

Research Paper

Effects of Salicylic Acid and Absciscic Acid Application on Metabolic Indicators of Drought Stress, Growth, and Yield of Maize

**Mohammad-Sadegh Ghasemzadeh¹, Barmak Jafari Haghighi^{*2}, Hamidreza Miri³,
Hamidreza Ebrahimi⁴, Abdolreza Jafari⁵**

1. Department of Agronomy, Arsanjan Branch, Islamic Azad University, Arsanjan, Iran
2. Department of Agronomy, Arsanjan Branch, Islamic Azad University, Arsanjan, Iran
3. Department of Agronomy, Arsanjan Branch, Islamic Azad University, Arsanjan, Iran
4. Department of Agronomy, Arsanjan Branch, Islamic Azad University, Arsanjan, Iran
5. Department of Biology, Arsanjan Branch, Islamic Azad University, Arsanjan, Iran

ARTICLE INFO

PP: 363-378

Use your device to scan and read
the article online



Keywords: *water stress
abscisic acid salicylic acid
yield antioxidant enzymes*

Abstract

Drought is one of the most important environmental stresses adversely affecting maize growth and production worldwide. Drought stress, particularly under climate change conditions, is considered one of the major constraints on rainfed crop production. During evolution, plants have developed a range of adaptive strategies through which they perceive stress stimuli and respond to stress signals via specific mechanisms. Absciscic acid (ABA) and salicylic acid (SA) are among the most important signaling molecules involved in plant responses to drought and play essential roles in plant growth and development. This experiment was conducted to evaluate the effects of salicylic acid and abscisic acid on the growth and biochemical characteristics of maize under different moisture regimes. The study was carried out using a split-plot design. The main plots consisted of three moisture regimes: (1) full irrigation, equivalent to 100% of the crop water requirement at different growth stages; and (2 and 3) two deficit-irrigation levels equivalent to 75% and 50% of the crop water requirement. The subplots included three treatments: (1) abscisic acid application, (2) salicylic acid application, and (3) an untreated control.

Citation: Ghasemzadeh, M, Jafari Haghighi, B, Miri, H, Ebrahimi, H, and Jafari, A., (2025). **Effects of Salicylic Acid and Absciscic Acid Application on Metabolic Indicators of Drought Stress, Growth, and Yield of Maize.** *Geography (Regional Planning)*, 15(59), 363-378

DOI:10.22034/jgeoq.2026.594459.4514

*** Corresponding author:** Barmak Jafari Haghighi, **Email:** binahayat954@gmail.com

Copyright © 2024 The Authors. Published by Qeshm Institute. This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Extended Abstract

Introduction

Drought stress is a major environmental constraint limiting maize (*Zea mays* L.) growth and productivity worldwide, particularly in arid and semi-arid regions where water scarcity is intensifying under climate change conditions. Maize, being highly susceptible to water deficit, experiences significant reductions in morphological traits, physiological processes, and ultimately grain yield when subjected to inadequate water supply. The oxidative stress triggered by drought disrupts cellular homeostasis, increases reactive oxygen species accumulation, and damages membrane integrity, leading to elevated levels of malondialdehyde (MDA) and electrolyte leakage. While plants have evolved adaptive mechanisms involving signaling molecules such as abscissic acid (ABA) and salicylic acid (SA), the effectiveness of exogenous application of these phytohormones in mitigating drought effects in maize under field conditions remains inadequately understood. This research addresses the critical need to evaluate whether foliar application of ABA and SA can enhance drought tolerance in maize by improving antioxidant defense systems, osmotic adjustment, and photosynthetic efficiency under different water deficit regimes (50%, 75%, and 100% of water requirement).

Methodology

This field experiment was conducted during the 2022-2023 growing season in Takht-e Jamshid, Fars Province, Iran, using a split-plot design with three replications. Main plots consisted of three moisture regimes: full irrigation (100% water requirement), and deficit irrigation at 75% and 50% water requirement. Subplots included three foliar treatments: abscissic acid (50 μM), salicylic acid (140 mg L^{-1}), and untreated control. Treatments were applied twice, 7 and 14 days after drought initiation at the five-leaf stage. Morphological traits (plant height, yield, relative water content), biochemical parameters (chlorophyll, proline, MDA,

soluble proteins, carbohydrates), and antioxidant enzyme activities (SOD, POD, CAT, GR) were measured at the milky stage. Data were analyzed using two-way ANOVA (SPSS v.17.0) with means compared at $p < 0.05$.

Results and discussion

Drought stress significantly reduced plant height, grain yield, and relative water content (RWC) in maize, with the greatest reductions observed under 50% water availability. Plants under severe drought showed 8.7% reduction in height, 30.5% decrease in yield, and 7.9% decline in RWC compared to fully irrigated controls. However, exogenous application of ABA and SA effectively mitigated these adverse effects, with ABA-treated plants achieving the highest values for all growth parameters. Chlorophyll content decreased under drought stress, but foliar application of both phytohormones significantly increased total chlorophyll (a+b) compared to untreated stressed plants. Biochemical analyses revealed that drought stress triggered substantial accumulation of proline (64.5% increase), soluble carbohydrates, and MDA (42.5% increase) as indicators of stress-induced oxidative damage. Notably, ABA and SA applications further enhanced proline accumulation while significantly reducing MDA content, suggesting improved membrane stability. The combined treatments of water deficit with ABA and SA induced the highest activities of antioxidant enzymes including SOD, POD, CAT, and GR, with 50% water availability + SA showing the most pronounced enzyme activities. These enzymatic enhancements correlated with increased soluble protein and carbohydrate concentrations. The findings demonstrate that both ABA and SA function as effective stress-signaling molecules that enhance drought tolerance through multiple mechanisms: osmotic adjustment via proline and carbohydrate accumulation, antioxidant defense system activation, and maintenance of membrane integrity. SA proved particularly effective in carbohydrate metabolism, while ABA showed superior performance in RWC maintenance and yield improvement. These results support the practical application of exogenous phytohormones as a viable strategy for improving maize productivity under

water-limited conditions in semi-arid regions, although the studied hybrid (S.C. 647) showed inherent sensitivity to severe drought stress.

Conclusion

This study demonstrates that drought stress significantly impairs maize growth, yield, and physiological performance through oxidative damage and reduced water status. However, exogenous foliar application of abscisic acid (ABA) and salicylic acid (SA) effectively alleviates these adverse effects by enhancing the plant's defensive mechanisms. Both phytohormones increased antioxidant enzyme activities (SOD, POD, CAT, GR), promoted osmotic adjustment through elevated proline and soluble carbohydrate accumulation, and reduced oxidative stress markers such as MDA. These biochemical improvements translated into better plant height, relative water content, chlorophyll maintenance, and ultimately higher grain yields under deficit irrigation conditions. ABA showed superior effects on yield and water retention, while SA demonstrated pronounced benefits in carbohydrate metabolism and antioxidant enzyme activation. The combined application with moderate deficit irrigation (75% water requirement) proved most effective, suggesting that integrating phytohormone application with regulated deficit irrigation offers a practical strategy for sustainable maize production in water-limited environments. However, the tested hybrid S.C. 647 exhibited low intrinsic drought tolerance, emphasizing the need for genotype-specific recommendations. Future research should explore optimal application timing and potential synergistic effects of combined ABA and SA treatments under field conditions.

