



Research Article

Vol. 23, No. 4, Winter 2025, p. 479-495

Improving Antioxidant Enzyme Activities, Seed and Oil Yield of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) with Brassinolide Foliar Application under Different Irrigation Regimes

M. Ghasemi¹, Sh. Jahanbin¹, H. Latifmanesh^{1*}, A. Mirshekari¹, H. Alahdadi¹

1- Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran

(*- Corresponding author's Email: h.latifmanesh@yu.ac.ir)**How to cite this article:**

Received: 30 December 2024

Revised: 10 March 2025

Accepted: 17 March 2025

Available Online: 13 April 2025

Ghasemi, M., Jahanbin, Sh., Latifmanesh, H., Mirshekari, A., & Alahdadi, H. (2025). Improving Antioxidant Enzyme Activities, Seed and Oil Yield of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) with Brassinolide Foliar Application under Different Irrigation Regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 23(4), 479-495. (In Persian with English abstract)<https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.91417.1372>

Introduction

Sunflower (*Helianthus annuus* L.) is one of the most significant oilseed crops, valued for its high content of unsaturated fatty acids, which contributes to the production of high-quality oil. Although this plant exhibits relative adaptability to Iran's climatic conditions, it demonstrates moderate sensitivity to drought stress. Drought stress poses a major challenge to crop production by directly affecting plant growth and yield. While sunflowers can tolerate mild drought conditions, severe drought significantly disrupts their physiological responses. Reduced regulation of transpiration and limited leaf expansion are key factors contributing to the plant's vulnerability to severe drought. This stress condition results in excessive production of reactive oxygen species (ROS), intensifying oxidative stress. Consequently, oxidative stress leads to chloroplast degradation, decreased photosynthetic capacity, leaf shrinkage and thickening, reduced leaf area, and morphological alterations such as impaired stomatal movement. Brassinolides, which belong to the class of plant steroid hormones, play a crucial role in regulating plant growth and development, including cell division and elongation, organogenesis, delayed leaf senescence, and enhanced resistance to environmental stress. By modulating plant responses to drought, brassinolides can mitigate the adverse effects of oxidative stress and improve overall plant performance.

Materials and Methods

To investigate the effect of brassinolide under water deficit conditions on antioxidant enzyme activity and certain agronomic traits of the sunflower cultivar Oscar, an experiment was conducted in a split-plot design based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The main factor consisted of irrigation regimes at three levels (full irrigation at 100% field capacity, moderate drought at 75% field capacity, and severe drought at 50% field capacity based on Class A pan evaporation). The sub-factor included brassinolide foliar application at three concentrations (0 (distilled water), 0.1 and 0.5 mg L⁻¹). In this study, traits such as relative water content (RWC) of leaves, antioxidant enzyme activities (catalase, peroxidase, and superoxide dismutase), leaf area index (LAI), filled and unfilled capitulum weight, seed yield, and oil yield were evaluated.

Results and Discussion

The results indicated that drought stress and brassinolide foliar application significantly affected the morphophysiological indices and agronomic performance of sunflower. Severe stress led to a reduction in



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/jcesc.2025.91417.1372>

relative leaf water content (by 18.79%) and an increase in antioxidant enzyme activity. At this stress level, leaf area index, grain yield, and oil yield decreased by 57.48%, 61.56%, and 70.01%, respectively, compared to full irrigation. This reduction highlights disruptions in water uptake and retention as well as diminished grain-filling capacity under drought conditions. On the other hand, the simple effect of foliar application of 0.5 mg/L brassinolide increased catalase and peroxidase activities by 18.58% and 36.40%, respectively. This increase highlights the role of brassinolide in alleviating oxidative stress and enhancing the plant's physiological condition. Furthermore, the highest leaf area index was recorded under full irrigation combined with a 0.5 mg/L brassinolide foliar application. Under severe stress conditions, grain yield and oil yield at the highest level of brassinolide application increased by 83.57% and 66.66%, respectively, compared to the treatment without foliar application.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that brassinolide foliar application, particularly under drought stress conditions, can be an effective strategy for enhancing both the quantitative and qualitative performance of sunflower. Brassinolide enhances antioxidant enzyme activities, mitigates the negative effects of oxidative stress, and improves plant physiological traits, thereby preserving photosynthetic potential and promoting vegetative and reproductive growth. Based on the results, foliar application of brassinolide at 0.5 mg L⁻¹ yielded the most significant improvements in leaf area index, seed yield, and oil yield, underscoring its effectiveness in optimizing plant growth even under limited water availability. Therefore, the application of brassinolide under optimal irrigation regimes, particularly during moderate to severe drought stress, is recommended as a viable approach to enhancing sunflower productivity and sustainability.

Keywords: Catalase, Drought stress, Leaf area index, Relative water content of leaves

بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، عملکرد دانه و روغن آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) با محلول‌پاشی براسینولید تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

مرضیه قاسمی^۱، شاهرخ جهانبین^۱، حجت‌اله لطیف‌منش^۱ ID،*، امین میرشکاری^۱ ID، حمید اله‌دادی^۱ ID

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

چکیده

بررسی تأثیر براسینولید بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) (رقم اسکار) می‌تواند به درک بهتری از سازوکارهای دفاعی گیاه در برابر تنش خشکی کمک کند و به معرفی راهکارهای لازم برای افزایش تاب‌آوری در شرایط کم‌آبیاری منجر شود. بنابراین آزمایشی به‌صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. عامل اصلی شامل رژیم آبیاری در سه سطح (بدون تنش (۱۰۰ درصد آبیاری کامل)، تنش متوسط (۷۵ درصد آبیاری کامل) و تنش شدید (۵۰ درصد آبیاری کامل)) با توجه به تشک تبخیر کلاس A و عامل فرعی شامل محلول‌پاشی براسینولید در سه سطح (صفر (آب مقطر)، ۰/۱ و ۰/۵ میلی گرم بر لیتر) بود. براساس مقایسه میانگین، تنش شدید سبب کاهش محتوای نسبی آب برگ (۱۸/۷۹ درصد) و افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شد. در این سطح تنش، شاخص سطح برگ، عملکرد دانه و عملکرد روغن به‌ترتیب با کاهش ۵۷/۴۸، ۶۱/۵۶ و ۷۰/۰۱ درصد نسبت به آبیاری کامل مواجه شدند. از سوی دیگر، اثر ساده محلول‌پاشی ۰/۵ میلی گرم بر لیتر براسینولید موجب افزایش ۱۸/۵۸ و ۳۶/۴۰ درصدی کاتالاز و پروکسیداز گردید. همچنین بیشترین میزان شاخص سطح برگ از تیمار آبیاری کامل + محلول‌پاشی ۰/۵ میلی گرم بر لیتر براسینولید به دست آمد. عملکرد دانه و عملکرد روغن نیز تحت بالاترین سطح محلول‌پاشی براسینولید در شرایط تنش شدید با افزایش ۸۳/۵۷ و ۶۶/۶۶ درصدی نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی + تنش شدید روبه‌رو بود. نتایج پژوهش نشان داد که محلول‌پاشی ۰/۵ میلی گرم بر لیتر براسینولید جهت بهبود عملکرد آفتابگردان تحت شرایط آبیاری مطلوب و تنش خشکی مناسب خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، شاخص سطح برگ، کاتالاز، محتوای نسبی آب برگ

مقدمه

خشکی را چالش برانگیزترین عامل محدودکننده در مسیر تولید محصولات زراعی برمی‌شمارند (Balestrini, Chitarra, Antoniou, Ruocco, & Fotopoulos, 2018). اگرچه آفتابگردان قادر به تحمل تنش خشکی متوسط است، اما در برابر خشکی شدید حساسیت نشان می‌دهد. این حساسیت عمدتاً به دلیل کاهش توانایی گیاه در تنظیم تعرق و آماس برگ است (García-López, Lorite, García-Ruiz, & Domínguez, 2014).

تنش خشکی تولید گونه‌های فعال اکسیژن مانند سوپراکسید و هیدروژن پراکسید را افزایش داده و تنش اکسیداتیو را تشدید می‌کند، در نتیجه سبب ایجاد اختلال در فعالیت‌های فیزیولوژیک یاخته‌ها (Tiwari et al., 2021) از جمله کاهش فرآیند فتوسنتز ناشی از تخریب کلروپلاست‌ها (Woodson, 2022)، کاهش سطح برگ و کوچک و ضخیم شدن برگ‌ها (Hu et al., 2020)، کاهش هدایت

آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) یکی از مهم‌ترین گیاهان دانه روغنی محسوب می‌شود که به دلیل داشتن درصد بالایی از اسیدهای چرب غیراشباع، از کیفیت روغن مرغوبی برخوردار است (Ansarifard, Mostafavi, Khosroshahli, Bihamta, & Ramshini, 2020). اگرچه اشاره شده است که این گیاه به‌خوبی با شرایط اقلیمی ایران سازگار بوده (Gholizadeh, Ghaffari, Payghamzadeh, & Kia, 2021)، با این حال نسبت به خشکی تحمل متوسطی دارد (Hassan & Mohamed, 2019). پژوهشگران با توجه به پاسخ گیاهان به تنش‌های محیطی و تغییرات اقلیمی، تنش

۱- گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
(Email: h.latifmanesh@yu.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول:

براسینولیدها متعلق به دسته‌ای از هورمون‌های استروئیدی گیاهی هستند که در تنظیم فرآیندهای رشدنمو از جمله تقسیم و کشیدگی سلولی، اندام‌زایی، پیری برگ و واکنش به تنش‌های محیطی نقش کلیدی ایفا می‌کنند (Hassanuzzaman, Nahar, Alam, Ahmad, 2015 & Fujita). این هورمون‌ها در بسیاری از گیاهان وجود دارند و حتی در غلظت‌های بسیار پایین نیز فعالیت بالایی دارند. مطالعات نشان داده است که براسینولیدها در رشد و توسعه جنین و تعامل با سایر هورمون‌های گیاهی اولیه و اسیدجاسمونیک و اسیدسالیسیلیک تأثیرگذارند. تعامل این هورمون‌ها با اسیدآبسیزیک در بسته شدن روزنه‌ها و افزایش تحمل به خشکی از طریق مسیرهای پیام‌رسانی نیتریک اکسید، به گیاه در مقابله با تنش‌های غیرزیستی کمک می‌کند. براسینولیدها همچنین با تنظیم بیان ژن‌های مشترک با اسیدآبسیزیک، فرآیندهای مرتبط با رشد و پاسخ به تنش خشکی را هماهنگ می‌کنند (Planas-Riverona et al., 2019). نتایج یافته‌های حجیری و پازکی (Hajiri & Pazoki, 2023) نشان داد که کاربرد براسینولید متناسب با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش میزان نشت مواد یونی سبب بهبود محتوای نسبی آب برگ در لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris* L. Pinto) شد. این هورمون‌ها از طریق افزایش فتوسنتز، تنظیم فعالیت آنزیم رویسکو و چرخه کالوین، کارایی دریافت دی‌اکسید کربن و سرعت کربوکسیلاسیون را بهبود بخشیده و در توسعه آوند چوبی، تشکیل لوله کرده و تمایز بافت‌های آوندی نقش دارند (Sirohi & Kapoor, 2020). کمبود براسینولید همچنین باعث کاهش جوانه‌زنی، کوتولگی، تأخیر در گل‌دهی و کاهش باروری می‌شود، درحالی‌که افزایش بیان ژن‌های مربوط به بیوسنتز براسینولیدها، رشد و تحمل گیاه را بهبود می‌بخشد (Chaghakaboodi, Mousavi, & Kakaei, 2024). تأثیر نقش مثبت براسینولید در افزایش عملکرد دانه و عملکرد روغن (Hamed El-Beltagi, El-Sherif, & Abdullah, 2022)، درصد روغن (El-Metwally, 2019)، شاخص سطح برگ و محتوای کلروفیل (AL Bakri & AL-Zubaidy, 2023) در آفتابگردان نیز مطرح شده است.

