



Evaluation of the Effects of Seed Priming and Ellagic Acid Foliar Application on the Biochemical Characteristics and Yield of *Phaseolus vulgaris* (Pinto Bean) under Drought Stress Condition

Babak Andalibi¹ | Mansour Faraji² | Mohsen Seilsepour³ | Sajjad Nasiri⁴

1. Corresponding Author, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: andalibi@znu.ac.ir
2. Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: faraji.mansour@znu.ac.ir
3. Agricultural Research and Training Center and Natural Resources of Tehran Province, Tehran, Iran. E-mail: m.seilsepour@areeo.ac.ir
4. Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: sajjad.nasiri@alumni.znu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 26 April 2025
Received in revised form
26 July 2025
Accepted 22 October 2025
Published online 13 April 2026

Keywords:

Antioxidant Compounds
Oxidative Stress
Osmotic Adjustment
Protein Crop

ABSTRACT

Objective: Drought stress is one of the most critical limiting factors affecting the overall growth and final yield of common bean. This study specifically aimed to evaluate the combined effects of seed priming and foliar application of ellagic acid on the yield, physiological performance, and biochemical characteristics of common bean under drought stress conditions.

Method: A detailed field experiment was conducted in May 2024 using a split-plot design based on randomized complete blocks with three replications at the Central Research Farm affiliated with the Agricultural and Natural Resources Research Center of Tehran Province, located in Varamin County. The main plots consisted of three irrigation levels (full irrigation equivalent to 100% of the crop water requirement, mild stress at 75%, and severe stress at 50%). The subplots included four treatments: control (no priming or foliar application), seed priming with 50 mg L⁻¹ ellagic acid, foliar spraying with 50 mg L⁻¹ ellagic acid, and a combination of seed priming and foliar application.

Results: The results clearly showed that drought stress significantly reduced grain yield and biological yield of common bean. However, the application of ellagic acid, especially the combined treatment of seed priming and foliar spraying, effectively improved these traits. The highest grain yield (4198 kg ha⁻¹) was recorded under full irrigation with the combined treatment, whereas the lowest yield (2220 kg ha⁻¹) occurred under severe stress without ellagic acid application, representing a 47.1% decrease. Under mild stress, foliar application alone increased grain yield by 12.5%, and under severe stress, the combined treatment enhanced yield by 22%. Biological yield also increased in response to treatments, with the combined treatment increasing it by 10.5%, 9.5%, and 19.6% compared to the control under full irrigation, mild stress, and severe stress, respectively. Catalase enzyme activity and malondialdehyde content increased under stress condition; however, ellagic acid application, particularly the combined treatment, reduced these indices by 26.1% and 20.9%, respectively.

Conclusions: Overall, the results clearly demonstrated that drought stress has a significantly negative impact on the yield and physiological traits of pinto beans. However, the application of ellagic acid—especially in the combined priming and foliar spray treatment—was able to mitigate oxidative stress effects and maintain cellular stability as well as water balance, thereby leading to improved growth and yield under water deficit conditions. Based on these findings, the consistent use of ellagic acid is recommended as an effective management strategy to enhance drought tolerance and sustain productivity in arid and semi-arid regions.

Cite this article: Andalibi, B., Faraji, M., Seilsepour, M., & Nasiri, S. (2026). Evaluation of the Effects of Seed Priming and Ellagic Acid Foliar Application on the Biochemical Characteristics and Yield of *Phaseolus vulgaris* (Pinto Bean) under Drought Stress Condition. *Journal of Crops Improvement*, 28 (1), 1-19. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.393317.2926>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.393317.2926>

Publisher: University of Tehran Press.



بررسی اثرات پرایمینگ بذر و محلول پاشی الاژیک اسید بر ویژگی‌های بیوشیمیایی و عملکرد لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris*) در شرایط تنش خشکی

بابک عندلیبی^۱ | منصور فرجی^۲ | محسن سیلسپور^۳ | سجاد نصیری^۴

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: andalibi@znu.ac.ir
۲. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: faraji.mansour@znu.ac.ir
۳. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، تهران، ایران. رایانامه: m.seilsepoor@areeo.ac.ir
۴. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: sajjad.nasiri@alumni.znu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و عملکرد لوبیا چیتی است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر پرایمینگ بذر و محلول پاشی الاژیک اسید بر عملکرد و ویژگی‌های بیوشیمیایی لوبیا چیتی تحت شرایط تنش خشکی صورت گرفت.

روش پژوهش: این آزمایش در اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۳ به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقات مرکزی وابسته به مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران واقع در شهرستان ورامین انجام شد. تیمارهای اصلی شامل سه سطح آبیاری (آبیاری کامل معادل ۱۰۰ درصد نیاز آبی، تنش ملایم با ۷۵ درصد نیاز آبی و تنش شدید با ۵۰ درصد نیاز آبی) و تیمارهای فرعی شامل چهار سطح (شاهد بدون پرایمینگ و محلول پاشی، پرایمینگ بذر با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر الاژیک اسید، محلول پاشی برگ با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر الاژیک اسید و ترکیب پرایمینگ و محلول پاشی) بودند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد تنش خشکی به‌طور معنی‌داری سبب کاهش عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک لوبیا چیتی شد، اما کاربرد الاژیک اسید، به‌ویژه در تیمار ترکیبی پرایمینگ و محلول پاشی، موجب بهبود این صفات گردید. بیش‌ترین عملکرد دانه (۴۱۹۸ کیلوگرم در هکتار) در شرایط آبیاری کامل و تیمار ترکیبی و کم‌ترین آن (۲۲۲۰ کیلوگرم) در تیمار تنش شدید بدون استفاده از الاژیک اسید ثبت شد که معادل ۴۷/۱ درصد کاهش بود. در شرایط تنش ملایم، محلول پاشی به‌تنهایی عملکرد دانه را ۱۲/۵ درصد افزایش داد و در تنش شدید، تیمار ترکیبی موجب بهبود ۲۲ درصدی شد. عملکرد بیولوژیک نیز در پاسخ به تیمارها افزایش یافت و تیمار ترکیبی در شرایط آبیاری کامل، تنش ملایم و تنش شدید به‌ترتیب عملکرد را ۱۰/۵، ۹/۵ و ۱۹/۶ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. فعالیت آنزیم کاتالاز و میزان مالون‌دی‌آلدهید با تنش افزایش یافتند، اما کاربرد الاژیک اسید، به‌ویژه در تیمار ترکیبی، این شاخص‌ها را به‌ترتیب تا ۲۶/۱ درصد و ۲۰/۹ درصد کاهش داد.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی تأثیر منفی قابل‌توجهی بر عملکرد و فیزیولوژی لوبیا چیتی دارد، اما کاربرد الاژیک اسید، به‌ویژه در ترکیب پرایمینگ و محلول پاشی، توانست با کاهش اثرات استرس اکسیداتیو و حفظ تعادل آبی، موجب بهبود رشد و عملکرد گیاه در شرایط کمبود آب شود. براساس این یافته‌ها، استفاده از الاژیک اسید به‌عنوان یک راه‌کار مدیریتی مؤثر برای افزایش تحمل گیاه به خشکی و حفظ عملکرد در مناطق خشک و نیمه‌خشک پیشنهاد می‌شود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴

کلیدواژه‌ها:

ترکیبات آنتی‌اکسیدانی
تنش اکسیداتیو
تنظیم اسمزی
گیاه پروتئینی

استناد: عندلیبی، بابک؛ فرجی، منصور؛ سیلسپور، محسن و نصیری، سجاد (۱۴۰۵). بررسی اثرات پرایمینگ بذر و محلول پاشی الاژیک اسید بر ویژگی‌های بیوشیمیایی و عملکرد لوبیا چیتی (*Phaseolus vulgaris*) در شرایط تنش خشکی. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۸ (۱)، ۱-۱۹.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.393317.2926>



۱. مقدمه

تنش خشکی از مهم ترین چالش های تولید محصولات زراعی در جهان است که با تشدید تغییرات اقلیمی و کاهش بارندگی، منابع آبی را محدود کرده و عملکرد گیاهان را کاهش می دهد (جاورنیک^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). این تنش با ایجاد اختلال در فرایندهای فیزیولوژیکی، متابولیکی و بیوشیمیایی و بسته به شدت و مدت آن، موجب آسیب به ساختار سلولی، دستگاه فتوسنتزی و مکانیسم های دفاعی می شود (باقری و همکاران، ۱۴۰۱). کاهش جذب آب و عناصر غذایی، افت تورگور سلولی، کاهش سطح برگ و راندمان فتوسنتز، تجمع گونه های فعال اکسیژن و برهم خوردن تعادل متابولیکی از پیامدهای اصلی خشکی هستند که در نهایت عملکرد و کیفیت محصول را کاهش می دهند (نادم^۲ و همکاران، ۲۰۱۹). لوبیا چیتی به عنوان یکی از حبوبات مهم و پرمصرف، حساسیت بالایی به خشکی دارد. کاهش آب در این گیاه موجب کاهش جوانه زنی، افت شاخص های رشد، کاهش فعالیت آنزیم های فتوسنتزی و کاهش وزن خشک می شود که در نهایت به افت عملکرد دانه منجر می گردد (خاتون^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). خشکی با کاهش رطوبت نسبی برگ و افزایش تولید گونه های فعال اکسیژن، آسیب جدی به غشاها و ساختار سلولی وارد می کند (پاپات هانسو^۴ و همکاران، ۲۰۲۲). برای مقابله با این شرایط، گیاهان مکانیسم هایی همچون تنظیم اسمزی، تجمع پرولین، گلیسین بتائین و قندهای محلول و همچنین افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی را به کار می گیرند (جاورنیک و همکاران، ۲۰۲۳؛ حسینی فرد^۵ و همکاران، ۲۰۲۲؛ ملادنو^۶ و همکاران، ۲۰۱۸). یکی از راه کارهای مؤثر برای بهبود مقاومت گیاهان، پرایمینگ بذر و محلول پاشی ترکیبات آنتی اکسیدانی است. پرایمینگ بذر با فعال سازی متابولیسم پیش از جوانه زنی، موجب تسریع جوانه زنی، بهبود رشد، کارایی مصرف آب و حتی تنظیم بیان ژن های مرتبط با تحمل خشکی می شود (کشاورز^۷ و همکاران، ۲۰۲۱؛ اسویونتک^۸ و همکاران، ۲۰۲۴). الاژیک اسید، یک ترکیب پلی فنولی با خاصیت آنتی اکسیدانی قوی، می تواند از طریق کاهش پراکسیداسیون لیپیدها، مهار رادیکال های آزاد و افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی اثرات منفی خشکی را کاهش دهد (ساویکی^۹ و همکاران، ۲۰۲۴). این ترکیب همچنین با بهبود جذب عناصر غذایی، تنظیم روزه ها، افزایش پایداری غشا و تعادل هورمونی مقاومت گیاه را تقویت می کند (اسویونتک و همکاران، ۲۰۲۴). مکانیسم های عملکرد آن شامل مهار تولید اتیلن، افزایش کلروفیل و بهبود راندمان مصرف آب است. ترکیب پرایمینگ بذر و محلول پاشی الاژیک اسید اثر هم افزایی دارد؛ پرایمینگ موجب تقویت رشد اولیه و مصرف آب می شود (اونی مونتالو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۰) و محلول پاشی با افزایش فعالیت آنزیم های دفاعی، بهبود فتوسنتز و کاهش تخریب، مقاومت گیاه را در مراحل بعدی رشد افزایش می دهد (خانگ^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۶). باین حال، مطالعات درباره اثرات هم زمان این دو روش در لوبیا چیتی محدود است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر ترکیبی پرایمینگ بذر و محلول پاشی الاژیک اسید بر صفات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکرد لوبیا چیتی در شرایط خشکی انجام شد تا راه کارهایی کاربردی برای مدیریت زراعی در مناطق خشک و نیمه خشک ارائه دهد و به بهبود پایداری تولید و بهره وری کشاورزی کمک کند.

