"نشریه علوم زراعی ایران"
جلد بیست و هفتم، شماره ۱، بهار ۱٤۰٤

مقاله پژوهشی

ارزیابی تحمل تنش خشکی در اینبرد لاین‌های ذرت (*Zea mays* L.)

Evaluation of maize (*Zea mays* L.) inbred lines for drought stress tolerance

علی ماهرخ[۱]، محمدرضا شیری[۲]، فرید گل‌زردی[۳] و ویدا قطبی[۴]

چکیده

علی ماهرخ، ع.، م.ر. شیری، ف. گل‌زردی و و. قطبی. ۱٤۰٤. ارزیابی تحمل تنش خشکی در اینبرد لاین‌های ذرت (*Zea mays* L.). **نشریه علوم زراعی ایران. ۲۷ (۱): ۲۲-۱.**

به‌منظور ارزیابی تحمل تنش خشکی در اینبرد لاین‌های در حال خلوص ذرت، دو آزمایش جداگانه با تیمارهای آبیاری کامل و تنش خشکی (به‌ترتیب آبیاری پس از ۵۰ و ۹۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر) به مدت دو سال (۱٤۰۲-۱٤۰۱) در موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در کرج اجرا شد. آزمایش به‌صورت طرح آلفا لاتیس ۷×٦ روی ۳٤ اینبرد لاین در حال خلوص در مرحله S4-S5، شش لاین خالص مناطق معتدله و دو لاین شاهد (MO17 و B73) با دو تکرار به اجرا درآمد. نتایج نشان داد که تنش خشکی اثر معنی‌داری بر خصوصیات فنولوژیکی ژنوتیپ‌های ذرت داشت. در شرایط آبیاری کامل، تعداد روز تا ظهور گل تاجی در لاین‌های ذرت بین ٦۹/۲ تا ۸۰/۷ روز متغیر بود، درحالی‌که در شرایط تنش خشکی این دامنه به ۷۱/۷ تا ۸٤/۷ روز افزایش یافت. تعداد روز تا گرده‌افشانی در شرایط آبیاری کامل بین ۷۱/۳ تا ۸۳/۱ روز بود و در شرایط تنش خشکی این دامنه از ۷۵/۱ تا ۸۸/۹ روز افزایش یافت. تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار ارتفاع بوته، وزن هزار دانه، تعداد دانه در بوته و وزن حجمی دانه (وزن هکتولیتر) اینبرد لاین‌های ذرت شد. در تیمار آبیاری کامل، ژنوتیپ‌های ۱۹ و ۲ به‌ترتیب بیشترین و کمترین (٤۳۱ و ۲۳۷ گرم) وزن هزار دانه را داشتند. در تیمار تنش خشکی، ژنوتیپ‌های ۳٦ و ۱۲ به‌ترتیب بیشترین و کمترین (۳٤۹ و ۱۹۰ گرم) وزن هزار دانه را داشتند. بیشترین عملکرد دانه در تیمارهای آبیاری کامل و تنش خشکی (به‌ترتیب ۱۰۵۳۰ و ۷۲۲۲ کیلوگرم در هکتار) در لاین ۳۵ ثبت شد. بیشترین مقدار بهره‌وری آب در تیمار آبیاری کامل (۱/۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب) و در تیمار تنش خشکی (۱/۱٦ کیلوگرم بر مترمکعب) نیز در لاین ۳۵ به‌دست آمد. لاین‌های ۳۵، ۲۷، ٦، ۳۱، ۱۵، ۲٤، ۳۲، ۳۳ و ۲۸ به‌ترتیب به‌عنوان ژنوتیپ‌های امیدبخش برتر در شرایط تنش خشکی و لاین‌های ۳۵، ٦، ۳۲، ۳۱، ۱۵ و ۳۳ به‌ترتیب به‌عنوان ژنوتیپ‌های امیدبخش برتر در شرایط آبیاری کامل شناسایی شدند. نتایج نشان داد که لاین ۳۵ برتری قابل‌توجهی در عملکرد دانه و بهره‌وری آب در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی داشته و به‌عنوان ژنوتیپ برتر همراه با سایر ژنوتیپ‌های منتخب، برای تولید هیبریدهای متحمل به تنش خشکی در برنامه‌های به‌نژادی ذرت قابل استفاده خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، تنش خشکی، ذرت، عملکرد دانه و وزن هزار دانه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸ این مقاله مستخرج از پروژه تحقیقاتی شماره ۰۱۰۴۶۴-۰۴۳-۰۳-۰۳-۲ مصوب مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر می‌باشد

۱- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(مکاتبه کننده، ✉ ali_mahrokh229@yahoo.com)
۲- دانشیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۳- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۴- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

Evaluation of maize (*Zea mays* L.) inbred lines for drought stress tolerance

Mahrokh, A.[1], Shiri, M.R.[2], Golzardi, F.[3] and Ghotbi. V.[4]

ABSTRACT

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

Introduction: In dry and semi-arid climatic conditions of Iran, drought stress is one of the major limiting factors for grain yield in maize (Mahrokh *et al*., 2021). As one of the most important cereal crops in ensuring food security and feeding the growing global population, maize holds significant importance. However, due to its high sensitivity to water deficit, its grain yield is considerably reduced under drought conditions. Therefore, identifying and selecting drought-tolerant genotypes with acceptable yield performance is of paramount importance. The objective of this experiment was to evaluate maize inbred lines under normal irrigation and drought stress conditions. The effect of drought stress on phenological, morphological, grain yield, yield components and irrigation water productivity was assssed. The drought-tolerant genotypes were selected for being utilized in maize breeding programs.

Materials and Methods: The experiment was conducted as an alpha lattice design (7×6) with 34 maize inbred lines (at the S_4–S_5 stage) sourced from the country's hot and dry regions, supplemented with six inbred lines from temperate regions and two check lines (MO_{17} and B_{73}). The experiment was arranged in two replications and six incomplete blocks per replication, with seven entries per block, under two irrigation regimes (normal irrigation and drought stress) in two growing seasons (2022 and 2023) at the Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran. In the normal irrigation treatment, irrigation was applied after a cumulative evaporation of 50 mm from a class A evaporation pan, while in the drought stress treatment, irrigation was applied after 90 mm evaporation from a class A evaportation pan. Days to tassel emergence, days to pollination, days to silk emergence, anthesis-silking interval (ASI), plant height, number of leaves per plant, ear length, ear diameter, number of grains per plant (GPP), 1000 grain weight (TGW), grain yield, grain moisture content, hectoliter weight, and irrigation water productivity (WP) were measured during growing seasons and after harvest.

Results: Drought stress had significant impact on all phenological characteristics of maize inbred lines. Under normal irrigation conditions, the mean days to tassel emergence varied from 69.2 to 80.7 days, while under drought stress this period increased to 71.7–84.7 days. Similarly, days to pollination under normal irrigation conditions ranged between 71.3 and 83.1 days, and under drought conditions, this period extended from 75.1 to 88.9 days. Line 10 showed the shortest duration days to pollination, while line 19 had the longest. Drought stress significantly reduced plant height, TGW, GPP, and hectoliter weight. Under normal irrigation, line 19 and 2 had the highest and lowest TGW (431 and 237 g, respectively). However, under drought stress conditions, line 36 had the highest TGW (349 g), and line 12 the lowest (190 g). Line 35 produced the highest grain yield with 10530 $kg.ha^{-1}$ under normal irrigation and 7222 $kg.ha^{-1}$ under drought stress. This line also had the highest WP under normal irrigation conditions (1.75 $kg.m^{-3}$) and under drought stress (1.16 $kg.m^{-3}$).

Conclusion: The results of this experoiment demonstrate that the responses of maize inbred lines to normal irrigation and drought stress conditions were complex and multidimensional. The observed delays in flowering stages under drought stress, along with significant reductions in TGW, GPP, and WP, indicated the negative impact of water deficit on growth and reproductive processes in maize inbred lines. However, the considerable genetic variation among the evaluated inbred lines provides a solid foundation for selecting and incorporating desirable genes, such as high grain yield and enhanced drought tolerance, in breeding programs. Inbred lines 35, 27, 6, 31, 15, 24, 32, 33, and 28 were identified as the promising lines under drought stress, while inbred lines 35, 6, 32, 31, 15, and 33 were deemed suitable under normal irrigation conditions. Overall, inbred line 35 performed superior for both grain yield and water productivity under both conditions, and could be utilized for development of drought-tolerant hybrids in maize breeding programs.

Key words: Drought stress, Grain yield, Maize, Water productivity and 1000 grain weight

Received: January, 2025 **Accepted**: **July, 2025**

1. Assistant Prof., Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran (Corresponding author, ✉ ali_mahrokh229@yahoo.com)
2. Associate Prof., Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
3. Assistant Prof., Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
4. Assistant Prof., Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

مقدمه

تنش‌های محیطی، به ویژه تنش خشکی، از مهم‌ترین عوامل کاهنده عملکرد دانه ذرت در ایران و سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شوند (Mahrokh *et al*., 2021). ذرت یکی از مهم‌ترین گیاهان غلاتی جهان است که در تغذیه جمعیت رو به رشد جهان و تامین امنیت غذایی نقش حیاتی دارد. ذرت به دلیل حساسیت زیاد به تنش‌های محیطی، به ویژه خشکی، در شرایط کاهش مقدار و دفعات آبیاری عملکرد و کیفیت محصول آن کاهش می‌یابد (Golzardi *et al*., 2017). گزار شده است که تنش خشکی باعث کاهش ۱۷ درصد عملکرد جهانی ذرت دانه‌ای می‌شود و در شرایط کم‌آبی شدید این مقدار به بیش از ۷۰ درصد هم می‌رسد (Sallah *et al*., 2002;). با توجه به قرار گرفتن ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک، کم‌آبی یکی از اصلی‌ترین عوامل محدودکننده تولید و موانع توسعه ذرت محسوب می‌شود (Mahrokh *et al*., 2021). بنابراین، شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی با عملکرد مناسب در شرایط تنش، از اهمیت بالایی در برنامه‌های به‌نژادی برخوردار است (Mahrokh *et al*., 2023a).

خشکی اثرات متعددی بر فیزیولوژی و بیوشیمی گیاه ذرت دارد. کاهش پتانسیل آب خاک باعث کاهش محتوای آب نسبی برگ و افزایش مقاومت روزنه‌ای می‌شود که این موضوع باعث کاهش جذب دی‌اکسید کربن و در نتیجه کاهش فتوسنتز می‌شود (Lawlor, 2002). کم‌آبی باعث تخریب غشاهای سلولی و افزایش نفوذپذیری یون‌ها در اثر افزایش حلالیت و پراکسیداسیون چربی‌های غشای سلولی می‌شود (Saneoka *et al*., 2004). این تغییرات باعث اختلال در ساختار و عملکرد غشای سلولی و کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌شوند. تنش خشکی باعث کاهش سطح برگ، کاهش رشد ساقه و ریشه، کاهش کارایی مصرف آب (Farooq *et al*., 2009)، محدودیت فعالیت‌های متابولیکی (Lawlor and Cornic, 2002)، بازدارندگی فعالیت‌های آنزیمی (Ashraf *et al*., 1995)، عدم تعادل یونی و اختلال در تجمع مواد محلول (Khan *et al*.,1999) می‌شود. در پاسخ به این چالش‌ها، شناسایی ژنوتیپ‌هایی که در شرایط تنش‌های محیطی، به ویژه تنش خشکی، عملکرد مناسبی داشته باشند، همواره یکی از موضوعات کلیدی در برنامه‌های به‌نژادی ذرت مورد نظر بوده است. شناسایی و انتخاب لاین‌های والدینی با تحمل نسبی بیشتر به خشکی، احتمال ایجاد ترکیب‌هایی با تحمل بالاتر را در نسل‌های بعدی افزایش می‌دهد (Banziger *et al*., 2000). این موضوع علاوه بر بهبود عملکرد در شرایط تنش می‌تواند به کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی نیز کمک کند.

