

Research Article

Vol. 38, No. 4, Winter 2024, p. 727-743

Effect of the Foliar Application of Copper Nanoparticles on the Growth and Yield of Persian Leek (*Allium ampeloprasum* subsp. *Persicum*) under Salinity Stress

F. Shakarami¹, S. Mousavi-Fard^{2*}, A. Rezaei Nejad³, F. Beiranvand⁴

1, 3 and 4- M.Sc. Student, Professor and Ph.D., Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran, respectively

(*- Corresponding Author Email: Mousavifard.S@sku.ac.ir)

2- Associate Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Received: 28-01-2024

Revised: 12-07-2024

Accepted: 17-07-2024

Available Online: 17-07-2024

How to cite this article:

Shakarami, F., Mousavi-Fard, S., Rezaei Nejad, A., & Beiranvand, F. (2024). Effect of the foliar application of copper nanoparticles on the growth and yield of Persian Leek (*Allium ampeloprasum* subsp. *Persicum*) under salinity stress. *Journal of Horticultural Science*, 38(4), 727-743. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jhs.2024.86565.1323>

Introduction

Salinity in water and soil stands as a crucial environmental factor that significantly hampers global agricultural production. Over recent decades, the escalating demand for irrigation in arid and semi-arid regions has intensified this issue, making it a major agricultural challenge. Salinity stress, characterized by reduced water absorption, heightened salt uptake (especially sodium, chlorine, and boron), and the generation of reactive oxygen species, induces oxidative stress in plants, severely impacting their growth and overall performance. To enhance plant tolerance to salinity stress, elicitors are employed as a short-term and viable solution to mitigate the adverse effects of stress. Copper, serving as a cofactor and essential element for numerous enzymes involved in photosynthesis and respiration processes, plays a crucial role in sustaining natural plant growth and metabolism. Copper ions function as cofactors in enzymes like superoxide dismutase (Cu/Zn SOD) and polyphenol oxidase, contributing to the removal of reactive oxygen species. However, the absence of this element in plants cultivated in alkaline and saline soils of arid and semi-arid regions can lead to nutritional disorders. In this context, copper nanoparticles emerge as a suitable alternative to chemical fertilizers due to their rapid and efficient effects. Their use not only mitigates the negative consequences of excessive fertilizer application but also decreases the frequency of applications. The Persian leek (*Allium ampeloprasum* subsp. *Persicum*) is a valuable edible-medicinal plant native to Iran, belonging to the Amaryllidaceae family. It holds significance in Iran as a key leafy vegetable, valued for its freshness and high processing potential among horticultural plants. Given the nutritional and medicinal importance of Persian leek and the prevalence of salinity stress, this study aims to explore the impact of copper nanoparticle spray in modifying the effects of salinity stress on the morphophysiological and biochemical characteristics of Persian leek.

Materials and Methods

A factorial experiment was conducted using a completely randomized design with three replications in the research greenhouses of Lorestan University's Faculty of Agriculture. The experimental conditions included daytime temperatures ranging from 20 to 28 °C, nighttime temperatures from 15 to 20 °C, relative humidity set at 60-70%, and a light intensity of 400-500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. The first factor involved foliar spraying of copper nanoparticles at control levels (zero), 150, and 300 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$, while the second factor comprised salinity stress at control levels (zero), 50, 100, and 150 mM sodium chloride. F1 seeds were obtained from Pakan Bazr Company and planted in 1.5-liter pots, with



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jhs.2024.86565.1323>

each pot containing three plants. The copper nanoparticles were applied through foliar spraying twice on the shoot parts at the four-leaf and six-leaf stages. Salinity stress was introduced one week after the foliar application, implemented through irrigation once every three days at a level corresponding to 90% of the field capacity. The soil mixture comprised an equal ratio of agricultural soil, cow manure, and sand, maintaining a clay-sand loam texture. Following three months of applying salt stress, a comprehensive assessment of morphophysiological characteristics was carried out. This included the measurement of plant height, stem and bulb diameter, leaf count, fresh and dry weights of stem, root leaf, root volume and length, shoot/root ratio, dry matter (%), stress tolerance index, relative water content (RWC), electrolyte leakage, malondialdehyde content, photosynthetic pigments, chlorophyll stability index, as well as the activity of peroxidase and ascorbate peroxidase.

Results and Discussion

The results indicated that salinity stress had a detrimental impact on various aspects of plant growth, including a decrease in plant height, stem and bulb diameter, leaf number, and the fresh and dry weights of the stem, bulb, and root. Additionally, there was a reduction in root volume and length, along with decreased levels of photosynthetic pigments. The percentage of electrolyte leakage, malondialdehyde content, and the activity of antioxidant enzymes, namely peroxidase and ascorbate peroxidase, also increased, highlighting the adverse effects of salinity stress on plant development. The decline in plant growth can be attributed to multiple factors, including diminished cell division, ionic imbalance, reduced water absorption, impaired uptake of essential elements, and the impact of toxic ions, particularly sodium and chlorine. Other contributing factors include impaired absorption, regeneration, and metabolism of nitrogen and protein, as well as stomatal closure, collectively resulting in reduced photosynthetic efficiency. Salinity stress further leads to a reduction in soil water potential and an increase in the osmotic pressure of the soil solution. Consequently, the plant requires more energy to absorb water from the soil, leading to increased respiration and alterations in the hormonal balance of plant tissues, ultimately causing a decrease in growth and negative effects on the plant. The application of copper nanoparticles at both concentrations demonstrated positive effects on various growth components, including plant height, stem and bulb diameter, leaf count, and the fresh and dry weights of the stem, bulb, and root, as well as increased root volume and length. Additionally, the use of copper nanoparticles resulted in a decrease in the percentage of electrolyte leakage and malondialdehyde content, coupled with an increase in the concentration of photosynthetic pigments and the activity of antioxidant enzymes, including peroxidase and ascorbate peroxidase. Notably, the concentration of $150 \text{ mg.liter}^{-1}$ exhibited a more pronounced effect in enhancing plant growth, with a diminishing impact observed at higher concentrations. Copper nanoparticles improve plant growth under stress conditions by influencing the content of cellular antioxidants and modulating the hormonal balance of plant tissues.

Conclusions

The findings of this study indicated that increased salinity stress led to higher electrolyte leakage and malondialdehyde content, along with a reduction in RWC and photosynthetic pigments. These changes caused a decline in the morpho-physiological characteristics of Persian leek. However, salinity stress also increased the activity of peroxidase and ascorbate peroxidase enzymes. Foliar application of copper nanoparticles under these conditions had beneficial effects on the plants. Specifically, at a concentration of $150 \text{ mg.liter}^{-1}$, the negative effects of salinity stress on the morpho-physiological indices of Persian leek were alleviated. This improvement was due to an increase in the activity of antioxidant enzymes, RWC, and the concentration of photosynthetic pigments.

Keywords: Electrolyte leakage, Malondialdehyde, Peroxidase enzyme, Relative water content

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص. ۷۴۳-۷۲۷

بررسی رشد و عملکرد تره ایرانی (*Allium ampeloperasum* subsp. *Persicum*) در پاسخ به محلول‌پاشی نانوذرات مس تحت تنش شوری

فرهاد شاکرمی^۱ - صادق موسوی فرد^{۲*} - عبدالحسین رضایی نژاد^۲ - فرهاد بیرانوند^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۷

چکیده

هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر محلول‌پاشی نانوذرات مس بر ویژگی‌های رشد و عملکرد گیاه تره ایرانی (*Allium ampeloperasum* subsp. *Persicum*) تحت شرایط تنش شوری بود. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اول شامل محلول‌پاشی نانوذرات مس در سه سطح صفر (شاهد)، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و فاکتور دوم شامل تنش شوری در چهار سطح صفر (شاهد)، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم بود که به صورت آبیاری سه روز یکبار (در سطح ۹۰ درصد ظرفیت زراعی) انجام شد. نتایج آزمایش نشان داد که افزایش تنش شوری موجب کاهش معنی‌داری در ارتفاع بوته، قطر ساقه و پیاز، تعداد برگ، حجم ریشه، وزن تر و خشک اندام هوایی، پیاز و ریشه، شاخص مقاومت به تنش، محتوای کلروفیل a، b و کل، کارتنوئید، شاخص ثابت کلروفیل و محتوای نسبی آب شد و از سوی دیگر، باعث افزایش قابل توجهی در طول ریشه، درصد ماده خشک، نشت الکترولیت، میزان مالون دی‌آلدئید و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از جمله پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز در گیاه تره ایرانی شد. نتایج نشان داد که محلول‌پاشی نانوذرات مس اثرات تنش شوری را با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و بهبود تعادل آبی تعدیل کرد. استفاده از هر دو غلظت نانوذرات مس باعث افزایش معنی‌داری در تمامی ویژگی‌های مورد مطالعه نسبت به شاهد شد. به‌طور کلی، نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که تنش شوری در همه سطوح دارای اثرات منفی بر رشد و عملکرد در تره ایرانی می‌باشد، در صورتی که کاربرد نانوذرات مس به‌ویژه در غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر با افزایش شاخص ثابت کلروفیل، بهبود روابط آبی گیاه و همچنین افزایش شاخص مقاومت گیاه به تنش منجر به افزایش قطر پیاز، وزن تر و خشک اندام هوایی و پیاز شد.

واژه‌های کلیدی: آنزیم پراکسیداز، مالون دی‌آلدئید، محتوی نسبی آب، نشت الکترولیت

مقدمه

شوری آب‌های آبیاری و خاک، یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی محدودکننده تولید محصولات کشاورزی در سراسر جهان است و در طول دهه‌های گذشته به دلیل افزایش نیاز آبیاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یکی از مشکلات عمده کشاورزی شده است (Abdelraheem et al., 2019; Gholamzadeh Alam et al., 2022). تحت شرایط تنش شوری، هدایت روزنه‌ای، تعرق و دسترسی به دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد و روند فتوسنتز تغییر می‌کند. در

نتیجه، تنش اکسیداتیو با افزایش تولید و حضور گونه‌های فعال اکسیژن و یا گونه‌های نیتروژن واکنش‌پذیر ایجاد می‌شود (Safari et al., 2022). شوری باعث کمبود یا عدم تعادل مواد غذایی معدنی در گیاه می‌شود. این تأثیر می‌تواند به دلیل رقابت یون‌های Na^+ و Cl^- با مواد مغذی مانند پتاسیم (K^+)، کلسیم (Ca^{2+}) فسفر (P)، منیزیم (Mg) و نترات (NO_3^-) باشد (Della Maggiora et al., 2023; Safari et al., 2022).

