

Effect of Thidiazuron on the Morphophysiological and Biochemical Characteristics of *Catharanthus roseus* L. under Water Deficit Stress

M. Ghasemi Kamalvand¹, A. Rezaei Nejad^{1*}, F. Beiranvand¹, N. Zomorodi¹

1- Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran

(*- Corresponding author's Email: rezaeinejad.h@lu.ac.ir)

Received: 07 September 2025
Revised: 29 October 2025
Accepted: 18 November 2025
Available Online: 18 November 2025

How to cite this article:

Ghasemi Kamalvand, M., Rezaei Nejad, A., Beiranvand, F., & Zomorodi, N. (2026). Effect of Thidiazuron on the morphophysiological and biochemical characteristics of *Catharanthus roseus* L. under water deficit stress. *Journal of Horticultural Science*, 40(3), 501-521. (In Persian).
<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.95290.1456>

Introduction

The growth and development of plants in arid and semi-arid regions are restricted primarily due to limited water availability. Under these conditions, the physiological and biochemical characteristics of plants undergo significant changes. In these conditions, due to the imbalance of hormones, plant growth decreases. Therefore, the use of plant growth regulators can be an effective factor in improving tolerance to abiotic stresses. Thidiazuron is known to activate stress-responsive genes and promote the accumulation of stress-related signaling molecules, including abscisic acid and proline. *Catharanthus roseus* is an evergreen ornamental-medicinal plant that is very popular for planting in pots and green spaces.

Materials and Methods

The experiment was conducted as a factorial experiment in a completely randomized design with two factors and four replications in the research greenhouses of Lorestan Agricultural College during the spring and summer of 2022. The first factor was water deficit stress at three levels of 80 (control), 50, and 20% available water content in soil, and the second factor was foliar application of thidiazuron at three levels of 0 (control), 2.5, and 5 mg.L⁻¹. Water deficit stress was imposed and maintained using a pressure plate device and the gravimetric method. Thidiazuron was applied as a foliar spray. Three months after the application of water deficit stress, growth traits (Such as plant height, stem diameter, leaf number and area, flower diameter, root diameter and volume, fresh and dry weight of shoots and roots), gas exchange parameters (photosynthesis rate, transpiration rate, stomatal conductance, mesophyll conductance, and intracellular CO₂ concentration) and biochemical characteristics (relative leaf water content, electrolyte leakage, photosynthetic pigments, malondialdehyde and peroxidase and ascorbate peroxidase enzyme activities) were measured.

Results and Discussion

The results indicated that higher levels of water deficit stress significantly reduced plant growth, gas exchange rates, photosynthetic pigment content, and relative water content, while significantly increasing root length, photosynthetic water use efficiency, electrolyte leakage, malondialdehyde content, and antioxidant enzyme activity in *Catharanthus*. Foliar application of thidiazuron alleviated the negative impacts of water deficit stress by enhancing antioxidant enzyme activity, improving gas exchange, and maintaining better plant water balance. These results indicate that water deficit stress has detrimental effects on both vegetative and reproductive growth in *Catharanthus roseus*. However, thidiazuron application reduced these effects and improved plant tolerance to stress by promoting root growth and increasing antioxidant enzyme activity. Water



Authors retain the copyright. 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.2025.95290.1456>

deficit limits plant growth by reducing shoot and root development, which decreases plant dry weight. This reduction is likely due to decreased photosynthesis, reduced cell expansion, and inhibited cell division. Thidiazuron may counteract these effects by promoting cell division, enhancing chlorophyll accumulation, stimulating the biosynthesis of photosynthetic pigments, and delaying leaf senescence through cytokinin stimulation. Drought stress also limits membrane integrity, pigment content, lipid biosynthesis, and hormonal balance by reducing gas exchange and carbon dioxide concentration, thereby reducing plant growth. On the other hand, thidiazuron, known as a cytokinin, has dual auxin and cytokinin effects and may facilitate the accumulation or synthesis of endogenous plant growth hormones, in fact, thidiazuron acts through adenine-type cytokinin activity either by stimulating endogenous cytokinin or by binding to cytokinin receptors. It also enhances plant growth by activating enzymatic and non-enzymatic antioxidant defense systems.

Conclusion

The results of the present experiment showed that thidiazuron enhances plant resistance to water deficit stress by stimulating root growth, enhancing gas exchange, and boosting enzymatic antioxidant activity. However, further research is needed to optimize its application for managing water deficit stress in *Catharanthus roseus*.

Acknowledgement

This article is based on a master's thesis proposal. The authors would like to thank Lorestan University and the Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, for their support.

Keywords: Drought, Hormone, Mesophyll conductance, Ornamental plants, Photosynthesis

تأثیر تیديازورون بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه پروانش (*Catharanthus roseus* L.) تحت تنش کم‌آبیاری

مینا قاسمی کمالوند^۱ - عبدالحسین رضایی نژاد^{۱*} - فرهاد بیرانوند^۱ - ناهید زمردی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

چکیده

هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر محلول‌پاشی تیديازورون بر مؤلفه‌های رشدی و ویژگی‌های فیزیو-بیوشیمیایی گل پروانش (*Catharanthus roseus* L.) تحت شرایط تنش کم‌آبیاری بود. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اول شامل تنش کم‌آبیاری در سه سطح ۸۰ (شاهد)، ۵۰ و ۲۰ درصد آب قابل دسترس و عامل دوم شامل محلول‌پاشی تیديازورون در سه سطح صفر (شاهد)، ۲/۵ و ۵ میلی‌گرم در لیتر بود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که افزایش سطح تنش کم‌آبیاری باعث کاهش معنی‌دار مؤلفه‌های رشدی گیاه (مانند ارتفاع بوته، قطر ساقه، تعداد و سطح برگ، قطر گل، قطر و حجم ریشه و وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه)، سرعت تبادل گاز (سرعت فتوسنتز و تعرق، هدایت روزنه‌ای و مزوفیلی و غلظت دی‌اکسید کربن درون سلولی)، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوای نسبی آب برگ شد، از طرفی باعث افزایش قابل توجه طول ریشه، کارایی مصرف آب فتوسنتزی، نشت الکترولیت، میزان مالون دی‌آلدئید و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از جمله پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز گردید. محلول‌پاشی تیديازورون باعث افزایش شاخص‌های رشدی گیاه (اندام‌های هوایی و ریشه)، بهبود تبادلات گاز، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، شاخص ثبات کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شد و در مقابل نشت الکترولیت و محتوای مالون دی‌آلدئید را کاهش داد. به‌طور کلی، نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که تنش کم‌آبیاری دارای اثرات منفی بر رشد رویشی و زایشی در پروانش می‌باشد. با این وجود، کاربرد تیديازورون با بهبود رشد ریشه و افزایش فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی، اثرات تنش کم‌آبیاری را کاهش و مقاومت گیاه به تنش را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: خشکی، فتوسنتز، گیاهان زینتی، هدایت مزوفیلی، هورمون

مقدمه

کاهش آسیب ناشی از تنش است؛ زیرا فیتوهورمون‌ها می‌توانند فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه را تعدیل کنند و نقش مهمی در بهبود سیستم‌های دفاعی گیاه در برابر شرایط نامطلوب محیطی داشته باشند (Sepehri et al., 2025). در گیاهان، هورمون‌های گیاهی، فعالیت‌های مختلف سلولی و پاسخ گیاهان به تنش‌های زیستی و غیرزیستی را تنظیم می‌کنند (Karnwal et al., 2023; Khan & Singh, 2021; Ali et al., 2018).

تیديازورون (1-phenyl-3-(1,2,3-thiadiazol-5-yl) TDZ؛ urea)، یک تنظیم‌کننده رشد گیاهی با فعالیت شبه‌سایتوکینینی (فاقد حلقه پورین-مشتق اوره) است که بر فیزیولوژی گیاه مانند تغذیه سلولی تأثیر می‌گذارد و می‌تواند تعادل هورمون‌های درون‌زا و برون‌زا را حفظ کند (Arlı et al., 2024). تیديازورون به دلیل مقاومت به اکسیدازهای درونی سیتوکینین در داخل بافت گیاهان ماندگاری

تغییرات اقلیمی، مشکل خشکسالی را تشدید می‌کند و می‌تواند دامنه آن را در مناطق خشک و نیمه‌خشک گسترش دهد و رشد و نمو گیاهان را محدود کند (Chieb & Gachomo, 2023; Liu et al., 2022). بنابراین برای مدیریت بهتر منابع آبی (به‌خصوص در فضای سبز) باید به توسعه راهبردهای جایگزین پایدار و کم‌اثر بر محیط زیست جهت مقابله با اثرات تنش خشکی توجه بیشتری گردد (Chieb & Gachomo, 2023). در این میان، تیمار گیاهان با تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی، روشی مؤثر برای بهبود مقاومت گیاه و

۱- گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران
(Email: rezaeinejad.h@lu.ac.ir)
(*)- نویسنده مسئول
<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.95290.1456>

مواد و روش‌ها

آزمایش حاضر به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه عامل و چهار تکرار در گلخانه‌های پژوهشی دانشکده کشاورزی لرستان (دمای روزانه ۲۸-۲۰ درجه سانتی‌گراد، دمای شبانه ۲۰-۱۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۷۰-۶۰ درصد و شدت نور ۵۰۰-۴۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه) در بهار و تابستان ۱۴۰۱ انجام شد. عامل اول شامل تنش کم‌آبیاری در سه سطح ۸۰ (شاهد)، ۵۰ و ۲۰ درصد آب قابل دسترس در خاک، و عامل دوم، محلول‌پاشی تیدیاژورون در سه سطح صفر (شاهد)، ۲/۵ و ۵ میلی‌گرم در لیتر بود. بذره‌های F₁ (شرکت پاکان بذر اصفهان) در گلدان‌هایی (۱/۵ کیلوگرمی، هر گلدان حاوی یک گیاه) شامل مخلوط ماسه، خاک زراعی و کود گوسفندی پوسیده گندزدایی‌شده به نسبت مساوی ۱:۱:۱ (با بافت خاک لومی رسی-شنی، ظرفیت زراعی ۲۳/۲۲ درصد، نقطه پژمردگی ۱۷/۶۶ درصد، حاوی ۰/۰۸۳ درصد نیتروژن، فسفر قابل جذب، پتاسیم، منیزیم و آهن نیز به ترتیب ۱/۸۶، ۰/۲۲، ۰/۴۵۲ و ۰/۰۲۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) کشت شدند. تیمار کم‌آبیاری با کمک دستگاه صفحات فشاری و روش وزنی محاسبه و اعمال شد (Zomorodi et al., 2022). همچنین اعمال تیمار تیدیاژورون (با فرمول: C₉H₈N₄O₅ و وزن مولکولی: ۲۲۰/۲۵ گرم بر مول) به صورت محلول‌پاشی در دو مرحله با فاصله زمانی در زمان چهار برگی گیاهان هم‌زمان با اعمال تنش کم‌آبیاری انجام شد. گلدان‌های شاهد نیز با آب مقطر محلول‌پاشی گردید (Yasemi et al., 2024). سه ماه بعد از اعمال تنش کم‌آبیاری ویژگی‌های زیر اندازه‌گیری شد (Zomorodi et al., 2022).

