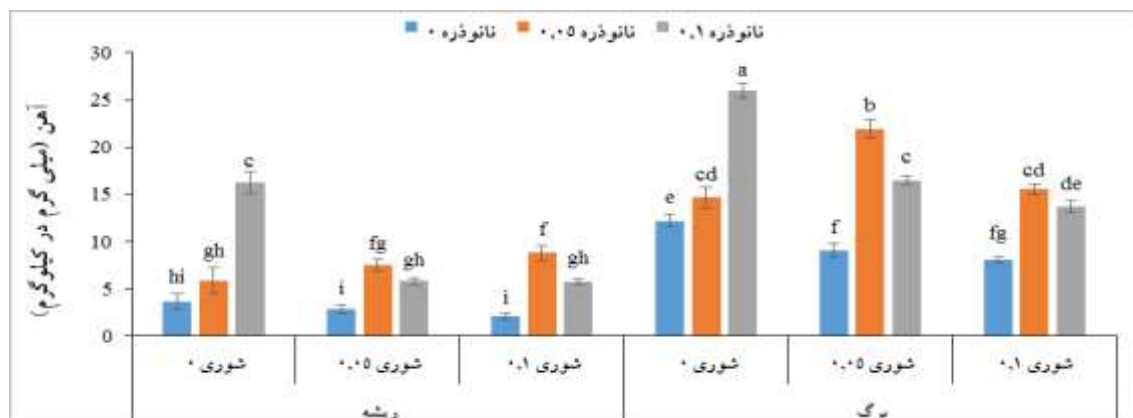
شکل ۶: مقایسه میانگین سطوح مختلف تنش شوری و نانوذره کیتوزان از نظر محتوای کلر در بافت برگ و ریشه ذرت. میانگین‌ها با حروف نامشابه اختلاف آماری معنی‌دار از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن دارند.



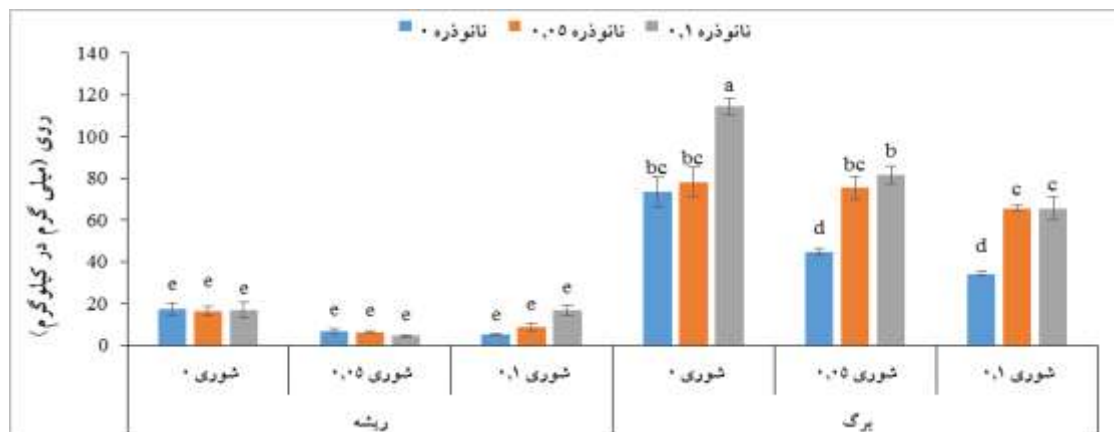
شکل ۷: مقایسه میانگین سطوح مختلف تنش شوری و نانوذره کیتوزان از نظر محتوای نیتروژن در بافت برگ و ریشه ذرت. میانگین‌ها با حروف نامشابه اختلاف آماری معنی‌دار از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن دارند.

محلول‌پاشی نانوذره کیتوزان با غلظت ۰/۱ گرم در شوری صفر حاصل شد. برخلاف شرایط عدم شوری، در غلظت‌های شوری ۰/۰۵ و ۰/۱ مولار، محلول‌پاشی نانوذره کیتوزان با غلظت ۰/۰۵ گرم بر لیتر تأثیر بیشتری بر میزان جذب آهن داشت (شکل ۸). در تضاد با بافت برگ، استفاده از محلول‌پاشی نانوذره کیتوزان تفاوت معنی‌داری در محتوای عنصر روی ریشه برجای نگذاشت (شکل ۹).

