DOI: 10.22092/spj.2026.374039.1480

"نهال و بذر"
جلد ۴۲، شماره ۱، سال ۱۴۰۵

مقاله پژوهشی

اثر محلول‌پاشی برخی از تعدیل‌کننده‌های تنش خشکی بر خصوصیات فنولوژیکی، اجزای عملکرد و عملکرد دو هیبرید ذرت دانه‌ای

Effect of Foliar Application of Some Drought Stress Mitigators on Phenological Characteristics, Yield Components and Yield of Two Grain Maize Hybrids

حسین احمدی[۱]، علی احمدی[۲*]، فرید گل‌زردی[۳] و منیژه سبک‌دست نودهی[۴]

۱- دانشجوی دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۲- استاد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۳- استادیار، بخش تحقیقات ذرت و گیاهان علوفه‌ای، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۴- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶

چکیده

احمدی، ح.، احمدی، ع.، گل‌زردی، ف. و سبک‌دست نودهی، م. ۱۴۰۵. اثر محلول‌پاشی برخی از تعدیل‌کننده‌های تنش خشکی بر خصوصیات فنولوژیکی، اجزای عملکرد و عملکرد دو هیبرید ذرت دانه‌ای. **نهال و بذر ۴۲:** ۹۰-۵۹

به منظور بررسی اثر سطوح مختلف کم‌آبی و محلول پاشی برخی از تعدیل‌کننده‌های تنش خشکی بر خصوصیات فنولوژیکی، اجزای عملکرد و عملکرد دو هیبرید ذرت دانه‌ای، آزمایشی به صورت استریپ‌پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال‌های زراعی ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در کرج اجرا شد. عامل عمودی شامل سه رژیم آبیاری (آبیاری کامل، تنش متوسط و شدید با تأمین ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) و عامل افقی شامل ترکیب چهار تیمار محلول‌پاشی (شاهد، ال-آرژینین، اسید سالیسیلیک و گلایسین بتائین) و دو هیبرید ذرت تری‌وی کراس ۶۴۷ و سینگل کراس ۷۰۴ بود. با اعمال تنش متوسط و شدید، عملکرد دانه به ترتیب ۱۹/۱ و ۴۳/۹ درصد کاهش یافت. تنش خشکی سبب افزایش فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل، کوتاه شدن دوره پر شدن دانه، افت تعداد دانه در بلال و کاهش وزن هزار دانه شد. بیشترین عملکرد دانه در شرایط آبیاری کامل (۷/۲۶ تن در هکتار) با کاربرد گلایسین بتائین در سینگل کراس ۷۰۴ و در شرایط تنش متوسط و شدید (به ترتیب ۶/۰۱ و ۴/۱۷ تن در هکتار) با همین تیمار در تری‌وی کراس ۶۴۷ به دست آمد. به‌طور کلی، پاسخ عملکرد دانه به محلول‌پاشی به سطح تنش و هیبرید بستگی داشت. تاثیر گلایسین بتائین در همه شرایط موثر بود و کارایی آن با تشدید تنش بیشتر شد، اما هیبرید ذرت برتر با تشدید تنش تغییر کرد. از این‌رو انتخاب هیبرید ذرت متناسب با شدت تنش همراه با محلول‌پاشی گلایسین بتائین، می تواند راهبرد مناسبی برای تولید ذرت در شرایط محدودیت آب آبیاری باشد.

واژه‌های کلیدی: ذرت، ، رژیم آبیاری، تحمل به خشکی، دوره پرشدن دانه،گلایسین بتائین.

* نگارنده مسئول: ahmadia@ut.ac.ir تلفن: ۰۲۶۳۲۲۴۶۰۷۴

2026© The Authors. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

مقدمه

در میان تنش‌های غیرزیستی، خشکی مخرب‌ترین عامل محدودکننده تولید محصولات زراعی در جهان است، به‌گونه‌ای که برآوردها نشان می‌دهد این تنش در دهه گذشته بیش از ۳۰ میلیارد دلار (معادل ۳۴ درصد از کل خسارات تولیدات کشاورزی) به محصولات کشاورزی دنیا زیان وارد کرده است (Gupta *et al*., 2020). تولید ذرت (*Zea mays* L.) در جهان نیز بیش از هر عامل محدودکننده دیگر محیطی با تنش خشکی مواجه است و کمبود آب بسته به شدت و مرحله وقوع، عملکرد دانه ذرت را بین ۳۰ تا ۶۶ درصد کاهش می‌دهد (Sah *et al*., 2020; Mahrokh *et al*., 2020; Golzardi *et al*., 2023).

اشرفی و همکاران (Ashrafi *et al*., 2016) گزارش کردند که تأمین ۷۵ درصد نیاز آبی ذرت، عملکرد دانه را ۲۰/۳ درصد کاهش داد، در حالی که با کاهش تأمین آب به ۵۰ درصد، کاهش عملکرد دانه به ۷۰/۱ درصد رسید. اسماعیلی و همکاران (Esmaily *et al*., 2022) نیز نشان دادند که با تأمین ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد نیاز آبی، عملکرد دانه ذرت در مقایسه با تأمین کامل نیاز آبی به‌ترتیب ۶/۸، ۵۲/۴ و ۸۲ درصد کاهش یافت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که پاسخ عملکرد دانه ذرت به کاهش تأمین آب خطی نیست و پس از عبور کمبود آب از یک آستانه مشخص، عملکرد دانه با شدت بیشتری کاهش می‌یابد (Golzardi *et al*., 2017).

با توجه به تشدید دوره‌های خشکی و محدودیت منابع آب کشاورزی، اعمال آبیاری کمتر از نیاز آبی گیاه در بسیاری از سامانه‌های تولید به یک واقعیت ناگزیر تبدیل شده است (Tavazoh *et al*., 2024). تنش خشکی با برهم زدن تعادل آبی گیاه، واکنش‌های مختلفی در سطوح مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی برمی‌انگیزد (Zhang *et al*., 2022; Mahrokh *et al*., 2025a). حساسیت ذرت به کمبود آب در مرحله گلدهی بیشتر از هر مرحله دیگر است، زیرا رشد کاکل بیش از رشد گل تاجی با کاهش پتانسیل آب گیاه محدود می‌شود. پیامد این عدم تقارن، افزایش فاصله زمانی گرده‌افشانی تا ظهور کاکل، سقط دانه‌های تشکیل‌شده و کوتاه شدن دوره پر شدن دانه است (Sah *et al*., 2020). این فاصله یکی از معتبرترین شاخص‌های مزرعه‌ای و فنولوژیک تحمل به خشکی در ذرت است و با توازن منبع و مقصد مرتبط است. هرچه فاصله زمانی گرده‌افشانی تا ظهور کاکل بیشتر باشد، احتمال گرده‌افشانی موفق کمتر، دانه‌بندی بلال ناقص‌تر و حساسیت به تنش خشکی بیشتر خواهد بود (Gupta *et al*., 2020; Shemi *et al*., 2021; Zhang *et al*., 2022).

به‌نژادی برای افزایش تحمل به تنش خشکی راهکار پایداری برای مدیریت مشکل کم‌آبی است، ولی زمان‌بر است و برتری هیبریدهای ذرت نیز در محیط‌های مختلف ثابت نیست. به این دلیل، محلول‌پاشی ترکیبات تنظیم‌کننده رشد

و تنظیم‌کننده‌های اسمزی به‌عنوان مداخله‌ای کم‌هزینه، سریع و قابل اجرا در مقیاس مزرعه مورد توجه قرار گرفته است (Matysiak *et al*., 2020; Pardhi *et al*., 2024). گلایسین بتائین یک ترکیب چهارآمینی سازگار است که با تنظیم اسمزی، پایدارسازی پروتئین‌های فتوسیستم II و حفاظت از غشای تیلاکوئید، فعالیت فتوسنتزی را در شرایط کمبود آب حفظ می‌کند (Hasanuzzaman *et al*., 2019). در ذرت، کاربرد برگی این ترکیب محتوای نسبی آب برگ و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش و تجمع گونه‌های فعال اکسیژن را کاهش داده است (Shafiq *et al*., 2021). بای و همکاران (Bai *et al*., 2022) نشان دادند که گلایسین بتائین با تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با پاسخ به تنش، مسیرهای دفاعی گیاه ذرت تحت تنش خشکی را تقویت کرده و اختلالات فنولوژیکی ناشی از کمبود آب را کاهش می‌دهد. میری و ضمانی مقدم (Miri and Zamani Moghadam, 2014) نیز گزارش کردند که محلول‌پاشی گلایسین بتائین در دورهای آبیاری ۴ روز (نرمال) و ۸ روز (تنش خشکی) توانست با افزایش شاخص سطح برگ و بهبود محتوی کلروفیل، عملکرد و اجزای عملکرد دانه ذرت را افزایش دهد.

اسید سالیسیلیک از طریق مسیرهای پیام‌رسانی وابسته به پراکسید هیدروژن عمل می‌کند و بیان ژن‌های مرتبط با آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، تنظیم روزنه‌ای و تنظیم تعادل هورمونی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (González-Villagra *et al*., 2022). کاربرد برگی اسید سالیسیلیک در ذرت تحت شرایط تنش خشکی، محتوای کلروفیل، مقاومت روزنه‌ای و وزن دانه را افزایش می‌دهد (Tayyab *et al*., 2020; Al Rawi *et al*., 2021). قاسمی گلعذانی و موسوی در یک آزمایش مزرعه‌ای گزارش کردند که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک با غلظت سه میلی‌مولار با بهبود محتوای نسبی آب برگ، پایداری غشا، محتوای کلروفیل و شاخص سطح برگ، موجب افزایش عملکرد دانه ذرت تحت شرایط تنش خشکی شد (Ghassemi-Golezani and Mousavi, 2022).

نصر و همکاران (Nasr *et al*., 2025) نیز در شرایط گلخانه‌ای نشان دادند که کاربرد برگی اسید سالیسیلیک با افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی، بهبود پایداری غشای سلولی و کاهش تجمع پراکسید هیدروژن، بخشی از آثار نامطلوب تنش خشکی در ذرت را کاهش داد. آرژینین نیز پیش‌ساز مشترک نیتریک اکساید و پلی‌آمین‌ها است و از این مسیر در تنظیم بسته شدن روزنه‌ها، پایداری غشا و تحمل به خشکی نقش دارد (Hasanuzzaman *et al*., 2018). در ذرت، کاربرد ال-آرژینین محتوای کلروفیل و کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II را به‌طور قابل‌توجهی افزایش و میزان هیدروژن پراکسید و مالون‌دی‌آلدئید را کاهش داده است (Sun *et al*., 2023).

با وجود مطالعات انجام‌شده، مقایسه همزمان اثر

گلایسین بتائین، اسید سالیسیلیک و ال-آرژینین تحت چند رژیم آبیاری و در شرایط مزرعه‌ای محدود است. این ترکیب‌ها معمولاً جداگانه بررسی شده‌اند و مقایسه‌ای بین اثربخشی آن‌ها انجام نشده است (Al Rawi *et al*., 2021; Shafiq *et al*., 2021; Sun *et al*., 2023). افزون بر این، مشخص نیست تغییرات فنولوژیکی و اجزای عملکرد در پاسخ ذرت به این ترکیبات چگونه بروز می‌کند.

بنابراین، پژوهش حاضر با هدف مقایسه پاسخ‌های فنولوژیکی و عملکردی دو هیبرید تری‌وی‌کراس ۶۴۷ و سینگل‌کراس ۷۰۴ ذرت به سه سطح تأمین آب و سه ترکیب تعدیل‌کننده تنش در شرایط مزرعه انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در دو سال زراعی ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ در مزرعه تحقیقاتی ۴۰۰ هکتاری مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در کرج اجرا شد. مختصات محل اجرا ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه و ۵۴/۰۲ ثانیه عرض شمالی، ۵۰ درجه و ۵۶ دقیقه و ۳۲/۱۰ ثانیه طول شرقی و ارتفاع ۱۲۷۹ متر از سطح دریا بود. میانگین بلندمدت بارندگی سالانه منطقه حدود ۲۵۰ میلی‌متر و اقلیم منطقه نیمه‌خشک است. میانگین دمای هوا و مجموع بارش ماهانه در دوره آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- میانگین دمای هوا و مجموع بارش ماهانه در دوره آزمایش در سال‌های زراعی ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴ در کرج

Table 1. Monthly mean air temperature and total precipitation during the experimental period in 2024 and 2025 growing seasons in Karaj in Iran

		میانگین دما (سانتی‌گراد) Mean temperature (°C)		بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	
Month	ماه	2024	2025	2024	2025
June	خرداد	24.7	24.5	14	2
July	تیر	27.7	27.8	4	0
August	مرداد	28.4	30.1	0	0
September	شهریور	25.5	25.0	2	0
October	مهر	18.7	19.5	30	0

خاک مزرعه دارای بافت رسی‌شنی، جرم مخصوص ظاهری ۱/۳۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب، اسیدیته ۷/۵، هدایت الکتریکی ۰/۷ دسی‌زیمنس بر متر و رطوبت ظرفیت زراعی ۲۶ درصد وزنی بود. بر اساس نتایج آزمون خاک، پیش از کاشت ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص از منبع اوره و ۱۴۰ کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع دی‌فسفات آمونیوم به خاک افزوده شد و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن دیگر نیز در مرحله چهار برگی به صورت همراه با آبیاری

مصرف شد.

