



## Effects of Foliar Application of Zinc Oxide Nanoparticles on the Morphophysiological and Biochemical Responses of *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. Under Water Deficit Stress

Haniyeh Haqhnazari <sup>1</sup>, Abdolhossein Rezaei Nejad <sup>\*2</sup>, Farhad Beiranvand <sup>3</sup>, Nahid Zomorrodi <sup>3</sup>

1- MSc. Graduated in Ornamental Plants, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran.

2- Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran.

3- Ph.D. in Horticultural Sciences – Physiology of Ornamental Plants, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran.

\*Corresponding Author: [rezaeinejad.h@lu.ac.ir](mailto:rezaeinejad.h@lu.ac.ir)

### Keywords:

Antioxidant activity,  
Ornamental plants, Proline,  
Relative water content, Water  
stress.

### Extended Abstract

#### Introduction

In recent decades, the economic importance of ornamental plants has increased considerably, creating substantial potential for their cultivation in both domestic and international markets. However, seasonal bedding plants are often more vulnerable than other plant species to water-related stresses. Consequently, the global challenge of water scarcity and limited water resources has encouraged researchers to explore strategies to mitigate these problems and improve water-use efficiency in agriculture. *Catharanthus roseus* (L.) G. Don., commonly known as periwinkle, is a valuable ornamental plant frequently used in landscaping as a border and ground-cover species. It is a perennial evergreen shrub in tropical and subtropical regions, whereas in colder climates it is cultivated as an annual. Beyond its ornamental value, periwinkle is also medicinally important due to its production of alkaloids with therapeutic applications. Previous studies have reported that foliar application of ZnO-NPs enhances vegetative and reproductive growth, promotes nutrient uptake, and mitigates the adverse impacts of drought stress. Zinc (Zn) plays a critical role in protecting proteins and membrane lipids against reactive oxygen species (ROS) and other by-products of intracellular redox reactions, thereby maintaining membrane integrity. In addition, Zn is an essential component of the superoxide dismutase (SOD) enzyme. Therefore, the present study

### Received:

02 Oct 2025

### Revised:

03 Dec 2025

### Accepted:

12 Dec 2025

### How to cite this article:

Haqhnazari, H; Rezaei Nejad, A; Beiranvand, F; & Zomorrodi, N. (2025). Effects of Foliar Application of Zinc Oxide Nanoparticles on the Morphophysiological and Biochemical Responses of *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. Under Water Deficit Stress. *Journal of Drought and Climate change Research* (JDCR), 4(13), 203-226. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.10186.1176>



was undertaken to evaluate the effects of foliar application of ZnO-NPs on the morphological and physio-biochemical traits of *C. roseus* under water-deficit stress.

### Materials and Methods

This research was conducted in 2024 in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran. Greenhouse conditions were maintained at an average daytime temperature of 20–28 °C, a nighttime temperature of 15–18 °C, relative humidity of 60–70%, and a light intensity of 400–500  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . The experiment was arranged as a factorial design based on a completely randomized design (CRD) with four replications. The first factor was water deficit at three levels (80%, 50%, and 20% of available water content (AWC)), and the second factor was foliar application of ZnO-NPs at four concentrations (0, 50, 100, and 200  $\mu\text{M}$ ). Hybrid F1 seeds of periwinkle were sown in pots containing a soil mixture composed of field soil, well-rotted manure, and sand. Water-deficit treatments were imposed and maintained until flowering. At the flowering stage, morphological traits (plant height, stem diameter, leaf area, number of nodes, number of leaves, number of lateral branches, root length and volume, and fresh and dry weights of shoots, leaves, flowers, and roots), gas-exchange parameters (photosynthetic rate, transpiration rate, intercellular  $\text{CO}_2$  concentration, stomatal and mesophyll conductance, and photosynthetic water-use efficiency), as well as physiological and biochemical indices (RWC, EL, MDA content, photosynthetic pigments, proline content, and activities of antioxidant enzymes, including CAT, POD, and APX) were measured.

### Results and Discussion

The results indicated that water-deficit stress had a significant impact on both morpho-physiological and biochemical traits. Water deficit reduced plant height, leaf area, RWC, photosynthetic pigment concentration, fresh and dry biomass, and gas-exchange parameters, while increasing EL, MDA content, proline accumulation, and the activities of antioxidant enzymes such as CAT, POD, and APX. Foliar application of ZnO-NPs significantly enhanced antioxidant enzyme activities, RWC, photosynthetic pigment concentration, and gas exchange, thereby improving plant tolerance to drought stress. Moreover, the fresh and dry weights of leaves, stems, roots, and flowers were significantly increased by ZnO-NP treatments. Among the tested concentrations, 50 and 100  $\mu\text{M}$  ZnO-NPs were the most effective in alleviating the adverse effects of water-deficit stress and enhancing plant growth performance.

Drought stress during the early growth stages was particularly critical, as it inhibited cell division and elongation, ultimately leading to biomass reduction. This inhibition was mainly attributed to decreased water uptake by roots, reduced synthesis of plant hormones, and disruption of

photosynthetic processes. Application of Zn enhanced indole-3-acetic acid (IAA) production and regulated enzymatic activities, contributing to improved cell division and growth. Furthermore, Zn, as a cofactor of RNA polymerase, plays a vital role in protein biosynthesis and is required for normal protein metabolism, thereby stabilizing the structural integrity of RNA, DNA, and ribosomes.

### **Conclusion**

Water-deficit stress negatively affected the vegetative and reproductive traits of *C. roseus* by reducing water uptake and impairing gas-exchange processes. However, foliar application of ZnO-NPs mitigated these adverse effects by enhancing both enzymatic and non-enzymatic antioxidant defense systems, regulating stomatal behavior, and preventing the degradation of photosynthetic pigments. As a result, plant growth parameters were significantly improved under drought-stress conditions. Overall, the application of 50–100  $\mu\text{M}$  ZnO-NPs proved to be the most effective strategy for alleviating the detrimental effects of water-deficit stress and improving growth and physiological performance in periwinkle.



## تأثیر محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی بر تغییرات مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گل پروانش (*Catharanthus roseus* (L.) G. Don.) تحت تأثیر تنش کم‌آبیاری

هانیه حق نظری<sup>۱</sup>، عبدالحسین رضایی نژاد<sup>۲</sup>، فرهاد بیرانوند<sup>۳</sup>، ناهید زمردی<sup>۴</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گیاهان زینتی، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

۲- استاد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.

۳- دکتری علوم باغبانی - گیاهان زینتی، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.

\*نویسنده مسئول: rezaeinejad.h@lu.ac.ir

### چکیده

### واژه‌های کلیدی:

هدف از مطالعه حاضر ارزیابی تأثیر محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه زینتی - دارویی پروانش [*Catharanthus roseus* (L.) G. Don]، تحت تنش کم‌آبیاری بود. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. فاکتور اول، شامل تنش کم‌آبیاری در سه سطح ۸۰، ۵۰ و ۲۰ درصد آب قابل دسترس در خاک و فاکتور دوم، شامل محلول‌پاشی نانوذرات دی‌اکسید روی در غلظت‌های صفر (شاهد)، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار بود که به صورت پیش‌تیمار در مرحله چهارم برگ‌ریزی روی برگ گیاهان اعمال شد. آزمایش تا زمان گلدهی کامل گیاهان به مدت ۲ ماه ادامه داشت، سپس شاخص‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی (ارتفاع بوته، طول و قطر ساقه، تعداد برگ، حجم و طول ریشه، وزن تر و خشک ساقه، برگ و ریشه، تبادلات گازی، محتوای نسبی آب برگ و نشت الکترولیت) و بیوشیمیایی (محتوای مالون دی‌آلدهید، پرولین، غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد، تنش کم‌آبیاری، باعث کاهش معنی‌داری در ارتفاع گیاه، سطح برگ، محتوای نسبی آب برگ، غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی، وزن تر و خشک گیاه و تبادلات گازی و افزایش در نشت الکترولیت، غلظت مالون دی‌آلدهید، پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شد. کاربرد نانوذرات اکسید روی، باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، محتوای نسبی آب برگ، غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی و همچنین تبادلات گازی شد و در نتیجه مقاومت به تنش خشکی را افزایش داد. در بین غلظت‌های استفاده‌شده، غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار نانوذرات تأثیر بهتری در کاهش تأثیر منفی تنش کم‌آبیاری و بهبود رشد گیاهان تحت تنش داشتند.

پرولین، تنش، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، گیاهان زینتی، محتوای نسبی آب برگ

### تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۷/۱۰

### تاریخ ویرایش:

۱۴۰۴/۰۹/۱۲

### تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۹/۲۱

## مقدمه

پروانش [*Catharanthus roseus (L.) G. Don*]، به عنوان یک گیاه مهم در فضای سبز به شکل حاشیه‌ای و پوششی شناخته می‌شود. گیاهی زینتی - دارویی از خانواده خرزهره (Apocynaceae) است که به صورت بوته‌ای چند ساله و همیشه سبز در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری وجود دارد، اما در مناطق سرد به صورت یک‌ساله در فضای سبز کشت می‌شود. دوره گلدهی گیاه از اواخر خرداد تا پاییز امکان پذیر است (Zomorodi et al., 2022). در دهه‌های اخیر، ارزش گیاهان زینتی از نظر اقتصادی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و پتانسیل بالایی برای پرورش آن‌ها در بازارهای داخلی و بین‌المللی در آینده به وجود آمده است. با این وجود، گیاهان باغچه‌ای فصلی، اغلب بیش‌تر از دیگر گیاهان در معرض تنش‌های رطوبتی قرار می‌گیرند. از طرفی، رشد سریع جمعیت و تغییرات آب و هوایی، کمبود آب، باعث مشکلات عمده‌ای در فضای سبز و رشد گیاهان زینتی به‌شمار می‌رود (Zomorodi et al., 2022). بنابراین چالش کمبود آب و محدودیت منابع آب در سطح جهان، موجب شده که پژوهش‌گران، به دنبال راهکارهایی برای حل این مشکل و افزایش راندمان مصرف آب در کشاورزی باشند (Yang et al., 2021). تنش آب با کاهش سطح برگ، بستن روزنه‌ها، کاهش قابلیت هدایت روزنه‌ای، آب‌گیری کلروپلاست و سایر قسمت‌های پروتوپلاسم و کاهش تولید پروتئین، موجب اختلال در فرآیندهای فتوسنتز، تنفس و تعرق شده و به‌طور مستقیم یا غیر مستقیم سایر فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه را تحت تأثیر قرار خواهد داد (Ma et al., 2013). گیاهان توانایی شناسایی و پاسخ به تنش‌های محیطی را دارند و در واکنش به تنش‌های زیستی و غیر زیستی، رادیکال‌های فعال تولید می‌کنند، اما غلظت بالای رادیکال‌های آزاد به گیاهان صدمه وارد می‌کند. در این زمینه، فعالیت آنزیم‌هایی مانند سوپر اکسید دیسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و گلوکاتیون پراکسیداز به غربال رادیکال‌های آزاد اکسیژن در سلول‌ها کمک می‌کنند و از آسیب‌های اکسیداتیو به اجزای سلول و متابولیسم‌های طبیعی

جلوگیری می‌کند (Kapoor et al., 2020). در سال‌های اخیر، فناوری نانو، به‌عنوان شاخه‌ای جدید و جذاب، اجازه پیشرفت به تحقیقات در زمینه‌های مختلف را فراهم و برنامه‌های جدیدی نیز در زمینه کشاورزی و بیوتکنولوژی مطرح کرده است (Alabdallah et al., 2021). از ویژگی‌های مهم نانوذرات، سطح تماس، واکنش‌پذیری، جذب و کارایی کاتالیزوری بالا و اندازه کوچک است و اندام‌های خاصی را در سلول‌های گیاهی جهت آزاد کردن محتوای خودشان مورد هدف قرار می‌دهند (Alabdallah et al., 2021; Ali et al., 2017). فلز روی، عنصری ضروری برای رشد و نمو گیاهان بوده و در اکثر فرآیندهای متابولیکی گیاه نقش دارد. این فلز، فعال کننده و کوفاکتور برخی آنزیم‌های حیاتی گیاه از جمله کربونیک آنهیدرازها، فسفولیپازها، دهیدروژنازها، آلکالین فسفاتازها و RNA پلیمرازها می‌باشند (Ma et al., 2012; Tsonev et al., 2013) و همچنین در سنتز اکسین، متابولیسم کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک، چربی‌ها و رنگدانه‌های فتوسنتزی نیز دخیل می‌باشد (Ma et al., 2013). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که نانوذرات اکسید روی (ZnO-NPs) از طریق تقویت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (مانند سوپر اکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز)، افزایش اسمولیت‌ها و حفظ کلروفیل، بیان ژن‌های مرتبط و بهبود وضعیت تغذیه‌ای با افزایش درصد نسبی آب برگ و ظرفیت حفظ آب و همچنین کاهش آسیب اکسیداتیو (مانند مالون دی‌آلدئید)، نقش مهمی در بهبود تحمل گیاهانی مانند *Dracocephalum kotschy* (Karimian and Samieil., 2023)، ذرت (Raza et al., 2025) و گندم (Pandya et al., 2023) به تنش خشکی دارند (Chandrashekar et al., 2023; Pandya et al., 2023). شواهد مزرعه‌ای و کنترل‌شده نیز نشان داده‌اند که تیمارهای نانوپرایمینگ یا محلول پاشی ZnO-NPs می‌توانند کارایی مصرف آب و پارامترهای رشدی را در گیاهان مختلف، به‌ویژه گندم، افزایش دهند (Raza et al., 2025). در واقع، عنصر روی با محافظت پروتئین‌ها و لیپیدهای غشایی در برابر رادیکال‌های آزاد و سایر محصولات حاصل از واکنش‌های احیایی درون سلولی،