با افزایش سطح تنش شوری به‌وضوح میزان آهن و روی در برگ ذرت کاهش یافت که استفاده از محلول‌پاشی نانوذره کیتوزان تا حد زیادی این روند را بهبود داد. مصرف نانوذره کیتوزان با غلظت ۰/۱ گرم بر لیتر تحت شرایط نرمال منجر به افزایش شدید و معنی‌دار میزان عناصر آهن و روی در برگ ذرت شد. میزان این دو عنصر به‌ویژه عنصر روی در بافت برگ ذرت به مراتب بیشتر از بافت ریشه بود. از طرفی دیگر، در بافت ریشه نیز بیشترین میزان آهن با



شکل ۸: مقایسه میانگین سطوح مختلف تنش شوری و نانوذره کیتوزان از نظر محتوای آهن در بافت برگ و ریشه ذرت. میانگین‌ها با حروف نامشابه اختلاف آماری معنی‌دار از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن دارند.



شکل ۹: مقایسه میانگین سطوح مختلف تنش شوری و نانوذره کیتوزان از نظر محتوای روی در بافت برگ و ریشه ذرت. میانگین‌ها با حروف نامشابه اختلاف آماری معنی‌دار از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن دارند.

بحث

افزایش معنی‌دار صفات مختلف ذرت مانند فنل، فلاونوئید و عناصر غذایی گردید و در گیاهان تحت تنش شوری موجب تعدیل اثرات نامطلوب تنش شد. پاسخ اولیه گیاهان به تنش شوری، تنش اسمزی است. مطابق با یافته‌های پژوهش حاضر، استفاده از نانوذره کیتوزان سبب بهبود ظرفیت مهار رادیکال آزاد DPPH در برگ ذرت شد. به عبارتی دیگر، به نظر می‌رسد افزایش ظرفیت مهار رادیکال‌های آزاد از طریق نانوذرات کیتوزان نشان‌دهنده اثربخشی این ترکیب به‌عنوان القاکننده سیستم پاداکسنده گیاه است. در راستای همین نتایج، مشخص گردید که نانوذره کیتوزان با آزادسازی نیتریک اکسید می‌تواند سیستم دفاع پاداکسنده ذرت را تحت تنش شوری تعدیل نماید (Oliveira et al., 2016). بنابراین، اثرات مضر ناشی از تنش شوری ممکن است با تیمار کیتوزان در غلظت‌های مناسب کاهش یابد (Thambiliyagodage et al., 2023). علاوه بر تنش شوری، کیتوزان منجر به بهبود ویژگی‌های رشدی ذرت در مواجهه با سایر تنش‌های محیطی می‌گردد (Guan et al., 2009). مشابه چنین نتایجی در گوجه فرنگی (Attia et al., 2021) و گندم دوروم (Quitadamo et al., 2021) مشاهده شده است که طی آن محلول‌پاشی کیتوزان در

همان‌طور که انتظار می‌رفت، تنش شوری بر بسیاری از پارامترهای ذرت اثر منفی برجای گذاشت. این نتیجه‌ای بود که در بسیاری از مطالعات گزارش شده است (Iqbal et al., 2020; Sabagh et al., 2021; Iftikhar et al., 2024). تنش شوری با ایجاد سمیت یونی، تنش هیپراسموتیک، عدم تعادل تغذیه‌ای، آسیب اکسیداتیو، اختلالات متابولیک و مهار نور بر چندین فرآیند در رشد و تولید گیاه تأثیر منفی می‌گذارد (Chen et al., 2018). با این حال، نانوذره کیتوزان به‌خوبی توانست آثار منفی حاصل از تنش مذکور را تعدیل نماید و به رشد گیاه ذرت کمک کند. تاکنون تلاش‌های زیاد و روش‌های متعددی برای بهبود تحمل به شوری در گیاهان معرفی شده‌اند (Hassan et al., 2021). در این میان، ثابت شده است که نانوذره کیتوزان در گیاهانی که تحت تنش‌های غیرزیستی قرار دارند، اثر مطلوبی ایجاد می‌کند (Hidangmayum & Dwivedi, 2022). برای نانوذره کیتوزان کاربردهای بسیاری در کشاورزی بیان شده است (Bandara et al., 2020; Román-Doval et al., 2023). در مطالعه حاضر، مصرف نانوذره کیتوزان در گیاهان رشد کرده در شرایط بدون تنش موجب

