



Evaluation of Ecophysiological Responses and Seed Yield of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) to Zinc Chelate and 24-epibrassinolide Foliar Application under Drought Stress Conditions

Ali Darjani¹ | Iraj Alahdadi^{2✉} | Hamid Jabbari³ | Hassan Amirioghan⁴ |

1. Department of Agrotechnology Sciences, Faculty of Agriculture, Tehran University, Aburaihan Campus, Pakdasht, County Iran. E-mail: darjani110@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Abu Raihan Campus, Pakdasht County, Iran. E-mail: alahdadi@ut.ac.ir
3. Department of Oil Seeds Research, Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: h.jabbari@areeo.ac.ir
4. Department of Oil Seeds Research, Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: amirioghan2014@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 4 January 2025
Received in revised form
12 February 2025
Accepted 21 February 2025
Published online 27 June 2025

Keywords:
Antioxidant
Flowering
Osmolyte
Physiological indicators
Seed filling

ABSTRACT

Objective: This study aimed to investigate zinc-chelate and 24-epibresinolide foliar application to compensate for reduced safflower seed yield (Goldasht cultivar) under drought-stress conditions.

Methods: The experiment was conducted as a split-factorial within a randomized complete block design, with three replications at the Seed and Plant Improvement Institute (SPII) in Karaj, Iran, across two growing seasons (2022-2024). The treatments included three levels of drought stress: at the flowering stage (I1), seed-filling stage (I2), and a control with regular irrigation (I3). Foliar applications of zinc were applied using distilled water (Zn1), zinc chelate at 3×1000 (Zn2), and at 6×1000 concentrations (Zn3). Additionally, 24-epibrassinolide was applied using distilled water (0 µM, B1) and at concentrations of 0.5 µM (B2) and 1 µM (B3).

Results: Drought stress significantly reduced grain yield, the SPAD index, relative leaf water content, and cell membrane stability, while increasing proline content, soluble sugars, and the activities of catalase and peroxidase enzymes. The highest grain yield was obtained under conventional irrigation (2466 kg/ha), whereas yields decreased to 1959 kg/ha during flowering and 2222 kg/ha during the seed-filling stage under drought conditions. The application of 24-epibrassinolide at 1 µM and zinc chelate at 3×1000 concentrations enhanced leaf relative water content, SPAD index, proline and soluble sugar content, cell membrane stability, and enzyme activities. Notably, the highest SPAD index (63.09), relative water content (81.11%), proline content (6.43 mg/g wet weight), and soluble sugar content (90.77 mg/g FW), along with the lowest electrolyte leakage, were observed with the combination of 24-epibrassinolide (1 µM) and zinc chelate (3×1000). The highest grain yield of 2398 kg/ha was also recorded under these treatment conditions, representing increases of 8% and 22% compared to drought-stressed conditions at flowering and seed-filling stages, respectively.

Conclusion: Foliar applications of zinc chelate and 24-epibrassinolide effectively mitigate the decline in safflower seed yield under drought stress. Specifically, the application of 24-epibrassinolide at 1 µM and zinc chelate at 3×1000 concentrations can help sustain yield in safflower. We recommend these treatments for safflower cultivation in Pakdasht City and similar regions facing irregular rainfall and limited precipitation, which can adversely affect safflower yield.

Cite this article: Darjani, A., Alahdadi, I., Jabbari, H., & Amirioghan, H. (2025). Evaluation of Ecophysiological Responses and Seed Yield of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) to Zinc Chelate and 24-epibrassinolide Foliar Application under Drought Stress Conditions. *Journal of Crops Improvement*, 27 (2), 239-260.
DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.388201.2913>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.388201.2913>

Publisher: University of Tehran Press.



ارزیابی پاسخ‌های اکوفیزیولوژیک و عملکرد دانه گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) به محلول‌پاشی کلات روی و ۲۴-اپی براسینولید در شرایط تنش خشکی

علی درجانی^۱ | ایرج اله‌دادای^۲ | حمید جباری^۳ | حسن امیری‌اوغان^۴

۱. گروه علوم کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، شهرستان پاکدشت، ایران. رایانامه: darjani110@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، پردیس ابوریحان، شهرستان پاکدشت، ایران. رایانامه: alahdadi@ut.ac.ir
۳. بخش تحقیقات دانه‌های روغنی، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: h.jabbari@areeo.ac.ir
۴. بخش تحقیقات دانه‌های روغنی، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: amirioghan2014@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

هدف: این مطالعه با هدف بررسی اثر محلول‌پاشی کلات روی و ۲۴-اپی براسینولید در جبران کاهش عملکرد دانه گلرنگ (رقم گلدشت) در شرایط تنش خشکی انجام شد.

روش پژوهش: آزمایش به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار طی سال‌های زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج اجرا شد. فاکتورهای موردبررسی شامل تنش خشکی در مرحله گل‌دهی (I_1)، در مرحله پرشدن دانه (I_2) و آبیاری معمول (شاهد) (I_3)، (ب) محلول‌پاشی روی شامل: محلول‌پاشی با آب مقطر (Zn_1)، محلول‌پاشی کلات روی با غلظت سه در هزار (Zn_2) و با غلظت شش در هزار (Zn_3) و (ج) محلول‌پاشی ۲۴-اپی براسینولید در سه سطح شامل محلول‌پاشی با آب مقطر (غلظت صفر میکرومولار (B_1))، محلول‌پاشی ۲۴-اپی براسینولید با غلظت ۰/۵ میکرومولار (B_2) و با غلظت ۱ میکرومولار (B_3) بود.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش عملکرد دانه، شاخص سبزی‌نگی، محتوای نسبی آب برگ و پایداری غشای سلولی شد، درحالی‌که محتوای پرولین، قندهای محلول و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در گلرنگ را افزایش داد. بیش‌ترین عملکرد دانه متعلق به تیمار آبیاری معمول (۲۴۶۶ کیلوگرم در هکتار) بود و عملکرد دانه در تیمارهای تنش خشکی در مراحل گلدهی (۱۹۵۹ کیلوگرم در هکتار) و پرشدن دانه (۲۲۲۲ کیلوگرم در هکتار) به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. محلول‌پاشی ۲۴-اپی براسینولید با غلظت یک میکرومولار و کلات روی با غلظت سه در هزار باعث بهبود محتوای نسبی آب برگ، شاخص سبزی‌نگی، محتوای پرولین، محتوای قندهای محلول، پایداری غشای سلولی و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز شد. بیش‌ترین میزان شاخص سبزی‌نگی (۶۳/۰۹)، محتوای نسبی آب (۸۱/۱۱ درصد)، محتوای پرولین (۶/۴۳ میلی‌گرم در گرم بر وزن تر)، محتوای قندهای محلول (۷۷/۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه) و کم‌ترین میزان نشت الکترولیت از غشا در تیمار ترکیب محلول‌پاشی ۲۴-اپی براسینولید با غلظت یک میکرومولار و کلات روی با غلظت سه در هزار به‌دست آمد. بیش‌ترین عملکرد دانه (۲۳۹۸ کیلوگرم در هکتار) نیز در همین شرایط محلول‌پاشی به‌دست آمد که منجر به افزایش ۸ و ۲۲ درصدی نسبت به عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی در مرحله گلدهی (۱۹۵۹ کیلوگرم در هکتار) و مرحله پرشدن دانه (۲۲۲۲ کیلوگرم در هکتار) شد.

نتیجه‌گیری: استفاده از محلول‌پاشی کلات روی و ۲۴-اپیبراسینولید در مزارع گلرنگ در غلظت‌های ذکرشده برای شهرستان پاکدشت و مناطق اقلیمی مشابه با بارندگی محدود به‌دلیل بارندگی‌های نامنظم (سیستم طبقه‌بندی کوپن) که باعث عملکرد پایین گلرنگ می‌شود، قابل توصیه است.

کلیدواژه‌ها:

آنتی‌اکسیدان
اُسمولیت
پرشدن دانه
شاخص‌های فیزیولوژیک
گلدهی

استناد: درجانی، علی؛ اله‌دادای، ایرج؛ جباری، حمید و امیری‌اوغان، حسن (۱۴۰۴). ارزیابی پاسخ‌های اکوفیزیولوژیک و عملکرد دانه گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) به محلول‌پاشی کلات روی و ۲۴-اپی براسینولید در شرایط تنش خشکی. به‌زراعی کشاورزی، ۲۷ (۲)، ۲۳۹-۲۶۰.
DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.388201.2913>



۱. مقدمه

کشور ایران به دلیل قرارگرفتن در نواحی خشک و نیمه‌خشک جهان، از نزولات آسمانی محدودی برخوردار است، متوسط بارندگی کشور حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که این میزان، حدود یک سوم میانگین بارندگی دنیا می‌باشد (معتضدی و همکاران ۱۳۹۸). به دلیل بارندگی نامنظم و کم در مناطق نیمه خشک، تعداد گیاهان دارای قابلیت تولید اقتصادی بسیار محدود است (صفاگل و اوزر^۱، ۲۰۲۲). بر این اساس، خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که با تغییر فرایندهای بیوشیمیایی و فیزیولوژیک عملکرد بسیاری از محصولات را تأثیر خود قرار می‌دهد (مانولیان^۲ و همکاران، ۲۰۲۱).

۲. پیشینه پژوهش

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید گیاهان زراعی در سراسر جهان به‌شمار می‌رود (جابرالداری^۳ و همکاران، ۲۰۱۷). تنش خشکی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش داده (موهودین^۴ و همکاران، ۲۰۲۰) و با کاهش محتوای نسبی آب (ژائو^۵ و همکاران، ۲۰۲۰)، کاهش محتوای کلروفیل (بارتوکولار^۶ و همکاران، ۲۰۱۹) و کاهش چشم‌گیر فتوسنتز (کاپور^۷ و همکاران، ۲۰۲۰) یکی از دلایل اصلی کاهش عملکرد دانه در محصولات زراعی به‌شمار می‌رود (کای^۸ و همکاران، ۲۰۲۰). به دنبال وقوع تنش‌های محیطی مکانیسم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاهان فعال می‌شود (معصومی^۹ و همکاران، ۲۰۱۰). در این راستا، آنزیم‌های سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز نقش اساسی در حفاظت از گیاهان در مقابله با تنش خشکی ایفا می‌کنند. پژوهش‌گران نشان دادند که فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز در پاسخ به تنش‌های محیطی نظیر خشکی و شوری افزایش پیدا کرد (مظهر^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۱). کاتالاز به‌عنوان یک آنزیم آنتی‌اکسیدانی عمل کرده و در پراکسی‌زوم‌ها و کاهش اثرات تخریبی گونه‌های فعال اکسیژن، حذف و روبندگی پراکسید هیدروژن تولید شده نقش مهمی بر عهده دارد (رضایی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۸). افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در شرایط تنش نشان‌دهنده این است که این آنزیم نقش کلیدی در پاکسازی گونه‌های فعال اکسیژن دارند (امینی و همکاران، ۱۳۹۳). پراکسیداز از H_2O_2 به‌عنوان سوبسترا برای واکنش استفاده می‌کند؛ هم‌چنین به دلیل میل ترکیبی زیاد پراکسیداز با H_2O_2 می‌توان گفت که با افزایش شدت تنش میزان پراکسیداز به دلیل افزایش گونه‌های فعال اکسیژن افزایش پیدا کند (میتلر^{۱۲}، ۲۰۰۲). برای افزایش مقاومت گیاهان به تنش، روش‌های مختلفی از جمله به‌نژادی، استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد (بلخادی^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۰)، هورمون‌های گیاهی (چن^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۸) و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی از جمله روی (حسین^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۶) کاربرد دارد. استفاده از هورمون‌های گیاهی یکی از راه‌کارهای امیدوارکننده و عملی

1. Sefaoglu and Ozer
2. Manvelian
3. Jabereldar
4. Muhu-Din
5. Zhao
6. Barutcular
7. Kapoor
8. Cai
9. Masoumi
10. Mazhar
11. Hydrogen peroxide
12. Mittler
13. Belkhadi
14. Chen
15. Hussain

برای افزایش بهره‌وری محصول در شرایط تنش است (چن^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). فیتوهورمون‌ها جایگاه مشخصی را در فهرست مواد شیمیایی اشغال می‌کنند که به‌طور مؤثری از طریق کاربرد برون‌زا یا تجمع درونی‌شان، تحمل استرس را در گیاهان القا می‌کنند (شارما^۲ و همکاران، ۲۰۱۹). در بین تمام هورمون‌های گیاهی، تصور می‌شود که براسینو استروئیدها قادر به کاهش تنش خشکی در گیاهان هستند (محمدی^۳ و همکاران، ۲۰۲۰).