آزمایش به‌صورت استریپ پلات فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار اجرا شد. رژیم آبیاری در سه سطح شامل آبیاری کامل (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی)، تنش خشکی متوسط (۷۵ درصد نیاز آبی) و تنش خشکی شدید (۵۰ درصد نیاز آبی) به عنوان عامل عمودی و در قالب نه نوار (سه سطح آبیاری در سه تکرار) قرار گرفت. ترکیب چهار تیمار محلول‌پاشی و دو هیبرید نیز به عنوان عامل افقی و در هشت نوار قرار داده شد. تیمارهای محلول‌پاشی شامل شاهد، ال‌آرژینین، اسید سالیسیلیک و گلایسین بتائین بود و دو هیبرید ذرت مورد استفاده تری‌وی‌کراس ۶۴۷ و سینگل‌کراس ۷۰۴ بودند.

هیبرید تری‌وی‌کراس ۶۴۷ از تلاقی هیبرید سینگل‌کراس ۶۴۷ (K1264/1 × B73) به عنوان پایه مادری و لاین MO17 به عنوان پایه پدری و هیبرید سینگل‌کراس ۷۰۴ از تلاقی لاین‌های B73 (مادری) و MO17 (پدری) حاصل شده اند. انتخاب این هیبریدها بر پایه شواهد پیشین از کاهش کمتر عملکرد دانه در هیبرید تری‌وی‌کراس ۶۴۷ نسبت به سینگل‌کراس ۷۰۴ در شرایط تنش خشکی انجام شد (Golzardi *et al*., 2017; Khatibi *et al*., 2022). هر واحد آزمایشی شامل پنج ردیف کاشت پنج متری با فاصله بین ردیف ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بین بوته روی ردیف ۱۸ سانتی‌متر بود تا تراکم ۷۴ هزار بوته در هکتار حاصل شود.

مقدار تبخیر و تعرق مرجع به صورت روزانه از ایستگاه هواشناسی واقع در مجاورت مزرعه آزمایشی، دریافت شد. این ایستگاه مقدار تبخیر و تعرق مرجع را بر پایه معادله پنمن-مانتیث محاسبه می‌کند (Allen *et al*., 1998). نیاز آبی گیاه در هر روز بر اساس رابطه ۱ به دست آمد:

$$ETc = ETo \times Kc \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن ETc تبخیر و تعرق واقعی گیاه (میلی‌متر در روز)، ETo تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر در روز) و Kc ضریب گیاهی ذرت است. ضرایب گیاهی متناسب با مرحله رشد و بر اساس نتایج آزمایش‌های پیشین و کالیبراسیون مزرعه‌ای در محل اجرای پژوهش تعیین شد (Allen *et al*., 1998).

مقادیر ضریب گیاهی بر پایه کالیبراسیون آزمایش‌های پیشین برای مراحل سبز شدن، ۲-۳، ۴، ۵، ۶-۸، ۹-۱۰، ۱۱-۱۲ و ۱۳-۱۴ برگی، ظهور گل تاجی، ظهور کاکل، تاولی شدن، شیری دانه، خمیری دانه، دندانه‌ای شدن و تشکیل لایه سیاه به‌ترتیب برابر با ۰/۳۵، ۰/۳۶، ۰/۴۱، ۰/۵۳، ۰/۶۸، ۰/۷۷، ۰/۸۹، ۰/۹۵، ۱/۰۲، ۱/۰۸، ۱/۱۴، ۱/۱۶، ۱/۱۶، ۱/۱۰ و ۰/۷۹ در نظر گرفته شد. حجم آب آبیاری در هر نوبت برای هر کرت از رابطه ۲ محاسبه شد:

$$V = (ETc \times A \times T) / Ea \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

که در آن V حجم آب آبیاری، ETc مجموع نیاز آبی روزانه گیاه در فاصله دو آبیاری، A مساحت کرت، T ضریب تیمار آبیاری (به ترتیب ۱، ۰/۷۵ و ۰/۵۰ برای تأمین ۱۰۰، ۷۵ و

۵۰ درصد نیاز آبی) و Ea راندمان کاربرد سامانه آبیاری نواری است که معادل ۹۰ درصد در نظر گرفته شد (Karimi and Gomrokchi, 2011).

آبیاری با استفاده از نوار تیپ انجام شد و حجم آب ورودی به کرت‌ها با کنتور حجمی کنترل گردید. اعمال تیمارهای تنش از مرحله چهار برگی آغاز شد و تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی ادامه یافت. تا پیش از مرحله چهار برگی، همه کرت‌ها به طور یکسان و در حد تأمین کامل نیاز آبی آبیاری شدند تا استقرار یکنواخت گیاهچه‌ها تضمین شود. کل آب آبیاری در سال ۱۴۰۳ برای آبیاری کامل، تنش خشکی متوسط و تنش خشکی شدید به‌ترتیب ۸۰۴۱، ۶۲۱۷ و ۴۳۹۳ مترمکعب در هکتار و در سال ۱۴۰۴ به‌ترتیب ۸۳۵۰، ۶۴۷۹ و ۴۶۰۹ مترمکعب در هکتار بود.

ال‌آرژینین و اسید سالیسیلیک با غلظت سه میلی‌مولار (به‌ترتیب ۵۲۳ و ۴۱۴ میلی‌گرم در لیتر) و گلایسین بتائین با غلظت پنج گرم در لیتر استفاده شد (Matysiak *et al*., 2020; Al Rawi *et al*., 2021; Pardhi *et al*., 2024). هر سه ترکیب با درجه خلوص آزمایشگاهی (۹۹ درصد) از شرکت مرک (Merck) آلمان تهیه شدند. شماره ثبت شیمیایی ال-آرژینین، اسید سالیسیلیک و گلایسین بتائین به‌ترتیب ۷۴-۷۹-۳، ۶۹-۷۲-۷ و ۱۰۷-۴۳-۷ بود. محلول‌های مادر در آزمایشگاه تهیه و بلافاصله به مزرعه منتقل و در مخزن حل شدند. ال-آرژینین و گلایسین بتائین مستقیماً در آب حل شدند. اسید سالیسیلیک به دلیل حلالیت کم در آب، ابتدا در اتانول ۹۵ درصد حل و سپس به آب افزوده شد. توین ۲۰ با غلظت دو میلی‌لیتر در لیتر در پایان به‌عنوان سورفکتانت برای بهبود پوشش و جذب برگی به همه محلول‌ها افزوده شد.

برای دسترسی به کرت‌های آزمایشی هنگام محلول‌پاشی، فرد پاشنده از طریق راهروهای دو متری بین بلوک‌ها وارد مزرعه شد و در امتداد فضای بین کرت‌ها حرکت کرد. محلول‌پاشی در شرایط وزش باد کم و پس از غروب آفتاب انجام شد و برای کاهش انتقال محلول به کرت‌های مجاور، دو خط نکاشت (۱/۵ متر) بین کرت‌ها منظور گردید. حجم آب مصرفی در هر نوبت ۳۲۰ لیتر در هکتار بود، بنابراین میزان مصرف ال‌آرژینین، اسید سالیسیلیک و گلایسین بتائین در هر نوبت به‌ترتیب ۱۶۷/۴، ۱۳۲/۵ و ۱۶۰۰ گرم در هکتار بود. محلول‌پاشی در سه نوبت و با فاصله هر ده روز یک‌بار انجام شد. نوبت نخست در مرحله شش تا هشت برگی و نوبت آخر در آستانه گلدهی بود. عملیات محلول‌پاشی با سمپاش پشتی موتوری انجام گرفت. تیمار شاهد در همان زمان‌ها و با همان حجم آب حاوی مواد کمکی متناظر (توین ۲۰) محلول‌پاشی شد.

ثبت مراحل فنولوژیکی بر پایه مشاهده روزانه از زمان کاشت انجام شد (Abendroth *et al*., 2011). تاریخی به عنوان تاریخ وقوع هر مرحله ثبت شد که در آن ۵۰ درصد گیاهان به

آن مرحله رسیده بودند. تعداد روز تا ظهور گل تاجی زمانی ثبت شد که شاخه‌های اصلی گل تاجی از غلاف برگ پرچم خارج شده بودند. تعداد روز تا گرده‌افشانی هنگامی ثبت شد که ریزش دانه گرده از حداقل نیمی از طول محور گل تاجی آغاز شده بود. تعداد روز تا ظهور کاکل زمانی ثبت شد که کاکل‌ها به اندازه دو تا سه سانتی‌متر از پوشش بلال خارج شده بودند. فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل از تفاضل دو تاریخ اخیر محاسبه شد.

مرحله تاولی شدن دانه (R2) با کنارزدن محتاطانه پوشش بلال و مشاهده دانه‌های سفید، برجسته و حاوی مایع شفاف در بخش میانی بلال تعیین شد (Abendroth *et al*., 2011). این ارزیابی در ردیف‌های اول و پنجم هر کرت انجام شد تا به ردیف‌های میانی ویژه برداشت عملکرد دانه آسیب وارد نشود. رسیدگی فیزیولوژیک (R6) بر پایه تشکیل لایه سیاه در محل اتصال دانه به چوب بلال ثبت شد. طول دوره پر شدن دانه از فاصله زمانی میان مرحله تاولی شدن دانه و رسیدگی فیزیولوژیکی محاسبه شد.

برای اندازه‌گیری اجزای عملکرد، بلال‌های موجود در ردیف میانی هر کرت انتخاب و صفات تعداد بلال، تعداد ردیف در بلال، تعداد دانه در ردیف و تعداد دانه در بلال شمارش شدند. وزن هزار دانه از پنج زیرنمونه ۲۰۰ دانه‌ای با ترازوی دیجیتال دارای دقت ۰/۰۱ گرم تعیین شد. عملکرد دانه با برداشت دو ردیف میانی هر کرت از سطحی معادل سه مترمربع اندازه‌گیری شد. بلال‌ها به صورت دستی برداشت، توزین و پس از خشک شدن، دانه آن‌ها جدا شد. رطوبت دانه بلافاصله پس از دانه‌کردن اندازه‌گیری شد و عملکرد دانه بر مبنای رطوبت استاندارد ۱۴ درصد به تن در هکتار تبدیل گردید.

پیش از انجام تجزیه واریانس مرکب داده‌ها، همگنی واریانس خطای آزمایشی در دو سال با استفاده از آزمون بارتلت بررسی شد (جدول ۲). نتیجه این آزمون برای همه صفات، به‌جز تعداد ردیف دانه در بلال، غیرمعنی‌دار بود. بنابراین، فرض همگنی واریانس خطا برای این صفات تأیید و تجزیه واریانس مرکب برای آن‌ها انجام شد. برای صفت تعداد ردیف دانه در بلال، به دلیل ناهمگنی واریانس خطای دو سال، تجزیه واریانس مرکب انجام نشد. افزون بر این، تجزیه جداگانه داده‌های هر سال نشان داد که اثر تیمارهای آزمایشی بر این صفت در هیچ‌یک از دو سال معنی‌دار نبود. ازاین‌رو، این صفت از ادامه گزارش نتایج کنار گذاشته شد. سال و بلوک در سال به‌عنوان عوامل تصادفی و رژیم آبیاری، محلول‌پاشی و هیبرید به‌عنوان عوامل ثابت در نظر گرفته شدند. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. محاسبات آماری در نرم‌افزار SAS و رسم نمودار در نرم‌افزار Excel انجام شد.