Dowom و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کرده اند که محلول پاشی نانوذره کیتوزان تحت شرایط تنش خشکی به ترتیب سبب افزایش ۲۳/۱ و ۳۶/۴ درصدی در محتوای فنل و فلاونوئید مریم گلی شد. Hassanvand و همکاران (۲۰۲۳) علت افزایش فعالیت پاداکسندگی را به عمل نانوذرات در بلوکه کردن مسیر اتیلن و حذف رادیکال های آزاد و افزایش متابولیت های ثانوی از جمله فلاونوئیدها و آنتوسیانین نسبت داده اند.

برخلاف شرایط عدم شوری، در غلظت های شوری ۰/۰۵ و ۰/۱ مولار، محلول پاشی نانوذره کیتوزان با غلظت ۰/۰۵ تأثیر بیشتری بر میزان جذب آهن داشت. این مواردی از اثر متقابل شدید بین عوامل مورد مطالعه حکایت دارد. با افزایش سطوح شوری، عدم تعادل تغذیه ای در بافت برگ و ریشه ذرت مشهودتر بود، به طوری که از میزان آهن، روی و نیتروژن کاسته و بر مقدار کلر افزوده شد. در صورتی که استفاده از محلول پاشی نانوذره کیتوزان منجر به افزایش سطوح جذب عناصر شد. افزایش نیتروژن را می توان به افزایش فعالیت آنزیم های کلیدی متابولیسم نیتروژن نسبت داد زیرا گزارش ها حاکی از آن است که کیتوزان فعالیت آنزیم های نترات ردوکتاز، گلوتامین سنتتاز و پروتئاز را افزایش می دهد (ChunYan et al., 2003). نقش مفید کیتوزان در کاهش تنش محیطی اغلب به جذب مواد مغذی معدنی (Dzung, 2007)، کاهش تنش اکسیداتیو (Cho et al., 2008) و افزایش کارایی مصرف آب، محتوای کلروفیل و فتوسنتز (Zhang et al., 2021) مربوط می شود. بهبودی و همکاران طی دو گزارش مختلف نشان داده اند که کاربرد روش محلول پاشی نانوذره کیتوزان در اکثر صفات تفاوتی با کاربرد آن در خاک ندارد (Behboudi et al., 2019b, Behboudi et al., 2018). بنابراین، در مطالعه حاضر نیز تنها از روش

شرایط تنش شوری سبب افزایش فعالیت سیستم پاداکسندگی گیاه شد. در مطالعه دیگر، نتیجه گیری شد که محلول پاشی کیتوزان با تعدیل غلظت یون درون سلولی، کنترل تنظیم اسمزی و افزایش فعالیت آنزیمی پاداکسندگی در برگ های کاهو، اثرات نامطلوب تنش شوری بر رشد و زیست توده گیاه را کاهش می دهد (Zhang et al., 2021). با این حال، Razavizadeh و همکاران (۲۰۲۰) در گیاه زینان گزارش کرده اند که کیتوزان تجمع فنلی و فعالیت آنزیم های پاداکسندگی را تحت تیمار NaCl سرکوب می کند. کیتوزان بر رشد گیاه گوجه فرنگی و نخود اثر تحریک کننده دارد و نشان داده شده است که باعث تقویت دفاع گیاه در برابر تنش های زیستی و غیر زیستی می شود (Malerba & Cerana, 2016). افزایش فعالیت آنزیم های پاداکسندگی گندم نظیر کاتالاز و سوپراکسید دسموتاز در نتیجه استفاده از نانوذره کیتوزان تحت شرایط تنش شوری (Hassan et al., 2021) و خشکی (Behboudi et al., 2018) مشاهده شده است. مشابه این یافته ها در گیاه لوبیا گزارش گردیده است که طی آن غلظت ۰/۱ درصد نانوذره کیتوزان اثر مثبتی بر فعالیت آنزیم های پاداکسندگی در تنش شوری می گذارد (Zayed et al., 2017). همچنین، کیتوزان تأثیر مستقیمی بر بیان برخی از ژن های دخیل در مسیر سنتز جاسمونیک اسید دارد که این ترکیب فعالیت مشابهی با هورمون گیاهی آبسزیک اسید ایفا می نماید (Bittelli et al., 2001). بنابراین، احتمال دارد محلول پاشی نانوذره کیتوزان منجر به تقویت مسیرهای سیگنال دهی پاسخ به تنش شود. از سویی دیگر، با محلول پاشی نانوذره کیتوزان، محتوای فنل و فلاونوئید برگ ذرت افزایش یافت، این نتیجه نشان می دهد که ترکیبات فنلی جزء غالب سیستم پاداکسندگی غیر آنزیمی در ذرت هستند و کیتوزان موجب بهبود این سیستم شده است. در توافق با این نتایج، Attaran