عنصر روی به‌عنوان محدودکننده‌ترین عنصر کم‌مصرف در تولید گیاهان زراعی در بخش‌های مختلف جهان مطرح است (سهیلی موحد^۴ و همکاران، ۲۰۱۹). استفاده از عناصر ریزمغذی مانند آهن، روی و منگنز می‌تواند کمبود تغذیه‌ای و حساسیت گیاهان را به تنش خشکی کاهش دهد (وقار^۵ و همکاران، ۲۰۲۰). افزایش عملکرد گلرنگ به‌دلیل محلول‌پاشی روی در شرایط تنش خشکی گزارش شده است (رحمانی^۶ و همکاران، ۲۰۱۹). روی قابل انتقال مجدد به داخل گیاه نیست، بنابراین بهتر است از آن به‌عنوان محلول‌پاشی استفاده شود (مانولیان و همکاران، ۲۰۲۱)، بنابراین از محلول‌پاشی برگ‌ی روی به‌عنوان یک رویکرد زراعی برای مقابله با شرایط تنش خشکی یاد شده است (سهیلی موحد و همکاران، ۲۰۱۹). با این وجود اطلاعات مربوط به اثر محلول‌پاشی روی بر رشدونمو گلرنگ تحت تنش کمبود آب اندک است (خاقانی^۷ و صفری^۸، ۲۰۱۶). براسینولیدها با فعال کردن سیستم دفاعی با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POD)^۹ و گلوتاتیون ردوکتاز (GSH)^{۱۰} گیاهان در برابر تنش‌های غیرزیستی محافظت می‌کنند (سیتار^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۹) و با تأثیر بر محتوای پروتئین، تجمع مواد محافظت‌کننده اسمزی و حفظ محتوای نسبی آب^{۱۲} باعث افزایش تحمل گیاه به خشکی می‌شود (یوان^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۰). به‌دلیل این‌که فعالیت بیولوژیکی ۲۴-آپی براسینولید زیاد و استحصال آن نیز نسبتاً ساده است، یک ترکیب مشابه براسینولید بوده و قابلیت استفاده به‌عنوان یک براسینولید مصنوعی را دارد (ژیا^{۱۴} و همکاران، ۲۰۰۹). شواهد دیگری نشان داد که کاربرد ۲۴-آپی براسینولید می‌تواند رنگدانه‌های فتوسنتزی گیاهی، تولید اسمولیت‌ها، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و عملکرد دانه را تحت تنش خشکی بهبود بخشد (ظفری^{۱۵} و همکاران، ۲۰۲۰). بر این اساس، هدف کلی این مطالعه بررسی تأثیرگذاری کاربرد روی و ۲۴-آپی براسینولید بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و عملکرد دانه گلرنگ و افزایش تحمل به خشکی در شرایط تنش خشکی بوده است.

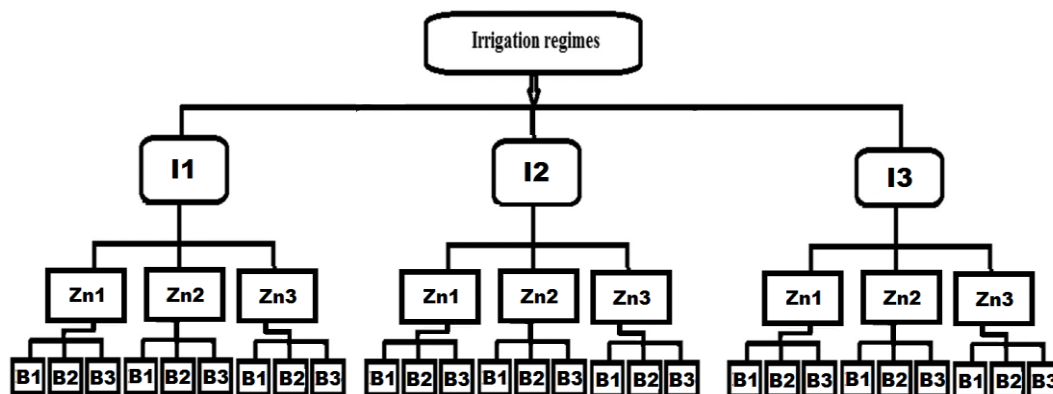
۳. روش‌شناسی پژوهش

جهت بررسی تأثیر محلول‌پاشی ۲۴-آپی براسینولید و کلات روی بر برخی پاسخ‌های اکوفیزیولوژیک گلرنگ تحت تنش خشکی، آزمایشی به‌صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی سال‌های زراعی

1. Chen
2. Sharma
3. Mohammadi
4. Soheili-Movahhed
5. Vaghar
6. Rahmani
7. Khaghani
8. Saffari
9. Superoxide dismutase
10. Catalase
11. Peroxidase
12. Glutathione reductase
13. Sytar
14. Relative Water Content
15. Yuan
16. Xia
17. Zafari

۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج، با موقعیت طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۷۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۹ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۱۳ متر از سطح دریا اجرا شد. براساس سیستم طبقه‌بندی کوپن، منطقه کرج دارای اقلیم سرد و نیمه‌خشک با متوسط بارندگی سالیانه ۲۴۳ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (جوشن و همکاران، ۱۳۹۹). بافت خاک مزرعه آزمایش، لومی رسی بود و مشخصات خاک محل آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است. سطوح عوامل به کار گرفته شده عبارت بودند از الف- سطوح رطوبتی شامل تنش خشکی در مرحله گل‌دهی (I_1)، تنش خشکی در مرحله پُرسیدن دانه (I_2) و آبیاری معمول (شاهد) (I_3); ب- محلول‌پاشی روی شامل: محلول‌پاشی با آب مقطر (Zn_1)، محلول‌پاشی کلات روی با غلظت ۳ در هزار (Zn_2)، محلول‌پاشی کلات روی با غلظت ۶ در هزار (Zn_3) و ج- محلول‌پاشی ۲۴-پی براسینولید در سه سطح شامل محلول-پاشی با آب مقطر (غلظت صفر میکرومولار) (B_1)، محلول‌پاشی ۲۴-پی براسینولید با غلظت ۰/۵ میکرومولار (B_2) و محلول‌پاشی ۲۴-پی براسینولید با غلظت ۱ میکرومولار (B_3) (شکل ۱).

۲۴-پی براسینولید از شرکت سیگما (Sigma-Aldrich Co., Madrid, Spain) و کلات‌روی از شرکت آلفا (Chelated EDTA; Europe Avan; Spain) تهیه گردید. بذر گلرنگ رقم گلدشت (بهاره، زودرس و متحمل به سرما) از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه و برای ضدعفونی بذر و جلوگیری از عفونت قارچی احتمالی، بذرها با محلول هیپوکلریت سدیم یک درصد به مدت دو دقیقه استریل و با آب لوله‌کشی و سپس با آب مقطر شسته شدند (مانولیان و همکاران، ۲۰۲۱). در شکل (۱) نمای کلی آزمایش (جریان روش پژوهش) ارائه شده است.



شکل ۱. فلوچارت روش تحقیق. تنش خشکی در مرحله گل‌دهی (I_1)، تنش خشکی در مرحله پُرسیدن دانه (I_2) و آبیاری معمول (شاهد) (I_3). محلول‌پاشی با آب مقطر (Zn_1)، محلول‌پاشی کلات روی با غلظت ۳ در هزار (Zn_2)، محلول‌پاشی کلات روی با غلظت ۶ در هزار (Zn_3)، محلول‌پاشی با آب مقطر (غلظت صفر میکرومولار) (B_1)، محلول‌پاشی ۲۴-پی براسینولید با غلظت ۰/۵ میکرومولار (B_2) و محلول‌پاشی ۲۴-پی براسینولید با غلظت ۱ میکرومولار (B_3).

محلول ۲۴-پی براسینولید با حل کردن آن در مقدار کمی اتانول و سپس رقیق کردن در آب MilliQ (اتانول: آب $(V/V)=1:10000$) و رساندن به حجم نهایی ۱۰ لیتر با آب در غلظت‌های ۰/۵ و ۱ میکرومولار تهیه شد. یک سورفکتانت Tween 20[®] (Sigma-Aldrich Co., Madrid, Spain) به میزان ۰/۱ درصد برای حفظ و نفوذ بهتر محلول ۲۴-پی براسینولید اضافه شد.

هر کرت آزمایشی شامل چهار ردیف کشت به طول ۴ متر بود که فاصله بین ردیف‌ها ۳۰ سانتی‌متر، فاصله بذور روی ردیف‌های کشت، ۵ سانتی‌متر، فاصله بین کرت‌ها ۱ متر و فواصل بین بلوک‌ها ۴ متر در نظر گرفته شد. براساس نتایج

تجزیه خاک مزرعه (جدول ۱)، اقدام به کود پاشی (کود اوره ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار در سه نوبت ۶۰ کیلوگرم به‌صورت پایه، ۱۲۰ کیلوگرم در مرحله ساقه‌دهی و ۷۰ کیلوگرم در مرحله شروع گل‌دهی، کود فسفات آمونیوم و سولفات پتاسیم به‌ترتیب ۱۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت پایه) شد.

جدول ۱. نتایج آزمون خاک محل انجام آزمایش (۰-۳۰ سانتی‌متر)

سیلت (درصد)	رس (درصد)	شن (درصد)	پتاسیم قابل جذب (پی‌پی‌ام)	فسفر قابل جذب (پی‌پی‌ام)	نیترژن کل (درصد)	هدایت الکتریکی خاک (دسی‌زیمنس بر متر)	کربن آلی	اسیدیته خاک	بافت خاک	عمق نمونه‌برداری (سانتی‌متر)
۴۹	۲۷	۲۴	۲۵۶	۱۲/۶	۰/۰۶	۲/۲۲	۰/۵۸	۷/۲۴	رسی لومی	۰-۳۰

پی‌پی‌ام: قسمت در میلیون

کشت گلرنگ به میزان ۲۵ کیلوگرم در هکتار در دو طرف پشته‌ها با تراکم ۶۶/۷ بوته در مترمربع در تاریخ ۱۳ مهرماه سال‌های زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۲-۱۴۰۳ انجام شد. از آنجایی‌که مراحل گل‌دهی و پُرسدن دانه در گلرنگ بیش‌ترین حساسیت به تنش خشکی را نشان می‌دهند. لذا بر این اساس، محلول‌پاشی کلات روی و هم‌چنین ۲۴-پی براسینولید یک هفته قبل از اعمال تنش خشکی توسط سمپاش پستی (مدل GT-PS-12L مجهز به نازل اسپری مخروطی) در خنک‌ترین ساعت طول روز (۷ صبح) در تمام سطح گیاه و درحد اشباع در مراحل گل‌دهی و پُرسدن دانه (کُدهای ۷۱ و ۶۱ جدول مقیاس BBCH) انجام شد.

قبل از کاشت از علف‌کش ترفلان^۱ (تریفلورالین^۲، EC 48%) به میزان دو لیتر در هکتار برای مبارزه با علف‌های هرز استفاده شد و با استفاده از دو بار دیسک عمود بر هم در خاک مخلوط شد (متین‌فر، ۱۳۹۰). در طول فصل رشد نیز کنترل علف‌های هرز طی سه مرحله با وجین دستی^۳ صورت گرفت. از مرحله طبق‌دهی تا پایان گلدهی جهت مبارزه با مگس گلرنگ^۴ سه مرتبه از سم ایمیداکلوپراید^۵ (کنفیدور^۶، SC35%)، شرکت گُل سم گرگان با غظت نیم لیتر در هکتار استفاده شد (موسوی و همکاران، ۱۳۹۹)، درضمن بیماری خاصی در مزرعه مشاهده نگردید. مراحل فنولوژیک رشد گلرنگ براساس مقیاس BBCH^۷ (آژانس بیولوژیکی فدرال، اداره فدرال انواع گیاهان و صنایع شیمیایی) که شامل مراحل رشد رویشی و زایشی است، تعیین شد (فلیمر^۸ و همکاران، ۲۰۱۹).

اندازه‌گیری قندهای محلول با استفاده از روش ایریگوین^۹ و همکاران (۱۹۹۲) انجام شد. به این منظور، ۰/۱ میلی‌لیتر از عصاره الکلی انتخاب و سپس ۳ میلی‌لیتر آنترون تازه تهیه‌شده به آن اضافه و به‌مدت ۱۰ دقیقه درحمام آب جوش قرار داده شد. پس از خنک‌شدن نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه، میزان جذب نمونه‌ها در طول موج ۶۲۵ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Model DR3900, HACH, USA) قرائت شد. در مرحله بعد، با استفاده از منحنی استاندارد، میزان قندهای محلول برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر محاسبه گردید. محتوای پرولین از ۰/۵ گرم نمونه برگ در

1. Treflan
2. Trifluralin
3. Hand weeding
4. Acanthiophilus helianthi
5. Imidacloprid
6. Confidor
7. Biologische Bundesantalt, Bundessortenamt and Chemische Industrie
8. Flemmer
9. Irigoyen

اسیدسولفوسالیسیلیک آبی ۳ درصد (w/v) استخراج شد و با استفاده از معرف نین هیدرین طبق روشی که توسط بیتز^۱ و همکاران (۱۹۷۳)، توصیف نموده اند، تخمین زده شد. جذب کسر با تولوئن به‌دست آمده از فاز مایع در ۵۲۰ نانومتر خوانده شد. غلظت پرولین با استفاده از منحنی کالیبراسیون تعیین شد و با واحد میکرومول پرولین بر گرم وزن تر بیان شد. به‌منظور اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز، نمونه‌های منجمدشده (۲۰۰ میلی گرم وزن تر)، در ۳ میلی لیتر بافر فسفات سدیم ۲۵ میلی مولار (pH=۶/۸) ساییده و با سرعت ۱۲۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد (این مراحل در ۴ درجه سانتی گراد انجام گرفت). از بخش شناور رویی حاصل برای سنجش فعالیت کاتالاز استفاده شد. در ادامه، ۳ میلی لیتر مخلوط واکنش حاوی بافر فسفات سدیم ۲۵ میلی مولار (pH=۶/۸)، ۱۰ میلی مولار H_2O_2 و عصاره آنزیم تهیه گردید و سپس روند واکنش با کاهش جذب در ۲۴۰ نانومتر در مدت ۳۰ ثانیه دنبال شد. فعالیت آنزیم برحسب تغییرات جذب به نسبت پروتئین عصاره بیان گردید (لوک^۲، ۱۹۷۴). میزان فعالیت آنزیم کاتالاز با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید:

رابطه (۱) پروتئین (میلی گرم) / جذب ابتدایی - جذب انتهایی = کاتالاز

به‌منظور اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD)، مقداری از عصاره که دارای ۵۰ میلی گرم پروتئین باشد (این مقدار با استفاده از منحنی استاندارد محاسبه شد)، ۵ میلی مولار گوئیکول و مقدار کافی بافر فسفات ۲۵ میلی مول با اسیدیت ۷ با هم مخلوط شد تا به حجم ۲ میلی لیتر رسید؛ در مرحله بعد این مخلوط در یک لوله آزمایش ریخته شد و با استفاده از قرارگیری در دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر صفر شد. میزان ۵ میکرولیتر پراکسید هیدروژن (H_2O_2) در ادامه به این مخلوط اضافه شد و به‌سرعت تغییرات جذب نور به فواصل ۱۰ ثانیه و به مدت ۱ دقیقه اندازه‌گیری شد (رئونی^۳، ۱۹۹۵).