1. Javornik
2. Nadeem
3. Khatun
4. Papatnasiou
5. Hosseinifard
6. Mladenov
7. Keshavarz
8. Swiontek
9. Sawicki
10. Oney-Montalvo
11. Khang

۲. پیشینه پژوهش

۲.۱. پیشینه نظری

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها در تولید لوبیا چیتی به‌عنوان یکی از حبوبات اصلی با ارزش غذایی بالاست و در مناطق خشک و نیمه‌خشک موجب کاهش رشد، عملکرد و تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی می‌شود. کاهش محتوای نسبی آب، افزایش گونه‌های فعال اکسیژن، آسیب‌های اکسیداتیو و اختلال در فتوسنتز از مهم‌ترین پیامدهای خشکی می‌باشند (جاورنیک و همکاران، ۲۰۲۳). در راستای افزایش مقاومت لوبیا به خشکی، روش‌هایی مانند پرایمینگ بذر و محلول‌پاشی ترکیبات آنتی‌اکسیدانی پیشنهاد شده است. پرایمینگ بذر با تیمار بذر با آنتی‌اکسیدان‌ها، هورمون‌ها یا ریزمغذی‌ها، موجب تسریع جوانه‌زنی، بهبود تعادل آبی و فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی می‌شود (ال‌هاواری^۱ و همکاران، ۲۰۲۳؛ پروان^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). ترکیباتی مانند سالیسیلیک‌اسید (مولنار و همکاران، ۲۰۲۳)، جیبرلین (فرگونی^۳ و همکاران، ۲۰۲۴) و روی (توی ونگ^۴ و همکاران، ۲۰۲۱) اثر مثبتی بر افزایش تحمل خشکی داشته‌اند. همچنین محلول‌پاشی برگی ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مانند سالیسیلیک‌اسید، آسکوربیک‌اسید و فنول‌ها، با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و بهبود تنظیم اسمزی، تحمل گیاه را تقویت می‌کند (ساویکی و همکاران، ۲۰۲۴). در این میان، الاژیک‌اسید به‌عنوان ترکیبی فنولی و آنتی‌اکسیدانی قوی، در بهبود فتوسنتز، تنظیم هورمون‌ها و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو کارآمد است (اسویونتک و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین، ترکیب پرایمینگ بذر و محلول‌پاشی الاژیک‌اسید می‌تواند استراتژی مؤثری برای افزایش تحمل لوبیا به خشکی و بهبود عملکرد آن باشد.

۲.۲. پیشینه تجربی

پژوهش‌های متعددی در سال‌های اخیر به بررسی اثرات تنش خشکی و راه‌کارهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی مقابله با آن در لوبیا چیتی پرداخته‌اند. کاهش سطوح آبیاری می‌تواند اثرات متفاوتی بر رشد، شاخص‌های فتوسنتزی، متابولیت‌های ثانویه و عملکرد گیاه داشته باشد، به‌گونه‌ای که انتخاب سطح مناسب تنش خشکی در طراحی آزمایش‌ها اهمیت زیادی دارد (ماتهبوبو^۵ و همکاران، ۲۰۱۸). در یک پژوهش با سه سطح آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه) بر سه رقم لوبیا چیتی، افزایش شدت تنش موجب کاهش ارتفاع گیاه، وزن ساقه و ریشه، محتوای کلروفیل، رطوبت نسبی برگ و هدایت روزنه‌ای و افزایش نشتی الکتروولت شد. کاهش‌ها در تنش شدید بیش‌تر بود. به‌طور مثال، وزن ساقه ۷۰ درصد و وزن ریشه ۷۴ درصد کاهش یافت. رقم صالح نسبت به سایر ارقام مقاومت بیش‌تری نشان داد و بالاترین کلروفیل، رطوبت نسبی و عملکرد دانه را داشت (قلندری^۶ و همکاران، ۲۰۲۰). در مطالعه‌ای دیگر با چهار سطح آبیاری (۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت مزرعه)، تمامی صفات مورفوفیزیولوژیک با کاهش آبیاری کاهش یافتند و در سطح ۲۵ درصد عملکرد به صفر رسید. با این‌حال، رقم D81083 سازگاری بیش‌تری در شرایط کم‌آبی داشت (ماتهبوبو و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین بررسی دو رقم Bn-16 (حساس) و Bn-150 (مقاوم) نشان داد که کاهش رشد و رطوبت برگ در هر دو رخ می‌دهد، اما در رقم مقاوم، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی افزایش یافته و پراکسیداسیون لیپیدی کم‌تر بود. همچنین

1. El-Hawary
2. Parveen
3. Fregonezi
4. Tuiwong
5. Mathobo
6. Ghalandari

محتوای فنل ها و فلاونوئیدها در رقم Bn-150 تحت تنش شدید افزایش بیش تری نشان داد (کاسووران^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). اگرچه پژوهش های زیادی درباره پرایمینگ و محلول پاشی الازیک اسید وجود دارد، مطالعات اندکی اثرات همزمان آن ها را بررسی کرده اند. قاسمی گلزانی^۲ و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که پرایمینگ و محلول پاشی همزمان الازیک اسید موجب افزایش کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ، کاهش تجمع پراکسید هیدروژن و بهبود عملکرد دانه در شرایط خشکی شد. کشاورز و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش کردند که پرایمینگ بذر با الازیک اسید (۱۰۰ میکرومولار به مدت ۸ ساعت) سرعت جوانه زنی، طول ریشه چه و توانایی حفظ آب در شرایط خشکی را افزایش داد. به طور کلی، سطوح متوسط و شدید خشکی موجب کاهش سطح برگ، رشد اندام ها، محتوای کلروفیل، فعالیت روزنه ها، جذب مواد مغذی و کارایی مصرف آب می شوند که در نهایت کاهش عملکرد را در پی دارد. شدت این اثرات بسته به رقم، خاک و اقلیم متفاوت است. پاسخ گیاه شامل تغییرات مورفولوژیکی (مانند توسعه ریشه)، فیزیولوژیکی (بستن روزنه ها، تغییر هورمون های استرس) و بیوشیمیایی (افزایش فعالیت آنتی اکسیدانی و تغییر بیان ژن ها) می باشد (خاتون و همکاران، ۲۰۲۰).

۳. روش شناسی پژوهش

۳.۱. زمان اجرا و طرح آزمایش

آزمایش مزرعه ای به صورت کرت های خرد شده در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی و در سه تکرار در مزرعه تحقیقات مرکزی وابسته به مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران واقع در شهرستان ورامین (۵۰ کیلومتری جنوب شرقی تهران در عرض جغرافیایی ۲۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه شرقی، با ارتفاع ۱۰۵۰ متری از سطح دریا) در اردیبهشت ماه ۱۴۰۳ اجرا شد. این منطقه دارای اقلیم منطقه گرم و خشک است و متوسط بارندگی سالانه آن کم تر از ۲۰۰ میلی متر می باشد. خاک این منطقه عمیق و دارای بافت متوسط تا سنگین است که برای کشت لوبیا چیتی مناسب است. به منظور بررسی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایش، قبل از کاشت و شروع آزمایش، از پنج قسمت از خاک مزرعه در عمق صفر تا ۳۰ سانتی متر نمونه برداری به عمل آمد و پس از خرد کردن کلوخه ها، نمونه ها از الک ۳ میلی متری گذرانده شدند. سپس نمونه ها در آزمایشگاه از لحاظ برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفتند که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات خاک محل آزمایش

عمق نمونه (سانتی متر)	اسیدیته	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	پتاسیم (میلی گرم بر کیلوگرم)	فسفر (میلی گرم بر کیلوگرم)	نیترژن (درصد)	کربن آلی (درصد)	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	بافت خاک
۰-۳۰	۷/۸	۵/۲	۳۳۵	۶/۷	۰/۰۸	۰/۸۲	۲۷	۴۴	۲۹	سیلتی لوم

۳.۲. نحوه اعمال تیمارها

کرت های اصلی تیمارهای اصلی شامل سه سطح مختلف از تنش خشکی بودند که براساس درصد نیاز آبی گیاه و با استفاده از مقادیر تبخیر روزانه از تشتک تبخیر کلاس A اعمال گردیدند. در تیمار شاهد، آبیاری بر مبنای ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه انجام شد. تیمار دوم با هدف شبیه سازی تنش ملایم خشکی، براساس ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه آبیاری گردید. در

1. Kusvuran
2. Ghassemi-Golezani

تیمار سوم که نمایانگر تنش شدید خشکی بود، آبیاری بر مبنای ۵۰ درصد نیاز آبی صورت گرفت. حجم دقیق آب مصرفی در هر نوبت آبیاری با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$V = (PE \times Kc \times A) / Ei \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن، V حجم آب آبیاری (مترمکعب)، PE تبخیر روزانه از تشتک کلاس A (میلی‌متر)، Kc ضریب گیاهی در مراحل مختلف رشد، A مساحت سطح آبیاری شده (مترمربع) و Ei کارایی آبیاری (برابر ۵۱ درصد) بود (فاروق^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). ضریب گیاهی لوبیا در مراحل مختلف رشد متفاوت بود، به‌گونه‌ای که در مرحله رشد اولیه ۰/۱۵، در میانه رشد ۱/۱۵ و در مرحله پایانی ۰/۲۶ در نظر گرفته شد. برنامه آبیاری در طول فصل رشد به‌صورت پویا و متناسب با میزان تبخیر واقعی انجام گرفت و از الگوی تقویمی یا ثابت پیروی نکرد. بدین منظور، میزان تبخیر روزانه از تشتک تبخیر کلاس A اندازه‌گیری و به‌صورت تجمعی ثبت شد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۵). به‌محض آن که تبخیر تجمعی به سطحی رسید که با در نظر گرفتن ضریب گیاهی و کارایی آبیاری، آبیاری برای هر تیمار توصیه‌پذیر می‌نمود، آبیاری اجرا می‌شد. به‌طور متوسط، تبخیر روزانه بین ۵ تا ۷ میلی‌متر بود که منجر به فاصله زمانی تقریباً پنج تا هفت روزه بین آبیاری‌ها در تیمار شاهد، حدود هفت تا ۱۰ روز در تیمار تنش ملایم، و ۱۰ تا ۱۳ روز در تیمار تنش شدید شد. این روش موجب شد سطوح تنش خشکی به‌صورت واقعی و قابل کنترل اعمال شوند و شرایط نزدیک‌تری به واقعیت مزرعه فراهم گردد.