References

1. Zeinoddini Mymand, A., Bagheri Bodaghabadi, M., Moghimi, E., Navidi, M. N., Ebrahimi Mymand, F., & Amirpour, M. (2018). Modeling yield and ranking of land characteristics for maize cultivation based on artificial neural network and regression models in southern Iran. *Desert*, 23, 85–95.
2. Shami, R., Wang, R., Gheith, A. S. M. S., Hossain, H. A., Hossain, S., Irfan, M., et al. (2021). Effects of salicylic acid, zinc, and glycine betaine on morpho-physiological growth and yield of maize under drought stress. *Scientific Reports*, 11, 3195.
3. Farré, A., van Oijen, M., Leffelaar, P. A., & Faci, J. M. (2000). Growth analysis of maize under different irrigation strategies in northeastern Spain. *European Journal of Agronomy*, 12, 225–238.
4. Nayar, H., & Gupta, D. (2006). Differential sensitivity of C3 and C4 plants to water deficit stress and its relationship with oxidative stress and antioxidants. *Environmental and Experimental Botany*, 58, 106–113.
5. Yang, X., Chen, X., Ge, Q., Li, B., Tong, Y., Zhang, A., Li, Z., Kuang, T., & Lu, C. (2006). Photosynthetic tolerance to photoinhibition, high temperature, and drought stress in flag leaf of wheat: Comparison of a hybrid line with its parents under field conditions. *Plant Science*, 171, 389–397.
6. Smirnov, N. (1998). Plant resistance to environmental stresses. *Current Opinion in Biotechnology*, 9, 214–219.
7. Wang, W., Vinocur, B., & Altman, A. (2003). Plant responses to drought, salinity, and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 218, 1–14.
8. Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2006). Gene networks involved in drought stress response and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 58, 221–227.
9. Kong, H., Zhang, Z., & Qin, J. (2021). Interactive effects of abscisic acid and drought stress on physiological responses of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Pakistan Journal of Botany*, 53, 1545–1551.
10. Wei, L., Wang, L., Yang, Y., Wang, P., Guo, T., & Kang, G. (2015). Abscisic acid enhances drought tolerance of wheat seedlings and regulates transcript levels of genes encoding ascorbate-glutathione biosynthesis pathway. *Frontiers in Plant Science*, 6.
11. Jiang, M., & Zhang, J. (2002). Water stress-induced abscisic acid accumulation triggers increased production of reactive oxygen species and enhances antioxidant enzyme activity in maize leaves. *Journal of Experimental Botany*, 53, 2401–2410.
12. Blanchard, M. G., Newton, L. A., Runkle, E., Woolard, D., & Campbell, S. (2007). Exogenous abscisic acid application improves postharvest drought tolerance

13. in several annual ornamental plants. *Acta Horticulturae*, 755, 127–132.
14. Yadgari, L. Z., Heidari, R., Rahmani, F., & Khara, J. (2014). Induction of drought tolerance in tomato through foliar application of abscisic acid and sulfonamide compounds. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 10, 327–334.
15. Hayat, Q., Hayat, S., Alyemeni, M., & Ahmad, A. (2012). Salicylic acid-mediated changes in growth, photosynthesis, nitrogen metabolism, and antioxidant defense system of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Plant, Soil and Environment*, 58, 417–423.
16. Sharma, M., Gupta, S. K., Majumder, B., Maurya, V. K., Deeba, F., Alam, A., et al. (2017). Salicylic acid-mediated growth, physiological, and proteomic responses in two wheat varieties under drought stress. *Journal of Proteomics*, 163, 28–51.
17. Alam, P., Balawi, T. A., & Faizan, M. (2022). Effect of salicylic acid on growth, photosynthesis, and antioxidant enzyme activity of wheat (*Triticum aestivum*) under salinity stress. *Molecules*, 28.
18. Tuteja, N. (2007). Absciscic acid and abiotic stress signaling. *Plant Signaling & Behavior*, 2, 135–138.
19. Arnon, D. A. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24, 1–15.
20. Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205–207.
21. Shi, D. M., Liu, W. S., Yang, G. D., Wu, S. A., & Zheng, S. S. (2010). Seed-specific overexpression of antioxidant genes in *Arabidopsis* enhances tolerance to oxidative stress during germination and early seedling growth stages. *Plant Biotechnology Journal*, 8, 796–806.
22. Maehly, A. C. (1954). Assay of catalase and peroxidase activities. *Methods of Biochemical Analysis*, 357–424.
23. Efeoğlu, B., Ekmekçi, Y., & Çiçek, N. (2009). Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery after stress. *South African Journal of Botany*, 75, 34–42.
24. Yavas, A., & Unay, A. (2016). Effect of zinc and salicylic acid on wheat under drought stress. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 26, 1012–1018.
25. Ge, T., Sui, F., Bai, L., Tong, C., & Sun, N. (2012). Effects of water stress on growth, biomass allocation, and water use efficiency of summer maize (*Zea mays* L.) throughout the growth cycle. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34, 1043–1053.
26. Miller, G., Suzuki, N., Ciftci-Yilmaz, S., & Mittler, R. (2010). Reactive oxygen species homeostasis and signaling during drought and salinity stresses. *Plant, Cell & Environment*, 33, 453–467.
27. Kirkham, M. B. (1983). Effect of abscisic acid on water relations of winter wheat cultivars with different drought resistance levels. *Physiologia Plantarum*, 59, 153–157.
28. Hongbo, S., Zongsuo, L., & Mingan, S. (2006). Osmotic regulation of 10 wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under soil water deficit. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 47, 132–139.
29. Riccardi, F., Gazeau, P., de Vienne, D., & Zivy, M. (1998). Protein changes in response to progressive water deficit in maize: Quantitative changes and polypeptide identification. *Plant Physiology*, 117, 1253–1263.
30. Tida, G., Fangong, S., & Liping, B. (2006). Effect of water stress on protective enzyme activities and lipid peroxidation in roots and leaves of summer maize. *Agricultural Sciences in China*, 5, 291–298.

مقاله پژوهشی

شاخص‌های متابولیکی تنش خشکی بر رشد و عملکرد ذرت در اثر کاربرد اسید

سالیسیلیک و اسید آبسزیک

محمدصادق قاسم زاده - گروه آگرونومی، واحد ارسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، ارسنجان، ایران

برمک جعفری حقیقی* - گروه آگرونومی، واحد ارسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، ارسنجان، ایران

حمیدرضا میری - گروه آگرونومی، واحد ارسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، ارسنجان، ایران

حمیدرضا ابراهیمی - گروه آگرونومی، واحد ارسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، ارسنجان، ایران

عبدالرضا جعفری - گروه زیست شناسی، واحد ارسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، ارسنجان، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که رشد و تولید ذرت را در سراسر جهان تحت تأثیر منفی قرار می‌دهد. تنش خشکی، به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم، یکی از محدودیت‌های اصلی تولید محصولات کشاورزی دیم به شمار می‌رود. گیاهان طی فرایند تکامل، مجموعه‌ای از راهبردهای سازگاری را توسعه داده‌اند که از طریق آن‌ها محرک‌های تنش‌زا را درک کرده و با سازوکارهای اختصاصی به این پیام‌های تنش‌ی پاسخ می‌دهند. اسید آبسزیک (ABA) و اسید سالیسیلیک (SA) از مهم‌ترین مولکول‌های پیام‌رسان در پاسخ گیاهان به خشکی محسوب می‌شوند و نقش اساسی در رشد و نمو گیاه دارند. این آزمایش با هدف ارزیابی تأثیر اسید سالیسیلیک و اسید آبسزیک بر ویژگی‌های رشدی و بیوشیمیایی ذرت در رژیم‌های مختلف رطوبتی انجام شد. پژوهش در قالب طرح کرت‌های خردشده اجرا گردید؛ به‌طوری‌که کرت اصلی شامل سه سطح رژیم رطوبتی بود: ۱. آبیاری کامل، معادل ۱۰۰ درصد آب مصرفی موردنیاز گیاه در مراحل مختلف رشد؛ ۲ و ۳. دو سطح آبیاری کمبود، معادل ۷۵ و ۵۰ درصد آب مصرفی. کرت فرعی نیز شامل سه تیمار بود: ۱. کاربرد اسید آبسزیک؛ ۲. کاربرد اسید سالیسیلیک؛ و ۳. تیمار شاهد. تنش آبی موجب کاهش ارتفاع بوته و عملکرد ذرت شد؛ اما میزان پروتئین‌های محلول، کربوهیدرات‌های محلول، پرولین و مالون‌دی‌آلدئید (MDA) را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. محلول‌پاشی اسید آبسزیک و اسید سالیسیلیک نیز سبب افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته، عملکرد و میزان پرولین شد. غلظت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در تیمارهای ترکیبی دسترسی ۷۵ و ۵۰ درصدی به آب همراه با کاربرد ABA و SA، در مقایسه با سایر تیمارها، افزایش یافت	شماره صفحات: ۳۶۳-۳۷۸ از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید 

واژه‌های کلیدی:

تنش آبی، اسید آبسزیک، اسید سالیسیلیک، عملکرد، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، پروتئین دهیدرین، کربوهیدرات.