کاهش شدید و افت سطح منابع آب‌های زیرزمینی، کاهش بارندگی‌ها طی چند سال اخیر و کمبود آب در اکثر مناطق کشور، لزوم بازنگری در روش‌های کشت محصولات زراعی را با در نظر گرفتن صرفه‌جویی در مصرف آب بخش کشاورزی ضروری می‌نماید. بنابراین، در این پژوهش محلول‌پاشی هورمون براسینولید به‌عنوان پیشنهادی مطلوب برای بهبود تحمل به تنش خشکی جهت ارزیابی برخی خصوصیات فیزیولوژیک و زراعی آفتابگردان تحت رژیم‌های مختلف آبیاری مورد بررسی قرار گرفت.

روزنه‌ای (Liu et al., 2022) و تغییرات مورفولوژیک در گیاهان می‌شود. برخی از این واکنش‌ها نوعی پاسخ سازگاری برای کاهش تعرق و از دست دادن کمتر آب می‌باشد، اما سرانجام با کاهش عملکرد کمی و کیفی گیاهان همراه خواهد بود (Gao et al., 2020). بررسی یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که تنش خشکی، محتوای نسبی آب برگ (Omidi Nasab, Meskarbashee, & Rahnama Ghahfarokhi, 2024) و محتوای کلروفیل (Ghasemi, Jahanbin, Latifmanesh, Farajee, & Mirshekari, 2021) آفتابگردان را به‌صورت معنی‌داری کاهش داده است. از سوی دیگر، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز (Motiei, Sirousmehr, Khammari, & Naderi, 2023)، پراکسیداز (Sheikh Mamo, Rahnama, & Hassibi, 2023) و سوپراکسید دیسموتاز (Yazdandoost Hamedani, Ghobadi, Ghobadi, Jalali, Honarmand, & Saeidi, 2022) نیز متأثر از سطوح تنش خشکی با افزایش محسوسی در آفتابگردان همراه بوده است. آنزیم سوپراکسید دیسموتاز با تبدیل سوپراکسید به پراکسید هیدروژن، نخستین خط دفاعی گیاه در برابر گونه‌های فعال اکسیژن است، درحالی‌که کاتالاز به حذف هیدروژن پراکسید از طریق تجزیه آن به آب و اکسیژن کمک می‌کند و پراکسیداز نیز با نقش‌آفرینی در پایداری دیواره سلولی و تنظیم رشد، H_2O_2 را از سلول‌ها حذف می‌کند (Huchzermeyer, Menghani, Khardia, & Shilu, 2022). افزایش هماهنگ فعالیت این آنزیم‌ها نقش حیاتی در کاهش آسیب اکسیداتیو، حفظ ساختار غشاء سلولی و بهبود تحمل گیاه به تنش خشکی دارد. عرب و همکاران (Arab, Yadavi, Balouchi, & Alahdadii, 2023) اظهار نمودند که تأخیر در آبیاری پس از ۱۸۰ میلی‌متر تبخیر موجب کاهش ۳۷/۵ درصدی عملکرد دانه و ۳۰ درصدی عملکرد زیستی آفتابگردان شد. همچنین پژوهشگران ابراز داشته‌اند که بروز تنش خشکی سبب کاهش درصد روغن دانه (Omidinasab, Meskarbashee & Rahnama Ghahfarokhi, 2023)، عملکرد روغن (Karami Borzabad, Peykarestan & Baghbani, 2022)، شاخص سطح برگ و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (Motiei et al., 2023) در آفتابگردان شده است. بنابراین اتخاذ راهبردهای لازم جهت بهبود سازگاری گونه‌های مقاوم به خشکی و کم‌آبی به‌دلیل تطابق‌های فیزیولوژیک، ریخت‌شناسی و بیوشیمیایی به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک، اهمیت دوچندان می‌یابد. کم‌آبیاری به‌عنوان یک راهکار بهینه و رویکرد هشیارانه، نقش مهمی در تولید محصولات کشاورزی در شرایط کمبود آب ایفا می‌کند. این روش با هدف افزایش بهره‌وری آب از طریق کاهش حجم آبیاری در هر نوبت یا حذف آبیاری‌هایی که توان بازدهی کمتری دارند، به مدیریت بهتر منابع آبی کمک می‌کند (Abaszadeh, Fanaee, & Bakhshi, 2024).

مواد و روش‌ها

آزمایش حاضر در سال زراعی ۱۳۹۷ در منطقه نورآباد ممسنی، استان فارس با مشخصات جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۷ دقیقه عرض شمالی، در ارتفاع ۹۲۰ متری از سطح دریا اجرا گردید. منطقه آزمایش براساس تقسیمات اقلیمی به‌روش کوپن (Köppen, 1936) جزئی از مناطق نیمه‌خشک می‌باشد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. عامل اصلی آزمایش شامل رژیم آبیاری در سه سطح (بدون تنش (۱۰۰ درصد آبیاری کامل)، تنش متوسط (۷۵ درصد آبیاری کامل) و تنش شدید (۵۰ درصد آبیاری کامل) با توجه به تبخیر از تشت تبخیر کلاس A) و عامل فرعی شامل محلول‌پاشی هورمون براسینولید (محصول شرکت شیمی دانش آزمای تهران) در سه سطح (صفر (آب مقطر)، ۰/۱ و ۰/۵ میلی گرم بر لیتر) بود.

به‌منظور اجرای آزمایش، عملیات آماده‌سازی زمین و بستر خاک با استفاده از وسایل مکانیزه (گاواهن و دیسک) در هفته اول تیر ماه صورت گرفت. جهت آماده‌سازی مراحل اولیه، هیچ نوع علف‌کش، آفت‌کش و یا قارچ‌کش استفاده نشد. پس از انجام عملیات خاک‌ورزی، کرت‌هایی به‌طول پنج متر و عرض چهار متر ایجاد شد. هر کرت شامل شش ردیف به‌فاصله ۶۰ سانتی‌متر بود. فاصله بین کرت‌های فرعی ۱/۵ متر و فاصله بین کرت‌های اصلی نیز سه متر در نظر گرفته شد. قبل از انجام عملیات زراعی، به‌منظور تعیین میزان حاصل‌خیزی خاک و نیاز کودی، از ۱۰ نقطه زمین آزمایشی، نمونه خاکی از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری تهیه شد (جدول ۱). براساس نتایج آزمون خاک، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن از منبع اوره طی سه مرحله (یک سوم همزمان با شخم، یک سوم در زمان شش برگگی و یک سوم در زمان ستاره‌ای شدن طبق‌ها به‌صورت نواری) اعمال گردید. کود فسفر نیز از منبع سوپر فسفات تربیل (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) قبل از کشت به خاک اضافه شد.

رقم آفتابگردان انتخابی در این آزمایش، اسکار بود. این رقم که

هیبریدی زودرس با دوره رشد ۱۱۰ روزه، مقاوم در برابر بیماری‌ها ورس و خشکی، حاوی ۴۸ تا ۵۱ درصد روغن، پایدار در عملکرد و سازگار با شرایط محیطی مختلف است از شرکت نگین سبز برنا تهیه شد. کاشت به‌صورت جوی و پشته‌ای و هیرم‌کاری انجام گرفت. فرآیند کاشت به‌صورت دستی با توجه به اندازه بذور در عمق پنج تا هفت سانتی‌متری، به‌حالت کپه‌ای (کشت دو تا سه بذر در هر کپه) و با رعایت فاصله ۲۵ سانتی‌متری روی ردیف در ۲۵ تیرماه انجام شد. در مرحله دو تا سه برگگی، عمل تنک‌کاری انجام شد. اولین آبیاری بلافاصله بعد از کشت انجام گرفت. تا زمان خروج گیاهچه‌ها از خاک، مزرعه هر سه روز یک بار آبیاری گردید، سپس بعد از مرحله سبز شدن هر شش روز یک بار انجام گرفت. زمانی که گیاه به مرحله گل‌دهی رسید، تیمارهای تنش خشکی اعمال شد. در این آزمایش، دور آبیاری آفتابگردان با استفاده از تشتک تبخیر (از جمله مشخصه‌های هواشناسی که در ایستگاه‌های هواشناسی به‌طور روزانه اندازه‌گیری می‌شود و اثرات کلیه عوامل آب‌وهوایی از جمله دما، باد، رطوبت و تشعشع را نشان می‌دهد) تعیین گردید. از ابتدای کشت تا هنگام برداشت، روزانه داده‌های تبخیر از تشت تبخیر کلاس A یادداشت‌برداری گردید تا زمان آبیاری مشخص گردد. همچنین با در نظر گرفتن ضریب گیاهی K_c ، میزان تبخیر و تعرق مشخص و براساس تخلیه رطوبتی و طبق تیمارهای مذکور تا رسیدن رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی، میزان آب مورد نیاز محاسبه و حجم آب مورد نیاز هر کرت توسط کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. حجم آب مصرفی در هر نوبت آبیاری برای تیمارهای مختلف و تعداد دفعات آبیاری آن‌ها به‌شرح جدول ۲ می‌باشد.