۱، ۳ و ۴- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استاد و دکتری، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Mousavifard.S@sku.ac.ir)

۲- دانشیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

است که یکی از راهکارهای بهبود تحمل به تنش شوری در گیاهان باغبانی، محلول‌پاشی مواد تعدیل‌دهنده تنش می‌باشد. در این خصوص، طیف وسیعی از ترکیبات شیمیایی و هورمون‌های گیاهی مورد استفاده قرار گرفته است (Safari et al., 2022; Roozbahani et al., 2020). با توجه به اینکه تره ایرانی به‌عنوان یک سبزی بومی و پرمصرف، اهمیت تغذیه‌ای و دارویی زیادی دارد، از طرفی تنش شوری در حال گسترش می‌باشد. لذا پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر محلول‌پاشی نانوذرات مس بر تعدیل اثر تنش شوری بر ویژگی‌های ریخت‌شناختی و بیوشیمیایی تره ایرانی انجام شده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه‌های پژوهشی دانشکده کشاورزی لرستان با دمای روزانه ۲۸-۲۰ درجه سانتی‌گراد و شبانه ۲۰-۱۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۷۰-۶۰ درصد و شدت نور ۵۰۰-۴۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه با دوره روشنایی ۱۶ ساعت و هشت ساعت تاریکی در بهار و تابستان ۱۴۰۱ اجرا شد. فاکتور اول شامل محلول‌پاشی نانوذرات مس (سطوح صفر؛ شاهد، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و فاکتور دوم شامل تنش شوری (سطوح صفر؛ شاهد، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم) بود. بذره‌های وارسته تره شادگانی از شرکت پاکان پذیر تهیه و در نیمه اول خرداد ماده در گلدان‌هایی با حجم ۱/۵ لیتری کشت شدند (هر گلدان حاوی سه گیاه). نانوذرات مس در مرحله چهاربرگی و شش‌برگی دوبار با فاصله حدود ۱۰ روز روی سطح رویی و زیرین برگ گیاهان محلول‌پاشی شد. یک هفته بعد از محلول‌پاشی، تنش شوری کلرید سدیم به‌صورت آبیاری سه روز یک‌بار در سطح ۹۰ درصد ظرفیت زراعی به‌میزان ۱۵۰ میلی‌لیتر اعمال شد. به‌منظور جلوگیری از اثر تجمع نمک، بعد از پنج مرتبه آبیاری گلدان‌ها با سطح شوری مورد نظر، آب‌شویی گلدان‌ها با ۵۰۰ میلی‌لیتر آب لوله انجام شد تا نمک اضافی از محیط ریشه خارج شود. نانوذرات مس با جرم مولکولی ۶۳/۵۴ از شرکت نانومواد ایرانیان تهیه شد. بستر کاشت شامل نسبت مساوی ۱:۱:۱ خاک زراعی، کود دامی پوسیده و ماسه (با بافت لومی رسی - سنی (۷۱/۷۱ درصد شن، ۴/۰۸ سیلت و ۲۴/۲ درصد رس) بود. تنش شوری به‌مدت سه ماه ادامه داشت و در نیمه اول مهرماه آزمایش پایان یافت، سپس شاخص‌های زیر اندازه‌گیری شد.

ویژگی‌های ریخت‌شناسی شامل ارتفاع گیاه (به‌وسیله خط‌کش بر حسب سانتی‌متر از ناحیه یقه محاسبه شد)، قطر ساقه و طوقه (با استفاده از دستگاه کولیس بر حسب میلی‌متر)، تعداد برگ، وزن تر و خشک لندام هوایی، طول ریشه (به‌وسیله خط‌کش بر حسب سانتی‌متر)، حجم ریشه (از طریق اختلاف حجم ایجاد شده پس از قرار

متابولیسم گیاه توسط عناصر درشت و ریزمغذی تنظیم می‌شود که ریزمغذی‌ها به‌طور عمده در حفاظت سلول، تنظیم بیان ژن‌ها، انتقال پیام و همچنین در بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه و فرآیندهای آنزیمی نقش عمده‌ای دارند. در میان ریز مغذی‌ها، مس (Cu) یک کوفاکتور و عنصر کلیدی برای بسیاری از آنزیم‌های درگیر در فرآیندهای فتوسنتز و تنفسی است و به‌عنوان کوفاکتور در بسیاری از آنزیم‌ها مانند سوپراکسید دیسموتاز (Cu/Zn SOD)، سیتوکروم C اکسیداز، آمینو اکسیداز، پلاستوسیانین و پلی فنل اکسیداز شرکت دارد (Thounaojam et al., 2012) و از طریق برخی آنزیم‌ها مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز باعث حذف گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود، در نتیجه کمبود این عنصر در گیاهان روئیده در خاک‌های قلیایی و شور مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند منجر به نوعی اختلال تغذیه‌ای شود (Thounaojam et al., 2012).

امروزه نانوفناوری، یک علم جدید و شاخه‌ای جذاب است که اجازه پیشرفت به تحقیقات در بسیاری از زمینه‌ها را می‌دهد. نانوتکنولوژی شامل دامنه‌ای از تکنولوژی‌های مربوط به دستکاری مواد در مقیاس طولی ۱۰۰-۱ نانومتر است (Pérez-Labrada et al., 2019). در این بین، نانوذرات مس می‌توانند به‌دلیل فعل و انفعال با ساختارهای داخل سلولی و سهولت نفوذ در دیواره سلولی به‌دلیل آندوسیتوز، شکل منافذ، پروتئین‌های انتقال‌دهنده یا پلاسموداسماها باعث افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی شوند (Pérez-Labrada et al., 2019). از طرف دیگر، کودهای شیمیایی، نقش اساسی در جبران کمبود عناصر کم‌مصرف در گیاه ایفا می‌کنند، اما به‌واسطه فتولیز (تجزیه آب)، هیدرولیز و فعالیت‌های میکروبی، بخش زیادی از آن از دسترس گیاه خارج می‌شود. در نتیجه، برای کنترل مؤثر و تأمین کمبود عناصر، تکرار کوددهی ضروری بوده که این خود منجر به اثرات ناخواسته‌ای همچون آلودگی آب و خاک و در نتیجه، شوری بیشتر خاک می‌گردد. از این رو به‌کارگیری نانوذرات به‌عنوان جایگزینی مناسب برای کودهای شیمیایی (برای به حداقل رسیدن اثرات منفی مصرف بیش از حد آن‌ها و کاهش تعداد دفعات کاربردشان) می‌تواند یکی از راه‌های مؤثر در رفع نیاز غذایی گیاهان به عناصر کم‌مصرف و افزایش جذب این عناصر باشد (Siddiqi et al., 2020).

تره ایرانی (*Allium ampeloprasum* subsp. *Persicum*) یکی از گونه‌های مهم خانواده Alliaceae است که به‌عنوان یک گیاه بومی ایرانی و یکی از سبزی‌های برگ‌مهم در ایران شناخته می‌شود. گیاهی دو ساله، چندچین دارای برگ‌های با عرض ۴-۱ سانتی‌متر و به‌طول ۳۰-۲۰ سانتی‌متر است. پس از هر بار برداشت، برگ‌های جدید عریض‌تر و طولی‌تر شده و در قاعده همدیگر را می‌پوشانند (Panahandeh, 2015). تولید سبزی‌ها به لحاظ اهمیت تازه‌خوری و فراوری زیاد آن‌ها در بین گیاهان باغبانی از اهمیت بسیاری برخوردار است (Panahandeh, 2015). مطالعات نشان داده

$$\text{Total Chl (mg.g}^{-1}\text{)} = 7.05 \times (A_{662}) + 18.09 \times (A_{645}) \quad (7)$$

$$\text{Car} = 1000 \times (A_{470} - 1.90 \times \text{Chl a} - 63.14 \times \text{Chl b}) / 214$$

شاخص ثبات کلروفیل نیز از معادله ۸ به دست آمد (Vinaya Rai & Parthiban, 1995).

(۸)

$$\text{Chlorophyll Stability Index (CSI)(\%)} = \frac{\text{Total chlorophyll contents (stressed)}}{\text{Total chlorophyll contents (control)}} \times 100$$

اندازه‌گیری میزان مالون دی‌آلدئید با استفاده از تیوباربیتریک اسید به‌عنوان معرف و براساس روش وانگ و همکاران (Wang et al., 2009) انجام شد. بدین منظور، یک دهم گرم از بافت تازه گیاه (برگ) با استفاده از نیتروژن مایع درون هاون چینی خرد شد، سپس پنج میلی‌لیتر از محلول نیم درصد تیوباربیتریک اسید (حل شده در تری کلرو استیک اسید) به آن اضافه و در فالكون ریخته شد. به‌منظور انجام واکنش، فالكون‌ها به‌مدت ۱۵ دقیقه درون حمام آب گرم با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند، پس از این مدت، بلافاصله با استفاده از یخ سرد شدند. مخلوط در ۴۰۰۰ دور در دقیقه به‌مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ گردید. جذب روشناور در سه طول موج ۴۵۰، ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفوتومتر (SHIMADZU, model UV-1700, Japan) قرائت شد و سپس میزان مالون دی‌آلدئید بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر محاسبه گردید.

(۹)

$$\text{MDA} = 6.45(\text{OD}_{532} - \text{OD}_{600}) - 0.56(\text{OD}_{450})$$

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پراکسیداز از روش ناکانوا و آسادا (MacAdam et al., 1992) استفاده شد. میزان فعالیت بر حسب میکرومول بر دقیقه بر گرم وزن تر محاسبه شد. در ابتدا، سه دهم گرم نمونه (برگ) با ۱۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات پتاسیم (۵۰ میلی‌مولار) هموژن شد. محلول حاصل به‌مدت ۲۰ دقیقه در ۱۴۰۰۰ دور در دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ گردید. سپس ۱۲۰۰ میکرولیتر بافر (۵۰ میلی‌مولار) و ۵۰ میکرولیتر آب اکسیژنه و ۵۰ میکرولیتر گایاکول با ۵۰ میکرولیتر از روشناور در طول موج ۴۷۵ نانومتر به‌مدت ۱۳۰ ثانیه با دستگاه اسپکتروفوتومتر (UV-600A) قرائت شد. میزان فعالیت آنزیم بر حسب میکرومول بر دقیقه بر گرم وزن تر محاسبه شد.