استناد: قاسم زاده، محمدصادق، جعفری حقیقی، برمک، میری، حمیدرضا، ابراهیمی، حمیدرضا و جعفری، عبدالرضا. (۱۴۰۴). شاخص‌های متابولیکی تنش خشکی بر رشد و عملکرد ذرت در اثر کاربرد اسید سالیسیلیک و اسید آبسزیک. فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای)، ۱۵ (۵۹)، ۳۶۳-۳۷۸

DOI:10.22034/jgeoq.2026.594459.4514

مقدمه

ذرت (*Zea mays L.*) یکی از مهم‌ترین غلات است که در سراسر جهان به‌طور گسترده برای تغذیه انسان و دام، تولید سوخت زیستی و به‌عنوان ماده اولیه در صنایع کشت می‌شود. در ایران، سطح زیر کشت ذرت در سال زراعی ۲۰۱۵-۲۰۱۴ حدود ۱۶۶ هزار هکتار بود که ۴۶/۱ درصد از کل سطح محصولات زراعی و ۰۳/۲ درصد از کل عملکرد غلات کشور را به خود اختصاص می‌داد (۱). در این مناطق، ذرت معمولاً پس از گندم کشت می‌شود. به نظر می‌رسد ذرت دومین گیاه زراعی مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران باشد. کمبود بارندگی و محدودیت منابع آب در این مناطق، کشت ذرت را با چالش‌هایی مواجه کرده است؛ زیرا گزارش شده است که این گیاه حساسیت زیادی به خشکی دارد (۲) تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده عملکرد ذرت در محیط‌های خشک، نیمه‌خشک و اراضی دیم نیمه‌مرطوب است (۳). تنش خشکی و تنش اکسیداتیو اغلب با یکدیگر ارتباط دارند و می‌توانند بسیاری از فرایندهای متابولیکی و فیزیولوژیکی را مختل کنند. از جمله این اختلالات می‌توان به افزایش تنش اکسیداتیو، برهم خوردن هم‌ایستایی و توزیع یون‌ها در سلول‌ها و تغییر در فلورسانس کلروفیل اشاره کرد که در نهایت موجب کاهش رشد، عملکرد و کیفیت محصول می‌شوند (۴، ۵). تنش اکسیداتیو همچنین می‌تواند موجب دنا توره شدن پروتئین‌های عملکردی و ساختمانی شود. (۶) در نتیجه، تنش‌های آبی اغلب موجب فعال شدن پاسخ‌های سلولی مختلفی می‌شوند که از جمله آن‌ها می‌توان به تولید گونه‌های فعال اکسیژن یا ROS، تولید پروتئین‌های تنشی، افزایش بیان یا فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تجمع مواد محلول سازگار اشاره کرد (۷، ۸). برای کاهش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط تنش خشکی، یک سامانه حفاظتی آنزیمی در گیاهان فعال می‌شود. آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی شامل سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT) و گلوکاتایون ردوکتاز (GR) هستند. این آنزیم‌ها می‌توانند رادیکال‌های آزاد اضافی را حذف کرده، از تجمع آن‌ها در گیاه جلوگیری کنند و تحمل گیاهان به خشکی را افزایش دهند. (۹) اسید آسزیک گیاهی (ABA) یکی از هورمون‌های کلیدی دخیل در تنظیم پاسخ به تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی، شوری و دمای پایین است. این هورمون مجموعه‌ای از عملکردهای گیاهی را هماهنگ می‌کند و گیاه را قادر می‌سازد با شرایط تنش‌زا مقابله کند (۱۰). افزایش سطح درون‌زاد ABA موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شده و به حفظ تعادل میان تولید گونه‌های فعال اکسیژن و سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی کمک می‌کند (۱۱). اسید آسزیک از طریق فعال کردن سازوکار دفاع آنتی‌اکسیدانی در گیاهچه‌های ذرت تحت کمبود آب، آسیب‌های اکسیداتیو را کاهش می‌دهد. (۱۱) مطالعات نشان داده‌اند که کاربرد خارجی ABA می‌تواند تحمل به خشکی را در برخی گونه‌های گیاهی افزایش دهد (۱۲، ۱۳). تیمار با ABA می‌تواند با تحریک فعالیت یا افزایش میزان بیان بسیاری از ترکیبات و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، مانند گلوکاتایون (GSH) و آسکوربات (ASA)، تجمع گونه‌های فعال اکسیژن را کاهش داده و تحمل گندم به تنش‌های غیرزیستی را افزایش دهد. (۱۰)

اسید سالیسیلیک (SA) یک فیتوهورمون فنولی است که می‌تواند طیف گسترده‌ای از پاسخ‌های متابولیکی را در گیاهان ایجاد کند. این هورمون همچنین بر شاخص‌های فتوسنتزی و روابط آبی گیاه، به‌ویژه در مدیریت و مقابله با تنش، تأثیر می‌گذارد (۱۴). شارما و همکاران (۱۵) پیشنهاد کردند که SA به‌طور چشمگیری تحمل به خشکی را افزایش می‌دهد و می‌توان از آن برای افزایش و تثبیت تولید محصولات زراعی در شرایط تنش استفاده کرد. اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک مولکول پیام‌رسان عمل کرده و با فعال‌سازی عملکردهای آنزیمی، پاسخ گیاه به تنش‌های غیرزیستی را تحریک می‌کند. آسیب اکسیداتیوی که در شرایط تنش‌زا و بر اثر افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن در گیاه ایجاد می‌شود، با کاربرد خارجی SA کاهش می‌یابد (۱۶). در نخود (*Cicer arietinum L.*) کاربرد برون‌زاد SA نه تنها موجب افزایش زیست‌توده و فتوسنتز می‌شود، بلکه فعالیت آنزیم‌های مرتبط با حذف گونه‌های فعال اکسیژن، از جمله سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز (APX) و کاتالاز را نیز تحریک می‌کند (۱۴) اهمیت ABA و SA در پاسخ گیاهان به تنش، به‌طور گسترده بررسی و مرور شده است (۱۷). پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش تیمارهای اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک در بهبود تحمل ذرت به خشکی، تحت سطوح مختلف تنش آبی و بر

مبنای تغییرات رشد، عملکرد و شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی طراحی شد. فرض بر این بود که کاربرد جداگانه و برون‌زاد SA و ABA، از طریق افزایش کارایی فتوسنتز و فعال‌سازی سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی ذرت، تحمل این گیاه به خشکی را بهبود می‌بخشد.

مواد و روش‌ها

طرح آزمایشی، شرایط رشد گیاه و تیمارها

به منظور ارزیابی تأثیر اسید آسزیک (ABA) و اسید سالیسیلیک (SA) بر ویژگی‌های زراعی و بیوشیمیایی ذرت علوفه‌ای هیبرید سینگل کراس S.C.647 در رژیم‌های مختلف رطوبتی، آزمایشی در سال زراعی ۲۰۲۲-۲۰۲۳ در یک مزرعه کشاورزی واقع در منطقه تخت جمشید استان فارس، در فاصله ۶۰ کیلومتری شهر شیراز، اجرا شد. محل آزمایش در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۵ دقیقه شمالی و در ارتفاع ۱۷۷۰ متری از سطح دریا قرار داشت. این مطالعه در قالب طرح کرت‌های خردشده اجرا شد. کرت‌های اصلی شامل سه سطح رژیم رطوبتی بودند:

۱. آبیاری کامل، معادل ۱۰۰ درصد آب موردنیاز گیاه در مراحل مختلف رشد؛
۲. آبیاری کمبود، معادل ۷۵ درصد آب موردنیاز گیاه در مراحل مختلف رشد؛
۳. آبیاری کمبود، معادل ۵۰ درصد آب موردنیاز گیاه در مراحل مختلف رشد.