شاخص‌های رشدی

ویژگی‌های ارتفاع گیاه، قطر ساقه، تعداد برگ، سطح برگ، وزن تر و خشک ساقه، برگ، گل و ریشه، طول (با استفاده از خط‌کش برحسب سانتی‌متر)، حجم (از طریق اختلاف حجم ایجادشده پس از قرار گرفتن ریشه در حجم مشخصی از آب برحسب سانتی‌مترمکعب) و قطر (با استفاده از دستگاه دیجیتالی کولیس برحسب میلی‌متر) ریشه و گل، و شاخص تحمل به تنش (وزن خشک کل به وزن خشک شاهد) (معادله ۱) (Fischer & Maurer, 1998) اندازه‌گیری شدند. زمان ظهور غنچه گل، مصادف با مشاهده اولیه غنچه گل از زمان کاشت بذر در نظر گرفته شد (Zomorodi et al., 2022). طول عمر گل روی بوته (واحد برحسب روز)، فاصله زمانی بین باز شدن گل تا پژمردگی آن در نظر گرفته شد (Zomorodi et al., 2022). برای تعیین وزن خشک اندام‌های گیاهی (ساقه، برگ،

بالایی دارد و همچنین فعالیت سیتوکینین اکسیداز/دهیدروژناز را مهار می‌کند که می‌تواند منجر به افزایش تجمع پورین سیتوکینین در بافت گیاهان شود (Dewir et al., 2018). از طرفی دیگر، تیدیاژورون، ژن‌های مرتبط با تنش را فعال و تجمع مولکول‌های سیگنال‌دهی تنش از جمله اسید آبسزیک و پرولین را افزایش می‌دهد (Dewir et al., 2018). تأثیر منفی تنش کم‌آبیاری بر رشد و نمو گیاهان زینتی از جمله شمعدانی معطر (*Pelargonium graveolens*) (Yasemi et al., 2024) و پروانش (*Catharanthus roseus* L.) (Zomorodi et al., 2022) گزارش شده است. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که تیدیاژورون علاوه بر تحریک رشد در شرایط معمول، در تعدیل پاسخ‌های گیاهان به تنش خشکی نیز مؤثر است. تیدیاژورون از طریق تعدیل مسیرهای هورمونی (به‌ویژه سیتوکینین، اکسین، اتیلن و اسید آبسزیک) (Wang et al., 2025; Li et al., 2022; Erland et al., 2020) می‌تواند اثرات تنش خشکی را بر گیاهان کاهش دهد. در شرایط کم‌آبی، اعمال تیدیاژورون منجر به افزایش شاخص‌های رشد، حفظ محتوای نسبی آب برگ (Yasemi et al., 2024; Allahbakhsh et al., 2020)، بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (Erland et al., 2020; Yang et al., 2019)، ترکیبات فنلی (Allahbakhsh et al., 2020) و کاهش پراکسیداسیون غشاهای می‌شود. مطالعات یاسمی و همکاران (Yasemi et al., 2024) نشان داد که محلول‌پاشی تیدیاژورون در گیاهان شمعدانی معطر تحت شرایط تنش کم‌آبیاری باعث افزایش ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی، تعداد برگ، رشد ریشه، غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی، محتوای نسبی آب برگ و عملکرد اسانس و کاهش میزان نشت الکترولیت و محتوای مالون دی‌آلدئید شد و در نتیجه مقاومت گیاهان به تنش کم‌آبیاری را افزایش داد. مطالعه لی و همکاران (Li et al., 2022) نشان داد که تیدیاژورون با تعدیل مسیرهای هورمونی از جمله اتیلن، اکسین و آبسزیک اسید که در پاسخ گیاه به تنش خشکی دخالت دارند، می‌تواند در مدیریت تعادل هورمونی گیاهان تحت کم‌آبی مؤثر باشد. باین‌حال، پاسخ گیاه به تیدیاژورون به غلظت، نوع گونه، شدت تنش و نحوه کاربرد آن بستگی دارد (Wang et al., 2024; Jiang et al., 2025). لذا هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر محلول‌پاشی تیدیاژورون بر شاخص‌های گل‌دهی و مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گل پروانش تحت شرایط تنش کم‌آبیاری است. پروانش (پروانش ماداگاسکاری) با نام علمی *Catharanthus roseus* (L.) G. Don. متعلق به خانواده خرزهره (Apocynaceae)، گیاهی زینتی-دارویی همیشه سبز است که محبوبیت زیادی برای کاشت در گلدان و فضای سبز دارد (Zomorodi et al., 2022).

اتاق و در داخل لوله‌های شیشه‌ای درب‌دار حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر قرار گرفت. هدایت الکتریکی اولیه به‌وسیله دستگاه EC متر قرائت شد. نمونه‌ها در اتوکلاو و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفت و پس از سرد شدن نمونه‌ها، هدایت الکتریکی ثانویه قرائت گردید. در نهایت درصد نشت الکترونیک برگ با استفاده از معادله ۵ محاسبه شد.

$$EL (\%) = (E1/E2) \times 100 \quad (5)$$

که در آن، EL: نشت الکترولیت، E1: هدایت الکتریکی اول و E2: هدایت الکتریکی دوم است.

میزان مالون دی‌آلدئید نیز براساس روش وانگ و همکاران (Wang et al., 2009) اندازه‌گیری 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 اسید تیوباربیتریک (حل‌شده در اسید تری‌کلرو استیک) به آن اضافه و در فالكون ریخته شد. به‌منظور انجام واکنش، فالكون‌ها به مدت 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 به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ گردید. جذب روشن‌آور در سه طول موج ۴۵۰، ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر (SHIMADZU, model UV-1700, Japan)، قرائت شد و سپس میزان مالون دی‌آلدئید برحسب میکرومول بر گرم وزن تر (معادله ۶) محاسبه گردید.

$$MDA = 6.45(OD532-OD600) - 0.56(OD450) \quad (6)$$

که در آن، MDA: غلظت مالون دی‌آلدئید و OD: میزان جذب در طول موج مورد نظر است.

رنگیزه‌های فتوسنتزی و شاخص ثبات کلروفیل

برای سنجش میزان کلروفیل و کاروتنوئید از روش لیختن هالر (Lichtenthaler, 1987) استفاده شد. ابتدا ۰/۱ گرم برگ توزین گردید. برگ در هاون چینی با ازت مایع خرد و با ۱۰ میلی‌لیتر استون خالص مخلوط شد. عصاره به‌دست‌آمده در فالكون ۱۵ میلی‌لیتری ریخته و به مدت ۱۵ دقیقه در دور ۴۰۰۰ سانتیفیوژ 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 گردید. در نهایت، غلظت رنگیزه‌ها با استفاده از معادله‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ محاسبه و براساس میلی‌گرم در گرم بیان گردید.

$$Chla (mg/g) = (11.24 \times A662) - (2.04 \times A645) \quad (7)$$

$$Chlb (mg/g) = (20.13 \times A645) - (4.19 \times A662) \quad (8)$$

گل گل و ریشه) نیز نمونه‌ها به آون با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت انتقال داده شدند.

$$STI (\text{Stress tolerance index}) (\%) = \quad (1)$$

$$\frac{\text{Total dry weight (g)}}{\text{Control dry weight (g)}} \times 1$$

تبادلات گازی

تبادلات گازی شامل سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق و غلظت دی‌اکسید کربن درون سلولی توسط دستگاه سنجش فتوسنتز مدل LCA4 (ADC Bioscientific, Ltd., Hoddesdon, England) اندازه‌گیری شدند. کارایی کربوکسیلاسیون (هدایت مزوفیلی) نیز از تقسیم میزان فتوسنتز به دی‌اکسید کربن درون سلولی (معادله ۲) به دست آمد (Tiwari et al., 1998). کارایی مصرف آب درون سلولی (فتوسنتزی) از طریق تقسیم مقدار فتوسنتز خالص بر تعرق (معادله ۳) محاسبه شد (Ritchie et al., 1990).

$$\text{Mesophilic conductance} (mmol.m^{-2}s^{-1}) = \quad (2)$$

$$\frac{P_n (\mu mol.m^{-2}s^{-1})}{CO_{2i} (\mu mol.mol^{-1})}$$

که در آن، Mesophilic conductance: هدایت مزوفیلی، Pn:

سرعت فتوسنتز و CO_{2i}: دی‌اکسید کربن درون سلولی است.

$$PWUE (\mu mol CO_2.mol^{-1}H_2O) = \frac{P_n (\mu mol.m^{-2}s^{-1})}{E (mmol.m^{-2}s^{-1})} \quad (3)$$

که در آن، PWUE: کارایی مصرف آب فتوسنتزی، Pn: سرعت

فتوسنتز و E: سرعت تعرق است.

ویژگی‌های فیزیوبیوشیمیایی

محتوای نسبی آب برگ، نشت الکترولیت و محتوای مالون دی‌آلدئید

اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ گیاه به‌روش ریچی و همکاران (Ritchie et al., 1990) انجام شد. پس از اندازه‌گیری وزن تر، نمونه‌های برگ به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر غوطه‌ور گردید. پس از آن، وزن تورژسانس آن اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در داخل آون و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. در نهایت محتوای نسبی آب برگ برحسب درصد با استفاده از معادله ۴ محاسبه شد.

$$RWC (\%) = (Fw - Dw) / (Tw - Sw) \quad (4)$$

که در آن، RWC: محتوای نسبی آب برگ، Fw: وزن تازه برگ،

Sw: وزن تورژسانس (اشباع) و Dw: وزن خشک برگ است.