کرت‌های فرعی نیز شامل چهار سطح مختلف از تیمارهای پرایمینگ بذر و محلول‌پاشی برگ با الایژیک‌اسید اعمال گردید. تیمار اول، شاهد بدون پرایمینگ و محلول‌پاشی برگ بود که شرایط طبیعی رشد گیاه بدون هیچ‌گونه دخالت اضافی را شبیه‌سازی کرد. در تیمار دوم، پرایمینگ بذر با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر الایژیک‌اسید انجام شد. این تیمار به‌منظور ارزیابی تأثیر پرایمینگ بذر بر تسهیل جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاه تحت شرایط تنش خشکی به‌کار رفت. در تیمار سوم، محلول‌پاشی برگ با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر الایژیک‌اسید انجام گرفت که به‌منظور ارزیابی تأثیر این ترکیب بر بهبود سازگاری گیاه در برابر تنش‌های محیطی و خشکی بود. تیمار چهارم، کاربرد هم‌زمان پرایمینگ بذر و محلول‌پاشی برگ با الایژیک‌اسید بود که به‌منظور بررسی اثرات ترکیبی این دو روش به‌طور هم‌زمان در شرایط تنش خشکی به‌کار رفت. عملیات کاشت در ۱۵ اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۳ صورت گرفت. زمین پس از انجام عملیات آماده‌سازی شامل شخم، دیسک و لولر برای بهبود ساختار خاک آماده شد. بذرها به‌صورت دستی و در خطوط با فاصله ۴۰ سانتی‌متر کاشته شدند. فاصله بوته‌ها در هر ردیف ۱۰ سانتی‌متر بود که منجر به تراکم تقریبی ۲۵۰۰۰۰ بوته در هکتار شد. کودهای پایه شامل ۱۰۰ کیلوگرم اوره (۴۶ درصد نیتروژن)، ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل (۲۰ درصد فسفر) و ۱۰۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم (۵۰ درصد پتاسیم) و کودهای میکرو شامل ۵۰ کیلوگرم سولفات منیزیم و ۲۰ کیلوگرم سولفات روی، براساس نتایج آنالیز خاک و به‌منظور تأمین نیازهای غذایی گیاه پیش از کاشت به خاک اضافه شدند. رقم لوبیا چیتی مورد استفاده در این آزمایش، رقم غفار بود که برای اولین بار در سال ۱۳۷۴ وارد ایران شد. این رقم به‌دلیل ویژگی‌های خاص خود از جمله عملکرد بالا، مقاومت به آفات و بیماری‌ها و توانایی تحمل خشکی، نسبت به سایر ارقام مانند صدری برتری دارد. رقم غفار دارای تیپ بوته دو (ایستاده و رشد نامحدود) است و وزن ۱۰۰ دانه آن ۴۰ گرم می‌باشد که این ویژگی‌ها موجب شد تا در این آزمایش به‌عنوان رقم منتخب برای بررسی انتخاب شود. در طول دوره رشد، به‌طور منظم کنترل علف‌های هرز، آفات و بیماری‌ها انجام شد. این عملیات به‌منظور جلوگیری از رقابت گیاهان زراعی با علف‌های هرز و همچنین کاهش خطرات ناشی از آفات و بیماری‌ها که می‌توانستند تأثیرات منفی بر رشد گیاه و پاسخ به تیمارها داشته باشند، ضروری بود.

برای ارزیابی وضعیت آبی گیاه، محتوای آب نسبی برگ^۱ (RWC) در مرحله گلدهی اندازه گیری شد. به این منظور، از برگ های کامل میانی نمونه برداری و بلافاصله وزن تازه^۲ (FW) آن ها اندازه گیری شد. سپس برگ ها به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر قرار گرفتند تا وزن کل^۳ (TW) به دست آید. پس از آن برگ ها در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد خشک شده و وزن خشک^۴ (DW) آن ها اندازه گیری شد. محتوای آب نسبی برگ با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید.

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

میزان پرولین، فعالیت آنزیم کاتالاز و میزان مالون دی آلدئید در لوبیا نیز در مرحله گلدهی و به ترتیب از روش های بتاس^۵ (۱۹۷۳)، آبی^۶ (۱۹۸۴)، بردفورد^۷ (۱۹۷۶) و دهیندسا^۸ و همکاران (۱۹۸۱) محاسبه شدند. برداشت عملکرد بیولوژیک و دانه در مرحله رسیدگی کامل (R8) از سطح ۵ مترمربع پس از حذف اثرات حاشیه ای انجام شد. نمونه ها پس از توزین اولیه، به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی گراد خشک شدند تا رطوبت به صفر برسد و عملکرد بیولوژیک براساس ماده خشک محاسبه شد. عملکرد دانه نیز پس از جداسازی از کاه و کلش و تعیین رطوبت با دستگاه رطوبت سنج الکترونیکی به صورت استاندارد بر مبنای رطوبت ۱۴ درصد گزارش شد. داده های حاصل از آزمایش نیز با استفاده از نرم افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) مورد تجزیه واریانس قرار گرفته و میانگین ها به وسیله آزمون LSD^۹ در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند. برای رسم شکل ها از برنامه اکسل^{۱۰} استفاده گردید.

۴. یافته های پژوهش

۴.۱. عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که برهم کنش تنش خشکی و کاربرد الاژیک اسید (در سطح احتمال ۱ درصد) بر عملکرد دانه لوبیا معنی دار بود (جدول ۲) و عملکرد دانه لوبیا چیتی تحت تأثیر معنی دار سطوح مختلف تنش خشکی و تیمارهای الاژیک اسید قرار گرفت. بیشترین عملکرد دانه در تیمار شاهد (۱۰۰ درصد نیاز آبی) و در شرایط کاربرد همزمان پرایمینگ بذر و محلول پاشی الاژیک اسید مشاهده شد که مقدار آن ۴۱۹۸/۸۲ کیلوگرم در هکتار بود. در مقابل، کمترین عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی شدید (۵۰ درصد نیاز آبی) و در تیمار بدون پرایمینگ و محلول پاشی برگ ثبت شد که مقدار آن به ۲۲۲۰ کیلوگرم در هکتار کاهش یافت (جدول ۳). این کاهش بیش از ۴۷ درصد در مقایسه با شرایط شاهد، نشان دهنده تأثیر منفی خشکی بر رشد و عملکرد گیاه است. کاربرد جداگانه پرایمینگ بذر یا محلول پاشی الاژیک اسید در شرایط تنش ملایم (۷۵ درصد نیاز آبی) باعث افزایش عملکرد شد، به طوری که در تیمار محلول پاشی، عملکرد دانه نسبت به تیمار بدون الاژیک اسید ۱۲/۵ درصد افزایش یافت و به ۳۰۲۴/۲۴ کیلوگرم در هکتار رسید. در تنش شدید نیز، کاربرد ترکیبی پرایمینگ و محلول پاشی باعث افزایش ۲۲ درصدی عملکرد نسبت به تیمار بدون الاژیک اسید شد (جدول ۳). به عبارت دیگر، نتایج آزمایش نشان داد که هرچند تنش خشکی به طور معنی داری عملکرد دانه را کاهش

1. Relative water content
2. Fresh Weight
3. Total Weight
4. Dry weight
5. Bates
6. Aebi
7. Bradford
8. Dhindsa
9. Least Significant Difference
10. Excel

داد، اما کاربرد الاژیک اسید، به ویژه در ترکیب پرایمینگ بذر و محلول پاشی، باعث کاهش اثرات منفی این تنش شد. به طور کلی، در شرایط تنش ملایم، محلول پاشی الاژیک اسید تأثیر بیش تری بر افزایش عملکرد دانه نسبت به پرایمینگ بذر داشت، اما در شرایط تنش شدید ترکیب هر دو روش مؤثرتر بود. یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از الاژیک اسید می‌تواند به عنوان یک راه کار مناسب در بهبود تحمل گیاه در برابر خشکی و حفظ عملکرد دانه در شرایط تنش‌های محیطی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۲. تجزیه واریانس صفات عملکردی و بیوشیمیایی لوبیا تحت تاثیر، تیمارهای آبیاری و کاربرد الاژیک اسید

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیک	محتوای آب نسبی برگ	فعالیت آنزیم کاتالاز	مالون دی‌آلدهید
بلوک (R)	۲	۷۸۸۵۶/۲۹	۱۲۹۸۶۷/۵۲	۱۳۰/۲۴	۰/۳۳	۰/۲۸
تنش خشکی (A)	۲	۴۱۷۱۵/۷۵**	۱۰۶۴۱۱۹/۷۶**	۲۶/۷۳**	۱۱/۱۳**	۱۸/۵۶**
الاژیک اسید (B)	۳	۷۴۲۲۴/۴۹**	۲۰۲۹۳۷۴/۱۱**	۳۹/۸۱**	۰/۴۷**	۰/۴۰**
A×B	۶	۶۵۸۱/۳۳**	۱۰۶۳۵۵/۷۳**	۵/۲۳**	۰/۱۱**	۱/۳۳**
خطای آزمایش	۲۲	۱۹/۲۶	۳۰/۲۴	۲/۶۷	۰/۰۵	۰/۰۵
ضریب تغییرات (درصد)	-	۵/۲۳	۶/۷۸	۴/۷۵	۵/۷۴	۴/۵۹

ns ** و *: به ترتیب عدم اختلاف معنی‌دار و وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر برهم کنش تنش خشکی و کاربرد الاژیک اسید بر ویژگی‌های صفات عملکردی و بیوشیمیایی لوبیا