کرت‌های فرعی نیز شامل تیمارهای زیر بودند:

۱. کاربرد اسید آسزیک؛
۲. کاربرد اسید سالیسیلیک؛
۳. تیمار شاهد، بدون کاربرد ABA و SA.

پس از تسطیح زمین، کرت‌هایی با ابعاد $5/3 \times 75$ متر ایجاد شد. هر کرت دارای پنج ردیف کاشت بود. فاصله میان ردیف‌های کاشت ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف ۱۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بذر به صورت دستی و در عمق ۳ تا ۵ سانتی‌متری خاک کشت شدند. بلافاصله پس از کاشت، مزرعه آبیاری شد تا نیم‌رخ رطوبتی خاک در تمام تیمارها به حد اشباع برسد و شرایط لازم برای جوانه‌زنی آسان و سریع بذر فراهم شود. اعمال تیمارهای رژیم رطوبتی از مرحله پنج‌برگی ذرت آغاز شد و تا پایان دوره رشد ادامه یافت. برای تعیین میزان رطوبت خاک در زمان آبیاری (R)، میزان رطوبت خاک در ظرفیت زراعی (FC)، رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) و آب قابل دسترس محاسبه شد. ضریب آب قابل استفاده یا قابل تخلیه (a) برای ذرت برابر با ۵/۰ در نظر گرفته شد. آب قابل دسترس (AW) از اختلاف میان رطوبت ظرفیت زراعی و رطوبت نقطه پژمردگی دائم به دست آمد:

$$AW = FC - PWP$$

$$R = FC - (a \times AW) \quad (2)$$

محلول‌پاشی در دو نوبت، یعنی ۷ و ۱۴ روز پس از آغاز اعمال تنش خشکی انجام شد (۲، ۱۸). اسید سالیسیلیک با غلظت ۱۴۰ میلی‌گرم در لیتر و اسید آسزیک با غلظت ۵۰ میکرومولار محلول‌پاشی شدند. برای افزایش حلالیت اسید سالیسیلیک در آب، از اتانول با نسبت ذکرشده در متن اصلی، یعنی یک گرم به ازای هر ۱۰ میلی‌گرم، استفاده شد. (14)

اندازه‌گیری صفات ریخت‌شناختی گیاه و محتوای نسبی آب

محصول در مرحله شیری دانه‌ها به صورت دستی برداشت شد. از هر کرت، ۲۰ بوته به طور کاملاً تصادفی انتخاب و صفات ریخت‌شناختی شامل ارتفاع بوته و عملکرد ذرت اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ، نمونه‌ها پس از تعیین وزن تر (FW)، به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر، در تاریکی و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا به حالت اشباع برسند. پس از خارج کردن برگ‌ها از آب مقطر و حذف رطوبت اضافی سطح آن‌ها، وزن اشباع نمونه‌ها (SW) اندازه‌گیری شد. سپس

نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰.۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا وزن خشک آن‌ها (DW) تعیین شود. در نهایت، محتوای نسبی آب برگ (RWC) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد: (15)

$$RWC (\%) = [(FW - DW) / (SW - DW)] \times 100$$

که در آن، FW وزن تر، SW وزن اشباع و DW وزن خشک نمونه است.

محتوای کلروفیل

برای اندازه‌گیری غلظت کلروفیل‌های a و b در طول دوره رشد و پیش از آبیاری، چند برگ از هر یک از کرت‌های شاهد و تحت تنش جدا شد و یک گرم نمونه تازه از بخش میانی برگ‌ها تهیه گردید. برای استخراج کلروفیل، هر نمونه تازه همراه با استون ۸۰ درصد در هاون چینی ساییده شد. محلول حاصل چندین مرتبه از کاغذ صافی عبور داده شد تا بقایای نمونه برگ کاملاً بی‌رنگ شوند. سپس حجم محلول به دست آمده با استفاده از استون ۸۰ درصد به ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. چگالی نوری عصاره برگ با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر قرائت شد. (18) برای محاسبه غلظت کلروفیل‌های a و b از روابط زیر استفاده شد:

محتوای کلروفیل a، بر حسب میلی‌گرم بر گرم بافت:

$$\text{Chlorophyll a} = [(12.7 \times D663) - (2.69 \times D645)] \times V / (1000 \times W)$$

محتوای کلروفیل b، بر حسب میلی‌گرم بر گرم بافت:

$$\text{Chlorophyll b} = [(22.9 \times D645) - (4.69 \times D663)] \times V / (1000 \times W)$$

در این روابط، V حجم محلول استخراج‌کننده بر حسب سانتی‌متر مکعب و W وزن برگ تازه بر حسب میلی‌گرم است D645. و D663 نیز به ترتیب چگالی نوری عصاره در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر هستند.

محتوای پرولین

محتوای پرولین گیاهان تحت تنش خشکی و گیاهان آبیاری شده به عنوان شاهد، با استفاده از روش بیتس و همکاران (۱۹) اندازه‌گیری شد. پرولین از ۵۰ میلی‌گرم نمونه تازه برگ استخراج گردید. جذب نوری عصاره نمونه با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر تعیین شد. غلظت پرولین با استفاده از منحنی استاندارد و بر حسب میکرومول بر گرم وزن خشک محاسبه گردید.

محتوای مالون‌دی‌آلدئید

برای انجام اندازه‌گیری‌های فیزیولوژیکی، نمونه‌هایی با وزن مساوی، معادل ۵/۰ گرم، در نیتروژن مایع همگن شدند. میزان مالون‌دی‌آلدئید (MDA) با استفاده از روش تیوباربیتوریک اسید (TBA)، مطابق روش چالماک و هورست (۱۹۹۱) و با اندکی تغییر اندازه‌گیری شد.

به‌طور خلاصه، ۵۰ میلی‌گرم بافت برگ با ۱۰ میلی‌لیتر بافر فسفات با pH برابر ۸/۷ همگن شد. سپس عصاره حاصل با ۲ میلی‌لیتر محلول ۶/۰ درصد TBA تهیه شده در تری‌کلرواستیک اسید ۱۰ درصد (TCA) مخلوط گردید. عصاره به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد انکوبه و پس از آن به سرعت روی یخ سرد شد. پس از سانتریفیوژ نمونه‌ها با شتاب $5000 \times g$ به مدت ۲۰ دقیقه، جذب نوری محلول رویی در طول موج‌های ۴۵۰، ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. مقدار کمپلکس MDA-TBA با استفاده از ضریب خاموشی مولی برابر با $155 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ تعیین گردید.

سنجش فعالیت آنزیم‌ها

برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، ۵/۰ گرم از برگ‌های تازه به‌طور کامل در نیتروژن مایع ساییده شد. سپس ۵ میلی‌لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار از پیش سرد شده با pH برابر ۸/۷، حاوی یک درصد پلی‌وینیل‌پیرولیدون، به نمونه افزوده شد تا همگن‌سازی کامل انجام شود. محلول همگن شده به‌طور کامل تکان داده شد و به مدت یک ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد

استخراج گردید. پس از سانتیفریوژ با شتاب $\times g 12000$ ، در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۰ دقیقه، محلول رویی جمع‌آوری و در بخش‌های جداگانه تقسیم شد. نمونه‌ها برای اندازه‌گیری پراکسید هیدروژن و سنجش فعالیت آنزیم‌ها در دمای منفی ۲۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. (۱۹،۲۰)

فعالیت پراکسیداز

فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD) بر اساس روش ماچلی و چنس (۲۱) و با اندکی تغییر اندازه‌گیری شد. در این روش، گایاکول به عنوان سوبسترا و حجم نهایی مخلوط واکنش برابر با ۳ میلی‌لیتر در نظر گرفته شد. مخلوط واکنش شامل بافر فسفات ۲۰۰ میلی‌مولار با pH برابر ۶، گایاکول یک درصد، پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد و عصاره آنزیمی بود. افزایش جذب نوری ناشی از اکسیدشدن گایاکول در طول موج ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. یک واحد فعالیت POD به صورت میزان تغییری تعریف شد که طی یک دقیقه، تغییر ۰/۱ واحدی در چگالی نوری در طول موج ۴۷۰ نانومتر ایجاد کند.

