



اثر محلول پاشی برخی از تعدیل کننده‌های 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 ID، علی احمدی^{۲*} ID، فرید گل زردی^۳ ID و منیژه سبک دست نودهی^۴ ID

۱- دانشجوی دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- استاد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده‌گان 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، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

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

چکیده

احمدی، ح.، احمدی، ع.، گل زردی، ف. و سبک دست نودهی، م. ۱۴۰۵. اثر محلول پاشی برخی از تعدیل کننده‌های تنش خشکی بر خصوصیات فنولوژیکی، اجزای عملکرد و عملکرد دو هیبرید ذرت دانه‌ای. نهال و بذر ۴۲: ۵۹-۹۰

به منظور بررسی اثر سطوح مختلف کم آبی و محلول پاشی برخی از تعدیل کننده‌های تنش خشکی بر خصوصیات فنولوژیکی، اجزای عملکرد و عملکرد دو هیبرید ذرت دانه‌ای، آزمایشی به صورت استرپ پلات 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 محلول پاشی (شاهد، ال-آرژنین، اسید سالیسیلیک و گلايسين بنائين) 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 گلايسين بنائين 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 محلول پاشی به سطح تنش و هیبرید بستگی داشت. تأثیر گلايسين بنائين در همه شرایط موثر بود و کارایی آن با تشدید تنش بیشتر شد، اما هیبرید ذرت برتر با تشدید تنش تغییر کرد. از این رو انتخاب هیبرید ذرت متناسب با شدت تنش همراه با محلول پاشی گلايسين بنائين، می‌تواند راهبرد مناسبی برای تولید ذرت در شرایط محدودیت آب آبیاری باشد.

واژه‌های کلیدی: ذرت، رژیم آبیاری، تحمل به خشکی، دوره پر شدن دانه، گلايسين بنائين.

تلفن: ۰۲۶۳۲۲۴۶۰۷۴

* نگارنده مسئول: ahmadia@ut.ac.ir



© 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، به گونه‌ای 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; Mahrokhi 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 به ترتیب 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; Mahrokhi 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 تشکیل شده 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

(González-Villagra *et al.*, 2022). کاربرد
برگی اسید سالیسیلیک در ذرت تحت شرایط
تنش خشکی، محتوای کلروفیل، مقاومت
روزنه ای و وزن دانه را افزایش می دهد
(Tayyab *et al.*, 2020; Al Rawi *et al.*,
2021). قاسمی گلعدانی و موسوی در یک
آزمایش مزرعه ای گزارش کردند که
محلول پاشی اسید سالیسیلیک با غلظت سه
میلی مولار 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 گلخانه ای نشان دادند که کاربرد برگی
اسید سالیسیلیک با افزایش رنگیزه های فتوسنتزی،
بهبود پایداری غشای سلولی و کاهش تجمع
پراکسید هیدروژن، بخشی از آثار نامطلوب
تنش خشکی در ذرت را کاهش داد. آرژنین نیز
پیش ساز مشترک نیتریک اکساید و پلی آمین ها
است و از این مسیر در تنظیم بسته شدن روزنه ها،
پایداری غشا و تحمل به خشکی نقش دارد
(Hasanuzzaman *et al.*, 2018). در ذرت،
کاربرد ال-آرژنین محتوای کلروفیل و کارایی
فتوشیمیایی فتوسیستم II را به طور قابل توجهی
افزایش و میزان هیدروژن پراکسید و
مالون دی آلدئید را کاهش داده است (Sun *et al.*,
2023).

با وجود مطالعات انجام شده، مقایسه همزمان اثر

و تنظیم کننده های اسمزی به عنوان مداخله ای
کم هزینه، سریع و قابل اجرا در مقیاس مزرعه
مورد توجه قرار گرفته است (Matysiak *et al.*,
2020; Pardhi *et al.*, 2024). گلاسیسین بتائین
یک ترکیب چهار آمینی سازگار است که با تنظیم
اسمزی، پایداری سازی پروتئین های فتوسیستم II و
حفاظت از غشای تیلاکوئید، فعالیت فتوسنتزی را
در شرایط کمبود آب حفظ می کند
(Hasanuzzaman *et al.*, 2019). در ذرت،
کاربرد برگی این ترکیب محتوای نسبی آب برگ
و فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی را افزایش
و تجمع گونه های فعال اکسیژن را کاهش داده
است (Shafiq *et al.*, 2021). بای و همکاران
(Bai *et al.*, 2022) نشان دادند که گلاسیسین بتائین
با تنظیم بیان ژن های مرتبط با پاسخ به تنش،
مسیرهای دفاعی گیاه ذرت تحت تنش خشکی را
تقویت کرده و اختلالات فنولوژیکی ناشی از
کمبود آب را کاهش می دهد. میری و ضمانی
مقدم (Miri and Zamani Moghadam, 2014)
نیز گزارش کردند که محلول پاشی گلاسیسین بتائین
در دوره های 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
پیام رسانی وابسته به پراکسید هیدروژن
عمل می کند و بیان ژن های مرتبط با آنزیم های
آنتی اکسیدانی، تنظیم روزنه ای و تنظیم تعادل
هورمونی را تحت تأثیر قرار می دهد

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.

گلايسين بتاين، اسيد سالیسیلیک و ال-آرژنین 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 تری‌وی کراس ۶۴۷ و سینگل کراس ۷۰۴ ذرت به سه سطح تأمین آب و سه ترکیب تعدیل‌کننده

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

Month	ماه	میانگین دما (سانتی‌گراد)		بارش (میلی‌متر)	
		Mean temperature (°C)		Precipitation (mm)	
		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

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 چهارم برگی به صورت همراه با آبیاری

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،

مصرف شد.