هدف از این تحقیق، ارزیابی لاین‌های در حال خلوص ذرت در شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی و شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل خشکی برای استفاده در برنامه‌های به‌نژادی آینده بوده است. در این تحقیق هدف ارزیابی لاین‌های ذرت در مرحله S4-S5، برای ایجاد هیبریدهای متحمل‌تر به خشکی بوده است.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در دو شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی به مدت دو سال (۱۴۰۱ و ۱۴۰۲) در موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در کرج اجرا شد. آزمایش به‌صورت طرح آلفا لاتیس ۷×۶ با دو تکرار و شش بلوک ناقص در هر تکرار و هفت لاین در هر بلوک ناقص اجرا شد. مواد گیاهی مورد ارزیابی شامل ۳۴ لاین در حال خلوص ذرت (در مرحله S_4-S_5) دریافتی از اقلیم گرم و خشک کشور همراه با شش لاین خالص مناطق معتدله و دو لاین شاهد (MO_{17} و B_{73}) بودند (جدول ۱). ویژگی‌های خاک مزرعه محل اجرای آزمایش در جدول ۲ و اطلاعات آب‌وهوایی در جدول ۳ ارائه شده است. در تیمار آبیاری کامل،

آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از سطح تشتک تبخیر کلاس A و در تیمار تنش خشکی، آبیاری پس از ۹۰ میلی‌متر تبخیر انجام شد (حد آستانه تنش خشکی برای لاین‌های ذرت ۵۵ تا ۶۰ میلی‌متر تبخیر است) (Sharifnasab *et al.*, 2022). آبیاری به صورت قطره‌ای نواری با فاصله بین قطره‌چکان ۲۰ سانتی‌متر، قطر لوله ۲۲ میلی‌متر و دبی آب ۰/۷ لیتر بر ساعت اجرا شد. هر کرت آزمایشی شامل دو ردیف کاشت به طول شش متر فاصله بین ردیف‌ها ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها روی ردیف ۱۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. به منظور دستیابی به تراکم دقیق، در هر حفره دو بذر کاشته شده و در مرحله ۲ تا ۳ برگی (BBCH 12-13) تنک بوته‌های اضافی انجام شد تا تراکم ۸۳ هزار بوته در هکتار حاصل شود. برای کنترل علف‌های هرز، علف‌کش ارادیکان (ای‌پی‌تی‌سی + ایمن‌کننده دی‌کلرامید) به میزان پنج لیتر در هکتار به‌صورت پیش‌کاشت به خاک داده شده و مخلوط شد. در مرحله ۳ تا ۴ برگی، علف‌کش یو۴۶ کمبی‌فلوئید (توفوردی+ ام‌سی‌پی‌آ) به میزان یک لیتر در هکتار محلول‌پاشی شد.

جدول ۱- مشخصات ژنوتیپ‌های ذرت مورد ارزیابی

Table 1. Maize genotypes characteristics used in the experiment

شماره Number	لاین‌های ذرت Maize lines	شماره Number	لاین‌های ذرت Maize lines
1	25/1-1-1-1	22	25/18-3-1-1
2	25/1-2-1-1	23	35/1-1-1-1
3	25/1-2-2-1	24	35/2-1-1-1
4	25/1-3-1-1	25	35/2-2-1-1
5	25/1-5-1-1	26	35/10-1-1-1
6	25/1-6-1-1	27	35/16-3-1-1
7	25/1-6-2-1	28	Maternal line of Karoun1
8	25/1-8-1-1	29	Maternal line of Karoun2
9	25/2-1-1-1	30	Maternal line of Karoun3
10	25/2-2-1-1	31	Paternal line of Mobin
11	25/3-1-1-1	32	Paternal line of Daniyal
12	25/4-2-1-1	33	Maternal line of 607
13	25/5-2-1-1	34	Maternal line of 608
14	25/5-3-1-1	35	K3541/4
15	25/6-3-1-1	36	K19
16	25/8-1-1-1	37	MO17
17	25/10-2-1-1	38	B73
18	25/11-2-1-1	39	K47/221
19	25/12-2-1-1	40	K47/421
20	25/14-1-1-1	41	K47/3
21	25/14-2-1-1	42	K18

لاین‌های ۱ تا ۳۴: در حال خلوص، لاین‌های ۳۵ تا ۴۲: خالص و لاین‌های ۳۷ و ۳۸: شاهد هستند. کلیه لاین‌های ذرت متعلق به گروه دیررس هستند

Lines 1 to 34: in the process of purification, lines 35 to 42: pure, and lines 37 and 38: checks. All maize lines are late-maturity group

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در محل اجرای آزمایش

Table 2. Physico-chemical properties of soil at the experiment site

بافت خاک Soil texture	سیلت Silt	رسی Clay	شن Sand	پتاسیم K	فسفر P	نیتروژن کل Total N (%)	هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)	واکنش گل اشباع pH
	(%)			($mg.kg^{-1}$)				
لوم-رسی Clay-loam	36	33	31	247	11	0.06	2.1	7.3

جدول ۳- اطلاعات هواشناسی محل اجرای آزمایش

Table 3. Meteorological information of the experiment site

		میانگین دما Mean temperature (°C)		بارندگی Precipitation (mm)	
		۱۴۰۱	۱۴۰۲	۱۴۰۱	۱۴۰۲
Month	ماه	2022	2023	2022	2023
May	اردیبهشت	15.5	16.7	47	26
Jun.	خرداد	22.8	24.5	2	8
Jul.	تیر	25.4	27.8	0	0
Aug.	مرداد	25.1	27.4	0	0
Sep.	شهریور	21.8	21.9	0	0

در زمان کاشت ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفر (از منبع سوپرفسفات تریپل) و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (از منبع اوره) به خاک داده شد. با توجه به محتوی پتاسیم قابل‌جذب در خاک (جدول ۲)، کود پتاسیم مصرف نشد. در مراحل ۶ تا ۸ برگی (BBCH 16-18) و ظهور گل‌های تاجی (BBCH 51) نیز ۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن (از منبع اوره) به‌صورت سرک استفاده شد. تاریخ کاشت در هر دو سال، ۲۰ اردیبهشت بود. تنش خشکی پس از استقرار بوته‌ها و در مرحله ۴ تا ۶ برگی (BBCH 14-16) اعمال شده و تا پایان فصل رشد ادامه یافت. برای تعیین زمان آبیاری، عدد سطح آب تشتک به‌صورت روزانه راس ساعت ۹ صبح قرائت شد. برای تعیین حجم آب مصرفی در هر نوبت، قبل از آبیاری نمونه‌برداری از خاک کرت‌های هر دو محیط تا عمق توسعه ریشه انجام و رطوبت وزنی خاک تعیین شد. درصد رطوبت وزنی خاک با خشکاندن نمونه‌های خاک در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت تعیین شد. عمق توسعه موثر ریشه در مراحل انتهایی نمونه‌برداری ۳۵ سانتی‌متر بود. حجم آب آبیاری در هر نوبت با استفاده از رابطه ۱ تعیین شد (Ghalkhani *et al.*, 2023). مقدار آب آبیاری با استفاده از کنتور که در ابتدای فلکه اصلی قرار داده شد، کنترل شد.

$$V = \rho b\ (\theta_{F.C} - \theta_m) \times D \times A \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

در این معادله، V حجم آب آبیاری، ρb جرم مخصوص ظاهری خاک، $\theta_{F.C}$ رطوبت جرمی خاک در ظرفیت زراعی، θ_m رطوبت جرمی خاک قبل از آبیاری، D عمق موثر ریشه و A مساحت کرت هستند. مقدار آب آبیاری در تیمار آبیاری کامل و تنش خشکی در سال ۱۴۰۱ به‌ترتیب ۷۱۸۲ و ۴۸۶۷ مترمکعب در هکتار بود، که با توجه به افزایش میانگین دما و کاهش بارش در سال دوم (جدول ۳)، در سال ۱۴۰۲ به‌ترتیب به ۷۴۱۲ و ۵۰۹۷ مترمکعب در هکتار افزایش یافت.

در پایان فصل، صفات مهم زراعی شامل تعداد روز تا ظهور گل تاجی، تعداد روز تا گرده‌افشانی، تعداد روز تا ظهور ابریشم، ارتفاع بوته، تعداد برگ در بوته، طول بلال، قطر بلال، تعداد ردیف دانه در بلال، تعداد دانه در ردیف، تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، رطوبت دانه و وزن هکتولیتر اندازه‌گیری شدند. صفات مورفولوژیک و اجزای عملکرد در ده بوته تصادفی از هر کرت اندازه‌گیری شدند. در مرحله رسیدگی، عملکرد دانه بر مبنای رطوبت ۱۴ درصد و با برداشت بلال‌های شش مترمربع از هر کرت محاسبه و وزن هزار دانه نیز اندازه‌گیری شد. وزن حجمی دانه (وزن هکتولیتر) با اندازه‌گیری وزن یک لیتر نمونه از دانه‌ها تعیین شد. بهره‌وری آب با تقسیم عملکرد دانه بر مجموع آب آبیاری مصرفی در طول دوره رشد محاسبه شد (Golzardi *et al.*, 2017). تجزیه واریانس مرکب داده‌ها با استفاده از رویه PROC MIXED نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون توکی در

سطح احتمال پنج درصد انجام شد. با توجه به معنی‌دار نبودن برهمکنش سال و ژنوتیپ و همچنین سال و آبیاری و ژنوتیپ برای کلیه صفات مورد بررسی، میانگین دوساله صفات گزارش شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر سال، تیمارهای آبیاری و ژنوتیپ بر کلیه مراحل فنولوژیک ژنوتیپ‌های ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. تعداد روز از کاشت تا ظهور گل تاجی در سال اول و دوم به‌ترتیب ۷۹/۶ و ۷۵/۰ روز، روز تا گرده‌افشانی به‌ترتیب ۸۲/۳ و ۷۷/۳ روز، روز تا ظهور ابریشم به‌ترتیب ۸۶/۲ و ۸۰/۸ روز و گرده‌افشانی تا ظهور ابریشم به‌ترتیب ۳/۹ و ۳/۵ روز بودند که این موضوع می‌تواند با بالاتر بودن میانگین دمای هوا در سال دوم (جدول ۳) و تسریع تامین نیاز دمایی گیاه و کوتاه‌تر شدن دوره رشد رویشی بوته‌ها مرتبط باشد (Golzardi *et al*., 2017). کمترین تعداد روز تا ظهور گل تاجی با میانگین ۷۰/۵ روز مربوط به ژنوتیپ ۱۰ بود که با ژنوتیپ‌های ۹ و ۳۹ تفاوت معنی‌داری نداشت. بیشترین تعداد روز تا ظهور گل تاجی با میانگین ۸۲/۷ روز مربوط به ژنوتیپ ۱۹ بود که با ژنوتیپ‌های ۸، ۲۱، ۲۳، ۲۶، ۳۳، ۳۴ و ۳۶ تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴). میانگین روز تا ظهور گل تاجی در تیمار آبیاری کامل در دامنه ۶۹/۲ روز (ژنوتیپ ۱۰) تا ۸۰/۷ روز (ژنوتیپ ۱۹) متغیر بود. در تیمار تنش خشکی این مقدار در دامنه ۷۱/۷ روز (ژنوتیپ ۱۰) تا ۸۴/۷ روز (ژنوتیپ ۱۹) قرار داشت. این تاخیر در ظهور گل تاجی در اثر تنش خشکی در اکثر ژنوتیپ‌های ذرت مشاهده شد (جدول ۴). ساه و همکاران (Sah *et al*., 2020) در آزمایش روی لاین‌های ذرت گزارش کردند که دامنه روز تا ظهور گل تاجی در لاین‌های حساس به خشکی در تیمار آبیاری کامل بین ۷۷ تا ۸۶ روز بود که در تیمار تنش به ۸۴ تا ۹۵ روز رسید. در لاین‌های متحمل به خشکی نیز دامنه روز تا ظهور گل تاجی در تیمار آبیاری کامل بین ۷۴ تا ۸۵ روز بود که در تیمار تنش به ۸۴ تا ۸۹ روز رسید. بیشترین مقدار تاخیر در ظهور گل تاجی در تیمار تنش خشکی در ژنوتیپ ۱ با افزایش ۵/۳ روز (هفت درصد) نسبت به آبیاری کامل ثبت شد. ژنوتیپ‌های ۲۴، ۳۵، ۲۷ و ۳۱ در تیمار تنش خشکی نسبت به آبیاری کامل زودتر به گل رفتند (جدول ۴). این نتایج نشان می‌دهد که برخی از لاین‌ها تحمل بیشتری نسبت به تاخیر در گل‌دهی در شرایط کم‌آبی دارند و می‌توان از آنها به‌عنوان منابع ژنتیکی در برنامه‌های به‌نژادی استفاده کرد (Danilevskaya *et al*., 2019; Sah *et al*., 2020). بیشترین و کمترین تعداد روز تا ظهور گل تاجی به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های ۱۹ و ۱۰ ثبت شد (جدول ۴).