محلول‌پاشی براسینولید نیز در دو مرحله رشد رویشی یعنی چهار و هشت برگگی (با غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۵ میلی گرم بر لیتر) برای هر کرت انجام شد. به‌منظور جذب بهتر، از ماده سورفکتانت (pH شاهد) جهت بهتر خیس نمودن برگ‌ها استفاده گردید. برداشت نمونه‌ها پس از رسیدگی فیزیولوژیکی آفتابگردان در ۱۰ آبان ماه از سطح سه مترمربع (پس از حذف حاشیه‌ها) در هر کرت انجام شد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Physicochemical properties of the soil at the test site

پتاسیم قابل جذب Available K (ppm)	فسفر قابل جذب Available P (ppm)	نیتروژن کل Nitrogen total (%)	کربن آلی Organic carbon (%)	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	اسیدیته pH	بافت Texture	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)
220	15	0.07	0.60	1.0	7.23	لوم سیلتی Silty loam	16	64	20

جدول ۲- حجم آب مصرفی در سطوح مختلف تیمار آبیاری

Table 2- Water consumption volume at different irrigation treatment levels

تعداد آبیاری	آب مصرفی در کرت	سطوح تیمار
Number of irrigations	Water consumption in the plot ($m^3 ha^{-1}$)	Treatment levels
13	2.2	آبیاری ۱۰۰ درصد 100 Percent irrigation
13	1.6	آبیاری ۷۵ درصد 75 Percent irrigation
13	1.06	آبیاری ۵۰ درصد 50 Percent irrigation

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز: مخلوط واکنش در حجم نهایی چهار میلی لیتر تهیه شد و شامل ۶۳ میکرومولار نیتروبلوترازولیوم (NBT)، ۱۳ میلی مولار متیونین، ۰/۱ میلی مولار EDTA، ۱۳ میکرومولار ریوفلاوین، ۰/۵ مولار سدیم کربنات و ۰/۵ میلی لیتر عصاره آنزیمی بود. لوله های آزمایش در زیر لامپ لوله ای فلورسنت ۱۵ وات به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفتند و پس از آن به مدت ۲۰ دقیقه در تاریکی نگهداری شدند. مقدار جذب در طول موج ۵۶۰ نانومتر اندازه گیری شد (Beauchamp & Fridovich, 1971).

شاخص سطح برگ: از هر کرت آزمایشی ۵۰۰ گرم برگ تر از دو ردیف میانی به صورت تصادفی برداشت شد. پس از خشک کردن نمونه ها در آون در دمای ۷۲ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت، سطح برگ نمونه ها به وسیله دستگاه Leaf Area Meter (Delta T) اندازه گیری شد. سپس نسبت سطح ویژه برگ (SLA) به عنوان نسبت مساحت برگ به وزن خشک نمونه محاسبه گردید. شاخص سطح برگ با استفاده از سطح ویژه برگ و وزن خشک کل برگ ها در هر مترمربع زمین محاسبه شد (Ravi & Indira, 1999).

عملکرد دانه و وزن طبق: سه مترمربع از وسط هر کرت انتخاب و پس از کفبردن ساقه ها، تمامی طبق ها از ساقه جدا شد. سپس کلیه دانه ها از طبق ها به روش دستی جدا گردید و پس از کاهش رطوبت تا سطح ۱۴ درصد توزین شدند.

عملکرد روغن: جهت اندازه گیری درصد روغن دانه از روش جوهانسون و اولریچ (Johnson & Ulrich, 1959) به کمک دستگاه سوکسله استفاده شد. عملکرد روغن از حاصل ضرب عملکرد دانه در درصد روغن به دست آمد.

تجزیه واریانس داده های آزمایشی با استفاده از نرم افزار SAS 9.1 انجام شد. مقایسه میانگین اثرات اصلی به روش LSD در سطح احتمال پنج درصد و با معنی دار شدن برهم کنش عامل های آزمایش، مقایسه میانگین برش دهی با رویه L.S.Means مورد مقایسه آماری قرار گرفت. برای ترسیم نمودارها از نرم افزار اکسل (Microsoft Excel 2016) استفاده گردید.

محتوای نسبی آب: نمونه برداری به کمک قیچی از برگ مرجع (آخرین برگ توسعه یافته) در مرحله گل دهی (کد ۶۵ براساس مقیاس BBCH) انجام و نمونه ها بلافاصله درون یخ قرار گرفته و وزن تر آن ها در آزمایشگاه با ترازوی دقیق (با دقت ۰/۰۰۰۱) اندازه گیری شد. سپس تمامی نمونه ها در آب مقطر قرار داده شده و به مدت ۲۴ ساعت در سردخانه با دمای چهار درجه سانتی گراد قرار گرفتند. وزن اشباع برگ ها بعد از ۲۴ ساعت اندازه گیری شد. سپس برگ ها به مدت ۲۴ ساعت دیگر در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته و وزن خشک یادداشت گردید. در نهایت، محتوای نسبی آب از رابطه (۱) محاسبه گردید (Ritchie & Nguyen, 1990).

$$RWC = \frac{F_w - D_w}{S_w - D_w} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، F_w : وزن تر برگ بلافاصله بعد از نمونه برداری، D_w : وزن خشک برگ بعد از قرار گرفتن در آون و S_w : وزن اشباع برگ بعد از قرار گرفتن در آب مقطر است.

اندازه گیری آنزیم های آنتی اکسیدانتی

فعالیت آنزیم کاتالاز: کمپلکس واکنشی شامل ۱/۵ میلی لیتر از بافر پتاسیم فسفات ۱۰۰ میلی مولار (pH 7)، ۰/۵ میلی لیتر از هیدروژن پراکسید ۷/۵ میلی مولار و ۵۰ میکرولیتر از محلول آنزیمی بود و حجم نمونه ها با اضافه کردن آب مقطر به سه میلی لیتر رسانده شد. جذب کمپلکس واکنشی در طول موج ۲۹۰ نانومتر یادداشت و میزان فعالیت آنزیم با استفاده از ضریب خاموشی ۳۶/۶ میلی مول بر سانتی متر محاسبه شد (Aebi, 1984).

فعالیت آنزیم پراکسیداز: مخلوط واکنش شامل ۸۱ میلی لیتر بافر پتاسیم فسفات ۵۰ میلی مولار با pH=۶/۶، ۲۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی نمونه و ۹۰ میکرولیتر گوئییکول یک درصد به عنوان الکترون دهنده مورد استفاده قرار گرفت. قبل از اندازه گیری سرعت واکنش، ۹۰ میکرولیتر هیدروژن پراکسید سه درصد به عنوان پذیرنده الکترون به مخلوط واکنش اضافه شد و مقدار جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه گیری گردید (MacAdam, Nelson, & Sharp, 1992).

نتایج و بحث

محتوای نسبی آب برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که برهم‌کنش دوگانه آبیاری $\times$ براسینولید در سطح احتمال پنج درصد بر میزان محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار شد (جدول ۳). بر مبنای مقایسه میانگین، با افزایش سطوح تنش خشکی، میزان محتوای نسبی آب نیز کاهش یافت. اعمال تنش خشکی با آبیاری ۵۰ درصد محتوای این صفت را به میزان ۱۸/۷۹ درصد در مقایسه با آبیاری کامل کاهش داد (شکل ۱). تنش خشکی باعث کاهش محتوای نسبی آب برگ (RWC) و ایجاد عدم تعادل در متابولیسم سلولی می‌شود. کاهش محتوای نسبی آب برگ به عنوان شاخصی برای وضعیت آبی گیاه منجر به کاهش فشار تورژسانس، اختلال در فرآیند فتوسنتز و محدودیت در رشد سلولی می‌شود. به عبارت دیگر، در راستای افزایش میزان شدت تنش خشکی با کاهش رطوبت خاک و محدودیت پتانسیل آب برگ، محتوای نسبی آب برگ نیز کاهش یافته و در پی آن هدایت روزنه‌ای و ورود دی‌اکسید کربن به داخل برگ کمتر می‌شود (Zhou et al., 2017). پژوهشگران در آفتابگردان نیز کاهش محتوای نسبی آب برگ را تحت تنش خشکی ابراز داشته‌اند (Ashraf & Siddiqi, 2024).

کاربرد محلول‌پاشی براسینولید تحت شرایط تنش خشکی روند مثبتی را نشان داد، به گونه‌ای که اعمال محلول‌پاشی ۰/۵ میلی گرم بر لیتر براسینولید در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد به ترتیب موجب افزایش ۱۳/۹۸، ۱۴/۸۸ و ۳۵/۰۹ درصدی محتوای نسبی آب برگ در

مقایسه با تیمار عدم کاربرد براسینولید شد (شکل ۱). در شرایط تنش خشکی، کاربرد براسینولید می‌تواند به دلیل تأثیر بر محتوای پروتئین‌ها، فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز، تولید اتیلن، ذخیره پلی‌آمین‌ها و محتوای نسبی آب باعث افزایش جذب و نگهداری آب در سلول‌های گیاهی شود (Talaat & Shawky, 2016). براسینولید ممکن است در تنظیم عملکرد روزنه‌ها نقش داشته باشد. روزنه‌ها وظیفه کنترل میزان آب و گازهای موجود در گیاهان را بر عهده دارند. افزایش فعالیت روزنه می‌تواند منجر به بهبود تعادل آب در گیاه شود. این هورمون همچنین تأثیرگذاری خود را به واسطه تنظیم فعالیت آنزیم‌های مرتبط با فرآیند متابولیسم آب و حفظ تعادل آبی گیاهان اعمال می‌کند. علاوه بر این از طریق سنتز سلولز، استحکام دیواره سلولی را افزایش داده که اولین خط دفاعی در برابر تنش‌های محیطی به شمار می‌آید (Bartwal & Arora, 2020).

فعالیت آنزیم کاتالاز

مطابق با جدول تجزیه واریانس، اثرات ساده آبیاری و براسینولید در سطح احتمال یک درصد بر میزان فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار شد. باین‌حال برهم‌کنش دوگانه تأثیر معنی‌داری را در پی نداشت (جدول ۳). مقایسه میانگین نشان داد که واکنش آنزیم کاتالاز با افزایش در سطوح تنش ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری مطلوب، به میزان ۴۵/۷۴ و ۸۱/۹۱ درصد به نسبت تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد افزایش یافت (جدول ۴).