اکسید روی با اندازه ۱۰ تا ۳۰ نانومتر و جرم مولکولی ۸۱/۳۸ گرم بر مول از شرکت نانومواد ایرانیان تهیه شد. بذور F1 گیاهان در گلدان‌هایی با قطر دهانه ۱۳ سانتی‌متر کشت گردید. مخلوط خاکی به نسبت مساوی ۱:۱:۱ به ترتیب خاک زراعی [بافت خاک شامل رس، شن و سیلت به ترتیب ۵/۷، ۵۰/۳۱ و ۴۰/۹۹ درصد و همچنین نیتروژن (۰/۰۸۳٪)، فسفر و پتاسیم به ترتیب ۱/۸۶ و ۰/۲۲ میلی‌گرم در کیلوگرم]، کود دامی پوسیده و ماسه بود. اعمال تنش کم‌آب‌یاری تا گلدهی ادامه داشت، سپس ویژگی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

### شاخص‌های رشد و عملکرد

ویژگی‌های ریخت‌شناسی شامل ارتفاع گیاه، قطر ساقه، سطح برگ، تعداد گره، برگ و ساقه فرعی، طول و حجم ریشه، وزن تر و خشک اندام هوایی (ساقه، برگ و گل) و ریشه اندازه‌گیری شد.

### تبادلات گازی

سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، دی‌اکسید کربن درون سلولی و هدایت روزنه‌ای توسط فتوسنتز متر قابل حمل اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری این پارامترها از برگ‌های جوان و کاملاً توسعه‌یافته گیاه (برگ دوم از بالا) در هر تکرار استفاده شد. کارآیی کربوکسیلاسیون (هدایت مزوفیلی) نیز از تقسیم میزان فتوسنتز به دی‌اکسید کربن درون سلولی به دست آمد (Tiwari et al., 1998). کارآیی مصرف آب درون سلولی (فتوسنتزی) از طریق تقسیم مقدار فتوسنتز خالص بر تعرق محاسبه شد (Ritchie et al., 1990).

### ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی

نشت یونی بر اساس روش لوتس و همکاران (Lutts et al., 1996) اندازه‌گیری شد. محتوای نسبی آب برگ گیاه به روش ریچی و نگوین (Ritchie and Nguyen, 1990)، از برگ‌های توسعه یافته بالایی به دست آمد. اندازه‌گیری میزان کلروفیل و کاروتنوئید برگ‌ها، به روش لیختن هالر (Lichtenthaler, 1987)، انجام شد. اندازه‌گیری میزان مالون دی‌آلدئید با استفاده از

موجب حفظ ساختار غشاء سلولی شده و به همراه عنصر مس بخش اصلی آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را تشکیل می‌دهد (Semida et al., 2021). گزارش‌های فراوانی ارائه شده که همگی نشان دهنده افزایش نمو رویشی و زایشی گیاه و همچنین جذب بسیاری از عناصر غذایی و در نتیجه کاهش اثرات مضر تنش خشکی با کاربرد عنصر روی می‌باشد (Sabir and Sari, 2019). به علاوه، عنصر روی با تنظیم روزنه و تعادل یونی در گیاهان، موجب کاهش اثرات منفی تنش خشکی می‌شود (Semida et al., 2025; Sepehri et al., 2021). اکسید روی یک نانوذره اکسید فلزی با کاربرد فراوان است و ساختار بلوری خاص آن، خواص اپتوالکتریک منحصر به فردی ایجاد می‌کند (Semida et al., 2021). در نتیجه هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف نانوذرات اکسید روی بر کاهش اثرات منفی تنش کم‌آب‌یاری با ارزیابی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گل پروانش انجام شد.

### مواد و روش‌ها

#### طرح آزمایشی و اعمال تیمارها

پژوهش حاضر در سال ۱۴۰۳ در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان (خرم‌آباد، طول جغرافیایی ۳۳ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی و در ارتفاع ۱۱۴۸ متر از سطح دریا) با میانگین دمای روزانه ۲۸-۲۰ درجه سانتی‌گراد، دمای شبانه ۱۸-۱۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی بین ۷۰-۶۰ درصد و شدت نور ۴۰۰-۵۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در گلخانه انجام گردید. فاکتور اول، شامل تنش کم‌آب‌یاری در سه سطح ۸۰، ۵۰ و ۲۰ درصد آب قابل دسترس در خاک و فاکتور دوم، شامل محلول‌پاشی نانوذرات دی‌اکسید روی در غلظت‌های صفر (شاهد)، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار است که به صورت پیش‌تیمار در مرحله چهارم برگ‌ها در دو مرحله با فاصله یک هفته قبل از شروع تنش کم‌آب‌یاری روی برگ گیاهان اعمال شد. نانوذرات

جانبی، وزن تر و خشک ساقه، تعداد و سطح برگ و همچنین وزن تر و خشک برگ (به ترتیب ۵۲/۷، ۵۶/۶، ۳۷/۷، ۷۸/۹، ۵۷/۷، ۹۴/۶، ۹۹ درصد کاهش) را در مقایسه با تیمار شاهد نشان داد (جدول ۲ و ۳). محلول پاشی نانوذرات اکسید روی بسته به سطح تنش و غلظت مورد استفاده تأثیرات متفاوتی روی مولفه‌های رشدی گیاه به همراه داشت. در سطح ۸۰ درصد آب قابل دسترس، محلول پاشی نانوذرات اکسید روی در غلظت ۵۰ میکرومولار، ارتفاع گیاه و تعداد گره را افزایش داد. طول ساقه جانبی نیز تحت تأثیر غلظت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار نانوذرات اکسید روی افزایش پیدا کرد. اما وزن تر و خشک ساقه جانبی در تمام غلظت‌های نانوذرات، کاهش نشان دادند. در سطوح ۵۰ و ۲۰ درصد آب قابل دسترس نیز کاربرد نانوذرات اکسید روی در غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار، تنها باعث افزایش در ارتفاع گیاه شد، روی دیگر شاخص‌ها تأثیر افزایشی و کاهش‌ی نشان داد، اما اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نداشتند (جدول ۲ و ۳).

همچنین مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم آبیاری × محلول پاشی نانوذرات اکسید روی نشان داد، اعمال تنش کم آبیاری باعث کاهش در تعداد و سطح برگ و همچنین وزن تر و خشک برگ شد و در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس، کمترین تعداد و سطح برگ و همچنین وزن تر و خشک برگ (به ترتیب ۹۰/۳، ۷۹/۶، ۶۷ و ۹۷/۳ درصد کاهش) را نسبت با تیمار شاهد نشان داد (جدول ۳). محلول پاشی نانوذرات اکسید روی بسته به سطح تنش و غلظت مورد استفاده، تأثیرات متفاوتی روی مولفه‌های رشدی گیاه به همراه داشت. در سطح ۸۰ درصد آب قابل دسترس، کاربرد نانوذرات اکسید روی در تمام غلظت‌ها باعث افزایش تعداد برگ و وزن تر و خشک برگ شدند. اما در سطح ۵۰ درصد آب قابل دسترس، وزن تر و خشک برگ با نانوذرات اکسید روی افزایش نشان داد. در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس، تنها وزن تر برگ با محلول پاشی نانوذرات اکسید روی در تمام غلظت‌ها افزایش معنی‌داری در مقایسه با تیمار شاهد نشان داد. در مجموع، بیشترین تعداد برگ و سطح برگ به ترتیب در غلظت‌های ۲۰۰ و ۵۰ میکرومولار نانوذره

تیوباربتوریک اسید به عنوان معرف و بر اساس روش وانگ و همکاران (Wang et al., 2009) انجام شد. جهت اندازه‌گیری میزان پرولین از روش اندازه‌گیری بیتس و همکاران (Bates et al., 1973) استفاده شد. بررسی میزان فعالیت آنزیم کاتالاز بر اساس روش چنس و مهلی (Chance and Maehly, 1955)، آنزیم پراکسیداز با استفاده از روش مک آدام و همکاران (MacAdam et al., 1992) و فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز نیز طبق روش ناکانوا و آسادا (Nakano and Asada, 1981) اندازه‌گیری شد.

### تجزیه آماری

در پایان تجزیه واریانس داده‌ها بر اساس طرح آزمایشی مورد استفاده و با استفاده از نرم‌افزار SAS صورت گرفت. مقایسه میانگین تیمارها نیز با آزمون دانکن در سطح پنج درصد انجام شد.

### نتایج و بحث

#### مولفه‌های رشدی گیاه

تجزیه واریانس اثر ساده تنش کم آبیاری نشان داد، اعمال تنش کم آبیاری بر مولفه‌های رشدی مانند ارتفاع بوته، تعداد گره، قطر ساقه، تعداد ساقه جانبی، طول ساقه‌های جانبی، وزن تر و خشک ساقه، تعداد و سطح برگ، وزن تر و خشک برگ و همچنین وزن تر و خشک گل معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج تجزیه واریانس اثر محلول پاشی نانوذرات نیز روی ویژگی‌های ارتفاع بوته، تعداد گره، قطر ساقه، طول ساقه‌های جانبی، وزن تر و خشک ساقه، تعداد و سطح برگ، وزن تر و خشک برگ و وزن تر و خشک گل معنی‌دار بود (جدول ۱). اثر متقابل تنش کم آبیاری و محلول پاشی نانوذرات اکسید روی نیز بر تمام صفات مذکور معنی‌دار شد (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم آبیاری × محلول پاشی نانوذرات اکسید روی نشان داد با افزایش سطح تنش کم آبیاری از ارتفاع گیاه، تعداد گره، قطر ساقه، تعداد و طول ساقه جانبی، وزن تر و خشک ساقه کاسته شد. تیمار ۲۰ درصد آب قابل دسترس، کمترین مقدار ارتفاع گیاه، تعداد گره، قطر ساقه، تعداد و طول ساقه

جدول ۱. تجزیه واریانس تأثیر نانوذرات روی بر ویژگی‌های موفوفیزبولوژیکی پروانش تحت تنش کم آبیاری  
**Table 1. Variance analysis (ANOVA) of the effects of the zinc oxide nanoparticles on the morphophysiological traits of periwinkle under water deficit stress**

منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع بوته	تعداد گره	قطر ساقه	تعداد ساقه فرعی	طول ساقه فرعی	وزن تر ساقه	وزن خشک ساقه	تعداد برگ
Source of variation	D.f	Plant height	Number of nodes	Stem diameter	Number of lateral stems	Lateral stem length	Stem fresh weight	Stem dry weight	Number of leaves
کم آبیاری									
Water deficit	2	129.59**	88.02**	8.03**	146.64**	132.32**	11.10**	0.174**	19215.6**
نانوذرات									
Nanoparticles	3	42.16**	6.35**	2.29**	1.16 <sup>ns</sup>	3.97**	0.70**	0.008**	131.4**
کم آبیاری × نانوذرات									
Water deficit × Nanoparticles	6	8.70**	3.27*	0.69*	5.39*	5.72**	0.78**	0.012**	105.0**
خطا									
Error	36	1.22	1.20	0.25	1.90	0.33	0.07	0.0007	12.8
ضریب تغییرات C.V%	-	7.53	13.45	13.83	12.85	12.48	13.31	16.68	6.34

<sup>ns</sup>، \* و \*\*: به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

\*\*ns, \* and: indicating non-significant difference, and significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