کمترین تعداد روز تا گرده‌افشانی با میانگین ۷۳/۲ روز مربوط به ژنوتیپ ۱۰ بود که با ژنوتیپ‌های ۹ و ۳۹ تفاوت معنی‌داری نداشت. بیشترین تعداد روز تا گرده‌افشانی با میانگین ۸۶ روز مربوط به ژنوتیپ ۱۹ بود که با ژنوتیپ‌های ۸، ۲۱، ۳۳ و ۴۱ تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۴). میانگین تعداد روز تا گرده‌افشانی در تیمار آبیاری کامل در دامنه ۷۱/۳ تا ۸۳/۱ روز و در شرایط تنش خشکی در دامنه ۷۵/۱ تا ۸۸/۹ روز متغیر بود. بیشترین تاخیر در گرده‌افشانی در تیمار تنش خشکی (بیش از پنج روز) در ژنوتیپ‌های ۱، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ مشاهده شد که نشان دهنده حساسیت بالای آنها به تنش خشکی است. در مقابل، ژنوتیپ‌های ۲۴، ۳۵ و ۲۷ در تیمار تنش خشکی زودتر از آبیاری کامل به مرحله گرده‌افشانی رسیدند (جدول ۴). به‌نظر می‌رسد ژنوتیپ‌هایی که کمترین افزایش در تعداد روز تا ظهور گل تاجی و گرده‌افشانی را در تیمار تنش خشکی داشتند، نسبت به تنش خشکی متحمل‌تر هستند و ژنوتیپ‌هایی که بیشترین افزایش را در هر دو صفت داشتند، احتمالا نسبت به تنش خشکی حساس‌تر هستند. تنش خشکی بر تاخیر در ظهور گل تاجی و گرده‌افشانی

جدول ۴- مقایسه میانگین صفات فنولوژیک ژنوتیپ‌های ذرت در تیمارهای آبیاری (۱۴۰۱ و ۱۴۰۲)

Table 4. Mean comparison of phonological traits of maize genotypes in irrigation treatments (2022 and 2023)

ژنوتیپ‌های ذرت	روز تا ظهور گل تاجی Days to tassel emergence				روز تا گرده‌افشانی Days to anthesis			
Maize genotypes	Mean	Full irrigation	Drought stress	Variation (%)	Mean	Full irrigation	Drought stress	Variation (%)
1	78.2c-l	75.5b-d	80.9g-j	7.0	80.5e-m	77.7b-d	83.2f-i	7.2%
2	77.0b-j	75.8b-d	78.1c-h	2.9	80.0c-m	78.7b-d	81.2b-h	3.2
3	76.5b-j	76.0b-d	76.9a-h	1.1	79.0b-k	78.7b-d	79.3a-i	0.8
4	75.9b-h	75.2b-d	76.7a-i	2.0	78.5b-g	77.4b-d	79.5a-g	2.7
5	76.8b-j	76.2b-d	77.3c-h	1.4	78.9b-i	78.1b-d	79.7a-g	2.0
6	75.3b-g	74.4a-c	76.2a-g	2.4	77.8bce	76.6a-c	79.0a-i	3.1
7	76.0b-h	75.6b-d	76.4a-g	1.1	78.6b-h	77.9b-d	79.3a-i	1.8
8	79.8d-m	78.6c-e	80.9g-j	2.9	82.4i-n	82.1cd	82.7c-h	0.8
9	73.9ab	72.8ab	75.0a-c	3.0	75.7ab	74.5ab	76.8a-d	3.2
10	70.5a	69.2a	71.7a	3.7	73.2a	71.3a	75.1a	5.3
11	75.4b-k	74.7a-c	76.1a-g	2.0	77.8b-e	77.2bc	78.4a-f	1.6
12	75.7b-f	74.9bc	76.6a-g	2.2	78.5b-g	77.6b-d	79.4a-g	2.4
13	76.1b-j	75.7b-d	76.6a-h	1.3	78.6b-h	77.5b-d	79.7a-g	2.9
14	76.9b-j	75.9b-d	77.8c-h	2.5	79.7c-m	79.0b-d	80.3a-h	1.7
15	77.9c-l	77.3b-d	78.4c-h	1.5	80.9e-m	79.9b-d	81.8b-h	2.3
16	77.6c-l	77.1b-d	78.2c-h	1.4	79.9c-m	79.1b-d	80.7a-h	2.0
17	77.7c-l	76.8b-d	78.5c-h	2.3	81.1e-m	80.1cd	82.2c-h	2.6
18	76.2b-j	74.7bc	77.7c-h	4.0	78.3b-g	76.7a-c	79.9a-h	4.1
19	82.7m	80.7e	84.7j	5.0	86.0n	83.1d	88.9j	7.1
20	77.8c-l	75.5b-d	80.2c-j	6.2	80.2e-m	77.5b-d	83.0c-h	7.0
21	80.6lm	78.8c-e	82.3f-j	4.4	82.7kn	79.9b-d	85.4h-j	6.9
22	76.7b-j	75.3b-d	78.2c-h	3.8	79.3b-l	77.3bc	81.4b-h	5.4
23	79.7j-m	77.2b-d	82.1h-j	6.3	81.8g-m	79.3b-d	84.3g-j	6.3
24	79.0e-l	79.5cd	78.5c-h	-1.2	81.1e-m	81.7cd	80.5a-h	-1.5
25	78.8f-l	77.7b-d	79.9c-j	2.8	81.1e-m	79.9b-d	82.3c-h	3.1
26	79.1f-m	77.6b-d	80.6g-j	3.9	81.5e-m	79.2b-d	83.8f-j	5.7
27	74.9bc	75.1bc	74.7a-c	-0.5	77.1b-f	77.2bc	77.0a-e	-0.2
28	76.4b-j	75.7b-d	77.1a-h	1.8	78.4b-g	77.6b-d	79.1a-i	2.0
29	75.4b-k	74.7bc	76.0a-g	1.8	77.6b-j	76.9a-c	78.3a-f	1.8
30	76.6b-j	76.0b-d	77.2a-h	1.6	79.0b-l	78.1b-d	80.0a-h	2.3
31	77.1b-l	77.2b-d	76.9a-h	-0.4	79.4c-m	79.4b-d	79.4a-g	0.1
32	77.8c-l	75.7b-d	79.9c-j	5.6	80.4e-m	78.0b-d	82.9c-h	6.3
33	80.1e-m	78.9cd	81.3g-j	3.1	83.1mn	81.1cd	85.0g-j	4.8
34	80.2i-m	78.1b-d	82.2e-j	5.3	82.3d-m	80.0b-d	84.6g-j	5.7
35	75.3b-g	75.7b-d	74.8a-c	-1.1	77.8b-j	78.0b-d	77.5a-c	-0.6
36	79.4h-m	78.2b-d	80.6g-j	3.1	82.3h-m	81.3cd	83.3f-j	2.4
37	77.2b-l	76.0b-d	78.4c-h	3.3	79.3b-l	78.4b-d	80.2a-h	2.3
38	78.9f-l	78.7c-e	79.1c-h	0.6	81.8g-m	81.7cd	81.9b-h	0.2
39	73.7ab	73.4a-e	74.0a-d	0.9	76.5a-c	76.4a-c	76.5ab	0.2
40	78.8f-l	77.3b-d	80.2b-j	3.7	81.5g-m	80.3cd	82.8c-h	3.2
41	78.4c-l	78.0b-d	78.8c-h	1.1	82.6l-n	82.0cd	83.3f-i	1.6
42	78.9f-l	77.7b-d	80.1c-j	3.1	80.6e-m	78.8b-d	82.5c-h	4.7

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability levels, using Tukey's test

اثر مستقیم داشت که این موضوع می‌تواند به‌دلیل کاهش توان فیزیولوژیکی و تنظیم هورمونی مرتبط با رشد زایشی گیاه در شرایط تنش باشد. تاخیر در ظهور گل تاجی و گرده‌افشانی در شرایط تنش خشکی در برخی ارقام ذرت، احتمالا نوعی سازگاری با شرایط نامساعد کم‌آبی است (Golzardi *et al.*, 2017). گزارش شده است که ممکن است در برخی از ارقام ذرت برای هماهنگی با وضعیت آبی و دورهای آبیاری طولانی‌تر، مراحل رشد با تاخیر مواجه شود (Sah *et al.*, 2020). بیشترین و کمترین تعداد روز تا گرده‌افشانی به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های ۱۹ و ۱۰ ثبت شد (جدول ۴).

کمترین تعداد روز تا ظهور ابریشم با میانگین ۷۶/۶ روز مربوط به ژنوتیپ ۱۰ بود که با ژنوتیپ‌های ۵، ۹، ۱۱، ۱۳، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۵ و ۳۹ تفاوت معنی‌داری نداشت. بیشترین تعداد روز تا ظهور ابریشم با میانگین ۸۹/۹ روز مربوط به ژنوتیپ ۱۹ بود هر چند با ژنوتیپ‌های ۱، ۸، ۱۷، ۲۰، ۲۱، ۲۵، ۲۶، ۳۳، ۳۴، ۳۶، ۳۷، ۳۸، ۴۰، ۴۱ و ۴۲ تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۵). به‌طور کلی، ژنوتیپ‌های ذرت در تیمار تنش خشکی تاخیر معنی‌داری در ظهور ابریشم داشتند. احتمالا این تاخیر با کاهش تقسیم و رشد سلول در شرایط کم‌آبی مرتبط است که بر سرعت رشد ابریشم تاثیر می‌گذارد (Danilevskaya *et al.*, 2019). میانگین تعداد روز تا ظهور ابریشم در تیمار آبیاری کامل در دامنه ۷۴/۳ تا ۸۵/۹ روز بود. این مقدار در تیمار تنش خشکی در دامنه ۷۸/۷ تا ۹۳/۹ روز قرار داشت. ساه و همکاران (Sah *et al.*, 2020) نیز گزارش کردند که دامنه تعداد روز تا ظهور ابریشم لاین‌های ذرت در تیمار آبیاری کامل ۸۲ تا ۹۱ روز بود که در شرایط تنش به ۹۲ تا ۱۰۳ روز رسید. در لاین‌های متحمل به خشکی نیز دامنه تعداد روز تا ظهور ابریشم در تیمار آبیاری کامل ۷۸ تا ۸۸ روز بود که در شرایط تنش به ۹۳ تا ۹۷ روز رسید. در یک آزمایش، مقدار دمای تجمعی لازم برای رسیدن به مرحله ظهور ابریشم در اینبرد لاین B_{73} ذرت در تیمار آبیاری کامل ۷۱۶ واحد بود و در شرایط تنش خشکی به ۷۵۱ واحد افزایش یافته و باعث تاخیر در ظهور ابریشم شد (Danilevskaya *et al.*, 2019). بیشترین تاخیر در ظهور ابریشم در تیمار تنش خشکی (هشت روز) در ژنوتیپ ۱۹ و پس از آن در ژنوتیپ‌های ۲۰ و ۲۱ (۹/۲ درصد افزایش) مشاهده شد که نشان دهنده حساسیت بالای آنها به شرایط کم‌آبی است. ژنوتیپ‌های ۷ و ۳۵ در تیمار تنش خشکی زودتر از شرایط آبیاری کامل به مرحله ظهور ابریشم رسیدند، که این موضوع می‌تواند نشان دهنده پتانسیل بالای آنها در شرایط تنش خشکی باشد. بیشترین و کمترین تعداد روز تا ظهور ابریشم به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های ۱۹ و ۱۰ ثبت شد (جدول ۵). گزارش شده است که در لاین‌های حساس به خشکی ذرت، تنش خشکی قبل از ظهور گل تاجی باعث تاخیر دو هفته‌ای در ظهور گل تاجی و ابریشم شده و عملکرد دانه تا ۹۰ درصد کاهش یافت (Kim and Lee, 2023). کمترین فاصله گرده‌افشانی تا ظهور ابریشم (دو روز) مربوط به ژنوتیپ‌های ۱۳ و ۲۸ بود که با ژنوتیپ‌های ۲ تا ۱۲، ۱۴ تا ۱۸، ۲۱ تا ۲۴، ۲۶، ۲۷، ۲۹ تا ۳۶ و ۳۸ تا ۴۱ در گروه آماری مشابهی قرار داشتند (جدول ۵). بیشترین فاصله بین گرده‌افشانی تا ظهور ابریشم (۷/۱ روز) مربوط به ژنوتیپ ۳۷ بود که با ژنوتیپ‌های ۱، ۹، ۱۴، ۱۷، ۱۹ تا ۲۲، ۲۵، ۲۶، ۴۰ و ۴۲ تفاوت معنی‌داری نداشت. فاصله بین گرده‌افشانی تا ظهور ابریشم یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی تحمل خشکی در ذرت محسوب می‌شود، زیرا افزایش این فاصله معمولا با کاهش میزان باروری و در نتیجه کاهش عملکرد دانه همراه است (Danilevskaya *et al.*, 2019). در آزمایش حاضر، افزایش فاصله گرده‌افشانی تا ظهور ابریشم در بسیاری از ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش خشکی مشاهده شد. بیشترین فاصله بین گرده‌افشانی تا ظهور ابریشم