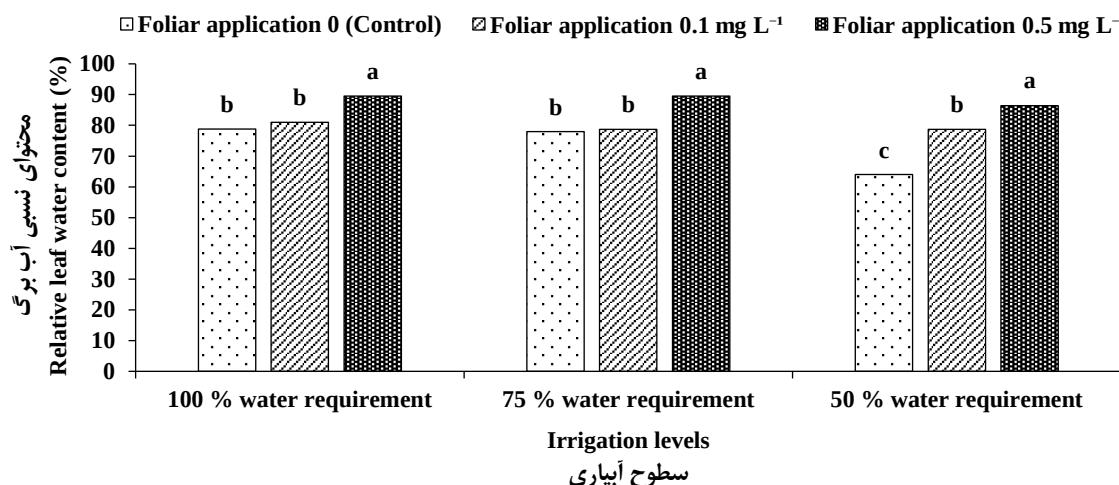
جدول ۳- تجزیه واریانس اثر آبیاری و براسینولید برای برخی از صفات فیزیولوژیک آفتابگردان

Table 3- Analysis of variance of the effect of irrigation and brassinolide for some physiological traits of sunflower

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	محتوای نسبی آب برگ Relative water content	آنزیم کاتالاز Catalase	آنزیم پراکسیداز Peroxidase	آنزیم سوپراکسید دیسموتاز Superoxide dismutase
تکرار Replication	2	259.76	0.08	0.87	0.50
آبیاری Irrigation (I)	2	120.84*	1.33**	36.66**	25.45**
خطای اصلی Main plot error	4	24.93	0.01	0.06	0.11
براسینولید Brassinolide (B)	2	515.83**	0.12**	5.33**	6.79**
I $\times$ B	4	15.31*	0.01 ^{ns}	0.16 ^{ns}	0.31*
خطای فرعی Sub plot error	12	15.79	0.01	0.24	0.05
ضریب تغییرات CV (%)		4.9	7.4	9.9	7.7

ns, ** و *: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال خطای یک و پنج درصد را نشان می‌دهند.

ns, ** and *: indicate nonsignificant and significant at the 1 and 5 percent error probability levels, respectively.



شکل ۱- مقایسه میانگین محلول‌پاشی براسینولید در سطوح رژیم آبیاری برای محتوای نسبی آب برگ در آفتابگردان
Figure 1- Mean comparison of the foliar application of brassinolide under irrigation regime levels for relative leaf water content in sunflower

در هر سطح رژیم آبیاری حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD و رویه L.S.Means می‌باشد.

At each irrigation regime level, at least one common letter indicates no statistical difference between the means at the 5% probability level based on the LSD test and L.S. Means procedure.

کاتالاز را از طریق فعال‌سازی مسیرهای سیگنالی مربوط به پروتئین کینازها و فسفاتازها افزایش دهد (Yaqoob, Jan, Raman, Siddique, & John, 2022). تشدید فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان تیمار شده با براسینولید به‌واسطه افزایش بیان ژن‌های مربوطه و تسریع سنتز این آنزیم‌ها رخ می‌دهد (Planas-Riverona et al., 2019). افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز تحت کاربرد براسینولید در لوبیا چیتی نیز عنوان شده است (Hajiri & Pazoki, 2023).

فعالیت آنزیم پراکسیداز

براساس نتایج تجزیه واریانس، اثرات ساده آبیاری و محلول‌پاشی براسینولید در سطح احتمال یک درصد بر میزان پراکسیداز معنی‌دار گردید، اما برهم‌کنش آن‌ها برای صفت مذکور معنی‌دار نشد (جدول ۳). مقایسه میانگین سطوح آبیاری نشان داد که بیشترین میزان پراکسیداز در تیمار تنش شدید (۵۰ درصد آبیاری مطلوب) با میانگین ۷/۰۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ و کم‌ترین میزان پراکسیداز در تیمار آبیاری کامل (۱۰۰ درصد آبیاری مطلوب) با میانگین ۳/۰۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ به دست آمد و از این جهت، فعالیت پراکسیداز با افزایش ۱/۳۲ برابری مواجه شد (جدول ۴). تنش خشکی، مشابه سایر تنش‌های زیستی و غیرزیستی منجر به انباشت گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) در سلول‌های گیاهی می‌شود.

احتمالاً انسداد روزنه‌ها در پاسخ به تنش خشکی موجب افزایش دمای برگ شده که این امر شرایط را برای تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن تسهیل می‌کند. در نتیجه آن، تخریب ساختارهای فتوسنتزی، فرآیند پراکسیداسیون لیپیدها، تخریب پروتئین‌های غشایی و اکسیداسیون ترکیبات زیستی حیاتی تشدید می‌شود. در چنین شرایطی، آنزیم‌های اکسیداتیو از جمله کاتالاز به‌صورت القایی فعال شده و با تجزیه هیدروژن پراکسید و سایر گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن، نقش مؤثری در کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تنش خشکی ایفا می‌کنند (Huchzermeyer et al., 2022). هم‌سو با نتایج حاضر، یافته‌های احمد و همکاران (Ahmad et al., 2014) نیز نشان داد که افزایش فعالیت کاتالاز متناسب با افزایش سطوح تنش خشکی بود.

مقایسه میانگین سطوح محلول‌پاشی براسینولید نشان داد که بیشترین میزان کاتالاز (۱/۴۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) در تیمار ۵/۰ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید به دست آمد که با تیمار ۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید (۱/۳۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) تفاوت معنی‌داری نداشت، اما در مقایسه با شاهد (عدم محلول‌پاشی) با اختلاف ۱۸/۸۵ درصدی همراه بود (جدول ۴). براسینولیدها از طریق القاء تولید مولکول‌های واسطه نظیر نیتریک اکسید و تنظیم بیوسنتز اسیدآبسیزیک، با افزایش غلظت داخلی این هورمون موجب فعال‌سازی مسیرهای آنتی‌اکسیدانی می‌شوند. مطالعات نشان داده‌اند که نیتریک اکسید قادر است فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات اصلی آبیاری و براسینولید برای کاتالاز و پراکسیداز در آفتابگردان

تیمار آزمایش	سطوح تیمار	فعالیت کاتالاز Catalase (mg g ⁻¹ FW)	فعالیت پراکسیداز Peroxidase (mg g ⁻¹ FW)
Experimental treatment	Treatment levels		
آبیاری Irrigation	آبیاری ۱۰۰ درصد 100 percent irrigation	0.94 ^{c*}	3.04 ^c
	آبیاری ۷۵ درصد 75 percent irrigation	1.37 ^b	4.89 ^b
	آبیاری ۵۰ درصد 50 percent irrigation	1.71 ^a	7.07 ^a
	0	1.22 ^b	4.23 ^c
براسینولید Brassinolide (mg L ⁻¹)	0.1	1.35 ^a	5.00 ^b
	0.5	1.45 ^a	5.77 ^a

* حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح احتمال خطا پنج درصد اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

* Similar letters in each column are not significantly different from each other based on the LSD test at the 5% error probability level.

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز

تجزیه واریانس داده‌ها نشان از معنی‌داری برهم‌کنش آبیاری × براسینولید در سطح احتمال خطای پنج درصد بر میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز داشت (جدول ۳). یافته‌ها نشان می‌دهد که بروز تنش خشکی در سطوح آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد به ترتیب با افزایش مطلوب همراه بود (شکل ۲). آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر سوپراکسید دیسموتاز نقش حیاتی در حفاظت از غشاهای سلولی و ماکرومولکول‌های زیستی در برابر آسیب اکسیداتیو ایفا کرده و غلظت هیدروژن پراکسید و سوپراکسید سلول را تنظیم می‌کنند. سوپراکسید با تغییر تعامل پروتئین‌ها و لیپیدها، غشاء را در معرض اکسیژن قرار داده و به عملکرد آن آسیب می‌زند. بنابراین تحت این شرایط، تولید رادیکال پراکسید افزایش می‌یابد (Bogati & Walczak, 2022).

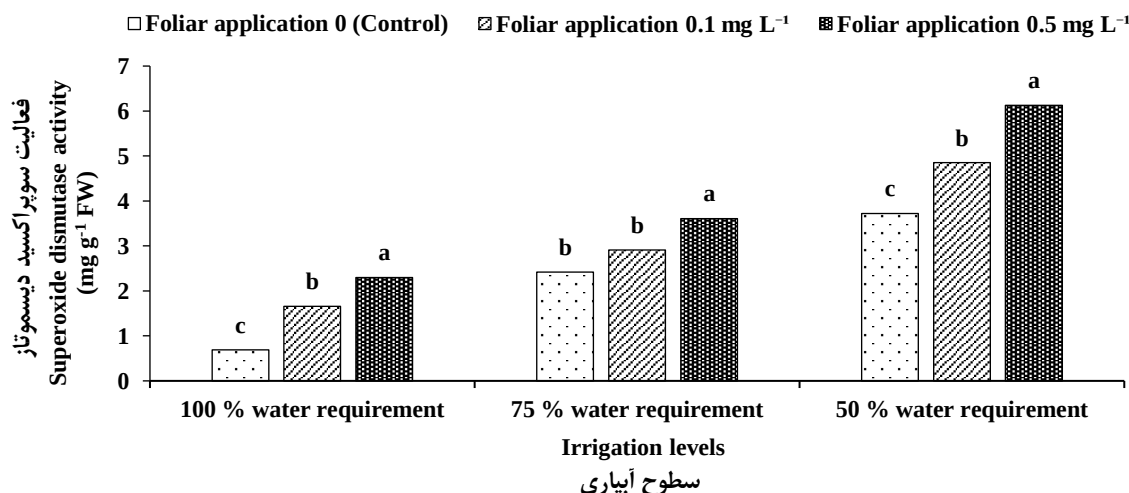
نتایج این تحقیق با یافته‌های اشرف و صدیقی (Ashraf & Siddiqi, 2016) در افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز تحت تیمارهای تنش آبی در آفتابگردان مطابقت دارد. نتایج مقایسه میانگین نشانگر آن است که میزان فعالیت سوپراکسید دیسموتاز در هر یک از سطوح آبیاری با افزایش محلول‌پاشی هورمون براسینولید افزایش یافت، به گونه‌ای که در سطوح ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری، اعمال محلول‌پاشی ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید به ترتیب عامل افزایش ۲/۳۳ برابری و ۴۹/۱۷ و ۶۵ درصدی فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (در مقایسه با عدم محلول‌پاشی هورمون) شد (شکل ۲). براسینولید به‌طور غیرمستقیم (از طریق بیان ژن‌های NCED و پیش‌سازهای آنزیمی) بر متابولیسم اسیدآسیزیک تأثیر می‌گذارد. افزایش سطح اسیدآسیزیک در پاسخ به براسینولید، به‌ویژه در شرایط تنش‌های محیطی مانند خشکی، می‌تواند فعال‌سازی سیستم آنتی‌اکسیدانی در گیاهان را تحریک کند. یکی از اثرات مهم