آزمایش به صورت استریپ پلات فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک های 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 محلول پاشی و دو هیبرید نیز به عنوان عامل افقی و در هشت نوار قرار داده شد. تیمارهای محلول پاشی شامل شاهد، ال آرژنین، اسید سالیسیلیک و گلیسین بتائین بود و دو هیبرید ذرت مورد استفاده تری وی کراس ۶۴۷ و سینگل کراس ۷۰۴ بودند.

هیبرید تری وی کراس ۶۴۷ از تلاقی هیبرید سینگل کراس ۶۴۷ ($K1264/1 \times B73$) به عنوان پایه مادری و لاین MO17 به عنوان پایه پدری و هیبرید سینگل کراس ۷۰۴ از تلاقی لاین های B73 (مادری) و MO17 (پدری) حاصل شده اند. انتخاب این هیبریدها بر پایه شواهد پیشین از کاهش کمتر عملکرد دانه در هیبرید تری وی کراس ۶۴۷ نسبت به سینگل کراس 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 سانتی متر و فاصله بین بوته روی ردیف ۱۸ سانتی متر 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-مانتیت محاسبه می کند (Allen et al., 1998). نیاز آبی گیاه در هر روز بر اساس رابطه ۱ به دست آمد:

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

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

مقادیر ضریب گیاهی بر پایه کالیبراسیون آزمایش های پیشین برای مراحل سبز شدن، ۲-۳، ۴، ۵، ۶-۸، ۹-۱۰، ۱۱-۱۲ و ۱۳-۱۴ برگ، ظهور گل تاجی، ظهور کاکل، تاوولی شدن، شیری دانه، خمیری دانه، دندانه ای شدن و تشکیل لایه سیاه به ترتیب برابر با ۰/۳۶، ۰/۳۵، 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:

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

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 به ترتیب ۸۰۴۱، ۶۲۱۷ و ۴۳۹۳ مترمکعب در هکتار و در سال ۱۴۰۴ به ترتیب ۸۳۵۰، ۶۴۷۹ و ۴۶۰۹ مترمکعب در هکتار بود.

ال آرژنین و اسید سالیسیلیک با غلظت سه میلی مولار (به ترتیب ۵۲۳ و ۴۱۴ میلی گرم در لیتر) و گلايسين بتائين 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-آرژنین، اسید سالیسیلیک و گلايسين بتائين به ترتیب ۷۴-۷۹-۳، ۶۹-۷۲-۷ و ۴۳-۱۰۷-۷ بود. محلول‌های مادر در آزمایشگاه تهیه و بلافاصله به مزرعه منتقل و در مخزن حل شدند. ال-آرژنین و گلايسين بتائين 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 میلی لیتر در لیتر در پایان به عنوان 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 ال آرژنین، اسید سالیسیلیک و گلايسين بتائين در هر نوبت به ترتیب 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 پستی 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 شاخه های اصلی گل تاجی از غلاف برگ پرچم خارج شده بودند. تعداد روز تا گرده افشانی 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 کاکل ها به اندازه دو تا سه سانتی متر از پوشش بلال خارج شده بودند. فاصله گرده افشانی تا ظهور کاکل از تفاضل دو تاریخ اخیر محاسبه شد.

مرحله تاولی شدن دانه (R2) با کنارزدن محتاطانه پوشش بلال و مشاهده دانه های سفید، برجسته و حاوی مایع شفاف در بخش میانی بلال تعیین شد (Abendroth *et al.*, 2011). این ارزیابی در ردیف های اول و پنجم هر کرت انجام شد تا به ردیف های 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 اندازه گیری اجزای عملکرد، بلال های 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 زیر نمونه ۲۰۰ دانه ای با ترازوی دیجیتال دارای دقت ۰/۰۱ گرم

تعیین شد. عملکرد دانه با برداشت دو ردیف میانی هر کرت از سطحی معادل سه متر مربع اندازه گیری شد. بلال ها به صورت دستی برداشت، توزین و پس از خشک شدن، دانه آن ها جدا شد. رطوبت دانه بلافاصله پس از دانه کردن اندازه گیری شد و عملکرد دانه بر مبنای رطوبت استاندارد ۱۴ درصد به تن در هکتار تبدیل گردید.

پیش از انجام تجزیه واریانس مرکب داده ها، همگنی واریانس خطای آزمایشی در دو سال با استفاده از آزمون بارتلت بررسی شد (جدول ۲). نتیجه این آزمون برای همه صفات، به جز تعداد ردیف دانه در بلال، غیرمعنی دار بود. بنابراین، فرض همگنی واریانس خطا برای این صفات تأیید و تجزیه واریانس مرکب برای آن ها 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 داده های هر سال نشان داد که اثر تیمارهای آزمایشی بر این صفت در هیچ یک از دو سال معنی دار نبود. از این رو، این صفت از ادامه گزارش نتایج کنار گذاشته شد. سال و بلوک در سال به عنوان عوامل تصادفی و رژیم آبیاری، محلول پاشی و هیبرید به عنوان عوامل ثابت در نظر گرفته شدند. مقایسه میانگین ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. محاسبات آماری در نرم افزار SAS و رسم نمودار در نرم افزار 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 تاسل دهی	0.00182	0.966
Day to anthesis	روز تا گرده افشانی	0.00216	0.963
Day to silking	روز تا کاکل دهی	0.01790	0.894
Anthesis-silking interval	فاصله گرده افشانی تا کاکل دهی	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

برهمکنش آبیاری × محلول پاشی بر تعداد روز تا ظهور گل تاجی، روز تا گرده افشانی، روز تا ظهور کاکل، فاصله گرده افشانی 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 معنی دار بود (جدول های ۳ و ۴). برهمکنش محلول پاشی × رقم فقط بر تعداد روز تا ظهور گل تاجی، روز تا گرده افشانی و روز تا ظهور کاکل معنی دار شد. برهمکنش آبیاری × رقم بر فاصله گرده افشانی 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 معنی دار شد. برهمکنش سه گانه آبیاری × محلول پاشی × رقم فقط بر عملکرد دانه معنی دار بود (جدول ۴).