فعالیت کاتالاز

فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و مطابق روش اکینچی و همکاران (۲۰۲۰) اندازه‌گیری شد. مخلوط واکنش شامل ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی و پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد در بافر فسفات ۱۵۰ میلی‌مولار با pH برابر ۷ بود. فعالیت CAT با بررسی کاهش جذب نوری پراکسید هیدروژن در طول موج ۲۴۰ نانومتر برآورد شد. نتایج با استفاده از ضریب خاموشی مولی $39.4 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ و برحسب میلی‌مول پراکسید هیدروژن تجزیه‌شده در دقیقه به ازای هر میلی‌گرم پروتئین بیان شدند.

فعالیت سوپراکسید دیسموتاز

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) با اندازه‌گیری توانایی این آنزیم در مهار احیای فتوشیمیایی نیتروبلو تترازولیوم (NBT)، مطابق روش بیچامپ و فریدویچ (۱۹۷۱)، تعیین شد. مخلوط واکنش شامل بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار با pH برابر ۸/۷، ریوفلاوین ۲۰ میکرومولار، NBT با غلظت ۷۵ میلی‌مولار، متیونین ۱۳ میلی‌مولار و EDTA با غلظت ۱/۰ میلی‌مولار بود. مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه در معرض نور دو لامپ فلورسنت قرار گرفت. سپس جذب نوری آن در طول موج ۵۶۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر فرابنفش - مرئی اندازه‌گیری شد.

فعالیت گلوتاتیون ردوکتاز

فعالیت گلوتاتیون ردوکتاز (GR) از طریق پایش اکسیداسیون NADPH در طول موج ۳۴۰ نانومتر، با ضریب خاموشی مولی $6.2 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ و طی مدت سه دقیقه اندازه‌گیری شد. یک میلی‌لیتر از مخلوط سنجش شامل بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار با pH برابر ۸/۷، Na_2EDTA با غلظت ۲ میلی‌مولار، NADPH با غلظت ۱۵/۰ میلی‌مولار، گلوتاتیون اکسیدشده یا GSSG با غلظت ۵/۰ میلی‌مولار و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. واکنش با افزودن NADPH آغاز شد. تصحیحات لازم برای جذب زمینه‌ای در طول موج ۳۴۰ نانومتر، با استفاده از نمونه فاقد NADPH، انجام گرفت. (21)

محتوای پروتئین محلول

میزان پروتئین محلول با استفاده از روش آبی درخشان کوماسی، بر اساس روش برادفورد (۱۹۷۶)، اندازه‌گیری شد. مقدار ۵/۰ گرم بافت برگ با ۱۰ میلی‌لیتر بافر فسفات با pH برابر ۸/۷ همگن گردید. سپس عصاره حاصل به ۹/۲ میلی‌لیتر مخلوط واکنش حاوی ۱/۰ گرم کوماسی بریلیانت بلو G-250، مقدار ۵۰ میلی‌لیتر اتانول ۹۵ درصد و ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید فسفریک ۸۵ درصد وزنی - حجمی افزوده شد. پس از دو دقیقه واکنش، جذب نوری محلول رویی در طول موج ۵۹۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. مقدار پروتئین موجود در نمونه با استفاده از منحنی استاندارد آلبومین سرم گاوی تعیین گردید.

کربوهیدرات‌های محلول

مقدار ۱/۰ میلی لیتر از عصاره الکلی با سه میلی لیتر معرف تازه تهیه شده آنترون مخلوط شد. معرف آنترون از حل کردن ۱۵۰ میلی گرم آنترون در ۱۰۰ میلی لیتر اسید سولفوریک ۷۲ درصد تهیه شده بود. محلول حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب جوش قرار داده شد تا واکنش انجام شده و رنگ تشکیل شود. سپس جذب نوری محلول با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر فرابنفش - مرئی مدل Lambda 25 در طول موج ۶۲۵ نانومتر قرائت و مقدار قندهای محلول محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل آماری

تمامی تجزیه و تحلیل های آماری با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۱۷.۰ و بر اساس تجزیه واریانس دوطرفه انجام شد. تفاوت میان تیمارها در سطح احتمال $p < 0.05$ معنی دار در نظر گرفته شد. پیش از انجام تجزیه واریانس، نرمال بودن توزیع داده ها با استفاده از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف و همگنی واریانس ها با استفاده از آزمون بارتلت بررسی شد.

نتایج

ارتفاع بوته، عملکرد ذرت و محتوای نسبی آب

اثرات مستقل رژیم های آبیاری (I) و کاربرد اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک (F) بر ارتفاع بوته، عملکرد ذرت و محتوای نسبی آب برگ (RWC) معنی دار بود:
ارتفاع بوته:

$$I: F_{2,8} = 16.4, p < 0.05$$

$$F: F_{2,8} = 8.7, p < 0.05$$

عملکرد ذرت

$$I: F_{2,8} = 22, p < 0.05$$

$$F: F_{2,8} = 8.7, p < 0.05$$

محتوای نسبی آب برگ

$$I: F_{2,8} = 11.78, p < 0.05$$

$$F: F_{2,8} = 8.31, p < 0.05$$

بالین حال، اثر متقابل رژیم آبیاری و کاربرد اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک ($I \times F$) بر این صفات معنی دار نبود:
ارتفاع بوته

$$I \times F: F_{4,8} = 0.1, p > 0.05$$

عملکرد ذرت

$$I \times F: F_{4,8} = 0.01, p > 0.05$$

محتوای نسبی آب برگ

$$I \times F: F_{4,8} = 1.5, p > 0.05$$

آبیاری بر مبنای ۵۰ درصد آب قابل دسترس، یعنی تیمار I3، در مقایسه با شرایط بدون تنش و آبیاری ۱۰۰ درصد، موجب کاهش معنی دار ارتفاع بوته، عملکرد ذرت و محتوای نسبی آب برگ شد. میانگین ارتفاع بوته، عملکرد ذرت و محتوای نسبی آب برگ در

رژیم‌های مختلف رطوبتی در جدول ۱ ارائه شده است. کاربرد اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک موجب افزایش چشمگیر این شاخص‌ها شد. میانگین ارتفاع بوته، عملکرد و محتوای نسبی آب برگ ذرت تحت کاربرد اسید آسزیک و اسید سالیسیلیک در جدول ۲ نشان داده شده است.

محتوای کلروفیل

محتوای کلروفیل کل، شامل مجموع کلروفیل‌های a و b ، در برگ‌های ذرت به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل رژیم‌های آبیاری (I) و کاربرد اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک (F) قرار گرفت:

$$I \times F: F_{4,8} = 4.3, p < 0.05$$

در رژیم‌های آبیاری معادل ۵۰ و ۷۵ درصد آب قابل‌دسترس، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک موجب افزایش معنی‌دار محتوای کلروفیل کل $a+b$ شد. میانگین محتوای کلروفیل $a+b$ در تیمارهای کاربرد اسید آسزیک و اسید سالیسیلیک در جدول ۳ ارائه شده است.

محتوای پرولین و مالون‌دی‌آلدئید

محتوای پرولین و مالون‌دی‌آلدئید به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر مستقل رژیم‌های آبیاری (I) و کاربرد اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک (F) قرار گرفت:

پرولین

$$I: F_{2,8} = 17.53, p < 0.05$$

$$F: F_{2,8} = 8.7, p < 0.05$$

مالون‌دی‌آلدئید

$$I: F_{2,8} = 3.29, p < 0.05$$

$$F: F_{2,8} = 8.7, p < 0.05$$

بالاین‌حال، اثر متقابل رژیم آبیاری و کاربرد هورمون‌ها بر این دو شاخص تنش معنی‌دار نبود:

پرولین

$$I \times F: F_{4,8} = 0.02, p > 0.05$$

مالون‌دی‌آلدئید

$$I \times F: F_{4,8} = 0.015, p > 0.05$$

بیشترین میزان پرولین در برگ‌های ذرت، در مقایسه با تیمار شاهد، تحت تیمارهای ABA و SA مشاهده شد. میانگین مقادیر پرولین و مالون‌دی‌آلدئید در شرایط کاربرد اسید آسزیک و اسید سالیسیلیک در جدول ۵ ارائه شده است. تنش آبی در سطوح دسترسی ۵۰ و ۷۵ درصدی به آب، در مقایسه با شرایط دسترسی ۱۰۰ درصدی به آب، موجب افزایش معنی‌دار محتوای مالون‌دی‌آلدئید در برگ‌های ذرت شد. میانگین محتوای پرولین و مالون‌دی‌آلدئید در رژیم‌های مختلف رطوبتی در جدول ۴ ارائه شده است.