این تجمع می‌تواند باعث ایجاد تنش اکسیداتیو و آسیب به ساختارهای حیاتی سلولی گردد. پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز به عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در سیستم دفاعی، نقش مهمی در کاهش اثرات تنش اکسیداتیو و حفاظت از گیاهان در شرایط خشکی ایفا می‌کند. این آنزیم از طریق تجزیه هیدروژن پراکسید و خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن، به حفظ تعادل اکسیداتیو و پایداری سلولی کمک کرده و به عنوان یک نشانگر زیستی در مطالعات مرتبط با تحمل گیاه به تنش‌های محیطی مورد توجه قرار گرفته است (Ghassemi-Golezani, Ghassemi, & Zehtab-Salmasi, 2018).

مقایسه میانگین سطوح محلول‌پاشی براسینولید گواه آن بود که بیشترین میزان پراکسیداز (۵/۷۷ میلی‌گرم بر وزن تر برگ) در تیمار ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید و کمترین میزان این صفت (۴/۲۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) در شاهد به دست آمد. در واقع، محلول‌پاشی براسینولید موجب افزایش ۳۶/۴۰ درصدی فعالیت پراکسیداز گردید (جدول ۴). براسینولید با تحریک مسیرهای سیگنالی وابسته به کینازهای پروتئین، مانند مسیرهای مرتبط با پروتئین کیناز وابسته به کلسیم (Ca²⁺-PKC) و پروتئین کیناز فعال شده توسط براسینولید (BRI1)، می‌تواند به‌طور غیرمستقیم بر بیان ژن‌هایی که مسئول سنتز آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی هستند، تأثیر بگذارد. این مسیرها ممکن است به افزایش بیان ژن‌های پراکسیداز و سایر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی منجر شوند. به این ترتیب، براسینولید می‌تواند از طریق تنظیم سطح بیان ژن پراکسیداز، سنتز این آنزیم را در گیاهان افزایش دهد (Hafeez et al., 2021). در این زمینه مطرح شده است که کاربرد براسینواستروئید فعالیت پراکسیداز را در آفتابگردان افزایش داده و کاهش تنش اکسیداتیو را در پی داشته است (El-Beltagi & El-Metwally, 2017).

همین رابطه، پژوهشی در آفتابگردان نشان داد که کاربرد براسینواستروئید عامل افزایش سوپراکسید دیسموتاز تحت تیمارهای تنش خشکی بوده است (El-Beltagi & El-Metwally, 2017).

اسیدآبسیزیک، تحریک تولید آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز است که مسئول خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد اکسیژن و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو در سلول‌ها هستند (Gao et al., 2024). در



شکل ۲- مقایسه میانگین محلول‌پاشی براسینولید در هر سطح رژیم آبیاری برای آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در آفتابگردان
Figure 2- Mean comparison of the foliar application of brassinolide under irrigation regime levels for superoxide dismutase in sunflower

در هر سطح رژیم آبیاری، حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD و رویه L.S.Means می‌باشد.

At each irrigation regime level, at least one common letter indicates no statistical difference between the means at the 5% probability level based on the LSD test and L.S. Means procedure.

شاخص سطح برگ

تجزیه واریانس نشان داد که برهم‌کنش دوگانه آبیاری × براسینولید در سطح حتمال پنج درصد برای میزان شاخص سطح برگ معنی‌دار شد (جدول ۵). اعمال تیمار تنش موجب کاهش ۷/۳۶ و ۵۷/۴۸ درصدی شاخص سطح برگ در سطوح آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد به نسبت آبیاری ۱۰۰ درصد شد (شکل ۳). کاهش محتوای رطوبتی خاک و گیاه منجر به تنش خشکی و تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود که به غشاها، پروتئین‌ها و کلروفیل آسیب اکسیداتیو وارد می‌کند. این فرآیند باعث تخریب سلول‌های مزوفیل و کاهش شاخص سطح برگ‌های (LAI) می‌شود. بسته شدن روزنه‌ها و کوچک شدن برگ‌ها به عنوان سازوکار دفاعی برای حفظ آب، اگرچه از تعرق جلوگیری می‌کند، اما فتوسنتز را محدود کرده و در ادامه تولید زیست‌توده را کاهش می‌دهد (Abaszadeh et al., 2024).

نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش دوگانه تحت سطوح آبیاری نشان‌دهنده بهبود شاخص سطح برگ با افزایش کاربرد محلول‌پاشی

براسینولید بود. در سطوح آبیاری ۱۰۰ و ۵۰ درصد، اعمال ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید موجب افزایش ۱۲/۲۶ و ۴۵/۴۱ درصدی شاخص سطح برگ در مقایسه با عدم محلول‌پاشی شد (شکل ۳). با این وجود تیمارهای محلول‌پاشی هورمون در سطح آبیاری ۷۵ درصد تفاوت آماری با شاهد (عدم محلول‌پاشی) نشان ندادند (شکل ۳). براسینولیدها از طریق فعال‌سازی ژن‌های مرتبط با تقسیم و توسعه سلولی باعث تحریک رشد برگ‌ها می‌شوند (Hassanuzzaman et al., 2015). همچنین می‌توانند با افزایش فعالیت آنزیم‌های مربوط به بیوسنتز کلروفیل و کاهش تجزیه آن، یا به عبارت دیگر از طریق مهار ژن‌های مرتبط با پیری برگ و فعال‌سازی آنتی‌اکسیدان‌ها، از تجزیه زودرس برگ‌ها جلوگیری کرده و سطح برگ را در طول دوره تنش خشکی حفظ کنند. این امر منجر به ذخیره بیشتر مواد تغذیه‌ای شده و فرآیند رشد را بهبود می‌بخشد (Vardhini & Anjum, 2015). گزارش شده است براسینولید سبب افزایش شاخص سطح برگ ذرت در مقایسه با شاهد شد (AL Bakri & AL-Zubaidy, 2023).

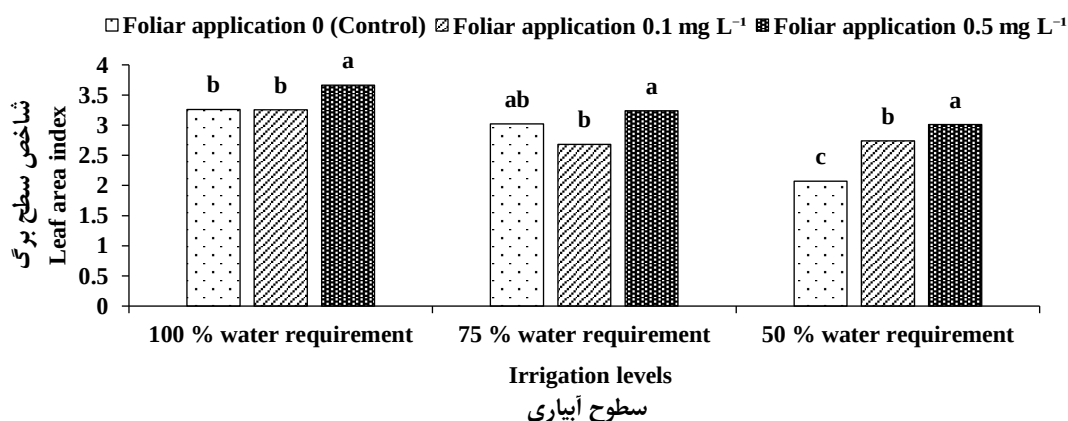
جدول ۵- تجزیه واریانس اثر آبیاری و براسینولید بر خصوصیات زراعی آفتابگردان

Table 5- Analysis of variance of the effect of irrigation and brassinolide on agronomic characteristics sunflower

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	شاخص سطح برگ Leaf area index	وزن طبق بدون دانه Weight per head without seeds	وزن طبق با دانه Weight per head with seeds	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد روغن Oil yield
تکرار Replication	2	0.93	8639	210553	356	24071
آبیاری Irrigation (I)	2	1.38**	11506*	10591542**	68881**	1261177**
خطای اصلی Main plot error	4	0.05	2313	96232	134	13239
براسینولید Brassinolide (B)	2	0.67**	25986* ⁸	1452997*	15557**	298393**
I×B	4	0.21*	5566 ^{ns}	68916 ^{ns}	624*	19834*
خطای فرعی Sub plot error	12	0.05	1748	215211	128	3771
ضریب تغییرات CV (%)		7.7	8.6	15.9	5.5	7.9

ns, ** و *: به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال خطای یک و پنج درصد را نشان می‌دهند.

ns, ** and *: indicate nonsignificant and significant at the 1 and 5 percent error probability levels, respectively.



شکل ۳- مقایسه میانگین محلول‌پاشی براسینولید در هر سطح رژیم آبیاری برای شاخص سطح برگ در آفتابگردان

Figure 3- Mean comparison of the foliar application of brassinolide under irrigation regime levels for leaf area index in sunflower

در هر سطح رژیم آبیاری، حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD و رویه L.S.Means می‌باشد.

At each irrigation regime level, at least one common letter indicates no statistical difference between the means at the 5% probability level based on the LSD test and L.S. Means procedure.