تجزیه واریانس مرکب داده ها نشان داد اثر سال بر فاصله گرده افشانی تا ظهور کاکل، طول دوره پر شدن دانه، تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک، عملکرد دانه، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال و تعداد بلال در مترمربع در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد معنی دار بود (جدول های ۳ و ۴). رژیم آبیاری همه صفات فنولوژیک و عملکردی را، به جز تعداد بلال در مترمربع، تحت تأثیر قرار داد. محلول پاشی بر تعداد روز تا ظهور گل تاجی، گرده افشانی و ظهور کاکل، فاصله گرده افشانی تا ظهور کاکل، طول دوره پر شدن دانه، عملکرد دانه، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بلال و وزن هزار دانه اثر معنی دار داشت (جدول های ۳ و ۴).

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

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

S.O.V.	منبع تغییرات	درجه آزادی d.f.	Mean Squares					میانگین مربعات
			روز تا تاسل دهی	روز تا گرده افشانی	روز تا کاکل دهی	فاصله گرده افشانی تا کاکل دهی	روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی	طول دوره پر شدن دانه
			Day to tasseling	Day to anthesis	Day to silking	Anthesis-silking interval	Day to physiological maturity	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)	محلول پاشی	3	28.9*	40.30*	78.90**	7.05*	5.41	27.09**
Y × F	سال × محلول پاشی	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	محلول پاشی × رقم	3	3.90*	3.00*	6.89*	1.24	1.80	3.24
Y × F × C	سال × محلول پاشی × 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 × محلول پاشی	6	5.19*	6.90*	15.20**	2.15*	15.94**	5.07*
Y × I × F	سال × آبیاری × محلول پاشی	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 × محلول پاشی × رقم	6	0.49	0.88	1.92	0.45	2.19	2.23
Y × I × F × C	سال × آبیاری × محلول پاشی × 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 معنی دار 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

S.O.V.	منبع تغییرات	درجه آزادی d.f.	Mean Squares				میانگین مربعات
			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)	محلول پاشی	3	1.01*	11.32*	2940**	1370 *	0.09
Y × F	سال × محلول پاشی	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	محلول پاشی × رقم	3	0.05	0.83	109	165	0.07
Y × F × C	سال × محلول پاشی × 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 × محلول پاشی	6	0.44**	0.81**	183**	467*	0.08
Y × I × F	سال × آبیاری × محلول پاشی	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 × محلول پاشی × رقم	6	0.31*	0.79	163	14	0.10
Y × I × F × C	سال × آبیاری × محلول پاشی × 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 گرده افشانی تا ظهور کاکل نیز در سال دوم کوتاه تر بود. گرم تر بودن دمای هوا در سال دوم (جدول ۱)، می تواند تا حدودی این تفاوت ها در دو سال را توضیح دهد، اما چون برهمکنش های سال با عوامل آزمایشی معنی دار نبودند، نمی توان تفاوت جزئی صفات فنولوژیکی بین دو سال را مستقیماً به یک متغیر هواشناسی خاص نسبت داد و تنها می توان آن را در چارچوب تفاوت کلی شرایط محیطی دو سال تفسیر کرد.

مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری × محلول پاشی (جدول ۶) نشان داد که پاسخ فنولوژیکی گیاه به ترکیبات محلول پاشی شده به وضعیت تأمین آب وابسته بود. در آبیاری کامل، هیچ یک از ترکیبات از نظر زمان ظهور گل تاجی، گرده افشانی، ظهور کاکل، فاصله گرده افشانی تا ظهور کاکل و طول دوره پر شدن دانه با شاهد اختلاف معنی داری نداشتند. بنابراین، در شرایط مطلوب آبی، محلول پاشی تغییر مشخصی در زمان بندی رشد زایشی ایجاد نکرد (جدول ۶).

در شرایط تنش خشکی متوسط، گلایسین بتائین زمان ظهور گل تاجی را به طور معنی داری از ۶۰/۴ به ۵۸/۴ روز، گرده افشانی را از ۶۴/۲ به ۶۱/۴ روز و ظهور کاکل را از ۷۲/۱ به ۶۸/۴ روز کاهش داد. همچنین فاصله گرده افشانی تا ظهور

کاکل از ۷/۹ به ۷/۰ روز کاهش یافت و طول دوره پر شدن دانه به طور معنی داری از ۲۸/۷ به ۳۱/۰ روز افزایش پیدا کرد. بنابراین، گلایسین بتائین ضمن کاهش اثر منفی تنش خشکی (تأخیر مراحل گل دهی)، فاصله گرده افشانی تا ظهور کاکل را ۰/۹ روز کوتاه و دوره مؤثر تشکیل تا رسیدگی دانه را ۲/۳ روز طولانی تر کرد. اثر ال-آرژنین و اسید سالیسیلیک بر دوره پر شدن دانه، روز تا رسیدگی و روز تا گرده افشانی کمتر از گلایسین بتائین بود و با شاهد اختلاف معنی داری نداشت (جدول ۶).