جدول ۲- نتایج آزمون بارتلت برای بررسی همگنی واریانس خطاهای آزمایشی صفات در دو سال
Table 2. Bartlett's test results for assessing the homogeneity of experimental error variances of the traits across two years

Trait	صفت	Chi-Square	Pr > ChiSq
Day to tasseling	روز تا تاسل‌دهی	0.00182	0.966
Day to anthesis	روز تا گرده‌افشانی	0.00216	0.963
Day to silking	روز تا کاکل‌دهی	0.01790	0.894
Anthesis-silking interval	فاصله گرده‌افشانی تا کاکل‌دهی	0.20760	0.649
Day to maturity	روز تا رسیدگی	0.11900	0.730
Grain filling period	دوره پر شدن دانه	0.21230	0.645
Grain yield	عملکرد دانه	0.00009	0.992
Kernel no. row^{-1}	تعداد دانه در ردیف	0.00004	0.995
Row no. ear^{-1}	تعداد ردیف در بلال	4.98500	0.026
Kernel no. ear^{-1}	تعداد دانه در بلال	0.02250	0.881
Thousand kernel weight	وزن هزار دانه	0.97700	0.323
Ear no. m^{-2}	تعداد بلال در مترمربع	3.36920	0.066

نتایج و بحث

تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد اثر سال بر فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل، طول دوره پر شدن دانه، تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی، عملکرد دانه، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال و تعداد بلال در مترمربع در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد معنی‌دار بود (جدول‌های ۳ و ۴). رژیم آبیاری همه صفات فنولوژیک و عملکردی را، به‌جز تعداد بلال در مترمربع، تحت تأثیر قرار داد. محلول‌پاشی بر تعداد روز تا ظهور گل تاجی، گرده‌افشانی و ظهور کاکل، فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل، طول دوره پر شدن دانه، عملکرد دانه، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال و وزن هزار دانه اثر معنی‌دار داشت (جدول‌های ۳ و ۴).

برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی بر تعداد روز تا ظهور گل تاجی، روز تا گرده‌افشانی، روز تا ظهور کاکل، فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل، تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، طول دوره پر شدن دانه، عملکرد دانه، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال و وزن هزار دانه معنی‌دار بود (جدول‌های ۳ و ۴). برهمکنش محلول‌پاشی × رقم فقط بر تعداد روز تا ظهور گل تاجی، روز تا گرده‌افشانی و روز تا ظهور کاکل معنی‌دار شد. برهمکنش آبیاری × رقم بر فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل، طول دوره پر شدن دانه، عملکرد دانه، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال، وزن هزار دانه و تعداد بلال در مترمربع معنی‌دار شد. برهمکنش سه‌گانه آبیاری × محلول‌پاشی × رقم فقط بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۴).

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب برای صفات فنولوژیکی هیبریدهای ذرت تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی در سال‌های ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴

Table 3. Combined analysis of variance for phenological traits of maize hybrids as affected by experimental treatments in 2024 and 2025

			میانگین مربعات Mean Squares					
S.O.V.	منبع تغییرات	درجه آزادی d.f.	روز تا تاسل‌دهی Day to tasseling	روز تا گرده‌افشانی Day to anthesis	روز تا کاکل‌دهی Day to silking	فاصله گرده‌افشانی تا کاکل‌دهی Anthesis-silking interval	روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی Day to physiological maturity	طول دوره پر شدن دانه Grain filling period duration
Year (Y)	سال	1	4.69	4.70	9.00	0.70*	31.17*	14.6*
Block/Y	بلوک/سال	4	1.27	1.44	1.88	0.06	1.70	1.29
Irrigation (I)	آبیاری	2	193.02**	324.2**	815.10**	112.5**	533.40**	664.09**
Y × I	سال × آبیاری	2	0.36	0.88	0.08	0.71	0.67	1.46
Error 1	خطای ۱	8	1.90	3.41	4.75	0.87	2.12	3.75
Foliar spraying (F)	محلول‌پاشی	3	28.9*	40.30*	78.90**	7.05*	5.41	27.09**
Y × F	سال × محلول‌پاشی	3	1.93	1.58	2.01	0.37	1.03	0.15
Cultivar (C)	رقم	1	100.01	103.3	148.02	4.00	14.06	16.00
Y × C	سال × رقم	1	2.77	3.36	1.00	0.69	0.17	0.25
F × C	محلول‌پاشی × رقم	3	3.90*	3.00*	6.89*	1.24	1.80	3.24
Y × F × C	سال × محلول‌پاشی × رقم	3	0.24	0.32	0.46	0.15	7.80	6.12
Error 2	خطای ۲	28	2.79	3.75	5.38	0.79	2.36	2.87
I × F	آبیاری × محلول‌پاشی	6	5.19*	6.90*	15.20**	2.15*	15.94**	5.07*
Y × I × F	سال × آبیاری × محلول‌پاشی	6	0.93	1.21	1.46	0.28	1.72	0.62
I × C	آبیاری × رقم	2	19.70	19.50	53.80	8.77*	8.31	40.6*
Y × I × C	سال × آبیاری × رقم	2	7.69*	8.42	7.75	0.13	1.17	0.89
I × F × C	آبیاری × محلول‌پاشی × رقم	6	0.49	0.88	1.92	0.45	2.19	2.23
Y × I × F × C	سال × آبیاری × محلول‌پاشی × رقم	6	1.21	1.99	3.24	0.37	1.78	0.90
Error 3	خطای ۳	56	2.02	2.90	3.61	0.53	2.79	2.19
C.V. (%)	ضریب تغییرات (درصد)	-	3.30	3.70	3.80	9.90	3.50	5.00

* and **: Significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد.

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب برای عملکرد دانه و اجزای عملکرد هیبریدهای ذرت تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی در سال‌های ۱۴۰۳ و ۱۴۰۴

Table 4. Combined analysis of variance for grain yield and yield components of maize hybrids as affected by experimental treatments in 2024 and 2025

			Mean Squares میانگین مربعات				
S.O.V.	منبع تغییرات	درجه آزادی d.f.	عملکرد دانه Grain yield	تعداد دانه در ردیف Kernel no. row^{-1}	تعداد دانه در بلال Kernel no. ear^{-1}	وزن هزار دانه Thousand kernel weight	تعداد بلال در مترمربع Ear no. m^{-2}
Year (Y)	سال	1	1.38*	22.40**	8388**	2244	4.17**
Block/Y	بلوک/سال	4	0.16	0.52	117	464*	0.08
Irrigation (I)	آبیاری	2	113.3**	350.09**	72100**	51447**	7.08
Y × I	سال × آبیاری	2	0.01	1.01	228	17	0.45
Error 1	خطای ۱	8	0.25	1.61	540	296	0.19
Foliar spraying (F)	محلول‌پاشی	3	1.01*	11.32*	2940**	1370*	0.09
Y × F	سال × محلول‌پاشی	3	0.06	0.76	73	145	0.08
Cultivar (C)	رقم	1	0.01	1.91	1702	103	2.59
Y × C	سال × رقم	1	0.03	1.87	253	9.0	0.02
F × C	محلول‌پاشی × رقم	3	0.05	0.83	109	165	0.07
Y × F × C	سال × محلول‌پاشی × رقم	3	0.02	0.34	82	27	0.01
Error 2	خطای ۲	28	0.04	1.80	720	576	0.23
I × F	آبیاری × محلول‌پاشی	6	0.44**	0.81**	183**	467*	0.08
Y × I × F	سال × آبیاری × محلول‌پاشی	6	0.02	0.07	20	58	0.02
I × C	آبیاری × رقم	2	1.42**	38.98**	8323**	1579*	3.00**
Y × I × C	سال × آبیاری × رقم	2	0.01	0.03	18	60	0.01
I × F × C	آبیاری × محلول‌پاشی × رقم	6	0.31*	0.79	163	14	0.10
Y × I × F × C	سال × آبیاری × محلول‌پاشی × رقم	6	0.04	0.20	49	4	0.06
Error 3	خطای ۳	56	0.13	1.65	514	172	0.22
C.V. (%)	ضریب تغییرات (درصد)	-	8.70	6.10	7.50	8.30	6.40

* and **: Significant at the 5% and 1% probability levels, respectively. * و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

صفات فنولوژیکی

در سال دوم، طول دوره پر شدن دانه حدود ۰/۷ روز بیشتر و رسیدگی فیزیولوژیکی حدود ۰/۹ روز زودتر از سال اول بود (جدول ۵). فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل نیز در سال دوم کوتاه‌تر بود. گرم‌تر بودن دمای هوا در سال دوم (جدول ۱)، می‌تواند تا حدودی این تفاوت‌ها در دو سال را توضیح دهد، اما چون برهمکنش‌های سال با عوامل آزمایشی معنی‌دار نبودند، نمی‌توان تفاوت جزئی صفات فنولوژیکی بین دو سال را مستقیماً به یک متغیر هواشناسی خاص نسبت داد و تنها می‌توان آن را در چارچوب تفاوت کلی شرایط محیطی دو سال تفسیر کرد.

مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی (جدول ۶) نشان داد که پاسخ فنولوژیکی گیاه به ترکیبات محلول‌پاشی‌شده به وضعیت تأمین آب وابسته بود. در آبیاری کامل، هیچ‌یک از ترکیبات از نظر زمان ظهور گل تاجی، گرده‌افشانی، ظهور کاکل، فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل و طول دوره پر شدن دانه با شاهد اختلاف معنی‌داری نداشتند. بنابراین، در شرایط مطلوب آبی، محلول‌پاشی تغییر مشخصی در زمان‌بندی رشد زایشی ایجاد نکرد (جدول ۶).

در شرایط تنش خشکی متوسط، گلایسین بتائین زمان ظهور گل تاجی را به طور معنی‌داری از ۶۰/۴ به ۵۸/۴ روز، گرده‌افشانی را از ۶۴/۲ به ۶۱/۴ روز و ظهور کاکل را از ۷۲/۱ به ۶۸/۴ روز کاهش داد. همچنین فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل از ۷/۹ به ۷/۰ روز کاهش یافت و طول دوره پر شدن دانه به طور معنی‌داری از ۲۸/۷ به ۳۱/۰ روز افزایش پیدا کرد. بنابراین، گلایسین بتائین ضمن کاهش اثر منفی تنش خشکی (تأخیر مراحل گل‌دهی)، فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل را ۰/۹ روز کوتاه و دوره مؤثر تشکیل تا رسیدگی دانه را ۲/۳ روز طولانی‌تر کرد. اثر ال-آرژینین و اسید سالیسیلیک بر دوره پرشدن دانه، روز تا رسیدگی و روز تا گرده‌افشانی کمتر از گلایسین بتائین بود و با شاهد اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۶).