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز نیز طبق روش ناکانوا و آسادا (Nakano & Asada, 1981) اندازه‌گیری شد. یک دهم گرم نمونه (برگ) با ۱۰۰۰ میکرولیتر بافر فسفات سدیم (۵۰ میلی‌مولار) حاوی EDTA (دو میلی‌مولار) و PVP (یک درصد) هموژن شد. محلول حاصل به‌مدت ۲۰ دقیقه در ۱۴۰۰۰ دور در دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ گردید. ۱۵۰۰ میکرولیتر بافر استخراج بدون اسید آسکوربیک و ۳۰۰ میکرو لیتر بافر (۵۰ میلی‌مولار) محتوی اسید

گرفتن ریشه در حجم مشخصی از آب براساس قانون ارشمیدوس بر حسب سانتی‌متر مکعب، محاسبه شد)، وزن تر و خشک ریشه، نسبت اندام هوایی به اندام زیرزمینی، درصد ماده خشک (Starman & Lombardini, 2006) و شاخص مقاومت به تنش خشکی (معادله ۱) (Fischer & Maurer, 1978) نیز طبق معادله زیر اندازه‌گیری شد:

(۱)

$$\text{STI (Stress tolerance index)(\%)} = \frac{\text{Total dry weight (g)}}{\text{Control dry weight (g)}} \times 100$$

ویژگی‌های فیزیولوژیکی: محتوای نسبی آب برگ گیاه

به‌روش ریچی و نگوین (Ritchie & Nguyen, 1990) اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری وزن تر (FW)، نمونه‌های برگ به‌مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر غوطه‌ور شد. پس از آن، وزن تورژسانس (TW) آن اندازه‌گیری گردید. جهت اندازه‌گیری وزن خشک (DW) به‌مدت ۴۸ ساعت نمونه‌ها در داخل آون و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. در نهایت، محتوای نسبی آب برگ (RWC) بر حسب درصد از معادله ۲ محاسبه شد.

$$\text{RWC (\%)} = (\text{FW} - \text{DW} / \text{TW} - \text{DW}) \times 100 \quad (2)$$

برای تعیین نفوذپذیری غشاء سلولی، براساس روش لوتس و همکاران (Lutts et al., 1996)، از برگ‌های جوان کاملاً توسعه‌یافته، نمونه‌برداری شد. نمونه‌های برگ در ابعاد یک سانتی‌متری بریده و سپس با آب مقطر شسته شد. پس از آن به‌مدت دو ساعت در دمای اتاق و در داخل لوله‌های شیشه‌ای درب‌دار حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر قرار گرفت. هدایت الکتریکی اولیه (E1) با دستگاه EC متر قرلث شد. نمونه‌ها در اتوکلاو و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفته و پس از سرد شدن نمونه‌ها، هدایت الکتریکی ثانویه (E2) قرائت شد. در نهایت، درصد نشت الکترونیک برگ از معادله ۳ محاسبه شد

$$\text{EL (\%)} = (\text{E1} / \text{E2}) \times 100 \quad (3)$$

اندازه‌گیری میزان کلروفیل و کارتنوئید برگ‌ها، به‌روش لیختن هالر (Lichtenthaler, 1987) انجام شد. ابتدا ۰/۱ گرم از برگ توزین شد. برگ در هاون چینی با ازت مایع خرد و با ۱۰ میلی‌لیتر استون خالص مخلوط شد. عصاره به‌دست آمده در فالكون ۱۵ میلی‌لیتری ریخته و در ۴۰۰۰ دور در دقیقه به‌مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ گردید. سپس با استفاده از اسپکتروفوتومتر، جذب محلول در طول موج‌های ۶۴۵، ۶۶۲ و ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. استون به‌عنوان محلول شاهد برای تنظیم صفر جذب نوری اسپکتروفوتومتر استفاده شد. در نهایت، غلظت رنگیزه‌ها با استفاده از معادلات زیر محاسبه و براساس میلی‌گرم در گرم محاسبه شد.

$$\text{Chl a (mg.g}^{-1}\text{)} = (11.24 \times A_{662}) - (2.04 \times A_{645}) \quad (4)$$

$$\text{Chl b (mg.g}^{-1}\text{)} = (20.13 \times A_{645}) - (4.19 \times A_{662}) \quad (5)$$

(۶)

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تنش شوری در سطح احتمال یک درصد بر تعداد برگ تأثیر معنی‌داری داشت، ولی اثر نانوذرات مس و اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس بر این ویژگی معنی‌دار نبود (جدول ۱). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش تنش شوری از تعداد برگ کاسته شد، هر چند اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف تنش شوری (۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ میلی‌مولار) مشاهده نشد و بیشترین تعداد برگ نیز در شاهد (۶/۲۲ در بوته) به دست آمد (جدول ۴).

نتایج پژوهش اکبری و همکاران (Akbari et al., 2011) نشان داد که با افزایش غلظت شوری ناشی از کلرید سدیم، از ارتفاع گیاه و تعداد برگ گیاه تره ایرانی کاسته شد که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. جلوگیری از رشد گیاه تحت تنش شوری می‌تواند به دلیل کاهش تقسیم سلولی، عدم تعادل یونی، کاهش جذب آب (افزایش تنش اسمزی)، اختلال در جذب عناصر، تأثیر یون‌های سمی به‌ویژه سدیم و کلر، اختلال در جذب، احیا و متابولیسم نیتروژن و پروتئین، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش کارایی فتوسنتز باشد (Raza et al., 2022). کاهش پتانسیل آب مانع از تقسیم سلولی، رشد اندام‌ها، فتوسنتز و تولید پروتئین می‌شود و تعادل هورمونی بافت‌های اساسی گیاه را تغییر می‌دهد و با افزایش غلظت املاح، فشار اسمزی محلول خاک زیاد شده، در نتیجه مقدار انرژی که گیاه باید صرف جذب آب از خاک کند، افزایش می‌یابد که این خود باعث افزایش تنفس و کاهش ارتفاع و عملکرد گیاه می‌شود (Raza et al., 2022). از طرفی دیگر، کاهش سطح برگ نیز در شرایط تنش شوری در نتیجه کاهش اندازه و تعداد سلول‌ها اتفاق می‌افتد که منجر به کاهش سطوح تعرق‌کننده شده و بنابراین در حفظ تعادل آبی گیاه نقش به‌سزایی دارد (Osakabe et al., 2014). در سطوح شوری بالا، برگ‌ها کوچک‌تر و ضخیم‌تر می‌شوند که این تغییرات ناشی از محدود شدن گسترش سلولی به دلیل کاهش فشار آماس و تنش ثانویه اسمزی است (Jampeetonga & Brix, 2009; Croser et al., 2001). همچنین کاهش سطح برگ در اعمال شوری می‌تواند به دلیل کاهش مواد فتوسنتزی جهت رشد و توسعه سلول‌های برگ باشد (Betran et al., 2003).

آسکوربیک و سه میکرولیتر آب اکسیژنه با ۵۰ میکرولیتر از روشناور در طول موج ۲۹۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-600A) قرائت شد. میزان فعالیت آنزیم بر حسب میکرومول بر دقیقه بر گرم وزن تر محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری Minitab V20 انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تنش شوری و نانوذرات مس در سطح احتمال یک درصد بر ارتفاع بوته تأثیر معنی‌داری داشت، ولی اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس بر این ویژگی معنی‌دار نبود (جدول ۱). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تنش شوری اثر منفی بر رشد گیاه داشت، به طوری که بیشترین ارتفاع بوته در شاهد (۵۸/۷۳ سانتی‌متر) و کمترین مقدار آن در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار (۲۴/۷ درصد کاهش در مقایسه با شاهد) به دست آمد (جدول ۴). همچنین محلول پاشی نانوذرات مس موجب افزایش ارتفاع بوته گردید و بیشترین ارتفاع بوته در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر (۱۴/۳۲ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) مشاهده شد (جدول ۵).

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس در سطح احتمال یک درصد بر قطر ساقه تأثیر معنی‌داری داشت (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر متقابل نشان داد که با افزایش سطح تنش شوری، قطر ساقه کاهش یافت و در سطح ۱۵۰ میلی‌مولار، کاهش ۴۱/۹۱ درصدی در مقایسه با شاهد نشان داد. اما محلول پاشی نانوذرات در دو سطح شوری ۵۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار سبب افزایش قطر ساقه شد. در کل، بیشترین قطر ساقه در شاهد (بدون شوری و نانوذرات) (۷/۷۳ میلی‌متر) و کمترین آن نیز در تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم بدون نانوذرات مس (۴/۴۹ میلی‌متر) به دست آمد (جدول ۳). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس در سطح احتمال یک درصد بر قطر پیاز تأثیر معنی‌داری داشت (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر متقابل نشان داد که با افزایش سطح تنش شوری از قطر پیاز کاسته شد، به طوری که در سطح ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم، کاهش ۳۲/۴۷ در مقایسه با شاهد نشان داد. کاربرد نانوذرات مس در سطح بدون تنش باعث کاهش قطر پیاز شد، اما در سطوح تنش شوری به‌خصوص در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر سبب افزایش قطر پیاز شد. در کل، بیشترین (۱۲/۸۴ میلی‌متر) و کمترین (۸/۶۷ میلی‌متر) قطر پیاز به ترتیب در شاهد (صفر میلی‌مولار کلرید سدیم و عدم محلول پاشی نانوذرات مس) و تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم بدون نانوذرات مس ثبت شد (جدول ۳).