شاخص سبزینگی (SPAD) به‌صورت غیرمستقیم و بدون ایجاد تخریب در برگ‌ها، با استفاده از دستگاه کلروفیل سنج (Single-Photon Avalanche Diode; Konica Minolta, Japan) تعیین گردید (ممنوئی^۴ و همکاران، ۲۰۰۶). محتوای نسبی آب برگ با استفاده از روش ارائه‌شده توسط معتضدی و همکاران (۲۰۲۲) و با استفاده از رابطه (۲) شد. در این رابطه، FW وزن تر نمونه‌ها، DW وزن آماس نمونه‌ها پس از شش ساعت غوطه وری در آب مقطر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و DW وزن خشک نمونه‌ها پس از چهار ساعت خشک شدن در آون در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد.

$$RWC = ((FW - DW) / (TW - DW)) \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

پس از مرحله رسیدگی فیزیولوژیک، بوته‌های دو ردیف وسط هر کرت آزمایشی (ردیف‌های ۳ و ۴) به طول دو متر، در سطح دو مترمربع و با در نظرگرفتن ۵۰ سانتی‌متر حاشیه از ابتدا و انتهای خطوط کشت، انتخاب و عملیات برداشت انجام شد؛ در مرحله بعدی به مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و سپس با استفاده از ترازوی دیجیتال (با دقت ۰/۰۱ گرم) اقدام به توزین شد و به‌عنوان عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد.

شاخص پایداری غشا (MSI) به روش قاسمی گل‌عزانی^۵ و همکاران (۲۰۱۴) اندازه‌گیری شد. بدین منظور ابتدا ۱۰۰ میلی گرم نمونه برگ در ۱۰ میلی لیتر آب مقطر به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد (EC_1) و سپس در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه (EC_2) حرارت داده شد. در هر مرحله هدایت الکتریکی به‌طور جداگانه اندازه‌گیری و ثبت شد و با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد:

$$MSI = ((EC_1) / EC_2) \times 100 \quad \text{رابطه (۳)}$$

1. Bates
2. Luck
3. Reuveni
4. Mamnoui
5. Ghassemi-Golezani

تجزیه واریانس مرکب داده‌ها پس از انجام آزمون بارتلت با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) انجام شد. مقایسه میانگین‌ها نیز به‌روش آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. برای مقایسه میانگین اثرات متقابل معنی‌دار نیز از روش بُرش‌دهی استفاده گردید.

۴. یافته‌های پژوهش

نتایج تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه در جدول (۲) درج شده است. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از آن بود که اثر آبیاری، روی، ۲۴-پی‌براسینولید و اثر متقابل ۲۴-پی‌براسینولید در روی بر کلیه صفات مورد بررسی شامل عملکرد دانه، محتوای پرولین، محتوای نسبی آب برگ، شاخص سبزی‌نگی، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز، محتوای قندهای محلول و پایداری غشای سلولی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). اثر ساده سال و سایر اثرات متقابل دوگانه و سه گانه تأثیر معنی‌داری بر صفات مورد بررسی نداشت (جدول ۲).

۴.۱. شاخص سبزی‌نگی (SPAD)

بیش‌ترین شاخص سبزی‌نگی ($50/33$) در شرایط بدون اعمال تنش خشکی (I_3) حاصل شد (جدول ۳). قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی (I_1) و پُرشدن دانه‌ها (I_2) منجر به کاهش میزان این شاخص شد ($49/49$ و $50/33$) و این کاهش در مرحله گل‌دهی نسبت به سایر تیمارها، مقدار بیش‌تری بود (جدول ۳). با توجه به همبستگی مثبت بین مقدار SPAD و RWC، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش محتوای نسبی آب می‌تواند مقدار SPAD را افزایش دهد (جدول ۴). بالاترین میزان شاخص سبزی‌نگی ($63/09$) در مقایسه میانگین اثر متقابل محلول‌پاشی کلات‌روی و ۲۴-پی‌براسینولید (جدول ۳) متعلق به تیمار B_3Zn_2 (ترکیب محلول‌پاشی بور با غلظت $0/5$ میکرومولار و کلات روی با غلظت سه در هزار) بود. این تیمار، تفاوت معنی‌داری از نظر آماری با تیمارهای B_2Zn_3 ، B_3Zn_1 و B_1Zn_3 نداشت. نتایج مقایسه میانگین حاصله حاکی از آن بود که محلول‌پاشی ۲۴-پی‌براسینولید با شاخص کلروفیل $36/40$ نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی با شاخص کلروفیل $34/8$ ، با $4/59$ درصد، برتری معنی‌داری داشته است.

۴.۲. محتوای نسبی آب برگ

توانایی گیاه در حفظ آب سلولی یکی از مهم‌ترین متغیرها در بقای گیاه در شرایط خشکی است. اعمال تنش خشکی منجر به کاهش محتوای نسبی آب برگ گل‌رنگ در مقایسه با شرایط آبیاری معمول شد (جدول ۳)؛ کم‌ترین مقدار RWC در مرحله گلدهی ثبت گردید ($64/98$ درصد) و پس از آن، تنش خشکی در مرحله پُرشدن دانه‌ها در رتبه بعدی قرار گرفت ($65/36$ درصد) (جدول ۳). تنش خشکی در مقایسه با شرایط آبیاری معمول منجر به کاهش $8/23$ درصدی RWC در مرحله گل‌دهی شد. با در نظر گرفتن همبستگی مثبت بین PC و RWC ($r=0/94$) استنباط می‌شود که با محلول‌پاشی روی و ۲۴-پی‌براسینولید، PC افزایش یافته و منجر به افزایش RWC شده است؛ در این زمینه، بررسی مقایسه میانگین اثر متقابل محلول‌پاشی کلات روی و ۲۴-پی‌براسینولید بر صفت محتوای نسبی آب حاکی از آن بود که بیش‌ترین مقدار محتوای نسبی آب ($81/11$ درصد) در تیمار B_3Zn_2 به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با تیمار B_2Zn_3 ($80/04$ درصد) نداشت (جدول ۳).

۴.۳. محتوای پرولین

محتوای پرولین تحت شرایط آبیاری کامل به‌دلیل ناپایداری پرولین در شرایط در دسترس بودن رطوبت کاهش یافت (جدول ۳).

این نتایج با یافته‌های معتضدی و همکاران (۲۰۲۲) در تطابق است. اعمال تنش خشکی هم در زمان گل‌دهی و هم در زمان پُرسدن دانه‌ها بیش‌ترین میزان پرولین را داشت (جدول ۳). هم‌چنین میزان پرولین در شرایط آبیای معمول (۳/۴۸ میلی‌گرم در گرم وزن‌تر) ۶۲/۹۳ و ۵۸/۶۲ درصد به‌ترتیب بیش‌تر از تنش خشکی در زمان گل‌دهی (۵/۶۷ میلی‌گرم در گرم بر وزن‌تر) و زمان پُرسدن دانه‌ها (۵/۵۲ میلی‌گرم در گرم بر وزن‌تر) بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل محلول‌پاشی کلات روی و ۲۴-پی‌برسینولید نشان داد که بیش‌ترین محتوای پرولین متعلق به تیمار B_3Zn_2 (۶/۴۳ میلی‌گرم در گرم بر وزن‌تر) بود اما تفاوت در محلول‌پاشی کلات روی و ۲۴-پی‌برسینولید در تیمار B_3Zn_2 و تیمارهای B_1Zn_3 (۶/۱۰ میلی‌گرم در گرم بر وزن‌تر) و B_2Zn_3 (۵/۷۰ میلی‌گرم در گرم بر وزن‌تر) از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۳).

۴.۴. قندهای محلول

بیش‌ترین میزان قند محلول برگ (۷۵/۱۳ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) در تیمار اعمال تنش خشکی در مرحله گل‌دهی (I_1) و بعد از آن در تیمار تنش خشکی در مرحله پُرسدن دانه (I_2) (۷۳/۰۵ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) حاصل شد؛ در این شرایط، کم‌ترین میزان قندهای محلول متعلق به تیمار آبیاری معمول (I_3) (۷۰/۴۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) بود (جدول ۳). باتوجه به همبستگی مثبت بین کربوهیدرات‌های محلول و پایداری غشای سلولی ($r=0.94$) می‌توان نتیجه گرفت که افزایش WSC منجر به افزایش MSI شده است (جدول ۵). بررسی مقایسه میانگین اثر متقابل محلول‌پاشی کلات روی و ۲۴-پی‌برسینولید بر صفت محتوای قندهای محلول حاکی از آن بود که بیش‌ترین مقدار این صفت (۹۰/۷۷ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) در تیمار B_3Zn_2 به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با تیمار B_2Zn_3 (۸۷/۶۷ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) و (۶۲/۹۱ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر) نداشت (جدول ۳). محلول‌پاشی روی باعث افزایش WSC شد.

۴.۵. فعالیت آنزیم کاتالاز

بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط تنش خشکی به‌ترتیب در مرحله گل‌دهی (۳/۸۵ نانومول بر میلی‌گرم پروتئین بر دقیقه) و پُرسدن دانه‌ها (۲/۸ نانومول بر میلی‌گرم پروتئین بر دقیقه) و کم‌ترین آن در شرایط آبیاری معمول مشاهده شد (جدول ۳). با درنظرگرفتن همبستگی مثبت بین CAT و RWC ($r=0.71$) استنباط می‌شود که با محلول‌پاشی روی و ۲۴-پی‌برسینولید، CAT افزایش یافته و منجر به افزایش RWC شده است. افزایش RWC میزان شاخص سبزیگی ($r=0.92$) و MSI ($r=0.93$) را افزایش داده در نهایت، با توجه به همبستگی بین GY با RWC ($r=0.90$) و MSI ($r=0.95$)، استنباط می‌شود که افزایش CAT باعث افزایش GY شده است ($r=0.88$) (جدول ۵). نتایج بررسی مقایسه میانگین اثر متقابل محلول‌پاشی کلات روی و ۲۴-پی‌برسینولید بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز نشان داد که بیش‌ترین مقدار (۳/۵۳ نانومول بر میلی‌گرم پروتئین بر دقیقه) در تیمار B_1Zn_3 به‌دست آمد؛ این تیمار تفاوت معنی‌داری با تیمارهای B_2Zn_3 و B_3Zn_3 نداشت (جدول ۴). به این مفهوم که اعمال تیمارهای کلات‌روی و ۲۴-پی‌برسینولید فعالیت آنزیم کاتالاز را افزایش داد (جدول ۴).

۴.۶. فعالیت آنزیم پراکسیداز

بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز به‌ترتیب در مرحله گل‌دهی (۴/۸۱ نانومول بر میلی‌گرم پروتئین بر دقیقه) و پُرسدن دانه‌ها در گلرنگ (۳/۸۵ نانومول بر میلی‌گرم پروتئین بر دقیقه) و کم‌ترین آن در شرایط آبیاری معمول

مشاهده شد (جدول ۳). با در نظر گرفتن همبستگی مثبت بین POD و RWC ($r=0/81$) استنباط می‌شود که با محلول‌پاشی روی و ۲۴-پی برسی‌نولید، RWC افزایش یافته است. افزایش RWC منجر به افزایش SPAD ($r=0/92$) و بهبود MSI ($r=0/93$) شده و در نهایت، با توجه به همبستگی بین GY و POD ($r=0/84$)، استنباط می‌شود که افزایش POD باعث افزایش GY شده است. با توجه به همبستگی مثبت بین POD و PC ($r=0/80$)، می‌توان نتیجه گرفت که محلول‌پاشی روی و ۲۴-پی برسی‌نولید منجر به افزایش پرولین و متعاقب آن افزایش RWC شده است. مقایسه میانگین اثر متقابل محلول‌پاشی کلات روی و ۲۴-پی برسی‌نولید بیانگر این مطلب بود که اعمال این تیمارها فعالیت آنزیم پراکسیداز را افزایش داده، به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار فعالیت این آنزیم ($8/52$ نانومول بر میلی‌گرم پروتئین بر دقیقه) در تیمار B_3Zn_2 به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با تیمارهای B_1Zn_3 ($7/77$ نانومول بر میلی‌گرم پروتئین بر دقیقه) و B_2Zn_2 ($2/79$ نانومول بر میلی‌گرم پروتئین بر دقیقه) نداشت (جدول ۴).