در شرایط تنش خشکی شدید، تفاوت میان تیمارهای محلول‌پاشی بیشتر نمایان شد. گلایسین بتائین در مقایسه با شاهد، ظهور گل تاجی را به طور معنی‌داری از ۶۴/۲ به ۶۰/۷ روز، گرده‌افشانی را از ۶۸/۳ به ۶۴/۴ روز و ظهور کاکل را از ۷۸/۳ به ۷۲/۲ روز کاهش داد. بنابراین، کاربرد این ترکیب ظهور کاکل را ۶/۱ روز جلو انداخت و فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل را به طور معنی‌داری از ۹/۹ به ۷/۸ روز کاهش داد. طول دوره پر شدن دانه نیز به طور معنی‌داری از ۲۴/۳ روز در شاهد به ۲۷/۱ روز در تیمار گلایسین بتائین افزایش یافت. ال-آرژینین و اسید سالیسیلیک نیز طول دوره پر شدن دانه را به‌ترتیب به ۲۵/۹ و ۲۶/۸ روز افزایش دادند، اما گلایسین بتائین بیشترین تغییر را ایجاد کرد. در شرایط تنش شدید، رسیدگی فیزیولوژیکی در تیمار گلایسین بتائین ۳/۸ روز زودتر از شاهد رخ داد. این نتایج نشان می‌دهد

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرهای اصلی عوامل آزمایشی بر صفات فنولوژیکی هیبریدهای ذرت

Table 5. Mean comparison of the main effects of experimental factors on phenological traits of maize hybrids

		روز تا تاسل‌دهی Day to tasseling	روز تا گرده‌افشانی Day to anthesis	روز تا کاکل‌دهی Day to silking	فاصله گرده‌افشانی تا کاکل‌دهی Anthesis-silking interval	روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی Day to physiological maturity	طول دوره پرشدن دانه Grain filling period
					سال Year		
2024	۱۴۰۳	59.8	63.1	70.5	7.43a	114.5a	29.3b
2025	۱۴۰۴	59.5	62.8	70.1	7.29b	113.6b	30.0a
					آبیاری Irrigation		
Full irrigation	آبیاری کامل	58.0c	60.6c	66.4c	5.83c	117.4	33.4a
Moderate stress	تنش خشکی متوسط	59.1b	62.5b	69.9b	7.35b	114.1	29.6b
Severe stress	تنش خشکی شدید	61.9a	65.7a	74.6 a	8.89a	110.7	26.0c
					محلول‌پاشی Spraying		
Control	شاهد	61.0a	64.5a	72.4a	7.91a	114.6	28.5c
L-Arginine	ال-آرژنین	59.4b	62.7b	70.1b	7.36ab	114.1	29.7b
Salicylic acid	اسید سالسیلیک	59.3b	62.5b	69.8b	7.33ab	114.0	29.8b
Glycine betaine	گلایسین بتائین	59.0b	62.1b	68.9b	6.83b	113.6	30.6a
					رقم Cultivar		
TWC.647	تری‌وی‌کراس ۶۴۷	58.8	62.1	69.3	7.19	113.8	30.0
SC.704	سینگل‌کراس ۷۰۴	60.5	63.8	71.3	7.53	114.4	29.4

میانگین‌هایی، در هر ستون و برای هر عامل، که دارای حداقل یک حرف مشترک می باشند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means, in each column and for each factor, with at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level using Tukey test.

جدول ۶- مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی بر صفات فنولوژیکی هیبریدهای ذرت

Table 6. Mean comparison of the irrigation × foliar spraying interaction effect on phenological traits of maize hybrids

Spraying	محلول‌پاشی	روز تا تاسل‌دهی Day to tasseling	روز تا گرده‌افشانی Day to anthesis	روز تا کاکل‌دهی Day to silking	فاصله گرده‌افشانی تا کاکل‌دهی Anthesis-silking interval	روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی Day to physiological maturity	طول دوره پرشدن دانه Grain filling period
				Full irrigation آبیاری کامل			
Control	شاهد	58.4e(A)	61.1ef(A)	67.0e(A)	5.9d(A)	116.9ab(A)	32.7a(A)
L-Arginine	ال-آرژنین	58.0e(A)	60.6ef(A)	66.4e(A)	5.8d(A)	117.7a(A)	33.8a(A)
Salicylic acid	اسید سالسیلیک	57.8e(A)	60.3f(A)	66.1e(A)	5.8d(A)	117.2a(A)	33.4a(A)
Glycine betaine	گلایسین بتائین	57.9e(A)	60.6ef(A)	66.3e(A)	5.8d(A)	117.8a(A)	33.9a(A)
				Moderate drought stress تنش خشکی متوسط			
Control	شاهد	60.4bcd(A)	64.2bcd(A)	72.1bc(A)	7.9bc(A)	114.4bc(A)	28.7c(B)
L-Arginine	ال-آرژنین	58.9cde(B)	62.5cde(AB)	69.8cd(AB)	7.3c(B)	114.0c(A)	29.5bc(B)
Salicylic acid	اسید سالسیلیک	58.6de(B)	62.2def(AB)	69.4d(B)	7.3c(B)	113.4cd(A)	29.3c(B)
Glycine betaine	گلایسین بتائین	58.4e(B)	61.4ef(B)	68.4de(B)	7.0c(B)	114.6bc(A)	31.0b(A)
				Severe drought stress تنش خشکی شدید			
Control	شاهد	64.2a(A)	68.3a(A)	78.3a(A)	9.9a(A)	112.3cde(A)	24.3e(B)
L-Arginine	ال-آرژنین	61.3b(B)	65.2b(B)	74.2b(B)	9.0a(AB)	110.6ef(AB)	25.9d(A)
Salicylic acid	اسید سالسیلیک	61.5b(B)	65.2b(B)	74.1b(B)	8.9ab(AB)	111.4de(A)	26.8d(A)
Glycine betaine	گلایسین بتائین	60.7bc(B)	64.4bc(C)	72.2b(B)	7.8c(B)	108.5f(B)	27.1d(A)

میانگین‌هایی، در هر ستون، که دارای حداقل یک حرف مشترک می باشند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. حروف بزرگ مربوط به برش‌دهی روی رژیم آبیاری و حروف کوچک مربوط به مقایسه میانگین کل ترکیب‌های تیماری است.

Means followed by at least one common letter are not significantly different at the 5% probability level using Tukey test. Uppercase letters refer to comparisons sliced by irrigation regime, and lowercase letters refer to the comparison of all treatment combinations.

که افزایش طول دوره پر شـــدن دانـه در این تیمار ناشـــی از جلو افتادن مرحله تاولی شـــدن و بهبود توالی مراحل زایشـــی بود، نه تأخیر در رسیدگی فیزیولوژیکی (جدول ۶).

افزایش فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل یکی از شـــناخته‌شـــده‌ترین واکنش‌های ذرت به کمبود آب در مرحله گلدهی است و علت آن حساسیت بیشـــتر رشـــد کاکل به کاهش پتانســـیل آب بافت نســـبت به رشـــد گل تاجی اســـت، بنابراین با افت پتانسیل آب، طویل شـدن کاکل زودتر از نمو گل تـاجی متوقف می‌شـــود (Sah *et al*., 2020). از آنجا که دوره گرده‌افشـانی در ذرت کوتاه اسـت، هر روز تـأخیر در ظهور کـاکـل بـه معنی کـاهش همپوشانی گرده‌افشانی با آمادگی کاکل و کاهش تلقیح اســـت (Otegui *et al*., 1995). به عبارت دیگر، نزدیک‌تر شـــدن زمان آزاد شـــدن گرده و آمادگی کاکل می‌تولند احتمال تلقیح و تثبیت دانه را افزایش دهد (Mahrokh *et al*., 2025b).

این صـــفت به‌عنوان یکی از شـــاخص‌ها برای گزینش غیرمســـتقیم برای تحمل به خشـــکی در ذرت شـــنـاخـتـه مـی‌شـــود (Bolaños and Edmeades, 1996). البته بـایـد در نظر داشـــت که فاصـــله گرده‌افشـــانی تا ظهور کاکل مســـتقیماً تعیین‌کننده طول دوره پر شدن دانه نیست و این دو صفت باید به‌صورت جداگانه تفسیر شوند. فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل بیشتر با موفقیت تلقیح و تشـــکیل دانه ارتباط دارد، درحالی‌که طول دوره پر شـدن دانه مدت زمانی را نشـان می‌دهد که دانه برای رشـــد و تجمع ماده خشـــک در اختیار دارد (Otegui *et al*., 1995; Bolaños and Edmeades, 1996).

اثر بیشـــتر گلایســـین بتـائین در شـــرایط تنش خشکی ممکن است با نقش شناخته‌شده آن در تنظیم اســـمزی، افزایش محتوای نســـبی آب و حفاظت از غشاها و دستگاه فتوسنتزی مرتبط باشد (Ashraf and Foolad, 2007; Chen and Murata, 2011; Hasanuzzaman *et al*., 2019; Shafiq *et al*., 2021; Shemi *et al*., 2021; Bai *et al*., 2022). اسید سالیسیلیک نیز در پیام‌رسانی پاسخ به تنش نقش دارد و احتمالاً با تنظیم روزنه‌ای و آنتی‌اکســـیـدانی از پیری زودرس برگ‌هـا جلوگیری کرده اســـت (Miura and Tada, 2014; Khan *et al*., 2015). بر اسـاس مطالعات انجام‌شـده، کاربرد اسـید سـالیسـیلیک در ذرت محتوای آب برگ، پایداری غشا و مقدار کلروفیل را در شـــرایط تنش خشـــکی افزایش داده اســـت (Tayyab *et al*., 2020; Ghassemi-Golezani and Mousavi, 2022) و احتمـالاً همین حفظ ســـطح ســـبز فعال، دوره مؤثر پر شـــدن دانه را طولانی‌تر می‌کند. ال-آرژینین نیز با تولید نیتریک اکســـید و پلی‌آمین‌ها احتمالاً در تنظیم روزنه‌ای، پایداری غشا و تنظیم اسمزی نقش دارد (Neill *et al*., 2008; Winter *et al*., 2015).

در مطالعات مشـــابه، کاربرد برگی ال-آرژینین مقدار کلروفیل برگ‌های ذرت و کارایی فتوسیستم II را افزایش و محتوی پراکســـید هیـدروژن و مالون‌دی‌آلدهید را کاهش داد (Sun *et al*., 2023) و در گـنـدم مـحـتـوای نســـبـی آب و

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را بهبود بخشید (Hasanuzzaman *et al*., 2018). بااین‌حال، وضعیت آب برگ، فتوسنتز، کلروفیل، پایداری غشا و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در پژوهش حاضر اندازه‌گیری نشد. بنابراین، این سازکارها تنها تبیین‌های محتمل بر پایه مطالعات پیشین هستند.

در مطالعه حاضر تنش خشکی موجب تأخیر در ظهور گل تاجی، گرده‌افشانی و کاکل‌دهی ذرت شد، در حالی که روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی و طول دوره پرشدن دانه کاهش یافت (جدول‌های ۵ و ۶). این الگو نشان می‌دهد که کمبود آب، توسعه اندام‌های زایشی را در مراحل پیش از گرده‌افشانی و کاکل‌دهی به تأخیر انداخته، اما در ادامه، مدت مرحله پرشدن دانه را کوتاه کرده است. نتایج پژوهش‌های پیشین نیز نشان داده است که تنش خشکی، رشد و ظهور کاکل، ظهور گل تاجی و گرده‌افشانی ذرت را به تأخیر می‌اندازد و فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل را افزایش می‌دهد (Herrero and Johnson, 1981; NeSmith and Ritchie, 1992a; NeSmith and Ritchie, 1992b; Abrecht and Carberry, 1993; Fuad-Hassan *et al*., 2008; Li *et al*., 2022; Mahrokh *et al*., 2025b).

هر چند تنش خشکی موجب تأخیر در ظهور گل تاجی، گرده‌افشانی و کاکل‌دهی ذرت شد، اما محلول‌پاشی گلایسین بتائین، ال-آرژینین و اسید سالیسیلیک در کاهش این تأخیر فنولوژیکی مؤثر بود. کمبود آب با کاهش فشار آماس سلولی، محدودکردن رشد اندام‌های زایشی، کاهش فتوسنتز و اختلال در انتقال مواد فتوسنتزی، ظهور اندام‌های زایشی ذرت را به تأخیر می‌اندازد (Golzardi *et al*., 2017; Zhang *et al*., 2022; Mahrokh *et al*., 2025a). ال-آرژینین به‌عنوان پیش‌ماده نیتریک‌اکسید و پلی‌آمین‌ها، اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک ترکیب پیام‌رسان تنظیم‌کننده پاسخ به تنش و گلایسین بتائین به‌عنوان یک اسمولیت سازگار، می‌توانند به حفظ فشار آماس، پایداری غشاها، فعالیت سامانه آنتی‌اکسیدانی و تداوم رشد لندام‌های زایشی کمک کنند (Neill *et al*., 2008; Winter *et al*., 2015; Tayyab *et al*., 2020; Shafiq *et al*., 2021; Shemi *et al*., 2021; Ghassemi-Golezani and Mousavi, 2022).

مقایسه میانگین‌های برهمکنش آبیاری × رقم نشان داد در شرایط آبیاری کامل، فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل و طول دوره پر شدن دانه دو هیبرید تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۷). در شرایط تنش خشکی متوسط، طول دوره پر شدن دانه در تری‌وی‌کراس ۶۴۷ برابر با ۳۰/۱ روز و در سینگل‌کراس ۷۰۴ برابر با ۲۹/۱ روز بود، اما از نظر فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل تفاوت معنی‌داری بین دو هیبرید ذرت مورد بررسی وجود نداشت. در شرایط تنش خشکی شدید، فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل در تری‌وی‌کراس ۶۴۷ برابر با ۸/۳ روز بود که به‌طور معنی‌داری کمتر از ۹/۵ روز در سینگل‌کراس ۷۰۴ بود (جدول ۷).