در شرایط تنش خشکی شدید، تفاوت میان تیمارهای محلول پاشی بیشتر نمایان شد. گلایسین بتائین در مقایسه با شاهد، ظهور گل تاجی را به طور معنی داری از ۶۴/۲ به ۶۰/۷ روز، گرده افشانی 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 گرده افشانی تا ظهور کاکل را به طور معنی داری از ۹/۹ به ۷/۸ روز کاهش داد. طول دوره پر شدن دانه نیز به طور معنی داری از ۲۴/۳ روز در شاهد به ۲۷/۱ روز در تیمار گلایسین بتائین افزایش یافت. ال-آرژنین و اسید سالیسیلیک نیز طول دوره پر شدن دانه را به ترتیب 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 می دهد

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

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

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 × محلول پاشی بر صفات فنولوژیکی هیبریدهای ذرت

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

طول دوره پر شدن دانه	روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی	فاصله گرده افشانی تا کاکل دهی	روز تا کاکل دهی	روز تا گرده افشانی	روز تا تاسل دهی	Spraying
Grain filling period	Day to physiological maturity	Anthesis-silking interval	Day to silking	Day to anthesis	Day to tasseling	محلول پاشی
Full irrigationآبیاری کامل						
Control	116.9ab(A)	5.9d(A)	67.0e(A)	61.1ef(A)	58.4e(A)	شاهد
L-Arginine	117.7a(A)	5.8d(A)	66.4e(A)	60.6ef(A)	58.0e(A)	ال-آرژنین
Salicylic acid	117.2a(A)	5.8d(A)	66.1e(A)	60.3f(A)	57.8e(A)	اسید سالیسیک
Glycine betaine	117.8a(A)	5.8d(A)	66.3e(A)	60.6ef(A)	57.9e(A)	گلیسین بتائین
Moderate drought stressتنش خشکی متوسط						
Control	114.4bc(A)	7.9bc(A)	72.1bc(A)	64.2bcd(A)	60.4bcd(A)	شاهد
L-Arginine	114.0c(A)	7.3c(B)	69.8cd(AB)	62.5cde(AB)	58.9cde(B)	ال-آرژنین
Salicylic acid	113.4cd(A)	7.3c(B)	69.4d(B)	62.2def(AB)	58.6de(B)	اسید سالیسیک
Glycine betaine	114.6bc(A)	7.0c(B)	68.4de(B)	61.4ef(B)	58.4e(B)	گلیسین بتائین
Severe drought stressتنش خشکی شدید						
Control	112.3cde(A)	9.9a(A)	78.3a(A)	68.3a(A)	64.2a(A)	شاهد
L-Arginine	110.6ef(AB)	9.0a(AB)	74.2b(B)	65.2b(B)	61.3b(B)	ال-آرژنین
Salicylic acid	111.4de(A)	8.9ab(AB)	74.1b(B)	65.2b(B)	61.5b(B)	اسید سالیسیک
Glycine betaine	108.5f(B)	7.8c(B)	72.2b(B)	64.4bc(C)	60.7bc(B)	گلیسین بتائین

میانگین هایی، در هر ستون، که دارای حداقل یک حرف مشترک می باشند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی داری ندارند. حروف بزرگ مربوط به برش دهی روی رژیم آبیاری و حروف کوچک مربوط به مقایسه میانگین کل ترکیب های 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.

(Otegui *et al.*, 1995; Bolaños and Edmeades, 1996).

اثر بیشتر گلايسين بتائين در شرايط تنش خشكي ممكن است با نقش شناخته شده آن در تنظيم اسمزي، افزايش محتوای نسبی 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 پیام رسانی پاسخ به تنش نقش دارد و احتمالاً با تنظيم روزنه‌ای و آنتی اکسیدانی از پیری زودرس برگ‌ها جلوگیری کرده است (Miura and Tada, 2014; Khan *et al.*, 2015). بر اساس مطالعات انجام شده، کاربرد اسید سالیسیلیک در ذرت محتوای آب برگ، پایداری غشا و مقدار کلروفیل را در شرایط تنش خشکی افزایش داده است (Tayyab *et al.*, 2020; Ghassemi-Golezani and Mousavi, 2022) و احتمالاً همین حفظ سطح سبز فعال، دوره مؤثر پر شدن دانه را طولانی تر می کند. ال-آرژنین نیز با تولید نیتریک اکسید و پلی آمین‌ها احتمالاً در تنظيم روزنه‌ای، پایداری غشا و تنظيم اسمزی نقش دارد (Neill *et al.*, 2008; Winter *et al.*, 2015).

در مطالعات مشابه، کاربرد برگی ال-آرژنین مقدار کلروفیل برگ‌های ذرت و کارایی فتوسیستم II را افزایش و محتوی پراکسید هیدروژن و مالون‌دی‌آلدهید را کاهش داد (Sun *et al.*, 2023) و در گندم محتوای نسبی آب و

که افزایش طول دوره پر شدن دانه در این تیمار ناشی از جلو افتادن مرحله تاولی شدن و بهبود توالی مراحل زایشی بود، نه تأخیر در رسیدگی فیزیولوژیکی (جدول ۶).

افزایش فاصله گرده افشانی تا ظهور کاکل یکی از شناخته شده ترین واکنش‌های ذرت به کمبود آب در مرحله گلدهی است و علت آن حساسیت بیشتر رشد کاکل به کاهش پتانسیل آب بافت نسبت به رشد گل تاجی است، بنابراین با افت پتانسیل آب، طویل شدن کاکل زودتر از نمو گل تاجی متوقف می شود (Sah *et al.*, 2020). از آنجا که دوره گرده افشانی در ذرت کوتاه است، هر روز تأخیر در ظهور کاکل به معنی کاهش همپوشانی گرده افشانی با آمادگی کاکل و کاهش تلقیح است (Otegui *et al.*, 1995). به عبارت دیگر، نزدیک تر شدن زمان آزاد شدن گرده و آمادگی کاکل می تواند احتمال تلقیح و تثبیت دانه را افزایش دهد (Mahrokh *et al.*, 2025b).