۷.۴. پایداری غشای سلولی

کم‌ترین میزان نشت الکترولیت از غشا و در نتیجه بیش‌ترین پایداری غشا مربوط به تیمار آبیاری نرمال ($37/85$ درصد) و بیش‌ترین میزان تراوش غشا و در نتیجه کم‌ترین پایداری غشا مربوط به تیمارهای تنش خشکی در مرحله پُرشدن دانه ($39/51$ درصد) و مرحله گل‌دهی ($41/06$ درصد) بود (جدول ۳). با در نظر گرفتن همبستگی مثبت بین RWC و MSI (جدول ۴)، می‌توان گفت که افزایش RWC از پایداری غشا پشتیبانی می‌کند. محلول‌پاشی روی و ۲۴-پی برسی‌نولید تا حد زیادی اثر تنش خشکی را بر MSI جبران کرد با این استدلال که مقایسه میانگین اثر متقابل محلول‌پاشی کلات روی و ۲۴-پی برسی‌نولید بیانگر این مطلب بود که کم‌ترین میزان تراوش غشا به‌صورت مشترک در تیمارهای B_3Zn_2 ($28/58$ درصد) و B_3Zn_3 ($34/04$ درصد) به‌دست آمد (جدول ۳)، لذا بیش‌ترین پایداری غشا مربوط به تیمارهای B_3Zn_2 و B_3Zn_3 بود.

۸.۴. عملکرد دانه

بیش‌ترین عملکرد دانه در تیمار آبیاری معمول (2466 کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد و میانگین عملکرد دانه به‌ترتیب در تیمارهای تنش خشکی در مراحل گل‌دهی و پُرشدن دانه (1959 و 2222 کیلوگرم در هکتار) کاهش یافت (جدول ۴). تنش خشکی باعث کاهش عملکرد دانه شد. در توافق با این نتایج، عباس و همکاران (عباس^۱ و همکاران، ۲۰۱۸) گزارش دادند که تنش خشکی (۳۵ درصد ظرفیت نگهداری آب خاک) منجر به کاهش ۳۹ درصدی عملکرد دانه گندم در مقایسه با آبیاری معمولی شد. با در نظر گرفتن همبستگی مثبت بین PC و RWC ($r=0/94$) استنباط می‌شود که با محلول‌پاشی روی و ۲۴-پی برسی‌نولید، PC افزایش یافته و منجر به افزایش RWC شده است. افزایش RWC اجزاء عملکرد را افزایش داده (نتایج نشان داده نشده است) در نهایت، با توجه به همبستگی بین GY و RWC ($r=0/90$)، استنباط می‌شود که افزایش RWC باعث افزایش GY شده است. با توجه به همبستگی مثبت بین RWC و SPAD ($r=0/92$)، می‌توان نتیجه گرفت که محلول‌پاشی روی و ۲۴-پی برسی‌نولید (و متعاقب آن افزایش محتوای نسبی آب) منجر به افزایش شاخص SPAD می‌شود. افزایش SPAD به نوبه خود باعث افزایش اجزای عملکرد می‌شود (نتایج نشان داده نشده است). همبستگی مثبت بین GY و SPAD نشان داد که افزایش شاخص سبزی‌نگی، عملکرد دانه را افزایش

می‌دهد. افزایش شاخص SPAD هم‌چنین منجر به افزایش تولید و انتقال مواد فتوسنتزی به بذر و طولانی‌شدن دوره پرشدن بذر می‌شود.

مقایسه میانگین اثر متقابل محلول‌پاشی کلات روی و ۲۴-پی برسی‌نولید نیز بیانگر این مطلب بود که بیش‌ترین میزان عملکرد دانه به‌صورت مشترک در تیمارهای B_3Zn_2 (۲۳۹۸/۵۶) کیلوگرم در هکتار، B_1Zn_3 (۲۱۱۶/۰۶) کیلوگرم در هکتار، B_2Zn_2 (۲۰۷۵) کیلوگرم در هکتار و B_2Zn_3 (۱۹۷۷) کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد (جدول ۳).

جدول ۲. تجزیه واریانس عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک (میانگین مربعات) در گیاه گلرنگ (*Carthamus tinctorius L.*)

منابع تغییر	درجه آزادی	عملکرد دانه	پرویلین	محتوای نسبی آب	شاخص سبزی‌نگی	فعالیت آنزیم کاتالاز	فعالیت آنزیم پراکسیداز	قندهای محلول	پایداری غشا سلولی
سال	۱	۵۵۴۰۵۳/۵۵ns	۴۵/۰۷ns	۲۶۸/۸۸ns	۹۰/۳۷ns	۳۸/۷۰ns	۱۷۱/۴۹ns	۴۹۹۰/۵۶ns	۴۶۶/۳۴ns
تکرار × سال	۴	۱۹۱۱۱۰/۱۴	۳۰/۲۱	۱۰۰۷/۴۲	۲۸۷۴/۴۰	۲۷/۶۴	۱۰۶/۱۱	۵۷۵۶/۱۹	۱۷۶۳/۲۰
آبیاری	۲	۱۵۵۷۲۰/۷۴**	۰/۶۶**	۲۶/۱۹**	۲۶/۶۸**	۰/۹۵۲**	۰/۹۵۵**	۳۰۱/۱۶**	۱۳۸/۸۷**
سال × آبیاری	۲	۱۲۸۷/۰۱ns	۰/۰۰ns	۰/۰۲ns	۹/۹۱ns	۰/۰۴۱ns	۰/۱۷۶ns	۱۵/۰۳ns	۵/۱۵ns
سال × تکرار × آبیاری	۸	۶۶۱۷/۳۷	۰/۱۰۷	۰/۳۱۱	۱/۲۸	۰/۰۴۲	۰/۱۰۳	۱۴/۷۰	۱/۹۶
روی	۲	۵۲۱۳۰۸/۳۷**	۱/۳۱**	۳۳۷/۷۳**	۱۷۲/۳۱**	۵/۷۵**	۶/۰۴**	۷۱۷/۹۷**	۱۶۵۷/۳۷**
براسینولید	۲	۱۸۲۶۵۶۰/۰۴**	۷/۶۱**	۷۷۶۲/۶۳**	۵۳۵۷/۱۶**	۸/۲۰**	۲۶/۵۷**	۹۷۲۲/۶۶**	۶۰۰/۲۴**
سال × روی	۲	۴۴۲۵/۹۰ns	۰/۷۸ns	۰/۷۹ns	۷/۰۲ns	۰/۳۲۲ns	۱/۶۲۶ns	۲۷/۴۲ns	۷۷/۰۳ns
سال × براسینولید	۲	۶۰۹۲/۵۷ns	۰/۰۵ns	۱/۸۷ns	۴۴/۸۹ns	۰/۰۲۶ns	۰/۱۷۵ns	۵/۶۰ns	۰/۷۴ns
آبیاری × روی	۴	۱۶۶۵۳/۱۵ns	۰/۰۵۳ns	۱/۳۸ns	۱۰/۶۸ns	۰/۰۰۶ns	۰/۰۴۰ns	۱۴/۱۶ns	۶/۰۸ns
آبیاری × براسینولید	۴	۲۳۸۸/۳۴ns	۰/۰۲۵ns	۰/۵۳ns	۷/۵۱ns	۰/۰۰۲ns	۰/۰۱۴ns	۰/۸۳ns	۱/۶۳ns
براسینولید × روی	۴	۶۲۱۹۰۷/۶۷**	۶/۸۹**	۱۱۲۵/۰۵**	۸۳۵/۶۷**	۱/۰۰۲**	۲۲/۳۱**	۱۲۸۳/۹۷**	۵۳۲/۴۴**
سال × آبیاری × روی	۴	۲۲۱۶/۳۱ns	۰/۰۲۰ns	۰/۰۳۶ns	۰/۹۴ns	۰/۰۱۸ns	۰/۰۲۸ns	۶/۸۹ns	۰/۴۶۵ns
سال × آبیاری × براسینولید	۴	۵۲۶/۱۲ns	۰/۰۰۲ns	۰/۳۱ns	۲۰/۴۸ns	۰/۰۰۴ns	۰/۰۳۹ns	۱/۸۱ns	۱/۵۷۶ns
سال × روی × براسینولید	۴	۸۴۸۳/۸۱ns	۰/۰۷۵ns	۰/۱۲۶ns	۲/۸۶ns	۰/۰۲۶ns	۰/۲۹۱ns	۲/۵۱ns	۱/۰۳ns
آبیاری × روی × براسینولید × روی	۸	۳۵۲۶/۲۸ns	۰/۰۲۱ns	۰/۳۶۹ns	۱۸/۷۱ns	۰/۰۰۳ns	۰/۰۳۲ns	۹/۹۲ns	۱/۸۹ns
سال × آبیاری × براسینولید × روی	۸	۱۰۱۱/۳۰ns	۰/۰۰۸ns	۰/۰۰۸ns	۱۲/۰۳ns	۰/۰۰۱ns	۰/۰۰۷ns	۶/۵۱ns	۱/۶۳ns
خطای کرت فرعی	۹۶	۳۷۳۲۲/۳۰	۰/۰۸۴	۳/۱۹	۱۴/۹۳	۰/۰۸۴	۰/۴۳۶	۱۳	۴/۹۷
ضریب تغییرات (درصد)	-	۱۲/۵۸	۵/۲۲	۲/۷۲	۷/۷۹	۱۰/۳۹	۹/۶۰	۴/۹۵	۵/۶۵

ns و ** به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد و عدم وجود تفاوت معنی‌دار.

جدول ۳. مقایسه میانگین عملکرد دانه و برخی صفات فیزیولوژیک در گلرنگ در تیمارهای آبیاری

آبیاری	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	پرویلین (میلی گرم بر گرم وزن تازه)	محتوای نسبی آب (درصد)	شاخص سبزی‌نگی (بدون واحد)	فعالیت آنزیم کاتالاز (نانومول میلی گرم پروتئین دقیقه)	فعالیت آنزیم پراکسیداز (نانومول میلی گرم پروتئین دقیقه)	قندهای محلول (میلی گرم بر گرم وزن تازه)	پایداری غشای سلولی (درصد)
I ₁	۱۹۵۹c	۵/۶۷a	۶۴/۹۸b	۴۸/۹۳c	۳/۸۵a	۴/۸۱a	۷۵/۱۳a	۴۱/۰۶a
I ₂	۲۲۲۲b	۵/۵۲a	۶۵/۳۶b	۴۹/۴۹b	۲/۸۰b	۳/۸۵b	۷۳/۰۵b	۳۹/۵۱b
I ₃	۲۴۶۶a	۳/۴۸b	۷۰/۳۳a	۵۰/۳۳a	۱/۵۵c	۲/۱۷c	۷۰/۴۲c	۳۷/۸۵c
LSD 5%	۳۶	۰/۱۴	۰/۲۴	۰/۵	۰/۰۹۱	۰/۱۷	۱/۷۰	۰/۶۲

I₁: تنش خشکی در مرحله گل‌دهی، I₂: تنش خشکی در مرحله پرشدن دانه‌ها و I₃: آبیاری معمول.

LSD حداقل اختلاف معنی‌دار.