میانگین مربعات							پرایمینگ و محلول پاشی	تنش خشکی
برولین (میکرومول بر گرم وزن تر)	مالون دی‌آلدهید (نانومول بر گرم وزن تر)	فعالیت آنزیم کاتالاز (واحد در میلی گرم پروتئین در دقیقه)	محتوای آب نسبی برگ (درصد)	عملکرد بیولوژیک (کیلوگرم در هکتار)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)			
۲/۳۱d	۳/۲۱i	۳/۲۵k	۸۲/۱۲d	۷۵۶۰/۲۴d	۳۶۷۰/۷۱d	شاهد (عدم پرایمینگ و محلول پاشی)	شاهد	
۲/۳۱d	۲/۹۸j	۳/۴۴j	۸۳/۰۹c	۷۷۰۹/۴۶bc	۳۹۰۹/۱۴c	پرایمینگ بذر با ۵۰ میلی گرم الاژیک اسید	(آبیاری براساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه)	
۲/۳۳d	۳/۰۲k	۳/۷۱i	۸۴/۲۱b	۸۲۰۱/۳۲b	۴۰۲۳/۱۸b	محلول پاشی برگ با ۵۰ میلی گرم در لیتر الاژیک اسید		
۲/۳۵d	۲/۸۹l	۳/۷۸hi	۸۵/۴۱a	۸۳۵۰/۱۱a	۴۱۹۸/۸۲a	کاربرد توأم پرایمینگ و محلول پاشی		
۳/۹۲h	۴/۶۲e	۴/۹۲d	۷۶/۷۹h	۶۸۲۰/۴۸e	۳۶۹۸/۲۶hi	شاهد (عدم پرایمینگ و محلول پاشی)	تنش متوسط	
۳/۵۶g	۴/۳۹f	۴/۱۲ef	۷۸/۵۱g	۷۱۱۲/۳۱f	۲۸۲۵/۳۰g	پرایمینگ بذر با ۵۰ میلی گرم الاژیک اسید	(آبیاری براساس ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه)	
۳/۲۴f	۴/۲۱g	۳/۹۴ef	۷۹/۲۳f	۷۲۵۰/۳۱e	۳۰۲۴/۱۷e	محلول پاشی برگ با ۵۰ میلی گرم در لیتر الاژیک اسید		
۳/۱۱ef	۳/۹۸h	۳/۸۸g	۸۰/۴۳ef	۷۲۲۱/۳۱e	۳۰۰۰/۷۹ef	کاربرد توأم پرایمینگ و محلول پاشی		
۵/۷۷l	۶/۸۵a	۶/۳۳a	۶۹/۴۳i	۵۲۵۰/۲۰k	۲۲۲۰/۷۴k	شاهد (عدم پرایمینگ و محلول پاشی)	تنش شدید	
۵/۲۱k	۶/۴۱b	۵/۱۱b	۷۱/۵۱k	۵۹۸۸/۴۷j	۲۳۱۰/۷۴j	پرایمینگ بذر با ۵۰ میلی گرم الاژیک اسید	(آبیاری براساس ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه)	
۴/۸۴j	۵/۹۷c	۴/۷۰c	۷۲/۴۴j	۶۱۰۰/۸۳i	۲۳۴۷/۲۵j	محلول پاشی برگ با ۵۰ میلی گرم در لیتر الاژیک اسید		
۴/۴۴i	۵/۴۲d	۴/۶۷c	۷۴/۸۳i	۶۲۷۵/۴۱h	۲۶۶۴/۲۱i	کاربرد توأم پرایمینگ و محلول پاشی		

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند براساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

۲.۴ عملکرد بیولوژیک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از آن است که اثرات صلی و برهم‌کنش تنش خشکی و کاربرد الاژیک اسید از نظر آماری در سطح احتمال ۱ درصد بر عملکرد بیولوژیک لوبیا معنی‌دار بود (جدول ۲). بیش‌ترین عملکرد بیولوژیک در شرایط آبیاری کامل معادل ۱۰۰ درصد نیاز آبی و در تیمار ترکیبی پرایمینگ بذر و محلول پاشی برگ با لیتر الاژیک اسید

مشاهده شد. این تیمار عملکرد بیولوژیک را به ۸۳۵۰ کیلوگرم در هکتار افزایش داد، در حالی که تیمار شاهد با ۱۰۰ درصد نیاز آبی بدون پرایمینگ و محلول پاشی مقدار ۷۵۶۰ کیلوگرم در هکتار را ثبت کرد که نشان‌دهنده افزایش ۱۰/۵۰ درصدی عملکرد بیولوژیک در اثر کاربرد هم‌زمان پرایمینگ و محلول پاشی بود (جدول ۳). با کاهش میزان آبیاری به ۷۵ درصد نیاز آبی، عملکرد بیولوژیک کاهش یافت، اما این کاهش در تیمارهای دارای الازیک اسید کم‌تر بود. تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی بدون پرایمینگ و محلول پاشی، عملکردی معادل ۶۸۲۰ کیلوگرم در هکتار داشت (جدول ۳). اما تیمارهای محلول پاشی مجزا و پرایمینگ بذر به ترتیب عملکردی معادل ۷۲۵۰ و ۷۱۱۲ کیلوگرم در هکتار داشتند و در تیمار ترکیبی پرایمینگ بذر به همراه محلول پاشی الازیک اسید عملکرد بیولوژیک معادل ۷۲۲۱ کیلوگرم در هکتار ثبت شد (جدول ۳) که نشان‌دهنده اثر مثبت این ترکیب بر بهبود رشد رویشی تحت تنش ملایم بود.

۳.۴. محتوای نسبی آب برگ

نتایج نشان داد که برهم‌کنش سطوح آبیاری و کاربرد الازیک اسید در سطح احتمال ۱ درصد بر محتوای نسبی آب برگ لوبیا معنی دار شد (جدول ۲). در شرایط آبیاری کامل، بیش‌ترین مقدار این شاخص در تیمار ترکیبی پرایمینگ بذر و محلول پاشی برگ با الازیک اسید مشاهده شد که مقدار آن ۸۵/۴۱ درصد بود. در حالی که در تیمار شاهد بدون پرایمینگ و محلول پاشی مقدار این شاخص ۸۲/۱۲ درصد اندازه‌گیری شد (جدول ۳).

با کاهش آبیاری به ۷۵ درصد نیاز آبی در تیمار شاهد (بدون پرایمینگ و عدم محلول پاشی) محتوای آب نسبی برگ ۷۶/۷۹ درصد بود، در حالی که در تیمارهای دارای محلول پاشی و پرایمینگ مجزا این مقدار به ترتیب به ۷۹/۲۳ و ۷۸/۵۱ درصد افزایش یافت (جدول ۳). در تیمار ترکیبی پرایمینگ و محلول پاشی، مقدار محتوای آب نسبی برگ به ۸۰/۴۳ درصد رسید که نسبت به تیمار شاهد در این سطح آبیاری، افزایش ۴/۶ درصدی را نشان داد (جدول ۳).

۴.۴. فعالیت آنزیم کاتالاز

نتایج پژوهش نشان داد که فعالیت آنزیم کاتالاز در برگ لوبیا چیتی تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و تیمارهای کاربرد الازیک اسید قرار گرفت، به نحوی که برهم‌کنش تیمارها در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). با کاهش میزان آبیاری، فعالیت این آنزیم به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که نشان‌دهنده واکنش گیاه به تنش اکسیداتیو ناشی از کمبود آب بود. در شرایط آبیاری کامل، کم‌ترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار شاهد بدون پرایمینگ و محلول پاشی ثبت شد که مقدار آن ۳/۲۵ واحد در میلی‌گرم پروتئین در دقیقه بود. در همین شرایط، تیمار ترکیبی پرایمینگ بذر و محلول پاشی برگ الازیک اسید موجب افزایش فعالیت این آنزیم به ۳/۷۸ واحد در میلی‌گرم پروتئین در دقیقه شد (جدول ۳). نکته قابل توجه این بود که با افزایش تنش در سطح ۷۵ درصد نیاز آبی، فعالیت کاتالاز افزایش یافت، اما این افزایش در تیمارهای دارای الازیک اسید کم‌تر بود. مقدار فعالیت این آنزیم در تیمار بدون پرایمینگ و محلول پاشی ۴/۹۲ واحد بود، در حالی که در تیمارهای دارای محلول پاشی و پرایمینگ مقدار آن به ترتیب به ۳/۹۴ و ۴/۱۲ واحد کاهش یافت. تیمار ترکیبی پرایمینگ و محلول پاشی فعالیت کاتالاز را به ۳/۸۸ واحد کاهش داد (جدول ۳).

۵.۴. میزان مالون‌دی‌آلدئید

اثرات ساده و برهم‌کنش تیمارهای تنش خشکی و کاربرد الازیک اسید در سطح احتمال ۱ درصد بر میزان مالون‌دی‌آلدئید لوبیا معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج پژوهش نشان داد که میزان این شاخص در برگ لوبیا چیتی با کاهش

آبیاری، افزایش یافت که نشان‌دهنده شدت آسیب اکسیداتیو و تخریب غشاهای سلولی در اثر تنش خشکی است. در شرایط آبیاری معادل ۱۰۰ درصد نیاز آبی، بیش‌ترین میزان این شاخص در تیمار شاهد بدون پرایمینگ و محلول‌پاشی ثبت شد که ۳/۲۱ نانومول بر گرم وزن تر بود. در همین شرایط، تیمار ترکیبی پرایمینگ بذر و محلول‌پاشی برگ با الاژیک‌اسید مقدار آن را به ۲/۸۹ نانومول در گرم وزن تر کاهش داد (جدول ۳). در سطح ۷۵ درصد نیاز آبی، مقدار مالون‌دی‌آلدئید افزایش یافت، به‌طوری‌که مقدار این شاخص در تیمار شاهد ۴/۶۲ نانومول بر گرم بود، اما در تیمار ترکیبی پرایمینگ و محلول‌پاشی، کاهش ۱۳/۹ درصدی همراه بود و ۳/۹۸ نانومول بر گرم رسید (جدول ۳). در سطح ۵۰ درصد نیاز آبی، بیش‌ترین مقدار مالون‌دی‌آلدئید ثبت شد و مقدار آن در تیمار شاهد به ۶/۸۵ نانومول بر گرم رسید که نسبت به شرایط مشابه با آبیاری کامل ۱۱۳/۶ درصد افزایش داشت (جدول ۳). هم‌چنین در همین سطح آبیاری (۵۰ درصد نیاز آبی)، تیمار ترکیبی مقدار مالون‌دی‌آلدئید را به ۵/۴۲ نانومول کاهش داد که نسبت به تیمار شاهد در همین سطح خشکی ۲۰/۹ درصد کاهش نشان داد (جدول ۳). به‌طورکلی، افزایش میزان مالون‌دی‌آلدئید در شرایط خشکی نشان‌دهنده افزایش پراکسیداسیون لیپیدی و تخریب غشاهای سلولی است. اما کاهش آن در تیمارهای حاوی الاژیک‌اسید، به‌ویژه در ترکیب پرایمینگ و محلول‌پاشی، نشان داد که این ترکیب با تقویت ساختارهای غشایی و کاهش استرس اکسیداتیو، توانسته است آسیب‌های ناشی از خشکی را به حداقل برساند.