این صفت به عنوان یکی از شاخص‌ها برای گزینش غیرمستقیم برای تحمل به خشکی در ذرت شناخته می شود (Bolaños and Edmeades, 1996). البته باید در نظر داشت که فاصله گرده افشانی تا ظهور کاکل مستقیماً تعیین کننده طول دوره پر شدن دانه نیست و این دو صفت باید به صورت جداگانه تفسیر شوند. فاصله گرده افشانی تا ظهور کاکل بیشتر با موفقیت تلقیح و تشکیل دانه ارتباط دارد، درحالی که طول دوره پر شدن دانه مدت زمانی را نشان می دهد که دانه برای رشد و تجمع ماده خشک در اختیار دارد

فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان را بهبود بخشید (Hasanuzzaman *et al.*, 2018). باین حال، وضعیت آب برگ، فتوستتر، کلروفیل، پایداری غشا و فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان در پژوهش حاضر اندازه گیری نشد. بنابراین، این سازکارها تنها تبیین های محتمل بر پایه مطالعات پیشین هستند.

در مطالعه حاضر تنش خشکی موجب تأخیر در ظهور گل تاجی، گرده افشانی و کاکل دهی ذرت شد، در حالی که روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی و طول دوره پرشدن دانه کاهش یافت (جدول های ۵ و ۶). این الگو نشان می دهد که کمبود آب، توسعه لندام های زایشی را در مراحل پیش از گرده افشانی و کاکل دهی به تأخیر انداخته، اما در ادامه، مدت مرحله پرشدن دانه را کوتاه کرده است. نتایج پژوهش های پیشین نیز نشان داده است که تنش خشکی، رشد و ظهور کاکل، ظهور گل تاجی و گرده افشانی ذرت را به تأخیر می اندازد و فاصله گرده افشانی تا ظهور کاکل را افزایش می دهد (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، گرده افشانی و کاکل دهی ذرت شد، اما محلول پاشی گلاسیسین بتائین، ال-آرژنین و اسید سالیسیلیک در کاهش این تأخیر

فنولوژیکی مؤثر بود. کمبود آب با کاهش فشار آماس سلولی، محدود کردن رشد اندام های زایشی، کاهش فتوستتر و اختلال در انتقال مواد فتوستتری، ظهور اندام های زایشی ذرت را به تأخیر می اندازد (Golzardi *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2022; Mahrokh *et al.*, 2025a). ال-آرژنین به عنوان پیش ماده نیتریک اکسید و پلی آمین ها، اسید سالیسیلیک به عنوان یک ترکیب پیام رسان تنظیم کننده پاسخ به تنش و گلاسیسین بتائین به عنوان یک اسمولیت سازگار، می توانند به حفظ فشار آماس، پایداری غشاها، فعالیت سامانه آنتی اکسیدانی و تداوم رشد لندام های 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 میانگین های برهمکش آبیاری $\times$ رقم نشان داد در شرایط آبیاری کامل، فاصله گرده افشانی تا ظهور کاکل و طول دوره پرشدن دانه دو هیبرید تفاوت معنی داری نداشت (جدول ۷). در شرایط تنش خشکی متوسط، طول دوره پر شدن دانه در تری وی کراس ۶۴۷ برابر با ۳۰/۱ روز و در سینگل کراس ۷۰۴ برابر با ۲۹/۱ روز بود، اما از نظر فاصله گرده افشانی تا ظهور کاکل تفاوت معنی داری بین دو هیبرید ذرت مورد بررسی وجود نداشت. در شرایط تنش خشکی شدید، فاصله گرده افشانی تا ظهور کاکل در تری وی کراس ۶۴۷ برابر با ۸/۳ روز بود که به طور معنی داری کمتر از ۹/۵ روز در سینگل کراس 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 تا کاکل‌دهی 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 irrigationآبیاری کامل								
TWC.647	تری‌وی کراس ۶۴۷	6.1d(A)	32.8a(A)	6.79b(B)	21.5d(B)	306.9c(B)	270.8a(A)	8.22a(A)
SC.704	سینگل کراس ۷۰۴	5.6d(A)	34.1a(A)	7.16a(A)	23.8a(A)	343.8a(A)	284.0a(A)	7.39b(B)
Moderate drought stressتنش خشکی متوسط								
TWC.647	تری‌وی کراس ۶۴۷	7.2c(A)	30.1b(A)	5.70c(A)	22.6b(A)	322.0b(A)	248.0b(A)	7.15bc(A)
SC.704	سینگل کراس ۷۰۴	7.5bc(A)	29.1bc(B)	5.58c(A)	22.1c(B)	318.4b(A)	249.6b(A)	7.04c(B)
Severe drought stressتنش خشکی شدید								
TWC.647	تری‌وی کراس ۶۴۷	8.3b(B)	27.2c(A)	4.06d(A)	18.4e(A)	262.1d(A)	216.9c(A)	7.14bc(A)
SC.704	سینگل کراس ۷۰۴	9.5a(A)	24.9d(B)	3.76e(B)	17.3f(B)	249.5e(B)	207.2c(B)	7.27bc(A)