برای تعیین نفوذپذیری غشاء سلولی طبق روش لوتس و همکاران (Lutts et al., 1996)، از برگ‌های جوان کاملاً توسعه‌یافته نمونه‌برداری گردید. نمونه‌های برگ‌ی در ابعاد یک سانتی‌متری بریده و سپس با آب مقطر شسته شد. پس از آن، به مدت دو ساعت در دمای

آن EDTA با غلظت دو میلی مولار و PVP-40 یک درصد به حجم یک لیتر رسانده شد. پس از اضافه نمودن آسکوربات با غلظت یک میلی مولار، سوسپانسیون حاصل در میکروتیوپ‌های ۱/۵ میلی لیتری ریخته و در دستگاه سانتیفریوژ یخچال دار به مدت ۲۰ دقیقه و دمای چهار درجه سانتی گراد با دور ۱۴۰۰۰ در دقیقه قرار داده شد. میزان ۵۰ میکرولیتر از روشناور حاصل جهت اندازه گیری فعالیت آنزیم آسکوربات به کار گرفته شد. در نهایت، مقدار فعالیت آنزیم برحسب میزان آب اکسیژنه غیرفعال شده در یک دقیقه در هر گرم وزن تازه بافت (معادله ۱۳) بیان شد.

$$\text{Activity (U/ml)} = \quad (13)$$

که در آن، U: واحد آنزیمی، ΔA_{240} : تفاوت میزان جذب مخلوط واکنش در زمان شروع و پایان واکنش، I: با توجه به ضریب H_2O_2 در معادله تعیین می شود که معادل ۱ می باشد، Vt: حجم مخلوط واکنش، df: فاکتور رقیق کننده، t: مدت زمان واکنش و Vs: حجم نمونه است.

تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از نرم افزار SAS (نسخه ۹/۴) و Minitab19 و مقایسه میانگین داده ها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد محاسبه شد.

نتایج و بحث

شاخص های رشدی

تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثر ساده تنش کم آبیاری و تیمدیزورون (به جز اثر تیمدیزورون بر سطح برگ) بر تمام مؤلفه های رشدی مانند ارتفاع بوته، قطر ساقه و تعداد برگ معنی دار بود (جدول ۱). اثر متقابل تنش کم آبیاری و تیمدیزورون بر شاخص های وزن تر و خشک ساقه، طول ساقه، تعداد و سطح برگ و وزن تر و خشک برگ معنی دار شد (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر ساده تنش کم آبیاری نشان داد که ارتفاع بوته، قطر و طول ساقه تحت تأثیر تنش کم آبیاری کاهش پیدا کرد (جدول ۴). سطح تنش کم آبیاری ۲۰ درصد آب قابل دسترس، کمترین مقدار ارتفاع بوته، قطر و طول ساقه (به ترتیب ۳۱/۲۵، ۳۹/۴۱، ۳۲/۲۵ و ۳۰/۴۰ درصد کاهش) را در مقایسه با شاهد نشان داد. بررسی اثر ساده تیمدیزورون بر شاخص های رشدی نشان داد که محلول پاشی تیمدیزورون باعث افزایش ارتفاع بوته، قطر و طول ساقه شد و در غلظت پنج میلی گرم، بیشترین درصد افزایش طول ساقه (۱۵/۸۰ درصد افزایش) را نسبت به شاهد نشان داد (جدول ۴). بیشترین ارتفاع بوته و قطر ساقه نیز در غلظت ۲/۵ میلی گرم در لیتر (به ترتیب ۱۴/۸۶ و ۶۱/۹۰ درصد افزایش) در مقایسه با شاهد به دست آمد. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم آبیاری × تیمدیزورون

$$\text{Total Chl (mg/g)} = 7.05 \times (A662) + 18.09 \times (A645) \quad (9)$$

$$\text{Car} = \quad (10)$$

$$1000 \times (A470 - 1.90 \times \text{Chl a} - 63.14 \times \text{Chl b}) / 214$$

که در آن، Chl a: غلظت کلروفیل a، Chl b: غلظت کلروفیل b، Total Chl: میزان کلروفیل کل و Car: غلظت کارتنوئید، A662: جذب در طول موج ۶۶۲ نانومتر، A645: جذب در طول موج ۶۴۵ نانومتر و A470: جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر است.

شاخص ثبات کلروفیل (CSI) نیز با استفاده از روش وینایا رای و پارتبان (Vinaya Rai & Parthiban, 1995) برحسب درصد اندازه گیری شد.

$$\text{CSI(\%)} = \quad (11)$$

$$\frac{\text{Total chlorophyll contents (stressed)}}{\text{Total chlorophyll contents (control)}} \times 100$$

فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی

میزان فعالیت پراکسیداز براساس روش مک آدام و همکاران (MacAdam et al., 1992) اندازه گیری شد. بدین منظور، مقدار ۰/۳ گرم از نمونه را وزن کرده و سپس در هاون چینی بر روی یخ قرار گرفت و با ازت مایع خرد و کامل پودر شد. در ادامه، میزان ۱/۵ میلی لیتر بافر پتاسیم فسفات به آن اضافه و نمونه با آن کاملاً مخلوط شد. سوسپانسیون حاصل در میکروتیوپ های دو میلی لیتری ریخته و پس از آن در دستگاه سانتیفریوژ یخچال دار به مدت ۲۰ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی گراد با دور ۱۴۰۰۰ در دقیقه قرار داده شد. میزان ۵۰ میکرولیتر از روشناور جهت اندازه گیری فعالیت آنزیم پراکسیداز در طول موج ۴۷۵ نانومتر با دستگاه اسپکتوفتومتر استفاده گردید. در نهایت، مقدار فعالیت آنزیم برحسب میزان آب اکسیژنه غیرفعال شده در یک دقیقه در هر گرم بافت تازه (معادله ۱۲) بیان شد.

$$\text{Activity (U/ml)} = \quad (12)$$

$$(\Delta A_{475} \times l \times V_t \times df) / (\epsilon \times l \times t \times V_s)$$

که در آن، U: واحد آنزیمی، ΔA_{475} : تفاوت میزان جذب مخلوط واکنش در زمان شروع و پایان واکنش، I: با توجه به ضریب در معادله تعیین می شود که معادل ۲ می باشد، Vt: حجم مخلوط واکنش، Df: فاکتور رقیق کننده، t: مدت زمان واکنش و Vs: حجم نمونه است.

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز نیز براساس روش ناکانو و آسادا (Nakano & Asada, 1981) انجام شد. جهت استخراج این آنزیم، مقدار ۰/۱ گرم نمونه برگ در هاون چینی بر روی یخ قرار گرفت و با ازت مایع خرد و کامل پودر شد. یک میلی لیتر بافر استخراج آنزیم (بافر سدیم فسفات با غلظت ۵۰ میلی مولار و اسیدیتة معادل ۷) به آن اضافه شد. برای تهیه بافر استخراج، ۲/۶۶ گرم NaH_2PO_4 و ۳/۷۵ گرم Na_2HPO_4 در آب مقطر حل شد و سپس به

خشک گل و عمر گل روی بوته (به ترتیب ۳۵/۳۱، ۳۲ و ۱۱/۱۱ درصد کاهش) را در مقایسه با شاهد نشان داد. محلول پاشی تیدیا زورون باعث افزایش وزن تر و خشک گل شد و در غلظت پنج میلی گرم در لیتر بیشترین مقادیر وزن تر و خشک گل (۸/۱۷ و ۸/۳۶ درصد افزایش) نسبت به ج شاهد به دست آمد.

مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم آبیاری و تیدیا زورون نشان داد که اعمال تنش کم آبیاری باعث افزایش مدت زمان ظهور غنچه گل شد، اما از قطر گل کاسته شد (جدول ۵). به طوری که تیمار ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث هشت درصد افزایش مدت زمان ظهور گل و همچنین ۱۵/۸۷ درصد کاهش قطر گل در مقایسه با شاهد شد. کاربرد تیدیا زورون بسته به سطح تنش و غلظت مورد استفاده تأثیرات متفاوتی به همراه داشت. در تنش ملایم، محلول پاشی تیدیا زورون، مدت زمان ظهور غنچه گل را کاهش داد، اما در تنش شدید باعث تأخیر ظهور غنچه گل شد. با این وجود، محلول پاشی تیدیا زورون به خصوص در غلظت پنج میلی گرم در لیتر در سطوح تنش ۵۰ و ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش قطر گل (به ترتیب ۵/۳۴ و ۱۲/۶۹ درصد) نسبت به شاهد شد. با این وجود، کمترین مدت زمان ظهور غنچه گل و قطر گل در شاهد مشاهده شد.

تحقیقات نشان داده است که تنش خشکی، تأثیر منفی مستقیمی بر فرآیندهای تولیدمثلی گیاهان دارد (Sepehri et al., 2025; Guo et al., 2023; Zomorodi et al., 2022). نتایج سپهری و همکاران (Sepehri et al., 2025) نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش تعداد گل و وزن خشک گل شد. با این حال، گیاهانی که با تنظیم کننده های رشد گیاهی (سیتوکینین، اکسین و اسید جیبرلیک) تیمار شدند، تعداد گل و وزن خشک گل بیشتری نسبت به شاهد داشتند. تنش خشکی از طریق تأخیر در زمان گل دهی بر رشد و نمو جوانه گل تأثیر می گذارد و منجر به کاهش عملکرد در سال بعد می شود. خشکی مداوم و غیرکشنده نیز می تواند باعث خشک شدن تدریجی و ریزش جوانه های گل و همچنین توقف رشد اندام های گل شود (Guo et al., 2023). با این وجود، سیتوکینین ها، نقش های تنظیمی مهمی در سنتز پروتئین، فعالیت آنزیم و متابولیسم سلولی دارند و می توانند مقاومت گیاه به خشکی را بهبود بخشند (Arli & Noli, 2024). نتایج ژائو و همکاران (Guo et al., 2023)، افزایش قابل توجه محتوای سیتوکینین در ۴۵ روز تیمار تنش خشکی را نشان داد که مشخص می کند، سیتوکینین ها و آبسازیک اسید، اثرات آنتاگونیستی بر مادگی و پرچم های کاملیا (*Camellia oleifera*) دارند.