جدول ۴. مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری‌شده در گلرنگ تحت تأثیر محلولپاشی ۲۴-آپی براسینولید و کلات‌روی

پایداری غشای سلولی (درصد)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	فعالیت آنزیم پراکسیداز (نانومول میلی‌گرم پروتئین دقیقه)	فعالیت آنزیم کاتالاز (نانومول میلی‌گرم پروتئین دقیقه)	قندهای محلول (میلی‌گرم بر گرم وزن تازه)	پروکلین (میلی‌گرم بر گرم وزن تازه)	محتوای نسبی آب (درصد)	شاخص سبزی‌نگی (بدون واحد)	تیمارها	
								محلول‌پاشی روی	محلول‌پاشی ۲۴-آپی براسینولید
۳۹/۲۰ ^a	۱۶۲۶ ^c	۵/۵۱ ^c	۳/۰۳ ^b	۵۲/۶۰ ^c	۴/۸۶ ^c	۴۹/۲۳ ^c	۳۵/۰۹ ^c	Zn ₁	B ₁
۳۳/۹۴ ^b	۱۸۰۳ ^b	۵/۹۲ ^b	۳/۱۶ ^b	۵۸/۰۸ ^b	۵/۰۴ ^b	۵۲/۰۹ ^b	۳۸/۸۶ ^b	Zn ₂	
۳۹/۰۹ ^a	۲۱۱۶ ^a	۷/۷۷ ^a	۳/۵۳ ^a	۶۲/۹۱ ^a	۶/۱۰ ^a	۵۴/۶۹ ^a	۴۱/۲۷ ^a	Zn ₃	
۱/۵۷	۵۱	-/۰۳	-/۰۳۳	۲/۴۶	-/۱۶	۱/۰۲	۲/۰۱	LSD ($\alpha=0.05$)	
۴۵/۰۲ ^a	۱۹۰۹ ^b	۶/۶۱ ^b	۲/۵۵ ^b	۶۸/۴۴ ^c	۵/۴۱ ^b	۶۲/۹۰ ^c	۴۷/۶۵ ^c	Zn ₁	B ₂
۳۹/۴۶ ^b	۱۹۷۷ ^{ab}	۷/۳۱ ^a	۲/۵۹ ^b	۷۴/۹۱ ^b	۴/۸۹ ^c	۶۵/۷۱ ^b	۵۰/۷۳ ^b	Zn ₂	
۴۵/۱۹ ^b	۲۰۷۵ ^a	۵/۷۱ ^c	۲/۷۹ ^a	۸۷/۶۷ ^a	۵/۷۰ ^a	۸۰/۰۴ ^a	۶۰/۱۵ ^a	Zn ₃	
۱/۶۲	۱۵۷	-/۵۸	-/۱۸	۲/۶۲	-/۱۸	-/۹۳	۱/۵۵	LSD ($\alpha=0.05$)	
۵۰/۷۳ ^a	۲۱۸۰ ^b	۷/۷۱ ^b	۲/۰۹ ^c	۸۴/۹۸ ^b	۶/۰۱ ^b	۷۶/۵۴ ^b	۵۹/۹۲ ^a	Zn ₁	B ₃
۲۸/۵۸ ^c	۲۳۹۸ ^a	۸/۵۲ ^a	۲/۲۴ ^b	۹۰/۷۷ ^a	۶/۴۳ ^a	۸۱/۱۱ ^a	۶۳/۰۹ ^a	Zn ₂	
۳۴/۰۴ ^c	۲۰۵۹ ^c	۶/۸۲ ^c	۳/۱۸ ^a	۷۵/۴۱ ^c	۵/۵۰ ^c	۶۷/۷۳ ^c	۴۹/۵۳ ^b	Zn ₃	
۱/۸۷	۸۳	-/۵۵	-/۱۵	۲/۸۱	-/۲۰	۱/۱۸	۳/۴۸	LSD ($\alpha=0.05$)	

B₁: محلول‌پاشی با آب مقطر، B₂: محلول‌پاشی با غلظت ۰/۵ میکرومولار ۲۴-آپی براسینولید، B₃: محلول‌پاشی با غلظت ۱ میکرومولار ۲۴-آپی براسینولید. Zn₁: آبیاری معمول (شاهد)، Zn₂: محلول‌پاشی کلات روی با غلظت ۳ در هزار، Zn₃: محلول‌پاشی کلات روی با غلظت ۶ در هزار. LSD: حداقل اختلاف معنی‌دار.

جدول ۵. همبستگی بین صفات اندازه‌گیری‌شده در گلرنگ

MSI	SPAD	RWC	WSC	PC	POD	CAT	GY	
۰/۹۵**	۰/۸۶**	۰/۹۰**	۰/۸۰**	-۰/۶۳**	۰/۸۴*	۰/۸۸*	۱	GY
۰/۷۴**	۰/۵۴*	۰/۵۱*	۰/۴۴ ^{ns}	۰/۵۷*	۰/۷۷*	۱	۰/۵۸*	CAT
۰/۸۰**	۰/۸۰**	۰/۸۱**	۰/۵۹*	۰/۸۰**	۱	۰/۶۷*	۰/۶۴*	POD
۰/۹۲**	۰/۹۴**	۰/۹۴**	۰/۸۷**	۱	۰/۸۰**	۰/۵۷*	-۰/۶۲**	PC
۰/۷۱**	۰/۸۵**	۰/۷۷**	۱	۰/۸۷**	۰/۵۹*	۰/۴۴ ^{ns}	۰/۸۰**	WSC
۰/۹۳**	۰/۹۲**	۱	۰/۷۷**	۰/۹۴**	۰/۸۱**	۰/۷۱*	۰/۹۰**	RWC
۰/۹۲**	۱	۰/۹۲**	۰/۸۵**	۰/۹۴**	۰/۸۰**	۰/۷۴*	۰/۸۶**	SPAD
۱	۰/۹۲**	۰/۹۳**	۰/۷۱**	۰/۹۲**	۰/۸۰**	۰/۷۴**	۰/۹۵**	MSI

GY: عملکرد دانه، CAT: کاتالاز، POD: پراکسیداز، PC: محتوای پروکلین، WSC: قندهای محلول، RWC: محتوای نسبی آب، SPAD: شاخص سبزی‌نگی، MSI: پایداری غشاء سلولی.

*, **, ns به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد و عدم وجود تفاوت معنی‌دار.

۵. بحث

محلول‌پاشی روی باعث بهبود شاخص SPAD شده است؛ روی به فعال‌شدن آنزیم‌های پروتئین سنتز در بیوستنز کلروفیل و برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کمک می‌کند و با محافظت از کلروفیل در برابر تخریب توسط رادیکال‌های فعال اکسیژن، محتوای کلروفیل را افزایش می‌دهد (مانولیان و همکاران، ۲۰۲۲). می‌توان علت افزایش محتوای کلروفیل برگ در نتیجه کاربرد عناصر غذایی مانند پتاسیم، روی و بور را به نقش این عناصر در کاهش سمیت انواع اکسیژن فعال با افزایش غلظت آنتی‌اکسیدان‌ها و متعاقب آن افزایش سرعت فتوسنتز در گیاه نسبت داد (واراچ و همکاران، ۲۰۱۲). نتایج مطالعه محمدی خلیفه لویی و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد که تأثیر محلول‌پاشی ۲۴-آپی براسینولید بر شاخص

کلروفیل در سطح پنج درصد معنی‌دار گردید. کاهش میزان عدد SPAD در گلرنگ در شرایط تنش خشکی توسط موحدی‌دهنوی^۱ و همکاران (۲۰۰۹) و مانولیان و همکاران (۲۰۲۲) گزارش شده است. کاهش میزان سبزیگی تحت تنش کم‌آبی می‌تواند به علت افزایش رادیکال‌های آزاد اکسیژن باشد که این رادیکال‌ها سبب پراکسیداسیون و تجزیه رنگیزه کلروفیل می‌گردند (شریفا و موریفاه^۲، ۲۰۱۵). در برخی مطالعات این کاهش به افزایش فعالیت آنزیم کلروفیل‌از نسبت داده شده؛ اگرچه در تجزیه کلروفیل، پراکسیداز و ترکیبات فنلی نیز نقش دارند (وقار، ۱۴۰۰).

افزایش محتوای نسبی آب در شرایط آبیاری معمول در مقایسه با مراحل گل‌دهی و پُرسیدن دانه‌ها (جدول ۴) باعث افزایش دسترسی به آب و بهبود استفاده از عناصر غذایی برگ‌ی توسط گیاهان به دلیل افزایش فتوسنتز شد. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج معتضدی^۳ و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد.

با توجه به همبستگی مثبت بین PC و RWC (جدول ۴)، می‌توان گفت که افزایش پرولین باعث افزایش محتوای نسبی آب می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده در توافق با نتایج معتضدی و همکاران (۲۰۲۲) است. محلول‌پاشی روی باعث افزایش RWC شد. افزایش RWC با محلول‌پاشی روی به دلیل نقش روی در تنظیم بازشدن دهانه روزنه‌هاست، زیرا این عنصر با ایفای نقش خود در حفظ پتاسیم در سلول‌های نگهبان روزنه باعث کاهش تلفات آب و افزایش RWC می‌شود (حسن عمر^۴ و همکاران، ۲۰۲۰). پژوهش‌گران معتقدند کاهش میزان RWC بر اثر تنش خشکی مربوط به بسته‌شدن روزنه‌ها می‌باشد و علت بسته‌شدن روزنه‌ها را نیز هورمون آبسزیک‌اسید ساخته شده در ریشه، در طی شرایط تنش خشکی می‌دانند که در سلول‌ها روزنه‌ای تجمع می‌یابد (بلترانو^۵ و رونکو^۶، ۲۰۰۸). از آنجایی که محتوای نسبی آب برگ با جذب آب توسط ریشه‌ها و همچنین با اتلاف آب در اثر تعرق مرتبط است، لذا افزایش محتوای نسبی آب برگ توسط اعمال براسینواستروئیدها ممکن است مربوط به کاهش تلفات آب گیاهچه‌ها در اثر تعرق (لی^۷ و همکاران، ۲۰۰۸)، و همچنین، در نتیجه تنظیم اسمزی و افزایش جذب آب از خاک (طلث^۸ و شاولی^۹، ۲۰۱۶) باشد.

مطالعه جیوانی و همکاران (۱۴۰۱) درخصوص تأثیر محلول‌پاشی روی بر تعدیل اثرات قطع آبیاری در مرحله پُرسیدن دانه در ژنوتیپ‌های گلرنگ نشان داد خشکی موجب کاهش ۱۱/۵۷ درصدی محتوای نسبی آب برگ نسبت به شاهد شد؛ در این شرایط، کاربرد روی باعث افزایش این شاخص نسبت به شاهد گردید. در حضور عنصر روی سلول قدرت حفظ ساختار خود را پیدا کرده و نشست مواد کمتر صورت می‌گیرد و در نتیجه محتوای نسبی آب افزایش می‌یابد (کرملایچ و قرینه، ۱۳۹۲).

تجمع پرولین اولین واکنش بافت‌های کم‌آب به‌ویژه برای کاهش آسیب سلولی به خشکی است (راحمی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۷). و نشان‌دهنده نقش حیاتی این اسید آمینه در تنظیم فشار اسمزی است (دین^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۱). پرولین در تقویت ساختار سه بعدی پروتئین‌ها، محافظت از سیستم غشای سلولی، تنظیم اسمزی سلولی و جاروکردن حساس به خشکی نقش دارد که ارتباط نزدیکی با تحمل به خشکی و سازگاری گیاه با شرایط خشکی دارد (جیوتی^{۱۲} و یاداو^{۱۳}،

1. Movahhedy-Dehnavy
2. Sharifa and Muriefah
3. Moitazedi
4. Hassan-Umair
5. Beltrano
6. Ronco
7. Li
8. Talaat
9. Shawky
10. Rahemi
11. Din
12. Jyoti
13. Yadav

۲۰۱۲). افزایش محتوای پرولین در طول تنش خشکی توسط نیکولایوا و همکاران (نیکولایوا^۱ و همکاران، ۲۰۱۰) گزارش شده است.

محلول‌پاشی روی باعث افزایش تجمع پرولین شد زیرا این عنصر آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین را غیرفعال کرده و آن‌ها را به اسید آمینه پرولین تبدیل می‌کنند (بوربوری، ارادتمند اصلی و تهرانی^۲، ۲۰۱۲). موحدی دهنوی و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که محلول‌پاشی روی باعث افزایش پرولین در محصول کنگد شده است. در شرایط کمبود آبیاری، روی از طریق افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول به‌عنوان یک تقویت‌کننده در تنظیم اسمزی عمل می‌کند. علاوه بر این، روی نقش مهمی در حفظ یکپارچگی ساختاری غشای پلاسمایی، متابولیسم سلولی، محافظت غشا در برابر رادیکال‌های آزاد اکسیژن و سایر فرایندهای مربوط به سازگاری گیاه با تنش‌ها ایفا می‌کند (ویسانی^۳ و همکاران، ۲۰۱۲). نتایج مطالعه محمدی و همکاران (۱۴۰۰) در گیاه گلرنگ نشان داد که کاربرد غلظت‌های مختلف اپی‌براسینولید (۶، ۴، ۲، صفر میکرومولار) باعث افزایش محتوای پرولین نسبت به شاهد شده اما این افزایش تنها در غلظت ۴ میکرومولار اپی‌براسینولید معنی‌دار بوده است. کاربرد براسینواستروئید موجب سنتز پرولین در سلول‌های گیاهی تحت شرایط تنش خشکی می‌شود (چن^۴ و همکاران، ۲۰۱۸). اعتقاد بر این است براسینواستروئید با تحریک $\Delta 1$ -پیرولین-S-کربوکسیلات سنتتاز که آنزیم کلیدی مسیر بیوسنتزی پرولین است، تجمع پرولین را افزایش می‌دهد (شارما و همکاران، ۲۰۱۱). در شرایط تنش خشکی، اگرچه تثبیت کربن در برگ‌های تحت تنش کاهش می‌یابد، گیاهان مقدار زیادی قندهای محلول مانند گلوکز، فروکتوز و ساکارز را انباشته می‌کنند. نوع کربوهیدرات‌های محلول برای گونه‌های مختلف متفاوت است (مانولیان و همکاران، ۲۰۲۱). قندهای محلول به شکل تنظیم‌کننده اسمزی، ثبات‌دهنده غشاهای سلولی و حفظ‌کننده تورژسانس سلول‌ها عمل می‌کنند. در حقیقت در گیاهانی که قندهای محلول در پاسخ به تنش خشکی تجمع می‌یابند، تنظیم اسمزی بهتر انجام می‌شود (حمیدی و همکاران ۱۳۹۹). از دیگر دلایل افزایش غلظت قند در گیاهان، اختلال در هیدرولیز نشاسته است (سلیمانی‌نیا و همکاران، ۱۴۰۰).