میانگین هایی، در هر ستون، که دارای حداقل یک حرف مشترک می باشند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی داری ندارند. حروف بزرگ مربوط به برش دهی روی رژیم آبیاری و حروف کوچک مربوط به مقایسه میانگین کل ترکیب های 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 تری‌وی کراس ۶۴۷ برابر با ۲۷/۲ روز و در سینگل کراس ۷۰۴ برابر با ۲۴/۹ روز بود. این نتایج نشان داد تری‌وی کراس ۶۴۷ در مقایسه با سینگل کراس 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، سینگل کراس ۷۰۴ نسبت به تری‌وی کراس ۶۴۷، ظهور گل تاجی، گرده‌افشانی و ظهور کاکل را به ترتیب ۲/۴، ۳/۳ و ۲/۴ 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	تری‌وی کراس ۶۴۷	59.7bc(B)	63.3b(B)	70.8b(B)
SC.704	سینگل کراس ۷۰۴	62.3a(A)	65.7a(A)	74.1a(A)
L-Arginine ال-آرژنین				
TWC.647	تری‌وی کراس ۶۴۷	58.8cd(B)	62.1cd(B)	69.3cd(B)
SC.704	سینگل کراس ۷۰۴	60.0b(A)	63.4b(A)	70.9b(A)
Salicylic acid اسید سالیسیک				
TWC.647	تری‌وی کراس ۶۴۷	58.7cd(A)	61.9cd(A)	69.3cd(A)
SC.704	سینگل کراس ۷۰۴	59.9b(A)	63.1bc(A)	70.4bc(A)
Glycine betaine گلائینین بتائین				
TWC.647	تری‌وی کراس ۶۴۷	58.1d(B)	61.2d(B)	67.9d(B)
SC.704	سینگل کراس 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 به ترتیب به ۱/۲، ۱/۳ و ۱/۶ روز کاهش یافت. در تیمار اسید سالیسیلیک، اختلاف دو هیبرید در هیچ یک از این سه صفت معنی‌دار نبود. در تیمار گلیسین بتائین، تری‌وی کراس ۶۴۷ به ترتیب ۱/۸، ۱/۹ و ۲/۱ روز زودتر از سینگل کراس 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 معنی داری بیشتر از تری وی کراس ۶۴۷ (۳۰۶/۹ عدد) بود، اما در شرایط تنش خشکی متوسط، تفاوت دو هیبرید برای این صفت معنی دار نشد. در شرایط تنش خشکی شدید، تری وی کراس ۶۴۷ با ۲۶۲/۱ دانه در بلال نسبت به سینگل کراس ۷۰۴ با ۲۴۹/۵ دانه برتری معنی داری داشت. در مورد تعداد دانه در ردیف نیز در شرایط آبیاری کامل سینگل کراس ۷۰۴ برتری معنی داری داشت، اما در شرایط تنش متوسط و شدید برتری با تری وی کراس ۶۴۷ بود (جدول ۷). وزن هزار دانه تحت تنش خشکی شدید در تری وی 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 تری وی 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 معنی دار شدن برهمکنش های آبیاری × محلول پاشی و آبیاری × رقم برای تعداد و وزن

دانه، از تفسیر اثرهای اصلی آبیاری، محلول پاشی و رقم برای این صفات خودداری شد. برهمکنش آبیاری × رقمشان داد که کمبود آب تعداد بلال قابل برداشت هر دو هیبرید را به طور معنی داری کاهش داد (جدول ۷).

در هیبرید سینگل کراس ۷۰۴، تعداد بلال از ۸/۲۲ بلال در مترمربع در شرایط آبیاری کامل به ترتیب 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 معنی دار 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 بوته های بدون بلال یا توقف رشد برخی بلال ها پیش از رسیدن به مرحله برداشت ارتباط داشته باشد. برهمکنش آبیاری × محلول پاشی بر تعداد بلال در مترمربع معنی دار نبود (جدول ۴). بنابراین، افزایش عملکرد ناشی از محلول پاشی تحت تنش خشکی را نمی توان به افزایش تعداد بلال نسبت داد.

مقایسه میانگین های برهمکنش آبیاری × محلول پاشی نشان داد پاسخ تعداد و وزن دانه به محلول پاشی به وضعیت تأمین آب وابسته بود. در شرایط آبیاری کامل، اختلاف میان تیمارهای محلول پاشی 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
		سال Year				
2024	۱۴۰۳	5.41b	20.5b	292.8b	242.1	7.54a
2025	۱۴۰۴	5.60a	21.3a	308.1a	250.0	7.20b
		آبیاری Irrigation				
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
		محلول پاشی Spraying				
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 سالیسیلیک	5.51ab	21.0ab	302.1ab	245.4ab	7.34
Glycine betaine	گلایسین بتائین	5.70a	21.6a	311.3a	252.6a	7.18
		رقم Cultivar				
TWC.647	تری وی 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

میانگین هایی، 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 معنی داری 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 × محلول پاشی 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

		عملکرد دانه (تن در هکتار)	تعداد دانه در ردیف	تعداد دانه در بلال	وزن هزار دانه (گرم)
Spraying	محلول پاشی	Grain yield (t ha ⁻¹)	Kernels no. row ⁻¹	Kernel no. ear ⁻¹	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 سالیسیک	6.99b(AB)	22.9bc(AB)	329.3ab(AB)	276.2b(A)
Glycine betaine	گلیسین 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 سالیسیک	5.61e(AB)	22.2de(B)	317.9cd(B)	246.5e(B)
Glycine betaine	گلیسین 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 سالیسیک	3.95h(A)	18.1g(A)	259.3f(A)	213.7h(B)
Glycine betaine	گلیسین 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 به طوری که در شرایط تنش خشکی میانگین وزن هزار دانه را از ۲۴۲/۰ به ۲۵۶/۴ گرم، تعداد دانه در بلال را از ۲۱/۶ به ۳۰۷/۹ و تعداد دانه 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 معنی داری نداشتند (جدول ۱۰).