فعالیت آنزیم‌ها

هر چهار آنزیم آنتی‌اکسیدانی بررسی شده، به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل رژیم‌های آبیاری (I) و کاربرد اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک (F) قرار گرفتند:

پراکسیداز

$$\text{POD: I} \times \text{F: } F_{4,8} = 5.28, p < 0.05$$

کاتالاز

$$\text{CAT: I} \times \text{F: } F_{4,8} = 31.6, p < 0.05$$

سوپراکسید دیسموتاز

$$\text{SOD: I} \times \text{F: } F_{4,8} = 35.4, p < 0.05$$

گلوتاتیون ردوکتاز

$$\text{GR: I} \times \text{F: } F_{4,8} = 22.2, p < 0.05$$

در شرایط دسترسی ۵۰ درصدی به آب همراه با کاربرد ABA و SA، فعالیت آنزیم‌های POD، CAT، SOD و GR در برگ‌های ذرت، در مقایسه با سایر ترکیب‌های تیماری، به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. میانگین فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و گلوتاتیون ردوکتاز به‌همراه خطای استاندارد، در برگ‌های ذرت و تحت ترکیب سه رژیم رطوبتی و سه وضعیت کاربرد هورمون، در شکل ۱ نشان داده شده است.

پروتئین کل محلول و کربوهیدرات‌ها

اثر متقابل رژیم‌های آبیاری (I) و کاربرد اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک (F) بر میزان پروتئین کل محلول و کربوهیدرات‌ها معنی‌دار بود:

پروتئین محلول

$$\text{Pro: I} \times \text{F: } F_{4,8} = 4.77, p < 0.05$$

کربوهیدرات محلول

$$\text{Carb: I} \times \text{F: } F_{4,8} = 3.56, p < 0.05$$

میزان پروتئین کل محلول و کربوهیدرات‌ها در شرایط دسترسی ۵۰ و ۷۰ درصدی به آب همراه با کاربرد اسید سالیسیلیک، در مقایسه با سایر ترکیب‌های تیماری، به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. میانگین غلظت پروتئین و کربوهیدرات‌ها به‌همراه خطای استاندارد، در برگ‌های ذرت و تحت ترکیب سه رژیم رطوبتی و سه وضعیت کاربرد هورمون، در شکل ۲ ارائه شده است.

بحث

تنش‌های محیطی مانند خشکی، دسترسی گیاه به آب را کاهش می‌دهند و در نتیجه، بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیکی و متابولیکی، از جمله سوخت‌وساز کربوهیدرات‌ها و نیتروژن، ساختار پروتئین‌ها و فعالیت آنزیم‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در پژوهش حاضر، رشد و عملکرد ذرت تحت تنش خشکی کاهش یافت؛ باین‌حال، کاربرد برون‌زاد اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک تا حدودی آثار ناشی از کمبود آب را جبران کرد و از طریق ایجاد تغییرات بیوشیمیایی در گیاهان ذرت، موجب بهبود شاخص‌های رشد شد. در مطالعه حاضر، صفات ریخت‌شناختی مانند ارتفاع بوته، عملکرد ذرت و محتوای نسبی آب برگ تحت شرایط دسترسی ۷۵ و ۵۰ درصدی به آب تغییر معنی‌داری نشان دادند. تجزیه واریانس داده‌های مربوط به ذرت در شرایط تنش خشکی و شاهد مزرعه‌ای نشان داد که اثر اصلی تیمارهای اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک بر کلروفیل، محتوای نسبی آب، وزن خشک، میزان سنتز پروتئین و نش‌یونی معنی‌دار بود. تنش خشکی موجب افزایش برخی شاخص‌های تنشی و نش‌یونی شد. مطالعات متعددی

نشان داده‌اند که تنش خشکی، شاخص‌های رشد ریخت‌شناختی ذرت را کاهش می‌دهد (۲، ۴، ۲۲). در مطالعه حاضر، محتوای کلروفیل کل برگ‌های ذرت تحت تنش آبی، در مقایسه با گیاهان رشدیافته در شرایط دسترسی ۱۰۰ درصدی به آب، کاهش یافت. خشکی با کاهش رنگیزه‌های کلروفیلی می‌تواند فرایند فتوسنتز را محدود کند (۱۶). به‌طور مشابه، یواس و اونای (۲۳) نشان دادند که کمبود آب موجب کاهش قابل‌توجه محتوای کلروفیل در گندم می‌شود. کاهش محتوای نسبی آب برگ در اثر تنش خشکی، از یک سو ناشی از کاهش جذب آب به‌وسیله ریشه‌ها و از سوی دیگر ناشی از افزایش تعلق آب از سطح برگ‌هاست؛ فرایندی که در نهایت به بسته‌شدن روزنه‌ها منجر می‌شود. گزارش‌ها نشان داده‌اند که خشکی موجب کاهش محتوای نسبی آب در گیاهان چندساله نیز می‌شود. کمبود آب آبیاری، بسته به نوع رقم، مرحله رشد، شدت و مدت تنش، عملکرد ذرت را کاهش می‌دهد. کمبود آب بر تقسیم سلولی اثر منفی می‌گذارد. در شرایط تنش خشکی، به دلیل تخریب غشای سلولی، مقدار بیشتری از محتویات سلول به بیرون نشت می‌کند. تغییرات ایجادشده در ساختار غشای سلولی، از جمله تغییر در ترکیب چربی‌ها، موجب افزایش نفوذپذیری غشا نسبت به یون‌ها و درشت‌مولکول‌ها می‌شود.

از یک سو، کمبود آب با تأثیر بر ساختار غشای سلولی، نفوذپذیری آن را نسبت به یون‌ها و درشت‌مولکول‌ها افزایش می‌دهد و از سوی دیگر، کاهش محتوای نسبی آب و پتانسیل آبی برگ، زمینه کاهش فتوسنتز در واحد سطح برگ را فراهم می‌کند (۲۳، ۲۴). همچنین کمبود آب موجب کاهش سرعت ظهور برگ، پیری زودرس در نتیجه انتقال آب از برگ‌های مسن به برگ‌های جوان و کاهش جذب تابش به دلیل ریزش یا کاهش سطح برگ‌ها می‌شود. پژوهشگران گزارش کرده‌اند که تنش خشکی موجب کاهش ماده خشک گیاهان ذرت می‌شود. در مقابل، تیمارهای اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک موجب افزایش صفات اندازه‌گیری شده و کاهش نشت یونی شدند. کاهش کارایی استفاده از تابش نیز یکی از دلایل احتمالی افت عملکرد در شرایط کمبود آب است. (24) از دیدگاه بیوشیمیایی، کاهش شاخص‌های رشد و عملکرد ذرت تحت تنش خشکی ممکن است به تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن مرتبط باشد. این ترکیبات موجب آسیب اکسیداتیو به غشاها و چربی‌ها شده و میزان پرولین و مالون‌دی‌آلدئید را افزایش می‌دهند. مالون‌دی‌آلدئید یک دی‌آلدئید سه‌کربنه بسیار واکنش‌پذیر و یکی از نشانگرهای زیستی تنش اکسیداتیو است. کاهش آسیب غشایی در نتیجه کاربرد اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک، که یکی از راهکارهای افزایش مقاومت گیاهان به خشکی محسوب می‌شود، ممکن است با افزایش تولید آنتی‌اکسیدان‌ها و کاهش خسارت اکسیداتیو همراه باشد. گزارش شده است که این دو هورمون، نشت یونی و تجمع یون‌های سمی را در گیاهان به‌طور معنی‌داری کاهش می‌دهند و همچنین می‌توانند موجب افزایش برخی تنظیم‌کننده‌های رشد شوند. (2) مطالعات پیشین متعددی نشان داده‌اند که تنش خشکی موجب افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود. این ترکیبات غشای سلولی را تخریب کرده، به چربی‌ها، پروتئین‌ها و کلروفیل‌ها آسیب می‌رسانند و در نهایت، تجمع زیست‌توده گیاه را کاهش می‌دهند. تقریباً یک درصد از کل آب جذب‌شده به‌وسیله ریشه مستقیماً در فرایندهای گیاهی مصرف می‌شود و بخش عمده آن به‌شکل بخار آب از گیاه خارج می‌گردد. بنابراین، افزایش توانایی گیاه برای حفظ آب می‌تواند رشد آن را، به‌ویژه در شرایط کم‌آبی، بهبود بخشد. (25) آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش، از ساختارهای سلولی در برابر گونه‌های فعال اکسیژن محافظت می‌کنند. در پژوهش حاضر، کاربرد ABA و SA موجب افزایش رشد و عملکرد ذرت شد و از طریق تقویت سامانه دفاعی، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شامل SOD، POD، CAT و GR، افزایش محتوای پرولین برگ و کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدئید، آثار نامطلوب تنش خشکی را تعدیل کرد.