(۵)

وزن طبق بدون دانه و با دانه

بر مبنای مقایسه میانگین سطوح آبیاری، وزن طبق بدون دانه متناسب با افزایش شدت تنش خشکی کاهش یافت، به گونه‌ای که تیمار آبیاری ۵۰ درصد عامل افت ۱۳/۶۵ درصدی این صفت به نسبت آبیاری ۱۰۰ درصد شد (جدول ۶). از سوی دیگر، بیشترین وزن طبق با دانه (۳۵۴۰/۹ گرم) در تیمار آبیاری کامل به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با تیمار تنش متوسط نداشت، اما در مقایسه با تیمار تنش

تجزیه واریانس نشان داد که اثرات ساده آبیاری (در سطح احتمال پنج درصد) و محلول‌پاشی براسینولید (در سطح احتمال یک درصد) بر وزن طبق بدون دانه معنی‌دار بود. همچنین برای وزن طبق پر نیز اثرات ساده آبیاری و محلول‌پاشی براسینولید (در سطوح احتمال یک و پنج درصد) معنی‌دار بود، اما برهم‌کنش‌های دوگانه آبیاری × براسینولید بر هیچ یک از این دو صفت اثر معنی‌داری نداشت (جدول

شدید (۱۶۶۱/۵ گرم) اختلاف ۵۳/۰۷ درصدی را بروز داد (جدول ۶). تنش خشکی همزمان با کاهش محتوای رطوبتی خاک و گیاه موجب افت فعالیت فتوسنتزی از طریق بسته شدن روزنه‌ها و تخریب کلروفیل می‌شود که سطح فتوسنتزکننده را کاهش می‌دهد. این امر منجر به کاهش تولید محصولات فتوسنتز و در نتیجه محدودیت در انتقال مواد فتوسنتزی از منابع (برگ‌ها) به مخازن (دانه‌ها) می‌شود (Jaleh, 2017). کاهش فتوسنتز و افت تولید زیست‌توده، ظرفیت پر شدن دانه‌ها را کاهش داده و وزن طبق با دانه و بدون دانه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. باین‌حال، کاهش محسوس‌تر وزن طبق با دانه نشان می‌دهد که افت عملکرد عمدتاً ناشی از کاهش وزن دانه‌ها است. این فرآیند احتمالاً به دلیل اختلال در تخصیص منابع و محدودیت دسترسی به آب و مواد مغذی رخ می‌دهد که می‌تواند باعث کاهش رشد زایشی نسبت به رویشی شود. در نتیجه، بسته به شدت و مدت تنش خشکی، گیاه ممکن است بخشی از منابع خود را برای حفظ ساختارهای حیاتی به‌جای تولید دانه تخصیص دهد که در نهایت سبب کاهش بهره‌وری گیاه در شرایط تنش خشکی می‌شود. گزارش شده است که وزن طبق و تعداد دانه در طبق گیاه آفتابگردان تحت شرایط تنش خشکی به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (Farooq, Wahid, Kobayashi, Fujita & Basra, 2009). مقایسه میانگین سطوح مختلف محلول‌پاشی براسینولید نمایانگر

تأثیر مثبت و معنی‌دار این هورمون در افزایش وزن طبق پر و خالی دارد. بیشترین وزن طبق بدون دانه (۵۳۸/۳۲ گرم) و وزن طبق با دانه (۳۱۶۶ گرم) در تیمار محلول‌پاشی ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید و کمترین وزن طبق بدون دانه (۴۳۰/۹۳ گرم) و وزن طبق با دانه (۲۴۵۰/۷ گرم) در تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) به دست آمد. از این جهت، اعمال محلول‌پاشی در بالاترین سطح کاربردی در این آزمایش، به‌ترتیب سبب افزایش ۲۴/۹۲ و ۲۹/۱۸ درصدی وزن طبق بدون دانه و با دانه شده است (جدول ۶). براسینولیدها با افزایش نرخ فتوسنتز، تقویت تولید محصولات فتوسنتزی و تسهیل انتقال آن‌ها به دانه‌ها، نقش مهمی در بهبود وزن طبق با دانه ایفا می‌کنند. این هورمون از طریق افزایش سنتز کلروفیل و فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی موجب پر شدن بهتر دانه‌ها می‌شود. همچنین با تحریک تقسیم و توسعه سلولی، انباشت بیشتر مواد ذخیره‌ای مانند نشاسته و پروتئین را در دانه‌ها تسریع می‌کند (Chen, Hu, Jiang, & Wang, 2024). علاوه‌بر این، با کاهش آسیب اکسیداتیو و فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، براسینولید از تخریب برگ‌ها جلوگیری کرده و طول عمر برگ‌ها را افزایش می‌دهد، که به حفظ سطوح فتوسنتزکننده و تولید مواد فتوسنتزی در طول دوره رشد کمک می‌کند (Vardhini & Anjum, 2015).

جدول ۶- مقایسه میانگین اثرات اصلی آبیاری و براسینولید برای وزن طبق بدون دانه و با دانه در آفتابگردان

Table 6- Comparison of mean main effects of irrigation and brassinolide for seedless and seeded head weight in sunflower

تیمار آزمایش	سطوح تیمار	وزن طبق بدون دانه	وزن طبق با دانه
Experimental treatment	Treatment levels	Weight per head without seeds (gr)	Weight per head with seeds (gr)
آبیاری Irrigation	آبیاری ۱۰۰ درصد 100 percent irrigation	518.19 ^a	3540.9 ^a
	آبیاری ۷۵ درصد 75 percent irrigation	491.68 ^{ab}	3540.0 ^a
	آبیاری ۵۰ درصد 50 percent irrigation	447.42 ^b	1661.5 ^b
براسینولید Brassinolide (mg L ⁻¹)	0	430.93 ^c	2450.7 ^b
	0.1	488.04 ^b	3125.6 ^a
	0.5	538.33 ^a	3166.0 ^a

* حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD در سطح احتمال خطای پنج درصد اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

* Similar letters in each column are not significantly different from each other based on the LSD test at the 5% error probability level

عملکرد دانه

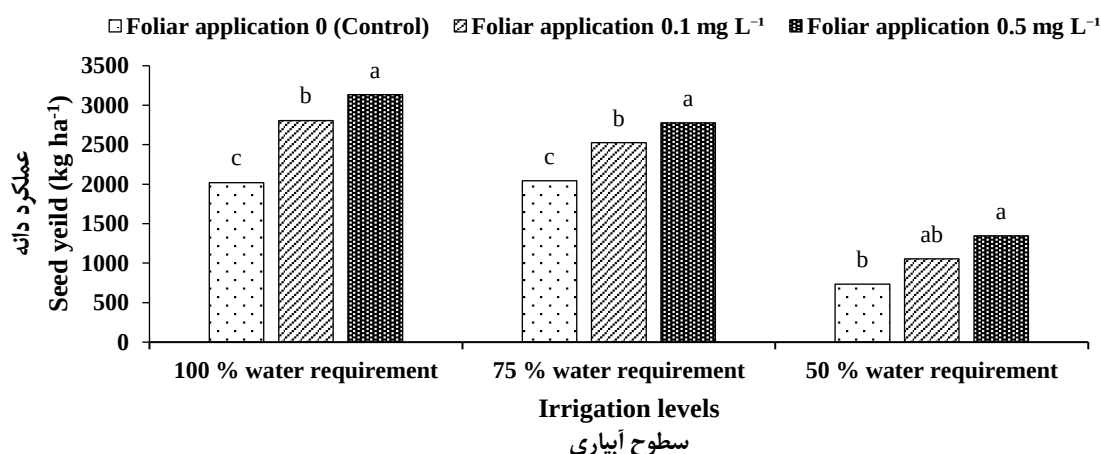
جدول تجزیه واریانس نشان داد که برهم‌کنش دوگانه آبیاری × براسینولید در سطح احتمال پنج درصد برای عملکرد دانه معنی‌دار شد (جدول ۵). داده‌های آزمایشی نشان‌دهنده کاهش عملکرد دانه با افزایش سطوح تنش خشکی می‌باشد، به‌طوری‌که تیمار تنش شدید کامل با کاهش ۶۱/۵۶ درصدی عملکرد دانه در مقایسه با آبیاری مطلوب همراه شد (شکل ۴). کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش

خشکی می‌تواند به‌دلیل سقط و از بین رفتن فندقه و کاهش باروری گیاه در این مرحله از رشد باشد. کاهش عملکرد دانه می‌تواند به‌طور مستقیم در اثر بسته شدن روزنه‌ها و یا به‌طور غیرمستقیم در اثر افزایش آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین‌ها و کلروفیل‌ها باشد که در نهایت باعث کاهش میزان فتوسنتز و به‌تبع آن کاهش مقدار مواد فتوسنتزی و در نهایت عملکرد دانه می‌گردد. عرب و همکاران (Arab et al., 2023) گزارش کردند که با افزایش تبخیر از تشتک تبخیر تا

فیزیولوژیکی گیاه در شرایط نرمال و تنش خشکی موجب افزایش تولید مواد غذایی برای گل‌ها و بذرها در حال رشد می‌شود. این امر به بهبود رشدونمو بذرها و در نتیجه افزایش عملکرد دانه منجر می‌گردد. افزایش عملکرد دانه تحت تأثیر براسینولید احتمالاً ناشی از بهبود جذب بیشتر دی‌اکسیدکربن است که با افزایش تجمع رنگدانه‌های فتوسنتزی، به‌ویژه کلروفیل و محتوای بالاتر پروتئین‌های محلول مرتبط است (Chen et al., 2024). هم‌سو با این نتایج، حامد و عبدالله (Hamed & Abdullah, 2022) نیز افزایش عملکرد دانه آفتابگردان را با کاربرد براسینولید گزارش کردند.

۱۸۰ میلی‌متر، عملکرد دانه آفتابگردان به میزان ۳۷/۵ درصد کاهش یافت.

مقایسه میانگین‌ها مشخص نمود که با افزایش میزان براسینولید تا ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر، اثرات تنش خشکی کاهش یافته و میزان عملکرد دانه بهبود یافت. در هر یک از سطوح آبیاری، بیشترین میزان عملکرد مربوط به بالاترین سطح براسینولید بود، به‌گونه‌ای که در مقایسه با تیمار عدم محلول‌پاشی موجب افزایش ۵۴/۴۰، ۳۵/۹۰ و ۸۳/۵۷ درصدی عملکرد دانه در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد شد (شکل ۴). مصرف براسینولید با حفظ یا تقویت فرآیندهای



شکل ۴- مقایسه میانگین محلول‌پاشی براسینولید در هر سطح رژیم آبیاری برای عملکرد دانه در آفتابگردان

Figure 4- Mean comparison of the foliar application of brassinolide under irrigation regime levels for seed yield in sunflower

در هر سطح رژیم آبیاری، حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD و رویه L.S.Means می‌باشد.