۴.۶. میزان پرولین

نتایج نشان داد که اثرات ساده و برهم‌کنش سطوح آبیاری و کاربرد الاژیک‌اسید در سطح احتمال ۱ درصد بر محتوای نسبی آب برگ لوبیا معنی دار شد (جدول ۲). با کاهش میزان آبیاری، مقدار پرولین افزایش یافت که نشان‌دهنده پاسخ گیاه به تنش خشکی و تلاش برای تنظیم فشار اسمزی و حفظ تعادل آبی سلول‌ها بود. در شرایط آبیاری کامل، کم‌ترین میزان پرولین در تیمار شاهد بدون پرایمینگ و محلول‌پاشی ثبت شد که مقدار آن ۲/۳۱ میکرومول بر گرم وزن تر بود (جدول ۳). در همین شرایط، تیمار ترکیبی پرایمینگ بذر و محلول‌پاشی با الاژیک‌اسید موجب افزایش نه‌چندان زیاد (غیر معنی‌دار) پرولین در لوبیا شد، اما با افزایش خشکی به سطح ۷۵ درصد نیاز آبی، افزایش پرولین در تیمارهای دارای الاژیک‌اسید کم‌تر بود. به‌طوری‌که تحت شرایط تنش خشکی متوسط، مقدار پرولین در تیمار بدون پرایمینگ و محلول‌پاشی ۳/۹۲ میکرومول بر گرم بود، درحالی‌که در تیمارهای دارای محلول‌پاشی و پرایمینگ مقدار آن به‌ترتیب به ۳/۲۴ و ۳/۵۶ کاهش یافت. تیمار ترکیبی پرایمینگ و محلول‌پاشی مقدار پرولین را به ۳/۱۱ میکرومول بر گرم کاهش داد که نسبت به تیمار شاهد در همین سطح آبیاری، ۲۰/۷ درصد کاهش نشان داد (جدول ۳).

در سطح ۵۰ درصد نیاز آبی، میزان پرولین به بیش‌ترین مقدار خود رسید و مقدار این شاخص در تیمار بدون پرایمینگ و محلول‌پاشی به ۵/۷۸ میکرومول بر گرم وزن تر رسید که در مقایسه با شرایط آبیاری کامل با تیمار مشابه الاژیک‌اسید، افزایش ۱۵۴/۳ درصدی داشت (جدول ۳). در همین سطح آبیاری، تیمار ترکیبی پرایمینگ و محلول‌پاشی میزان پرولین را به ۴/۴۴ میکرومول کاهش داد که نسبت به تیمار شاهد در همین سطح خشکی، ۲۴/۳ درصد کاهش نشان داد (جدول ۳). به‌طور کلی، افزایش میزان پرولین در شرایط خشکی نشان‌دهنده نقش این اسید آمینه در تنظیم فشار اسمزی و حفاظت از سلول‌ها در برابر کاهش دسترسی به آب است. اما کاهش پرولین در تیمارهای دارای الاژیک‌اسید، به‌ویژه در تیمار ترکیبی، نشان داد که این ترکیب با بهبود تعادل آبی و کاهش شدت استرس، نیاز گیاه به سنتز پرولین را کاهش داده است.

۵. بحث

کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی را می توان به چندین عامل فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نسبت داد. تنش خشکی با کاهش میزان دسترسی گیاه به آب، موجب کاهش تورژانس سلولی، بسته شدن روزنه ها و کاهش نرخ فتوسنتز می شود. بسته شدن روزنه ها به عنوان یک مکانیسم دفاعی برای کاهش تعرق، منجر به محدودیت ورود دی اکسید کربن به سلول های فتوسنتزی شده و در نتیجه، ظرفیت تولید کربوهیدرات های مورد نیاز برای رشد دانه ها کاهش می یابد. این موضوع به ویژه در شرایط تنش خشکی شدید کاملاً مشهود است (پاپات هانسیو و همکاران، ۲۰۲۲).

کاربرد الاژیک اسید، به ویژه در تیمار ترکیبی پرایمینگ بذر و محلول پاشی، توانست اثرات منفی تنش خشکی را کاهش دهد که نشان دهنده نقش این ترکیب در تنظیم پاسخ های فیزیولوژیکی گیاه است (آل فی^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). مکانیسم های احتمالی مؤثر در بهبود عملکرد تحت تیمارهای الاژیک اسید را می توان در چند جنبه بررسی کرد. نخست، الاژیک اسید یک ترکیب آنتی اکسیدانی قوی است که قادر به مهار گونه های فعال اکسیژن بوده و از آسیب های اکسیداتیو ناشی از خشکی جلوگیری می کند. این موضوع به ویژه در تیمار ترکیبی که عملکرد دانه در شرایط تنش شدید را تا ۲۲ درصد افزایش داد، به وضوح مشاهده شد. دوم، تأثیر مثبت الاژیک اسید بر حفظ تعادل آبی گیاه می تواند از دیگر عوامل بهبود عملکرد باشد. این ترکیب با تنظیم بیان ژن های مرتبط با پروتئین های انتقال دهنده آب مانند آکوپورین ها، می تواند به افزایش جذب و نگهداری آب در سلول های گیاهی کمک کند (مناسابگول^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). در نتیجه، در تیمارهای دارای الاژیک اسید، گیاه در مواجهه با تنش خشکی کارایی بهتری در حفظ آب داشته و دچار پژمردگی کمتری شده است. این ویژگی باعث شده است که حتی در سطوح پایین آبیاری، فرایندهای فتوسنتزی و متابولیسم گیاه در سطح بالاتری حفظ شوند. سوم، اثرات مثبت پرایمینگ بذر با الاژیک اسید را می توان به بهبود مراحل اولیه رشد و افزایش پایداری گیاه نسبت به شرایط تنش نسبت داد (آل فی و همکاران، ۲۰۲۰). در تیمارهایی که پرایمینگ بذر انجام شده بود، جوانه زنی یکنواخت تر و قدرت گیاهچه ها بیش تر بود که منجر به بهبود استقرار گیاه در شرایط تنش شد. این اثر در کنار محلول پاشی، به گیاه امکان داد که در مراحل حساس زایشی، مانند پر شدن دانه ها، عملکرد بهتری داشته باشد. تفاوت بین تأثیر پرایمینگ و محلول پاشی در سطوح مختلف تنش نیز دارای اهمیت است. در شرایط تنش ملایم (۷۵ درصد نیاز آبی)، محلول پاشی برگ تأثیر بیش تری بر عملکرد دانه داشت که احتمالاً به دلیل جذب مستقیم ترکیب و فعال سازی سریع تر مکانیسم های دفاعی بوده است. اما در شرایط تنش شدید (۵۰ درصد نیاز آبی)، ترکیب پرایمینگ و محلول پاشی بیش ترین تأثیر را داشت که نشان می دهد آماده سازی گیاه از مرحله جوانه زنی و ادامه آن در مراحل رشد رویشی و زایشی، به ویژه در شرایط تنش شدید ضروری است.

کاهش عملکرد بیولوژیک لوبیا چیتی در شرایط تنش خشکی را می توان به محدودیت رشد رویشی و کاهش توانایی گیاه در تولید زیست توده نسبت داد. تنش خشکی باعث کاهش دسترسی ریشه به آب و عناصر غذایی شده و در نتیجه جذب مواد مغذی ضروری را محدود می کند. این کاهش در جذب مواد معدنی، منجر به کند شدن تقسیم سلولی و کاهش توسعه اندام های رویشی نظیر ساقه و برگ می شود (آل فی و همکاران، ۲۰۲۰). در تیمارهای دارای کمترین میزان آبیاری، کاهش شدید عملکرد بیولوژیک مشاهده شد که احتمالاً به دلیل کاهش سطح فتوسنتز کننده فعال و کاهش نرخ تولید ترکیبات کربنی مورد نیاز برای رشد ساختارهای رویشی بوده است. محدودیت آبی هم چنین باعث افزایش غلظت هورمون های بازدارنده رشد مانند آبسزیک اسید می شود که از طریق مهار توسعه برگ و کاهش رشد ساقه، منجر به

1. Alfei

2. Melo-Sabogal

کاهش شدید زیست توده گیاه می شود (جاورنیک و همکاران، ۲۰۲۳). کاربرد الاژیک اسید در این پژوهش توانست اثرات منفی خشکی را بر عملکرد بیولوژیک کاهش دهد که این موضوع را می توان به تأثیرات این ترکیب بر افزایش تولید هورمون های رشد و بهبود توسعه اندام های رویشی نسبت داد. یکی از مهم ترین نقش های این ترکیب، تأثیر بر افزایش غلظت سیتوکینین ها و اکسین هاست که به ترتیب در تحریک تقسیم سلولی و افزایش رشد طولی ساقه و برگ نقش دارند (فرگوزنی و همکاران، ۲۰۲۳). در تیمارهای دارای الاژیک اسید، به ویژه در ترکیب پرایمینگ بذر و محلول پاشی، افزایش رشد رویشی مشاهده شد که احتمالاً به دلیل تقویت فرایندهای هورمونی و بهبود کارایی جذب آب و مواد معدنی بوده است. این اثر به ویژه در تیمار تنش شدید خشکی (۵۰ درصد نیاز آبی) مشاهده شد که در آن گیاهانی که با الاژیک اسید تیمار شده بودند، رشد رویشی بیش تری نسبت به گیاهان فاقد این ترکیب داشتند. یکی دیگر از دلایل بهبود عملکرد بیولوژیک در تیمارهای دارای الاژیک اسید، نقش این ترکیب در کاهش تولید اتیلن تحت شرایط خشکی است. اتیلن در شرایط تنش به عنوان یک سیگنال هشداردهنده عمل کرده و باعث پیری زودرس سلول ها و توقف رشد اندام های رویشی می شود (دوجموویک^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). در تیمارهای بدون الاژیک اسید، کاهش زیست توده گیاه احتمالاً به دلیل افزایش میزان اتیلن و در نتیجه محدود شدن رشد گیاه بوده است، گزارش شده است که الاژیک اسید، باعث کاهش تولید اتیلن و در نتیجه افزایش رشد برگ و ساقه و حفظ سطح فتوسنتزی فعال می شود (گلزانی و همکاران، ۲۰۲۲). این موضوع نشان می دهد احتمالاً جذب این ترکیب از طریق برگ می تواند اثر مستقیمی بر تنظیم مسیرهای متابولیکی مرتبط با رشد گیاه داشته باشد. تفاوت تأثیر پرایمینگ و محلول پاشی در افزایش عملکرد بیولوژیک نشان داد که در شرایط تنش ملایم، محلول پاشی مؤثرتر بوده است که احتمالاً به دلیل جذب مستقیم و سریع تر الاژیک اسید از طریق برگ ها و فعال سازی فوری مسیرهای تنظیمی رشد بوده است. اما در شرایط تنش شدید، ترکیب پرایمینگ و محلول پاشی اثر بیش تری بر افزایش زیست توده داشت که این امر می تواند به نقش پرایمینگ در بهبود توسعه سیستم ریشه ای و افزایش توانایی گیاه در جذب آب و مواد مغذی از خاک مرتبط باشد. بنابراین به طور کلی، کاهش عملکرد بیولوژیک در اثر خشکی را می توان به محدودیت در رشد رویشی، کاهش سطح فتوسنتزی فعال، افزایش تولید هورمون های بازدارنده رشد و افزایش پیری سلولی نسبت داد (سامک^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). اما کاربرد الاژیک اسید، به ویژه به صورت ترکیبی، موجب افزایش تنظیم هورمونی، بهبود توسعه اندام های رویشی، کاهش تولید اتیلن و افزایش تقسیم سلولی شد که در نهایت باعث بهبود عملکرد بیولوژیک گیاه شد. این یافته ها نشان داد که استفاده از این ترکیب می تواند به عنوان یک راه کار مؤثر در مدیریت تنش خشکی و بهبود توسعه گیاه در شرایط محدودیت آبی مورد استفاده قرار گیرد.