جدول ۷- مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری × رقم بر صفات فنولوژیکی و اجزای عملکرد دانه هیبریدهای ذرت

Table 7. Mean comparison of the irrigation × cultivar interaction effect on phenological traits and grain yield components of maize hybrids

Cultivar	رقم	فاصله گرده‌افشانی تاکاکل‌دهی Anthesis-silking interval	طول دوره پرشدن دانه Grain filling period duration	عملکرد دانه (تن در هکتار) Grain yield (t ha^{-1})	تعداد دانه در ردیف Kernel no. row^{-1}	تعداد دانه در بلال Kernel no. ear^{-1}	وزن هزار دانه (گرم) Thousand kernel weight (g)	تعداد بلال در مترمربع Ear no. m^{-2}
				Full irrigation	آبیاری کامل			
TWC.647	تری‌وی‌کراس ۶۴۷	6.1d(A)	32.8a(A)	6.79b(B)	21.5d(B)	306.9c(B)	270.8a(A)	8.22a(A)
SC.704	سینگل‌کراس ۷۰۴	5.6d(A)	34.1a(A)	7.16a(A)	23.8a(A)	343.8a(A)	284.0a(A)	7.39b(B)
				Moderate drought stress	تنش خشکی متوسط			
TWC.647	تری‌وی‌کراس ۶۴۷	7.2c(A)	30.1b(A)	5.70c(A)	22.6b(A)	322.0b(A)	248.0b(A)	7.15bc(A)
SC.704	سینگل‌کراس ۷۰۴	7.5bc(A)	29.1bc(B)	5.58c(A)	22.1c(B)	318.4b(A)	249.6b(A)	7.04c(B)
				Severe drought stress	تنش خشکی شدید			
TWC.647	تری‌وی‌کراس ۶۴۷	8.3b(B)	27.2c(A)	4.06d(A)	18.4e(A)	262.1d(A)	216.9c(A)	7.14bc(A)
SC.704	سینگل‌کراس ۷۰۴	9.5a(A)	24.9d(B)	3.76e(B)	17.3f(B)	249.5e(B)	207.2c(B)	7.27bc(A)

میانگین‌هایی، در هر ستون، که دارای حداقل یک حرف مشترک می باشند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. حروف بزرگ مربوط به برش‌دهی روی رژیم آبیاری و حروف کوچک مربوط به مقایسه میانگین کل ترکیب‌های تیماری است.

Means followed by at least one common letter are not significantly different at the 5% probability level using Tukey test. Uppercase letters refer to comparisons sliced by irrigation regime, and lowercase letters refer to the comparison of all treatment combinations

همچنین، طول دوره پر شدن دانه در شرایط تنش خشکی شدید در تری‌وی‌کراس ۶۴۷ برابر با ۲۷/۲ روز و در سینگل‌کراس ۷۰۴ برابر با ۲۴/۹ روز بود. این نتایج نشان داد تری‌وی‌کراس ۶۴۷ در مقایسه با سینگل‌کراس ۷۰۴ توان بیشتری برای حفظ همزمانی گل‌دهی و طول دوره رشد دانه در شرایط تنش خشکی شدید داشت (جدول ۷). بر اساس مقایسه میانگین‌های برهمکنش محلول‌پاشی × رقم نشان داد که در تیمار شاهد، سینگل‌کراس ۷۰۴ نسبت به تری‌وی‌کراس ۶۴۷، ظهور گل تاجی، گرده‌افشانی و ظهور کاکل را به‌ترتیب ۲/۶، ۲/۴ و ۳/۳ روز دیرتر بود (جدول ۸).

جدول ۸- مقایسه میانگین برهمکنش محلول‌پاشی × رقم بر صفات فنولوژیکی هیبریدهای ذرت

Table 8. Mean comparison of the foliar spraying × cultivar interaction effect on phenological traits of maize hybrids

Cultivar	رقم	روز تا ظهور تاسل Day to tasseling	روز تا گرده‌افشانی Day to anthesis	روز تا ظهور کاکل Day to silking
		Control شاهد		
TWC.647	تری‌وی‌کراس ۶۴۷	59.7bc(B)	63.3b(B)	70.8b(B)
SC.704	سینگل‌کراس ۷۰۴	62.3a(A)	65.7a(A)	74.1a(A)
		L-Arginine ال-آرژنین		
TWC.647	تری‌وی‌کراس ۶۴۷	58.8cd(B)	62.1cd(B)	69.3cd(B)
SC.704	سینگل‌کراس ۷۰۴	60.0b(A)	63.4b(A)	70.9b(A)
		Salicylic acid اسید سالسیلیک		
TWC.647	تری‌وی‌کراس ۶۴۷	58.7cd(A)	61.9cd(A)	69.3cd(A)
SC.704	سینگل‌کراس ۷۰۴	59.9b(A)	63.1bc(A)	70.4bc(A)
		Glycine betaine گلایسین بتائین		
TWC.647	تری‌وی‌کراس ۶۴۷	58.1d(B)	61.2d(B)	67.9d(B)
SC.704	سینگل‌کراس ۷۰۴	59.9b(A)	63.1bc(A)	70.0bc(A)

میانگین‌هایی، در هر ستون، که دارای حداقل یک حرف مشترک می باشند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. حروف بزرگ مربوط به برش‌دهی روی رژیم آبیاری و حروف کوچک مربوط به مقایسه میانگین کل ترکیب‌های تیماری است.

Means followed by at least one common letter are not significantly different at the 5% probability level using Tukey test. Uppercase letters refer to comparisons sliced by irrigation regime, and lowercase letters refer to the comparison of all treatment combinations.

با کاربرد ال-آرژنین، اختلاف دو هیبرید ذرت مورد بررسی در این سه صفت به‌ترتیب به ۱/۲، ۱/۳ و ۱/۶ روز کاهش یافت. در تیمار اسید سالیسیلیک، اختلاف دو هیبرید در هیچ‌یک از این سه صفت معنی‌دار نبود. در تیمار گلایسین بتائین، تری‌وی‌کراس ۶۴۷ به‌ترتیب ۱/۸، ۱/۹ و ۲/۱ روز زودتر از سینگل‌کراس ۷۰۴ به مراحل ظهور گل تاجی، گرده‌افشانی و ظهور کاکل رسید. بنابراین، محلول‌پاشی فاصله فنولوژیک دو هیبرید را کاهش داد، ولی میزان این کاهش به نوع ترکیب مصرفی وابسته بود (جدول ۸).

مقایسه میانگین‌های برهمکنش آبیاری × رقم نشان داد پاسخ اجزای عملکرد دو هیبرید به کمبود آب یکسان نبود (جدول ۷). در شرایط

آبیاری کامل، تعداد دانه در بلال در سینگل کراس ۷۰۴ (۳۴۳/۸ عدد) به طور معنی‌داری بیشتر از تری‌وی کراس ۶۴۷ (۳۰۶/۹ عدد) بود، اما در شرایط تنش خشکی متوسط، تفاوت دو هیبرید برای این صفت معنی‌دار نشد. در شرایط تنش خشکی شدید، تری‌وی کراس ۶۴۷ با ۲۶۲/۱ دانه در بلال نسبت به سینگل کراس ۷۰۴ با ۲۴۹/۵ دانه برتری معنی‌داری داشت. در مورد تعداد دانه در ردیف نیز در شرایط آبیاری کامل سینگل کراس ۷۰۴ برتری معنی‌داری داشت، اما در شرایط تنش متوسط و شدید برتری با تری‌وی کراس ۶۴۷ بود (جدول ۷). وزن هزار دانه تحت تنش خشکی شدید در تری‌وی کراس ۶۴۷ برابر با ۲۱۶/۹ گرم و در سینگل کراس ۷۰۴ برابر با ۲۰۷/۲ گرم بود. بنابراین، سینگل کراس ۷۰۴ در شرایط آبیاری کامل ظرفیت بیشتری برای تولید دانه نشان داد، اما تری‌وی کراس ۶۴۷ در شرایط تنش خشکی شدید تعداد و وزن دانه بیشتری را حفظ کرد (جدول ۷).

اجزای عملکرد دانه

در سال دوم، تعداد دانه در ردیف ۳/۸ درصد و تعداد دانه در بلال ۵/۲ درصد بیشتر از سال اول بود، در حالی که تعداد بلال در واحد سطح ۴/۵ درصد کاهش نشان داد (جدول ۹). به دلیل معنی‌دار شدن برهمکنش‌های آبیاری × محلول‌پاشی و آبیاری × رقم برای تعداد و وزن دانه، از تفسیر اثرهای اصلی آبیاری، محلول‌پاشی و رقم برای این صفات خودداری شد. برهمکنش آبیاری × رقمنشان داد که کمبود آب تعداد بلال قابل برداشت هر دو هیبرید را به‌طور معنی‌داری کاهش داد (جدول ۷).

در هیبرید سینگل کراس ۷۰۴، تعداد بلال از ۸/۲۲ بلال در مترمربع در شرایط آبیاری کامل به‌ترتیب به ۷/۱۵ و ۷/۱۴ بلال در مترمربع تحت تنش خشکی متوسط و شدید کاهش یافت. در هیبرید ۶۴۷ نیز اعمال تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار تعداد بلال شد. بنابراین، کاهش عملکرد دانه تحت کمبود آب فقط ناشی از کاهش تعداد دانه و وزن دانه نبود، بلکه کاهش تعداد بلال قابل برداشت نیز در آن نقش داشت (جدول ۷). کاهش تعداد بلال قابل برداشت ممکن است با افزایش تعداد بوته‌های بدون بلال یا توقف رشد برخی بلال‌ها پیش از رسیدن به مرحله برداشت ارتباط داشته باشد. برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی بر تعداد بلال در مترمربع معنی‌دار نبود (جدول ۴). بنابراین، افزایش عملکرد ناشی از محلول‌پاشی تحت تنش خشکی را نمی‌توان به افزایش تعداد بلال نسبت داد.

مقایسه میانگین‌های برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی نشان داد پاسخ تعداد و وزن دانه به محلول‌پاشی به وضعیت تأمین آب وابسته بود. در شرایط آبیاری کامل، اختلاف میان تیمارهای محلول‌پاشی اندک بود (جدول ۱۰).

جدول ۹- مقایسه میانگین اثر اصلی عوامل آزمایشی بر عملکرد دانه و اجزای عملکرد هیبریدهای ذرت

Table 9. Mean comparison of the main effect of experimental factors on grain yield and yield components of maize hybrids

		عملکرد دانه (تن در هکتار) Grain yield (t ha^{-1})	تعداد دانه در ردیف Kernel no. row^{-1}	تعداد دانه در بلال Kernels no. ear^{-1}	وزن هزار دانه (گرم) Thousand kernel weight (g)	تعداد بلال در مترمربع Ear no. m^{-2}
				Year سال		
2024	۱۴۰۳	5.41b	20.5b	292.8b	242.1	7.54a
2025	۱۴۰۴	5.60a	21.3a	308.1a	250.0	7.20b
				Irrigation آبیاری		
Full irrigation	آبیاری کامل	6.97a	22.7a	325.3a	277.3a	7.81
Moderate stress	تنش خشکی متوسط	5.64b	22.3a	320.2a	248.8b	7.09
Severe stress	تنش خشکی شدید	3.91c	17.8b	255.8b	212.0c	7.20
				Spraying محلول‌پاشی		
Control	شاهد	5.29b	20.2b	289.4c	238.7b	7.55
L-Arginine	ال-آرژنین	5.51ab	20.9ab	298.8bc	247.5ab	7.40
Salicylic acid	اسید سالسیلیک	5.51ab	21.0ab	302.1ab	245.4ab	7.34
Glycine betaine	گلایسین بتائین	5.70a	21.6a	311.3a	252.6a	7.18
				Cultivar رقم		
TWC.647	تری‌وی کراس ۶۴۷	5.52	20.8	297.0	245.2	7.50
SC.704	سینگل کراس ۷۰۴	5.50	21.1	303.9	246.9	7.23

میانگین‌هایی، در هر ستون و برای هر عامل، که دارای حداقل یک حرف مشترک می باشند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means, in each column and for each factor, with at least one letter in common are not significantly different at the 5% probability level using Tukey test

جدول ۱۰- مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی بر عملکرد دانه و اجزای عملکرد هیبریدهای ذرت

Table 10. Mean comparison of the irrigation × foliar spraying interaction effect on grain yield and yield components of maize hybrids