در تیمار تنش خشکی مربوط به ژنوتیپ ۳۷ (۷/۵ روز) و پس از آن ژنوتیپ‌های ۲۰ و ۴۲ (به‌ترتیب ۷/۳ و ۷/۰ روز) بود. این ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش خشکی دچار اختلال در هم‌زمانی ظهور گل‌های نر و ماده شده و احتمالا در شرایط کم‌آبی، میزان باروری پایین‌تری خواهند داشت (Golzardi *et al*., 2017). در یک آزمایش، تنش خشکی باعث افزایش فاصله بین گرده‌افشانی تا ظهور ابریشم لاین‌های حساس به خشکی ذرت از پنج روز در شرایط آبیاری کامل به ۹/۵ روز در شرایط تنش و افزایش فاصله بین گرده‌افشانی تا ظهور ابریشم لاین‌های متحمل به خشکی از چهار روز در شرایط آبیاری کامل تا ۸ روز در شرایط تنش شد (Sah *et al*., 2020). دانیلوسکایا و همکاران (Danilevskaya *et al*., 2019) نیز گزارش کردند که کم‌آبی باعث افزایش فاصله بین گرده‌افشانی تا ظهور ابریشم در اینبرد لاین B_{73} ذرت از ۱/۶ روز در شرایط آبیاری کامل به ۴/۸ روز در شرایط تنش خشکی شد. ژنوتیپ ۲۸ کمترین فاصله بین گرده‌افشانی تا ظهور ابریشم را در تیمار تنش خشکی داشت که می‌تواند به عنوان یک ویژگی مطلوب در برنامه‌های به‌نژادی مورد توجه قرار گیرد (جدول ۵). کاهش فاصله بین گرده‌افشانی تا ظهور ابریشم، نشان دهنده کارایی بیشتر ژنوتیپ در هم‌زمانی ظهور گل‌های نر و ماده در شرایط تنش خشکی است که می‌تواند باعث افزایش باروری و عملکرد دانه شود (Kim and Lee, 2023). در تیمار آبیاری کامل نیز بیشترین فاصله بین گرده‌افشانی تا ظهور ابریشم (۶/۸ روز) در ژنوتیپ‌های ۱ و ۳۷ و کمترین مقدار آن (۱/۳ روز) در ژنوتیپ ۱۳ مشاهده شد (جدول ۵). تنش رطوبتی با خشک شدن زودهنگام ابریشم‌ها، باعث جلوگیری از جذب موفقیت‌آمیز دانه‌های گرده می‌شود. رشد گل تاجی در اثر کم‌آبی به تاخیر افتاده و باعث کاهش همزمانی با ظهور ابریشم می‌شود (Du and Xiong, 2024). این عدم همزمانی عامل اصلی کاهش باروری و افت عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی است. شناسایی این صفات و سازوکارهای مرتبط با تحمل خشکی، نقش مهمی در برنامه‌های به‌نژادی ذرت دارند (Liu *et al*., 2021). به‌طورکلی، تأخیر در ظهور گل تاجی، گرده‌افشانی و ظهور ابریشم در لاین‌های ذرت در شرایط تنش خشکی می‌تواند با کاهش تقسیم و رشد سلول‌ها در اندام‌های تولی مثلی (Kim and Lee, 2023)، تجمع آبسیزیک اسید و اثر مهارکننده آن بر رشد گل تاجی و ابریشم (Jiang *et al*., 2025) و کاهش نرخ فتوسنتز و به دنبال آن کاهش تجمع ساکارز در بافت‌های تولیدمثلی در شرایط کم‌آبی (Li *et al*., 2023; Jiang *et al*., 2025) مرتبط باشد.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری بر ارتفاع بوته ژنوتیپ‌های ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. ژنوتیپ‌های ذرت از نظر ارتفاع بوته و تعداد برگ در بوته تفاوت معنی‌داری (در سطح احتمال یک درصد) با یکدیگر داشتند، اما از نظر طول و قطر بلال تفاوت معنی‌داری بین آنها مشاهده نشد. اثر سال و برهمکنش ژنوتیپ و آبیاری بر ارتفاع بوته و تعداد برگ در بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. ارتفاع بوته در سال اول و دوم به‌ترتیب ۱۴۵ و ۱۳۲ سانتی‌متر و تعداد برگ در بوته به‌ترتیب ۱۲/۳ و ۱۱/۶ عدد بود که علت آن می‌تواند با بالاتر بودن میانگین دمای هوا در سال دوم (جدول ۳) و کوتاه‌تر شدن دوره رشد رویشی مرتبط باشد (Golzardi *et al*., 2017).

جدول ۵- مقایسه میانگین صفات فنولوژیک ژنوتیپ‌های ذرت در تیمارهای آبیاری (۱۴۰۱ و ۱۴۰۲)

Table 5. Mean comparison of phonological traits of maize genotypes in irrigation treatments (2022 and 2023)

ژنوتیپ‌های ذرت	روز تا ظهور ابریشم Days to silk emergence				فاصله گرده‌افشانی تا ظهور ابریشم Days from anthesis to silking			
Maize genotypes	Mean	Full irrigation	Drought stress	Variation (%)	Mean	Full irrigation	Drought stress	Variation (%)
1	86.0h-j	84.7bc	87.2d-j	3.0	5.5b-d	6.8b	4.3ab	-37.0
2	83.7c-i	82.6bc	84.8a-h	2.7	3.6a-c	3.8ab	3.5ab	-6.7
3	84.1c-i	83.4bc	84.9a-h	1.8	5.3a-d	5.0ab	5.5ab	10.0
4	83.3c-i	81.6ab	85.0a-h	4.2	4.6a-d	4.0ab	5.3ab	31.3
5	81.5a-h	80.0ab	83.0a-d	3.8	2.8a-c	2.0ab	3.5ab	75.0
6	82.2c-h	80.6ab	83.8a-h	4.0	4.4a-d	4.0ab	4.8ab	18.8
7	82.2c-h	82.4bc	82.0a-d	-0.5	3.8a-c	4.8ab	2.8ab	-42.1
8	86.1h-j	85.2bc	87.0d-j	2.1	3.6a-c	3.0ab	4.3ab	41.7
9	79.3a-d	78.0a-c	80.7a-i	3.5	3.9a-d	3.8ab	4.0ab	6.7
10	76.6a	74.3a	78.7a	5.9	3.3a-c	3.0ab	3.5ab	16.7
11	80.0a-c	79.2ab	80.9a-d	2.2	2.3a-b	1.8ab	2.8ab	57.1
12	81.8c-h	81.4ab	82.1a-d	0.9	3.1a-c	3.8ab	2.5ab	-33.3
13	80.6a-g	79.0ab	82.2a-d	4.1	2.0a	1.3a	2.8ab	120.0
14	84.1c-i	82.3ab	85.9a-h	4.4	4.4a-d	3.3ab	5.5ab	69.2
15	84.7c-i	83.6bc	85.7a-h	2.6	3.8a-c	3.8ab	3.8ab	0
16	82.7c-i	81.9ab	83.4a-d	1.9	2.8a-c	2.8ab	2.8ab	0
17	84.9c-j	82.9bc	86.9d-j	4.9	3.9a-d	3.0ab	4.8ab	58.3
18	80.9a-f	78.7ab	83.0a-d	5.5	2.6a-b	2.0ab	3.3ab	62.5
19	89.9j	85.9c	93.9j	9.2	4.0a-d	3.0ab	5.0ab	66.7
20	86.4h-j	82.6bc	90.2c-j	9.2	6.0c-d	4.8ab	7.3b	52.6
21	87.6i-j	83.8bc	91.5h-j	9.2	4.9a-d	3.8ab	6.0ab	60.0
22	83.9c-i	81.5ab	86.3a-j	5.9	4.6a-d	4.5ab	4.8ab	5.6
23	84.6c-i	81.7ab	87.5d-j	7.2	2.8a-c	2.3ab	3.3ab	44.4
24	84.1c-i	83.8bc	84.4a-h	0.7	3.1a-c	2.3ab	4.0ab	77.8
25	85.1b-j	83.6bc	86.6a-j	3.5	4.0a-d	3.8ab	4.3ab	13.3
26	86.1h-j	85.1bc	87.1d-j	2.3	4.6a-d	6.0ab	3.3ab	-45.8
27	79.6a-e	79.4ab	79.7a-f	0.3	2.5a-b	2.3ab	2.8ab	22.2
28	80.4a-c	80.1ab	80.8a-d	0.9	2.0a	2.3ab	1.8a	-22.2
29	79.8a-c	78.8ab	80.8a-d	2.6	2.1a	1.8ab	2.5ab	42.9
30	82.6c-i	81.2ab	84.0a-h	3.5	3.6a-c	3.3ab	4.0ab	23.1
31	82.0c-h	80.9ab	83.2a-d	2.8	2.8a-c	1.8ab	3.8ab	114.3
32	83.4c-i	80.5ab	86.3a-j	7.2	2.9a-c	2.5ab	3.3ab	30.0
33	86.6h-j	84.7bc	88.4d-j	4.3	3.6a-c	3.8ab	3.5ab	-6.7
34	85.3b-j	81.7ab	88.8d-j	8.6	3.0a-c	1.8ab	4.3ab	142.9
35	80.3a-c	80.4ab	80.1a-f	-0.4	2.5a-b	2.3ab	2.8ab	22.2
36	85.9f-j	84.7bc	87.1d-j	2.8	3.4a-c	3.3ab	3.5ab	7.7
37	86.3h-j	84.9bc	87.7d-j	3.3	7.1d	6.8b	7.5b	11.1
38	85.7f-j	85.3bc	86.0a-j	0.9	3.8a-c	3.5ab	4.0ab	14.3
39	79.2a-d	78.7ab	79.6a-g	1.1	2.9a-c	2.5ab	3.3ab	30.0
40	86.3h-j	84.5bc	88.0d-j	4.2	4.8a-d	4.3ab	5.3ab	23.5
41	85.9f-j	85.2bc	86.6a-j	1.6	3.3a-c	3.0ab	3.5ab	16.7
42	86.4h-j	82.9bc	89.8b-j	8.3	5.5b-d	4.0ab	7.0b	75.0