افزایش محتوای کربوهیدرات محلول در گلرنگ با استفاده از ۱ کیلوگرم در هکتار روی گزارش شد (کومارا^۵ و همکاران، ۲۰۲۰). روی با افزایش جذب پتاسیم که برای تشکیل و انتقال کربوهیدرات‌ها ضروری است، محتوای کربوهیدرات را افزایش می‌دهد. روی، با افزایش دهانه روزنه، می‌تواند به‌عنوان یک ترکیب کربنیک انیدراز یا عاملی در حفظ یکپارچگی سلولی و جذب پتاسیم در نظر گرفته شود. از این‌رو، فتوسنتز و محتوای کربوهیدرات را بهبود می‌بخشد (غنایا^۶ و همکاران، ۲۰۱۰). هم‌چنین گزارش شده که با افزایش غلظت روی در محیط کشت ریحان تا میزان ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، میزان قندهای محلول به بیش‌ترین حد خود رسیده است (عزیزیان شرمه و همکاران، ۱۳۹۷). افزایش میزان قند توسط روی می‌تواند به این علت باشد که روی با شرکت در سنتز هورمون اکسین از طریق تحریک سنتز اسیدآمینه تریپتوفان (به‌عنوان پیش‌ماده سنتز هورمون اکسین) و تنظیم ایجاد نشاسته در سلول، به سنتز کربوهیدرات، پروتئین و چربی کمک می‌کند (سعید‌الاهل^۷ و حسین^۸، ۲۰۱۰). تجمع قندهای ساده به‌عنوان سازگاری با تنش خشکی رخ می‌دهد و شامل پایداری غشا می‌شود (از غشا در برابر آسیب‌های ناشی از کم

1. Nikolaeva

2. Boorboori, EradatmandAsli, and Tehrani

3. Weisany

4. Chen

5. Kumara

6. Ghnaya

7. Said Al-Ahl

8. Hussein

آبی محافظت می‌کند). عدم توانایی در تجمع این محافظ‌ها یکی از نقاط ضعف گیاه در شرایط خشکی است (مانولیان و همکاران، ۲۰۲۱).

مطالعه پوراسداللهی (۱۳۹۸) نشان داد محلول‌پاشی با اپی براسینولید مقدار کربوهیدرات محلول برگ را به‌ترتیب به‌میزان ۱۸ و ۱۴ درصد و مقدار کربوهیدرات محلول در غده را ۲۰ و ۱۱ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. به این دلیل که پراکسید هیدروژن را در سلول‌ها تجزیه می‌کنند و از تشکیل ROSها جلوگیری و فعالیت بیش‌تر این آنزیم باعث می‌شود گیاه کم‌تر مورد حمله ROSها قرار گیرد (مانولیان و همکاران، ۲۰۲۲؛ رضایی نیا و همکاران، ۱۳۹۸). سلول‌های گیاهی دارای مکانیسم‌های دفاعی ویژه‌ای جهت مقابله با اثرات منفی تنش‌های محیطی هستند مانند سنتز آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز که افزایش میان فعالیت این آنزیم موجب کاهش تنفس نوری و نقطه جبرانی دی‌اکسیدکربن کمک می‌کند (دارابی و همکاران ۱۴۰۰).

انوار^۱ و همکاران (۲۰۱۸) بیان کردند که کاربرد براسینواستروئیدها در زمان تنش خشکی با بهبود سیستم آنتی-اکسیدانی آنزیمی و تنظیم بیان ژن‌های تولیدکننده آنزیم کاتالاز، موجب تحمل به تنش خشکی در گیاهان می‌شود. آهن و روی به‌عنوان اجزای فلزی آنزیم‌های مختلف، در ساختار و عملکرد کوفاکتورهای تنظیمی دخالت دارند و با بیوستنز ساکاریدها، فتوستنز و ساخت پروتئین در گیاهان ارتباط دارند (حسن‌پور اقدم^۲ و همکاران، ۲۰۲۰) برخلاف نتایج این پژوهش، فارسی و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی تحت عنوان مطالعه صفات فیزیولوژیک گیاه دارویی مرزنجوش یک‌ساله در پاسخ به عنصر روی در شرایط تنش خشکی بیان نمودند که آنزیم کاتالاز تحت تأثیر تیمارهای روی قرار نگرفت. نتایج این مطالعه در توافق با نتایج ظفری^۳ و همکاران (۲۰۲۰) بود که گزارش نمودند فعالیت آنزیم کاتالاز در گلرنگ تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفته و فعالیت این آنزیم در تمام وارپته‌های مورد آزمایش افزایش یافته است. تجمع پرولین اولین واکنش بافت‌های کم‌آب به‌ویژه برای کاهش آسیب سلولی به خشکی است (راحمی^۴ و همکاران، ۲۰۱۷) و نشان‌دهنده نقش حیاتی این اسید آمینه در تنظیم فشار اسمزی است (دین و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به روابط همبستگی مبسوط فوق، در نهایت افزایش شاخص SPAD منجر به افزایش تولید و انتقال مواد فتوستنزی به بذر و طولانی‌شدن دوره پرشدن بذر می‌شود. این نتایج با یافته‌های معتضدی و همکاران (۲۰۲۲) در تطابق است.

بهبود فعالیت POX با کاربرد روی توسط نورین و همکاران (نورین^۵ و همکاران، ۲۰۲۰) گزارش شده است. کاربرد ۲۴-اپی‌براسینولید از طریق افزایش فعالیت پراکسیداز موجب تحمل به تنش شده است (لو و یانگ^۶، ۲۰۱۳)؛ همچنین روی با بهبود فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی مانند پراکسیداز و تنظیم عملکرد غشاهای زیستی مانند یک روبنده گونه‌های فعال اکسیژن عمل می‌کند (سان^۷ و همکاران، ۲۰۲۱). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان تیمار شده با براسینولید به‌دلیل افزایش بیان ژن و سنتز این آنزیم است (گائو^۸ و همکاران، ۲۰۱۰).

نتایج مطالعه حسن^۹ و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد کوددهی کافی با عنصر روی به‌طور ضروری فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز را در پاسخ به شرایط کمبود آب بهبود بخشید. وو^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۵) در بیان

1. Anwar
2. Hassanpouraghdam
3. Zafari
4. Rahemi
5. Noreen
6. Lu and Yang
7. Sun
8. Gao
9. Hassan
10. Wu

علت افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز بر اثر کاربرد روی گزارش دادند که کاربرد روی بیان پروتئین انگشتی روی^۱ را تنظیم می‌کند که منجر به فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی بالاتر و کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود. همچنین نتایج مطالعه ستار و همکاران (ستار^۲ و همکاران، ۲۰۲۲) نشان داده که کاربرد روی فعالیت آنزیم پراکسیداز را ۱۸ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داده است. نتایج این مطالعه در توافق با نتایج فاروق^۳ و همکاران (۲۰۰۹) است.

نتایج پژوهش رافعی و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد استعمال خارجی هورمون براسینواستروئید موجب افزایش درصد پایداری غشای سلولی در همه ژنوتیپ‌های گندم مورد مطالعه شد. براسینواستروئیدها از طریق کاهش پراکسیداسیون لیپیدی منجر به افزایش پایداری غشای سلولی می‌شوند، نتیجه پژوهش نشان داد که بهترین غلظت هورمون، یک میلی‌گرم در لیتر براسینوئید بود که منجر به حفظ بیش‌تر پایداری غشای سلولی در ژنوتیپ‌های مورد بررسی گردید (لی^۴ و فنگ^۵، ۲۰۱۱).

یدوی و همکاران (یدوی^۶ و همکاران، ۲۰۱۴) گزارش دادند که محلول‌پاشی عنصر غذایی روی موجب افزایش شاخص پایداری غشای سلول (کاهش نشت الکترولیت‌ها) نسبت به شرایط عدم محلول‌پاشی شد. برخی از پژوهش‌گران معتقدند که فلز روی از طریق محافظت پروتئین‌ها و لیپیدهای غشایی در برابر رادیکال‌های آزاد و سایر محصولات حاصل از واکنش‌های احیایی درون سلولی سبب حفظ تمامیت غشای سلول‌ها می‌شود (فارسی و همکاران، ۱۳۹۶). این نتایج در توافق با نتایج آذری نصرآباد و همکاران (۱۳۹۵) است. پورداد و همکاران (۱۳۸۷) در بررسی تحمل به تنش خشکی ارقام گلرنگ بهاره در مناطق مختلف کشور اظهار داشتند که تنش خشکی باعث کاهش میزان پایداری غشای سلولی شد. در اثر تنش آبی، تراوایی غشای سلول افزایش می‌یابد و باعث می‌شود که الکترولیت‌های موجود در داخل سلول به سمت بیرون از سلول نشت کنند (گودرزیان، ۱۳۹۶). خشک‌شدن سلول‌های گیاهی باعث نشت یون‌ها و الکترولیت‌ها از غشای سلولی می‌شود (دست برهان و قاسمی گل‌دانی^۷، ۲۰۱۵).

گلدهی و پرشدن دانه از مراحل رشدی هستند که بیش‌ترین حساسیت را به تنش خشکی دارند (فاروق^۸ و همکاران، ۲۰۱۴). تنش خشکی از طریق تأثیر بر آنزیم‌های مؤثر در فرایند فتوسنتز، بستن منافذ روزنه‌ها و کاهش میزان فتوسنتز، ضمن کاهش سطح برگ‌ها، منجر به تسریع پیری برگ شده و باعث کاهش قدرت منبع می‌گردد و این موضوع کاهش عملکرد اقتصادی گیاه را به دنبال دارد (باسل^۹ و همکاران، ۲۰۱۴). کمبود آب موجب کاهش انبساط سلولی در اثر افت فشار تورژسانس شده و از این طریق رشد اندام‌ها و ارتفاع بوته را کاهش می‌دهد، بنابراین از جمله تأثیرات منفی کم‌آبی کاهش ارتفاع بوته بر اثر کاهش رطوبت قابل دسترس و قابلیت جذب عناصر و کاهش رشد می‌باشد (عزیزی و همکاران، ۱۳۸۷). فرخ‌نیا و همکاران (۱۳۹۰) گزارش کردند که تنش خشکی در گیاه با کاهش آب برگ و در نتیجه بسته‌شدن روزنه‌ها و افت فتوسنتز از یک سو و متأثرکردن فعالیت‌های آنزیمی و فرایندهای مربوطه از سوی دیگر، موجب افت عملکرد دانه می‌شود.

کاربرد روی باعث بهبود عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی شد. بهبود GY توسط کاربرد Zn را می‌توان به نقش

1. Zinc finger protein

2. Sattar

3. Farooq

4. Li

5. Feng

6. Yadavi

7. Dastborhan and Ghassemi-Golezani

8. Farooq

9. Basel

روی در کنترل روزنه برای افزایش RWC نسبت داد (مارچنر^۱، ۲۰۱۲). با محلول‌پاشی عناصری از جمله روی که نقش مهمی در کاتالیزور فرایندهای سوخت‌وساز و حفظ آماس سلولی در گیاه را بر عهده دارند، گیاه عناصر موردنیاز خود برای افزایش اسمولیت‌ها، بهتر و راحت‌تر در اختیار دارد. بنابراین سلول به فعالیت‌های حیاتی خود ادامه می‌دهد و در نهایت عملکرد بهتری در این شرایط تولید می‌کند (کوهنورد^۲ و همکاران، ۲۰۱۲)؛ از طرفی، مصرف براسینولید می‌تواند موجب افزایش بازگسیل مواد در داخل گیاه به سمت دانه‌ها شود که این موضوع سبب افزایش عملکرد دانه می‌گردد، اثرات مفید براسینولید در افزایش عملکرد دانه می‌تواند به علت زیاد شدن ثبات غشای یاخته‌ها و یا سنتز پروتئین‌های خاص در شرایط نامطلوب باشد (فرضی امین‌آباد و همکاران ۱۴۰۰).