ادامه جدول ۱. تجزیه واریانس تأثیر نانوذرات روی بر ویژگی‌های موفوفیزبولوژیکی پروانش تحت تنش کم آبیاری  
**Table 1 (cont). Variance analysis (ANOVA) of the effects of the zinc oxide nanoparticles on the morphophysiological traits of periwinkle under water deficit stress**

منابع تغییرات	درجه آزادی	سطح برگ	وزن تر برگ	وزن خشک برگ	وزن تر گل	وزن خشک گل	حجم ریشه	طول ریشه	وزن تر ریشه	وزن خشک ریشه
Source of variation	D.f	Leaf area	Leaf fresh weight	Leaf dry weight	Flower fresh weight	Flower dry weight	Root volume	Root length	Root fresh weight	Root dry weight
کم آبیاری										
Water deficit	2	54340.6**	156.75**	14.72**	2.15**	0.00031**	6.06**	44.84**	17.24**	0.0076**
نانوذرات										
Nanoparticles	3	197.8**	12.74**	1.38**	0.22**	0.00008**	0.09 <sup>ns</sup>	9.23*	1.29**	0.0003**
کم آبیاری × نانوذرات										
Water deficit × Nanoparticles	6	128.5**	1.29**	0.36**	0.17**	0.00010**	0.09 <sup>ns</sup>	16.19**	0.19 <sup>ns</sup>	0.0003**
خطا										
Error	36	30.7	0.20	0.03	0.01	0.000007	0.13	2.52	0.09	0.0193
ضریب تغییرات C.V%	-	6.75	3.84	7.66	36.59	22.2	32.6	9.98	13.5	11.61

<sup>ns</sup>، \* و \*\*: به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

\*\*ns, \* and: indicating non-significant difference, and significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر نانوذرات اکسید روی بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی گل پروانش تحت تنش کم آبیاری

**Table 2. Comparison of the average effects of the zinc oxide nanoparticles on the morpho-physiological characteristics of periwinkle flowers under water deficit stress**

وزن خشک ساقه (گرم)	وزن تر ساقه (گرم)	طول ساقه جانبی (سانتی‌متر)	تعداد ساقه جانبی (در گیاه)	قطر ساقه (میلی‌متر)	تعداد گره (در گیاه)	ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)	نانوذرات اکسید روی (میکرومولار)	آبیاری تنش کم (درصد آب قابل دسترس)
Stem dry weight (g)	Stem fresh weight (g)	Lateral stem length (cm)	Number of lateral stems (per plant)	Stem diameter (mm)	Number of nodes (per plant)	Plant height (cm)	Zinc oxide nanoparticles ( $\mu\text{M}$ )	Water deficit stress (%AWC <sub>i</sub> )
0.304 <sup>a</sup>	0.818 <sup>a</sup>	5.58 <sup>b</sup>	7.5 <sup>ab</sup>	3.10 <sup>abc</sup>	5.3 <sup>cd</sup>	16.3 <sup>cd</sup>	0	80
0.239 <sup>b</sup>	1.731 <sup>b</sup>	6.35 <sup>b</sup>	5.8 <sup>bcd</sup>	3.74 <sup>a</sup>	8.8 <sup>a</sup>	19.0 <sup>a</sup>	50	
0.252 <sup>b</sup>	1.718 <sup>b</sup>	8.60 <sup>a</sup>	8.8 <sup>a</sup>	3.41 <sup>ab</sup>	7.3 <sup>ab</sup>	18.2 <sup>ab</sup>	100	
0.116 <sup>c</sup>	1.042 <sup>c</sup>	9.38 <sup>a</sup>	6.0 <sup>bcd</sup>	1.93 <sup>de</sup>	8.5 <sup>a</sup>	16.7 <sup>bc</sup>	200	
0.030 <sup>de</sup>	0.729 <sup>cd</sup>	3.80 <sup>cd</sup>	5.8 <sup>bcd</sup>	2.43 <sup>cd</sup>	5.0 <sup>cd</sup>	13.7 <sup>ef</sup>	0	50
0.042 <sup>d</sup>	0.543 <sup>de</sup>	3.28 <sup>d</sup>	5.3 <sup>cd</sup>	2.95 <sup>de</sup>	6.3 <sup>bc</sup>	16.4 <sup>cd</sup>	50	
0.033 <sup>de</sup>	0.543 <sup>de</sup>	4.38 <sup>c</sup>	4.5 <sup>d</sup>	1.97 <sup>de</sup>	5.3 <sup>cd</sup>	15.8 <sup>cd</sup>	100	
0.034 <sup>de</sup>	0.504 <sup>de</sup>	3.87 <sup>c</sup>	6.8 <sup>bc</sup>	1.86 <sup>de</sup>	4.5 <sup>de</sup>	12.2 <sup>f</sup>	200	
0.003 <sup>e</sup>	0.150 <sup>e</sup>	2.36 <sup>e</sup>	5.1 <sup>e</sup>	1.93 <sup>de</sup>	2.3 <sup>f</sup>	7.7 <sup>h</sup>	0	20
0.002 <sup>e</sup>	0.146 <sup>e</sup>	2.10 <sup>e</sup>	5.1 <sup>e</sup>	1.59 <sup>e</sup>	2.8 <sup>f</sup>	13.0 <sup>fg</sup>	50	
0.013 <sup>de</sup>	0.241 <sup>e</sup>	0.89 <sup>f</sup>	8.0 <sup>e</sup>	1.60 <sup>e</sup>	3.0 <sup>ef</sup>	15.1 <sup>de</sup>	100	
0.029 <sup>de</sup>	0.451 <sup>de</sup>	1.94 <sup>e</sup>	1.0 <sup>e</sup>	1.39 <sup>e</sup>	3.0 <sup>ef</sup>	11.8 <sup>g</sup>	200	

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون، براساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ دارند.

Means followed by the same letter in each column are not significantly different at the 1% probability level according to the LSD test.

باعث کاهش زیست‌توده می‌شود (Kapoor et al., 2020). کاهش رشد به دلیل کاهش جذب آب توسط ریشه‌ها و کاهش تولید هورمون‌های گیاهی و همچنین اختلال در فرآیند فتوسنتز (به علت بسته شدن روزنه و اختلال در واکنش‌های فتوشیمیایی) می‌باشد که در مجموع رشد و نمو گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Najzadeh and Khoshgoftarmansh, 2019). گزارش‌های زیادی حاکی از تأثیر مثبت محلول پاشی اکسید روی، در جلوگیری از کاهش عملکرد بیولوژیک در شرایط خشکی وجود دارد (Raeesi Sadati et al., 2021; Umair Hassan et al., 2020; Ranjbari et al., 2020). عنصر روی به واسطه افزایش تقسیم سلولی از طریق افزایش سنتز اکسین و تولید اسیدآمین ترپتوفان، باعث افزایش سطح برگ و بهره‌گیری بهتر و بیش‌تر از نور می‌شود (Najzadeh and Khoshgoftarmansh, 2019; Nadergoli et al., 2011). کاربرد عنصر روی با افزایش تولید هورمون ایندول استیک اسید و تنظیم فعالیت‌های آنزیمی و در نتیجه تأثیر بر تقسیم سلولی، منجر به رشد و عملکرد گیاه می‌شود (Alabdallah et al., 2021). روی به عنوان کوفاکتور آنزیم RNA پلی‌مراز در بیوسنتز پروتئین‌ها نقش دارد و برای سوخت و ساز

اکسید روی (۲۳/۸ و ۴/۶ درصد افزایش) در سطح ۸۰ درصد آب قابل دسترس در مقایسه با تیمار شاهد به دست آمد. غلظت ۱۰۰ میکرومولار نانوذره اکسید روی هم در سطح ۸۰ درصد آب قابل دسترس بیشترین وزن تر و خشک برگ (به ترتیب ۵۲/۳ و ۱۲۵ درصد افزایش) را نسبت به تیمار شاهد نشان داد. تیمار ۲۰ درصد آب قابل دسترس نیز کمترین تعداد برگ، وزن تر و خشک برگ را ثبت کرد. اما کمترین سطح برگ (۲۸/۹ درصد کاهش در مقایسه با تیمار شاهد) در غلظت ۱۰۰ میکرومولار نانوذره اکسید روی در سطح تنش کم آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس به دست آمد (جدول ۳).

تحقیقات گذشته روی گیاهان پروانش (Sepahri et al., 2025; Zomorodi et al., 2022; Jaleel et al., 2008) مریم‌گلی (Beiranvand et al., 2023)، شمعدانی معطر (Eslami Senoukesh et al., 2024) و گندم (Yasemi et al., 2024) نیز نتایج مشابهی را در ارتباط با کاهش مولفه‌های رشدی در شرایط تنش کم آبیاری گزارش کردند که با داده‌های این آزمایش همخوانی دارد. تنش خشکی در مراحل اولیه رشد گیاه بسیار تأثیر گذار بوده و با کاهش تقسیم و طویل شدن سلول،

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر نانوذرات اکسید روی بر ویژگی‌های برگ، گل و ریشه کل پروانش تحت تنش کم آبیاری

Table 3. Comparison of the average effects of the zinc oxide nanoparticles on the leaf, flower, and root characteristics of periwinkle under water deficit stress.

تنش کم آبیاری (درصد آب قابل دسترس)	نانوذرات اکسید روی (میکرومولار)	تعداد برگ (در گیاه)	سطح برگ (سانتی‌متر مربع)	وزن تر برگ (گرم)	وزن خشک برگ (گرم)	وزن تر گل (گرم)	وزن خشک گل (گرم)	طول ریشه (سانتی متر)	وزن خشک ریشه (گرم)
Water deficit stress (% AWC)	Zinc oxide nanoparticle s ( $\mu$ M)	Number of leaves (per plant)	Leaf area (cm <sup>2</sup> )	Leaf fresh weight (g)	Leaf dry weight (g)	Flower fresh weight (g)	Flower dry weight (g)	Root length (cm)	Root dry weight (g)
80	0	65.0 <sup>c</sup>	128 <sup>a</sup>	7.152 <sup>d</sup>	1.058 <sup>d</sup>	0.694 <sup>b</sup>	0.004 <sup>cd</sup>	16.43 <sup>efg</sup>	0.061 <sup>a</sup>
	50	73.3 <sup>b</sup>	134 <sup>a</sup>	9.576 <sup>b</sup>	2.097 <sup>b</sup>	0.283 <sup>c</sup>	0.003 <sup>cd</sup>	21.63 <sup>a</sup>	0.051 <sup>b</sup>
	100	70.5 <sup>b</sup>	127 <sup>a</sup>	10.898 <sup>a</sup>	2.386 <sup>a</sup>	0.735 <sup>b</sup>	0.008 <sup>b</sup>	19.45 <sup>abc</sup>	0.053 <sup>b</sup>
	200	80.5 <sup>a</sup>	128 <sup>a</sup>	8.637 <sup>c</sup>	1.866 <sup>bc</sup>	1.141 <sup>a</sup>	0.020 <sup>a</sup>	20.70 <sup>ab</sup>	0.033 <sup>c</sup>
50	0	24.5 <sup>d</sup>	109 <sup>b</sup>	6.384 <sup>c</sup>	0.821 <sup>d</sup>	0 <sup>d</sup>	0 <sup>d</sup>	16.13 <sup>fg</sup>	0.015 <sup>de</sup>
	50	18.3 <sup>ef</sup>	96 <sup>cd</sup>	8.202 <sup>c</sup>	1.609 <sup>c</sup>	0.214 <sup>c</sup>	0.006 <sup>bc</sup>	15.18 <sup>g</sup>	0.032 <sup>c</sup>
	100	11.0 <sup>f</sup>	91 <sup>d</sup>	8.711 <sup>c</sup>	1.824 <sup>c</sup>	0.297 <sup>c</sup>	0.003 <sup>cd</sup>	15.00 <sup>g</sup>	0.023 <sup>d</sup>
	200	25.0 <sup>d</sup>	103 <sup>bc</sup>	8.126 <sup>c</sup>	1.683 <sup>c</sup>	0.304 <sup>c</sup>	0.002 <sup>cd</sup>	18.95 <sup>bc</sup>	0.008 <sup>efg</sup>
20	0	6.3 <sup>f</sup>	26 <sup>e</sup>	2.358 <sup>g</sup>	0.028 <sup>c</sup>	0 <sup>d</sup>	0 <sup>d</sup>	16.85 <sup>d-g</sup>	0.003 <sup>g</sup>
	50	8.3 <sup>f</sup>	14 <sup>f</sup>	3.522 <sup>f</sup>	0.042 <sup>c</sup>	0 <sup>d</sup>	0 <sup>d</sup>	18.13 <sup>c-f</sup>	0.005 <sup>fg</sup>
	100	6.8 <sup>f</sup>	16 <sup>f</sup>	3.576 <sup>f</sup>	0.044 <sup>c</sup>	0 <sup>d</sup>	0 <sup>d</sup>	18.43 <sup>b-c</sup>	0.009 <sup>efg</sup>
	200	6.5 <sup>f</sup>	11 <sup>f</sup>	3.111 <sup>f</sup>	0.034 <sup>c</sup>	0 <sup>d</sup>	0 <sup>d</sup>	15.38 <sup>g</sup>	0.011 <sup>cf</sup>

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون، براساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

Means followed by the same letter in each column are not significantly different at the 1% probability level according to the LSD test.