جدول ۱- تجزیه واریانس تأثیر نانوذرات مس بر صفات رشدی تره ایرانی تحت تنش شوری
Table 1- ANOVA for the effect of copper nanoparticles on growth characteristics of Persian leek under salinity stress

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean squares													
		ارتفاع گیاه Plant height	تعداد برگ Number of leaves	قطر ساقه Stem diameter	قطر پیاز Bulb diameter	وزن تره شوت هوانی Shoot fresh weight	وزن تره پیاز Bulb fresh weight	وزن خشک اندام هوانی Shoot dry weight	وزن خشک پیاز Bulb dry weight	طول ریشه Root length	حجم ریشه Root volume	وزن تره ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	نسبت اندام هوانی به زیرزمینی Shoot/root ratio	درصد وزن خشک percentage of dry matter
شوری Salinity	3	357.3**	7.1**	5.620**	10.22**	4332.7**	25.1**	0.529**	2.642**	4567.1**	3967.1**	31.92**	0.0473**	36.09**	4019.5**
نانوذرات مس NP-Cu	2	136.9**	0.33 ^{ns}	0.420**	1.629**	75.4**	0.65 ^{ns}	0.164**	1.941*	60.86**	69.90**	1.47**	0.00008 ^{ns}	0.56 ^{ns}	167.2**
شوری × نانوذرات مس Salinity × NP-Cu	6	2.88 ^{ns}	0.33 ^{ns}	1.41**	1.63**	33.6**	0.782*	0.082*	2.621**	4.75 ^{ns}	4.97 ^{ns}	0.76**	0.00111 ^{ns}	0.54 ^{ns}	79.55**
خطای آزمایشی Error	22	1.71	0.212	0.057	0.018	1.08	0.294	0.023	0.363	2.81	4.21	0.09	0.0012	0.43	3.95
ضریب تغییرات C.V (%)		2.58	10.71	3.99	1.28	2.57	4.76	6.21	2.93	3.45	4.31	5.57	8.35	5.55	3.00

ns, * and **: non- significant and significant at the 5% and 1% of probability level, respectively.
1: Stress Tolerance Index

جدول ۲- تجزیه واریانس تاثیر نانوذرات مس بر شاخص های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی تره ایرانی تحت تاثیر تنش شوری
 Table 2- ANOVA for the effect of copper nanoparticles on the physiological and biochemical indices of Persian leek under salinity stress

منبع تغییرات S. O. V.	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات Mean squares									
		محتوای نسبی آب Relative water content	نشست الکترولیت leakage	مالون دی آلدئید Malondi aldehyde	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کاروتنئید Carotenoid	کلروفیل کل Total chlorophyll	شاخص ثبات کلروفیل CSI	پراکس یداز Peroxi dase	آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase
شوری Salinity	3	76.65**	299.33**	0.0152**	3.817**	1.304**	0.640**	9.421**	2697.3*	9.421**	0.0055**
نانوذرات مس NP-Cu	2	7.68*	70.27**	0.0010**	4.659**	0.363**	0.583**	7.618**	2181.3*	7.618**	0.0154**
شوری × نانوذرات مس Salinity × NP-Cu	6	8.67**	7.83 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.035 ^{ns}	0.026 ^{ns}	0.016 ^{ns}	0.057 ^{ns}	16.4 ^{ns}	0.057 ^{ns}	0.0003*
خطای آزمایشی Error	22	2.02	2.13	0.0001	0.123	0.020	0.024	0.163	46.94	0.163	0.0001
ضریب تغییرات C.V (%)		1.59	5.33	12.45	9.35	10.37	11.72	7.92	7.92	7.47	5.17

CSI: Chlorophyll stability index

ns, * and **: non- significant and significant at the 5% and 1% of probability level, respectively.
 ns و **: بدترتیب عدم وجود اختلاف معنی دار و اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول ۳- تأثیر نانوذرات مس بر صفات رشدی گیاه تره ایرانی تحت تأثیر تنش شوری

Table 3- The effect of copper nanoparticles on the growth characteristics of Persian leek under salinity stress

شوری (mM) Salinity (mM)	نانوذرات مس NP-Cu (mg.l ⁻¹)	قطر ساقه Stem diameter (mm)	قطر پیاز Onion diameter (mm)	وزن تر اندام هوایی Shoot Fresh weight (g)	وزن خشک اندام هوایی Shoot Dry weight (g)	وزن تر پیاز Fresh weight of onion (g)	وزن خشک پیاز Dry weight of onion (g)	طول ریشه Root length (cm)	وزن خشک ریشه Root dry weight (g)	شاخص مقاومت به تنش STI (%)	محتوای نسبی آب Relative water content (%)	آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase (μmol.min ⁻¹ .g ⁻¹ FW)
0	0	7.73a	12.84a	74.66a	5.804a	13.80a	2.912a	20.07ef	8.466a	100a	90a	0.1514g
	150	6.28bc	10.82e	72.51b	5.384b	12.84b	2.707ab	21.43bcd	7.977a	94b	87bcd	0.2036e
	300	6.40b	11.81b	68.68c	5.476ab	12.57bc	2.539bc	20.53def	7.428b	90c	88bc	0.2193de
50	0	5.13ef	10.74e	39.02f	3.107d	11.59d	2.398cde	20.53def	4.973e	61f	85def	0.1770f
	150	5.87d	11.09cd	45.36d	3.753c	12.29bcd	2.598bc	19.60f	6.429c	74d	89ab	0.2082e
	300	5.95cd	11.26c	43.33e	3.443cd	11.81cd	2.447cd	20.40ef	5.907d	69e	87cd	0.2621b
100	0	6.38b	9.51h	24.44h	2.126g	9.55ef	2.082fg	22.47a	3.963f	48h	84efg	0.1843f
	150	5.29e	10.39f	32.62g	2.638e	10.26e	2.398cde	20.27ef	4.944e	58f	86cde	0.2139e
	300	5.06ef	10.95de	33.38g	2.421ef	10.03e	2.227def	21.70bc	4.705e	54g	83fg	0.2345cd
150	0	4.50g	8.67j	17.69j	1.980g	8.98f	1.957g	22.07ab	3.148g	41i	81h	0.2167e
	150	4.82fg	9.17i	25.24h	2.660e	10.11e	2.470bcd	20.97cde	3.989f	53g	83fg	0.2445c
	300	5.38e	10.13g	22.55i	2.131fg	9.45ef	2.163efg	19.80f	3.663f	46h	82gh	0.2924a

STI: Stress Tolerance Index

حروف مختلف در هر ستون براساس آزمون LSD، اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد را نشان می‌دهند.

In each column, different letters show significant difference at 5% of probability level based on LSD test.

جدول ۴- تأثیر تنش شوری بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه تره ایرانی

Table 4- The effect of salinity stress on the morphophysiological characteristics of Persian leek

شوری (mM) Salinity (mM)	ارتفاع گیاه Plant height (cm)	تعداد برگ Number of leaves	حجم ریشه Root volume (cm ³)	وزن تر ریشه Root fresh weight (g)	نسبت اندام هوایی به اندام زیرزمینی percentage of dry matter	نشت الکترولیت Electrolyte leakage (%)	مالون دی‌آلدئید Malondialdehyde (mg.g ⁻¹ FW)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg.g ⁻¹ FW)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.g ⁻¹ FW)	کاروتنوئید Carotenoid (mg.g ⁻¹ FW)	کلروفیل کل Total chlorophyll (mg.g ⁻¹ FW)	شاخص ثبات کلروفیل CSI (%)	پراکسیداز Peroxidase (μmol.min ⁻¹ .g ⁻¹ FW)	
0	58.7a*	6.22a	73.44a	68.06a	0.522a	10.60c	22c	0.0374d	4.704a	1.885a	1.715a	6.589a	111a	3.576c
50	51.5b	4.56b	56.2b	62.81b	0.417b	9.95d	22c	0.0671c	3.468b	1.302b	1.270b	4.770b	81b	4.226b
100	47.2c	4.67b	36.11c	35.78c	0.353c	12.1b	26b	0.0896b	3.454b	1.257b	1.214bc	4.711b	80b	4.213b
150	44.2d	4.22b	22.1d	24.520d	0.389b	14.46a	34a	0.1350a	3.306b	0.979c	1.110c	4.286c	73c	5.026a

CSI: Chlorophyll stability index

حروف مختلف در هر ستون براساس آزمون LSD، اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد را نشان می‌دهند.

In each column, different letters show significant difference at 5% of probability level based on LSD test.

جدول ۵- تأثیر نانوذرات مس بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه تره ایرانی

Table 5- The effect of copper nanoparticles on the morphophysiological characteristics of Persian leek

نانوذرات مس NP-Cu (mg.l ⁻¹)	ارتفاع گیاه Plant height (cm)	حجم ریشه Root volume (cm ³)	وزن تر ریشه Root fresh weight (g)	نشت الکترولیت Electrolyte leakage (%)	مالون دی‌آلدئید Malondialdehyde (mg.g ⁻¹ FW)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg.g ⁻¹ FW)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.g ⁻¹ FW)	کاروتنوئید Carotenoid (mg.g ⁻¹ FW)	کلروفیل کل Total chlorophyll (mg.g ⁻¹ FW)	شاخص ثبات کلروفیل CSI (%)	پراکسیداز Peroxidase ($\mu\text{mol.min}^{-1}\text{g}^{-1}\text{FW}$)
0	46.83a*	49.17a	50.269a	28a	0.0927a	3.207c	1.201c	1.107c	4.408c	75c	3.423c
150	50.81b	44.67b	45.448b	23c	0.0746b	4.421a	1.544a	1.549a	5.965a	101a	4.998a
300	53.54c	47.08c	47.662c	26b	0.0795b	3.571b	1.323b	1.326b	4.894b	83b	4.360b

CSI: Chlorophyll stability index

* حروف مختلف در هر ستون براساس آزمون LSD، اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد را نشان می‌دهند.

* In each column, different letters show significant difference at 5% of probability level based on LSD test.