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بیش‌ترین عملکرد دانه (۲۴۶۶ کیلوگرم در هکتار) متعلق به تیمار آبیاری معمول بود. اعمال تنش خشکی در مرحله گل‌دهی، عملکرد دانه را حدوداً به میزان ۲۶ درصد نسبت به شرایط آبیاری معمول کاهش داد. تنش خشکی با محدود کردن گرده‌افشانی گل‌ها، کاهش جوانه‌زنی گرده و کوتاه کردن دوره پرشدن دانه، عملکرد را کاهش می‌دهد. در طرف مقابل، محلول‌پاشی کلات‌روی و ۲۴-پی‌براسینولید باعث افزایش صفات فیزیولوژیک و در نتیجه افزایش قابل توجه عملکرد دانه به ویژه در مراحل حساس رشد (یعنی دوره گل‌دهی و پرشدن دانه) شد. می‌توان گفت که جذب کلات‌روی و ۲۴-پی‌براسینولید توسط گیاهان برای رشد مجدد بافت‌های آسیب دیده در طول دوره خشکسالی ضروری است. آبیاری هم‌چنین نقش مهمی در جذب مواد مغذی دارد. محلول‌پاشی ۲۴-پی‌براسینولید در ترکیب با کلات روی باعث افزایش تجمع پرولین به عنوان یک اسمولیت سازگار و در نتیجه افزایش جذب آب و محتوای نسبی آب می‌شود؛ این به نوبه خود، تبادل گاز را با باز کردن منافذ (در نتیجه حذف محدودیت‌های دی‌اکسیدکربن) و افزایش فتوسنتز و در نهایت افزایش عملکرد دانه افزایش داد. با این حال، با توجه به برتری تیمار B_3Zn_2 در میزان پرولین، محتوای نسبی آب، قندهای محلول، پایداری غشای سلولی و عملکرد دانه، به این نتیجه رسیدیم که محلول‌پاشی ۲۴-پی‌براسینولید با غلظت یک میکرومولار در ترکیب با کلات روی با غلظت سه در هزار تحت شرایط تنش خشکی، به ویژه در مراحل بحرانی رشد گلرنگ (گل‌دهی و پرشدن دانه) برای ارقام گلرنگ در منطقه کرج و مناطق اقلیمی مشابه باید در اولویت قرار گیرد تا عملکرد دانه افزایش یابد.

۷. تشکر و قدردانی

از تمام عزیزانی که ما را در این پژوهش یاری و کمک کردند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

امینی، زهره؛ معلمی، نوراله و سعادت، صفورا (۱۳۹۳). مقایسه اثر تنش کم‌آبی بر تغییرات میزان پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در سه رقم زیتون (*Olea europaea L.*). *مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)*، ۲۷ (۲)، ۱۶۷-۱۵۶.

- پوراسداللهی، عاطفه. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر آبیاری بارانی و دوره‌های مختلف آبیاری قطره‌ای و کاربرد برخی تنظیم‌کننده‌های رشد بر عملکرد غده و ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی سیب زمینی. *پایان‌نامه کارشناسی/ارشد*. دانشگاه کردستان.
- جیوانی، مانول یان؛ ویسانی، وریا؛ جباری، حمید و دیانت، مرجان (۱۴۰۱). تأثیر محلول‌پاشی روی بر تعدیل اثرات قطع آبیاری در مرحله پرشدن دانه در ژنوتیپ‌های گلرنگ. *نشریه حفاظت منابع آب و خاک*، ۱۱ (۳)، ۱۱۱-۱۲۵.
- جوشن، یوسف؛ ثانی، بهزاد؛ جباری، حمید؛ مظفری، حمید و معاونی، پیام (۱۳۹۹). تأثیر تنش خشکی آخر فصل بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیک ارقام ایرانی گلرنگ در منطقه کرج. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۳ (۴)، ۱۰۳۹-۱۱۰۴.
- حمیدی، رقیه؛ سیروس‌مهر، علیرضا و قنبری، احمد (۱۳۹۹). تأثیر محلول‌پاشی سدیم سلنات، تیتانیوم دی‌اکسید و تنظیم‌کننده رشد آلی بر برخی صفات‌های فیزیولوژیکی، عملکرد و درصد روغن گلرنگ در معرض تنش خشکی. *زیست‌شناسی گیاهی/ایران*، ۱۲ (۴۶)، ۱-۱۸.
- خلیفه لویی، زهرا؛ عباسی‌فر، احمدرضا؛ خدیوی، علی و اکرمیان مرتضی (۱۳۹۸). اثر پرولین و ۲۴-اپی براسینولید بر شاخص‌های رشد و ویژگی‌های بیوشیمیایی مرزه تابستانی (*Satureja hortensis* L.). *مجله تحقیقات گیاهی*، ۳۲ (۴)، ۸۷۳-۸۸۵.
- دارابی فرشته؛ عباسی، نصرت اله و زراع محمدجواد (۱۴۰۱). بررسی تأثیر پوترسین و ۲۴-اپی براسینولید بر فعالیت آنزیم‌های ضد اکسندگی گیاه ریحان تحت شرایط تنش خشکی. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۴ (۲)، ۵۸۲-۵۶۳.
- رضایی‌نیا، مریم؛ بی‌همتا، محمدرضا؛ پیغمبری، سیدعلی و عباسی، علیرضا (۱۳۹۸). تأثیر تنش خشکی بر فعالیت برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و صفات فیزیولوژیکی در ژنوتیپ‌های نخود. *پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی*، ۱۱ (۳۰)، ۱۱-۲۲.
- سلیمانی‌نیا، زهرا؛ مهتدی، احمد و موحدی‌دهنوی، محسن (۱۴۰۰). پاسخ برخی از صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک کینوا به کاربرد روی در شرایط تنش خشکی. *فرایند و کارکرد گیاهی*، ۱۰ (۴۱)، ۱۷۱-۱۸۶.
- عزیزیان شرمه، امید؛ عینعلی، علیرضا و ولزاده، جعفر (۱۳۹۷). پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) بر اثر غلظت‌های مختلف عنصر روی. *زیست‌شناسی گیاهی/ایران*، ۱۰، ۵۶-۳۵.
- فارسی، مرضیه؛ عبداللهی، فرزین؛ صالحی، امین و قاسمی، شیوا (۱۳۹۶). مطالعه صفات فیزیولوژیک گیاه دارویی مرزنجوش یک‌ساله (*Origanum majorana* L.) در پاسخ به عنصر روی در شرایط تنش خشکی. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۰ (۴)، ۵۵۹-۵۷۰.
- کرملاجعب، عزیز و قرینه، محمدحسین (۱۳۹۲). تأثیر عنصر روی بر رشد، اجزای عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیکی ذرت دانه‌ای در شرایط تنش شوری ناشی از کلرید سدیم. *نشریه پژوهش‌های زراعی/ایران*، ۱۱، ۴۴۶-۴۵۳.
- معتضدی، سامان؛ سیف‌زاده، سعید؛ حق‌پرست، رضا؛ ذاکرین، حمیدرضا و جباری، حمید (۱۳۹۸). شناسایی صفات مؤثر بر عملکرد دانه ژنوتیپ‌های گندم نان در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی. *پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی*، ۱۱ (۳۰)، ۸۷-۶۸.
- موسوی، سیدبصیر؛ سیف‌زاده، سعید؛ جباری، حمید؛ ولدآبادی، سیدعلیرضا و حدیدی ماسوله، اسماعیل (۱۳۹۹). تأثیر محلول‌پاشی هورمون اکسین در دو رقم گلرنگ آبی در شرایط تنش خشکی. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۴ (۲)، ۳۶-۳۷۸.
- مهری چروده، محراب؛ ذاکرین، حمیدرضا؛ مصطفوی راد، مصطفی؛ سیف‌زاده، سعید و ولدآبادی، سیدعلیرضا (۱۴۰۲). اثر آبیاری تکمیلی و کاربرد برگ سالیسیلیک‌اسید بر رشد، عملکرد دانه و برخی صفات فیزیولوژیک بادام زمینی. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۵ (۴)، ۹۱۰-۸۹۳.
- متین‌فر، مسعود؛ سیف‌زاده، سعید؛ شیرانی‌راد، امیرحسین؛ باغستانی محمدعلی و متین‌فر، مهرداد (۱۳۹۰). اثرات کنترل شیمیایی علف‌های هرز در رژیم‌های آبیاری مختلف بر بیوماس علف‌های‌هرز و عملکرد گلرنگ. *مجله علمی-پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی و علف‌های هرز*، ۵ (۱۷)، ۶۴-۵۳.
- محمدی مهسا؛ پوریوسف، مجید و توکلی، افشین (۱۴۰۰). تأثیر کاربرد اپی‌براسینولید بر تخصیص مواد فتوسنتزی، مقاومت به خشکی و عملکرد دانه دو ژنوتیپ لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L.). *نشریه پژوهش‌های زراعی/ایران*، ۱۹ (۲)، ۱۶۹-۱۸۴.
- وقار، محمدسعید (۱۴۰۰). بهبود شاخص سطح برگ و غلظت کلروفیل سویا با محلول‌پاشی نانو کلات آهن، روی و منگنز در شرایط آبیاری محدود. *بیولوژی کاربردی*، ۱۱ (۴۴)، ۹۱-۱۰۸.

References

- Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Mahmood, A., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Arshad, M., & Qayyum, M.F. (2018). Biochar application increased the growth and yield and reduced cadmium in drought stressed wheat grown in an aged contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety Journal*, 148, 825-833.
- Amini, Z., Moalemi, N., & Saadati, S. (2014). Comparison of the effect of water deficit stress on changes in proline content and antioxidant enzyme activity in three olive cultivars (*Olea europaea* L.). *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 27 (2), 156-167. (In Persian).
- Anwar, A., Yumei, L., Rongrong, D., Longqiang, B., Xianchang, Y., & Yansu, L. (2018). The physiological and molecular mechanism of brassinosteroid in response to stress: a review *Biological Research*, 51(46), 1-15.
- Azizian-Shermeh, O., Einali, A., & Valizadeh, J. (2018). Physiological and biochemical responses of basil (*Ocimum basilicum*) seedlings to different concentrations of zinc. *Iranian Journal of Plant Biology*, 10(2), 35-56. (In Persian).
- Barutcular, C., Yildirim, M., Koc, M., Akinci, C., Toptas, I., Albayrak, O., Tanrikalu, A., & El-Sabagh, A. (2019). Evaluation of spad chlorophyll in spring wheat genotypes under different environments. *Fersenius Environme Ntal Bulletin*, 25 (1), 1258-1266.
- Bates, I.S., Waldren, R.P., & Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39 (1), 205-7.
- Belkhadi, A., Hediji, H., Abbas, Z., Nouairi, I., Barhoumi, Z., Zarrouk, M., Chaibi, W., & Djebali, W., (2010). Effects of exogenous salicylic acid pre-treatment on cadmium toxicity and leaf lipid content in *Linum usitatissimum* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73, 1004-1011.
- Beltrano, J., & Ronco, M.G. (2008). Improved tolerance of wheat plants (*Triticum aestivum* L.) to drought stress and rewatering by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus claroideum*: Effect on growth and cell membrane stability. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 20, 29-37.
- Boorboori, M.R., EradatmandAsli, D., & Tehrani, M. (2012). The effect of dose and different methods of iron, zinc, manganese and copper application on yield components, morphological traits and grain protein percentage of barley plant (*Hordeum vulgare* L.) in greenhouse conditions. *Journal of Advances in Environmental Biology*, 6, 740-746.
- Cai, K., Chen, X., Han, Z., Wu, X., Zhang, S.H., Li, Q., Nazir, M. M., Zhang, G., & Zeng, F. (2020). Screening of world wide barley collection for drought tolerance: The Assessment of various physiological measures as the selection criteria. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1159.
- Chen, Z., Wang, Z., Yang, Y., Li, M., & Xu, B. (2018). Absciscic acid and brassinolide combined application synergistically enhances drought tolerance and photosynthesis of tall fescue under water stress. *Scientia Horticulturae*, 228, 1-9.
- Darabi, F., Abbasi, N., & Zarea, M.J. (2021). The Effect of Putrescine and 24-Epibrasinolide on the Activity of Antioxidant Enzymes in Basil to under Drought Stress. *Journal of Crop Improvement*, 24(2), 582-563. (In Persian).
- Dastborhan, S., & Ghassemi-Golezani K. (2015). Influence of seed priming and water stress on selected physiologic al traits of borage. *Folia Horticulturae*, 27 (2), 151-159.
- Din, J., Khan, S.U., Ali, I., & Gurmani, A.R. (2011). Physiological and agronomic response of canola varieties to drought stress. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, 21, 78-82.
- Farooq, M., Wahid, A., & Basra, S.M.A. (2009). Improving water relations and gas exchange with brassinosteroids in rice under drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195(4), 262-269.
- Farsi, M., Abdollahi, F., Salehi, A., & Ghasemi, S. (2017). Study of physiological traits of the annual medicinal plant *Origanum majorana* in response to zinc under drought stress conditions. *Enviromental Stresses in Crop Sciences*. 10(4), 559-570. (In Persian).
- Flemmer, A.C., Franchini, M.C., & Lindström, L.I. (2015). Description of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) phenological growth stages according to the extended BBCH scale. *Annals of Applied Biology*, 166(2), 331-339.
- Ghassemi-Golezani, K., Ghassemi, S., & Yaghoubian, I. (2014). Salicylic Acid regulate Physiolog -ical Performance of milk thistle (*Silybum marianum* L.) under water stress. *Advances in Bioresearch*, 7 (4), 34-40.
- Ghnaya, A.B., Hourmant, A., Cerantola, S., Kervarec, N., Cabon, J.Y., Branchard, M., & Charles, G. (2010). Influence of zinc on soluble carbohydrate and free amino acid levels in rapeseed plants regenerated in vitro in the presence of zinc. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 102, 191-197.