که در معرض تنش خشکی قرار می‌گیرند میزان گلدهی به‌دلیل صرف قابل توجهی از انرژی گیاه جهت مقابله با تنش خشکی کاهش پیدا می‌کند (Zomorodi et al., 2022). نتایج تحقیقات روی گل پروانش (Zomorodi et al., 2022)، اطلسی (Ranjbari et al., 2020) و مریم‌گلی زینتی (Beiranvand et al., 2023) نیز نشان داد تنش کم آبیاری، باعث کاهش شاخص‌های گلدهی (تعداد گل، وزن تر و خشک گل و عمر گل روی بوته) شده است که با داده‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد. عنصر روی، به‌عنوان یک کوفاکتور در سنتز هورمون اکسین نقش دارند که با سنتز کافی این هورمون، اندازه سلول‌ها را افزایش می‌دهد، این هورمون در کنترل مریستم گل‌دهنده تولید و رهاسازی شده و شکل‌گیری و تمایز گل‌ها نقش داشته و منجر به تحریک نمو بافت‌های آوندی در آن‌ها می‌شود (Farahi and Jahromi, 2018). از طرفی دیگر تنش خشکی، زمانی اتفاق می‌افتد که پتانسیل آب و آماسیدگی به حدی کاهش یابد که عملکرد متابولیک طبیعی و ظرفیت تولیدمثلی گیاه را مختل کند (Asgari et al., 2024). گزارش‌های زیادی نشان داده‌اند که استفاده از عنصر روی باعث کاهش اثرات منفی تنش و افزایش رشد رویشی و زایشی در گیاهان

طبیعی پروتئین نیز مورد نیاز بوده و باعث تثبیت ساختمان RNA، DNA و ریبوزوم‌ها می‌گردد (Gatea, Khshan et al., 2025; Ma et al., 2013; Tsonev et al., 2012).

### شاخص‌های گلدهی

نتایج نشان داد اعمال تنش کم آبیاری، باعث کاهش گلدهی در گیاه پروانش شد، به‌طوری‌که در سطح ۵۰ و ۲۰ درصد آب قابل دسترس، هیچ‌گونه گلدهی صورت نگرفت. محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی در سطوح ۸۰ و ۵۰ درصد آب قابل دسترس، باعث افزایش در گلدهی گیاهان پروانش شد؛ اما در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس تأثیر مثبتی به‌همراه نداشت. همچنین نتایج نشان داد کاربرد نانوذرات اکسید روی تأثیرات متفاوتی روی وزن تر و خشک گل نشان دادند. در سطح ۸۰ درصد آب قابل دسترس، غلظت ۲۰۰ میکرومولار نانوذر به‌ترتیب باعث افزایش ۶۴/۴ و ۴۰۰ درصدی در وزن تر و خشک گل در مقایسه با تیمار شد. در سطح ۵۰ درصد آب قابل دسترس نیز کاربرد نانوذر اکسید روی در تمام غلظت‌ها باعث افزایش در وزن تر و خشک گل شد (جدول ۳). با وجود اینکه در گیاهان زینتی، عنصر اساسی گل است. در گیاهانی

ریشه و وزن تر ریشه تحت تأثیر تنش کم آبیاری کاهش پیدا کردند. تیمار ۲۰ درصد آب قابل دسترس، کمترین حجم ریشه و وزن تر ریشه (به ترتیب ۷۰/۲ و ۷۵/۲ درصد کاهش) را ثبت کرد (جدول ۴). همچنین مقایسه میانگین نشان داد محلول پاشی نانوذرات اکسید روی تنها در غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار به ترتیب باعث افزایش ۲۷/۳ و ۳۲/۶ درصدی در وزن تر ریشه در مقایسه با تیمار شاهد شد (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم آبیاری × نانوذرات اکسید روی نشان داد که طول ریشه تحت شرایط تنش کم آبیاری افزایش معنی داری نشان نداد. وزن خشک ریشه نیز تحت تأثیر تنش کم آبیاری به شدت کاهش پیدا کرد و در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس، کاهش ۹۵ درصدی در مقایسه با تیمار شاهد نشان داد. در مجموع، غلظت ۵۰ میکرومولار نانوذره اکسید روی در سطح ۸۰ درصد آب قابل دسترس با ۳۱/۶ درصد افزایش، بیشترین طول ریشه را نسبت به تیمار شاهد ثبت کرد. تیمار شاهد نیز بیشترین وزن خشک ریشه را نشان داد (جدول ۳).

مختلف شده است (Seleiman et al., 2023; Umair Hassan et al., 2020; Ranjbari et al., 2020; Zhang et al., 2013; Nadergoli et al., 2011). نقش دوگانه عنصر روی به عنوان یک ماده اولیه ضروری و کوفاکتور در افزایش فعالیت آنزیم‌های محرک فسفر مانند فسفاتاز و فیتاز، پاسخ فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را افزایش می‌دهد (Rashwan et al., 2016). گزارش شده است که عنصر روی به واسطه دخالت در ساخت پروتئین لوله کرده می‌تواند باعث افزایش گلدهی در گیاهان شود (Farahi and Jahromi, 2018).

### ویژگی‌های ریشه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر ساده تنش کم آبیاری بر تمام ویژگی‌های ریشه (طول و حجم، وزن تر و خشک) معنی دار شد. اثر ساده محلول پاشی نانوذرات اکسید روی و همچنین اثر متقابل تنش کم آبیاری × نانوذرات اکسید روی نیز بر طول و وزن خشک ریشه معنی دار شدند (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین اثر ساده تنش کم آبیاری نشان داد حجم

جدول ۴. مقایسه میانگین اثرات جداگانه تنش کم آبیاری و نانوذرات اکسید روی بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گل پروانش  
Table 4. Comparison of the average separate effects of the water deficit stress and zinc oxide nanoparticles on the physiological and biochemical characteristics of periwinkle

تیمار	حجم ریشه (سانتی متر مکعب)	وزن تر ریشه (گرم)	کارایی مصرف آب فتوسنتزی (میکرومول دی اکسید کربن بر مول آب)	محتوای نسبی آب برگ (درصد)	کاروتنوئید (میلی گرم بر گرم وزن تر)
Treatment	Root volume (cm <sup>3</sup> )	Root fresh weight (g)	Photosynthetic water use efficiency (μmol CO <sub>2</sub> mol <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O)	Relative leaf water content (%)	Carotenoid (mg g <sup>-1</sup> FW)
آبیاری (درصد تنش کم)	80	1.75 <sup>a</sup>	2.523 <sup>b</sup>	84 <sup>a</sup>	2.201 <sup>a</sup>
آب قابل دسترس)	50	1.13 <sup>b</sup>	3.028 <sup>a</sup>	73 <sup>b</sup>	1.721 <sup>b</sup>
Water deficit stress (% AWC)	20	0.52 <sup>c</sup>	2.722 <sup>b</sup>	60 <sup>c</sup>	1.229 <sup>c</sup>
نانوذرات اکسید روی	0	-	-	68 <sup>c</sup>	1.610 <sup>b</sup>
(میکرومولار)	50	-	-	75 <sup>a</sup>	1.764 <sup>a</sup>
Zinc Oxide Nanoparticles (μM)	100	-	-	74 <sup>a</sup>	1.767 <sup>a</sup>
	200	-	-	72 <sup>b</sup>	1.727 <sup>a</sup>

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون، براساس آزمون LSD اختلاف معنی داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

Means followed by the same letter in each column are not significantly different at the 1% probability level according to the LSD test.

et al., 2008) و کاهش (Zomorrodi et al., 2022) رشد ریشه در پروانش شده است. گیاهان در برابر خشکی، بیشتر تولیدات فتوسنتزی خود را به سمت ریشه هدایت می‌کنند تا توانایی خود برای جذب آب موجود در

تأثیر منفی تنش خشکی می‌تواند به واسطه توسعه ریشه و افزایش جذب آب توسط گیاه جبران گردد (Kapoor et al., 2020). با این حال، برخی از پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تنش خشکی، موجب افزایش (Jaleel

تنفس) را تحت تأثیر قرار داده و سبب کاهش رشد گیاه می‌شود (Zomorodi et al., 2022).

### تبادلات گازی

تجزیه واریانس اثر تنش ساده تنش کم‌آبیاری نشان داد تبادلات گازی پروانش مانند سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، دی‌اکسید کربن درون سلولی، سرعت تعرق، هدایت مزوفیلی و کارایی مصرف آب درون سلولی به‌صورت معنی‌داری تحت تأثیر تنش کم‌آبیاری قرار گرفتند (جدول ۵). همچنین اثر ساده محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی و اثر متقابل تنش کم‌آبیاری × نانوذرات اکسید روی نیز بر سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق، غلظت دی‌اکسید کربن درون سلولی و هدایت مزوفیلی معنی‌دار بودند (جدول ۵). مقایسه میانگین اثر ساده تنش کم‌آبیاری بر کارایی مصرف آب فتوسنتزی نشان داد تنش کم‌آبیاری در سطح ۵۰ درصد آب قابل دسترس، افزایش ۲۰ درصدی نسبت به تیمار شاهد نشان داد (جدول ۴).

خاک را حفظ خواهد کنند، در نتیجه باعث افزایش نسبت ریشه به ساقه می‌شود (Umair Hassan et al., 2020). عنصر روی برای سنتز ایندول استیک اسید و محافظت از آن در برابر تجزیه اکسیداتیو به‌وسیله‌ی گونه‌های فعال اکسیژن ضروری می‌باشد (Semida et al., 2021). از طرفی دیگر، با کاهش روی، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز نیز کاهش می‌یابد و سلول مستعد حمله‌ی گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود (Semida et al., 2021). با این حال، در غلظت بالای نانوذرات روی، رشد طولی ریشه‌ها به‌دلیل حساسیت بالای مریستم رأس ریشه به فلزات سنگین و تأثیر عنصر روی بر آنزیم ایندول استیک اسید اکسیداز، کاهش می‌یابد (Umair Hassan et al., 2020; Ma et al., 2013). کاهش رشد ریشه‌ها که با کاهش طول و وزن تر و خشک آنها همراه است باعث عدم توسعه و گسترش مناسب سیستم ریشه‌ای شده و با کاهش سطوح جذب و تغییر در ساختار غشای سلولی، جذب آب کاهش یافته و محتوای آب گیاه نیز کم می‌شود که فرآیندهای فیزیولوژیکی (مانند فتوسنتز، تعرق و

جدول ۵. تجزیه واریانس تأثیر نانوذرات روی بر تبادلات گازی پروانش تحت تنش کم‌آبیاری

**Table 5. Variance analysis (ANOVA) of the effects of the zinc oxide nanoparticles on gas-exchange parameters of periwinkle under water deficit stress**

منابع تغییرات	درجه آزادی	سرعت فتوسنتز	هدایت روزنه‌ای	تعرق	دی‌اکسید کربن درون سلولی	هدایت مزوفیلی	کارایی مصرف آب فتوسنتزی
Source of variation	D.f	Photosynthetic rate	Stomatal conductance	Transpiration	Inter-cellular CO <sub>2</sub>	Mesophyll Conductance	Photosynthetic water use efficiency
کم‌آبیاری	2	897.36**	0.227**	152.07**	104271**	0.0055**	1.035**
نانوذرات	3	29.79**	0.027**	3.87**	11741**	0.0002**	0.280 <sup>ns</sup>
کم‌آبیاری × نانوذرات	6	6.59**	0.004**	1.84**	2065**	0.0001**	0.278 <sup>ns</sup>
خطا	36	0.57	0.0004	0.14	545	0.000009	0.147
Error							
ضریب تغییرات C.V%	-	6.46	8.19	8.54	9.62	6.61	13.94

\*\*، \* و ns: به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

\*\*ns, \* and ns: indicating non-significant difference, and significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

سطح ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار، باعث افزایش معنی داری در هدایت روزنه‌ای و غلظت دی‌اکسید کربن درون سلولی شد. اما هدایت مزوفیلی کاهش پیدا کرد. در مجموع، غلظت ۱۰۰ میکرومولار نانوذرات اکسید روی در سطح ۸۰ درصد آب قابل دسترس، بیشترین سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق و هدایت مزوفیلی (به ترتیب ۳۴/۶، ۶۴/۷، ۵۰ و ۱۵/۴ درصد افزایش) را نسبت به تیمار شاهد نشان داد. بیشترین غلظت دی‌اکسید کربن درون سلولی نیز در غلظت ۲۰۰ میکرومولار نانوذره اکسید روی در سطح ۸۰ درصد آب قابل دسترس (۱۷/۶ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد) به دست آمد. تیمار ۲۰ درصد آب قابل دسترس بدون محلول پاشی نیز کمترین سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق و غلظت دی‌اکسید کربن درون سلولی را ثبت کرد. غلظت ۵۰ میکرومولار نانوذره اکسید روی در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس نیز کمترین هدایت مزوفیلی را در مقایسه با تیمار شاهد نشان داد (جدول ۶).

مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبیاری × محلول پاشی نانوذرات اکسید روی نشان داد که افزایش تنش کم‌آبیاری، باعث کاهش قابل توجهی در سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق، دی‌اکسید کربن درون سلولی و هدایت مزوفیلی شد. سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس، کمترین سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق، دی‌اکسید کربن درون سلولی و هدایت مزوفیلی (به ترتیب ۷۹، ۶۰/۷، ۸۱/۳، ۶۷/۲ و ۳۸/۸ درصد کاهش) را در مقایسه با تیمار شاهد نشان داد. محلول پاشی نانوذرات اکسید روی بسته به سطح تنش و غلظت مورد استفاده، تأثیرات متفاوتی روی شاخص‌های تبادلات گازی داشت. در سطح ۵۰ درصد آب قابل دسترس، کاربرد نانوذرات در اغلب غلظت‌ها به خصوص غلظت ۱۰۰ میکرومولار، باعث افزایش سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق، دی‌اکسید کربن درون سلولی و هدایت مزوفیلی در مقایسه با تیمار شاهد شد. در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس، محلول پاشی نانوذرات به‌ویژه در

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر نانوذرات اکسید روی بر تبادلات گل پروانش تحت تنش کم‌آبیاری

Table 6. Comparison of the average effects of the zinc oxide nanoparticles on the gaseous exchange of periwinkle under water deficit stress

تنش کم‌آبیاری (درصد آب قابل دسترس)	نانوذرات اکسید روی (میکرومولار)	سرعت فتوسنتز (میکرومول CO <sub>2</sub> بر متر مربع در ثانیه)	هدایت روزنه (میلی مول بر مترمربع در ثانیه)	تعرق (میلی مول بر مترمربع بر ثانیه)	CO <sub>2</sub> درون سلولی (میکرومول بر مول در لیتر)	هدایت مزوفیلی (میلی مول بر مترمربع در ثانیه)
Water deficit stress (% AWC)	Zinc oxide nanoparticles (μM)	Photosynthetic rate (μmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Stomatal conductance (mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Transpiration (mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Intercellular CO <sub>2</sub> (μmol mol <sup>-1</sup> )	Mesophyll Conductance (mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )
80	0	15.3 <sup>d</sup>	0.291 <sup>d</sup>	5.53 <sup>b</sup>	278 <sup>c</sup>	0.0577 <sup>bc</sup>
	50	18.0 <sup>b</sup>	0.383 <sup>b</sup>	8.15 <sup>a</sup>	313 <sup>ab</sup>	0.0577 <sup>bc</sup>
	100	20.6 <sup>a</sup>	0.480 <sup>a</sup>	8.30 <sup>a</sup>	312 <sup>ab</sup>	0.0666 <sup>a</sup>
	200	17.7 <sup>bc</sup>	0.350 <sup>c</sup>	7.83 <sup>a</sup>	327 <sup>a</sup>	0.0554 <sup>c</sup>
50	0	12.0 <sup>e</sup>	0.207 <sup>e</sup>	4.50 <sup>de</sup>	221 <sup>d</sup>	0.0548 <sup>c</sup>
	50	15.3 <sup>d</sup>	0.300 <sup>d</sup>	4.90 <sup>cd</sup>	283 <sup>bc</sup>	0.0539 <sup>c</sup>
	100	16.6 <sup>c</sup>	0.312 <sup>d</sup>	5.05 <sup>bc</sup>	280 <sup>bc</sup>	0.0610 <sup>b</sup>
	200	11.8 <sup>e</sup>	0.297 <sup>d</sup>	4.15 <sup>e</sup>	285 <sup>bc</sup>	0.0421 <sup>d</sup>
20	0	3.2 <sup>f</sup>	0.114 <sup>g</sup>	1.03 <sup>f</sup>	191 <sup>f</sup>	0.0353 <sup>e</sup>
	50	3.3 <sup>f</sup>	0.156 <sup>f</sup>	1.45 <sup>f</sup>	189 <sup>d</sup>	0.0175 <sup>g</sup>
	100	3.9 <sup>f</sup>	0.163 <sup>f</sup>	1.45 <sup>f</sup>	198 <sup>d</sup>	0.0197 <sup>g</sup>
	200	3.2 <sup>f</sup>	0.122 <sup>g</sup>	1.25 <sup>f</sup>	130 <sup>e</sup>	0.0247 <sup>f</sup>

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون، براساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

Means followed by the same letter in each column are not significantly different at the 1% probability level according to the LSD test.

و سرعت فتوسنتز را کاهش می‌دهد. از طرفی با کاهش سرعت تعرق، دمای برگ افزایش می‌یابد، هر چند کارآیی مصرف آب فتوسنتزی افزایش نشان می‌دهد (Eslami Senoukesh et al., 2024; Laxa et al., 2019). نانوذرات روی با پردازش و یکپارچه ساختار روبیسکو می‌توانند سرعت فتوسنتز را تحت تنش خشکی بهبود ببخشند (Tsonev et al., 2012). از طرفی دیگر نانوذرات روی با حفظ یکپارچگی غشاء، تجمع تنظیم‌کننده‌های اسمزی و افزایش ورود پتاسیم به سلول‌های نگهبان روزه، باعث بهبود تنظیم روزه‌ها می‌شوند که در نتیجه منجر به رشد و عملکرد بهتر گیاه می‌شود (Dehnavi et al., 2017).

#### محتوای نسبی آب برگ، نشأت الکترولیت و محتوای مالون دی‌آلدئید

نتایج نشان داد اثر ساده تنش کم‌آبیاری و محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی بر محتوای نسبی آب برگ، نشأت الکترولیت و محتوای مالون دی‌آلدئید معنی‌دار شد (جدول ۷). اثر متقابل تنش کم‌آبیاری × محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی بر نشأت الکترولیت و محتوای مالون دی‌آلدئید تأثیر معنی‌داری داشت (جدول ۷). میانگین اثر ساده تنش کم‌آبیاری نشان داد محتوای نسبی آب برگ با افزایش سطح تنش، به شدت کاهش یافت و در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس، ۲۸/۵ درصد در مقایسه با تیمار شاهد کاهش نشان داد (جدول ۴). نانوذرات اکسید روی در تمام غلظت‌ها، باعث افزایش محتوای نسبی آب برگ گیاهان پروانش شد. غلظت ۵۰ میکرومولار نانوذره اکسید روی نیز بیشترین محتوای نسبی آب برگ (۱۰/۲ درصد افزایش) را در مقایسه با تیمار شاهد نشان داد (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبیاری × نانوذرات اکسید روی نشان داد که نشأت الکترولیت و محتوای مالون دی‌آلدئید با افزایش سطح تنش کم‌آبیاری، افزایش یافته است و در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس به ترتیب منجر به افزایش ۱۱۹ و ۸۰/۸ درصدی در نشأت الکترولیت و محتوای مالون دی‌آلدئید در مقایسه با تیمار شاهد شد. کاربرد نانوذرات اکسید روی نیز در سطوح مختلف تنش

تحقیقات روی گیاهان مختلف مانند پروانش (Zomorrodi et al., 2022)، مریم‌گلی زینتی (Beiranvand et al., 2023) و اطلسی (Ranjbari et al., 2020) تأثیر منفی تنش خشکی بر شاخص‌های تبادلات گازی را نشان داده‌اند. زمردی و همکاران (Zomorrodi et al., 2022) در بررسی تأثیر تنش کم‌آبیاری (۸۰، ۵۰ و ۲۰ درصد آب قابل دسترس) گزارش کردند که تنش کم‌آبیاری، باعث کاهش قابل توجهی در سرعت تعرق، هدایت روزه‌ای، غلظت دی‌اکسید کربن درون سلولی و سرعت فتوسنتز گیاه پروانش شد، به نحوی که در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس، به ترتیب کاهش ۹۰، ۵۱، ۳۲ و ۶۱ درصدی در مقایسه با تیمار شاهد نشان دادند. یکی از علائم سریع تنش خشکی در گیاهان، انسداد روزه‌ها به صورت جزئی یا کامل است تا تلفات آب را به حداقل برساند (Kapoor et al., 2020). در واقع یکی از سازوکارهای اصلی مقاومت گیاهان به تنش خشکی، بستن روزه‌هاست که کاهش هدایت روزه‌ای، ورود دی‌اکسید کربن، سرعت تعرق و افزایش دمای برگ را به همراه دارد تا تلفات آب را به حداقل برساند (Eslami Senoukesh et al., 2024; Zomorrodi et al., 2022). کاهش هدایت روزه‌ای در تنش خشکی نیز دلیل کاهش تورژسانس (آماس سلولی) سلول‌های نگهبان اطراف روزه‌ها است (Dehnavi et al., 2017). همچنین تحت شرایط تنش خشکی، کاهش فتوسنتز می‌تواند به دلیل انسداد روزه‌ها و آسیب به مجموعه عوامل بیوشیمیایی تثبیت‌کننده دی‌اکسید کربن مانند آنزیم روبیسکو به منظور جلوگیری از واکنش‌های فتوشیمیایی و کاهش محتوای کلروفیل برگ باشد (Zomorrodi et al., 2022; Kapoor et al., 2020). در واقع کاهش اولیه فتوسنتز در نتیجه بسته شدن روزه‌هاست اما تنش طولانی مدت و شدید آب، می‌تواند منجر به تخریب کلروپلاست و کاهش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی گردد (Yang et al., 2021). در مجموع می‌توان گفت تنش خشکی با بستن روزه‌ها به منظور کاهش اتلاف آب، هدایت روزه‌ای و سرعت تعرق را کاهش داده و از طریق تأثیر بر سازوکارهای درونی برگ از انتشار دی‌اکسید کربن به فضای بین‌سلولی جلوگیری می‌کند، که در نتیجه مقدار دی‌اکسید کربن داخلی

تیلاکوئیدی کلروپلاست و به دنبال آن تولید دی آسید گلیسرول، تری آسید گلسیرول و اسیدهای چرب آزاد اتفاق افتاده و در نهایت، میزان مالون دی آلدئید و نشت الکترولیت در بافت گیاهی افزایش و محتوای نسبی آب برگ کاهش می یابد (Umair Hassan et al., 2020). گزارش شده که نانوذرات اکسید روی، مقاومت گیاهان را در برابر تنش های زیستی و غیر زیستی افزایش داده (Seleiman et al., 2023; Semida et al., 2021) و آسیب های اکسایشی را از طریق القای سیستم دفاعی پاداکسایشی کاهش می دهند (Shi et al., 2014). در پژوهش حاضر نیز کاربرد نانوذرات اکسید روی با کاهش تأثیر تنش کم آبیاری، باعث بهبود محتوای نسبی آب برگ و کاهش نشت الکترولیت و محتوای مالون دی آلدئید در گیاهان تحت تنش شد. نانوذرات اکسید روی ممکن است در حفظ یکپارچگی غشای سلولی و افزایش محتوای آب نسبی به عنوان آب قابل دسترس متابولیکی نقش داشته باشند که می تواند منعکس کننده فرآیندهای متابولیک درون گیاهان باشد (Semida et al., 2021; Tsonev et al., 2012). همچنین نانوذرات اکسید روی با افزایش بازده فتوسنتزی، باعث تثبیت فراساختار کلروپلاست و میتوکندری تحت شرایط تنش آب می شوند و از این طریق محتوای نسبی آب را افزایش و نشت الکترولیت و محتوای مالون دی آلدئید را کاهش می دهند (Umair Hassan et al., 2020).