Spraying	محلول‌پاشی	عملکرد دانه (تن در هکتار) Grain yield (t ha^{-1})	تعداد دانه در ردیف Kernels no. row^{-1}	تعداد دانه در بلال Kernel no. ear^{-1}	وزن هزار دانه (گرم) Thousand kernel weight (g)
			Full irrigation آبیاری کامل		
Control	شاهد	6.80c(B)	21.9ef(B)	313.6de(B)	271.4c(A)
L-Arginine	ال-آرژنین	6.99b(AB)	22.5cd(AB)	323.9bc(AB)	280.0ab(A)
Salicylic acid	اسید سالسیلیک	6.99b(AB)	22.9bc(AB)	329.3ab(AB)	276.2b(A)
Glycine betaine	گلایسین بتائین	7.11a(A)	23.4a(A)	334.6a(A)	281.8a(A)
			Moderate drought stress تنش خشکی متوسط		
Control	شاهد	5.42f(B)	21.6f(C)	307.9e(C)	242.0f(C)
L-Arginine	ال-آرژنین	5.61e(AB)	22.3de(B)	317.7cd(B)	250.4e(B)
Salicylic acid	اسید سالسیلیک	5.61e(AB)	22.2de(B)	317.9cd(B)	246.5e(B)
Glycine betaine	گلایسین بتائین	5.93d(A)	23.3ab(A)	337.2a(A)	256.4d(A)
			Severe drought stress تنش خشکی شدید		
Control	شاهد	3.66i(B)	17.3h(B)	246.8g(B)	203.0i(C)
L-Arginine	ال-آرژنین	3.95h(A)	17.9g(A)	254.9fg(AB)	212.0h(B)
Salicylic acid	اسید سالسیلیک	3.95h(A)	18.1g(A)	259.3f(A)	213.7h(B)
Glycine betaine	گلایسین بتائین	4.07g(A)	18.1g(A)	262.2f(A)	219.5g(A)

میانگین‌هایی، در هر ستون، که دارای حداقل یک حرف مشترک می باشند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. حروف بزرگ مربوط به برش‌دهی روی رژیم آبیاری و حروف کوچک مربوط به مقایسه میانگین کل ترکیب‌های تیماری است.

Means followed by at least one common letter are not significantly different at the 5% probability level using Tukey test. Uppercase letters refer to comparisons sliced by irrigation regime, and lowercase letters refer to the comparison of all treatment combinations.

گلایسین بتائین تعداد دانه در بلال را از ۳۱۳/۶ در شاهد به ۳۳۴/۶، تعداد دانه در ردیف را از ۲۱/۹ به ۲۳/۴ و وزن هزار دانه را از ۲۷۱/۴ به ۲۸۱/۸ گرم افزایش داد (جدول ۱۰). میزان اثربخشی گلایسین بتائین تحت تنش خشکی افزایش یافت به‌طوری‌که در شرایط تنش خشکی میانگین وزن هزار دانه را از ۲۴۲/۰ به ۲۵۶/۴ گرم، تعداد دانه در بلال را از ۳۰۷/۹ به ۳۳۷/۲ و تعداد دلنه در ردیف را از ۲۱/۶ به ۲۳/۳ افزایش داد. ال-آرژینین و اسید سالیسیلیک برای این صفات در گروه میانی قرار گرفتند و با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۱۰).

تعداد دانه در بلال در تیمار گلایسین بتائین در شرایط تنش خشکی متوسط با مقادیر مشاهده‌شده در آبیاری کامل تفاوت معنی‌داری نداشت، اما وزن هزار دانه همچنان کمتر بود. نتایج آزمایش حاضر نشان داد که گلایسین‌بتائین قادر به جبران اثر منفی تنش خشکی بر تعداد دانه بود، ولی نتوانست اثر تنش خشکی دوره پر شدن دانه را جبران کند و مانع از کاهش وزن دلنه شود. نقش گلایسین بتائین در حفظ تعداد دانه ذرت در شرایط تنش خشکی توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Shafiq *et al*., 2021; Hasanuzzaman *et al*., 2019).

در شرایط تنش خشکی شدید، گلایسین بتائین وزن هزار دانه را از ۲۰۳/۰ در شاهد به ۲۱۹/۵ گرم و تعداد دانه در بلال را از ۲۴۶/۸ به ۲۶۲/۲ افزایش داد (جدول ۱۰). تعداد دانه در ردیف نیز از ۱۷/۳ در شاهد به ۱۸/۱ در تیمارهای اسید سالیسیلیک و گلایسین بتائین افزایش یافت. اسید سالیسیلیک و گلایسین بتائین از نظر تعداد دانه در بلال تحت تنش خشکی شدید در گروه آماری برتر قرار گرفتند، هر چند ال-آرژینین با آن‌ها اختلاف معنی‌داری نداشت. برای وزن هزار دلنه، گلایسین بتائین بیشترین میانگین را نشان داد و ال-آرژینین و اسید سالیسیلیک در گروه بعدی قرار گرفتند (جدول ۱۰).

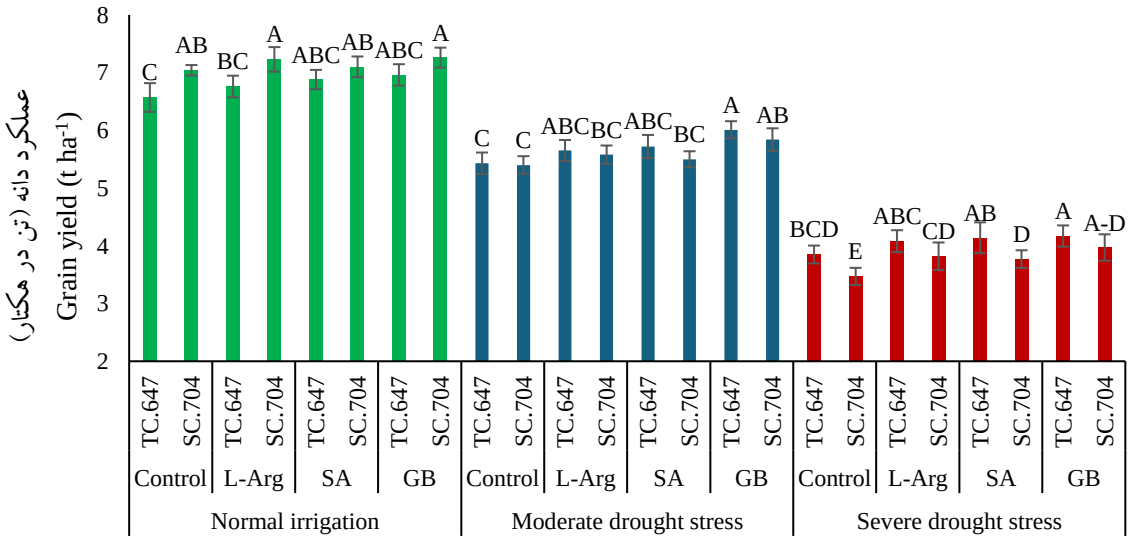
کاهش ۲۵ درصدی وزن هزار دانه در شرایط تنش شدید نشان‌دهنده محدودیت منبع در دوره پر شدن دانه بود، زیرا وزن نهایی دانه در ذرت به‌طور مستقیم تابع مقدار مواد پرورده در دسترس و طول دوره پر شدن دانه است (Borrás *et al*., 2004). محلول‌پاشی در پژوهش حاضر در سه نوبت و از مرحله شش تا هشت برگی تا حوالی گل‌دهی انجام شد، بنابراین، کاربرد ترکیبات فقط به آغاز رشد رویشی محدود نبود و اثر آن‌ها بر وزن دانه ممکن است نتیجه تداوم پاسخ ایجادشده تا دوره تشکیل و پر شدن دانه باشد. گلایسین بتائین می‌تواند پس از جذب در بافت گیاه باقی بماند و از ساختار غشاها و پروتئین‌ها در شرایط تنش محافظت کند (Ashraf and Foolad, 2007; Chen and Murata, 2011).

کاهش هم‌زمان تعداد و وزن دانه در این آزمایش با استمرار کمبود آب از مرحله چهاربرگی تا رسیدگی فیزیولوژیکی قابل توضیح است. کمبود آب در حوالی مرحله گل‌دهی می‌تواند گرده‌افشانی، تلقیح و تثبیت دانه را محدود کند، درحالی‌که تداوم آن در دوره رشد دانه

می‌تواند مدت پر شدن و وزن نهایی دانه را کاهش دهد (Mahrokh *et al*., 2025b). بنابراین، کاهش این دو جزء به مراحل متفاوتی از قرارگیری گیاه در معرض کمبود آب مربوط است و نباید صرفاً به شدت تنش نسبت داده شود (Andrade *et al*., 1999; Borrás *et al*., 2004).

عملکرد دانه

عملکرد دانه در سال دوم با ۵/۶۰ تن در هکتار به‌طور معنی‌داری بیشتر از سال اول (۵/۴۱ تن در هکتار) بود (جدول ۹). به دلیل معنی‌دار شدن برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی × رقم (جدول ۴)، اثر اصلی و برهمکنش‌های دوگانه مربوط به عملکرد دانه به‌صورت مستقل تفسیر نشدند. مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی × رقم نشان داد در آبیاری کامل، هیبرید سینگل کراس ۷۰۴ عملکرد بیشتری داشت، اما با تشدید تنش خشکی این برتری از میان رفت، به‌طوری‌که در تنش شدید، تری‌وی کراس ۶۴۷ برتر قرار بود (شکل ۱). این نتیجه نشان می‌دهد گزینش هیبرید ذرت بر پایه عملکرد دانه در شرایط مطلوب برای مناطق با محدودیت آب راهگشا نیست و ارزیابی باید در همان شرایط تنش انجام شود (Bolaños and Edmeades, 1996; Mahrokh *et al*., 2025b).



شکل ۱- مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری × محلول‌پاشی × رقم بر عملکرد دانه هیبریدهای ذرت (برش‌دهی روی رژیم آبیاری). میله‌های خطا اشتباه معیار میانگین را نشان می دهند. Control: شاهد، L-Arg: ال-آرژنین، SA: اسید سالیسیلیک، GB: گلایسین بتائین

Fig. 1. Mean comparison of the irrigation × foliar spraying × cultivar interaction effect on grain yield of maize hybrids (sliced by irrigation regime). Error bars represent the standard error of the mean. L-Arg: L-Arginine, SA: Salicylic acid, GB: Glycine betaine

در شـرایط آبیاری کامل، بیشـترین عملکرد دانه با کاربرد گلایسـین بتائین در سـینگل‌کراس ۷۰۴ و به میزان ۷/۲۶ تن در هکتار به دسـت آمد(شکل ۱) . بیشترین عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی متوسط و شدید (به‌ترتیب ۶/۰۱ و ۴/۱۷ تن در هکتار) از ترکیب گلایسـین بتائین و هیبرید تری‌وی‌کراس ۶۴۷ حاصـل شـد (شـکل ۱). میری و زمانی مقدم (Miri and Zamani Moghadam, 2014) نیـز گـزارش کردند که محلول‌پاشی گلایسین بتائین، از طریق افزایش محتوای کلروفیل، کاروتنوئید و پرولین و حفظ ظرفیت فتوسنتزی و ساختار غشا در برابر تنش خشکی، اثر منفی تنش خشکی بر عملکرد دانه ذرت را کاهش داد.

سـهم نسـبی محلول‌پاشـی با افزایش شـدت تنش بیشتر شد، هرچند مقدار مطلق عملکرد دانه جبران‌شده در تنش متوسط از تنش شدید بالاتر بود. این الگو منطقی اسـت، در آبیاری کامل محدودیت آبی وجود ندارد که برطرف شـود و در تنش شـدید نیز آسـیب وارد بر گیاه فراتر از ظرفیت جبران این ترکیب‌ها است. بیشترین بازده کاربرد این ترکیب‌هـا در محـدوده میـانی تنش قرار دارد؛ جـایی کـه گیـاه هنوز توان پـاسـخ فیزیولوژیک دارد ولی با محدودیت آبی مؤثری روبه‌رو اسـت (Ashraf and Foolad, 2007; Golzardi *et al*., 2017).