At each irrigation regime level, at least one common letter indicates no statistical difference between the means at the 5% probability level based on the LSD test and L.S. Means procedure

رخ می‌دهد. بنابراین، اگرچه کاهش درصد روغن در دانه‌ها تحت تأثیر تنش خشکی قرار می‌گیرد، اما کاهش عملکرد دانه و تولید زیست‌توده، عامل اصلی کاهش میزان روغن تولیدی بوده است. مطابق با این نتایج، مرادی قه‌دریجانی و همکاران نیز (Moradi-Ghahderijani, Jafarian, & Keshavarz, 2017) از تأثیر منفی و معنی‌دار تنش خشکی بر عملکرد روغن دانه آفتابگردان گزارش کردند.

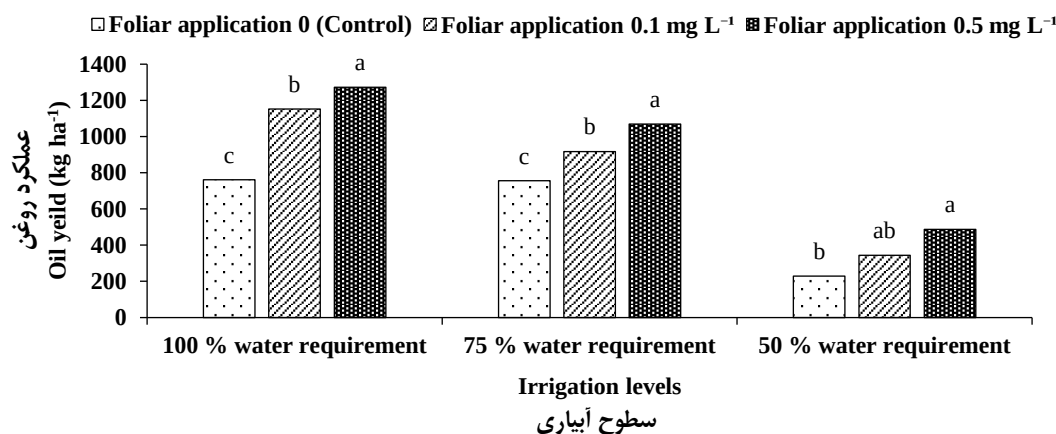
در هر یک از سطوح تیمار آبیاری، کاربرد محلول‌پاشی براسینولید با افزایش عملکرد روغن همراه بود. کاربرد سطح محلول‌پاشی ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد به‌ترتیب موجب افزایش ۶۷/۰۳، ۴۱/۴۹ و ۶۸/۶۶ درصدی عملکرد روغن در مقایسه با تیمار عدم محلول‌پاشی شد (شکل ۵). مصرف براسینولید تحت شرایط تنش خشکی می‌تواند با بهبود کارایی فتوسنتزی و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو، عملکرد روغن را بهبود بخشد. همچنین براسینولید با بهبود راندمان جذب دی‌اکسیدکربن و

عملکرد روغن

براساس نتایج تجزیه واریانس، برهم‌کنش آبیاری × براسینولید در سطح احتمال پنج درصد بر عملکرد روغن معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین آشکار نمود که عملکرد روغن متأثر از سطوح تنش خشکی به‌صورت معنی‌داری کاهش یافته است. کم‌ترین میزان عملکرد روغن تحت آبیاری ۵۰ درصد مشاهده شد که در مقایسه با تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد با کاهش ۷۰/۰۱ درصدی مواجه بود (شکل ۵). تنش خشکی از عوامل اصلی کاهش عملکرد روغن در گیاهان روغنی است. این تنش به‌طور مستقیم باعث کاهش درصد روغن در دانه‌ها می‌شود، اما تأثیر عمده‌تر آن بر کاهش عملکرد دانه است. کاهش حجم دانه‌ها و محدودیت در تجمع مواد ذخیره‌ای مانند روغن، اغلب به‌واسطه افت فعالیت فتوسنتزی و اختلال در فرآیندهای متابولیکی مرتبط با پر شدن دانه‌ها و سنتز روغن در بافت‌های مخزن

می‌شود (Nasser & Sarhan, 2023). وحدی و قلی‌نژاد (Vahdi & GHolinejad, 2015) گزارش کردند که تنش خشکی سبب کاهش عملکرد روغن دانه سویا (*Glycine max* L.) گردید. ایشان ابراز داشتند که تنش خشکی باعث افزایش ضخامت پوست دانه و کاهش درصد مغز به کل دانه شد که برآیند آن‌ها کاهش درصد روغن بود.

افزایش تولید کلروفیل، به افزایش تجمع مواد فتوسنتزی و افزایش درصد روغن در دانه‌ها کمک می‌کند. با این حال، اثر اصلی براسینولید در بهبود عملکرد روغن، از طریق تحریک رشد و توسعه دانه‌ها، افزایش اندازه و وزن دانه و بهبود پر شدن دانه‌ها است که در نهایت منجر به افزایش عملکرد کل دانه و در نتیجه افزایش تولید روغن



شکل ۵- مقایسه میانگین محلول‌پاشی براسینولید در هر سطح رژیم آبیاری برای عملکرد روغن در آفتابگردان

Figure 5- Mean comparison of the foliar application of brassinolide under irrigation regime levels for oil yield in sunflower

در هر سطح رژیم آبیاری، حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون LSD و رویه L.S.Means می‌باشد.

At each irrigation regime level, at least one common letter indicates no statistical difference between the means at the 5% probability level based on the LSD test and L.S. Means procedure

نتیجه‌گیری

روغن را در پی داشته است. در این راستا، با در نظر گرفتن محدودیت و کاهش سهولت دسترسی به منابع آبی، استفاده از این نوع محرک‌های رشد در کشاورزی پایدار می‌تواند بسیار مفید باشد. با توجه به نتایج این پژوهش، به نظر می‌رسد که محلول‌پاشی ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر براسینولید تأثیر مثبتی در کاهش پیامدهای تنش خشکی بر عملکرد دانه و روغن آفتابگردان داشته است. با این حال، از آنجایی که این مطالعه در یک فصل زراعی انجام شده است، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات بیشتری در شرایط متنوع اقلیمی و با تکرارهای بیشتر انجام گیرد تا امکان ارائه یک توصیه مدیریتی قطعی فراهم شود.

سپاسگزاری

نویسندگان از خانم مهندس یاسمین کرمی، کارشناس محترم آزمایشگاه زراعت دانشگاه یاسوج برای پشتیبانی در اجرای آزمایش‌ها و از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه یاسوج به جهت تأمین اعتبار لازم برای انجام این طرح، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تنش خشکی به‌طور معنی‌داری بر تمامی صفات مورد مطالعه تأثیر منفی گذاشت. با این حال، کاربرد محلول‌پاشی براسینولید در سطوح مختلف تیمار آبیاری، تا حدودی توانست اثرات سوء تنش خشکی را کاهش دهد. این نتایج حاکی از آن است که تنش خشکی با افزایش تولید رادیکال‌های آزاد، آسیب به غشاء سلولی و ایجاد اختلال در تعادل هورمونی و فیزیولوژیکی گیاه منجر به کاهش رشد رویشی و زایشی و در نهایت کاهش عملکرد می‌شود. اما کاربرد براسینولید می‌تواند به‌عنوان یک محرک رشد و افزایش‌دهنده تحمل به تنش خشکی برای آفتابگردان مورد استفاده قرار گیرد. براسینولید با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه، حفظ تعادل هورمونی و بهبود وضعیت آب و یون در گیاه، به افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی کمک کرد، به‌گونه‌ای که کاهش خسارت واردشده بر دستگاه فتوسنتزی با حفظ شاخص سطح برگ مطلوب در طی تنش خشکی منجر به بهبود تجمع مواد ذخیره‌ای و انتقال مناسب این مواد به طبق‌ها شده؛ در نتیجه افزایش عملکرد دانه و به‌دنبال آن عملکرد

References

1. Abaszadeh, B., Fanaee, S., & Bakhshi, D. (2024). Foliar application of *Silybum marianum* L. Gaertn. with plant growth regulators under different soil moisture conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 40(3), 562-580. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2024.364529.3405>
2. Aebi, H. (1984). Catalase *in vitro*. *Method of Enzymology*, 105, 121-126. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3)
3. Ahmad, P., Jamsheed, S., Hameed, A., Rasool, S., Sharma, I., Azooz, M. M., & Hasanuzzaman, M. (2014). Drought stress induced oxidative damage and antioxidants in plants. In *Oxidative damage to plants* (pp. 345-367). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799963-0.00011-3>
4. AL Bakri, A. A. A., & AL-Zubaidy, S. A. A. H. (2023, September). Effect of irrigation periods and brassinolide growth regulator on the growth of maize (*Zea mays* L.). In *AIP Conference Proceedings*, 2845(1), 020010. AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0157396>
5. Ansarifard, I., Mostafavi, K., Khosroshahli, M., Bihamta, M., & Ramshini, H. (2020). A study on genotype–environment interaction based on GGE biplot graphical method in sunflower genotypes (*Helianthus annuus* L.). *Food Science & Nutrition*, 8(7), 3327-3334. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1610>
6. Arab, R., Yadavi, A., Balouchi, H., & Alahdadii, H. (2023). The effects of iron and zinc foliar application on nutrients absorption improvement, seed yield and water use efficiency of sunflower under drought stress conditions. *Journal of Crops Improvement*, 25(4), 977-993. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2023.352118.2767>
7. Ashraf, F., & Siddiqi, E. H. (2024). Mitigation of drought-induced stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) via foliar application of Jasmonic acid through the augmentation of growth, physiological, and biochemical attributes. *BioMed Central Plant Biology*, 24(1), 592. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05273-4>
8. Balestrini, R., Chitarra, W., Antoniou, C., Ruocco, M., & Fotopoulos, V. (2018). Improvement of plant performance under water deficit with the employment of biological and chemical priming agents. *The Journal of Agricultural Science*, 156(5), 680-688. <https://doi.org/10.1017/S0021859618000126>
9. Bartwal, A., & Arora, S. (2020). *Brassinosteroids: Molecules with myriad roles*. In A. Arora & A. Ramawat (Eds.), *Co-evolution of Secondary Metabolites* (pp. 869–895). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96397-6_18
10. Beauchamp, C., & Fridovich, I. (1971). Superoxide dismutase: Improved assays and applicable to acryl amide gels. *Annual Review of Biochemistry*, 44, 276-287. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8)
11. Bogati, K., & Walczak, M. (2022). The impact of drought stress on soil microbial community, enzyme activities and plants. *Agronomy*, 12(1), 189. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010189>
12. Chaghakaboodi, Z., Mousavi, S. H., & Kakaei, M. (2024). The effect of 24-epibrasinolide (24-EBL) on physiological and biochemical pathways of lettuce (*Lactuca Sativa* L.) under drought stress conditions. *Crop Biotechnology*, 14(1), 15-28. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.30473/cb.2024.70956.1964>
13. Chen, X., Hu, X., Jiang, J., & Wang, X. (2024). Functions and mechanisms of brassinosteroids in regulating crop agronomic traits. *Plant and Cell Physiology*, 65(10), 1568-1580. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcae044>
14. El-Beltagi, H. S., & El-Metwally, M. M. (2017). Alleviation of drought stress effects on sunflower (*Helianthus annuus* L.) by exogenous application of brassinosteroids. *Plant Growth Regulation*, 83(2), 267-279.
15. El-Beltagi, H. S., El-Sherif, A. M., & El-Metwally, M. M. (2019). Role of brassinosteroids in improving yield and oil quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under salinity stress. *Plant Growth Regulation*, 88(2), 215-226.
16. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185-212. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_12
17. Gao, S., Wang, Y., Yu, S., Huang, Y., Liu, H., Chen, W., & He, X. (2020). Effects of drought stress on growth, physiology and secondary metabolites of two Adonis species in Northeast China. *Scientia Horticulturae*, 259, 108-795. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108795>
18. Gao, Y., Ma, X., Zhang, Z., Wang, X., & Wang, Y. (2024). Brassinolides signaling pathway: Tandem response to plant hormones and regulation under various abiotic stresses. *Horticulture Advances*, 2(1), 27. <https://doi.org/10.1007/s44281-024-00050-7>
19. García-López, J., Lorite, I. J., García-Ruiz, R., & Domínguez, J. (2014). Evaluation of three simulation approaches for assessing yield of rainfed sunflower in a Mediterranean environment for climate change impact modelling. *Climatic Change*, 124(1), 147-162. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1067-6>
20. Ghasemi, M., Jahanbin, S., Latifmanesh, H., Farajee, H., & Mirshekari, A. (2021). Effect of brassinolide foliar application on some physiological and agronomic characteristics of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under drought stress conditions. *Journal of Crop Production*, 14(1), 31-48. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2021.18084.2339>