نشان داد که تنش کم آبیاری باعث کاهش قابل توجه وزن تر و خشک ساقه، سطح برگ و وزن تر و خشک برگ شد (جدول ۵). تیمار ۲۰ درصد ظرفیت زراعی، کمترین مقادیر وزن تر و خشک ساقه، سطح برگ و وزن تر و خشک برگ (به ترتیب ۶۱/۸۲، ۶۰، ۴۴/۳۴، ۷۳/۶۴ و ۷۶/۷۱ درصد کاهش) را در مقایسه با شاهد نشان داد. محلول پاشی تیدیا زورون بسته به سطح تنش کم آبیاری، تأثیرات متفاوتی به همراه داشت. با این وجود، در سطوح تنش ۵۰ و ۲۰ درصد ظرفیت زراعی، کاربرد تیدیا زورون باعث افزایش در شاخص های مذکور شد. به طوری که در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس، غلظت ۲/۵ میلی گرم در لیتر تیدیا زورون، بهترین تأثیر را در افزایش وزن تر ساقه، خشک ساقه، وزن تر و خشک برگ (به ترتیب ۸۲/۸۳، ۱۰۴، ۸۹/۶۹ و ۸۲/۳۵ درصد افزایش) نسبت به شاهد نشان داد. در کل، غلظت ۲/۵ میلی گرم در لیتر تیدیا زورون در سطح ۸۰ درصد ظرفیت زراعی، بیشترین وزن تر و خشک ساقه و همچنین وزن خشک برگ (به ترتیب ۷۷/۷۷، ۱۱۶ و ۱۵ درصد افزایش) را نسبت به شاهد ثبت کرد. شاهد نیز بیشترین سطح برگ و وزن تر برگ را نشان داد. تحت شرایط تنش خشکی، کاهش آماس سلولی باعث کاهش تقسیم و طولی شدن سلول و متابولیت های ضروری مورد نیاز برای رشد و نمو گیاه می شود که در نتیجه، کاهش شاخص های رشد را به همراه خواهد داشت (Chieb & Gachomo, 2023). تحقیقات مختلف، تأثیر تیدیا زورون روی گیاهان در کاهش (Celikel et al., 2021) و افزایش (Sepehri et al., 2025; Ali et al., 2018) طول ساقه و همچنین افزایش تعداد و سطح برگ (Al-Dulime & Al-Dulime, 2019; Hussain et al., 2023; Mohammadi, 2023) را گزارش کرده اند. به نظر می رسد که نقش تیدیا زورون در افزایش محتوای مواد مغذی و کربوهیدرات برگ ها، به دلیل نقش سیتوکینین ها در تحریک رشد برگ ها و همچنین افزایش سرعت رشد است؛ زیرا علاوه بر نقش آن در جذب و تجمع عناصر مغذی از تمام قسمت های گیاه به مکان های فعال آن، باعث افزایش راندمان رشد می شود (Al-Dulime & Al-Dulime, 2023).

تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثر ساده تنش کم آبیاری بر عمر گل روی بوته و وزن تر و خشک گل معنی دار شد (جدول ۱). اثر ساده تیدیا زورون نیز بر وزن تر و خشک گل تأثیر معنی داری داشت (جدول ۱). اثر متقابل تنش کم آبیاری و تیدیا زورون هم بر مدت زمان ظهور غنچه گل و قطر گل معنی دار شد (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر ساده تنش کم آبیاری نشان داد که اعمال تنش کم آبیاری باعث کاهش قابل توجه وزن تر و خشک گل و همچنین عمر گل روی بوته شد (جدول ۴). تیمار ۲۰ درصد آب قابل دسترس، کمترین وزن تر و

جدول ۱- تجزیه واریانس تاثیر تیدیا زورون بر شاخص های رشدی گیاه پروانش تحت تنش کم آبیاری
Table 1- Analysis of variance for the effect of thidiazuron on growth indices of periwinkle (*Catharanthus roseus*) under water deficit stress

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	ارتفاع گیاه Plant height	قطر ساقه Stem diameter	طول ساقه Stem length	وزن تر ساقه Stem fresh weight	وزن خشک ساقه Stem dry weight	تعداد برگ Leaves number	سطح برگ Leaves area	وزن تر برگ Leaves fresh weight	وزن خشک برگ Leaves dry weight	ظهور غنچه Flower bud opening	قطر گل Flower diameter
کم آبیاری Water deficit stress	2	80.14**	8.08**	36.02**	34.40**	1.23**	68.08**	930.7**	10.96**	0.67**	122.3**	0.012 ^{ns}
تیدیا زورون TDZ	2	16.52**	20.23**	5.68**	8.79**	0.41**	3.58**	6.8 ^{ns}	0.87*	0.05**	158.3**	0.002 ^{ns}
کم آبیاری × تیدیا زورون Water deficit stress × TDZ	4	1.35 ^{ns}	1.21 ^{ns}	0.27 ^{ns}	1.18**	0.09**	0.54 ^{ns}	32.5**	0.85**	0.02**	186.6**	0.046**
خطا Error	24	1.35	0.49	0.51	0.08	0.006	0.61	6.8	0.18	0.002	1.02	0.006
ضریب تغییرات C.V (%)	-	8.32	16.40	7.66	9.05	13.70	6.19	6.44	18.93	10.50	0.78	17.75

^{ns}, **, و *** : به ترتیب عدم معنی دار، و معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد.
^{ns}, **, and *** : non-significant, significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.

ادامه جدول (۱) - تجزیه واریانس تأثیر تیدیا زورون بر شاخص‌های رشدی گیاه پروانش تحت تنش کم آبیاری
Continued Table 1 - Analysis of variance for the effect of thidiazuron on growth indices of periwinkle (*Catharanthus roseus*) under water deficit stress

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	وزن تر گل Flower fresh weight	وزن خشک گل Flower dry weight	عمر گل روی بوته Inflorescence longevity	شاخص تحمل به تنش Stress tolerance index	وزن خشک کل Total dry weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن تر ریشه Root fresh weight	حجم ریشه Root volume	طول ریشه Root length	قطر ریشه Root diameter
کم آبیاری Water deficit stress	2	0.01312 ^{**}	0.000331 ^{**}	2.68 [*]	1676.0 ^{**}	0.61 ^{**}	0.36 ^{**}	34.42 ^{**}	54.84 ^{**}	9.25 ^{**}	1.62 ^{**}
تیدیا زورون TDZ	2	0.00040 ^{**}	0.000015 ^{**}	0.92 ^{ns}	17814.8 ^{**}	6.50 ^{**}	0.01 [*]	1.63 [*]	3.17 ^{**}	11.11 ^{**}	0.53 [*]
کم آبیاری × تیدیا زورون Water deficit TDZ × stress	4	0.00004 ^{ns}	0.0000001 ^{ns}	0.34 ^{ns}	198.2 ^{**}	0.07 ^{**}	0.001 ^{ns}	0.67 ^{ns}	0.63 ^{ns}	8.06 ^{**}	0.21 ^{ns}
خطای آزمایشی Error	24	0.000010	0.0000001	0.58	6.7	0.01	0.003	0.29	0.25	0.71	0.10
ضریب تغییرات C.V (%)	-	7.32	3.70	10.07	3.32	8.65	14.60	14.44	10.87	5.50	13.16

^{ns}، ^{**} و ^{***}: پداترتیب عدم معنی دار، و معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد.
^{ns}، ^{*} and ^{**}: non-significant, and significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر تیدیاژورون بر تبادلات گازی گیاه پروانش تحت تنش کم آبیاری

Table 2- Analysis of variance of the effect of TDZ on gas exchange of periwinkle (<i>Catharanthus roseus</i>) plant under water deficit stress									
منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	سرعت فتوسنتز Photosynthesis rate	هدایت روزنه ای Stomatal conductance	سرعت تعرق Transpiration rate	سولوی Internal CO ₂	هدایت مزوفیلی Mesophilic conductance	کارایی مصرف آب فتوسنتزی Photosynthetic water use efficiency		
تنش کم آبیاری water deficit stress	2	441.34**	65143.4**	88.73**	0.001513**	68400.1**	18.28**		
تیدیاژورون TDZ	2	7.09**	490.3**	0.45 ^{ns}	0.000170**	1965.8**	0.03*		
تنش کم آبیاری × تیدیاژورون water deficit stress × TDZ	4	6.41**	202.9**	4.23**	0.000047**	1429.4**	0.03**		
خطا Error	24	0.55	7.9	0.006	7.5	0.00001	0.39		
ضریب تغییرات C.V (%)	-	5.86	1.12	4.52	0.88	8.11	6.81		

ns، * و **: به ترتیب عدم معنی دار، و معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد.
ns، * and **: non-significant, and significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.

جدول ۳ - تجزیه واریانس تأثیر تیدیا زورون بر ویژگی های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه پروانش تحت تنش کم آبیاری
Table 3- Analysis of variance of the effect of TDZ on physiological and biochemical traits of periwinkle (*Catharanthus roseus*) plant under water deficit stress

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	محتوای نسبی آب Relative water content	نشت الکترولیت Electrolyte leakage	نشست Malondialdehyde	مالون دی آلدئید	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل Total chlorophyll	کاروتنئید Carotenoid	شاخص ثبات کلروفیل Chlorophyll stability index	پراکسیداز Peroxidase	آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase
تنش کم آبیاری water deficit stress	2	2451.34**	950.52**	0.272**	0.272**	44.27**	15.37**	111.81**	1.52**	300.6**	0.014105**	0.001031**
تیدیا زورون TDZ	2	169.0**	182.41**	0.046**	0.046**	1.75*	0.38**	3.75**	0.49**	9852.1**	0.001776**	0.000138**
کم آبیاری × تیدیا زورون water deficit stress × TDZ	4	27.65*	52.04**	0.004 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.49 ^{ns}	0.07*	46.1**	0.000294**	0.000033**
خطا Error	24	8.04	9.13	0.003	0.003	0.40	0.05	0.67	0.02	5.7	0.000008	0.000002
ضریب تغییرات C.V (%)	-	3.94	10.79	10.49	10.49	11.98	8.71	10.30	8.97	3.19	6.11	0.003

^{ns} ، ** و : به ترتیب عدم معنی دار، و معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد.
* ، ** and * : non-significant, and significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.