را نشان داد، اما هر سه سطح شوری (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار) موجب افزایش وزن خشک اندام هوایی شد. در بین غلظت‌های استفاده شده نیز غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر نیز تأثیر بیشتری در افزایش شاخص‌های فوق داشت. به‌طور کلی، شاهد بیشترین وزن تر (۷۴/۶۶ گرم) و خشک (۵/۸ گرم) اندام هوایی را نشان داد. تیمار تنش شوری ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم بدون نانوذرات نیز کمترین وزن تر (۱۷/۶۹ گرم) و خشک (۱/۹۷ گرم) اندام هوایی را داشت (جدول ۳). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس بر وزن تر و خشک پیاز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که وزن تر و خشک پیاز گیاه تره ایرانی با اعمال تنش شوری کاهش نشان داد، به‌طوری‌که در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم به‌ترتیب کاهش ۳۵ و ۳۲/۹۸ درصدی در وزن تر و خشک پیاز گیاه تره ایرانی مشاهده شد. کاربرد نانوذرات مس نیز در سطح بدون تنش شوری منجر به کاهش وزن تر و خشک پیاز شد. باین‌حال، استفاده از نانوذرات به‌خصوص در غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر در سطوح مختلف شوری (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار) باعث افزایش شاخص‌های مورد نظر شد. در بین تیمارهای آزمایشی، شاهد بیشترین وزن تر (۱۳/۸ گرم) و خشک (۲/۹۱۲ گرم) پیاز را نشان داد. سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم بدون نانوذرات نیز کمترین مقدار وزن تر (۸/۹۷۷ گرم) و خشک (۱/۹۵۷ گرم) ریشه را ثبت کرد (جدول ۳).

نتایج پژوهش وجودی مهرابی و همکاران (Vojodi Mehrabani *et al.*, 2018) روی تره ایرانی نیز نشان داد که تنش شوری موجب کاهش زیست‌توده گیاه تره ایرانی شد که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. کاهش وزن تر اندام در هنگام تنش شوری به‌علت

نتایج پژوهش روی گیاه گوجه فرنگی (Pérez-Labrada *et al.*, 2019; Hernandez-Hernandez *et al.*, 2018) کاربرد نانوذرات مس باعث افزایش ارتفاع بوته، قطر ساقه و تعداد برگ در گیاهان تحت تنش شوری شد که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. پیام‌رسانی هورمون‌های گیاهی نقش مهمی در تعدیل گیاه و پاسخ به سازگاری تنش خشکی و شوری دارد. اکسین در تنظیم شوری گیاهان و واکنش تطبیقی تنش خشکی بسیار مهم است و به‌عنوان یک پیام‌رسان شیمیایی، بیان ژن را از طریق خانواده‌ای از فاکتورهای رونویسی (فاکتورهای پاسخ اکسین (ARFs) متصل‌شونده به DNA) متمایز از نظر عملکردی، تحت تأثیر قرار می‌دهد. از طرفی، فاکتورهای پاسخ اکسین (ARFs) نقش مهمی در ایجاد پاسخ‌های اکسین دارند و چندین فرآیند بیولوژیکی مانند قطبیت اندام، گسترش برگ، پیری، رشد ریشه، رشد گل و رشد میوه را تنظیم می‌کند. بنابراین عنصر مس با تنظیم و تعدیل اکسین بر رشدونمو گیاه تأثیر می‌گذارد (Raza *et al.*, 2022). همچنین مس با تأثیر بر متابولیسم نیتروژن و در نتیجه با تولید اسید آمینه تریپتوفان و تولید اکسین باعث افزایش ارتفاع گیاه می‌شود (Hernandez-Hernandez *et al.*, 2018).

اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس در سطح احتمال یک درصد بر وزن تر و خشک اندام هوایی تأثیر معنی‌داری داشت (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر متقابل نشان داد که وزن تر و خشک اندام هوایی با افزایش سطح تنش شوری کاهش یافت و در غلظت ۱۵۰ میلی‌مولار کلرید سدیم به‌ترتیب در وزن تر و خشک اندام هوایی کاهش ۷۶/۳۰ و ۶۶ درصد مشاهده شد. کاربرد نانوذرات مس در سطح بدون شوری کلرید سدیم کاهش وزن تر و خشک اندام هوایی

افزایش وزن خشک ریشه نشان داد، هر چند در سطوح شوری ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی مولار اختلاف معنی داری با غلظت ۳۰۰ میلی گرم در لیتر نشان نداد. در مجموع، بیشترین وزن خشک ریشه در شاهد (۸/۴۶ گرم) و کمترین مقدار آن در سطح شوری ۱۵۰ میلی مولار کلرید سدیم و عدم محلول پاشی نانوذرات مس (۳/۱۴ گرم) به دست آمد (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تنش شوری باعث کاهش نسبت اندام هوایی به اندام زیرزمینی شد و در سطح ۱۵۰ میلی مولار، کاهش ۲۴/۴ درصدی در شاخص مذکور در مقایسه با شاهد شد (جدول ۳).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس در سطح احتمال یک درصد بر طول ریشه گیاه تره ایرانی تأثیر معنی داری داشت. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش سطح تنش شوری، طول ریشه افزایش یافت و در سطح شوری ۱۰۰ میلی مولار باعث افزایش ۱۱/۹۶ درصدی در مقایسه با شاهد شد. محلول پاشی نانوذرات مس در سطح بدون تنش باعث افزایش طول ریشه شد، اما در سطوح تنش شوری کلرید سدیم (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی مولار) باعث کاهش طول ریشه در گیاه تره‌فرنگی شد. در مجموع، تیمار شوری ۱۰۰ میلی مولار کلرید سدیم بدون نانوذرات، بیشترین طول ریشه (۲۲/۴۶ سانتی متر) را نشان داد. همچنین غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات در سطوح تنش شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی مولار نیز کمترین (به ترتیب ۱۹/۶ و ۱۹/۸ سانتی متر) مقدار شاخص مذکور را ثبت کردند (جدول ۳). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده تنش شوری و نانوذرات مس در سطح احتمال یک درصد بر حجم ریشه تأثیر معنی داری داشت، ولی اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس بر این ویژگی معنی دار نبود (جدول ۱). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش سطح شوری کلرید سدیم به شدت از حجم ریشه کاسته شد، به طوری که در سطح ۱۵۰ میلی مولار شوری، کاهش ۶۹/۸۹ درصدی در مقایسه با شاهد نشان داد (جدول ۴). با این وجود، کاربرد نانوذرات مس موجب افزایش حجم ریشه نسبت به شاهد شد و در غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر عملکرد بهتری (۱۰ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) نشان داد (جدول ۵).

افزایش رشد ریشه گیاهان مختلف از جمله تره ایرانی (*Allium ampeloprasum* var. *porrum* Gay) (Vojodi Mehrabani et al., 2018) با کاربرد نانوذرات مس گزارش شده است. ریشه، وظیفه جذب آب و مواد غذایی را برعهده دارد و تنش شوری از ناحیه ریشه به گیاه وارد می‌شود، بنابراین ریشه اولین اندامی است که با تنش شوری مواجه می‌شود و با توجه به تنظیم اسمزی و شیوه‌های اجتنابی که در جهت کاهش اثر شوری انجام می‌دهد. ریشه مقدار زیادی انرژی از اندام‌های هوایی دریافت می‌کند که صرف مقابله با تنش شوری می‌نماید، این عمل باعث کاهش کارایی ریشه در تأمین عناصر غذایی

افزایش غلظت نمک‌های محلول محیط رشد ریشه می‌باشد که سبب منفی تر شدن پتانسیل اسمزی محیط و در نتیجه، کاهش جذب آب شده که در نهایت، منجر به کاهش سطح سطح برگ، سرعت فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای می‌شود (Raza et al., 2022). از دیگر دلایل کاهش رشدونمو گیاه تحت تنش شوری، افزایش مصرف انرژی در گیاه به منظور خروج یون‌های سدیم است (Arvin, 2015). نتایج نشان داد که کاربرد نانوذرات مس، اثر منفی تنش شوری را بهبود بخشید و سبب افزایش وزن تر و خشک بوته و پیاز (*Allium cepa*) شد. نومان و همکاران (Noman et al., 2021) روی گیاه ذرت و وجودی مهرابی و همکاران (Vojodi Mehrabani et al., 2018) روی گیاه تره ایرانی گزارش کردند که کاربرد نانوذرات مس باعث افزایش زیست‌توده گیاهان (وزن تر شاخساره) تحت شرایط تنش شوری شده است که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. عوامل متعددی مانند کاهش فتوسنتز، تخریب غشاء سلولی، کاهش آب در دسترس گیاهان و تجمع Na^+ در برگ‌ها از عوامل اصلی کاهش وزن در شرایط شوری است، که این افزایش رشد ناشی از کاربرد نانوذرات مس می‌تواند به دلیل تنظیم مثبت تنش اکسیداتیو و تنش یونی ناشی از شوری باشد (Choudhary et al., 2017). بنابراین، نانوذرات مس با افزایش سطح آنتی‌اکسیدان‌های سلولی (آنزیمی و غیر آنزیمی) باعث غربال گونه‌های فعال اکسیژن شده و در نتیجه، تنش اکسیداتیو را کاهش می‌دهند (Noman et al., 2021).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده تنش شوری و نانوذرات مس در سطح احتمال یک درصد بر وزن تر ریشه و نسبت اندام هوایی به اندام زیرزمینی تأثیر معنی داری داشت، ولی اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس معنی دار نبود (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر ساده نشان داد که وزن تر ریشه با افزایش سطح تنش شوری کاهش پیدا کرد و در سطح شوری ۱۵۰ میلی مولار باعث کاهش ۶۳/۹۷ درصدی در وزن تر ریشه در مقایسه با شاهد شد (جدول ۲). محلول پاشی نانوذرات مس موجب افزایش وزن تر ریشه نسبت به شاهد شد و در غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر، عملکرد بهتری (۱۰/۶ درصد افزایش در مقایسه شاهد) به همراه داشت (جدول ۵). همچنین نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس در سطح احتمال یک درصد بر وزن خشک ریشه گیاه تره ایرانی معنی دار شد (جدول ۱). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که وزن خشک ریشه گیاه تره ایرانی با افزایش سطح تنش شوری کاهش پیدا کرد، به طوری که در سطح ۱۵۰ میلی مولار شوری کلرید سدیم، کاهش ۶۲/۸۸ درصدی نسبت به شاهد نشان داد. کاربرد نانوذرات مس در سطوح تنش شوری (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی مولار) موجب افزایش وزن خشک ریشه شد، اما در سطح شاهد (بدون تنش شوری) کاهش شاخص مذکور را نشان داد. غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات مس نیز در سطوح مختلف، تأثیر به نسبت بهتری روی

سطح غیر تنش، کاربرد نانوذرات مس نیز باعث کاهش شاخص مقاومت به تنش در گیاهان تحت تیمار شد، اما در سطوح تنش شوری مختلف استفاده از نانوذرات مس باعث افزایش در شاخص مورد نظر شد، به طوری که در غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر در سطح تنش ۱۵۰ میلی مولار کلرید سدیم باعث افزایش ۱۲ درصدی در شاخص مقاومت به تنش نسبت به تیمار شوری ۱۵۰ میلی مولار کلرید سدیم به نانوذر شد (جدول ۳).