21. Ghassemi-Golezani, K., Ghassemi, S., & Zehtab-Salmasi, S. (2018). Changes in essential oil-content and composition of ajowan (*Carum copticum* L.) seeds in response to growth regulators under water stress. *Scientia Horticulturae*, 231, 219-226. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.011>
22. Gholizadeh, A., Ghaffari, M., Payghamzadeh, K., & Kia, S. (2021). Study on relationships between yield and other agronomic traits and identification of the superior hybrids in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Crop Breeding*, 13(37), 171-184. (in Persian with English abstract). <http://doi.org/10.52547/jcb.13.37.171>
23. Hafeez, M. B., Zahra, N., Zahra, K., Raza, A., Batool, A., Shaukat, K., & Khan, S. (2021). Brassinosteroids: Molecular and physiological responses in plant growth and abiotic stresses. *Plant Stress*, 2, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100029>
24. Hajiri, K., & Pazoki, A. (2023). Investigating the role of brassinolide in tolerance to lead toxicity on growth and physiological traits of pinto beans. *Journal of Crop Production*, 16(3), 17-32. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/ejcp.2024.20577.2532>
25. Hamed, M. A., & Abdullah, B. H. (2022). The effect of brassinolide on the yield components, seed and oil yields of some sunflower cultivars. *Journal of Plant Production*, 13(6), 215-218. <https://doi.org/10.21608/JPP.2022.245281>
26. Hassan, A. M., & Mohamed, H. E. (2019). L-arginine pretreatment enhances drought resistance of sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants by increase in polyamines content. *Journal of Plant Growth Regulation*, 38(2), 600-605. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9873-0>
27. Hassanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M. M., Ahmad, S., & Fujita, M. (2015). *Exogenous application of phytoprotectants in legumes against environmental stress*. In Legumes under environmental stress: Yield, improvement and adaptations. pp. 161-197. Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118917091.ch11>
28. Hu, W., Lu, Z., Meng, F., Li, X., Cong, R., Ren, T., & Lu, J. (2020). The reduction in leaf area precedes that in photosynthesis under potassium deficiency: the importance of leaf anatomy. *New Phytologist*, 227(6), 1749-1763. <https://doi.org/10.1111/nph.16644>
29. Huchzermeyer, B., Menghani, E., Khardia, P., & Shilu, A. (2022). Metabolic pathway of natural antioxidants, antioxidant enzymes and ROS providence. *Antioxidants*, 11(4), 761. <https://doi.org/10.3390/antiox11040761>
30. Jaleh, D. (2017). *Metabolic adjustments, assimilate partitioning, and alterations in source-sink relations in drought-stressed plants*. In Photoassimilate distribution in plants and crops: Source-sink relationships. pp. 407-420. Routledge.
31. Johnson, C. M., & Ulrich, A. (1959). Analytical methods for use in plant analysis. *California Agricultural Experiment Station, Bulletin*, 766, 52-78.
32. Karami Borzabad, R., Peykarestan, B., & Baghbani-Arani, A. (2022). The effect of stopping irrigation and using superabsorbent on the morphological, quantitative and qualitative characteristics of sunflower grains. *Journal of Plant Ecophysiology*, 47(13), 32-44. (in Persian with English abstract)
33. Köppen, W. (1936). *Das Geographische System der Klimate*. In W. Köppen, & R. Geiger, eds. *Handbuch der Klimatologie*, Vol. 1, Part C. Gebruder Borntraeger, Berlin.
34. Liu, H., Song, S., Zhang, H., Li, Y., Niu, L., Zhang, J., & Wang, W. (2022). Signaling transduction of ABA, ROS, and Ca²⁺ in plant stomatal closure in response to drought. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(23), 14824. <https://doi.org/10.3390/ijms232314824>
35. 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>
36. Motiei, M. M., Sirousmehr, A. P., Khammari, I., & Naderi, A. (2023). Investigation of the effect of different irrigation regimes on seed yield, antioxidant enzyme activity and some quantitative traits of sunflower cultivars. *Crop Physiology Journal*, 14(55), 5-20. (in Persian with English abstract).
37. Nasser, S. E. D. M., & Sarhan, I. A. (2023, July). Effect of spraying with brassinolide on yield and its components of sesame cultivars. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1213, No. 1, p. 012028). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1213/1/012028>
38. Omid Nasab, D., Meskarbashee, M., & Rahnama Ghahfarokhi, A. (2024). The effect of deficit irrigation on grain yield and some physiological indicators of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 22(1), 71-88. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2023.83198.1258>
39. Omidinasab, D., Meskarbashee, M., & Rahnama Ghahfarokhi, A. (2023). Effect of deficit irrigation on grain yield and quality characteristics of oil content of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(3), 97-108. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.353827.654972>
40. Planas-Riverola, A., Gupta, A., Betegón-Putze, I., Bosch, N., Ibañes, M., & Caño-Delgado, A. I. (2019). Brassinosteroid signaling in plant development and adaptation to stress. *Development*, 146(5), dev151894. <https://doi.org/10.1242/dev.151894>
41. Moradi-Ghahderijani, M., Jafarian, S., & Keshavarz, H. (2017). Alleviation of water stress effects and improved

- oil yield in sunflower by application of soil and foliar amendments. *Rhizosphere*, 4, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2017.06.002>
42. Ravi, V., & Indira, P. (1999). Crop physiology of sweetpotato. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 23, 277-338. <https://doi.org/10.1002/9780470650752.ch6>
43. Ritchie, S. W., & Nguyen, H. T. (1990). Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science*, 30, 105-111. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x>
44. Sheikh Mamo, B., Rahnama, A., & Hassibi, P. (2023). Evaluation of biochemical traits and seed yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars in response to terminal heat stress in Ahvaz, Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 25(3), 275-293. (in Persian with English abstract).
45. Sirohi, G., & Kapoor, M. (2020). *Brassinosteroids in lowering abiotic stress-mediated damages*. In M. Hasanuzzaman, K. Nahar, & M. Fujita (Eds.). *Protective Chemical Agents in the Amelioration of Plant Abiotic Stress: Biochemical and Molecular Perspectives*. pp. 318-326. Wiley. 318-326. <https://doi.org/10.1002/9781119552154.ch15>
46. Talaat, N. B., & Shawky, B. T. (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(2), 518-533. <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9557-y>
47. Tiwari, R. K., Lal, M. K., Kumar, R., Chourasia, K. N., Naga, K. C., Kumar, D., & Zinta, G. (2021). Mechanistic insights on melatonin-mediated drought stress mitigation in plants. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 1212-1226. <https://doi.org/10.1111/ppl.13307>
48. Vahdi, N., & GHolinejad, E. (2015). Evaluation of drought tolerance of some soybean cultivars. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(1), 1-9. (in Persian with English abstract).
49. Vardhini, B. V., & Anjum, N. A. (2015). Brassinosteroids make plant life easier under abiotic stresses mainly by modulating major components of antioxidant defense system. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 67. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00067>
50. Woodson, J. D. (2022). Control of chloroplast degradation and cell death in response to stress. *Trends in Biochemical Sciences*, 47(10), 851-864. <https://doi.org/10.1016/j.tibs.2022.03.010>
51. Yaqoob, U., Jan, N., Raman, P. V., Siddique, K. H., & John, R. (2022). Crosstalk between brassinosteroid signaling, ROS signaling and phenylpropanoid pathway during abiotic stress in plants: Does it exist? *Plant Stress*, 4, 100075. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100075>
52. Yazdandoost Hamedani, M., Ghobadi, M., ghobadi, M. E., Jalali Honarmand, S., & Saeidi, M. (2022). The Effect of foliar application of some chemical compounds on antioxidant enzymes activity and chlorophyll fluorescence of sunflower in different irrigation conditions. *Journal of Crops Improvement*, 24(1), 1-14. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jci.2021.307719.2432>
53. Zhou, R., Yu, X., Ottosen, C. O., Rosenqvist, E., Zhao, L., Wang, Y., & Wu, Z. (2017). Drought stress had a predominant effect over heat stress on three tomato cultivars subjected to combined stress. *BMC Plant Biology*, 17, 24-33. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-0974-x>