جدول ۴- اثر ساده تنش کم آبیاری و تیدیاورون بر صفات رشدی گیاه پروانش

Table 4- Simple effect of water deficit stress and TDZ on growth traits of periwinkle (*Catharanthus roseus*) plant

تیمار Treatment	ارتفاع گیاه Plant height (cm)	قطر ساقه Stem diameter (mm)	طول ساقه Stem length (cm)	تعداد برگ Leaves number (per plant)	Inflorescence longevity (day)	عمر گل روی بوته longevity (day)	وزن تر گل Flower fresh weight (g)	وزن خشک گل Flower dry weight (g)	قطر ریشه Root diameter (mm)
تنش کم آبیاری Water deficit stress (%AWC)	80	16.54 ^a	4.96 ^a	15.3 ^a	8.1 ^a	8.1 ^a	0.1775 ^a	0.0328 ^a	2.84 ^a
	50	14.08 ^b	4.51 ^a	11.9 ^b	7.8 ^{ab}	7.8 ^{ab}	0.1275 ^b	0.0277 ^b	2.32 ^b
	20	11.37 ^c	3.36 ^b	10.8 ^c	7.2 ^b	7.2 ^b	0.1150 ^c	0.0223 ^c	2.13 ^b
تیدیاورون TDZ (mg.L ⁻¹)	0	12.66 ^b	3.57 ^b	12.8 ^a	-	-	0.1333 ^b	0.0263 ^b	2.24 ^b
	2.5	14.87 ^a	5.78 ^a	12.1 ^b	-	-	0.1425 ^a	0.0278 ^a	2.39 ^{ab}
	5	14.45 ^a	3.48 ^b	13.2 ^a	-	-	0.1442 ^a	0.0285 ^a	2.65 ^a

*حروف متفاوت در سطوح مختلف هر تیمار، بر اساس آزمون LSD، اختلاف معنی دار را در سطح احتمال ۵ درصد نشان می دهند.

*Different letters at various levels of each treatment indicate significant differences based on the LSD test at the 5% probability level.

گیاهان تحت تیمار شد. رشد گیاهان به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم متأثر از هورمون‌های گیاهی است که تحت تأثیر خشکی دچار اختلال شده و متعاقب آن رشد و نمو گیاه را کاهش می‌دهد. افزایش رشد ریشه در اثر کاربرد تیدیا زورون نیز ممکن است به‌دلیل حفظ تعادل هورمونی در گیاهان باشد (Liu et al., 2022).

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده تنش کم‌آبیاری و تیدیا زورون و همچنین اثر متقابل تنش کم‌آبیاری و تیدیا زورون تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک کل گیاه و شاخص تحمل به تنش دارد (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبیاری و تیدیا زورون نشان داد که وزن خشک کل گیاه پروانش و شاخص تحمل به تنش با افزایش سطح تنش کم‌آبیاری به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا کردند، به‌طوری که در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس، کاهش ۶۵/۲۱ و ۶۵ درصدی در مقایسه با شاهد نشان دادند (جدول ۷). محلول‌پاشی تیدیا زورون باعث افزایش وزن خشک کل گیاه و شاخص تحمل به تنش گیاهان در سطوح مختلف تنش کم‌آبیاری شد و در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس، غلظت ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر تیدیا زورون به‌ترتیب سبب افزایش ۵۳/۸ و ۵۱/۴۲ درصدی وزن خشک کل گیاه و شاخص تحمل به تنش گیاهان در مقایسه با تیمار ۲۰ درصد آب قابل دسترس بدون محلول‌پاشی شدند.

تنش خشکی بسته به سطح تنش و مرحله نمو گیاه از طریق کاهش سطح برگ، پیری برگ، افزایش مقاومت روزه‌ای و کاهش مقدار رنگدانه‌های فتوسنتزی، رشد رویشی و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد (Chieb & Gachomo, 2023). باین‌وجود، تأثیر تیدیا زورون می‌تواند از طریق سیتوکینین باعث افزایش تقسیم سلولی، تجمع کلروفیل، بیوسنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی (تبدیل اتیوپلاست به کلروپلاست) و تأخیر در پیری برگ گیاهان شود (Taiz & Zeiger, 2006)، تنظیم از پایین‌دست سیتوکینین منجر به بیان سیستم ریشه‌ای شده و نسبت ریشه به شاخساره را افزایش می‌دهد که سطح جذب آب ریشه‌ها را افزایش می‌دهد. از طرفی دیگر، شاخه‌ها و سطح برگ به نسبت کوچک در مقایسه با ریشه‌ها می‌تواند به‌طور مؤثری تعرق گیاه را کاهش دهد (Calvo-Polanco et al., 2019). بنابراین گیاه می‌تواند محتوای نسبی آب نسبتاً بالایی حفظ کند و تحمل به خشکی را بهبود بخشد. علاوه بر این، تنظیم مسیرهای پایین‌دستی سیگنالینگ سیتوکینین می‌تواند از طریق تعدیل سیستم اکسیداتیو و افزایش ظرفیت دفاع آنتی‌اکسیدانی، به بهبود تحمل گیاه به تنش خشکی کمک کند (Calvo-Polanco et al., 2019).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تنش کم‌آبیاری × تیدیا زورون بر سرعت فتوسنتز، هدایت روزه‌ای، تعرق،

هورمون‌های گیاهی، مولکول‌های سیگنال‌دهنده‌ای هستند که به گیاهان اجازه می‌دهند تغییرات در محیط خارجی خود را حس کنند، رشد را تنظیم کنند، در برابر شرایط نامساعد محیطی مقاومت کنند و بقای خود را حفظ کنند. هرچند در گیاهان، مجموعه‌ای از سازوکارهای سازگاری برای کاهش آسیب از طریق تنظیم سنتز و انتقال سیگنال هورمون‌های درون‌زا فعال می‌شوند (Guo et al., 2023).

تجزیه واریانس داده‌های حاصل از این پژوهش نشان داد که اثر ساده تنش کم‌آبیاری و تیدیا زورون بر ویژگی‌های ریشه (قطر، حجم، وزن تر و خشک) معنی‌دار شد (جدول ۱). اثر متقابل تنش کم‌آبیاری و تیدیا زورون نیز بر طول ریشه معنی‌دار شد (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر ساده تنش کم‌آبیاری نشان داد که با افزایش سطح تنش کم‌آبیاری از قطر، حجم و وزن تر و خشک ریشه کاسته شد (جدول ۴ و ۶)، به‌طوری که در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس به‌ترتیب کاهش ۲۵، ۵۸/۵، ۵۸/۷ و ۵۶/۳ درصدی در شاخص‌های فوق نسبت به شاهد ثبت گردید. استفاده از تیدیا زورون نیز به‌خصوص در غلظت پنج میلی‌گرم در لیتر باعث افزایش ۱۸/۳، ۶، ۲ و ۶ درصدی قطر، حجم و وزن تر و خشک ریشه در مقایسه با شاهد شد. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبیاری و تیدیا زورون نشان داد که طول ریشه تحت تأثیر تنش کم‌آبیاری در سطح ۵۰ درصد آب قابل دسترس افزایش قابل توجهی (۲۰ درصد افزایش نسبت به شاهد) نشان داد، اما در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس کاهش پیدا کرد (جدول ۵). کاربرد تیدیا زورون در سطوح ۸۰ و ۵۰ درصد آب قابل دسترس به‌ترتیب افزایش و کاهش طول ریشه را به همراه داشت. باین‌وجود بیشترین و کمترین طول ریشه به‌ترتیب در سطح ۵۰ درصد آب قابل دسترس (بدون تیدیا زورون) و ۲۰ درصد آب قابل دسترس (به همراه ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر تیدیا زورون) به دست آمد. گیاهان برای بهبود حفظ آب و مقاومت به خشکی، سیستم ریشه‌ای و ظرفیت جذب آب را نیز افزایش می‌دهند (Liu et al., 2022). تنش خشکی باعث کاهش مقدار اکسین شده و انتقال آن از واحدهای سازنده به مریستم انتهایی و برگ‌ها را دچار اختلال می‌کند. از طرفی دیگر، تولید سیتوکینین در ریشه و انتقال آن به برگ‌ها نیز کاهش یافته و تجزیه آن در ریشه و برگ اتفاق می‌افتد (Yasemi et al., 2024). همچنین وضعیت مواد غذایی گیاه باعث تنظیم سیتوکینین می‌شود و نسبت سیتوکینین به اکسین نیز به‌نوبه خود، سرعت نسبی ریشه و اندام هوایی را تعیین می‌دهد (Taiz & Zeiger, 2006). نتایج حسین و همکاران (Hussain et al., 2019) روی گیاهان تربچه (*Raphanus sativus*) L. نشان داد که کاربرد تیدیا زورون باعث افزایش ویژگی‌های ریشه