تعداد دانه در بلال در تیمار گلایسین بتائین در شرایط تنش خشکی متوسط با مقادیر مشاهده شده در آبیاری کامل تفاوت معنی داری نداشت، اما وزن هزار دانه همچنان کمتر بود. نتایج آزمایش حاضر نشان داد که گلایسین بتائین 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 دانه 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 معنی داری نداشت. برای وزن هزار دانه، 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 نشان دهنده محدودیت منبع در دوره پر شدن دانه بود، زیرا وزن نهایی دانه در ذرت به طور مستقیم تابع مقدار مواد پرورده در دسترس و طول دوره پر شدن دانه است (Borrás et al., 2004). محلول پاشی در پژوهش حاضر در سه نوبت و از مرحله شش تا هشت برگی تا حوالی گل دهی انجام شد، بنابراین، کاربرد ترکیبات فقط به آغاز رشد رویشی محدود نبود و اثر آنها بر وزن دانه ممکن است نتیجه تداوم پاسخ ایجاد شده تا دوره تشکیل و پر شدن دانه باشد. گلایسین بتائین می تواند پس از جذب در بافت گیاه باقی بماند و از ساختار غشاها و پروتئین ها در شرایط تنش محافظت کند (Ashraf and Foolad, 2007; Chen and Murata, 2011).

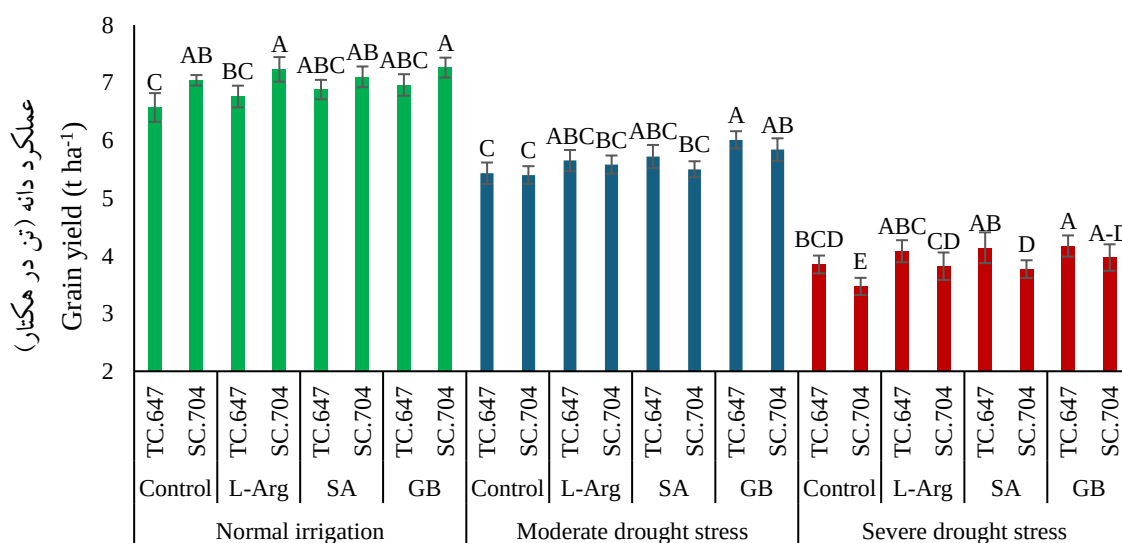
کاهش همزمان تعداد و وزن دانه در این آزمایش با استمرار کمبود آب از مرحله چهاربرگی تا رسیدگی فیزیولوژیکی قابل توضیح است. کمبود آب در حوالی مرحله گل دهی می تواند گرده افشانی، تلقیح و تثبیت دانه را محدود کند، درحالی که تداوم آن در دوره رشد دانه

مربوط به عملکرد دانه به صورت 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، به طوری که در تنش شدید، تری وی کراس ۶۴۷ برتر قرار بود (شکل ۱). این نتیجه نشان می دهد گزینه 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; Mahrokhi et al., 2025b).

می تواند مدت پر شدن و وزن نهایی دانه را کاهش دهد (Mahrokhi 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 به طور معنی داری بیشتر از سال اول (۵/۴۱ تن در هکتار) بود (جدول ۹). به دلیل معنی دار شدن برهمکنش آبیاری × محلولپاشی × رقم (جدول ۴)، اثر اصلی و برهمکنش های دوگانه



شکل ۱- مقایسه میانگین برهمکنش آبیاری × محلولپاشی × رقم بر عملکرد دانه هیبریدهای ذرت (برش دهی روی رژیم آبیاری). میله های خطا اشتباه معیار میانگین را نشان می دهند. Control: شاهد، L-Arg: ال-آرژنین، SA: اسید سالیسیلیک، GB: گلیاسین 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 شرایط آبیاری کامل، بیشترین عملکرد دانه با کاربرد گلايسين بتائين در سينگل کراس ۷۰۴ و به میزان ۷/۲۶ تن در هکتار به دست آمد (شکل ۱). بیشترین عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی متوسط و شدید (به ترتیب ۶/۰۱ و ۴/۱۷ تن در هکتار) از ترکیب گلايسين بتائين و هیبرید تری وی کراس ۶۴۷ حاصل شد (شکل ۱). میری و زمانی مقدم (Miri and Zamani Moghadam, 2014) نیز گزارش کردند که محلول پاشی گلايسين بتائين، از طریق افزایش محتوای کلروفیل، کاروتنوئید و پروتئین و حفظ ظرفیت فتوسنتزی و ساختار غشا در برابر تنش خشکی، اثر منفی تنش خشکی بر عملکرد دانه ذرت را کاهش داد.