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability levels, using Tukey's test

بیشترین ارتفاع بوته با میانگین ۱۷۷ سانتی‌متر مربوط به ژنوتیپ ۳۵ بود که با ژنوتیپ‌های ۶، ۷، ۱۲، ۳۶، ۳۷ و ۴۱ تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین ارتفاع بوته با میانگین ۱۰۹ سانتی‌متر مربوط به ژنوتیپ ۱۰ بود که تفاوت معنی‌داری با ژنوتیپ‌های ۱، ۲، ۱۹، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۲ و ۳۹ نداشت (جدول ۶). میانگین ارتفاع بوته در تیمار آبیاری کامل در دامنه ۱۱۸ تا ۱۹۲ سانتی‌متر و در تیمار تنش خشکی در دامنه ۱۰۱ تا ۱۶۲ سانتی‌متر متغیر بود. تنش خشکی در کلیه ژنوتیپ‌های ذرت مورد ارزیابی باعث کاهش ارتفاع بوته شد. بیشترین کاهش ارتفاع بوته در تیمار تنش خشکی (۲۹/۶ درصد) در ژنوتیپ ۲۳ مشاهده شد که نشان دهنده حساسیت بالای آن به کم‌آبی است. ژنوتیپ‌های ۳۷، ۱ و ۲۰ کمترین کاهش ارتفاع بوته را داشتند (جدول ۶) نشان دهنده پایداری بیشتر آنها در شرایط تنش خشکی است. بیشترین و کمترین ارتفاع بوته به‌ترتیب در ژنوتیپ‌های ۳۵ و ۱۰ ثبت شد (جدول ۶). ارتفاع بوته یک شاخص از رشد کلی گیاه و توان رقابتی آن برای کسب منابع محسوب می‌شود (Ghalkhani *et al*., 2023). نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای نشان داده است که در شرایط تنش خشکی، ارتفاع بوته ژنوتیپ‌های ذرت نسبت به آبیاری کامل ۳ تا ۴۴ درصد کاهش داشت (Golzardi *et al*., 2017; Danilevskaya *et al*., 2019; Sah *et al*., 2020). مهار بیوسنتز اسید جیبرلیک در اثر کم‌آبی باعث کاهش طویل شدن میانگره‌ها می‌شود (Nelissen *et al*., 2018). این مکانیسم با مهار ارتفاع بوته و اولویت‌دهی به رشد ریشه، یک راهکار موثر برای حفظ بقای گیاه در شرایط نامساعد محسوب می‌شود (Nazari *et al*., 2017; Yan *et al*., 2023).

بیشترین تعداد برگ در بوته (۱۳/۶) مربوط به ژنوتیپ ۱۹ بود که با ژنوتیپ‌های ۳، ۶، ۷، ۸، ۱۱، ۱۴، ۱۵، ۱۷، ۲۰، ۲۱، ۳۲، ۳۳، ۳۵ و ۴۱ تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۶). تعداد برگ در بوته علاوه بر نقش در فتوسنتز، نشان دهنده وضعیت گیاه در مواجهه با تنش‌های محیطی است. کمترین تعداد برگ در بوته (۱۱) مربوط به ژنوتیپ‌های ۱، ۱۰، ۳۰، ۳۶ و ۳۷ بود که با سایر ژنوتیپ‌های ذرت مورد بررسی به غیر از ژنوتیپ‌های ۱۹، ۲۱ و ۳۵ تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۶). بیشترین تعداد برگ در بوته در تیمار آبیاری کامل مربوط به ژنوتیپ ۱۹ (۱۴/۱ برگ) بود که در تیمار تنش خشکی به ۱۳ برگ کاهش یافت. محدوده تغییرات تعداد برگ در تیمار تنش خشکی بین ۱۵/۳+ درصد در ژنوتیپ ۲۴ تا ۱۴/۵- درصد در ژنوتیپ ۴۱ متغیر بود (جدول ۶).

کمترین تعداد برگ در تیمار آبیاری کامل (۱۰/۵ برگ) در ژنوتیپ‌های ۲۴ و ۳۷ و کمترین تعداد برگ در تیمار تنش خشکی (۱۰/۷ برگ) در ژنوتیپ ۳۶ مشاهده شد. ژنوتیپ‌های ۳۵ و ۱۹ نیز با ۱۳ برگ در بوته، بیشترین تعداد برگ را در تیمار تنش خشکی داشتند (جدول ۶). نتایج سایر آزمایش‌ها نیز نشان داده است که واکنش تعداد برگ در بوته به تنش خشکی، در ژنوتیپ‌های ذرت متفاوت است، در برخی از ژنوتیپ‌ها تعداد برگ‌ها در شرایط تنش حفظ شده، در برخی پنج تا هشت درصد افزایش یافته و در برخی ۱۲ تا ۱۵ درصد کاهش نشان داده است (Kamara *et al*., 2003; Sah *et al*., 2020; Balbaa *et al*., 2022). این تفاوت‌ها، نشان دهنده راهکارهای متفاوت مقابله با خشکی در ژنوتیپ‌های ذرت است. در ارقام متحمل به خشکی، حفظ تعداد برگ از طریق تسریع نرخ ظهور برگ‌ها و تأخیر در پیری آن‌ها حاصل می‌شود (Balbaa *et al*., 2022)، درحالی‌که در ژنوتیپ‌های حساس، تعداد برگ در بوته از طریق عدم تشکیل برگ‌های جدید و ریزش زودرس برگ‌های قدیمی کاهش می‌یابد (Kamara *et al*., 2003).

جدول ۶- مقایسه میانگین صفات مورفولوژیک ژنوتیپ‌های ذرت در تیمارهای آبیاری (۱۴۰۱ و ۱۴۰۲)

Table 6. Mean comparison of morphological traits of maize genotypes in irrigation treatments (2022 and 2023)

ژنوتیپ‌های ذرت	ارتفاع بوته Plant height (cm)				تعداد برگ در بوته Number of leaves.plant^{-1}			
Maize genotypes	Mean	Full irrigation	Drought stress	Variation (%)	Mean	Full irrigation	Drought stress	Variation (%)
1	126a-g	130a-d	121a-g	-6.6	11.0a	10.9ab	11.1a	2.1
2	129a-i	144a-j	114a-f	-20.6	11.4b-e	11.2a-c	11.5a	2.9
3	140c-n	156d-k	125a-g	-19.6	12.3d-g	11.9b-f	12.6a	5.5
4	144f-o	156d-k	132a-k	-15.3	11.7c-f	11.8b-f	11.5a	-2.6
5	146e-o	155b-k	136d-k	-12.1	11.5b-e	12.0b-f	11.1a	-7.8
6	165op	181kl	150g-k	-17.1	12.4d-g	12.2b-f	12.5a	2.3
7	156l-p	169g-l	143f-k	-15.9	12.5d-g	12.5b-f	12.5a	0.0
8	155j-o	172j-l	138f-k	-19.6	12.9b-g	13.5c-f	12.3a	-8.5
9	134b-k	144a-j	124a-j	-13.7	11.6b-e	11.5a-e	11.7a	2.5
10	109a	118a	101a	-14.6	11.0a	11.0a-c	11.0a	0.2
11	124a-f	137a-g	110a-f	-19.7	12.8c-g	12.7b-f	12.8a	1.2
12	157m-p	173j-l	141f-k	-18.5	11.5b-e	11.8b-f	11.2a	-5.2
13	153k-o	166c-l	140f-k	-16.0	11.6c-f	11.3a-e	12.0a	6.2
14	144f-n	157d-k	131a-k	-16.6	12.5d-g	12.8b-f	12.2a	-5.1
15	146g-o	158d-k	134d-k	-15.3	12.5d-g	12.6b-f	12.4a	-1.0
16	145g-o	161d-l	129a-k	-20.1	11.6c-f	11.8b-f	11.4a	-3.0
17	131b-h	139a-g	123a-g	-11.4	12.2d-g	11.7b-f	12.7a	7.9
18	133b-k	143a-j	122a-g	-14.6	12.0c-f	11.9b-f	12.0a	0.4
19	125a-g	142a-j	108a-i	-24.0	13.6g	14.1f	13.0a	-7.1
20	147h-o	152b-k	142c-k	-6.9	12.6d-g	12.8b-f	12.4a	-2.8
21	153k-o	168g-l	138f-k	-17.9	12.6e-g	12.6b-f	12.6a	0.2
22	119a-d	131a-d	106a-h	-18.7	11.3c-e	10.9ab	11.7a	6.8
23	125a-g	147a-j	103a-e	-29.6	11.7c-f	12.2b-f	11.2a	-8.4
24	125a-g	134a-e	116a-f	-13.3	11.4b-e	10.5a	12.2a	15.3
25	147h-o	166e-l	128a-j	-23.0	11.6b-e	12.0b-f	11.2a	-7.3
26	150h-o	168g-l	133d-k	-20.9	11.5b-e	11.9b-f	11.1a	-6.6
27	123a-f	133a-f	113a-f	-15.1	11.6c-f	11.6b-f	11.6a	-0.2
28	119a-c	128a-d	110a-f	-14.3%	11.5b-e	11.8b-f	11.2a	-5.4
29	122a-c	131a-f	113a-f	-13.3	11.8c-f	12.1b-f	11.6a	-3.7
30	114a-b	123ab	104a-d	-15.2	11.0a	11.0ab	11.0a	-0.6
31	130a-h	144a-j	116a-f	-19.0	11.9c-f	12.2b-f	11.6a	-5.1
32	119a-c	134a-f	105a-d	-21.5	12.1d-g	11.9b-f	12.4a	3.9
33	136c-m	147a-j	125a-j	-15.0	12.4d-g	13.0a-f	11.8a	-9.3
34	123a-f	140a-g	107a-h	-23.6	11.6c-f	11.0ab	12.3a	11.6
35	177p	192l	162k	-16.0	13.2f-g	13.3a-f	13.0a	-2.5
36	158n-p	173j-l	143c-k	-17.4	11.0a	11.3a-e	10.7a	-4.7
37	160n-p	163e-l	157jk	-3.7	11.0a	10.5a	11.4a	8.3
38	154k-o	177i-l	132a-k	-25.6	12.5d-g	12.8b-f	12.3a	-3.8
39	129a-i	139a-g	118a-g	-14.7	11.9c-f	11.4a-e	12.4a	9.1
40	135c-l	150b-k	119a-g	-20.9	11.9c-f	12.2b-f	11.5a	-5.5
41	160n-p	175h-l	145b-k	-17.3	12.7c-g	13.7ef	11.7a	-14.5
42	143f-n	161d-l	125a-j	-22.3%	11.7c-f	11.9b-f	11.5a	-3.2%

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability levels, using Tukey's test

نتایج تجزیه و اریانس نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری و ژنوتیپ بر تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه، محتوای رطوبت دانه و وزن حجمی دانه (وزن هکتولیتر) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود.

وزن هزار دانه در سال اول و دوم به‌ترتیب ۲۹۴ و ۲۸۲ گرم، تعداد دانه در بوته به‌ترتیب ۴۷۲ و ۴۵۸ عدد، وزن حجمی دانه به‌ترتیب ۷۰/۳ و ۶۷/۹ کیلوگرم در ۱۰۰ لیتر و رطوبت دانه به‌ترتیب ۲۰/۱ و ۱۷/۳ بود که می‌تواند با بالاتر بودن میانگین دمای هوا در سال دوم (جدول ۳) مرتبط باشد.