دی‌اکسید کربن درون سلولی، هدایت مزوفیلی و کارایی مصرف آب فتوسنتزی معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبیاری × تیمدیزورون نشان داد که سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، هدایت روزنه‌ای، غلظت دی‌اکسید کربن درون سلولی، هدایت مزوفیلی و کارایی مصرف آب فتوسنتزی تحت تأثیر تنش کم‌آبیاری کاهش پیدا کردند و در سطح ۶۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب کاهش ۷۵/۳۷، ۸۸/۸۵، ۳۶/۵۳، ۹۲/۹ و ۶۰/۹۴ درصدی در مقایسه با شاهد نشان دادند (جدول ۷)، اما کارایی مصرف آب فتوسنتزی تحت تأثیر تنش کم‌آبیاری و در سطح ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، افزایش ۶۹۲ درصدی نسبت به شاهد نشان داد. کاربرد تیمدیزورون در سطوح تنش کم‌آبیاری به خصوص در سطح ۶۰ درصد ظرفیت زراعی باعث افزایش سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، هدایت روزنه‌ای و هدایت مزوفیلی شد، اما غلظت دی‌اکسید کربن درون سلولی را کاهش داد. باین‌وجود، در غلظت ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر در سطح غیرتنش بیشترین سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، هدایت روزنه‌ای و غلظت دی‌اکسید کربن درون سلولی (به ترتیب ۱۱/۵، ۴/۹، ۳ و ۶/۶ درصد افزایش در مقایسه با شاهد) به دست آمد. غلظت پنج میلی‌گرم در لیتر تیمدیزورون در سطح غیرتنش نیز بیشترین هدایت مزوفیلی (۸/۷ درصد افزایش نسبت به شاهد) را ثبت کرد. کارایی مصرف آب فتوسنتزی با کاربرد تیمدیزورون در اکثر غلظت‌ها روند افزایشی نشان داد و در غلظت ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر در سطح ۲۰ درصد ظرفیت زراعی بالاترین شاخص مورد نظر (۴/۷ درصد افزایش در مقایسه با شاهد سطح ۶۰ درصد ظرفیت زراعی) را ثبت کرد (جدول ۷). تنش خشکی با کاهش هدایت روزنه‌ای و مزوفیلی، انتشار دی‌اکسید کربن، تنفس نوری، انرژی، یکپارچگی غشاء، محتوای رنگدانه، بیوسنتز لیپید و تعادل هورمونی را محدود می‌کند و از این طریق باعث کاهش رشد گیاهان می‌شوند (Chieb & Gachomo, 2023). باین‌حال، تیمدیزورون که به‌عنوان یک سیتوکینین شناخته می‌شود، اثرات دوگانه اکسین و سیتوکینین را دارد و ممکن است تجمع یا سنتز هورمون‌های رشد گیاهی داخلی را تسهیل کند (Arlı & Noli, 2024). پیشنهاد شده است که تیمدیزورون از طریق فعالیت سیتوکینین نوع آدنین یا با تحریک سیتوکینین‌های درون‌زا یا با اتصال به گیرنده‌های سیتوکینین عمل می‌کند (Arlı & Noli, 2024). سیتوکینین‌ها نیز از طریق تحریک تنظیم اسمزی، تأثیرات مخرب تنش خشکی را کاهش می‌دهند، باین‌حال در سلول‌های نگیهان روزنه به‌طور مستقیم در القاء قطبی شدن غشاء درگیر بوده و با افزایش فعالیت پمپ پروتون، چرخه آدنیلات و ارتباط سیستم کلسیم - کالمودولین، باعث باز شدن روزنه‌ها شده و منجر به افزایش تعرق و کاهش دمای برگ می‌شود و همچنین کاربرد آن تحت شرایط تنش خشکی از طریق غربال رادیکال‌های آزاد

باعث تأخیر در پیری برگ شده و خسارت وارده به غشای سلولی را کاهش می‌دهد (Arlı & Noli, 2024).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده تنش کم‌آبیاری و تیمدیزورون بر غلظت مالون دی‌آلدئید معنی‌دار شد (جدول ۳). اثر متقابل تنش کم‌آبیاری × تیمدیزورون نیز بر محتوای نسبی آب برگ و نشت الکترولیت معنی‌دار گردید. مقایسه میانگین اثر ساده تنش کم‌آبیاری نشان داد که اعمال تنش کم‌آبیاری باعث افزایش غلظت مالون دی‌آلدئید شد (جدول ۶). تیمار ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۱۱۹ درصدی مقدار شاخص مذکور شد. اما محلول‌پاشی برگ تیمدیزورون منجر به کاهش مقدار مالون دی‌آلدئید شد و در غلظت پنج میلی‌گرم در لیتر، کاهش ۲۲ درصدی در مقایسه با شاهد نشان داد. بررسی نتایج مقایسه میانگین اثر تنش کم‌آبیاری و تیمدیزورون نشان داد که با افزایش سطح تنش کم‌آبیاری، محتوای نسبی آب برگ کاهش و نشت الکترولیت افزایش پیدا کردند (جدول ۸). محلول‌پاشی تیمدیزورون در سطوح مختلف تنش کم‌آبیاری باعث افزایش محتوای نسبی آب برگ و کاهش نشت الکترولیت شد. به‌طوری که در سطح ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، غلظت پنج میلی‌گرم در لیتر تیمدیزورون باعث افزایش ۲۳ درصدی محتوای نسبی آب برگ و کاهش ۳۱/۸۱ درصدی میزان نشت الکترولیت گیاهان تحت تنش شد. مطالعات روی گیاهان پروانش (Zomorodi et al., 2022)، کاملیا (Guo et al., 2023) و گل شمعدانی معطر (Yasemi et al., 2024) در شرایط تنش خشکی نیز افزایش نشت الکترولیت و مالون دی‌آلدئید و کاهش محتوای نسبی آب برگ را نشان دادند که با پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. در بین اجزای گیاهی، غشای سلولی، اولین قسمتی از سلول است که در مواجهه با تنش خشکی آسیب می‌بیند. تنش خشکی با ایجاد تنش اکسیداتیو و تولید گونه‌های فعال اکسیژن در سلول‌های گیاهی منجر به اکسیداسیون اسیدهای چرب دیواره سلولی شده که در نتیجه با تخریب غشای سلولی و افزایش نفوذپذیری یون‌ها در اثر افزایش حلالیت و پراکسیداسیون چربی‌های غشاء، نشت الکترولیت و محتوای مالون دی‌آلدئید را افزایش و محتوای نسبی آب در گیاهان را کاهش می‌دهد (Demidchik et al., 2014). یاسمی و همکاران (Yasemi et al., 2024) گزارش کرده‌اند که محلول‌پاشی تیمدیزورون روی گیاهان شمعدانی معطر تحت شرایط تنش کم‌آبیاری باعث افزایش محتوای نسبی آب برگ و کاهش نشت الکترولیت و محتوای مالون دی‌آلدئید گیاهان شد. مطالعات نشان داده است که سیتوکینین در شرایط تنش با افزایش فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی، باعث حذف رادیکال‌های آزاد شده و ثبات غشاء سلولی را افزایش داده و از این طریق، رشد گیاه را افزایش می‌دهد (Arlı & Noli, 2024).

(*Pelargonium zonale*) (Mutui et al., 2008) و آلسترومریا (*Alstroemeria* spp.) (Mutui et al., 2004) نشان داده است که سیتوکینین به دلیل تأخیر در تخریب کلروفیل و حفظ قابلیت دستگاه فتوسنتزی از زردی برگ گیاهان جلوگیری می‌کند.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تنش کم‌آبیاری $\times$ تیدیا زورون بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز معنی‌داری شد (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبیاری و تیدیا زورون نشان داد که فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از جمله پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز با افزایش سطح تنش کم‌آبیاری به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا کردند، به‌طوری که در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس به‌ترتیب ۵۲۴ و ۱۷۸ درصد در مقایسه با شاهد افزایش یافتند (جدول ۸). محلول‌پاشی تیدیا زورون در سطوح مختلف تنش کم‌آبیاری نیز در هر دو غلظت مورد استفاده باعث افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های مربوطه شد. در مجموع، غلظت پنج میلی‌گرم در لیتر در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس، بالاترین میزان فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز (۸۸۳ و ۳۶۰ درصد افزایش) را در مقایسه با شاهد نشان دادند. سازگاری گیاهان با محیط خارجی و توانایی آن‌ها در جلوگیری از تنش‌ها و فرآیند پیری، می‌تواند بازتابی از سطح فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان باشد. کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در گیاهان تحت شرایط تنش خشکی، می‌تواند باعث تجمع گونه‌های فعال اکسیژن در بافت‌های آن‌ها شود که به‌نوبه خود می‌تواند منجر به آسیب سمی شود (Luo et al., 2023; Guo et al., 2023). باین‌وجود، برخی مواقع ممکن است به‌واسطه فعالیت کم فتوسنتزی برای کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن از طریق کلروپلاست‌ها، سیستم آنزیمی نسبت به تنش‌های محیطی، فعالیت یا حساسیت کمتری داشته باشد (Luo et al., 2023). نتایج پژوهش علی و همکاران (Ali et al., 2018) روی *Ajuga bracteosa* نشان داد که تأثیر تیدیا زورون به غلظت و مرحله رشد گیاه بستگی دارد، به‌طوری که تیدیا زورون در غلظت ۱/۲ میلی‌گرم در لیتر، فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز را در ساقه‌ها افزایش داد. باین‌وجود، حداکثر فعالیت آنزیم کاتالاز در غلظت بالای از تیدیا زورون (پنج میلی‌گرم در لیتر) مشاهده شد. تنظیم از پایین‌دست سیتوکینین می‌تواند با تولید بیش از حد سیتوکینین اکسیداز به دست آید و منجر به کاهش رشد گیاهان و افزایش محتوای ترکیبات محافظت‌کننده شده و تحمل خشکی در گیاهان شمع‌دانی معطر (Yasemi et al., 2024) و بادام زمینی (*Arachis hypogaea* L.) (Khandal et al., 2020) را افزایش دهد.

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر ساده تنش کم‌آبیاری و تیدیا زورون بر محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی مانند کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل معنی‌دار شد (جدول ۳). اثر متقابل تنش کم‌آبیاری و تیدیا زورون نیز بر محتوای کاروتنوئید و شاخص ثبات کلروفیل معنی‌دار گردید (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر ساده تنش کم‌آبیاری نشان داد که غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی از جمله کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل تحت تأثیر تنش کم‌آبیاری به‌شدت کاهش پیدا کردند و در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس به‌ترتیب کاهش ۴۶/۸۰، ۵۲/۱۵ و ۴۸/۶۴ درصدی محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل به‌دست آمد (جدول ۶). مقایسه میانگین اثر ساده محلول‌پاشی تیدیا زورون نشان داد که کاربرد تیدیا زورون باعث افزایش مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی شد و در غلظت پنج میلی‌گرم در لیتر، بیشترین مقدار کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل (به‌ترتیب ۱۵/۳۵، ۱۴/۶۹ و ۱۵/۱۳ درصد افزایش) در مقایسه با شاهد به دست آمد (جدول ۶). مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبیاری و تیدیا زورون نشان داد که با افزایش سطح تنش کم‌آبیاری، از محتوای کاروتنوئید و شاخص ثبات کلروفیل کاسته شد (جدول ۸). تیمار ۲۰ درصد آب قابل دسترس نیز کمترین محتوای کاروتنوئید و شاخص ثبات کلروفیل (به‌ترتیب ۴۰ و ۵۲ درصد کاهش) را نسبت به شاهد ثبت کرد. باین‌وجود، محلول‌پاشی تیدیا زورون در تمام سطوح تنش کم‌آبیاری باعث افزایش غلظت کاروتنوئید و شاخص ثبات کلروفیل شد، به‌طوری که غلظت پنج میلی‌گرم در لیتر تیدیا زورون در سطح ۲۰ درصد آب قابل دسترس باعث افزایش ۴۹/۱۶ و ۲۹/۱۶ درصدی محتوای کاروتنوئید و شاخص ثبات کلروفیل در مقایسه با شاهد شد.