حیات و همکاران (۱۴) نشان دادند که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محتوای پرولین در گیاهان نخود شد. نتایج مشابهی نیز در گندم گزارش شده است. پژوهشگران همچنین گزارش کرده‌اند که اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک، محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها را در گیاهان ذرت افزایش می‌دهند. افزون بر این، غلظت‌های پایین اسید سالیسیلیک موجب افزایش معنی‌دار رنگیزه‌های فتوسنتزی در سویا و گندم می‌شود. (16) وی و همکاران (۱۰) گزارش کردند که کاربرد برون‌زاد ABA، تحمل گندم تیمار شده را در برابر تنش خشکی افزایش می‌دهد. شمی و همکاران (۲) نیز نشان دادند

که کاربرد SA، محتوای مالون دی آلدئید را در ذرت رشد یافته تحت تنش آبی کاهش می دهد. تنش خشکی با کاهش رشد سلولی، از طریق کاهش تقسیم سلولی و کوچک شدن اندازه سلول ها در مرحله رشد رویشی، موجب کاهش رشد گیاه، از جمله ارتفاع بوته، می شود. گزارش شده است که اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک با افزایش تقسیم سلولی در مریستم گیاهچه های گندم، رشد گیاه را بهبود می بخشد. همچنین کاربرد این ترکیبات موجب افزایش ارتفاع بوته های سویا در شرایط گلخانه ای و مزرعه ای شده است. افزون بر تقویت سامانه دفاعی، افزایش تحمل به خشکی در اثر ABA و SA ممکن است با نقش های حفاظتی این ترکیبات، از جمله بسته شدن روزنه ها، کاهش تبخیر و تنظیم جذب و تجمع مواد محلول، مرتبط باشد. پژوهشگران گزارش کرده اند که تغییر فواصل آبیاری بر وزن هزار دانه اثر می گذارد. تنش خشکی با مختل کردن فرایند جذب و انتقال عناصر غذایی، تأمین مواد مورد نیاز گیاه را کاهش می دهد و موجب تغییر اجزای عملکرد و کاهش عملکرد دانه می شود. (26) در پژوهش حاضر، کاربرد ABA و SA در ذرت رشد یافته تحت شرایط دسترسی ۵۰ و ۷۵ درصدی به آب، موجب افزایش پرولین و کربوهیدرات های محلول شد. پرولین که به عنوان یک اسمولیت عمل می کند، همراه با کربوهیدرات های محلول، از اجزای مهم تنظیم اسمزی گیاهان در شرایط تنش به شمار می رود. (2)

قندهای محلول در حفظ تعادل اسمزی سلول ها، پایداری ساختار آنزیم ها، حفاظت در برابر رادیکال های آزاد و افزایش پایداری پروتئین ها در شرایط تنش نقش دارند و به حفظ ظرفیت اسمزی گیاه کمک می کنند. (۲۷، ۲۸) افزایش پروتئین محلول در برگ های ذرت تیمار شده با ABA و SA تحت تنش خشکی، با یافته های ریکاردی و همکاران (۲۸) مطابقت داشت. آنان گزارش کردند که میزان مجموعه ای از پروتئین های دهیدرین، که به عنوان پروتئین های تنشی شناخته می شوند، در پاسخ به تنش آبی حدود ۳/۱ تا ۵ برابر افزایش یافت. مطالعات مشابه نشان داده اند که شاخص برداشت گیاه ذرت تحت تأثیر تنش خشکی ممکن است تقریباً ثابت باقی بماند؛ زیرا تنش خشکی علاوه بر کاهش عملکرد دانه، وزن خشک کل را نیز کاهش می دهد. با این حال، در شرایط تنش شدید، کاهش بیشتر عملکرد دانه ممکن است موجب کاهش شاخص برداشت شود. (29) بر اساس مجموعه نتایج به دست آمده، مقاومت رقم ذرت بررسی شده، یعنی هیبرید سینگل کراس S.C.647، به تنش آبی پایین ارزیابی می شود؛ زیرا عملکرد و شاخص های رشد آن به طور معنی داری کاهش یافتند. بنابراین، کشت ارقام حساس به خشکی ذرت در مناطق خشک، به دلیل عملکرد بسیار پایین، توصیه نمی شود. با این حال، می توان با کاهش کنترل شده میزان آبیاری توصیه شده همراه با محلول پاشی اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک، مقاومت ذرت به خشکی را افزایش داد و رشد و عملکرد آن را بهبود بخشید؛ به گونه ای که کشت ذرت در مناطق نیمه خشک از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد. هدف این آزمایش، بررسی تأثیر اسید سالیسیلیک و اسید آسزیک بر رشد و عملکرد ذرت کشت شده در شرایط مزرعه ای و تحت تنش خشکی بود.

منبع تأمین مالی: این پژوهش از هیچ منبع مالی برخوردار نبوده است.

سپاسگزاری: بدین وسیله مراتب قدردانی صمیمانه خود را از تمامی افرادی که در طول فرایند انجام این پژوهش از ما حمایت کردند، ابراز می داریم.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می کنند که هیچ گونه تعارض منافی ندارند.

ملاحظات اخلاقی

منابع

۱. زین الدینی میمند، ا.، باقری بداغ آبادی، م.، مقیمی، ا.، نویدی، م. ن.، ابراهیمی میمند، ف. و امیرپور، م. (۲۰۱۸). مدل سازی عملکرد و رتبه بندی ویژگی های اراضی برای کشت ذرت بر اساس شبکه عصبی مصنوعی و مدل های رگرسیونی در جنوب ایران *Desert*، ۲۳، ۹۵-۹۵.