بیشترین وزن هزار دانه (۳۷۵ گرم) مربوط به ژنوتیپ ۱۹ بود که با ژنوتیپ‌های ۴، ۶، ۹، ۱۰، ۱۵، ۱۶، ۲۶، ۳۶ و ۳۷ تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین وزن هزار دانه (۲۱۹ گرم) نیز مربوط به ژنوتیپ ۱۲ بود که با ژنوتیپ‌های ۱، ۲، ۳، ۵، ۱۱، ۱۷، ۲۰، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۷، ۲۹ تا ۳۴، ۳۸، ۳۹، ۴۱ و ۴۲ در گروه آماری مشابهی قرار گرفت (جدول ۷). تنش خشکی باعث کاهش وزن هزار دانه در کلیه ژنوتیپ‌های ذرت شد. میانگین کاهش وزن هزار دانه در شرایط تنش خشکی نسبت به تیمار آبیاری کامل حدود ۹/۱ درصد بود. بیشترین کاهش وزن هزار دانه در ژنوتیپ‌های ۴۲ (۳۰/۷- درصد)، ۱۹ (۲۶/۱- درصد)، ۲۹ (۲۴/۶- درصد) و ۱۲ (۲۳/۳- درصد) مشاهده شد که می‌تواند نشان‌دهنده حساسیت بالای آنها به تنش خشکی باشد. در مقابل، وزن هزار دانه ژنوتیپ‌هایی مانند ۲۴، ۲۸ و ۳۰ کاهش کمتری را داشتند (۱/۴- درصد) که احتمالا نشان دهنده تحمل بیشتر آن‌ها به شرایط کم‌آبی است. در تیمار آبیاری کامل، ژنوتیپ ۱۹ بالاترین وزن هزار دانه (۴۳۱ گرم) را داشت که نشان دهنده پرشدن مناسب دانه‌ها در شرایط فراهمی آب است. در مقابل، ژنوتیپ ۲ پایین‌ترین وزن هزار دانه را در تیمار آبیاری کامل داشت (۲۳۷ گرم) که نشان دهنده رشد محدود دانه، حتی در شرایط بدون تنش است. در تیمار تنش، بیشترین وزن هزار دانه مربوط به ژنوتیپ ۳۶ (۳۴۹ گرم) و کمترین مقدار آن (۱۹۰ گرم) مربوط به ژنوتیپ ۱۲ بود (جدول ۷). گزارش شده است که تنش خشکی باعث کاهش۸ تا ۱۷ درصد در وزن صد دانه ژنوتیپ‌های ذرت شد (Al-Naggar *et al*., 2016). کاهش وزن هزار دانه در شرایط کم‌آبی می‌تواند با کوتاه شدن دوره پر شدن دانه، اختلال در بیوسنتز نشاسته و کاهش محتوی آمیلوز در دانه و کاهش ظرفیت بارگیری و انتقال شیره پرورده توسط آوند آبکش مرتبط باشد (Kamara *et al*., 2003; Nelissen *et al*., 2018; Kim and Lee, 2023; Yan *et al*., 2023; Gao *et al*., 2025).

بیشترین تعداد دانه در بوته (۵۹۷ دانه) مربوط به ژنوتیپ ۱۲ بود که با ژنوتیپ‌های ۳۵، ۱۳ و ۲۹ تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین تعداد دانه در بوته (۳۵۰ دانه) نیز مربوط به ژنوتیپ ۳۸ بود که با ژنوتیپ‌های ۱۴ و ۱۵ تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۷). با توجه به این که ژنوتیپ ۱۲ بیشترین تعداد دانه در بوته و کمترین وزن هزار دانه را داشت (جدول ۷)، به نظر می‌رسد که تخصیص مواد فتوسنتزی به تعداد دانه بیشتر، باعث کاهش وزن دانه آن شده باشد. بیشترین کاهش تعداد دانه در تیمار تنش خشکی در ژنوتیپ‌های ۱۱ (۳۸/۵- درصد)، ۲۵ (۳۶/۱- درصد)، ۳ (۳۴/۷- درصد) و ۳۵ (۳۴/۳- درصد) مشاهده شد (جدول ۷) که علت آن می‌تواند کاهش فتوسنتز و ضعف در گرده‌افشانی در شرایط کم‌آبی باشد. در تیمار آبیاری کامل، بیشترین تعداد دانه در بوته (۷۰۷ دانه) در ژنوتیپ ۳۵ و کمترین تعداد (۳۵۹ دانه) در ژنوتیپ ۳۸ مشاهده شد. در تیمار تنش خشکی، ژنوتیپ ۱۳ بیشترین تعداد دانه در بوته (۵۷۴ دانه) و ژنوتیپ ۲۶ کمترین تعداد (۳۲۱ دانه) را داشتند (جدول ۷). نتایج نشان داد که اگرچه تنش خشکی روی تعداد دانه در بوته اثر منفی داشت، برخی ژنوتیپ‌ها مانند ژنوتیپ ۱۳ توانایی بهتری در حفظ تعداد دانه داشتند. در سایر آزمایش‌ها نیز کاهش معنی‌دار تعداد دانه در بوته ذرت در شرایط کم‌آبی گزارش شده است که نشان دهنده حساسیت بالای این جزء عملکرد به خشکی است (Al-Naggar *et al*., 2016; Sah *et al*., 2020). کاهش تعداد دانه در بوته در شرایط کم‌آبی می‌تواند

با کاهش زنده‌مانی و ناباروری دانه گرده، ناهم‌زمانی در ظهور گل تاجی و ابریشم و کاهش باروری تخمک و افزایش سقط دانه در شرایط تنش خشکی مرتبط باشد (Kamara *et al*., 2003; Kim and Lee, 2023).

جدول ۷- مقایسه میانگین وزن هزار دانه و تعداد دانه در بوته ژنوتیپ‌های ذرت در تیمارهای آبیاری (۱۴۰۱ و ۱۴۰۲)

Table 7. Mean comparison of 1000 grain weight and number of grains.plant^{-1} of maize genotypes in irrigation treatments (2022 and 2023)

ژنوتیپ‌های ذرت Maize genotypes	وزن هزار دانه 1000 grain weight (g)				تعداد دانه در بوته Number of grain.plant^{-1}			
	Mean	Full irrigation	Drought stress	Variation (%)	Mean	Full irrigation	Drought stress	Variation (%)
1	231a-d	245a-e	217a-c	-11.3	489bc	526ab	452a	-14.1
2	234a-f	237a	232a-d	-2.0	457bc	467ab	447a	-4.5
3	253a-e	261a-g	245a-f	-6.2	459bc	556ab	363a	-34.7
4	342k-o	346f-i	338fg	-2.4	406bc	430ab	382a	-11.0
5	246a-e	263a-g	229a-d	-13.0	467bc	522ab	412a	-21.2
6	341k-o	358b-i	324d-g	-9.6	507bc	567ab	446a	-21.3
7	280a-k	294a-f	266a-g	-9.6	383bc	384ab	382a	-0.5
8	291d-l	304a-f	277a-g	-8.9	472bc	534ab	411a	-23.1
9	332h-o	349f-i	315d-g	-9.7	518bc	551ab	484a	-12.2
10	346l-o	354f-i	338fg	-4.6	396bc	448ab	344a	-23.1
11	252a-e	266a-g	237a-e	-10.9	491bc	608ab	374a	-38.5
12	219a	248a-c	190a	-23.3	597d	647ab	548a	-15.2
13	308b-n	339c-i	277a-g	-18.2	575cd	576ab	574a	-0.3
14	306e-n	321a-f	291c-g	-9.1	369ab	407ab	331a	-18.8
15	349l-o	365f-i	334fg	-8.3	360ab	374ab	346a	-7.4
16	334h-o	338c-i	329e-g	-2.5	503bc	534ab	472a	-11.7
17	244a-e	251a-h	238a-e	-5.4	529bc	564ab	495a	-12.1
18	292e-l	304a-f	281a-g	-7.8	538bc	585ab	491a	-16.0
19	375o	431i	319d-g	-26.1	445bc	477ab	413a	-13.4
20	269a-i	282a-f	255a-f	-9.6	404bc	474ab	335a	-29.3
21	297e-l	306a-f	288c-g	-5.9	450bc	486ab	415a	-14.7
22	291d-l	304a-f	278a-g	-8.7	488bc	490ab	486a	-0.8
23	266a-i	274a-f	259a-g	-5.5	527bc	589ab	464a	-21.2
24	277a-i	279a-f	275a-g	-1.4	537bc	581ab	492a	-15.4
25	276a-i	304a-f	249a-f	-18.0	516bc	630ab	402a	-36.1
26	321i-o	336c-i	307c-g	-8.7	381bc	440ab	321a	-27.0
27	266a-j	274a-f	257a-g	-6.3	385bc	417ab	354a	-15.0
28	287d-m	289a-f	285c-g	-1.4	513bc	582ab	443a	-23.9
29	277a-i	315a-f	238a-e	-24.6	560b-d	646ab	475a	-26.5
30	277a-i	279a-f	275a-g	-1.4	475bc	524ab	425a	-18.8
31	282a-k	296a-f	267a-g	-10.1	480bc	499ab	462a	-7.5
32	247a-e	262a-g	232a-d	-11.7	491bc	556ab	426a	-23.4
33	240a-g	246a-c	234a-d	-5.1	400bc	414ab	385a	-6.9
34	270a-i	282a-f	257a-g	-9.0	471bc	532ab	411a	-22.7
35	311c-n	321a-f	301c-g	-6.1	586cd	707b	464a	-34.3
36	361n-o	372d-i	349g	-6.2	488bc	536ab	440a	-17.9
37	327i-o	329a-f	324b-g	-1.8	410bc	412ab	407a	-1.1
38	279a-i	297a-f	260a-g	-12.4	350a	359a	340a	-5.2
39	277a-i	291a-f	263a-g	-9.8	393bc	428ab	359a	-16.2
40	296e-l	310a-f	282a-g	-8.8	421bc	470ab	371a	-21.1
41	277a-i	286a-f	268a-g	-6.4	443bc	458ab	427a	-6.9
42	264a-j	312a-f	216a-c	-30.7	399bc	454ab	344a	-24.3

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability levels, using Tukey's test

بیشترین وزن حجمی دانه (وزن هکتولیتر) (۷۸ کیلوگرم در ۱۰۰ لیتر) مربوط به ژنوتیپ ۱۲ بود که با ژنوتیپ‌های ۲، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۸، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۳۵، ۳۶، ۳۷، ۳۸، ۳۹ و ۴۲ تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین وزن حجمی دانه (۶۱/۸ کیلوگرم در ۱۰۰ لیتر) مربوط به ژنوتیپ ۲۹ بود که با ژنوتیپ‌های ۱، ۳ تا ۸، ۱۴ تا ۱۷، ۱۹ تا ۲۲، ۲۶ تا ۲۸، ۳۰ تا ۳۴، ۳۷، ۳۸، ۴۰ و ۴۱ تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۸). وزن حجمی دانه در کیله ژنوتیپ‌های ذرت در شرایط تنش خشکی کاهش یافت، هرچند که برخی از آنها از جمله ژنوتیپ‌های ۱۷، ۲۵، ۱۴ و ۱۰ تغییرات ناچیزی داشتند که نشان دهنده حفظ چگالی دانه‌ها در شرایط کمبود آب است. در تیمار آبیاری کامل، ژنوتیپ ۱۳ بیشترین (۷۷/۹ کیلوگرم در ۱۰۰ لیتر) و ژنوتیپ ۲۹ کمترین (۶۲/۳ کیلوگرم در ۱۰۰ لیتر) وزن حجمی دانه را داشتند. در تیمار تنش خشکی، ژنوتیپ ۱۲ بیشترین (۷۷/۸ کیلوگرم در ۱۰۰ لیتر) و ژنوتیپ‌های ۲۹ و ۳۱ کمترین (۶۱/۳ کیلوگرم در ۱۰۰ لیتر) وزن حجمی دانه را داشتند (جدول ۸).