تحقیقات مختلف روی گیاهان پروانش (Sepehri et al., 2025; Zomorodi et al., 2022) تأثیر منفی تنش خشکی را گزارش کردند که با داده‌های پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. تنش خشکی از طریق افزایش تولید رادیکال‌های آزاد در سلول باعث تخریب رنگدانه‌ها و پروتئین‌های D₁ و D₂ در فتوسیستم دو می‌شود که در نتیجه سبب بی‌نظمی در غشای تیلاکوئید می‌شود (Luo et al., 2023). نتایج رسولی و همکاران (Rasouli et al., 2015) روی گیاه گل شاخه بریده رز (*Rosa × hybrida*) و یاسمی و همکاران (Yasemi et al., 2024) روی گل شمع‌دانی معطر نشان داد که اعمال تیدیا زورون از تخریب کلروفیل جلوگیری کرده و غلظت آن را افزایش داده است که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. مطالعات نشان داده است که سیتوکینین‌ها از طریق کاهش فعالیت آنزیم کلروپلاز و فعال کردن آنزیم NADH پروتوکلروفیلید ردوکتاز در مسیر بیوسنتز کلروفیل، محتوای کلروفیل را افزایش می‌دهند (Karnwal et al., 2023). تحقیقات روی گیاهان شمع‌دانی

جدول ۵- اثر متقابل تیمیازورون × تنش کم آبیاری بر ویژگی‌های صفات رشدی گیاه پروانش

Table 5- The interaction Effect of TDZ on growth characteristics of periwinkle (<i>Catharanthus roseus</i>) plant under water deficit stress									
تنش کم آبیاری Water deficit stress (%AWC)	تیمیازورون TDZ (mg.L ⁻¹)	وزن تر ساقه Stem fresh weight (g)	وزن خشک ساقه Stem dry weight (g)	سطح برگ Leaves area (cm ²)	وزن برگ تازه Leaves fresh weight (g)	وزن برگ خشک Leaves dry weight (g)	ظهور غنچه Flower bud opening (day)	قطر گل Flower diameter (mm)	طول ریشه Root length (cm)
80	0	3.51 ^c	0.55 ^c	52.50 ^a	3.68 ^a	0.73 ^b	120.3 ^g	1.46 ^a	15.0 ^b
	2.5	6.24 ^a	1.19 ^a	50.55 ^b	2.56 ^b	0.84 ^a	138.3 ^b	1.20 ^d	15.0 ^b
	5	5.58 ^b	1.14 ^a	47.12 ^b	3.72 ^a	0.59 ^c	128.8 ^{de}	1.34 ^{bc}	17.7 ^a
50	0	2.05 ^{de}	0.40 ^d	37.82 ^{cd}	1.92 ^{bcd}	0.37 ^{ef}	130.0 ^d	1.31 ^{bcd}	18.0 ^a
	2.5	3.33 ^c	0.60 ^b	39.62 ^c	2.19 ^{bc}	0.48 ^d	127.0 ^f	1.33 ^{bc}	14.2 ^{bc}
	5	2.33 ^{de}	0.47 ^{cd}	40.47 ^c	2.22 ^{bc}	0.44 ^{de}	128.3 ^{ef}	1.38 ^{ab}	15.2 ^b
20	0	1.34 ^f	0.22 ^e	29.22 ^f	0.97 ^e	0.17 ^h	130.0 ^{de}	1.26 ^{cd}	14.7 ^b
	2.5	2.45 ^d	0.45 ^c	33.85 ^e	1.84 ^{cd}	0.31 ^{fg}	131.5 ^e	1.42 ^{ab}	13.5 ^c
	5	1.91 ^e	0.36 ^d	34.72 ^{de}	1.84 ^{cd}	0.27 ^g	142.3 ^a	1.42 ^{ab}	14.7 ^b

* حروف مختلف، بر اساس آزمون LSD، اختلاف معنی‌دار را در سطح احتمال ۵ درصد نشان می‌دهند.

Different letters indicate significant differences at the 5% probability level based on the LSD test.

جدول ۶- اثر ساده تنش کم آبیاری و تیدیا زورون بر صفات رشدی و رنگرزه‌های فتوسنتزی گیاه پروانش

Table 6- Simple effect of water deficit stress and TDZ on growth traits and photosynthetic pigments of periwinkle (<i>Catharanthus roseus</i>) plant									
تیمار Treatment	تنش کم آبیاری Water deficit stress (%AWC)	حجم ریشه Root volume (cm ³)	وزن خشک ریشه Root dry weight (g)	وزن تر ریشه Root dry fresh (g)	مالون دی‌آلدئید MDA (mg.g ⁻¹ FW)	کلروفیل Chlorophyll a (mg.g ⁻¹ FW)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.g ⁻¹ FW)	کلروفیل کل Chlorophyll ab (mg.g ⁻¹ FW)	کلروفیل کل Chlorophyll ab (mg.g ⁻¹ FW)
تیدیا زورون TDZ (mg.L ⁻¹)	80	7.0 ^a	0.591 ^a	5.633 ^a	0.249 ^c	7.52 ^a	3.95 ^a	11.47 ^a	11.47 ^a
	50	4.1 ^b	0.335 ^b	3.353 ^b	0.364 ^b	4.42 ^b	2.11 ^b	6.53 ^b	6.53 ^b
	20	2.9 ^c	0.258 ^c	2.324 ^c	0.547 ^a	4.00 ^b	1.89 ^c	5.89 ^b	5.89 ^b
تیدیا زورون TDZ (mg.L ⁻¹)	0	4.8 ^a	0.399 ^{ab}	3.925 ^a	0.458 ^a	4.95 ^b	2.45 ^b	7.40 ^b	7.40 ^b
	2.5	4.1 ^b	0.362 ^b	3.348 ^b	0.346 ^b	5.29 ^{ab}	2.68 ^a	7.97 ^{ab}	7.97 ^{ab}
	5	5.1 ^a	0.423 ^a	4.037 ^a	0.356 ^b	5.71 ^a	2.81 ^a	8.52 ^a	8.52 ^a

*Different letters at various levels of each treatment indicate significant differences based on the LSD test at the 5% probability level.

حروف متفاوت در سطوح مختلف هر تیمار، بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌دار را در سطح احتمال ۵ درصد نشان می‌دهند.

جدول ۷- اثر متقابل تیمارهای تنش × تنش کم آبیاری بر صفات رشدی و تبادلات گازی گیاه پروانش
Table 7- The interaction effect of TDZ × water deficit stress on growth traits and gas exchange of periwinkle (*Catharanthus roseus*) plant

تنش کم آبیاری Water deficit stress (%AWC)	تیمار تیمار TDZ (mg.L ⁻¹)	وزن خشک کل Total dry weight (g)	شاخص تحمل به تنش Stress tolerance index (%)	سرعت فتوسنتز Photosynthesis rate (μmol.m ⁻² .s ⁻¹)	هدایت روزنه‌ای Stomatal conductance (mmol.m ⁻² .s ⁻¹)	سرعت تعرق Transpiration rate (mmol.m ⁻² .s ⁻¹)	دی اکسید کربن درونی Internal CO ₂ (μmol.mol ⁻¹)	هدایت مزوفیلی Mesophyll conductance (mmol.m ⁻² .s ⁻¹)	کارایی مصرف آب فتوسنتزی Photosynthetic water use efficiency (μmol CO ₂ .mol ⁻¹ H ₂ O)
80	0	1.906 ^c	100 ^c	18.19 ^b	314.0 ^b	3.23 ^b	390 ^b	0.0466 ^{ab}	5.63 ^d
	2.5	2.641 ^a	138 ^a	20.29 ^a	323.7 ^a	3.39 ^a	416 ^a	0.0487 ^a	5.99 ^d
	5	2.384 ^b	125 ^b	18.11 ^b	310.0 ^b	3.11 ^b	359 ^c	0.0507 ^a	5.84 ^d
50	0	1.165 ^{ef}	61 ^f	12.41 ^d	266.7 ^e	1.37 ^d	345 ^{cd}	0.0360 ^c	9.04 ^e
	2.5	1.400 ^d	73 ^d	13.58 ^d	282.0 ^d	1.49 ^{cd}	321 ^e	0.0423 ^b	9.15 ^e
	5	1.298 ^{de}	68 ^e	16.60 ^c	293.3 ^c	1.54 ^c	328 ^{de}	0.0506 ^a	10.75 ^b
20	0	0.663 ^h	35 ^h	4.48 ^f	144.7 ^g	0.36 ^e	246 ^f	0.0182 ^e	12.55 ^a
	2.5	1.020 ^{fg}	53 ^g	5.81 ^e	160.7 ^f	0.44 ^e	200 ^g	0.0292 ^d	13.14 ^a
	5	0.961 ^g	50 ^g	4.99 ^{ef}	157.0 ^f	0.48 ^e	205 ^g	0.0243 ^d	10.44 ^b

* Different letters indicate significant differences at the 5% probability level based on the LSD test.
*حروف مختلف، بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی دار را در سطح احتمال ۵ درصد نشان می‌دهند.