سهم نسبی محلول پاشی با افزایش شدت تنش بیشتر شد، هرچند مقدار مطلق عملکرد دانه جبران شده در تنش متوسط از تنش شدید بالاتر بود. این الگو منطقی است، در آبیاری کامل محدودیت آبی وجود ندارد که برطرف شود و در تنش شدید نیز آسیب وارد بر گیاه فراتر از ظرفیت جبران این ترکیب ها است. بیشترین بازده کاربرد این ترکیب ها در محدوده میانی تنش قرار دارد؛ جایی که گیاه هنوز توان پاسخ فیزیولوژیک دارد ولی با محدودیت آبی مؤثری روبه روست (Ashraf and Foolad, 2007; Golzardi et al., 2017).

در شرایط تنش خشکی متوسط، گلايسين بتائين عملکرد دانه تری وی کراس ۶۴۷ را ۱۰/۷ درصد و عملکرد دانه سينگل کراس ۷۰۴ را ۸/۱

درصد نسبت به شاهد همان هیبرید افزایش داد (شکل ۱). در شرایط تنش خشکی شدید، الگو معکوس شد و افزایش نسبی ناشی از گلايسين بتائين در سينگل کراس ۷۰۴ برابر با ۱۴/۴ درصد و در تری وی کراس ۶۴۷ برابر با ۸/۳ درصد بود. اگرچه پاسخ نسبی سينگل کراس ۷۰۴ به گلايسين بتائين در شرایط تنش خشکی شدید بیشتر بود، عملکرد دانه مطلق آن همچنان کمتر از تری وی کراس ۶۴۷ باقی ماند (شکل ۱). این یافته ها نشان می دهد محلول پاشی بخشی از خسارت کمبود آب را جبران کرد، اما نتوانست جایگزین انتخاب هیبرید ذرت مناسب شود.

گلايسين بتائين به عنوان اسمولیت سازگار مستقیماً در تنظیم اسمزی شرکت می کند و همچنین دستگاه فتوسنتزی را در برابر تنش محافظت می نماید، در حالی که اسید سالیسیلیک و ال-آرژنین بیشتر نقش پیام رسان دارند و اثر آن ها به فعال شدن پاسخ های دفاعی گیاه وابسته است (Chen and Murata, 2011; Khan et al., 2015; Winter et al., 2015). افزون بر این، گلايسين بتائين در گیاه به سرعت تجزیه نمی شود و پس از جذب برگی به بافت های در حال رشد منتقل می شود، همین پایداری می تواند دلیل تداوم اثر آن تا مرحله پر شدن دانه باشد (Ashraf and Foolad, 2007).

در مقایسه با شرایط آبیاری کامل میزان کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش شدید در تیمار شاهد محلول پاشی برای تری وی کراس ۶۴۷ و سينگل کراس ۷۰۴ به ترتیب ۴۱/۴ و ۵۰/۷

درصد بود، درحالی که کاربرد گلايسين بتائين آن را به ترتيب به ۳۶/۵ و ۴۳/۶ درصد رساند (شکل ۱). به بيان ديگر محلول پاشی توانست بخشی از خسارت تنش خشکی را جبران کند. اين درصد کاهش با نتایج فرتحليل هايی که افت عملکرد دانه ذرت در شرایط تنش خشکی را بين ۲۰ تا ۵۰ درصد گزارش کرده اند، هم خوانی دارد (Mahrokh et al., 2020; Sah et al., 2020; Golzardi et al., 2023).

به طور کلی، نتایج پژوهش حاضر نشان داد پاسخ ذرت به محلول پاشی گلايسين بتائين و ال-آرژينين به رژيم آبیاری وابسته بود. در شرایط آبیاری کامل، تفاوت میان تیمارهای محلول پاشی محدود بود، اما در شرایط کمبود آب، به ویژه با محلول پاشی گلايسين بتائين، تأخیر گل دهی کاهش یافت، فاصله گرده افشانی تا ظهور کاکل کوتاه تر شد و طول دوره پر شدن دانه افزایش پیدا کرد. اين تغييرات 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. سينگل کراس ۷۰۴ در شرایط آبیاری کامل ظرفیت عملکرد دانه بیشتری نشان داد، اما تری وی کراس ۶۴۷ در شرایط

تنش خشکی شدید فاصله گرده افشانی تا ظهور کاکل کوتاه تر، دوره رشد دانه طولانی تر و تعداد و وزن هزار دانه بیشتری را حفظ کرد. بیشترین عملکرد دانه در شرایط آبیاری کامل با کاربرد گلايسين بتائين در هیبرید سينگل کراس ۷۰۴ حاصل شد. درحالی که در شرایط تنش خشکی متوسط و شدید بیشترین عملکرد دانه از ترکیب گلايسين بتائين و هیبرید تری وی کراس ۶۴۷ به دست آمد. بنابراین، برای دو هیبرید ذرت مورد بررسی، انتخاب هیبرید متناسب با شدت محدودیت آب همراه با کاربرد گلايسين بتائين پیش از گل دهی می تواند از کاهش عملکرد جلوگیری کند.

سپاسگزاری

نگارندگان بدین وسیله از پشتیبانی های بخش تحقیقات ذرت و گیاهان علوفه ای، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر و گروه زراعت و اصلاح نباتات دانشگاه تهران برای اجرای این پژوهش سپاسگزاری می کنند.

عدم تعارض منافع

نگارندگان اعلام می دارند که هیچگونه تعارض منافع با هم 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. Ahmadi¹ , A. Ahmadi^{2*} , F. Golzardi³  and M. Sabokdast Noudehi⁴ 

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.647 with 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.