در شرایط کم‌آبی، وزن حجمی دانه دانه ذرت که نشان دهنده فشردگی دانه‌های نشاسته در بافت آندوسپرم دانه و معیاری برای سنجش چگالی و کیفیت آن است، کاهش می‌یابد (Golzardi *et al.*, 2017). کم‌آبی در طی دوره پر شدن دانه‌ها باعث رشد ضعیف آن‌ها می‌شود، زیرا بر اثر کاهش فتوسنتز، انتقال شیره پرورده به دانه‌ها کاهش یافته و در نتیجه دانه‌ها چروکیده و سبک می‌شوند (Sharifi and Adeli Nasab, 2016). رشد ناقص آندوسپرم دانه به عنوان علت کاهش وزن حجمی دانه در ذرت در شرایط کم‌آبی معرفی شده است. کاهش وزن حجمی دانه باعث افت ارزش تجاری و کیفیت فرآوری دانه ذرت می‌شود (Mahrokh *et al.*, 2023b). شریفی و عادلی نسب (Sharifi and Adeli Nasab, 2016) نیز گزارش کردند که تنش خشکی در مرحله پر شدن دانه باعث کاهش ۲۲/۵ درصدی وزن حجمی دانه در ذرت هیبرید سینگل کراس ۶۴۰ شد.

کمترین محتوای رطوبت دانه (۱۵/۴ درصد) مربوط به ژنوتیپ ۱۰ بود که با ژنوتیپ‌های ۲ تا ۵، ۷، ۹، ۱۱ تا ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۵، ۲۷ تا ۳۱، ۳۴، ۳۶ و ۳۷، ۳۹ و ۴۱ و ۴۲ تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۸). محتوای رطوبت دانه در زمان برداشت شاخصی از رسیدگی دانه و کیفیت پس از برداشت آن است. با توجه به کوتاه‌تر بودن مراحل فنولوژیک در ژنوتیپ ۱۰ (جدول‌های ۴ و ۵)، خشک‌تر بودن دانه‌ها در زمان برداشت در این ژنوتیپ بدیهی به‌نظر می‌رسد. بیشترین مقدار رطوبت دانه (۲۲/۸ درصد) مربوط به ژنوتیپ ۳۳ بود که با ژنوتیپ‌های ۱، ۶، ۸، ۱۵، ۱۷، ۱۹، ۲۱، ۲۳، ۲۴، ۲۶، ۳۲، ۳۵، ۳۸ و ۴۰ تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۸). محتوی رطوبت دانه کلیه ژنوتیپ‌های ذرت در تیمار تنش خشکی کاهش یافت، به‌ویژه در ژنوتیپ‌های ۴۱ (۲۰/۹- درصد)، ۱۰ (۲۰/۲- درصد)، ۱۷ (۱۹/۰- درصد) و ۲۵ (۱۸/۸- درصد)، که کاهش شدیدتر رطوبت دانه را داشتند. این کاهش احتمالا به دلیل تسریع در رسیدگی دانه‌ها در شرایط تنش است. در تیمار آبیاری کامل، بیشترین مقدار رطوبت دانه (۲۲/۹ درصد) در ژنوتیپ ۳۳ و کمترین مقدار رطوبت دانه در ژنوتیپ‌های ۱۸، ۱۳ و ۱۰ (به‌ترتیب ۱۶/۸، ۱۷/۰ و ۱۷/۲ درصد) مشاهده شد که ممکن است به عنوان یک مزیت برای خشک شدن سریع دانه و مدیریت پس از برداشت در نظر گرفته شود. در تیمار تنش خشکی، ژنوتیپ ۱۰ کمترین مقدار رطوبت دانه (۱۳/۷ درصد) را داشت که ممکن است در اثر رسیدگی سریع در شرایط کمبود آب باشد. ژنوتیپ ۳۳ در تیمار تنش خشکی بیشترین (۲۲/۷ درصد) رطوبت دانه را داشت (جدول ۸). دانه‌هایی که در معرض تنش خشکی قرار می‌گیرند، معمولا در زمان برداشت رطوبت کمتری دارند که می‌تواند بر قابلیت نگهداری و مدیریت پس از برداشت آن‌ها تأثیر بگذارد. کوتاه شدن دوره پرشدن دانه در شرایط کم‌آبی، باعث کاهش تجمع نشاسته و افت محتوی رطوبت دانه‌ها می‌شود

(Mahrokh *et al*., 2023a). تنش خشکی اغلب با دماهای بالا همراه است که این ترکیب باعث افزایش تبخیر و تعرق و کاهش رطوبت دانه‌ها می‌شود (Golzardi *et al*., 2017).

جدول ۸- مقایسه میانگین وزن حجمی دانه هزار دانه و محتوای رطوبت دانه ژنوتیپ‌های ذرت در تیمارهای آبیاری (۱۴۰۱ و ۱۴۰۲)

Table 8. Mean comparison of hectoliter weight and grain moisture content of maize genotypes in irrigation treatments (2022 and 2023)

ژنوتیپ‌های ذرت	وزن حجمی دانه (هکتولیتر) Hectoliter weight (kg.100l^{-1})				محتوی رطوبت دانه Grain moisture content (%)			
Maize genotypes	Mean	Full irrigation	Drought stress	Variation (%)	Mean	Full irrigation	Drought stress	Variation (%)
1	64.8a-e	65.0b-e	64.6ab	-0.6	20.9f-h	22.0ab	19.8c-e	-10.2
2	71.6e-h	72.7b-d	70.5bc	-2.9	18.2a-f	18.1ab	17.9a-e	-1.4
3	68.8a-g	69.8b-d	67.8bc	-2.8	19.0a-f	20.0ab	17.9a-e	-10.4
4	69.6a-g	70.3b-d	68.9bc	-2.1	18.1a-f	17.9ab	17.8a-e	-0.8
5	68.8a-g	70.8b-d	66.8bc	-5.6	17.7a-f	18.5ab	16.9a-c	-8.6
6	67.7a-f	68.9b-d	66.6bc	-3.3	20.6c-h	20.7ab	20.6b-e	-0.4
7	69.4a-g	70.2b-d	68.6bc	-2.4	18.9a-f	18.7ab	18.6a-e	-1.0
8	69.3a-g	69.6b-d	69.0bc	-0.8	20.1e-h	20.7ab	19.4c-e	-6.2
9	70.7b-h	71.3b-d	70.1bc	-1.7	17.6a-f	18.0ab	17.2a-c	-4.4
10	70.4b-h	70.5b-d	70.3bc	-0.3	15.4a	17.2ab	13.7a	-20.2
11	74.8f-h	75.1de	74.5bc	-0.8	16.9a-e	17.6ab	16.1a-c	-9.0
12	78.0h	78.2de	77.8c	-0.5	16.0a-g	17.4ab	14.7a-d	-15.4
13	76.4g-h	77.9e	74.9bc	-3.9	17.5a-f	17.0a	16.9a-c	-0.7
14	69.6a-g	69.7b-d	69.5bc	-0.3	17.9a-f	17.7ab	17.6a-e	-0.9
15	68.7a-g	70.3b-d	67.2bc	-4.4	19.4e-h	18.8ab	18.6a-e	-1.2
16	67.3a-f	68.2b-d	66.4ab	-2.6	18.3a-f	18.7ab	17.9a-e	-4.2
17	64.6a-e	64.6b-e	64.5ab	-0.2	19.4e-h	21.4ab	17.4a-c	-19.0
18	72.3c-h	75.2c-e	69.3bc	-7.8	17.0a-e	16.8a	16.7a-c	-0.9
19	65.2a-e	67.4b-d	63.0ab	-6.5	20.6d-h	21.1ab	20.0c-e	-5.2
20	68.9a-g	70.7b-d	67.1bc	-5.2	17.0a-e	17.6ab	16.3a-c	-7.1
21	69.6a-g	72.4b-d	66.9bc	-7.6	20.1e-h	19.6ab	19.5c-e	-0.8
22	69.8a-h	72.9b-d	66.8bc	-8.3	18.9a-f	18.1ab	18.0a-e	-0.7
23	71.0e-h	71.2b-d	70.7bc	-0.7	20.8f-h	20.9ab	20.8b-e	-0.2
24	71.2e-h	71.4b-d	71.0bc	-0.6	20.9f-h	22.2ab	19.6c-d	-11.6
25	71.3e-h	71.5b-d	71.2bc	-0.3	18.1a-f	19.9ab	16.2a-c	-18.8
26	68.5a-g	71.0b-d	66.0ab	-7.0	19.5e-h	19.7ab	19.3c-d	-2.1
27	64.1a-e	64.3a-c	63.9ab	-0.6	17.0a-e	18.5ab	15.5a-c	-16.0
28	63.3a-e	63.5a-c	63.1ab	-0.6	16.6a-e	18.2ab	15.0a-c	-17.7
29	61.8a	62.3a	61.3a	-1.5	17.5a-f	18.9ab	16.0a-c	-15.3
30	68.8a-g	69.0b-d	68.6bc	-0.6	17.5a-f	18.7ab	16.4a-c	-12.1
31	62.6ab	63.8a-c	61.3a	-4.0	18.6a-f	19.9ab	17.2a-c	-14.0
32	68.1a-g	69.5b-d	66.8bc	-3.9	20.8f-h	21.3ab	20.3c-e	-4.3
33	67.3a-f	67.8b-d	66.8bc	-1.4%	22.8h	22.9b	22.7e	-0.9%
34	66.3a-e	66.8b-d	65.8ab	-1.5%	17.9a-f	19.2ab	16.5a-c	-13.7%
35	71.3e-h	71.5b-d	71.1bc	-0.6%	20.3b-h	21.0ab	19.6c-d	-6.8%
36	70.9e-h	72.5b-d	69.3bc	-4.4%	18.4a-f	19.2ab	17.7a-e	-7.8%
37	70.1a-h	70.7b-d	69.5bc	-1.7%	18.4a-f	19.1ab	17.6a-e	-7.8%
38	70.0a-h	71.9b-d	68.1bc	-5.3%	19.3e-h	19.3ab	19.2c-d	-0.5%
39	71.9c-h	73.4b-d	70.4bc	-4.1%	18.8a-f	19.1ab	18.4a-e	-4.0%
40	66.3a-e	69.4b-d	63.2ab	-9.0%	19.2e-h	17.9ab	17.8a-e	-0.3%
41	68.7a-g	70.5b-d	67.0bc	-4.9%	18.9a-f	21.1ab	16.7a-c	-20.9%
42	72.6d-h	74.8c-e	70.4bc	-5.9%	18.6a-f	18.9ab	18.2a-e	-3.8%

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability levels, using Tukey's test

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر سال، تیمارهای آبیاری و ژنوتیپ بر عملکرد دانه و بهره‌وری آب ژنوتیپ‌های ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. عملکرد دانه در سال اول و دوم به‌ترتیب ۵۵۱۷ و ۵۱۳۳ کیلوگرم در هکتار و بهره‌وری آب به‌ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۸۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود که می‌تواند با بالاتر بودن تعداد دانه در بوته و وزن هزار دانه در سال دوم (جدول ۷) مرتبط باشد. بیشترین مقدار عملکرد دانه (۸۸۷۶ کیلوگرم در هکتار) مربوط به ژنوتیپ ۳۵ بود که با ژنوتیپ‌های ۶، ۱۵، ۲۷، ۳۱، ۳۲ و ۳۳ تفاوت معنی‌داری نداشت. لاین‌های مذکور، به‌دلیل عملکرد بالاتر در هر دو شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی، می‌توانند در برنامه‌های به‌نژادی مورد استفاده قرار گیرند. کمترین مقدار عملکرد دانه (۳۹۶۹ کیلوگرم در هکتار) مربوط به ژنوتیپ ۳۴ بود که با ژنوتیپ‌های ۱ تا ۵، ۷ تا ۱۴، ۱۶ تا ۲۶، ۲۸ تا ۳۰، ۳۶ تا ۴۲ تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۸). عملکرد دانه کلیه ژنوتیپ‌های ذرت در تیمار تنش خشکی کاهش یافت، اما میزان کاهش در ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت بود. بیشترین کاهش عملکرد در ژنوتیپ‌های ۲۵ (۵۶/۵- درصد)، ۱۹ (۵۲/۹- درصد) و ۳ (۵۰/۱- درصد) مشاهده شد که نشان دهنده حساسیت بالای آن به تنش خشکی است. در مقابل، ژنوتیپ‌های ۲۸ (۰/۸- درصد)، ۵ (۳/۲- درصد)، ۴۰ (۷/۴- درصد) و ۷ (۷/۸- درصد) کمترین کاهش عملکرد را داشتند. بیشترین عملکرد دانه در تیمار آبیاری کامل مربوط به ژنوتیپ ۳۵ (۱۰۵۳۰ کیلوگرم در هکتار) و کمترین مقدار آن (۴۳۳۳ کیلوگرم در هکتار) مربوط به ژنوتیپ ۴۰ بود. در تیمار تنش خشکی، ژنوتیپ ۳۵ همچنان دارای بیشترین عملکرد (۷۲۲۲ کیلوگرم در هکتار) بود و ژنوتیپ ۱۹ با ۲۵۷۲ کیلوگرم در هکتار کمترین عملکرد دان را داشت (جدول ۸). نتایج تحقیقات نشان داده است که تنش خشکی از طریق کاهش تعداد و وزن دانه، باعث کاهش ۲۵ تا ۶۰ درصدی عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های ذرت می‌شود (Al-Naggar *et al*., 2016; Golzardi *et al*., 2017; Sah *et al*., 2020). تنش خشکی از مسیرهای مختلف باعث کاهش عملکرد دانه ذرت می‌شود. تنش خشکی باعث بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی و کاهش تولید مواد فتوسنتزی و کاهش عملکرد دانه می‌شود (Golzardi *et al*., 2017). کم‌آبی در مرحله گلدهی با افزایش فاصله گرده‌افشانی تا ظهور ابریشم، باعث گرده‌افشانی ضعیف و کاهش موفقیت در لقاح و افزایش سقط دانه‌ها می‌شود (Kim and Lee, 2023). کوتاه شدن طول دوره پر شدن دانه در اثر کم‌آبی نیز به عنوان یکی از علل کاهش عملکرد دانه ذرت در شرایط تنش خشکی شناخته شده است (Yan *et al*., 2023; Gao *et al*., 2025).