- Hamidi, R., Sirous-Mehr A., & Ghanbari, A. (2019). The effect of foliar application of sodium selenate, titanium dioxide and organic growth regulator on some physiological traits, yield and oil percentage of safflower exposed to drought stress. *Iranian Plant Biology*, 12 (46), 18-1. (In Persian).
- Hassanpouraghdam, M.B., Mehrabani, L.V., & Tzortzakakis, N. (2020). Foliar application of nano-zinc and iron affects physio-logical attributes of *Rosmarinus officinalis* and quietens NaCl salinity depression. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 335-345.
- Hassan-Umar, M., Aamer, M., Umer-Chattha, M., Haiying, T., Shahzad, B., Barbanti, L., Nawaz, M., Rasheed, A., Afzal, A., & Liu Y., et al. (2020). The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture*, 10 (9), 396.
- Hussain, M.I., Lyra, D.A., Farooq, M., Nikoloudakis, N., & Khalid, N. (2016). Salt and drought stresses in safflower: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 4.
- Irigoyen, J.J., Emerich, D.W., & Sanchez-Diaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa* L.) plants. *Physiologia Plantarum*, 84, 55-60.
- Jabereldar, A.A., El Naim, A.M., Abdalla, A.A., & Dagash, Y.M. (2017). Effect of water stress on yield and water use efficiency of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) in semi-arid environment. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 7(1), 1-6.
- Joshan, Y., Sani, B., Jabbari, H., Mozaffari, H., & Moaveeni, P. (2019). The effect of late season drought stress on some morphophysiological characteristics of Iranian safflower cultivars in Karaj region. *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 13 (4), 1039-1104. (In Persian).
- Jyoti, B., & Yadav, S.K. (2012). Comparative study on biochemical parameters and antioxidant enzymes in a drought tolerant and a sensitive variety of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* L.) under drought stress. *American Journal of Plant Physiology*, 7, 17-29.
- Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., Sharma, A., Ramakrishnan, M., & Sharma, A. (2020). The Impact of Drought in Plant Metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Applied sciences*. 10(16): 5692.
- Karmollachab, A., & Gharineh, M.H. (2013). Effect of Zinc Element on Growth, Yield Components and some Physiological Characteristics of Maize under NaCl Salinity Stress. *Iranian Journal of Field Crops Research* 11(3), 443-456. (In Persian).
- Khaghani, S., & Saffari, J. (2016). Microwave-assisted chemical preparation of ZnO nanoparticles and its application on the improving grain yield, quantity and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Journal of Nanostruct*, 6(1), 46-51.
- Khalifa Lui, Z., Abbasifar, A., Khedevi, A., & Akramian, M. (2019). The effect of proline and 24-epibrassinolide on growth indices and biochemical characteristics of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Journal of Plant Research*, 32 (4), 873-885. (In Persian).
- Kumara, K., Rao, K.N., Veeresh, H., Gaddi, A.K., & Channabasavanna, A.S. (2020). Response of safflower to foliar application of micronutrient mixture. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 16, 26-33.
- Lu, X.M., & Yang, W. (2013). Alleviation effects of brassinolide on cucumber seedlings under NaCl stress. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*, 24, 1409-1414.
- Mamnoui, E., Fotouhi-Ghazvini, R., Esfahani, M., & Nakhoda, B. (2006). The Effects of water deficit on crop yield and the physiological characteristics of barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 8 (3), 211-219.
- Manvelian, J., Weisany W., Abdul-razzak Tahir N., Jabbari H., & Diyanat M. (2021). Physiological and biochemical response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars to zinc application under drought stress. *Industrial Crops & Products*, 172 (2021), 114069.
- Marschner, P. (2012). Marschner's mineral nutritional of higher plants. 3rd ed. London, UK: Academic Press.
- Masoumi, H., Masoumi, M., Darvishi, F., Daneshian, J., Nourmohammadi, G., & Habibi, D. (2010). Change in several antioxidant enzymes activity and seed yield by water deficit stress in soybean (*Glycine max* L.) cultivars. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 38 (3), 86-94.
- Matinfar, M., Sayfzadeh, S., Shiranirad, A.H., Baghestani, M.A., & Matinfar, M. (2011). Effect of different methods of chemical weed control irrigation regimes on weed biomass and safflower yield. *Journal of crop ecohysiology (Agriculture Science)*, 5(17), 53-64. (In Persian).

- Mazhar, M.V., Ali, Q., Ishtiaq, M., Ghani, A., Maqbool, M., & Hussain, T. (2021). Zinc-Aspartate-Mediated drought amelioration in maize promises better growth and agronomic parameters than zinc sulfate and L-Aspartate. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 53(2), 29-41
- Mehri Charvadeh, M., Zakerin, H.R., Mostafavi-Rad, M., Sayfzadeh, S., & Valadabadi, S.A. (2025). Effect of supplementary irrigation and foliar application of salicylic acid on growth, grain yield and some physiological characteristics of peanut (*Arachis hypogaea L.*). *Journal of Crops Improvement*, 25(4), 901-918. (In Persian).
- Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, 7(9), 405-410.
- Mohammadi, H., Akhondzadeh, M., Ghorbanpour, M., Aghaee, A. (2020). Physiological responses and secondary metabolite ingredients in sage plants induced by 24-epibrassinolide foliar application under different water deficit regimes. *Scientia Horticulturae*, 263, 109139.
- Mohammadi, M., Pouryousef, M., & Tavakoli A. (2021). The Effect of Epibrassinolide Application on Photosynthetic Material Allocation, Drought Tolerance, and Seed Yield of two Pinto Bean Genotypes (*Phaseolus vulgaris L.*). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 19(2), 169-184. (In Persian).
- Moitazedi, S., Sayfzadeh, S., Haghparast, R., Zakerin, H.R., & Jabari, H. (2022). Mitigation of drought stress effects on wheat yield via the foliar application of boron, zinc, and manganese nano-chelates and supplementary irrigation. *Journal of Plant Nutrition*, 61 (3), 184-199
- Moitazedi, S., Sayfzadeh, S., Haghparast, R., Zakirin, H., & Jabbari, H. (2019). Identification of traits affecting grain yield of bread wheat genotypes under dryland and supplementary irrigation conditions. *Journal of Crop Plant Breeding*, 11(30), 68-87. (In Persian).
- Mousavi, S.B., Sayfzadeh, S., Jabbari, H., Valadabadi, S.A., & Hadidi Masouleh, E. (2021). The Effect of Auxin Foliar Application in Two Irrigated Safflower Cultivars under Drought Stress. *Journal of Crops Improvement*, 24(2), 365-378. (In Persian).
- Movahhedy-Dehnavy, M., Modarres-Sanavy, S.A.M., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2009). Foliar application of zinc and manganese improves seed yield and quality of safflower (*Carthamus tinctorius L.*) grown under water deficit. *Industrial Crops and Products*, 30(1), 82-92.
- Muhu-Din, A.H.G., Sajjad, M., Zeng, Y., Iqbal, M., Sultan, H.K., Ullah, A., & Akhtar, M.N. (2020). Genome-wide association mapping through 90k SNP array for quality and yield attributes in bread wheat against water-deficit conditions. *Agriculture*, 10 (9), 392-23.
- Nikolaeva, M.K., Maevskaya, S.N., Shugaev, A.G., & Bukhov, N.G. (2010). Effect of drought on chlorophyll content and antioxidant enzyme activities in leaves of three wheat cultivars varying in productivity. *Russian Journal of Plant Physiology*, 57 (1), 87-95.
- Noreen, S., Sultan, M., Akhter, M.S., Shah, K.H., Ummara, U., Manzoor, H., Ulfat, M., Alyemeni, M.N., & Ahmad, P. (2020). Foliar fertigation of ascorbic acid and zinc improves growth, antioxidant enzyme activity and harvest index in barley (*Hordeum vulgare L.*) grown under salt stress. *Plant Physiol. Biochem*, 158, 244-254.
- Pourasadollahi, A. (2019). Studying the effect of sprinkler irrigation and different periods of drip irrigation and the use of some growth regulators on tuber yield and morphophysiological characteristics of potatoes. Master's thesis. University of Kurdistan. (In Persian).
- Rahemi, M., Karimi, S., Sedaghat, S., & Rostami, A.A. (2017). Physiological responses of olive cultivars to salinity stress. *Advances in Horticultural Science*, 31 (1), 53-9.
- Rahmani, F., Sayfzadeh, S., Jabbari, H., Valadabadi, S.A., & Masouleh, E.H. (2019). Alleviation of drought stress effects on safflower yield by foliar application of zinc. *International of Journal Plant Production*, 13, 297-308.
- Reuveni, R. (1995). Biochemical marker of disease resistance. In: Singh, R. P., and Singh, U. S.(Ed.) *Molecular Methods in Plant Pathology*, 99-114.
- Rezaeina, M., Bihanta M., Peighambari, S.A., & Abbasi A. (2019). Effect of Drought Stress on Antioxidant Enzymes Activities and Some Physiological Traits in Chickpea (*Cicer Arietinum L.*). *Journal of Crop Breeding*, 11(30), 11-22. (In Persian).
- Said-Al Ahl, H.A.H., & Hussein, M.S. (2010). Effect of drought stress and potassium humate on the productivity of oregano plant using saline and fresh water irrigation. *Ozean Journal of Applied Sciences*, 3, 125-141.
- Sakya, A.T., Sulistyaningsih, E., Indradewa, D., & Purwanto, B.H. (2018). Physiological characters and tomato yield under drought stress. In *International Conference on Climate Change*, 61 (4), 51-71.

- Sattar, A., Wang X., Ul-Allah S., Sher A., Ijaz M., & Irfan M. (2022). Foliar application of zinc improves morpho-physiological and antioxidant defense mechanisms, and agronomic grain biofortification of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29, 1699-1706.
- Sefaoglu, F., & Ozer, H. (2022). Response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) to planting rate and row spacing in a high Aaltitude environment. *Dergi Park*, 8, 1-10.
- Sharifa, S., & Muriefah, A. (2015). Effects of paclobutrazol on growth and physiological attributes of Soybean (*Glycine max* L.) plants grown under water stress conditions. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 34, 81-93.
- Sharma, I., Pati, P.K., & Bhardwaj, R. (2011). Effect of 24-epibrassinolide on oxidative stress markers induced by nickel-ion in *Raphanus sativus* L. *Acta Physiologiae Plantarum*, 33(5), 17 23-1735.
- Soheili-Movahhed, S., Khomari, S., Sheikhzadeh, P., & Alizadeh, B. (2019). Improvement in seed quantity and quality of spring safflower through foliar application of boron and zinc under end-season drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, 42(8), 942-953.
- Solimaninya, Z., Mohtadi, A., & Movahhedi-Dehnavi, M. (2021). Response of some physiological and morphological properties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) by zinc application under drought stress. *Plant Process and Function*, 10 (41), 171-186. (In Persian).
- Sun, W., Zhou, S., Sun, Y., & Xu, Y. (2021). Synthesis and evaluation of cationic flocculant P (DACPAPTAC- AM) for flocculation of coal chemical wastewater. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 99, 239-248.
- Sytar, O., Kumari, P., Yadav, S., Brestic, M., & Rastogi, A. (2019). Phytohormone priming: regulator for heavy metal stress in plants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(2), 739-752.
- Talaat, N., & Shawky, B. (2016). Dual application of 24-epibrassinolide and spermine confers drought stress tolerance in maize (*Zea mays* L.) by modulating polyamine and protein metabolism. *Journal of Plant Growth Regulation*, 35, 518-533.
- Vaghar, M.S. (2022). Improvement of leaf area index and leaf chlorophyll concentration (SPAD) soybean by Fe, Zn and Mn nano-chelates foliar application under limited irrigation conditions. *Applied Biology*, 11(44), 91-108. (In Persian).
- Vaghar, M.S., Sayfzadeh, S., Zakerin, H.R., Kobraee, S., & Valadabadi, S.A. (2020). Foliar applica -tion of iron, zinc, and manganese nano-chelates improves physiological indicators and soybean yield under water deficit stress. *Journal of Plant Nutrition*, 43 (18), 2740-56.
- Waraich, E.A., Ahmad, R., Halim, A., & Aziz, T. (2012). Alleviation of temperature stress by nutrient management in crop plants: a review. *Journal of Soil Science (Plant Nutrition)*, 12 (2), 221-244.
- Weisany, W., Mohammadi, M., Abdul-razzak Tahir, N., Aslania, N., & Ali Omer, D. (2021). Changes in growth and nutrient status of maize (*Zea mays* L.) in response to two zinc sources under drought stress. *Journal of Soil Science (Plant Nutrition)*, 121 (6), 623-639
- Xia, X.J., Wang, Y.J., Zhou, Y.H., Tao, Y., Mao, W.H., Shi, K., & Yu, J.Q. (2009). Reactive oxygen species are involved in brassinosteroid-induced stress tolerance in cucumber. *Plant Physiology*, 150 (2), 801-814.
- Yuan, G.F., Jia, C.G., Li, Z., Sun. B., Zhang, L.P., Liu, N., & Wang, Q.M. (2010). Effect of brassinosteroids on drought resistance and abscisic acid concentration in tomato under water stress. *Scientia Horticulturae*, 126 (2), 103-108.
- Zafari, M., Ebadi, A., Jahanbakhsh, S., & Sedghi, M. (2020). Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) biochemical properties, yield, and oil content affected by 24-epibrassinosteroid and genotype under drought stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68 (22), 6040-6047.
- Zhao, W., Liu, L., Shen, Q., Yang, J., Han, X., Tian, F., & Wu, J. (2020). Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat. *Water*, 12 (8), 2127.