تنش شوری از طریق اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی (تبادلات گازی و رفتار روزنه‌ای) و بیوشیمیایی گیاه و همچنین دفاع آنتی‌اکسیدانی در نتیجه تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن، مقاومت گیاهان را کاهش می‌دهد (Guzman & Marques, 2023; Acosta-Motos *et al.*, 2017). با این حال، تأثیر نانوذرات اکسید مس در افزایش مقاومت به تنش در گیاهان را می‌توان مرتبط با نقش این عنصر در بسیاری از آنزیم‌ها مانند سوپراکسید دیسموتاز (Cu/Zn SOD)، سیتوکروم C اکسیداز، آمینو اکسیداز، پلاستوسیانین و پلی فنل اکسیداز و همچنین غربال گونه‌های فعال اکسیژن با افزایش فعالیت برخی آنزیم‌ها از جمله سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز دانست (Tabatabaee *et al.*, 2021; Thounaojam *et al.*, 2012).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس بر محتوای نسبی آب برگ تأثیر معنی‌داری داشت. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش سطح تنش شوری، از محتوای نسبی آب کاسته شد و در سطح ۱۵۰ میلی مولار، کاهش ۱۰/۷۳ درصدی نسبت به شاهد نشان داد. کاربرد نانوذرات مس در سطح بدون تنش شوری، کاهش محتوای نسبی آب را نشان داد، اما در سطوح تنش شوری (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی مولار) باعث افزایش محتوای نسبی آب برگ شد و در غلظت‌های استفاده شده، غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر تأثیر بهتری در افزایش شاخص مربوطه به همراه داشت. بیشترین محتوای نسبی آب برگ در شاهد (۹۰/۹۱ درصد) و کمترین مقدار آن نیز در سطح شوری ۱۵۰ میلی مولار کلرید سدیم بدون نانوذرات (۸۱/۱۵ درصد) به دست آمد (جدول ۳). بررسی نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که تنش شوری و نانوذرات مس در سطح احتمال یک درصد بر نشت الکترولیت و غلظت مالون دی‌آلدئید تأثیر معنی‌داری داشت، اما اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس بر معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش سطح شوری کلرید سدیم، میزان نشت الکترولیت و غلظت مالون دی‌آلدئید نیز افزایش یافت، به طوری که در سطح شوری ۱۵۰ میلی مولار بیشترین میزان نشت الکترولیت و غلظت مالون دی‌آلدئید (به ترتیب ۵۴/۷۳ و ۲۶۴ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) به دست آمد (جدول ۴). با این حال، محلول پاشی نانوذرات مس سبب کاهش نشت الکترولیت و غلظت مالون دی‌آلدئید شد، هر چند با افزایش غلظت تأثیر کاهش‌دهنده نشان داد، به طوری که در غلظت ۱۵۰

و آب برای سایر اندام‌ها می‌شود. مجموع این عوامل، کاهش رشد ریشه را به دنبال خواهد داشت (Raza *et al.*, 2022). کاهش طول ریشه و اندام هوایی نیز در شرایط تنش اسمزی، می‌تواند به علت کاهش جذب آب، ترشح هورمون‌ها و فعالیت آنزیم‌ها و همچنین اختلال در فتوسنتز و رشد ریشه و اندام هوایی باشد. در شرایط تنش، مقدار پروتئین‌های دیواره سلولی که در طول شدن و رشد سلول نقش دارند، کاهش یافته و در نتیجه، موجب کاهش طول ریشه‌چه و اندام هوایی می‌گردد (Zhang *et al.*, 2014). همچنین در دراز مدت، به دلیل سمیت یونی ناشی از تجمع بیش از حد نمک‌ها در سیتوپلاسم، واکوئل‌ها قادر به حذف نمک اضافی نخواهند. سمیت سدیمی نیز باعث جذب بیشتر یون شده و pH ریزوسفر را به دلیل کربنات‌ها و بی‌کربنات‌هایی که مانع جذب مواد مغذی می‌شوند، افزایش می‌دهد. تحت چنین شرایط شوری، رشد ریشه به شدت کاهش می‌یابد و رشد اندام هوایی متوقف می‌شود (Raza *et al.*, 2022).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تنش شوری و نانوذرات مس در سطح احتمال یک درصد بر درصد ماده خشک تأثیر معنی‌داری داشت، ولی اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس بر آن‌ها معنی‌دار نبود (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که درصد ماده خشک گیاهی با اعمال تنش شوری افزایش یافت و در سطح ۱۵۰ میلی مولار کلرید سدیم منجر به افزایش ۳۶/۴ درصد در شاخص مذکور شد (جدول ۴).

افزایش تولید ماده خشک تابع وجود آب قابل وصول در محیط ریشه و در نتیجه، انتقال عناصر غذایی لازم از ریشه به برگ‌ها و در نهایت، بهبود فتوسنتز در شرایط بهینه است. یکی از اثرات تنش شوری، محدودیت میزان توسعه برگ و کاهش میزان رشد برگ‌ها به دلیل کم شدن میزان تقسیم سلولی و یا کاهش طول شدن سلول‌هاست که می‌تواند تجمع ماده خشک و عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار دهد (Gorgini Shabankareh *et al.*, 2021; Kapoor *et al.*, 2020). مطالعات افزایش (Fattahi *et al.*, 2021) و کاهش (Nabati *et al.*, 2012) درصد ماده خشک گیاهی در گونه‌های مختلف گیاهی را در تنش شوری گزارش کردند. افزایش درصد ماده خشک در گیاهان تحت تنش شوری می‌تواند به دلیل انباشت یون‌های سمی در برگ باشد که منجر به انتقال آب به طرف برگ‌ها جهت حفظ تعادل اسمزی و عدم آسیب به سلول می‌شود (Abdel-Salam *et al.*, 2018).

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد (جدول ۲) که اثرات تنش شوری و نانوذرات مس و همچنین اثر متقابل آن‌ها روی شاخص مقاومت به تنش معنی‌دار شده است. بررسی میانگین داده‌ها نشان داد که اعمال تنش شوری باعث کاهش قابل توجهی در شاخص مقاومت به تنش در گیاهان تره ایرانی شد و در سطح ۱۵۰ میلی مولار کلرید سدیم، کاهش ۵۹ درصدی در مقایسه با شاهد نشان داد. از طرفی دیگر، در

تنش شوری کلرید سدیم از مقدار کلروفیل a، کلروفیل b، کارتنوئید و کلروفیل کل کاسته شد، به طوری که تنش ۱۵۰ میلی مولار کلرید سدیم به ترتیب باعث کاهش ۲۹/۷۸، ۴۷/۸۷، ۳۵/۴۶ و ۳۴/۹۰ درصدی در مقدار کلروفیل a، کلروفیل b، کارتنوئید و کلروفیل کل شد (جدول ۴). کاربرد نانوذرات مس موجب افزایش غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی شد و در غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر به ترتیب سبب ۳۸/۱۲، ۲۸/۳۳، ۴۰/۹۰ و ۳۵/۶۸ درصد افزایش در مقدار کلروفیل a، کلروفیل b، کارتنوئید و کلروفیل کل شد (جدول ۵). همچنین نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که شاخص ثبات کلروفیل با افزایش سطح تنش شوری کاهش یافت و سطح شوری ۱۵۰ میلی مولار باعث کاهش ۵۰ درصدی در شاخص مذکور شد (جدول ۴). با این حال، کاربرد نانوذرات مس، افزایش شاخص ثبات کلروفیل را به دنبال داشت و در غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر باعث افزایش ۳۴/۶ درصد در شاخص مربوطه شد (جدول ۵).

کلروفیل برگ یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیولوژیکی می‌باشد که نشان دهنده شرایط مطلوب گیاه بوده که به آب قابل دسترس گیاه و سطح تغذیه بستگی دارد (Farouk & Al-Amri, 2019). تحقیقات روی گیاهان تره ایرانی، کاهش محتوای کلروفیل a، b و کلروفیل کل را تحت شرایط تنش شوری گزارش کردند (Vojodi Mehrabani et al., 2011; Akbari et al., 2011; et al., 2018)، که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. کاهش مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش، می‌تواند به دلیل تخریب ساختمان کلروپلاست و دستگاه فتوسنتزی، اکسیداسیون نوری کلروفیل‌ها، واکنش آن‌ها با اکسیژن یکتایی، تخریب پیش‌ماده‌های سنتز کلروفیل و ممانعت از بیوسنتز کلروفیل‌های جدید و فعال شدن آنزیم‌های تجزیه‌کننده کلروفیل از جمله کلروفیل‌ها و اختلالات هورمونی باشد (Farouk & Al-Amir, 2019). تنش شوری با افزایش فعالیت آنزیم‌های پروتئولیتیکی مانند کلروفیل‌ها، جایگزینی یون منیزیم موجود در ساختار کلروفیل با یون سدیم و کلر، کاهش آمینولولنیک اسید سنتتاز و روبیسکو، رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Radi et al., 2013). نتایج پژوهش هرنلندز-هرنلندز و همکاران (Hernandez-Hernandez et al., 2018) روی گوجه فرنگی نشان داد که استفاده از نانوذرات مس باعث افزایش غلظت کلروفیل در گیاهان تحت تنش شوری شد که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. با این وجود، پرز-لابرادا و همکاران (Pérez-Labrada et al., 2019) روی گیاه گوجه فرنگی نشان داد که کاربرد نانوذرات مس باعث کاهش کلروفیل a، b، کلروفیل کل تحت تنش شوری شد. مطالعات نشان داده است که عنصر مس به دلیل نقش مؤثری که در تولید تعداد زیادی از آنزیم‌ها دارد، عملکردهای متابولیکی متفاوتی در گیاه می‌تواند داشته باشد، هر چند غلظت بالای این عنصر اثر منفی بر رشد گیاه دارد (Siddiqi et al., 2020).