محلول‌پاشی استفاده گردید. در نهایت، علاوه بر اثرات مثبت بر رشد، می‌توان اظهار داشت که محلول‌پاشی نانوذره کیتوزان با توجه به پایین بودن خطرات زیست‌محیطی شایسته توجه بیشتر از سوی محققان و کشاورزان دارد و کاربرد آن بسیار نویدبخش می‌باشد (Hidangmayum & Dwivedi, 2022).

نتیجه‌گیری نهایی

تنش شوری اعمال شده به‌ویژه در غلظت بالا منجر به اختلال در رشد ذرت گردید که استفاده از نانوذره کیتوزان تا حدود زیادی اثرات منفی حاصل از

تنش را تعدیل نمود. همچنین مشاهدات ما حاکی از آن بود که اثر تنش شوری و نانوذره کیتوزان در بافت ریشه و برگ ذرت متفاوت می‌باشد و عموماً این عوامل در برگ‌ها اثر خود را بیشتر نشان می‌دهند. با توجه به عملکرد مطلوب نانوذره کیتوزان و خطرات پایین زیست‌محیطی آن توصیه می‌گردد در برنامه‌های کشت ذرت و مدیریت شوری در اراضی شور کشور از این نانوذره استفاده گردد. از طرفی دیگر، پیشنهاد می‌شود آزمایش فوق در ارقام دیگر ذرت جهت حصول نتایج دقیق‌تر و دید جامع‌تر مورد مطالعه قرار گیرد.

References

- Al-Tawaha, A.R., Turk, M.A., Al-Tawaha, A.R.M., Alu'Datt, M.H., Wedyan, M., Al-Ramamneh, E.A.D.M. and Hoang, A.T. (2018). Using chitosan to improve growth of maize cultivars under salinity conditions. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 24(3): 437-442.
- Al-Tawaha, A.R.M. and Al-Ghzawi, A. L. A. (2013). Effect of chitosan coating on seed germination and salt tolerance of lentil (*Lens culinaris* L.). *Research on Crops*. 14(2): 489-491.
- Arya, S.P., Mahajan, M. and Jain, P. (2000). Non-spectrophotometric methods for the determination of Vitamin C. *Analytica Chimica Acta*. 417(1): 1-14.
- Arzhang, S., Darvishzadeh, R., Alipour, H., Maleki, H.H. and Dezhsetan, S. (2024). Genetic variability of maize (*Zea mays*) germplasm from Iran: genotyping with a maize 600K SNP array and genome-wide scanning for selection signatures. *Crop and Pasture Science*. 75(3).
- Attaran Dowom, S., Karimian, Z., Mostafaei Dehnavi, M. and Samiei, L. (2022). Chitosan nanoparticles improve physiological and biochemical responses of *Salvia abrotanoides* (Kar.) under drought stress. *BMC Plant Biology*. 22(1): 364.
- Attia, M.S., Osman, M.S., Mohamed, A.S., Mahgoub, H.A., Garada, M.O., Abdelmouty, E.S. and Abdel Latef, A.A.H. (2021). Impact of foliar application of chitosan dissolved in different organic acids on isozymes, protein patterns and physio-biochemical characteristics of tomato grown under salinity stress. *Plants*. 10(2): 388.
- Badshah, I., Mustafa, N., Khan, R., Mashwani, Z. U. R., Raja, N.I., Almutairi, M. H., Aleya, L., Sayed, A.A., Zaman, S., Sawati, L. and Sohail. (2023). Biogenic titanium dioxide nanoparticles ameliorate the effect of salinity stress in wheat crop. *Agronomy*. (13):352.
- Bandara, S., Du, H., Carson, L., Bradford, D. and Kommalapati, R. (2020). Agricultural and biomedical applications of chitosan-based nanomaterials. *Nanomaterials*. 10(10): 1903.
- Behboudi, F., Tahmasebi Sarvestani, Z., Kassaee, M.Z., Modares Sanavi, S.A.M., Sorooshzadeh, A. and Ahmadi, S.B. (2018). Evaluation of chitosan nanoparticles effects on yield and yield components of barley (*Hordeum vulgare* L.) under late season drought stress. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*. 3(1): 22-39.
- Behboudi, F., Tahmasebi Sarvestani, Z., Zaman Kassaee, M., Modares Sanavi, S.A.M. and Sorooshzadeh, A. (2019a). The effect of foliar and soil application of chitosan nanoparticles on chlorophyll, photosynthesis, yield and yield components of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress after pollination. *Plant Process and Function*. 8(30): 271-285. [In Persian].
- Behboudi, F., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Kassaee, M.Z., Modares-Sanavy, S.A.M., Sorooshzadeh, A. and Mokhtassi-Bidgoli, A. (2019b). Evaluation of chitosan nanoparticles effects with two