کاهش محتوای آب برگ در تیمارهای بدون الاژیک اسید احتمالاً ناشی از کاهش جذب آب و افزایش تعرق تحت تنش خشکی بود. اما در تیمارهایی که با الاژیک اسید تیمار شده بودند، به ویژه در شرایط تنش شدید، گیاه توانست آب بیش تری در بافت های خود حفظ کند. مقایسه تیمارها نشان داد که در تنش ملایم ۷۵ درصد نیاز آبی، محلول پاشی تأثیر بیش تری در حفظ رطوبت برگ داشت، در حالی که در تنش شدید ۵۰ درصد نیاز آبی، ترکیب پرایمینگ و محلول پاشی مؤثرتر بود که نشان دهنده نقش تقویتی این روش در بهبود وضعیت آبی گیاه و افزایش مقاومت به خشکی است. کاهش محتوای آب نسبی برگ در شرایط تنش خشکی ناشی از کاهش جذب آب توسط ریشه، افزایش مقاومت روزنه ای و کاهش جریان آب به برگ هاست (اسویوتک و همکاران، ۲۰۲۴). در تیمارهای با شدت خشکی بیش تر، این کاهش شدیدتر بود که نشان دهنده ناتوانی گیاه در حفظ تعادل آبی تحت محدودیت شدید آب است (نادم و همکاران، ۲۰۱۹). در

مقابل، افزایش محتوای آب نسبی در تیمارهای حاوی الاژیک اسید، به‌ویژه در ترکیب پرایمینگ و محلول پاشی، نشان‌دهنده نقش این ترکیب در بهبود حفظ آب در بافت‌های گیاهی بود. این اثر احتمالاً به دلیل افزایش کارایی جذب و انتقال آب از طریق تنظیم بیان آکوآپورین‌ها، بهبود ساختارهای غشایی و کاهش نشت آب از سلول‌ها بوده است (نادم و همکاران، ۲۰۱۹). در تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی، کاربرد الاژیک اسید باعث شد که گیاه با افزایش کارایی مصرف آب و کاهش تعرق، افت کم‌تری در محتوای آب نسبی تجربه کند. در این سطح از تنش، محلول پاشی تأثیر بیش‌تری بر حفظ آب برگ داشت که احتمالاً به دلیل اثر سریع‌تر آن در مقایسه با پرایمینگ بذر بود. اما در تنش شدید با ۵۰ درصد نیاز آبی، ترکیب پرایمینگ و محلول پاشی بهترین نتیجه را نشان داد، زیرا پرایمینگ باعث توسعه بهتر سیستم ریشه‌ای و افزایش جذب آب از خاک می‌شود (ساویکی و همکاران، ۲۰۲۴)، در حالی که محلول پاشی نیز از طریق بهبود مسیرهای متابولیکی مرتبط با تنظیم تعادل آبی، گیاه را در برابر تنش محافظت می‌کند (فاروق و همکاران، ۲۰۱۹). به‌طور کلی، کاهش محتوای آب نسبی در تیمارهای بدون الاژیک اسید ناشی از کاهش توانایی گیاه در حفظ تعادل آبی بود، اما در تیمارهای حاوی این ترکیب، به‌ویژه در تیمار ترکیبی، گیاه توانست آب بیش‌تری در بافت‌های خود نگه دارد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پرایمینگ و محلول پاشی الاژیک اسید می‌تواند یک راه‌کار مؤثر برای بهبود وضعیت آبی گیاه و افزایش مقاومت آن در برابر تنش خشکی باشد. تنش خشکی موجب کاهش جذب آب، بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش تبادلات گازی می‌شود که در نهایت، کارایی فتوسنتز را کاهش داده و منجر به افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن مانند پراکسید هیدروژن، رادیکال‌های سوپراکسید و هیدروکسیل می‌شود. این ترکیبات در صورت عدم کنترل، می‌توانند به غشاهای سلولی، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک آسیب وارد کنند (اونی مونتالو و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط تنش خشکی را می‌توان به افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و تلاش گیاه برای کاهش اثرات مخرب این ترکیبات نسبت داد. آنزیم کاتالاز با تجزیه پراکسید هیدروژن به آب و اکسیژن، نقش کلیدی در کاهش استرس اکسیداتیو ایفا می‌کند (ملادنو و همکاران، ۲۰۱۸). افزایش فعالیت این آنزیم در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی نشان می‌دهد که شدت تنش اکسیداتیو در این شرایط بیش‌ترین مقدار را داشته و گیاه برای محافظت از سلول‌ها، سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی خود را فعال‌تر کرده است. کاهش فعالیت کاتالاز در تیمارهای دارای الاژیک اسید نشان‌دهنده کاهش میزان استرس اکسیداتیو و تولید کم‌تر گونه‌های فعال اکسیژن در این گیاهان است. یکی از مکانیسم‌های مهم این اثر، نقش الاژیک اسید در بهبود وضعیت آبی گیاه و کاهش تولید بیش‌ازحد این ترکیبات است (ساویکی و همکاران، ۲۰۲۴). افزایش جذب و انتقال آب در گیاهان تیمار شده با الاژیک اسید احتمالاً از طریق بهبود توزیع آب در سلول‌ها رخ داده است. در نتیجه، با کاهش خشکی سلولی، میزان تنش اکسیداتیو کاهش یافته و در نتیجه نیاز به فعالیت شدید آنزیم کاتالاز نیز کم‌تر شده است.

علاوه بر این، الاژیک اسید موجب افزایش فعالیت سایر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز می‌شود که در حذف گونه‌های فعال اکسیژن نقش دارند. این آنزیم‌ها، در کنار کاتالاز، شبکه‌ای از دفاع آنتی‌اکسیدانی را تشکیل می‌دهند که در شرایط تنش، شدت آسیب‌های اکسیداتیو را کاهش می‌دهند (فرگوزنی و همکاران، ۲۰۲۴). در تیمارهایی که از الاژیک اسید استفاده شده بود، احتمالاً افزایش فعالیت این آنزیم‌ها موجب کاهش فشار روی کاتالاز شده و به همین دلیل میزان فعالیت این آنزیم نسبت به تیمارهای بدون الاژیک اسید پایین‌تر باقی مانده است. بهبود پایداری غشاهای سلولی در تیمارهای حاوی الاژیک اسید نیز می‌تواند یکی دیگر از دلایل کاهش نیاز به فعالیت شدید کاتالاز باشد. در شرایط تنش خشکی، تولید گونه‌های فعال اکسیژن موجب آسیب به فسفولیپیدهای غشا و افزایش نشت الکترولیت از سلول می‌شود (آل‌فی و همکاران، ۲۰۲۰). اما در گیاهانی که با الاژیک اسید تیمار شده بودند،

تثبیت ترکیبات غشایی و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی موجب کاهش آسیب غشا و در نتیجه کاهش تحریک سیستم‌های دفاعی شده است. تنظیم هورمونی نیز نقش مهمی در این فرایند دارد. در شرایط تنش خشکی، تولید هورمون‌هایی مانند آبسزیک‌اسید و اتیلن افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به افزایش بسته‌شدن روزنه‌ها و افزایش تنش اکسیداتیو شود (اسویونتک و همکاران، ۲۰۲۴). در گیاهانی که تحت تیمار با الاژیک‌اسید قرار گرفته‌اند، احتمالاً این تنظیم هورمونی بهینه‌تر انجام شده و در نتیجه تولید گونه‌های فعال اکسیژن کاهش یافته است که منجر به کاهش نیاز به فعالیت بالای کاتالاز شده است. در سطح ۷۵ درصد نیاز آبی، کاهش فعالیت کاتالاز در تیمارهای حاوی الاژیک‌اسید کمتر از تیمارهای تحت خشکی شدید بود که نشان می‌دهد در این سطح از تنش، گیاه همچنان به فعالیت آنتی‌اکسیدانی نیاز دارد، اما شدت آن کمتر است. در این شرایط، محلول‌پاشی الاژیک‌اسید تأثیر بیشتری در کاهش فعالیت کاتالاز داشت که احتمالاً به دلیل جذب سریع‌تر آن و اثر مستقیم‌تر بر سیستم دفاعی گیاه بوده است. اما در سطح ۵۰ درصد نیاز آبی، ترکیب پرایمینگ و محلول‌پاشی بیش‌ترین اثر کاهش را داشت. بنابراین به‌طور کلی، افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط خشکی شدید نشان‌دهنده افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و تلاش گیاه برای مقابله با استرس اکسیداتیو بود. اما در تیمارهای حاوی الاژیک‌اسید، این ترکیب از طریق بهبود تعادل آبی، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مکمل، تثبیت غشاهای سلولی و تنظیم هورمونی، موجب کاهش نیاز گیاه به فعالیت بیش‌ازحد کاتالاز شد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب پرایمینگ و محلول‌پاشی الاژیک‌اسید می‌تواند راه‌کاری مؤثر برای کاهش اثرات منفی خشکی و افزایش مقاومت گیاه از طریق کاهش استرس اکسیداتیو باشد.

افزایش میزان مالون‌دی‌آلدئید در شرایط تنش خشکی را می‌توان به تغییر در وضعیت آبی گیاه، کاهش سنتز ترکیبات حفاظتی غشا و تغییر در متابولیسم چربی‌های غشایی نسبت داد. چراکه کاهش جذب آب توسط ریشه و کاهش تورژسانس سلولی فشار مکانیکی بر ساختار غشاها را افزایش داده و موجب ناپایداری و تخریب آن‌ها می‌شود (آل‌فی و همکاران، ۲۰۲۰). در نتیجه، میزان مالون‌دی‌آلدئید که یک محصول جانبی تخریب لیپیدهای غشایی است، افزایش می‌یابد. در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی، بیش‌ترین میزان مالون‌دی‌آلدئید مشاهده شد که نشان‌دهنده شدت بالای تنش خشکی و تخریب سریع‌تر غشاهای سلولی در این شرایط بود. یکی دیگر از دلایل افزایش مالون‌دی‌آلدئید در گیاهان تحت تنش خشکی، کاهش سنتز و پایداری ترکیبات غشایی مانند فسفولیپیدها و پروتئین‌های غشاست. فسفولیپیدها نقش کلیدی در انعطاف‌پذیری و پایداری غشا دارند، اما در شرایط خشکی، کاهش فعالیت آنزیم‌های مسئول سنتز این ترکیبات باعث کاهش انعطاف‌پذیری غشا و افزایش تخریب آن می‌شود (مناسابگول و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین، کاهش تولید پروتئین‌های ساختاری غشا حساسیت غشا را به تخریب افزایش می‌دهد. در نتیجه، افزایش میزان مالون‌دی‌آلدئید در تیمارهای بدون الاژیک‌اسید را می‌توان به کاهش ظرفیت گیاه در ترمیم و بازسازی غشاها نسبت داد (آل‌فی و همکاران، ۲۰۲۰).