۲. شمی، ر.، وانگ، ر.، غیث، ا. س. م. س.، حسین، ح. ا.، حسین، س.، عرفان، م. و همکاران. (۲۰۲۱). تأثیر اسید سالیسیلیک، روی و گلیسین‌بتائین بر رشد ریخت‌شناختی - فیزیولوژیکی و عملکرد ذرت تحت تنش خشکی *Scientific Reports*, ۱۱, ۳۱۹۵.
۳. فاره، ا.، ون اویجن، م.، لفلار، پ. ا. و فاسی، خ. م. (۲۰۰۰). تحلیل رشد ذرت تحت راهبردهای مختلف آبیاری در شمال شرقی اسپانیا *European Journal of Agronomy*, ۱۲, ۲۳۵-238.
۴. نایار، ه. و گوپتا، د. (۲۰۰۶). حساسیت متفاوت گیاهان C3 و C4 به تنش کمبود آب و ارتباط آن با تنش اکسیداتیو و آنتی‌اکسیدان‌ها *Environmental and Experimental Botany*, ۵۸, ۱۰۶-113.
۵. یانگ، اکس.، چن، اکس.، گه، ک.، لی، ب.، تونگ، ی.، ژانگ، ا.، لی، ز.، کوانگ، ت. و لو، س. (۲۰۰۶). تحمل فتوستنز نسبت به بازدارندگی نوری، دمای بالا و تنش خشکی در برگ پرچم گندم: مقایسه یک لاین دورگ با والدین آن در شرایط مزرعه‌ای *Plant Science*, ۱۷۱, ۳۸۹-397.
۶. اسمیرنوف، ن. (۱۹۹۸). مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی *Current Opinion in Biotechnology*, ۹, ۲۱۴-219.
۷. وانگ، و.، وینوکور، ب. و آلمن، ا. (۲۰۰۳). پاسخ گیاهان به خشکی، شوری و دماهای شدید: به‌سوی مهندسی ژنتیک برای تحمل به تنش *Planta*, ۲۱۸, ۱-14.
۸. شینوزاکی، ک. و یاماگوچی - شینوزاکی، ک. (۲۰۰۶). شبکه‌های ژنی دخیل در پاسخ و تحمل به تنش خشکی. *Journal of Experimental Botany*, ۵۸, ۲۲۱-227.
۹. کونگ، ه.، ژانگ، ز. و چین، ج. (۲۰۲۱). اثرات متقابل اسید آسزیک و تنش خشکی بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی گندم زمستانه *Pakistan Journal of Botany*, ۵۳, ۱۵۴۵-1551.
۱۰. وی، ل.، وانگ، ل.، یانگ، ی.، وانگ، پ.، گوئو، ت. و کانگ، گ. (۲۰۱۵). اسید آسزیک تحمل گیاهچه‌های گندم به خشکی را افزایش داده و سطوح رونویسی ژن‌های کدکننده مسیر زیست‌ساخت آسکوربات - گلوکاتینون را تنظیم می‌کند. *Frontiers in Plant Science*.
۱۱. جیانگ، م. و ژان، ج. (۲۰۰۲). تجمع اسید آسزیک ناشی از تنش آبی، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن را تحریک کرده و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را در برگ‌های ذرت افزایش می‌دهد *Journal of Experimental Botany*, ۵۳, ۲۴۰۱-2410.
۱۲. بلانچارد، م. گ.، نیوتن، ل. ا.، رانکل، ا. و ولارد، د. و کمپیل، س. (۲۰۰۷). کاربرد برون‌زاد اسید آسزیک، تحمل پس از برداشت به خشکی را در چندین گیاه زینتی یک‌ساله بهبود بخشید *Acta Horticulturae*, ۷۵۵, ۱۲۷-132.
۱۳. یادگاری، ل. ز.، حیدری، ر.، رحمانی، ف. و خارا، ج. (۲۰۱۴). القای تحمل به خشکی در گوجه‌فرنگی از طریق محلول‌پاشی اسید آسزیک و ترکیبات سولفونامیدی *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, ۱۰, ۳۲۷-334.
۱۴. حیات، ق.، حیات، س.، الیمنی، م. و احمد، ا. (۲۰۱۲). تغییرات میانجی‌گری‌شده توسط اسید سالیسیلیک در رشد، فتوستنز، متابولیسم نیتروژن و سامانه دفاع آنتی‌اکسیدانی نخود (*Cicer arietinum L.*). *Plant, Soil and Environment*, ۵۸, ۴۱۷-423.
۱۵. شارما، م.، گوپتا، س. ک.، ماجومدر، ب.، موریاء، و. ک.، دیبا، ف.، عالم، ا. و همکاران. (۲۰۱۷). پاسخ‌های رشدی، فیزیولوژیکی و پروتئومیکی میانجی‌گری‌شده توسط اسید سالیسیلیک در دو رقم گندم تحت تنش خشکی *Journal of Proteomics*, ۱۶۳, ۲۸-51.

۱۶. عالم، پ.، بالاوی، ت. ا. و فایزان، م. (۲۰۲۲). تأثیر اسید سالیسیلیک بر رشد، فتوسنتز و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گندم (*Triticum aestivum*) در مواجهه با تنش شوری *Molecules*، ۲۸.
۱۷. توتجا، ن. (۲۰۰۷). اسید آبسزیک و پیام‌رسانی تنش‌های غیرزیستی *Plant Signaling & Behavior*، ۲، ۱۳۵-138.
۱۸. آرنون، د. ا. (۱۹۴۹). آنزیم‌های مس‌دار در کلروپلاست‌های جداسازی‌شده: پلی‌فنل‌اکسیداز در *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*، ۲۴، ۱-15.
۱۹. بیتس، ل. س.، والدین، ر. پ. و تیر، ا. د. (۱۹۷۳). تعیین سریع پرولین آزاد برای مطالعات تنش آبی *Plant and Soil*، ۳۹، ۲۰۵-207.
۲۰. شی، د. م.، لیو، و. س.، یانگ، گ. د.، وو، س. ا. و ژنگ، س. س. (۲۰۱۰). بیش‌بیاختصاصی ژن‌های آنتی‌اکسیدانی در بذر آرابیدوپسیس، تحمل به تنش اکسیداتیو را طی جوانه‌زنی و مراحل اولیه رشد گیاهچه افزایش می‌دهد *Plant Biotechnology Journal*، ۸، ۷۹۶-806.
۲۱. میلی، ا. س. (۱۹۵۴). سنجش فعالیت کاتالازها و پراکسیدازها *Methods of Biochemical Analysis*، ۳۵۷، 424.
۲۲. افه‌اوغلو، ب.، اکمچی، ی. و چیچک، ن. (۲۰۰۹). پاسخ‌های فیزیولوژیکی سه رقم ذرت به تنش خشکی و بازیابی پس از تنش *South African Journal of Botany*، ۷۵، ۳۴-42.
۲۳. یاواس، ا. و اونای، ا. (۲۰۱۶). تأثیر روی و اسید سالیسیلیک بر گندم تحت تنش خشکی *Journal of Animal and Plant Sciences*، ۲۶، ۱۰۱۲-1018.
۲۴. گه، ت.، سوئی، ف.، بای، ل.، تونگ، س. و سان، ن. (۲۰۱۲). تأثیر تنش آبی بر رشد، تخصیص زیست‌توده و کارایی مصرف آب ذرت تابستانه (*Zea mays L.*) در سراسر چرخه رشد *Acta Physiologiae Plantarum*، ۳۴، ۴۳-1053.
۲۵. میلر، گ.، سوزوکی، ن.، چیفتچی - ییلماز، س. و میتلر، ر. (۲۰۱۰). هم‌ایستایی و پیام‌رسانی گونه‌های فعال اکسیژن در طول تنش‌های خشکی و شوری *Plant, Cell & Environment*، ۳۳، ۴۵۳-467.
۲۶. کرکهام، م. ب. (۱۹۸۳). تأثیر اسید آبسزیک بر روابط آبی ارقام گندم زمستانه با سطوح متفاوت مقاومت به خشکی. *Physiologia Plantarum*، ۵۹، ۱۵۳-157.
۲۷. هونگبو، ش.، زونگسو، ل. و مینگان، ش. (۲۰۰۶). تنظیم اسمزی ۱۰ ژنوتیپ گندم (*Triticum aestivum L.*) تحت کمبود آب خاک *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*، ۴۷، ۱۳۲-139.
۲۸. ریکاردی، ف.، گازو، پ.، دووین، د. و زیوی، م. (۱۹۹۸). تغییرات پروتئینی در پاسخ به کمبود تدریجی آب در ذرت: تغییرات کمی و شناسایی پلی‌پتیدها *Plant Physiology*، ۱۱۷، ۱۲۵۳-1263.
۲۹. تی‌دا، گ.، فانگ‌گونگ، س. و لی‌پینگ، ب. (۲۰۰۶). تأثیر تنش آبی بر فعالیت آنزیم‌های حفاظتی و پراکسیداسیون لیپیدی در ریشه‌ها و برگ‌های ذرت تابستانه *Agricultural Sciences in China*، ۵، ۲۹۱-298.