- application methods on wheat under drought stress. *Journal of Plant Nutrition*. 42(13): 1439-1451.
- Bittelli, M., Flury, M., Campbell, G.S. and Nichols, E.J. (2001). Reduction of transpiration through foliar application of chitosan. *Agricultural and Forest Meteorology*. 107(3): 167-175.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E. and Berset, C.L.W.T. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology*. 28(1): 25-30.
- Chen, M., Yang, Z., Liu, J., Zhu, T., Wei, X., Fan, H. and Wang, B. (2018). Adaptation mechanism of salt excluders under saline conditions and its applications. *International Journal of Molecular Sciences*. 19(11): 3668.
- Cho, M.H., No, H.K. and Prinyawiwatkul, W. (2008). Chitosan treatments affect growth and selected quality of sunflower sprouts. *Journal of Food Science*. 73(1): S70-S77.
- ChunYan, L., GuoRui, M. and WenYing, H. (2003). Induction effect of chitosan on suppression of tomato early blight and its physiological mechanism. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*. 29: 280-286.
- Dzung, N. A. (2007). Chitosan and their derivatives as prospective biosubstances for developing sustainable eco-agriculture. *Advances in Chitin Science X*. 453-459.
- Farooq, M., Hussain, M., Wakeel, A., & Siddique, K. H. (2015). Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 461-481.
- Guan, Y.J., Hu, J., Wang, X.J., and 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.
- Hassan, F.A.S., Ali, E., Gaber, A., Fetouh, M.I. and Mazrou, R. (2021). Chitosan nanoparticles effectively combat salinity stress by enhancing antioxidant activity and alkaloid biosynthesis in *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. *Plant Physiology and Biochemistry*. 162: 291-300.
- Hassanvand, A., Saadatmand, S., Lari Yazdi, H. and Iranbakhsh, A. (2023). Evaluation of photosynthetic pigments, fluorescence indexes, gas exchange, and some active flavonoid substances Pansy (*Viola tricolor* L.) under the effect of Bio-Silver Nanoparticles. *Journal of Plant Environmental Physiology*. 69(1): 80-98. [In Persian].
- Hidangmayum, A. and Dwivedi, P. (2022). Chitosan based nanoformulation for sustainable agriculture with special reference to abiotic stress: a review. *Journal of Polymers and the Environment*. 30(4): 1264-1283.
- Iftikhar, N., Perveen, S., Ali, B., Saleem, M.H. and Al-Sadoon, M.K. (2024). Physiological and Biochemical Responses of Maize (*Zea mays* L.) Cultivars under Salinity Stress. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 48(3): 332-343.
- Iqbal, S., Hussain, S., Qayyum, M.A., Ashraf, M. and Saifullah, S. (2020). The response of maize physiology under salinity stress and its coping strategies. *Plant Stress Physiology*. 1-25.
- Kalra, N., Jain, M.C., Joshi, H.C., Choudhary, R., Harit, R.C., Vatsa, B.K., Sharma, S.K. and Kumar, V. (1998). Flyash as a soil conditioner and fertilizer. *Bioresource Technology*. 64(3): 163-167.
- Li, C., Du, H., Wang, L., Shu, Q., Zheng, Y., Xu, Y., Zhang, J., Zhang, J., Yang, R. and Ge, Y. (2009). Flavonoid composition and antioxidant activity of tree peony (*Paeonia* section Moutan) yellow flowers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 57(18): 8496-8503.
- Ma, L., Li, Y., Yu, C., Wang, Y., Li, X., Li, N., Chen, Q. & Bu, N. (2012). Alleviation of exogenous oligochitosan on wheat seedlings growth under salt stress. *Protoplasma*. 249: 393-399.
- Malerba, M. and Cerana, R. (2016). Chitosan effects on plant systems. *International Journal of Molecular Sciences*. 17(7): 996.
- Ministry of Jihad Agriculture. (2023). Agricultural statistics. Vol. 1: Crops. Statistics and information technology office, deputy of planning and economy. Ministry of Jihad Agriculture. [In Persian].
- Munns, R. and Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*. 59(1): 651-681.