کم آبیاری واکنش متفاوتی به همراه داشت و در اکثر غلظت ها باعث کاهش در نشت الکترولیت و محتوای مالون دی آلدئید شد. به طوری که در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس، غلظت ۱۰۰ میکرومولار نانوذرات اکسید روی به ترتیب باعث کاهش ۲۶ و ۱۰/۵ درصدی در نشت الکترولیت و محتوای مالون دی آلدئید شد (جدول ۸).

نتایج تحقیقات مختلف روی گیاهان پروانش (Sepehri et al., 2020; Zomorrodi et al., 2022; Ranjbari et al., 2025)، اطلسی (Yasemi et al., 2024) و مریم گلی زینتی (Beiranvand et al., 2023)، کاهش محتوای نسبی آب برگ و افزایش نشت الکترولیت و محتوای مالون دی آلدئید را در اثر تنش کم آبیاری گزارش کرده اند که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. در شرایط تنش خشکی، تولید رادیکال های آزاد در گیاهان بیشتر از میزان غریبال آنها توسط سیستم آنتی اکسیدان آنزیمی و غیر آنزیمی است، در نتیجه رادیکال های آزاد به ساختارهای مختلف سلولی از جمله DNA، پروتئین ها، چربی ها و غشاهای سلولی آسیب می زنند (Hashemi, 2019). شاخص کلیدی تنش اکسایشی، پراکسیداسیون لیپیدهاست. اسیدهای چرب غیراشباع غشای سلولی به دلیل پیوند دوگانه ضعیف، از مهم ترین اهداف رادیکال های آزاد محسوب می شوند. تحت شرایط تنش، پراکسیداسیون گلیکولیپیدهای

#### جدول ۷. تجزیه واریانس تأثیر نانوذرات روی بر ویژگی های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی پروانش تحت تنش کم آبیاری

**Table 7. Variance analysis (ANOVA) of the effects of the zinc oxide nanoparticles on the physiological and biochemical traits of periwinkle under water deficit stress**

منابع تغییرات	درجه آزادی	محتوای نسبی آب برگ	مالون دی نشت یونی	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئید	کلروفیل کل	پرولین	کاتالاز	پراکسیداز	آسکوربات پراکسیداز	
Source of variation	D.f	Relative leaf water content	Electrolyte leakage	MDA	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Carotenoid	Total Chlorophyll	Proline	Catalase	Peroxidase	Ascorbate peroxidase
کم آبیاری	2	2166.2**	1535.5**	0.508**	38.64**	28.88**	3.77**	139.47**	78.13**	0.00102**	0.02104**	0.0042**
نانوذرات کم آبیاری	3	133.7**	148.9**	0.019**	6.93**	1.64**	0.06*	14.03**	4.00**	0.00005**	0.00088**	0.0002**
نانوذرات کم آبیاری ×	6	3.9 <sup>ns</sup>	26.4**	0.004*	0.84*	0.41**	0.02 <sup>ns</sup>	4.67**	1.41*	0.00002**	0.00042**	0.0001**
خطا	36	7.1	5.9	0.001	0.30	0.08	0.01	0.72	0.58	0.000007	0.00006	0.00004
ضریب تغییرات C.V%	-	3.69	7.67	7.90	9.42	10.29	8	9.92	9.98	9.77	4.74	11.27

ns: \* و \*\*: به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی دار و اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱

\*\*ns, \* and: indicating non-significant difference, and significant differences at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

جدول ۸. مقایسه میانگین اثر نانوذرات اکسید روی بر ویژگی‌های بیوشیمیایی گل پروانش تحت تنش کم‌آبیاری

**Table 8. Comparison of the average effects of zinc oxide nanoparticles on the biochemical characteristics of periwinkle under water deficit stress.**

تنش کم‌آبیاری (درصد آب قابل دسترس)	نانوذرات اکسید روی (میکرومولار)	نشت الکترولیت (درصد)	مالون دی‌آلدهید	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	پرولین
Water deficit stress (AWC%)	Zinc oxide nanoparticles ( $\mu\text{M}$ )	Electrolyte Leakage (%)	Malondialdehyde	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Total Chlorophyll	Proline
				میلی‌گرم بر گرم وزن تر mg g <sup>-1</sup> FW			
80	0	21 <sup>f</sup>	0.360 <sup>f</sup>	6.38 <sup>bc</sup>	3.58 <sup>b</sup>	9.96 <sup>b</sup>	4.03 <sup>gh</sup>
	50	19 <sup>f</sup>	0.267 <sup>g</sup>	8.08 <sup>a</sup>	4.50 <sup>a</sup>	12.58 <sup>a</sup>	3.96 <sup>gh</sup>
	100	20 <sup>f</sup>	0.248 <sup>g</sup>	8.10 <sup>a</sup>	4.53 <sup>a</sup>	12.63 <sup>a</sup>	3.35 <sup>h</sup>
	200	22 <sup>f</sup>	0.216 <sup>g</sup>	7.71 <sup>a</sup>	4.69 <sup>a</sup>	12.40 <sup>a</sup>	3.24 <sup>h</sup>
50	0	38 <sup>c</sup>	0.588 <sup>bc</sup>	4.33 <sup>e</sup>	2.01 <sup>e</sup>	6.33 <sup>ef</sup>	5.58 <sup>de</sup>
	50	32 <sup>d</sup>	0.473 <sup>e</sup>	5.78 <sup>cd</sup>	2.64 <sup>cd</sup>	8.43 <sup>cd</sup>	4.63 <sup>fg</sup>
	100	28 <sup>e</sup>	0.548 <sup>cd</sup>	5.40 <sup>d</sup>	2.33 <sup>de</sup>	6.17 <sup>ef</sup>	4.58 <sup>fg</sup>
	200	34 <sup>d</sup>	0.534 <sup>d</sup>	6.61 <sup>b</sup>	2.94 <sup>e</sup>	9.56 <sup>bc</sup>	5.53 <sup>ef</sup>
20	0	46 <sup>a</sup>	0.651 <sup>a</sup>	3.50 <sup>f</sup>	1.26 <sup>f</sup>	4.76 <sup>g</sup>	9.34 <sup>a</sup>
	50	36 <sup>cd</sup>	0.604 <sup>ab</sup>	5.08 <sup>de</sup>	2.05 <sup>e</sup>	7.12 <sup>e</sup>	8.26 <sup>ab</sup>
	100	34 <sup>d</sup>	0.583 <sup>bcd</sup>	5.15 <sup>d</sup>	2.16 <sup>e</sup>	7.30 <sup>de</sup>	7.53 <sup>bc</sup>
	200	42 <sup>b</sup>	0.612 <sup>ab</sup>	4.35 <sup>e</sup>	1.38 <sup>f</sup>	5.73 <sup>fg</sup>	6.85 <sup>cd</sup>

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون، براساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

Means followed by the same letter in each column are not significantly different at the 1% probability level according to the LSD test.

درصد آب قابل دسترس، غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار نانوذرات روی به‌صورت معنی‌داری غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد. در کل، غلظت ۱۰۰ میکرومولار نانوذرات اکسید روی بیشترین مقدار کلروفیل a و کلروفیل کل (به‌ترتیب ۲۶/۹ و ۲۶/۸ درصد افزایش) را در سطح ۸۰ درصد آب قابل دسترس نسبت به تیمار شاهد نشان دادند. همچنین در سطح ۸۰ درصد آب قابل دسترس در غلظت ۲۰۰ میکرومولار نانوذرات اکسید روی، بیشترین مقدار کلروفیل b (۳۱ درصد افزایش) نسبت به تیمار شاهد به‌دست آمد. تیمار ۲۰ درصد آب قابل دسترس نیز کمترین مقدار شاخص‌های مذکور را نشان داد (جدول ۸).

کاهش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی در گیاهانی مانند پروانش (Sepehri et al., 2025; Zomorrodi et al., 2022; Jaleel et al., 2008; Ranjbari et al., 2020)، مریم‌گلی (Beiranvand et al., 2023) و سنجد (Seif et al., 2024) در اثر تنش کم‌آبیاری گزارش شده است. تحت شرایط تنش خشکی، گیاه در طول روز با بسته نگه‌داشتن روزنه‌ها، سعی در حفظ محتوای نسبی آب خود دارد که باعث اختلال در انتقال الکترون در فتوسیستم دو شده و در این شرایط، الکترون اضافی ناشی از فتولیز (تجزیه) آب، باعث تولید گونه‌های فعال اکسیژن و خسارت به غشاء سلولی از طریق اکسیداسیون چربی‌ها، پروتئین‌ها و کاهش محتوای

### رنگیزه‌های فتوسنتزی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثر ساده تنش کم‌آبیاری و محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی بر غلظت کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئید و کلروفیل کل معنی‌دار بود (جدول ۷). اثر متقابل تنش کم‌آبیاری × محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی بر غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل اثر معنی‌داری داشت (جدول ۷). مقایسه میانگین اثر ساده تنش کم‌آبیاری نشان داد محتوای کاروتنوئید تحت تأثیر تنش کم‌آبیاری کاهش یافت و در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس، کاهش ۴۴/۱ درصدی در مقایسه با تیمار شاهد نشان داد (جدول ۴). محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی در تمام غلظت‌ها، باعث افزایش در محتوای کاروتنوئید شد. غلظت ۱۰۰ میکرومولار نانوذره روی نیز بیشترین مقدار شاخص مذکور (۹/۷ درصد افزایش) را در مقایسه با تیمار شاهد نشان داد (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبیاری × محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی نشان داد تنش کم‌آبیاری، باعث کاهش در محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل شد. تیمار ۲۰ درصد آب قابل دسترس نیز کمترین مقدار کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل (به‌ترتیب ۴۵/۱، ۶۴/۸ و ۵۲/۳ درصد کاهش) را در مقایسه با تیمار شاهد نشان داد. محلول‌پاشی نانوذرات اکسید روی در بیشتر غلظت‌ها در سطوح مختلف تنش کم‌آبیاری، غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی را افزایش داد. در سطح ۲۰

نشان داد، کاهش میزان آب از سطح ۸۰ تا ۲۰ درصد آب قابل دسترس، به طور قابل توجهی محتوای پرولین را در گیاه پروانش افزایش (۱۳۱ درصد) داد، محلول پاشی نانوذرات اکسید روی در شرایط تنش و غیر تنش باعث کاهش محتوای پرولین شد. با این وجود، در سطح ۵۰ درصد آب قابل دسترس، تنها غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار اختلاف معنی داری با تیمار شاهد نشان دادند. در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس نیز غلظت های ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار باعث کاهش معنی داری در مقایسه با تیمار شاهد شدند (جدول ۸). اسمولیت هایی مانند پرولین نقش مهمی در سمیت زدایی و محدودیت پراکسیداسیون چربی ها دارند. بنابراین، می توانند با تحمل تنش آبی در گیاهان مرتبط باشند (Yang et al., 2021). افزایش تجمع پرولین در اثر تنش خشکی (Ranjbari et al., 2020) و کاربرد نانوذرات روی (Ranjbari et al., 2020; Amirjani et al., 2016) در گیاهان اطلسی و پروانش گزارش شده است که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد. پرولین در تنظیم پتانسیل ردوکس سلول، تثبیت فسفولیپیدهای غشاء، تنظیم pH سلول، حفظ پروتئین ها و محافظت از آنزیم ها در مقابل تجزیه شدن نقش مهمی دارد. در تنش کم آبی، تولید پروتئین های دهیدرین تحریک می شود. این پروتئین ها مانع از دست دهی آب بیش تری در گیاه می شوند (Luo et al., 2010). همچنین پرولین می تواند به عنوان منبع نیتروژن و کربن در گیاهان تحت تنش خشکی عمل کرده و تحمل گیاهان را در برابر تنش افزایش دهد (Yang et al., 2021). نانوذرات روی با تجمع تنظیم کننده های اسمزی از جمله پرولین و قندهای مورد نیاز برای تنظیم کارکرد اسمزی، به تثبیت کلروپلاست و ساختارهای میتوکندری در گیاهان تحت تنش خشکی کمک کرده، در نتیجه کارایی فتوسنتز را افزایش می دهند (Sun et al., 2020; Umair et al., 2020).