در شـرایط تنش خشـکی متوسـط، گلایسـین بتائین عملکرد دانه تری‌وی‌کراس ۶۴۷ را ۱۰/۷ درصـد و عملکرد دانه سینگل‌کراس ۷۰۴ را ۸/۱ درصـد نسـبت به شـاهد همان هیبرید افزایش داد (شـکل ۱). در شـرایط تنش خشـکی شـدید، الگو معکوس شـد و افزایش نسـبی ناشـی از گلایسـین بتائین در سینگل‌کراس ۷۰۴ برابر با ۱۴/۴ درصد و در تری‌وی‌کراس ۶۴۷ برابر با ۸/۳ درصد بود. اگرچه پاسـخ نسـبی سـینگل‌کراس ۷۰۴ به گلایسـین بتائین در شـرایط تنش خشـکی شـدید بیشـتر بود، عملکرد دانه مطلق آن همچنان کمتر از تری‌وی‌کراس ۶۴۷ باقی ماند (شـکل ۱). این یافته‌ها نشـان می‌دهد محلول‌پاشـی بخشـی از خسارت کمبود آب را جبران کرد، اما نتوانست جایگزین انتخاب هیبرید ذرت مناسب شود.

گلایسـین بتائین به‌عنوان اسـمولیت سـازگار مسـتقیماً در تنظیم اسـمزی شـرکت می‌کند و همچنین دسـتگاه فتوسـنتزی را در برابر تنش محافظت می‌نماید، در حالی که اسید سالیسیلیک و ال-آرژینین بیشـتر نقش پیام‌رسـان دارند و اثر آن‌ها به فعال شـدن پاسخ‌های دفاعی گیاه وابسته اسـت (Chen and Murata, 2011; Khan *et al*., 2015; Winter *et al*., 2015). افزون بر این، گلایسـین بتائین در گیاه به‌سـرعت تجزیه نمی‌شـود و پس از جذب برگی به بافت‌های در حال رشد منتقل می‌شود، همین پایداری می‌تواند دلیل تداوم اثر آن تا مرحله پر شـدن دانه باشـد (Ashraf and Foolad, 2007).

در مقایسـه با شـرایط آبیاری کامل میزان کاهش عملکرد دانه در شـرایط تنش شـدید در تیمار شـاهد محلول‌پاشـی برای تری‌وی‌کراس ۶۴۷ و سینگل‌کراس ۷۰۴ به‌ترتیب ۴۱/۴ و ۵۰/۷

درصد بود، درحالی‌که کاربرد گلایسین بتائین آن را به‌ترتیب به ۳۶/۵ و ۴۳/۶ درصد رساند (شکل ۱). به بیان دیگر محلول‌پاشی توانست بخشی از خسارت تنش خشکی را جبران کند. این درصد کاهش با نتایج فراتحلیل‌هایی که افت عملکرد دانه ذرت در شرایط تنش خشکی را بین ۲۰ تا ۵۰ درصد گزارش کرده‌اند، هم‌خوانی دارد (Mahrokh *et al*., 2020; Sah *et al*., 2020; Golzardi *et al*., 2023).

به طور کلی، نتایج پژوهش حاضر نشان داد پاسخ ذرت به محلول‌پاشی گلایسین بتائین و ال-آرژینین به رژیم آبیاری وابسته بود. در شرایط آبیاری کامل، تفاوت میان تیمارهای محلول‌پاشی محدود بود، اما در شرایط کمبود آب، به‌ویژه با محلول‌پاشی گلایسین بتائین، تأخیر گل‌دهی کاهش یافت، فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل کوتاه‌تر شد و طول دوره پر شدن دانه افزایش پیدا کرد. این تغییرات با حفظ بهتر تعداد دانه و وزن هزار دانه در شرایط کمبود آب همراه بود.

پاسخ دو هیبرید ذرت به شدت کمبود آب یکسان نبود. سینگل‌کراس ۷۰۴ در شرایط آبیاری کامل ظرفیت عملکرد دانه بیشتری نشان داد، اما تری‌وی‌کراس ۶۴۷ در شرایط تنش خشکی شدید فاصله گرده‌افشانی تا ظهور کاکل کوتاه‌تر، دوره رشد دانه طولانی‌تر و تعداد و وزن هزار دانه بیشتری را حفظ کرد. بیشترین عملکرد دانه در شرایط آبیاری کامل با کاربرد گلایسین بتائین در هیبرید سینگل‌کراس۷۰۴ حاصل شد. درحالی‌که در شرایط تنش خشکی متوسط و شدید بیشترین عملکرد دانه از ترکیب گلایسین بتائین و هیبرید تری‌وی‌کراس ۶۴۷ به دست آمد. بنابراین، برای دو هیبرید ذرت مورد بررسی، انتخاب هیبرید متناسب با شدت محدودیت آب همراه با کاربرد گلایسین بتائین پیش از گل‌دهی می‌تواند از کاهش عملکرد جلوگیری کند.

سپاسگزاری

نگارندگان بدین‌وسیله از پشتیبانی‌های بخش تحقیقات ذرت و گیاهان علوفه‌ای، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر و گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه تهران برای اجرای این پژوهش سپاسگزاری می‌کنند.

عدم تعارض منافع

نگارندگان اعلام می‌دارند که هیچگونه تعارض منافعی باهم و سایر اشخاص حقوقی/حقیقی ندارند.

References

Abendroth, L.J., Elmore, R.W., Boyer, M.J. and Marlay, S.K. 2011. Corn growth and development. PMR 1009. Iowa State University, Ames, Iowa, USA. 50 pp.

Abrecht, D.G. and Carberry, P.S. 1993. The influence of water deficit prior to tassel initiation on maize growth, development and yield. *Field Crops Research*, *31*(1–2), pp.55–69. DOI: 10.1016/0378-4290(93)90050-W

Al Rawi, A.T.M., Abdel Ghani, E.T. and Sabry, N.A. 2021. The adaptability of maize (*Zea mays* L.) to drought tolerance by using salicylic acid (SA) foliar application under the middle area conditions of Iraq. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *779*, e012009. DOI: 10.1088/1755-1315/779/1/012009

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Andrade, F.H., Vega, C., Uhart, S., Cirilo, A., Cantarero, M. and Valentinuz, O. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Science*, *39*(2), pp.453–459. DOI: 10.2135/cropsci1999.0011183X0039000200026x

Ashraf, M. and Foolad, M.R. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, *59*(2), pp.206–216. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2005.12.006

Ashrafi, S., Sadrghaen, H. and Baghani, J. 2016. Effects of irrigation levels, plant densities and planting patterns on water use efficiency corn (KSC700). *Water and Soil*, *28*(6), pp.1183–1190. DOI: 10.22067/jsw.v0i0.32870

Bai, M., Zeng, W., Chen, F., Ji, X., Zhuang, Z., Jin, B., Wang, J., Jia, L. and Peng, Y. 2022. Transcriptome expression profiles reveal response mechanisms to drought and drought-stress mitigation mechanisms by exogenous glycine betaine in maize. *Biotechnology Letters*, *44*, pp.367–386. DOI: 10.1007/s10529-022-03221-6

Bolaños, J. and Edmeades, G.O. 1996. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *Field Crops Research*, *48*(1), pp.65–80. DOI: 10.1016/0378-4290(96)00036-6

Borrás, L., Slafer, G.A. and Otegui, M.E. 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: A quantitative reappraisal. *Field Crops Research*, *86*(2–3), pp.131–146. DOI: 10.1016/j.fcr.2003.08.002

Chen, T.H.H. and Murata, N. 2011. Glycinebetaine protects plants against abiotic

stress: Mechanisms and biotechnological applications. *Plant, Cell and Environment*, *34*(1), pp.1–20. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2010.02232.x

Esmaily, M., Dadashi, M.R., Fayzbakhsh, M.T., Kaboosi, K. and Shaikh, F. 2022. Evaluation of the effects of deficit irrigation on yield, yield components, proline content, and water productivity of four seed corn cultivars in Gorgan, Iran. *Journal of Water Research in Agriculture*, *36*(3), pp.269–285. DOI: 10.22092/jwra.2022.358655.926

Fuad-Hassan, A., Tardieu, F. and Turc, O. 2008. Drought-induced changes in anthesis–silking interval are related to silk expansion: a spatio-temporal growth analysis in maize plants subjected to soil water deficit. *Plant, Cell and Environment*, *31*(9), pp.1349–1360. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2008.01839.x

Ghassemi-Golezani, K. and Mousavi, S.A. 2022. Improving physiological performance and grain yield of maize by salicylic acid treatment under drought stress. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, *12*(2), pp.1–10. DOI: 10.22034/jppb.2022.16041

Golzardi, F., Baghdadi, A. and Afshar, R.K. 2017. Alternate furrow irrigation affects yield and water-use efficiency of maize under deficit irrigation. *Crop and Pasture Science*, *68*(8), pp.726–734. DOI: 10.1071/CP17178

Golzardi, F., Mahrokh, A., Azizi, F., Zamanian, M., Mofidian, S.M.A., Rahjoo, V., Khazaei, A., Moghaddam, A., Ghotbi, V., Torabi, M. and Soltani, E. 2023. A meta-analysis of drought stress impact on the yield of some important forage-grain crops in Iran. *Crop Science Research in Arid Regions*, *4*(2), pp.389–403. DOI: 10.22034/CSRAR.2022.325559.1183

González-Villagra, J., Reyes-Díaz, M.M., Tighe-Neira, R., Inostroza-Blancheteau, C., Escobar, A.L. and Bravo, L.A. 2022. Salicylic acid improves antioxidant defense system and photosynthetic performance in *Aristotelia chilensis* plants subjected to moderate drought stress. *Plants*, *11*(5), e639. DOI: 10.3390/plants11050639

Gupta, A., Rico-Medina, A. and Caño-Delgado, A.I. 2020. The physiology of plant responses to drought. *Science*, *368*(6488), pp.266–269. DOI: 10.1126/science.aaz7614

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Rahman, A., Inafuku, M., Oku, H. and Fujita, M. 2018. Exogenous nitric oxide donor and arginine provide protection against short-term drought stress in wheat seedlings. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *24*(6), pp.993–1004. DOI: 10.1007/s12298-018-0531-6

Hasanuzzaman, M., Banerjee, A., Bhuyan, M.H.M.B., Roychoudhury, A., Mahmud,

J.A. and Fujita, M. 2019. Targeting glycinebetaine for abiotic stress tolerance in crop plants: Physiological mechanism, molecular interaction and signaling. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, *88*(3), pp.185–221. DOI: 10.32604/phyton.2019.07559

Herrero, M.P. and Johnson, R.R. 1981. Drought stress and its effects on maize reproductive systems. *Crop Science*, *21*(1), pp.105–110. DOI: 10.2135/cropsci1981.0011183X002100010029x

Karimi, M. and Gomrokchi, A. 2011. Yield and water use efficiency of corn planted in one or two rows and applying furrow or drip tape irrigation systems in Ghazvin Province, Iran. *Irrigation and Drainage*, *60*(1), pp.35–41. DOI: 10.1002/ird.562

Khan, M.I.R., Fatma, M., Per, T.S., Anjum, N.A. and Khan, N.A. 2015. Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in Plant Science*, *6*, 462. DOI: 10.3389/fpls.2015.00462

Khatibi, A., Omrani, S., Omrani, A., Shojaei, S.H., Mousavi, S.M.N., Illés, Á., Bojtor, C. and Nagy, J. 2022. Response of maize hybrids in drought-stress using drought tolerance indices. *Water*, *14*(7), p.1012. DOI: 10.3390/w14071012

Li, J., Guo, Y., Cui, R., Zhang, X., Wang, C. and Liu, S. 2022. Influence of drought stress on tassel development characteristics and yield of maize. *Journal of South China Agricultural University*, *43*(3), pp.26–33. DOI: 10.7671/j.issn.1001-411X.202107025

Mahrokh, A., Golzardi, F., Azizi, F., Mofidian, S.M.A., Zamanian, M., Rahjoo, V., Torabi, M. and Soltani, M. 2020. Agronomical factor analysis on grain maize yield decline in Iran with meta-analysis method. *Journal of Crops Improvement*, *23*(1), pp.73–86. (in Persian). DOI: 10.22059/jci.2020.292889.2299

Mahrokh, A., Golzardi, F., Ghotbi, V., Kara, E., Heydarzadeh, S. and Sürmen, M. 2025a. Drought stress effects on quality and grain composition in four hybrid maize varieties with different stomatal resistance. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*, *62*(2), pp.151–162. DOI: 10.20289/zfdergi.1495688

Mahrokh, A., Shiri, M.R., Golzardi, F. and Ghotbi, V. 2025b. Evaluation of maize (*Zea mays* L.) inbred lines for drought stress tolerance. *Iranian Journal of Crop Sciences*, *27*(1), pp.1–22. (in Persian).