میلی گرم در لیتر، کمترین درصد نشست الکترولیت و مقدار مالون دی‌آلدئید (به ترتیب ۱۶/۸ و ۲۹/۵ درصد کمتر از شاهد) را نشان داد (جدول ۵).

محتوای نسبی آب از چند طریق بر فیزیولوژی سلول از جمله تغییر در موقعیت‌های اندامک بین سلولی، کانال‌های انتقال مواد و بیوشیمی آنزیم‌ها مثل انقباض دیواره سلولی تأثیر می‌گذارد. واضح است که این تغییرات بر متابولیسم سلولی از جمله فتوسنتز تأثیر می‌گذارد (Lawlor & Cornic, 2002). غلظت بالای سدیم در سلول‌های گیاهی با ایجاد اختلال در تعادل اسمزی و خشکی فیزیولوژیکی، مانع از جذب آب در گیاه می‌گردد و منفی‌تر شدن پتانسیل آب برگ را در پی دارد (Zhang et al., 2014)، در نتیجه به واسطه اختلال در فرآیند انتقال الکترون در کلروپلاست و میتوکندری، مقادیر بالای از گونه‌های فعال اکسیژن تولید می‌شود که باعث پراکسیداسیون اسیدهای چرب غیر اشباع غشاء لیپیدی و به دنبال آن تخریب تمامیت غشاء سلولی می‌شود (Zhang et al., 2014). در نتیجه این فرآیندها، غلظت مالون دی‌آلدئید و نشست یونی افزایش یافته و محتوای نسبی آب کاهش می‌یابد. نتایج پژوهش اکبری و همکاران (Akbari et al., 2011) روی تره ایرانی نشان داد که تنش شوری موجب افزایش محتوای نسبی آب تره ایرانی شد که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی داشت. وجودی مهربانی و همکاران (Vojodi Mehrabani et al., 2017) در بررسی تأثیر تنش شوری (صفر، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ میلی مولار کلرید سدیم) روی گیاه تره ایرانی (*Allium ampeloprasum* L.) گزارش کردند با افزایش سطح تنش شوری تجمع یون سدیم، نشست الکترولیت و غلظت مالون دی‌آلدئید در گیاهان افزایش یافت و در غلظت ۱۶۰ میلی گرم در لیتر بیشترین مقادیر شاخص‌های مذکور را نشان داد. مطالعات روی ذرت (Noman et al., 2021) و رزماری (Hejazi et al., 2012) نشان داد که کاربرد نانوذرات مس باعث کاهش نشست الکترولیت و غلظت مالون دی‌آلدئید و افزایش محتوای نسبی آب برگ در گیاهان تحت تنش شوری شد که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. تحقیقات نشان داده است که عنصر مس به دلیل شرکت در ساختار برخی آنزیم‌ها از جمله پلی فنل اکسیداز، سوپر اکسید دیسموتاز Zn/Cu و آسکوربات اکسیداز باعث افزایش فعالیت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی آنزیمی شده و باعث حذف رادیکال‌های آزاد می‌شود، در نتیجه بهبود محتوای نسبی آب برگ و کاهش نشست الکترولیت و غلظت مالون دی‌آلدئید را به همراه دارد (Raza et al., 2022; Siddiqi et al., 2020).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که تنش شوری و نانوذرات مس در سطح احتمال یک درصد بر کلروفیل a، کلروفیل b، کارتنوئید، کلروفیل کل و شاخص ثبات کلروفیل تأثیر معنی‌داری داشت، ولی اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس بر این ویژگی معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش سطح

(Pérez-Labrada *et al.*, 2021) و گوجه‌فرنگی (Noman *et al.*, 2021) تحت شرایط تنش شوری گزارش شده است که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. کاربرد نانوذرات مس موجب تولید سریع‌تر و کارآمدتر گونه‌های اکسیژن فعال و فعالیت آنتی‌اکسیدانی می‌شود، زیرا توسط فضاهای متخلخل جذب شده و از دیواره سلولی عبور می‌کنند. پس از ورود به داخل سلول، نانوذرات (با بار منفی) به قسمت بیرونی غشاء سلولی (بارهای مثبت غشاء) طی برهم‌کنش الکترواستاتیکی متصل می‌شوند. در نهایت، نانوذرات توسط پتانسیل غشای پلاسمایی در سیتوسل، پلاستیدها، واکوئل یا هسته پخش می‌شود (Da Costa & Sharma, 2016). بنابراین، ورود نانوذرات باعث تنش اکسیداتیو می‌شود که در نتیجه، سازوکارهای آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیر آنزیمی فعال می‌شوند و تحمل گیاه را به تنش شوری افزایش می‌دهند (Da Costa & Sharma, 2016). از طرفی دیگر، پراکسید هیدروژن، گونه‌ای فعال اکسیژن تولید شده در پاسخ به شرایط تنش است که از کاتالیز رادیکال آزاد سوپراکسید به وسیله فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز تولید شده و در نهایت، توسط برخی آنزیم‌ها از جمله کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز به آب و اکسیژن تجزیه می‌شود (Noman *et al.*, 2021). در کل، پاسخ گیاهان به شوری شامل تعدیل هموستاز یونی، القای سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی و بیوسنتز فیتوهورمون‌های متعدد و محافظت‌کننده‌های اسمزی در برابر تنش اسمزی با کاهش سمیت یونی و افزایش مهار گونه‌های اکسیژن فعال همراه است. از آنجایی که اکثر گیاهان به شوری حساس هستند، بهبود تحمل به نمک از طریق تعدیل‌کننده‌های تنش در حفظ بهره‌وری کشاورزی جهانی بسیار مهم است (Raza *et al.*, 2022).

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که افزایش تنش شوری با افزایش نشت الکترولیت و کاهش محتوای نسبی آب برگ باعث کاهش رشد گیاه تره‌فرنگی شد. هر چند درصد ماده خشک و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مثل پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز را اندکی افزایش داد. اگرچه اثرات نانوذرات مس در گیاهان شاهد (سطح بدون تنش) مثبت نبود، اما تحت شرایط تنش و به‌خصوص در غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر با افزایش فعالیت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و بهبود روابط آبی گیاه، مقاومت گیاهان به تنش شوری را افزایش و تأثیر منفی تنش روی شاخص‌های مورفو-فیزیولوژی (قطر پیاز، وزن تر و خشک لندام هوایی و پیاز) گیاه تره ایرانی را کاهش داد. بنابراین، کاربرد نانوذرات مس زمانی که گیاه در معرض انواع تنش‌های مختلف قرار می‌گیرد، شایسته توجه بیشتری است.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تنش شوری و نانوذرات مس در سطح احتمال یک درصد بر فعالیت آنزیم پراکسیداز تأثیر معنی‌داری داشت، ولی اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس بر این ویژگی معنی‌دار نبود (جدول ۱). بررسی مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که فعالیت آنزیم پراکسیداز تحت تأثیر تنش شوری کلرید سدیم افزایش شد و در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار بیشترین (۴۰/۵۰ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) میزان فعالیت آنزیم مربوطه را نشان داد (جدول ۴). محلول پاشی نانوذرات مس نیز موجب افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز نسبت به شاهد شد و در غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر بالاترین (۱۶/۶ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) فعالیت آنزیم ثبت شد (جدول ۵).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تنش شوری و نانوذرات مس بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز تأثیر معنی‌داری داشتند (جدول ۱). بررسی مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش سطح تنش شوری فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز به‌طور قابل توجهی افزایش یافت و در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار، افزایش ۳۴ درصدی در مقایسه با شاهد نشان داد. کاربرد نانوذرات مس در سطوح مختلف شوری (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار) باعث افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز شد، به‌طوری‌که در سطح تنش شوری ۱۵۰ میلی‌مولار در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر باعث افزایش ۹۳/۳۷ درصد در فعالیت آنزیم مذکور در مقایسه با شاهد (بدون شوری و نانوذرات) شد (جدول ۳).

به‌طور کلی در شرایط تنش شوری، رونویسی از برخی ژن‌های مربوط به آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند گلوکاتینون ردوکتاز یا آسکوربات پراکسیداز برای بهبود وضعیت گیاه در چنین شرایطی، افزایش پیدا می‌کند که نقش مهمی در کاهش گونه‌های اکسیژن فعال و آسیب‌های ناشی از آن را ایفا می‌کند (Raza *et al.*, 2022). با توجه به سمیت پراکسید هیدروژن برای سلول‌های گیاهی از جمله کلروپلاست و حضور کاتالاز در پراکسی‌زوم‌ها، فعالیت آنزیم پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز می‌تواند نقش مهمی در غربال پراکسید هیدروژن داشته باشد. در مطالعه حاضر، فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز تحت تنش شوری افزایش یافت. تنش شوری باعث تجمع گونه‌های اکسیژن فعال از جمله پراکسید هیدروژن (H_2O_2) در سلول‌های گیاهی می‌شود. متابولیسم H_2O_2 وابسته به عملکرد آنزیم‌های مختلف آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز در سلول‌های گیاهی است (Siddiqi *et al.*, 2020). محلول پاشی نانوذرات مس باعث افزایش سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی آنزیمی شامل فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز شد. در تحقیقات گذشته نیز افزایش فعالیت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی آنزیمی از جمله پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز در گیاهان ذرت