بنابراین، کاهش میزان مالون‌دی‌آلدئید در تیمارهای حاوی الاژیک‌اسید نشان داد که این ترکیب احتمالاً موجب کاهش شدت تخریب غشاها شده است. یکی از مکانیسم‌های اصلی این کاهش، افزایش فعالیت آنزیم‌های دخیل در بیوسنتز ترکیبات غشایی مانند کولین فسفوترانسفراز و فسفولیپاز است که موجب حفظ بهتر ساختار غشا و کاهش تخریب آن در شرایط خشکی می‌شود (آحن و همکاران، ۲۰۱۸). در تیمارهای دارای الاژیک‌اسید، به‌ویژه تیمار ترکیبی پرایمینگ و محلول‌پاشی، افزایش ظرفیت سنتز این ترکیبات احتمالاً باعث کاهش میزان مالون‌دی‌آلدئید شده است. همچنین، الاژیک‌اسید ممکن است با افزایش نسبت اسیدهای چرب اشباع و کاهش اسیدهای چرب غیراشباع در غشاها، موجب افزایش پایداری ساختاری غشاها شده باشد. اسیدهای چرب اشباع مقاومت بیشتری در برابر تنش‌های محیطی دارند،

درحالی که اسیدهای چرب غیراشباع حساس تر بوده و سریع تر تخریب می شوند (شارما و همکاران، ۲۰۲۰). در تیمارهای بدون الاژیک اسید، احتمالاً غشاها دارای مقدار بیش تری از اسیدهای چرب غیراشباع بوده و در نتیجه میزان تخریب آن ها و تولید مالون دی آلدئید افزایش یافته است. بهبود تنظیم متابولیسم لیپیدها و حفظ یکپارچگی غشا در گیاهان تیمار شده با الاژیک اسید نیز می تواند یکی از عوامل کاهش میزان مالون دی آلدئید باشد (کشاورز و همکاران، ۲۰۲۱). تنش خشکی موجب کاهش تولید برخی از مولکول های حفاظتی غشا مانند استرول ها و اسفنگولیپیدها می شود که نقش مهمی در حفظ استحکام غشا دارند (آحن و همکاران، ۲۰۱۸). اما در گیاهانی که با الاژیک اسید تیمار شده بودند، احتمالاً این ترکیبات در سطح بالاتری تولید شده و از این طریق از تخریب غشاها جلوگیری شده است. در سطح ۷۵ درصد نیاز آبی، میزان مالون دی آلدئید نسبت به تیمار خشکی شدید کم تر بود اما همچنان افزایش داشت. در این شرایط، محلول پاشی الاژیک اسید تأثیر بیش تری در کاهش مالون دی آلدئید داشت که احتمالاً به دلیل تنظیم سریع تر متابولیسم چربی ها و کاهش سرعت تخریب غشاها بوده است. اما در سطح ۵۰ درصد نیاز آبی، ترکیب پرایمینگ و محلول پاشی بیش ترین اثر کاهش را داشت، زیرا پرایمینگ موجب تقویت سیستم ریشه ای و افزایش جذب آب شد و محلول پاشی نیز موجب تنظیم بهتر تولید فسفولیپیدها و سایر ترکیبات حفاظتی غشا شد. به طور کلی، افزایش میزان مالون دی آلدئید در تیمارهای خشکی شدید ناشی از ناپایداری غشای سلولی، کاهش بیوسنتز فسفولیپیدها و افزایش تخریب ساختارهای غشایی بود. اما در تیمارهای حاوی الاژیک اسید، این ترکیب با افزایش تولید فسفولیپیدها، تنظیم متابولیسم چربی ها، کاهش نسبت اسیدهای چرب غیراشباع و بهبود استحکام غشاها، موجب کاهش میزان مالون دی آلدئید و بهبود پایداری سلولی شد. این نتایج نشان می دهد که استفاده از ترکیب پرایمینگ و محلول پاشی الاژیک اسید یک راه کار مؤثر برای کاهش تخریب غشاهای سلولی و افزایش مقاومت گیاه به خشکی است.

افزایش میزان پرولین در شرایط تنش خشکی یکی از مکانیسم های سازگاری گیاه برای حفظ تعادل اسمزی و کاهش اثرات کمبود آب است. پرولین به عنوان یک اسمولیت سازگار نقش مهمی در تنظیم فشار اسمزی، تثبیت ساختارهای پروتئینی و آنزیمی، حفاظت از غشاهای سلولی و کاهش اثرات ناشی از تنش اکسیداتیو دارد. افزایش این ترکیب در گیاهانی که با محدودیت آبی مواجه شده اند، بیانگر تلاش سلول ها برای حفظ رطوبت، جلوگیری از تخریب ساختارهای سلولی و افزایش پایداری سلول ها در برابر خشکی است (شارما و همکاران، ۲۰۲۰). بیش ترین افزایش پرولین در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی نشان داد که شدت تنش موجب فعال شدن بیش تر مسیرهای سنتز این ترکیب شده و گیاه برای حفظ بقا به افزایش تولید پرولین روی آورده است.

کاهش میزان پرولین در تیمارهای حاوی الاژیک اسید، به ویژه در تیمار ترکیبی پرایمینگ و محلول پاشی، نشان دهنده نقش این ترکیب در کاهش شدت استرس خشکی است. یکی از دلایل این کاهش، بهبود تعادل آبی گیاه در حضور الاژیک اسید است. کاهش میزان پرولین در تیمارهای حاوی الاژیک اسید می تواند ناشی از بهبود متابولیسم نیتروژن و تعادل مسیرهای بیوسنتزی باشد. پرولین از مسیرهای متابولیکی گلوتامات و اورنیتین تولید می شود که این مسیرها در شرایط تنش به طور فعال به سمت سنتز پرولین هدایت می شوند (تیندا-پاریلا^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). اما در گیاهانی که با الاژیک اسید تیمار شدند، به دلیل بهبود شرایط آبی و کاهش اثرات تنش (نظری و همکاران، ۲۰۱۸)، این مسیرها به جای تمرکز بر تولید پرولین، احتمالاً بیش تر در مسیرهای تولید پروتئین های ساختاری و آنزیمی مورد استفاده قرار گرفته اند. این موضوع نشان می دهد که گیاه در شرایط استفاده از الاژیک اسید، کم تر دچار تنش شده و متابولیسم خود را به سمت رشد و توسعه بهتر هدایت کرده است. نقش تنظیم هورمونی الاژیک اسید نیز در کاهش نیاز به پرولین قابل توجه است. در

شرایط خشکی، تولید هورمون‌های استرس مانند آبسزیک‌اسید و اتیلن افزایش می‌یابد که موجب بسته‌شدن روزنه‌ها، کاهش تعرق و تحریک مسیرهای سنتز پرولین می‌شود (فاروق و همکاران، ۲۰۱۹). اما در تیمارهای حاوی الاژیک‌اسید، تنظیم بهتر این هورمون‌ها احتمالاً منجر به کاهش شدت استرس و در نتیجه کاهش نیاز گیاه به سنتز بالای پرولین شده است. این اثر در تیمار ترکیبی پرایمینگ و محلول‌پاشی قوی‌تر بود، زیرا گیاه از ابتدای رشد در برابر تنش آماده‌تر شده و در طول دوره رشد نیز از حمایت متابولیکی بیش‌تری برخوردار بوده است.

در سطح ۷۵ درصد نیاز آبی، کاهش میزان پرولین در تیمارهای حاوی الاژیک‌اسید نسبت به تیمارهای تنش شدید کم‌تر بود، که نشان می‌دهد در این سطح از تنش، گیاه هنوز به میزان متوسطی از تنظیم اسمزی نیاز داشته است. در این شرایط، محلول‌پاشی الاژیک‌اسید اثر بیش‌تری در کاهش پرولین داشت که احتمالاً به‌دلیل جذب سریع‌تر و تنظیم متابولیسم در سطح برگ‌ها (تیندا-پاریلا و همکاران، ۲۰۲۲) بود. اما در سطح ۵۰ درصد نیاز آبی، ترکیب پرایمینگ و محلول‌پاشی بیش‌ترین اثر کاهش را بر میزان پرولین داشت، زیرا پرایمینگ موجب تقویت سیستم ریشه‌ای و جذب بهتر آب شده و محلول‌پاشی نیز تنظیم بهتر پاسخ‌های متابولیکی و هورمونی را به‌همراه داشته است. به‌طور کلی، افزایش میزان پرولین در تیمارهای تنش خشکی نشان‌دهنده تلاش گیاه برای حفظ تعادل اسمزی و کاهش اثرات کمبود آب بود. اما در تیمارهای حاوی الاژیک‌اسید، این ترکیب از طریق بهبود جذب و توزیع آب، کاهش تنش اکسیداتیو، تنظیم مسیرهای متابولیکی و تعدیل هورمونی، باعث کاهش نیاز گیاه به تولید پرولین شد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب پرایمینگ و محلول‌پاشی الاژیک‌اسید می‌تواند به‌عنوان یک راه‌کار مؤثر برای افزایش مقاومت گیاه در برابر خشکی و کاهش نیاز آن به تنظیم اسمزی از طریق پرولین باشد.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی تأثیر منفی قابل‌توجهی بر عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و محتوای آب نسبی برگ در لوبیا چیتی دارد. شدت این کاهش در تنش شدید (۵۰ درصد نیاز آبی) نسبت به تنش ملایم (۷۵ درصد نیاز آبی) بیش‌تر بود. با این حال، کاربرد ترکیبی پرایمینگ بذر و محلول‌پاشی برگ با ترکیبات آنتی‌اکسیدانی موجب افزایش تحمل گیاه به خشکی، بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی و کاهش استرس اکسیداتیو شد. در شرایط تنش ملایم، محلول‌پاشی برگ تأثیر معنی‌داری بر افزایش عملکرد دانه داشت، با این وجود در شرایط تنش شدید، ترکیب پرایمینگ و محلول‌پاشی نتایج بهتری به‌همراه داشت. همچنین، کاربرد این ترکیبات موجب افزایش محتوای آب نسبی برگ، کاهش فعالیت آنزیم‌های مرتبط با استرس اکسیداتیو و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی شد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت این روش‌ها در حفظ پایداری سلولی گیاه است. براساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود که در مناطق با تنش خشکی ملایم، محلول‌پاشی برگ به‌عنوان یک راه‌کار کارآمد مورد استفاده قرار گیرد، اما در شرایط خشکی شدید، ترکیب پرایمینگ و محلول‌پاشی به‌طور هم‌زمان اعمال شود. همچنین، انجام مطالعات تکمیلی برای تعیین دوزهای بهینه ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، بررسی مکانیسم‌های مولکولی تنظیم‌کننده پاسخ گیاه به این ترکیبات، و اجرای آزمایش‌های بلندمدت در شرایط مزرعه‌ای متنوع جهت بررسی پایداری اثرات این روش‌ها ضروری است. علاوه بر این، امکان ترکیب این روش‌ها با سایر تکنیک‌های مدیریتی مانند بهینه‌سازی آبیاری، انتخاب ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی و استفاده از ترکیبات زیست‌فعال دیگر مورد ارزیابی قرار گیرد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که کاربرد ترکیبات آنتی‌اکسیدانی می‌تواند به‌عنوان یک راه‌کار مؤثر برای کاهش اثرات منفی خشکی و بهبود پایداری عملکرد لوبیا چیتی در شرایط کم‌آبی مورد استفاده قرار گیرد.