اثر متقابل تنش کم آبیاری و محلول پاشی نانوذرات اکسید روی نشان داد، تنش کم آبیاری، باعث افزایش در میزان فعالیت آنزیم های کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز شد. در تیمار ۲۰ درصد آب قابل

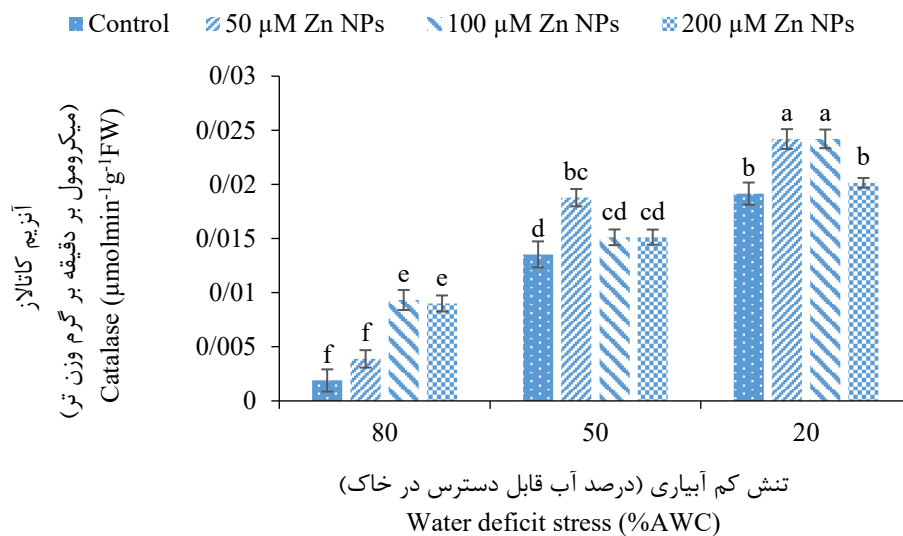
کلروفیل می گردد (Ali et al., 2017). از دیگر دلایل کاهش محتوای کلروفیل، مصرف گلوتامات به عنوان پیش ماده برای بیوسنتز پرولین است (Luo et al., 2010). در پژوهش حاضر نیز تنش خشکی باعث افزایش قابل توجهی در محتوای پرولین گیاهان تحت تنش شد. تأثیر مفید نانوذرات روی در کاهش اثرات تنش خشکی در گیاهان گزارش شده است (Seleiman et al., 2023; Alabdallah et al., 2021; Semida et al., 2021; Sun et al., 2020). تحقیقات گذشته بیان کردند که نانوذرات فعالیت فتوسنتزی، محتوای کلروفیل، سرعت تعرق، هدایت روزنه ای و کارایی مصرف آب فتوسنتزی را در گیاهان ذرت (Sun et al., 2020) و پروانش (Ranjbari et al., 2016; Amirjani et al., 2020) افزایش می دهد. با توجه به حضور عنصر روی در آنزیم کربونیک انهدراز (موجود در بافت های فتوسنتزی)، چرخه بیوسنتز کلروفیل و فعالیت هیدرولیتیکی اندامک های مهم سلولی مانند کلروپلاست، میتوکندری، سیتوپلاسم و فضای آپوپلاستی (Sun et al., 2020)، کاربرد این عنصر می تواند باعث افزایش در محتوای کلروفیل و عملکرد گیاه شود. همچنین عنصر روی به وسیله محافظت از گروه سولفیدریل و تشکیل پورفوبیلینوژن (به عنوان پیش ماده ساخت کلروفیل) باعث سنتز کلروفیل می شود (Etehadnejad and Aboutalebi, 2014). بنابراین عنصر روی نقش مؤثری در فرآیندهای فیزیولوژیکی و برخی فعالیت های سلولی مانند فعالیت آنزیم ها، متابولیسم کربوهیدرات ها و نوکلئیک اسید، فتوسنتز برگ، جذب دی اکسید کربن و بهبود انتقال مواد فتوسنتزی و قندها دارد (Alabdallah et al., 2021; Sun et al., 2020).

### سیستم دفاع غیر آنزیمی و آنزیمی

تجزیه واریانس داده ها نشان داد اثر ساده تنش کم آبیاری، اثر ساده محلول پاشی نانوذرات اکسید روی و همچنین اثر متقابل تنش کم آبیاری × محلول پاشی نانوذرات اکسید روی بر غلظت پرولین و فعالیت آنزیم های کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز معنی دار بود (جدول ۷). بررسی اثر مقایسه متقابل تنش کم آبیاری و محلول پاشی نانوذرات اکسید روی

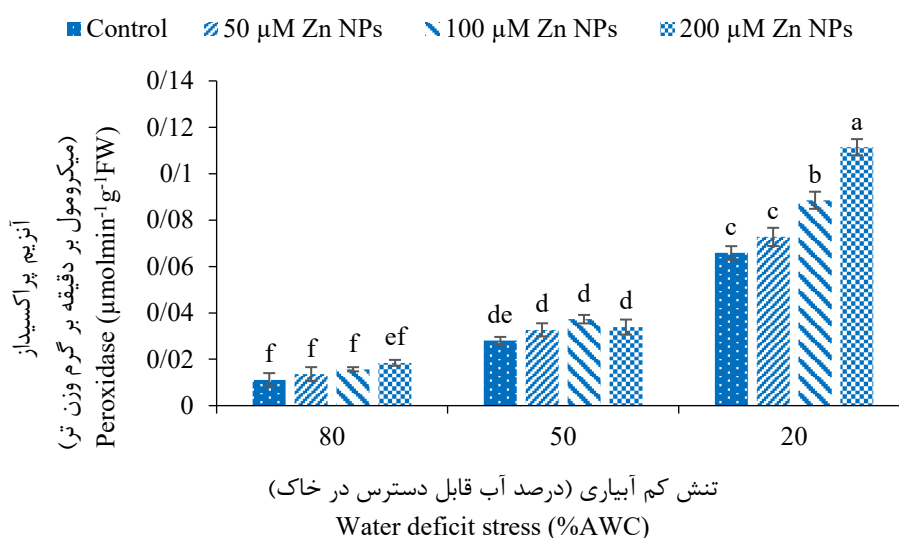
شد. آنزیم‌های پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز نیز به ترتیب در غلظت‌های ۲۰۰ و ۵۰ میکرومولار نانوذرات اکسید روی در سطح تنش ۲۰ درصد آب قابل دسترس، بیشترین میزان فعالیت (به ترتیب ۸۹۹ و ۶۴۵ درصد افزایش) را در مقایسه با تیمار شاهد نشان دادند. تیمار شاهد نیز کمترین میزان فعالیت آنزیم‌های مربوطه را نشان داد (شکل ۱، ۲ و ۳).

دسترس، بیشترین میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز (به ترتیب ۹۶۳، ۴۹۰ و ۲۰۳ درصد افزایش) به دست آمد. نانوذرات اکسید روی نیز در برخی غلظت‌ها بسته به سطح تنش، منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های مذکور شد. در مجموع بیشترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در غلظت ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار نانوذره اکسید روی (به ترتیب ۱۱۷۹ و ۱۲۳۸ درصد افزایش) در مقایسه با تیمار شاهد ثبت



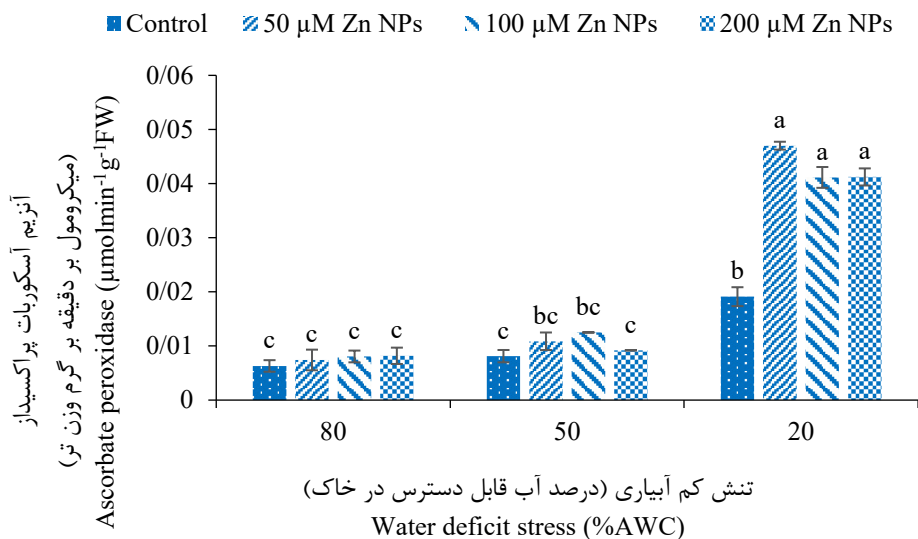
شکل ۱. اثر متقابل تنش کم آبیاری و نانوذرات اکسید روی بر فعالیت آنزیم کاتالاز گل پروانش

**Fig 1. Interaction effects of the water deficit stress and zinc oxide nanoparticles on catalase enzyme activity in periwinkle**



شکل ۲. اثر متقابل تنش کم آبیاری و نانوذرات اکسید روی بر فعالیت آنزیم پراکسیداز گل پروانش

**Fig 2. Interaction effects of the water deficit stress and zinc oxide nanoparticles on peroxidase enzyme activity in periwinkle**



شکل ۳. اثر متقابل تنش کم آبیاری و نانوذرات اکسید روی بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز گل پروانش

**Fig 3. Interaction effects of the water deficit stress and zinc oxide nanoparticles on ascorbate enzyme activity in periwinkle**

بعد، پاک‌سازی پراکسید هیدروژن توسط آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز و پراکسیداز انجام می‌شود (Kapoor et al., 2020). همچنین عنصر روی می‌تواند با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر سوپر اکسید دیسموتاز، کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز، از تجمع و آسیب پراکسید هیدروژن اکسیداتیو ایجاد شده به وسیله تنش خشکی تا حدودی جلوگیری کند (Semida et al., 2021; Sun et al., 2020). عنصر روی در القای بیان ژن‌های مسئول سنتز پروتئین‌ها و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مؤثر است و در مواردی حتی به‌عنوان کوفاکتور این دسته از آنزیم‌ها نیز محسوب می‌شود (Semida et al., 2021; Tsonev et al., 2012). تحقیقات رئیسی ساداتی و همکاران (Raeesi et al., 2021) در مطالعه‌ی الگوی بیان عوامل رونویسی در گندم تحت تنش خشکی و تأثیر نانوذره روی نشان داد کاربرد این عنصر با افزایش بیان ژن ZIP1 و HMA2 و کاهش اثرات رادیکال‌های آزاد تولید شده، تحمل گیاه به تنش خشکی را افزایش می‌دهد. در واقع افزایش فعالیت آنزیم‌هایی آنتی‌اکسیدانی مختلف مانند کاتالاز و پراکسیداز یک پاسخ سازگار یافته در برابر تنش اکسیداتیو به‌شمار می‌رود (Ali et al., 2017).