References

- 1- Abdelraheem, A., Esmaceli, N., O'Connell, M., & Zhang, J. (2019). Progress and perspective on drought and salt stress tolerance in cotton. *Industrial Crops and Products*, 130, 118-129. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.070>
- 2- Abdel-Salam, E., Alatar, A., & El-Sheikh, M. A. (2018). Inoculation with arbuscular mycorrhiza fungi alleviates harmful effects of drought stress on damask rose. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25, 1772-1780. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.10.015>
- 3- Acosta-Motos, J.R., Maria Fernanda, O., Agustin, B., Pedro, D.V., Maria, J.B., & Jose Antonio, H. (2017). Plant responses to salt stress: Adaptive mechanisms. *Agronomy*, 7(1), 18. <https://doi.org/10.3390/agronomy7010018>
- 4- Akbari, S., Dashti, F., & Gholami, M. (2011). *Effect of salinity stress on performance and some biochemical and physiological characteristics of Iranian leek*. 7th Congress of Iranian Horticultural Science, Isfahan, Iran. (In Persian with English abstract). <https://civilica.com/doc/174155>
- 5- Arvin, P. (2015). Effect of gibberellin on some morphological traits, photosynthetic pigments content and proline in savory (*Satureja hortensis* L.) under salinity stress conditions. *Journal of Agricultural Research*, 7(2), 90-104.
- 6- Betran, F.J., Beck, D., Banziger, M., & Edmeades, G.O. (2003). Secondary traits in parental inbreeds and hybrids under stress and nonstress environments in tropical maize. *Field Crops Research*, 83, 51-65. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00061-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00061-3)
- 7- Choudhary, R.C., Kumaraswamy, R.V., Kumari, S., Sharma, S.S., Pal, A., Raliya, R., & Saharan, V. (2017). Chitosan nanoparticle boost defense responses and plant growth in maize (*Zea mays* L.). *Scientific Reports*, 7(1), 9754. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08571-0>
- 8- Croser, C., Renault, S., Franklin, J., & Zwiasek, J. (2001). The effect of salinity on the emergence and seedling growth of *Picea morian*, *Picea glauca* and *Pinus banksiana*. *Environmental Pollution*, 115, 6-16. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00097-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00097-5)
- 9- Da Costa, M.V.J., & Sharma, P.K. (2016). Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. *Photosynthetica*, 54, 110-119. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0167-5>
- 10- Della Maggiora, L., Francini, A., & Giovannelli, A. (2023). Assessment of the salinity tolerance, response mechanisms and nutritional imbalance to heterogeneous salt supply in *Populus alba* L. clone 'Marte' using a split-root system. *Plant Growth Regul*, 101, 251-265. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-01017-w>
- 11- Farouk, S., & Al-Amri, S.M. (2019). Ameliorative roles of melatonin and/or zeolite on chromium-induced leaf senescence in marjoram plants by activating antioxidant defense, osmolyte accumulation, and ultrastructural modification. *Industrial Crops and Products*, 142, 111823. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111823>
- 12- Fattahi, M., Mohammadkhani, A., Shiran, B., Baninasab, B., & Ravash, R. (2021). Investigation of phosphorus use efficiency and drought and salinity stress resistance index in pistachio rootstocks coexisted with mycorrhiza arbuscular. *Plant Productions*, 44(4), 587-600. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/ppd.2020.33219.1894>
- 13- Fischer, R.A., & Maurer, R. (1998). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29, 897-912. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>
- 14- Gholamzadeh Alam, A., Mousavi-Fard, S., & Rezaei Nejad, A. (2022). Morphological and physiological characteristics for evaluation of salicylic acid effects on *Celosia argentea* L. under salinity stress. *Iranian Journal of Plant Physiology*, 12(1), 4027-4037. <https://doi.org/10.30495/ijpp.2022.689078>
- 15- Gorgini Shabankareh, H., Khorasaninejad, S., & Soltanloo, H. (2021). Physiological response and secondary metabolites of three lavender genotypes under water deficit. *Scientific Reports*, 11(1), 19164. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98750-x>
- 16- Guzman, M.R., & Marques, I. (2023). Effects of salinity on edible marigold flowers (*Tagetes patula* L.). *Biology Life Science Forum*, 27, 38. <https://doi.org/10.3390/IECAG2023-15986>
- 17- Hejazi, M. M., Shariatmadari, H., Khoshgoftarmanesh, A. H., & Dehghani, F. (2012). Copper effects on growth, lipid peroxidation, and total phenolic content of rosemary leaves under salinity stress. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14, 205-212.
- 18- Hernandez-Hernandez, H., Juárez-Maldonado, A., Benavides-Mendoza, A., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Sánchez-Aspeytia, D., & González-Morales, S. (2018). Chitosan-PVA and copper nanoparticles improve growth and overexpress the SOD and JA genes in tomato plants under salt stress. *Agronomy*, 8(9), 175. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090175>
- 19- Jameetonga, A., & Brix, H. (2009). Effects of NaCl salinity on growth, morphology, photosynthesis and proline accumulation of *Salvinia natans*. *Aquatic Botany*, 3, 181-186. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2009.05.003>
- 20- Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., Sharma, A., Ramakrishnan, M., & Sharma, A. (2020). The impact of drought in plant metabolism: how to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Applied Sciences*, 10, 5692. <https://doi.org/10.3390/app10165692>

- 21- Lawlor, D.W., & Cornic, G. (2002). Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant Cell Environment*, 25, 275–294. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00814.x>
- 22- Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophyll and carotenoids—pigments of photosynthetic biomembrances za Colowick SP, *Kaplan NO Methods in Enzymology*, Vol. 148.
- 23- Lutts, S., Kinet, J.M., & Bouharmont, J. (1996). NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany*, 78(3), 389-398. <https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0134>
- 24- MacAdam, J.W., Nelson, C.J., & Sharp, R.E. (1992). Peroxidase activity in the leaf elongation zone of tall fescue: I. Spatial distribution of ionically bound peroxidase activity in genotypes differing in length of the elongation zone. *Plant Physiology*, 99(3), 872-878. <https://doi.org/10.1104/pp.99.3.872>
- 25- Nabati, J., Kafi, M., Nezami, A., Rezvani Moghaddam, P., Masoumi, A., & Zare Mehrjerdi, M. (2012). Evaluation of quantitative and qualitative characteristic of forage kochia in different growth under salinity stress. *Journal of Crop Production*, 5(2), 111-128. (In Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.2008739.1391.5.2.7.8>
- 26- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22(5), 867-880. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>
- 27- Noman, M., Ahmed, T., Shahid, M., Niazi, M.B.K., Qasim, M., Kouadri, F., & Ali, S. (2021). Biogenic copper nanoparticles produced by using the *Klebsiella pneumoniae* strain NST2 curtailed salt stress effects in maize by modulating the cellular oxidative repair mechanisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217, 112264. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112264>
- 28- Osakabe, Y., Yamaguchi-Shinozaki, K., Shinozaki, K., & Tran, L.S.P. (2014). ABA control of plant macroelement membrane transport systems in response to water deficit and high salinity. *New Phytologist*, 202(1), 35-49. <https://doi.org/10.1111/nph.12613>
- 29- Panahandeh, J. (2015). Meiosis in persian leek *Allium ampeloprasum* ssp. persicum. In *VII International Symposium on Edible Alliaceae*, 1143, 23-26. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1143.4>
- 30- Pérez-Labrada, F., López-Vargas, E.R., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. (2019). Responses of tomato plants under saline stress to foliar application of copper nanoparticles. *Plants*, 8(6), 151. <https://doi.org/10.3390/plants8060151>
- 31- Radi, A.F. (2013). Physiological and biochemical responses of salt-tolerant and salt-sensitive wheat and bean cultivars to salinity. *Journal of Biology and Earth Sciences*, 3, 72-88.
- 32- Raza, A., Tabassum, J., Fakhar, A. Z., Sharif, R., Chen, H., Zhang, C., & Varshney, R.K. (2023). Smart reprogramming of plants against salinity stress using modern biotechnological tools. *Critical Reviews in Biotechnology*, 43(7), 1035-1062. <https://doi.org/10.1080/07388551.2022.2093695>
- 33- Ritchie, S.W., Nguyen, H.T., & Holaday, A.S. (1990). Leaf water content and gas-exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science*, 30(1), 105-111. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x>
- 34- Roozbahani, F., Mousavi-Fard, S., & Nejad, A.R. (2020). Effect of proline on some physiological and biochemical characteristics of two cultivars of *Impatiens walleriana* under salt stress. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 51(3), 537-550. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijhs.2019.279774.1632>
- 35- Safari, M., Mousavi-Fard, S., Rezaei Nejad, A., Sorkheh, K., & Sofo, A. (2022). Exogenous salicylic acid positively affects morpho-physiological and molecular responses of *Impatiens walleriana* plants grown under drought stress. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(2), 969–984. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03092-2>
- 36- Siddiqi, K.S., & Husen, A. (2020). Current status of plant metabolite-based fabrication of copper/copper oxide nanoparticles and their applications: A review. *Biomaterials Research*, 24(1), 1-15. <https://doi.org/10.1186/s40824-020-00188-1>
- 37- Starman, T., & Lombardini, L. (2006). Growth, gas exchange and chlorophyll fluorescence of four ornamental herbaceous perennials during water deficit conditions. *Journal American Horticultural Science*, 131(4), 475.
- 38- Tabatabaee S., Iranbakhsh, A., Shamili, M., & Oraghi Ardebili Z. (2021). Copper nanoparticles mediated physiological changes and transcriptional variations in microRNA159 (miR159) and mevalonate kinase (MVK) in pepper; potential benefits and phytotoxicity assessment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106151. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106151>
- 39- Thounaojam, T.C., Panda, P., Mazumdar, P., Kumar, D., Sharma, G.D., Sahoo, L., & Sanjib, P. (2012). Excess copper induced oxidative stress and response of antioxidants in rice. *Plant Physiology and Biochemistry*, 53, 33-39. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.01.006>
- 40- Vinaya Rai, R.S., & Parthiban, K.T. (1995). Studies on the drought tolerance of *Eucalyptus* at seedling stage. *Journal Tropical For Science*, 8(2), 155–160. <https://www.jstor.org/stable/43582472>
- 41- Vojodi Mehrabani, L., Valizadeh Kamran, R., Khurizadeh, S., & Seiied Nezami, S. (2018). Response of coriander to salinity stress. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, 8(2), 89-98. <https://doi.org/10.22034/JPPB.2018.9804>

- 42- Wang, F., Zeng, B., Sun, Z., & Zhu, C. (2009). Relationship between proline and Hg²⁺- induced oxidative stress in a tolerant rice mutant. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 56, 723-731. <https://doi.org/10.1007/s00244-008-9226-2>
- 43- Zhang, H.Z. (2014). Melatonin promotes seed germination under high salinity by regulating antioxidant systems, ABA and GA4 interaction in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Journal of Pineal Research*, 57, 269-279. <https://doi.org/10.1111/jpi.12167>