جدول ۸- اثر متقابل تیدیا زورون × تنش کم آبیاری بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه پروانش

Table 8- The interaction effect of TDZ × water deficit stress on physiological and biochemical characteristics of periwinkle (<i>Catharanthus roseus</i>) plant									
تنش کم آبیاری Water deficit stress (%AWC)	تیدیا زورون TDZ (mg.L ⁻¹)	محتوای نسبی آب Relative leaf water content (%)	نشت الکترولیت Electrolyte leakage (%)	کاروتنوئید Carotenoid (mg.g ⁻¹ FW)	شاخص ثبات کلروفیل Chlorophyll stability index (%)	پراکسیداز Peroxidase (μmol.min ⁻¹ .g ⁻¹ FW)	پراکسیداز Ascorbate peroxidase (μmol.min ⁻¹ .g ⁻¹ FW)	شاخص ثبات کلروفیل Chlorophyll stability index (%)	پراکسیداز Peroxidase (μmol.min ⁻¹ .g ⁻¹ FW)
80	0	86 ^{ab}	19 ^d	2.00 ^{bc}	100 ^c	0.0110 ⁱ	0.00657 ^f	100 ^c	0.0110 ⁱ
	2.5	85 ^b	19 ^d	2.10 ^b	109 ^b	0.0175 ^h	0.00699 ^f	109 ^b	0.0175 ^h
	5	90 ^a	18 ^d	2.48 ^a	114 ^a	0.0227 ^g	0.00727 ^f	114 ^a	0.0227 ^g
50	0	67 ^{de}	35 ^b	1.56 ^c	60 ^d	0.0268 ⁱ	0.00828 ^f	60 ^d	0.0268 ⁱ
	2.5	71 ^{cd}	26 ^c	1.71 ^{de}	61 ^d	0.0391 ^e	0.01330 ^e	61 ^d	0.0391 ^e
	5	74 ^c	27 ^c	1.70 ^{de}	63 ^d	0.0476 ^d	0.01550 ^d	63 ^d	0.0476 ^d
20	0	52 ^g	44 ^a	1.20 ^f	48 ^f	0.0687 ^c	0.01830 ^e	48 ^f	0.0687 ^c
	2.5	60 ^f	35 ^b	1.56 ^{de}	56 ^e	0.0752 ^b	0.02650 ^b	56 ^e	0.0752 ^b
	5	64 ^e	30 ^c	1.79 ^{cd}	62 ^d	0.1082 ^a	0.03023 ^a	62 ^d	0.1082 ^a

*حروف مختلف، بر اساس آزمون LSD، اختلاف معنی‌دار را در سطح احتمال ۵ درصد نشان می‌دهند.

* Different letters indicate significant differences at the 5% probability level based on the LSD test.

نتیجه گیری

در لیتر، تأثیر به مراتب بهتری روی رشد و نمو گیاهان به همراه داشت. با این وجود، برای بررسی دقیق تر تأثیر تیديازورون بر رشد و نمو گیاهان تحت شرایط تنش کم آبیاری در گیاهان مختلف، نیاز به تحقیقات بیشتری در این زمینه است.

با توجه به نتایج به دست آمده می توان اظهار داشت که تیديازورون می تواند از طریق بهبود تبادلات گازی، افزایش رشد ریشه و فعالیت سیستم آنتی اکسیدانی آنزیمی، مقاومت گیاهان به تنش کم آبیاری را افزایش دهد. در بین غلظت های تیديازورون نیز غلظت پنج میلی گرم

References

1. Al-Dulime, M. A., & Al-Mohammed, M. (2023). Effect of spraying with growth regulators brassinolide and thidiazuron on the chemical content of leaves and pods of three okra hybrids under protected cultivation conditions. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1252(1), 012089. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1252/1/012089>
2. Ali, H., Khan, M., Kayani, W. K., Khan, T., & Khan, R. S. (2018). Thidiazuron regulated growth, secondary metabolism and essential oil profiles in shoot cultures of *Ajuga bracteosa*. *Industrial Crops and Products*, 121, 418-427. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.043>
3. Allahbakhsh, R., Chamani, E., Ghanbari, A., & Estaji, A. (2020). The influence of thidiazuron (TDZ) and silver thiosulfate (STS) on morphological and phytochemical characteristics under in-vitro condition in evening primrose. *Plant Process and Function*, 9(36), 251-261. (In Persian). <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-874-fa.html>
4. Arli, N. M., & Noli, Z. A. (2024). Shoot induction of dendrobium lasianthera JJ smith with several types of cytokinins through in vitro culture. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 10(4), 2059-2064. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i4.5324>
5. Calvo-Polanco, M., Armada, E., Zamarreño, A. M., García-Mina, J. M., & Aroca, R. (2019). Local root ABA/cytokinin status and aquaporins regulate poplar responses to mild drought stress independently of the ectomycorrhizal fungus *laccaria bicolor*. *Journal of Experimental Botany*, 70(21), 6437-6446. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz389>
6. Celikel, F. G., Zhang, Q., Zhang, Y., Reid, M. S., & Jiang, C. Z. (2021). A cytokinin analog thidiazuron suppresses shoot growth in potted rose plants via the gibberellic acid pathway. *Frontiers in Plant Science*, 12, 639717. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.639717>
7. Chieb, M., & Gachomo, E. W. (2023). The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. *BMC Plant Biology*, 23(1), 407. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04403-8>
8. Demidchik, V., Straltsova, D., Medvedev, S. S., Pozhvanov, G. A., Sokolik, A., & Yurin, V. (2014). Stress-induced electrolyte leakage: the role of K⁺ permeable channels and involvement in programmed cell death and metabolic adjustment. *Journal of Experimental Botany*, 65(5), 1259-1270. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru004>
9. Dewir, Y. H., Nurmansyah, Naidoo, Y., & da Silva, J. A. T. (2018). Thidiazuron-induced abnormalities in plant tissue cultures. *Plant Cell Reports*, 37(11), 1451-1470. <https://doi.org/10.1007/s00299-018-2326-1>
10. Erland, L. A., Giebelhaus, R. T., Victor, J. M., Murch, S. J., & Saxena, P. K. (2020). The morphoregulatory role of thidiazuron: metabolomics-guided hypothesis generation for mechanisms of activity. *Biomolecules*, 10(9), 1253. <https://doi.org/10.3390/biom10091253>
11. 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>
12. Guo, P. R., Wu, L. L., Wang, Y., Liu, D., & Li, J. A. (2023). Effects of drought stress on the morphological structure and flower organ physiological characteristics of *Camellia oleifera* flower buds. *Plants*, 12, 2585. <https://doi.org/10.3390/plants12132585>
13. Hussain, F., Hadi, F., & Akbar, F. (2019). Magnesium oxide nanoparticles and thidiazuron enhance lead phytoaccumulation and antioxidative response in *Raphanus sativus* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 30333-30347. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06206-7>
14. Jiang, T., Luo, C., Wan, W., Liang, R., Lu, T., Li, Y., & He, X. (2024). Effects of thidiazuron on the quality and storage properties of mango fruit during postharvest. *Food Quality and Safety*, 8, 47. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyad047>
15. Karnwal, A., Shrivastava, S., Al-Tawaha, A. S., Kumar, G., Kumar, A., & Kumar, A. (2023). PGPR-mediated breakthroughs in plant stress tolerance for sustainable farming. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11013-z>
16. Khan, A., & Singh, A. V. (2021). Multifarious effect of ACC deaminase and EPS producing *Pseudomonas* sp. and *Serratia marcescens* to augment drought stress tolerance and nutrient status of wheat. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03166-4>
17. Khandal, H., Gupta, S. K., Dwivedi, V., Mandal, D., Sharma, N. K., Vishwakarma, N. K., & Chattopadhyay, D. (2020). Root-specific expression of chickpea cytokinin oxidase/dehydrogenase 6 leads to enhanced root growth, drought tolerance

- and yield without compromising nodulation. *Plant Biotechnology Journal*, 18(11), 2225-2240. <https://doi.org/10.1111/pbi.13378>
18. Li, F., Wu, Q., Liao, B., Yu, K., Huo, Y., Meng, L., & Li, Z. (2022). Thidiazuron promotes leaf abscission by regulating the crosstalk complexities between ethylene, auxin, and cytokinin in cotton. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(5), 2696. <https://doi.org/10.3390/ijms23052696>
19. Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophyll and carotenoids—pigments of photosynthetic biomembranes. *Colowick SP, Kaplan NO Methods in Enzymology*, 148, 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
20. Liu, Y., Wang, X., Wang, X., Gao, W., & You, C. (2022). Identification and functional characterization of apple MdCKX5.2 in root development and abiotic stress tolerance. *Horticulturae*, 8(1), 62. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010062>
21. Luo, Y., Hu, T., Huo, Y., Wang, L., Zhang, L., & Yan, R. (2023). Effects of exogenous melatonin on chrysanthemum physiological characteristics and photosynthesis under drought stress. *Horticulturae*, 9, 106. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9010106>
22. 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>
23. 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>
24. Mutui, T. M., Mibus, H., & Serek, M. (2008). Effects of phytohormones and dark storage on postharvest quality of *Pelargonium* cuttings. *African Journal of Horticultural Science*, 1(1), 19-32.
25. Mutui, T. M., Emongor, M. J., & Hutchinson, M. J. (2004). Influence of plant growth regulators on postharvest characteristics of alstroemeria cut flowers. *Discovery and Innovation*, 16(3), 195-201. <https://doi.org/10.4314/dai.v16i3.15677>
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. Rasouli, O., Ahmadi, N., Behmanesh, M., & Nergi, M. D. (2015). Effects of BA and TDZ on postharvest quality and expression of laccase and aquaporin genes in cut rose 'Sparkle'. *South African Journal of Botany*, 99, 75-79. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.03.191>
28. 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>
29. 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. <https://doi.org/10.22059/ijhst.2024.368022.726>
30. Taiz, L. D., & Zeiger, E. (2006). *Plant Physiology* 4th Edition. Sunderland, MA, 764 p.
31. 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.
32. Wang, F., Li, Y., Pang, Y., Hu, J., Kang, X., & Qian, C. (2025). Thidiazuron enhances strawberry shoot multiplication by regulating hormone signal transduction pathways. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(9), 4060. <https://doi.org/10.3390/ijms26094060>
33. 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>
34. Vinaya Rai, R. S., & Parthiban, K. T. (1995). Studies on the drought tolerance of *Eucalyptus* at seedling stage. *Journal of Tropical Forest Science*, 8(2), 155 - 160. <https://www.jstor.org/stable/43582472>
35. Yang, G., Zhao, S., Gong, J., Huang, M., Yu, W., Zhang, K., & Hu, D. (2019). Dissipation and the effects of thidiazuron on antioxidant enzyme activity and malondialdehyde content in strawberry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(9), 4331-4337. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9666>
36. Yasemi, A., Rezaei Nejad, A., Mousavi-Fard, S., & Beiranvand, F. (2024). Effect of pinching and thidiazuron on morphophysiological and biochemical properties of *pelargonium graveolens* under water deficit stress. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 55(2), 215-240. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijhs.2023.363042.2117>
37. 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. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8080675>