- Nadernejad, N., Ahmadimoghadam, A., Hossyinifard, J. and Poorseyedi, S. (2013). Study of the rootstock and cultivar effect in PAL activity, production of phenolic and flavonoid compounds on flower, leaf and fruit in Pistachio (*Pistacia vera* L.). Journal of Plant Biological Sciences. 5(15): 95-110.
- Oliveira, H.C., Gomes, B.C., Pelegrino, M.T. and Seabra, A.B. (2016). Nitric oxide-releasing chitosan nanoparticles alleviate the effects of salt stress in maize plants. Nitric Oxide. 61: 10-19.
- Quitadamo, F., De Simone, V., Beleggia, R. and Trono, D. (2021). Chitosan-induced activation of the antioxidant defense system counteracts the adverse effects of salinity in durum wheat. Plants. 10(7): 1365.
- Rahimian, M.H. and Gholami, H. (2022). An analysis of the salinity status of water resources in use in the agricultural sector. Journal of Water and Sustainable Development. 9(3): 107-116. [In Persian].
- Razavizadeh, R., Adabavazeh, F. and Komatsu, S. (2020). Chitosan effects on the elevation of essential oils and antioxidant activity of *Carum copticum* L. seedlings and callus cultures under in vitro salt stress. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology. 29: 473-483.
- Román-Doval, R., Torres-Arellanes, S.P., Tenorio-Barajas, A.Y., Gómez-Sánchez, A. and Valencia-Lazcano, A.A. (2023). Chitosan: Properties and its application in agriculture in context of molecular weight. Polymers. 15(13): 2867.
- Sabagh, A.E., Çiğ, F., Seydoşoğlu, S., Battaglia, M.L., Javed, T., Iqbal, M.A. and Awad, M. (2021). Salinity stress in maize: Effects of stress and recent developments of tolerance for improvement. Cereal Grains. 1: 213.
- Sen, S.K., Chouhan, D., Das, D., Ghosh, R. and Mandal, P. (2020). Improvisation of salinity stress response in mung bean through solid matrix priming with normal and nano-sized chitosan. International Journal of Biological Macromolecules. 145: 108-123.
- Singleton, V.L. and Rossi, J.A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture. 16(3): 144-158.
- Soni, A.T., James, E., Rookes, E. and Arya, S. (2023). Chitosan Nanoparticles as Seed Priming Agents to Alleviate Salinity Stress in Rice (*Oryza sativa* L.) Seedlings. Polysaccharides (4): 129-141.
- Thambiliyagodage, C., Jayanetti, M., Mendis, A., Ekanayake, G., Liyanaarachchi, H. and Vigneswaran, S. (2023). Recent advances in chitosan-based applications—a review. Materials. 16(5): 2073.
- Yousefi, K., Jamei, R. and Darvishzadeh, R. (2022). Study of some physiological and biochemical parameters of Okra plant (*Abelmoschus esculentus* L.) under salt stress in the presence of chitosan nanoparticles. Iranian Journal of Plant Biology. 14(1): 2322-2204. [In Persian].
- Zayed, M.M., Elkafafi, S.H., Zedan, A.M. and Dawoud, S.F. (2017). Effect of nano chitosan on growth, physiological and biochemical parameters of *Phaseolus vulgaris* under salt stress. Journal of Plant Production. 8(5): 577-585.
- Zhang, G., Wang, Y., Wu, K., Zhang, Q., Feng, Y., Miao, Y. and Yan, Z. (2021). Exogenous application of chitosan alleviate salinity stress in lettuce (*Lactuca sativa* L.). Horticulturae. 7(10): 342.