۷. تشکر و قدردانی

از همکاری صمیمانه و حمایت ارزشمند مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران در اجرای این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

باقری، حمیدرضا؛ مقدم، علیرضا؛ دانائی، الهام و عبدوسی، وحید (۱۴۰۱). اثر محلول پاشی نانوکلات‌های آهن، پتاسیم، کلسیم و منگنز بر برخی خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی و عناصر غذایی گیاه نعنای فلفلی (*Mentha piperita*). *فیزیولوژی محیطی گیاهی*، ۲۹ (۵)، ۱-۱۳.

References

- Aebi, H. E. (1984). Catalase in vitro. *Methods Enzymology*, 105, 121-126.
- Ahn, J. C., Kang, J. W., Shin, I. S., & Park, Y. G. (2018). Ellagic acid modulates antioxidant enzyme activity and gene expression in soybean seedlings under drought stress. *Journal of Plant Physiology*, 231, 61-68.
- Alfei, S., Marengo, B., & Zuccari, G. (2020). Oxidative Stress, Antioxidant Capabilities, and Bioavailability: Ellagic Acid or Urolithins? *Antioxidants*, 9 (8), 707.
- Bagheri, H., Moghadam, A., Danaei, E., & Abdousi, V. (2022). The effect of foliar application of nanochelates of iron, potassium, calcium and manganese on some morphophysiological characteristics and nutrients of peppermint (*Mentha piperita*). *Plant Environmental Physiology*, 29 (5), 1-13. (In Persian).
- Bates, L. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil*, 39, 205-207.
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Annals of Biochemistry*, 72, 248-254.
- Dhindsa, R. S., & Motowe, W. (1981). Drought tolerance in two mosses: correlation with enzymatic defense against lipid peroxidation. *Journal of Experimental Botany*, 32, 79-91.
- Dujmović, M., Opačić, N., Radman, S., Fabek Uher, S., Voća, S., & Šic Žlabur, J. (2023). Accumulation of Stinging Nettle Bioactive Compounds as a Response to Controlled Drought Stress. *Agriculture*, 13 (7), 1358.
- El-Hawary, M. M., Hashem, O. S. M., & Hasanuzzaman, M. (2023). Seed Priming and Foliar Application with Ascorbic Acid and Salicylic Acid Mitigate Salt Stress in Wheat. *Agronomy*, 13 (2), 493.
- Essa, S. M., Wafa, H. A., Mahgoub, E.-S. I., Hassanin, A. A., Al-Khayri, J. M., Jalal, A. S., El-Moneim, D. A., ALshamrani, S. M., Safhi, F. A., & Eldomiaty, A. S. (2023). Assessment of eight faba Bean (*Vicia faba* L.) cultivars for drought stress tolerance through molecular, morphological, and physiochemical parameters. *Sustainability*, 15 (4), 3291.
- Farooq, M., Wahid, A., & Siddique, K. H. M. (2019). Seed priming improves drought tolerance in crops: A comprehensive review. *Environmental and Experimental Botany*, 166, 103464.
- Fregonezi, B. F., Pereira, A. E. S., Ferreira, J. M., Fraceto, L. F., Gomes, D. G., & Oliveira, H. C. (2024). Seed priming with nanoencapsulated gibberellic acid triggers beneficial morphophysiological and biochemical responses of tomato plants under different water conditions. *Agronomy*, 14 (3), 588.
- Ghalandari, S., Kafi, M., Goldanii, M., & Bagheri, A. (2019). The effect of drought stress on some of morphological and physiological traits of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Plants*, 18 (4), 124-139.
- Ghassemi-Golezani, K., Lotfi, R., & Shafagh-Kolvanagh, J. (2022). Seed priming and foliar application of ellagic acid mitigate drought stress effects on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Plant Growth Regulation*, 41, 1234-1245.

- Hosseinifard, M., Stefaniak, S., Ghorbani Javid, M., Soltani, E., Wojtyła, Ł., & Garnczarska, M. (2022). Contribution of exogenous proline to abiotic stresses tolerance in plants: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23 (9), 5186.
- Janpaijit, S., Sillapachaiyaporn, C., Theerasri, A., Charoenkiatkul, S., Sukprasansap, M., & Tencomnao, T. (2023). Cleistocalyx nervosum var. paniala Berry Seed Protects against TNF- α -Stimulated Neuroinflammation by Inducing HO-1 and Suppressing NF- κ B Mechanism in BV-2 Microglial Cells. *Molecules*, 28 (7), 3057.
- Javornik, T., Carović-Stanko, K., Gunjača, J., Vidak, M., & Lazarević, B. (2023). Monitoring Drought Stress in Common Bean Using Chlorophyll Fluorescence and Multispectral Imaging. *Plants*, 12 (6), 1386.
- Keshavarz, M., Shekari, F., & Abbasi, A. (2021). Seed priming with phenolic compounds improves germination and seedling growth of common bean under drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, 44 (15), 2255-2267.
- Khang, D. T., Dung, T. N., Elzaawely, A. A., & Xuan, T. D. (2016). Phenolic Profiles and Antioxidant Activity of Germinated Legumes. *Foods*, 5 (2), 27.
- Khatun, M., Sarkar, S., Era, F. M., Islam, A. K. M. M., Anwar, M. P., Fahad, S., Datta, R., & Islam, A. K. M. A. (2021). Drought Stress in Grain Legumes: Effects, Tolerance Mechanisms and Management. *Agronomy*, 11 (12), 2374.
- Kusvuran, S., & Dasgan, H. Y. (2019). Effects of drought stress on physiological and biochemical changes in *Phaseolus vulgaris* L. *Agricultural Water Management*, 186, 28-42.
- Mathobo, R., Marais, D., & Steyn, J. M. (2018). The effect of drought stress on yield, leaf gaseous exchange and chlorophyll fluorescence of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultural Water Management*, 180, 118-125.
- Melo-Sabogal, D. V., & Contreras-Medina, L. M. (2024). Elicitors and Biostimulants to Mitigate Water Stress in Vegetables. *Horticulturae*, 10 (8), 837.
- Mladenov, P., Aziz, S., Topalova, E., Renaut, J., Planchon, S., Raina, A., & Tomlekova, N. (2023). Physiological Responses of Common Bean Genotypes to Drought Stress. *Agronomy*, 13 (4), 1022.
- Molnár, K., Biró-Janka, B., Domokos, E., Nyárádi, I.-I., Fodorpatáki, L., Stoie, A., & Duda, M. M. (2023). Effects of Seed Priming and Foliar Treatment with Ascorbate, Cysteine, and Triacanol on Canola (*Brassica napus* L.) under Field Conditions. *Horticulturae*, 9 (2), 207.
- Nadeem, M., Li, J., Yahya, M., Sher, A., Ma, C., Wang, X., & Qiu, L. (2019). Research Progress and Perspective on Drought Stress in Legumes: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 20 (10), 2541.
- Oney-Montalvo, J. E., Avilés-Betanzos, K. A., Ramírez-Rivera, E. d. J., Ramírez-Sucre, M. O., & Rodríguez-Buenfil, I. M. (2020). Polyphenols Content in *Capsicum chinense* Fruits at Different Harvest Times and Their Correlation with the Antioxidant Activity. *Plants*, 9 (10), 1394.
- Papathanasiou, F., Ninou, E., Mylonas, I., Baxevanos, D., Papadopoulou, F., Avdikos, I., Sistanis, I., Koskosidis, A., Vlachostergios, D. N., Stefanou, S., Tigka, E., & Kargiotidou, A. (2022). The Evaluation of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Genotypes under Water Stress Based on Physiological and Agronomic Parameters. *Plants*, 11 (18), 2432.
- Parveen, A., Arslan Ashraf, M., Hussain, I., Perveen, S., Rasheed, R., Mahmood, Q., Hussain, S., Ditta, A., Hashem, A., Al-Arjani, A.-B. F., Alqarawi, A. A., & Abd Allah, E. F. (2021). Promotion of Growth and Physiological Characteristics in Water-Stressed *Triticum aestivum* in Relation to Foliar Application of Salicylic Acid. *Water*, 13 (9), 1316.
- Šamec, D., Karalija, E., Šola, I., Vujčić Bok, V., & Salopek-Sondi, B. (2021). The Role of Polyphenols in Abiotic Stress Response: The Influence of Molecular Structure. *Plants*, 10 (1), 118.
- Sawicki, T., Jabłońska, M., Danielewicz, A., & Przybyłowicz, K. E. (2024). Phenolic Compounds Profile and Antioxidant Capacity of Plant-Based Protein Supplements. *Molecules*, 29 (9), 2101.
- Sharma, A., Shahzad, B., Rehman, A., Bhardwaj, R., Landi, M., & Zheng, B. (2020). Response of phenylpropanoid pathway and the role of polyphenols in plants under abiotic stress. *Molecules*, 24 (13), 2452.
- Swiontek Brzezinska, M., Shinde, A. H., Kaczmarek-Szczepańska, B., Jankiewicz, U., Urbaniak, J., Boczkowski, S., Zasada, L., Ciesielska, M., Dembińska, K., Pałubicka, K., & Michalska-Sionkowska, M. (2024). Biodegradability Study of Modified Chitosan Films with Cinnamic Acid and Ellagic Acid in Soil. *Polymers*, 16 (5), 574.

- Tienda-Parrilla, M., López-Hidalgo, C., Guerrero-Sanchez, V. M., Infantes-González, Á., Valderrama-Fernández, R., Castillejo, M.-Á., Jorrín-Novo, J. V., & Rey, M. D. (2022). Untargeted MS-Based Metabolomics Analysis of the Responses to Drought Stress in *Quercus ilex* L. Leaf Seedlings and the Identification of Putative Compounds Related to Tolerance. *Forests*, 13 (4), 551.
- Tuiwong, P., Lordkaew, S., Veeradittakit, J., Jamjod, S., & Prom-u-thai, C. (2022). Seed Priming and Foliar Application with Nitrogen and Zinc Improve Seedling Growth, Yield, and Zinc Accumulation in Rice. *Agriculture*, 12 (2), 144.