تنش خشکی در گیاهان می‌تواند با تجمع انواع اکسیژن واکنش‌گر مانند آنیون سوپراکسید، رادیکال‌های هیدروکسیل، اکسیژن منفرد و پراکسید هیدروژن و راه‌اندازی واکنش‌های پراکسیداتیو، به غشاء سلولی و ماکرومولکول‌های ضروری مانند رنگدانه‌های فتوسنتزی، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و لیپیدها خسارت وارد کرده و منجر به تشکیل محصولات سمی نظیر مالون دی‌آلدهید شود (Laxa et al., 2019). از طرفی، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز در شرایط تنش خشکی، باعث کاهش محتوای رادیکال‌های آزاد اکسیژن در سلول‌های گیاهی می‌شود (Kapoor et al., 2020). تحقیقات مختلف تأثیر تنش خشکی در افزایش فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی را روی گیاهان پروانش (Sepahri et al., 2025; Zomorodi et al., 2022)، مریم‌گلی (Beiranvand et al., 2023) و شمعدانی معطر (Yasemi et al., 2024) را نشان داده‌اند. در پژوهش حاضر نیز تنش کم آبیاری باعث افزایش فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی از جمله پراکسیداز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز شد. آنزیم سوپراکسید دیسموتاز اولین خط دفاعی بر علیه رادیکال‌های فعال اکسیژن در سلول است که رادیکال سوپراکسید را به پراکسید هیدروژن و اکسیژن مولکولی کاتالیز می‌کنند. در مراحل

- and Chinaberry (*Melia azedarach* L.) at various ages. *Journal of Drought and Climate change Research*, 1(4), 87-104. [In Persian]. <http://doi.org/10.22077/JDCR.2023.6925.1047>.
- Bates, L. S., Waldren, R. P. A. & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39(1), 205-207. <http://doi.org/10.1007/BF00018060>.
- Beiranvand, F., Zahedi, B. & Rezaei Nejad, A. (2023). Investigation of the effect of selenium foliar application on morphophysiological and biochemical characteristics of ornamental salvia under irrigation regime. *Plant Process and Function*, 11(47), 323-339. [In Persian]. <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1525-fa.html>.
- Chance, B. & Maehly, A.C. (1955). Assay of catalase and peroxidase. In: Colowick, S.P., and N.D. Kaplan (eds). *Methods in enzymology*. Academic Press, New York, 764-775.
- Chandrashekar, H. K., Singh, G., Kaniyassery, A., Thorat, S. A., Nayak, R., Murali, T. S. & Muthusamy, A. (2023). Nanoparticle-mediated amelioration of drought stress in plants: a systematic review. *3 Biotech*, 13(10), 336. <http://doi.org/10.1007/s13205-023-03751-4>
- Eslami Senoukesh, F., Zarandi-Miandoab, L., Lotfi, R., Abbasi, A. & Chaparzadeh, N. (2024). The effect of main components of climate change on photosynthetic efficiency and grain yield of wheat genotypes under rainfed conditions. *Journal of Drought and Climate change*
- نتیجه‌گیری**
- نتایج نشان داد تنش کم‌آبیاری، باعث کاهش قابل توجهی در رشد گیاه پروانش شد و سطح تنش کم‌آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس، بیشترین تأثیر منفی را بر ویژگی‌های رویشی و زایشی نشان داد. کاربرد نانوذرات اکسید روی به‌ویژه در غلظت‌های ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار از طریق افزایش فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیر آنزیمی، کنترل تبادلات گازی، جلوگیری از تخریب رنگدانه‌های فتوسنتزی و افزایش رشد ریشه، باعث بهبود روابط آبی گیاه و در نتیجه افزایش توانایی تحمل به تنش کم‌آبیاری و بهبود مولفه‌های رشدی در گیاهان پروانش شد.
- منابع**
- Alabdallah, N. M., Hasan, M. M., Hammami, I., Alghamdi, A. I., Alshehri, D. & Alatawi, H. A. (2021). Green synthesized metal oxide nanoparticles mediate growth regulation and physiology of crop plants under drought stress. *Plants*, 10(8), 1730. <http://doi.org/10.3390/plants10081730>.
- Ali, F., Bano, A. & Fazal, A. (2017). Recent methods of drought stress tolerance in plants. *Plant Growth Regulation*, 82(3), 363-375. <http://doi.org/10.1007/s10725-017-0267-2>.
- Amirjani, M., Askary M. & Askari, F. (2016). Investigation of change pigment level, metal uptake and growth characteristics of Madagascar periwinkle (*Catharantus roseus*) by nano zinc oxide. *Plant Process and Function*, 4(14), 17-30. [In Persian]. <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-146-fa.html>.
- Asgari, M., Javanmiri Pour, M., Etemad, V. & Ahmadaali, Kh. (2024). Effect of drought stress on morphological characteristics of Tehran pine (*Pinus eldarica* Medw.)

- to increase crop production. *Applied sciences*, 10(16), 5692. <http://doi.org/10.3390/app10165692>.
- Karimian, Z. & Samiei, L. (2023). Zinc oxide nanoparticles efficiently enhance drought tolerance in *Dracocephalum kotschyi*. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1134567. <http://doi.org/10.3389/fpls.2023.1134567>.
- Laxa, M., Liebthal, M., Telman, W., Chibani, K. & Dietz, K. J. (2019). The role of the plant antioxidant system in drought tolerance. *Antioxidants*, 8(4), 94. <http://doi.org/10.3390/antiox8040094>.
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophyll and carotenoids—pigments of photosynthetic biomembranes. Colowick SP, Kaplan NO *Methods in Enzymology*. 148.
- Luo, Y., Zhao, X., Zhou, R., Zuo, X., Zhang, J. & Li, Y. (2011). Physiological acclimation of two psammophytes to repeated soil drought and rewatering. *Acta Physiologiae Plantarum*, 33(1), 79-91. <http://doi.org/10.1007/s11738-010-0519-5>.
- 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. <http://doi.org/10.1006/anbo.1996.0134>.
- Ma, H., Williams, P. L. & Diamond, S. A. (2013). Ecotoxicity of manufactured ZnO nanoparticles—a review. *Environmental pollution*, 172, 76-85. <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.08.011>.
- MacAdam, J.W., Nelson, C.J. & Sharp, R.E. (1992). Peroxidase activity in the leaf elongation zone of tall fescue: I. *Research*, 1(4), 1-16. [In Persian]. <http://doi.org/10.22077/JDCR.2023.6609.1033>.
- Etehadnejad, F. & Aboutalebi, A. (2014). Evaluating the effects of foliar application of nitrogen and zinc on yield increasing and quality improvement of apple cv.'Golab Kohanz'. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*, 4(2), 125-129.
- Farahi, M. H. & Jahroomi, A. A. (2018). Effect of pre-harvest foliar application of polyamines and calcium sulfate on vegetative characteristics and mineral nutrient uptake in *Rosa hybrida*. *Journal of Ornamental Plants*, 8(4), 241-253. <https://sid.ir/paper/242585/en>
- Gatea Khshan, S., Fekri, M., Mohammadi-Nejad, Gh., Abdulhay Desher, M. & Boroomand, N. (2025). The role of potassium and zinc fertilizer and irrigation period in wheat production in Basrah, Iraq. *Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)*, 3(10), 47-56. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9044.1123>.
- Hashemi, S. (2020). Effect of Nanoparticles on Lipid. *Advances in lipid metabolism*, 57. <http://doi.org/10.5772/intechopen.88202>.
- Jaleel, C.A., Gopi, R. & Panneerselvam, R. (2008). Growth and photosynthetic pigments responses of two varieties of *Catharanthus roseus* to triadimefon treatment. *Comptes rendus. Biologies*, 331(4), 272-277. <http://doi.org/10.1016/j.crv.2008.01.004>.
- 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

- of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(2), 233-250. [In Persian]. doi: 10.22034/saps.2021.13106.
- Ranjbari, S., Chamani, E., Maleki Lajayer, H., Adel Mahmood Abad, H. & Porbeyrami Hir, Y. (2020). Effect of nano particles and sulfate of zinc on growth and quality of petunia (*Petunia Hybrida* var Parade) grown in various moisture conditions. *Horticultural Plants Nutrition*, 3(1), 163-174. [In Persian]. <http://doi.org/10.22070/hpn.2020.5083.1069>.
- Rashwan, B., Ali, A. & Abo Zaed, S. (2016). Effect of organic and bio-fertilization as partial substitute for mineral nitrogen fertilization on wheat plants. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 7(5), 335-344. <http://doi.org/10.21608/JSSAE.2016.39645>.
- Raza, M. A. S., Muhammad, F., Farooq, M., Aslam, M. U., Akhter, N., Toleikiené, M. & Iqbal, R. (2025). ZnO-nanoparticles and stage-based drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.): effect on morpho-physiology, nutrients uptake, grain yield and quality. *Scientific Reports*, 15(1), 5309. <http://doi.org/10.1038/s41598-025-89718-2>
- 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. <http://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x>.
- Sabir, A. & Sari, G. (2019). Zinc pulverization alleviates the adverse effect of water deficit on plant growth, yield and nutrient acquisition in grapevines (*Vitis* Spatial distribution of ionically bound peroxidase activity in genotypes differing in length of the elongation zone. *Plant Physiology*, 99(3), 872-878. <http://doi.org/10.1104/pp.99.3.872>.
- Nadergoli, M. S., Yarnia, M. & Khoei, F. R. (2011). Effect of zinc and manganese and their application method on yield and yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris* L. CV. Khomein). *Middle East Journal of Scientific Research*, 8(5), 859-865.
- Najizadeh, A. & Khoshgoftarmanesh, A. H. (2019). Effects of foliar applied zinc in the form of ZnSO<sub>4</sub> and Zn-amino acid complexes on pistachio nut yield and quality. *Journal of Plant Nutrition*, 42(18), 2299-2309. <http://doi.org/10.1080/01904167.2019.1655043>
- Nakano, Y. & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and cell physiology*, 22(5), 867-880. <http://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>.
- Pandya, P., Kumar, S., Sakure, A. A., Rafaliya, R., & Patil, G. B. (2023). Zinc oxide nanoprimer elevates wheat drought tolerance by inducing stress-responsive genes and physio-biochemical changes. *Current Plant Biology*, 35, 100292. <http://doi.org/10.1016/j.cpb.2023.100292>
- Raeesi Sadati, S. Y., Jahanbakhsh Godekahriz, S., Ebadi, A. & Sedghi, M. (2021). Effect of zinc oxide nanoparticles on some biochemical and morphological characteristics of wheat under drought conditions. *Journal*

- drought stress via modulating the plant water use and carbohydrate metabolism in maize. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(2), 245-259. <http://doi.org/10.1080/03650340.2020.1723003>.
- Tiwari, H., Agarwal, R. & Bhatt, P. (1998). Photosynthesis, stomata resistance and related characteristics as influenced by potassium under normal water supply and water stress condition in rice. *Indian Plant Physiology*, 3, 314-316.
- Tsonev, T. & Cebola Lidon, F. J. (2012). Zinc in plants-an overview. *Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA)*, 24(4), 322-333 <http://ejfa.info>.
- Umair Hassan, M., Aamer, M., Umer Chattha, M., Haiying, T., Shahzad, B., Barbanti, L. & Guoqin, H. (2020). The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture*, 10(9), 396. <http://doi.org/org/10.3390/agriculture10090396>.
- Wang, F., Zeng, B., Sun, Z. & Zhu, C. (2009). Relationship between proline and Hg<sup>2+</sup>-induced oxidative stress in a tolerant rice mutant. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 56, 723-731. <http://doi.org/10.1007 / s00244-008-9226-2>.
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z. & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7(3), 50. <http://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>.
- Yasemi, A., Rezaei Nejad, A., Mousavi-Fard, S. & Beiranvand, F. (2024). Effect of pinching and thidiazuron on morphophysiological *vinifera* L.). *Scientia Horticulturae*, 244, 61-67. <http://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.035>.
- Seif, Z., Etemad, V. & Javanmiri Pour, M. (2024). Effect of drought and salinity stress on chlorophyll and carotenoid content in russian olive leaves (*Elaeagnus angustifolia* L.). *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(3), 32-48. [In Persian] <http://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7645.1069>.
- Seleiman, M. F., Al-Selwey, W. A., Ibrahim, A. A., Shady, M. & Alsadon, A. A. (2023). Foliar applications of ZnO and SiO<sub>2</sub> nanoparticles mitigate water deficit and enhance potato yield and quality traits. *Agronomy*, 13(2), 466. <http://doi.org/10.3390/agronomy13020466>.
- Semida, W. M., Abdelkhalik, A., Mohamed, G. F., Abd El-Mageed, T. A., Abd El-Mageed, S. A., Rady, M. M. & Ali, E. F. (2021). Foliar application of zinc oxide nanoparticles promotes drought stress tolerance in eggplant (*Solanum melongena* L.). *Plants*, 10(2), 421. <http://doi.org/10.3390/plants10020421>.
- Sepehri, B., Tohidi-Moghadam, H.R., Ghooshchi, F., Oveysi, M. & Kasraie, P. (2025). Evaluation of metallic nanoparticles and plant growth regulators affecting *Catharanthus roseus* L. performance under water-deficit stress. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 12(3), 677-692. <http://doi.org/10.22059/ijhst.2024.368022.726>.
- Sun, L., Song, F., Zhu, X., Liu, S., Liu, F., Wang, Y. & Li, X. (2021). Nano-ZnO alleviates

and biochemical properties of pelargonium graveolens under water deficit stress. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 55(2), 215-240. [In Persian]. <http://doi.org/10.22059/ijhs.2023.363042.2117>.

Zhang, N., Zhao, B., Zhang, H. J., Weeda, S., Yang, C., Yang, Z. C. & Guo, Y. D. (2013). Melatonin promotes water-stress tolerance, lateral root formation, and seed germination in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Journal of Pineal research*, 54(1), 15-23. <http://doi.org/10.1111/j.1600-079X.2012.01015.x>.

Zomorodi, N., Rezaei Nejad, A., Mousavi-Fard, S., Feizi, H., Tsaniklidis, G. & Fanourakis, D. (2022). Potency of titanium dioxide nanoparticles, sodium hydrogen sulfide and salicylic acid in ameliorating the depressive effects of water deficit on periwinkle ornamental quality. *Horticulturae*, 8(8), 675. <http://doi.org/10.3390/horticulturae8080675>.