Matysiak, K., Kierzek, R., Siatkowski, I., Kowalska, J., Krawczyk, R. and Miziniak, W. 2020. Effect of exogenous application of amino acids L-arginine and glycine on maize under temperature stress. *Agronomy*, *10*, 769. DOI:

10.3390/agronomy10060769

Miri, H.R. and Zamani Moghadam, A. 2014. The effect of external usage of glycine betaine on corn (*Zea mays* L.) in drought condition. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *12*(4), pp.704–717. DOI: 10.22067/gsc.v12i4.24221

Miura, K. and Tada, Y. 2014. Regulation of water, salinity, and cold stress responses by salicylic acid. *Frontiers in Plant Science*, *5*, e4. DOI: 10.3389/fpls.2014.00004

Nasr, F., Emam, Y. and Zamani, A. 2025. Minimizing adverse effects of drought stress on maize (*Zea mays* L.) using foliar application of jasmonic and salicylic acids. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, *15*(2), pp.147–170. DOI: 10.22034/jppb.2025.69241.1383

Neill, S., Barros, R., Bright, J., Desikan, R., Hancock, J., Harrison, J., Morris, P., Ribeiro, D. and Wilkinson, S. 2008. Nitric oxide, stomatal closure, and abiotic stress. *Journal of Experimental Botany*, *59*(2), pp.165–176. DOI: 10.1093/jxb/erm293

NeSmith, D.S. and Ritchie, J.T. 1992a. Effects of soil water deficits during tassel emergence on development and yield component of maize (*Zea mays* L.). *Field Crops Research*, *28*(3), pp.251–256. DOI: 10.1016/0378-4290(92)90044-A

NeSmith, D.S. and Ritchie, J.T. 1992b. Short- and long-term responses of corn to a pre-anthesis soil water deficit. *Agronomy Journal*, *84*(1), pp.107–113. DOI: 10.2134/agronj1992.00021962008400010021x

Otegui, M.E., Andrade, F.H. and Suero, E.E. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research*, *40*(2), pp.87–94. DOI: 10.1016/0378-4290(94)00093-R

Pardhi, D.S., Chandan, A.S., Devi, O.R., Ashiq, I.M., Senchowa, T., Hussain, R. and Laishram, B. 2024. Effects of glycine betaine and salicylic acid foliar spray on growth of late sown wheat. *Plant Archives*, *24*(2), pp.2761–2768. DOI: 10.51470/plantarchives.2024.v24.no.2.392

Sah, R.P., Chakraborty, M., Prasad, K., Pandit, M., Tudu, V.K., Chakravarty, M.K., Narayan, S.C., Rana, M. and Moharana, D. 2020. Impact of water deficit stress in maize: phenology and yield components. *Scientific Reports*, *10*, e2944. DOI: 10.1038/s41598-020-59689-7

Shafiq, S., Akram, N.A., Ashraf, M., García-Caparrós, P., Ali, O.M. and Abdel-Latef, A.A.H. 2021. Influence of glycine betaine (natural and synthetic) on growth, metabolism and yield production of drought-stressed maize (*Zea mays* L.) plants.

Plants, *10*(11), e2540. DOI: 10.3390/plants10112540

Shemi, R., Wang, R., Gheith, E.S.M.S., Hussain, H.A., Hussain, S., Irfan, M., Cholidah, L., Zhang, K., Zhang, S. and Wang, L. 2021. Effects of salicylic acid, zinc and glycine betaine on morpho-physiological growth and yield of maize under drought stress. *Scientific Reports*, *11*(1), e3195. DOI: 10.1038/s41598-021-82264-7

Sun, Y., Miao, F., Wang, Y., Liu, H., Wang, X., Wang, H., Guo, J., Shao, R. and Yang, Q. 2023. L-Arginine alleviates the reduction in photosynthesis and antioxidant activity induced by drought stress in maize seedlings. *Antioxidants*, *12*(2), e482. DOI: 10.3390/antiox12020482

Tavazoh, M., Habibi, D., Golzardi, F., Ilkaee, M.N. and Paknejad, F. 2024. Effect of drought stress on morpho-physiological characteristics, nutritive value, and water-use efficiency of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] varieties under various irrigation systems. *Brazilian Journal of Biology*, *84*, e286121. DOI: 10.1590/1519-6984.286121

Tayyab, N., Naz, R., Yasmin, H., Nosheen, A., Keyani, R., Sajjad, M., Hassan, M.N. and Roberts, T.H. 2020. Combined seed and foliar pre-treatments with exogenous methyl jasmonate and salicylic acid mitigate drought-induced stress in maize. *PLOS ONE*, *15*(5), e0232269. DOI: 10.1371/journal.pone.0232269

Winter, G., Todd, C.D., Trovato, M., Forlani, G. and Funck, D. 2015. Physiological implications of arginine metabolism in plants. *Frontiers in Plant Science*, *6*, e534. DOI: 10.3389/fpls.2015.00534

Zhang, H., Zhu, J., Gong, Z. and Zhu, J.K. 2022. Abiotic stress responses in plants. *Nature Reviews Genetics*, *23*, pp.104–119. DOI: 10.1038/s41576-021-00413-0

RESEARCH ARTICLE

DOI: 10.22092/spj.2026.374039.1480

Effect of Foliar Application of Some Drought Stress Mitigators on Phenological Characteristics, Yield Components and Yield of Two Grain Maize Hybrids

H. Ahmadi[1], A. Ahmadi[2*], F. Golzardi[3] and M. Sabokdast Noudehi[4]

1. Ph .D. Student, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
3. Assistant Professor, Maize and Forage Crops Research Department, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.
4. Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

ABSTRACT

Ahmadi, H., Ahmadi, A., Golzardi, F. and Sabokdast Noudehi, M. 2026. Effect of foliar application of some drought stress mitigators on phenological characteristics, yield components and yield of two grain maize hybrids. *Seed and Plant, 42,* pp.59-90 (in Persian).

To investigate the effect of different levels of water deficit and foliar application of some drought stress mitigators on phenological characteristics, yield components and yield of two grain maize hybrids a field experiment was conducted as strip-plot factorial arrangements in randomized complete block design with three replications at the research field of the Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran in 2024 and 2025. The vertical factor consisted of three irrigation regimes (full irrigation, moderate stress and severe stress, supplying 100, 75 and 50% of crop water requirement) and the horizontal factor comprised the combination of four foliar treatments (control, L-arginine, salicylic acid and glycine betaine) and two grain maize hybrids, TWC.647 and SC.704. Under moderate and severe stress, grain yield decreased by 19.1% and 43.9%, respectively. Drought stress increased anthesis-silking interval, shortened grain filling period duration, reduced kernels ear^{-1}, and decreased thousand kernel weight. The highest grain yield under full irrigation (7.26 t ha^{-1}) obtained from SC.704 with application of glycine betaine, whereas under moderate and severe stress conditions the highest grain yield (6.01 and 4.17 t ha^{-1}, respectively) obtained from TWC.647with application of the same treatment. Overall, the grain yield response to foliar application depended on both stress level and hybrid. Glycine betaine was superior under all conditions and its effect was more pronounced as stress intensified, however the superior maize hybrid changed with increasing stress level. Therefore, selection suitable maize hybrid for different stress levels together with application of glycine betaine is an appropriate management strategy for grain maize production under limited water conditions in Karaj and similar semi-arid regions.

Keywords: Maize, irrigation regime, drought tolerance, glycine betaine, grain filling period duration.

Introduction

Maize (*Zea mays* L.) is sensitive to water deficit around flowering stage, when kernel set and grain yield are most vulnerable (Sah *et al.*, 2020). Drought commonly delays silk emergence more than pollen shedding, thereby widening the anthesis–silking interval and restricting kernel formation (Fuad-Hassan *et al.*, 2008). Foliar application of stress-mitigator compounds can play a potential role in reducing drought stress adverse effects.

Glycine betaine acts as a compatible osmolyte that contributes to osmotic adjustment and protection of the photosynthetic apparatus, whereas salicylic acid participates in stress signaling and antioxidant defense and L-arginine is a precursor of nitric oxide and polyamines (Chen and Murata, 2011). However, direct field comparisons of L-arginine, salicylic acid and glycine betaine across different water-deficit levels and maize hybrids remain limited.

Therefore, this study aimed to evaluate the effects of these compounds on phenological traits, grain yield and yield components of two maize hybrids under three irrigation regimes.

Materials and Methods

A two-year field experiment was carried out in 2024 and 2025 growing seasons at the research field of the Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran (35°47′54″N, 50°56′10″E, 1279 m a.s.l.). The experiment was conducted as strip-plot factorial arrangements in randomized complete block design with three replications.

Three irrigation regimes supplying 100, 75 and 50% of crop water requirement were assigned to vertical plots. The factorial combinations of four foliar treatments (control, L-arginine, salicylic acid and glycine betaine) and two grain maize hybrids (TWC.647 and SC.704) were assigned to horizontal plots. Spraying was applied three times at ten-day intervals from the six- to eight-leaf to flowering stages.

Phenological stages were recorded when 50% of plants reached each stage. Phenological traits, ears per square meter, kernel no. ear^{-1}, kernel no. row, thousand-kernel weight and grain yield, adjusted to 14% moisture, were measured. Homogeneity of error variances was examined using Bartlett's test before combined analysis of variance, and means were compared using the Tukey test at the 5% probability level.

Results and Discussion

Water deficit delayed reproductive development, but the magnitude of delay depended on foliar treatment. Under severe stress conditions, glycine betaine reduced days to tasseling, anthesis and silking from 64.2, 68.3 and 78.3 days in the control to 60.7, 64.4 and 72.2 days, respectively. It also reduced the anthesis–silking interval from 9.9 to 7.8 days and increased grain filling period duration from 24.3 to 27.1 days. These responses agree with the greater drought sensitivity of silk expansion than male flowering reported by Fuad-Hassan et al. (2008).

All foliar treatments partially alleviated grain yield loss, although the magnitude of their effect depended on irrigation regime and maize hybrid. Under full irrigation conditions, the

highest grain yield was obtained from glycine betaine-treated SC.704 (7.26 t ha^{-1}), whereas under moderate and severe stress conditions, the highest grain yield obtained from glycine betaine-treated TWC.647 (6.01 and 4.17 t ha^{-1}, respectively).

Glycine betaine also increased kernels no. ear^{-1} and thousand-kernel weight under water deficit conditions. The superior performance of glycine betaine may be associated with its established roles in osmotic adjustment and protection of membranes and the photosynthetic machinery (Chen and Murata, 2011), which can help maintaining assimilate supply to developing kernels and is consistent with the improved growth and yield of drought-stressed maize reported by Shafiq *et al*. (2021).

Overall, application of glycine betaine before flowering stage, combined with a suitable hybrid adapted to the expected stress level, are recommended for grain maize production under limited water conditions in Karaj and similar semi-arid regions.

References

Chen, T.H.H. and Murata, N. 2011. Glycinebetaine protects plants against abiotic stress: Mechanisms and biotechnological applications. *Plant, Cell and Environment, 34*(1), pp.1–20. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2010.02232.x

Fuad-Hassan, A., Tardieu, F. and Turc, O. 2008. Drought-induced changes in anthesis–silking interval are related to silk expansion: a spatio-temporal growth analysis in maize plants subjected to soil water deficit. *Plant, Cell and Environment, 31*(9), pp.1349–1360. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2008.01839.x

Sah, R.P., Chakraborty, M., Prasad, K., Pandit, M., Tudu, V.K., Chakravarty, M.K., Narayan, S.C., Rana, M. and Moharana, D. 2020. Impact of water deficit stress in maize: phenology and yield components. *Scientific Reports, 10*, e2944. DOI: 10.1038/s41598-020-59689-7

Shafiq, S., Akram, N.A., Ashraf, M., García-Caparrós, P., Ali, O.M. and Abdel-Latef, A.A.H. 2021. Influence of glycine betaine (natural and synthetic) on growth, metabolism and yield production of drought-stressed maize (*Zea mays* L.) plants. *Plants, 10*(11), e2540. DOI: 10.3390/plants10112540

***Corresponding author**: ahmadia@ut.ac.ir Tel.: +982632246074

Received: 04 April 2026
Accepted: 02 June 2026

2026© The Authors. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.