بیشترین مقدار بهره‌وری آب آبیاری (۱/۴۶ کیلوگرم دانه بر مترمکعب آب) در ژنوتیپ ۳۵ ثبت شد که با ژنوتیپ‌های ۶، ۱۵، ۲۷، ۳۱، ۳۲ و ۳۳ تفاوت معنی‌داری نداشت. کمترین مقدار بهره‌وری آب (۰/۶۵ کیلوگرم بر مترمکعب) مربوط به ژنوتیپ ۱۹ و پس از آن مربوط به ژنوتیپ‌های ۱۰، ۳۴ و ۴۰ (به‌ترتیب ۰/۶۷، ۰/۶۸ و ۰/۷۱ کیلوگرم بر مترمکعب) بود. بهره‌وری آب کلیه ژنوتیپ‌های ذرت در تیمار تنش خشکی کاهش یافت. بیشترین مقدار کاهش بهره‌وری آب در ژنوتیپ‌های ۲۵ (۵۹/۳- درصد)، ۱۹ (۵۶/۸- درصد)، ۴۲ (۵۲/۳ درصد) و ۳۴ (۵۲/۱ درصد) مشاهده شد که نشان دهنده حساسیت بالای آنها به تنش خشکی است. ژنوتیپ‌های ۵ (۲/۷- درصد)، ۲۸ (۸/۳- درصد) و ۷ (۹/۲- درصد) کمترین کاهش بهره‌وری آب را داشتند (جدول ۹) که نشان دهنده توانایی بالای آنها در شرایط تنش خشکی است. همبستگی بالا بین عملکرد و بهره‌وری آب در شرایط تنش خشکی (Golzardi *et al*., 2017)، نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌های با بهره‌وری آب بالا، معمولا عملکرد مطلوب‌تری در شرایط تنش دارند. در تیمار آبیاری کامل، ژنوتیپ ۳۵

جدول ۹- مقایسه میانگین عملکرد دانه و بهره‌وری آب ژنوتیپ‌های ذرت در تیمارهای آبیاری (۱۴۰۱ و ۱۴۰۲)

Table 9. Mean comparison of grain yield and water producrivity of maize genotypes in irrigation treatments (2022 and 2023)

ژنوتیپ‌های ذرت Maize genotypes	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha^{-1})				بهره‌وری آب Water productivity (kg.m^{-3})			
	Mean	Full irrigation	Drought stress	Variation (%)	Mean	Full irrigation	Drought stress	Variation (%)
1	4847a-f	5690ab	4004ab	-29.6	0.79a-f	0.94a-c	0.64ab	-31.7
2	4410a-e	5219ab	3602ab	-31.0	0.72ab	0.87a-c	0.57ab	-34.6
3	4771a-f	6366ab	3176a	-50.1	0.76a-d	1.01a-c	0.50a	-50.5
4	4379a-e	5490ab	3269a	-40.5	0.73ab	0.93a-c	0.53ab	-43.3
5	4739a-f	4817ab	4661ab	-3.2	0.75a-d	0.75a	0.73ab	-2.7
6	7236f-g	8626a-c	5846ab	-32.2	1.19f-h	1.44b-e	0.95ab	-34.4
7	4808a-f	5002ab	4613ab	-7.8	0.77a-g	0.81bc	0.73ab	-9.2
8	6142a-f	7461bc	4823ab	-35.4	1.01a-f	1.24c-e	0.77ab	-37.6
9	4817a-f	5594ab	4039ab	-27.8	0.77a-f	0.90a-c	0.65ab	-27.7
10	4148ab	5352ab	2945a	-45.0	0.67a	0.88a-c	0.46a	-48.1
11	5090a-f	5649ab	4532ab	-19.8	0.82a-f	0.93a-c	0.71ab	-23.2
12	5261a-f	6479ab	4042ab	-37.6	0.86a-f	1.07a-c	0.65ab	-38.8
13	5642a-f	6318ab	4966ab	-21.4	0.95a-f	1.09a-c	0.81ab	-26.1
14	5291a-f	6081ab	4500ab	-26.0	0.86a-f	1.00a-c	0.72ab	-27.8
15	6724c-g	8048bc	5401ab	-32.9	1.19f-h	1.45a-e	0.93ab	-35.5
16	4745a-f	5032ab	4457ab	-11.4	0.79a-f	0.83a-c	0.74ab	-11.5
17	4218a-c	4880ab	3557ab	-27.1	0.7ab	0.84a-c	0.57ab	-32.5
18	4577a-e	5698ab	3456ab	-39.3	0.75a-d	0.95a-c	0.55ab	-41.5
19	4014a	5456ab	2572a	-52.9	0.65a	0.91a-c	0.39a	-56.8
20	4549a-e	5802ab	3297a	-43.2	0.83a-f	1.06a-c	0.59ab	-44.1
21	4801a-f	6205ab	3398ab	-45.2	0.74ab	0.99a-c	0.49a	-50.3
22	5167a-f	5435ab	4899ab	-9.9	0.90a-f	0.98a-c	0.82ab	-16.1
23	5931a-f	7851bc	4012ab	-48.9	0.97a-f	1.28c-e	0.66ab	-48.1
24	6219a-f	7066bc	5373ab	-24.0	1.04a-h	1.18c-e	0.90ab	-23.6
25	4959a-f	6914bc	3005a	-56.5	0.82a-f	1.17c-e	0.48a	-59.3
26	5498a-f	7291bc	3705ab	-49.2	0.9a-f	1.22c-e	0.59ab	-51.8
27	6794e-g	7691bc	5897ab	-23.3	1.11b-h	1.27c-e	0.95ab	-25.0
28	5121a-f	5140ab	5101ab	-0.8	0.87a-f	0.91a-c	0.84ab	-8.3
29	5440a-f	6197ab	4684ab	-24.4	0.92a-f	1.07a-c	0.77ab	-28.2
30	4686a-e	5556ab	3816ab	-31.3	0.76a-d	0.91a-c	0.61ab	-33.7
31	6889e-g	8232bc	5546ab	-32.6	1.18c-h	1.42b-e	0.93ab	-34.0
32	6890d-g	8531bc	5249ab	-38.5	1.17d-h	1.45b-e	0.89ab	-39.1
33	6603b-g	7962bc	5243ab	-34.1	1.1b-h	1.35c-e	0.84ab	-37.4
34	3969a	5264ab	2673a	-49.2	0.68ab	0.91a-c	0.44a	-52.1
35	8876g	10530c	7222b	-31.4	1.46h	1.75e	1.16b	-33.5
36	4463a-e	5560ab	3366ab	-39.5	0.77a-g	1.00a-c	0.55ab	-44.5
37	4872a-f	5501ab	4243ab	-22.9	0.79a-f	0.90a-c	0.68ab	-24.6
38	5109a-f	6486ab	3732ab	-42.5	0.87a-f	1.12c-e	0.63ab	-43.9
39	6224a-f	7572bc	4877ab	-35.6	1.01a-f	1.25c-e	0.78ab	-38.0
40	4172ab	4333a	4011ab	-7.4	0.71ab	0.77ab	0.65ab	-16.2
41	5807a-f	7596bc	4017ab	-47.1	1.02a-f	1.30c-e	0.74ab	-43.1
42	4764a-f	6308ab	3220a	-49.0	0.79a-f	1.06a-c	0.51a	-52.3

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability levels, using Tukey's test

با بهره‌وری آب ۱/۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب برتر بود و ژنوتیپ ۵ کمترین مقدار بهره‌وری آب (۰/۷۵ کیلوگرم

بر متر مکعب) را داشت. در تیمار تنش خشکی، ژنوتیپ ۳۵ همچنان بالاترین بهره‌وری آب (۱/۱۶ کیلوگرم بر متر مکعب) را داشت و ژنوتیپ‌های ۱۹، ۳۴، ۱۰، ۲۵، ۲۱، ۳ و ۴۲ (به‌ترتیب با ۰/۳۹، ۰/۴۴، ۰/۴۶، ۰/۴۸، ۰/۴۹، ۰/۵۰ و ۰/۵۱ کیلوگرم دانه بر متر مکعب آب) کمترین بهره‌وری آب را داشتند (جدول ۹). نتایج بهره‌وری آب همراه با عملکرد دانه نشان می‌دهد که ژنوتیپ ۳۵ از نظر توانایی تبدیل آب به عملکرد دانه، حتی در شرایط تنش خشکی، برتر از سایر ژنوتیپ‌ها بوده است. کاهش بهره‌وری آب در ذرت در شرایط تنش خشکی نتیجه تعامل پیچیده‌ای از عوامل فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مدیریتی است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر نسبت عملکرد دانه به آب مصرفی تأثیر می‌گذارند (Golzardi *et al*., 2017). در پاسخ به خشکی، ماده خشک بیشتری به ریشه‌ها اختصاص داده می‌شود تا امکان جذب آب افزایش یابد. تخصیص بیشتر منابع به ریشه، باعث کاهش رشد اندام‌های هوایی و در نهایت کاهش عملکرد دانه و کاهش بهره‌وری آب می‌شود (Golzardi *et al*., 2017; Nazari *et al*., 2017). تنش خشکی با اختلال در فعالیت آنزیم‌های فتوسنتزی باعث کاهش سرعت فتوسنتز و کاهش عملکرد دانه و بهره‌وری آب می‌شود (Lawlor, 2002).

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که پاسخ ژنوتیپ‌های ذرت به شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی از نظر صفات مرتبط با تکامل دانه و کیفیت آن تا زمان‌بندی فرآیندهای تولید مثل و ساختار کلی گیاه، متفاوت است. لاین‌های ذرت مورد ارزیابی در تیمارهای آبیاری کامل و تنش خشکی از نظر صفات فنولوژیک، مورفولوژیک، عملکرد دانه و بهره‌وری آب تفاوت‌های معنی‌داری داشته و تنوع ژنتیکی بالایی داشتند. تاخیر در مراحل رشد در شرایط تنش خشکی، همراه با کاهش معنی‌دار وزن هزار دانه، تعداد دانه در بوته، ارتفاع بوته و بهره‌وری آب، نشان دهنده اثر مستقیم کم‌آبی بر فرآیندهای رشد و تولید مثل ذرت است. تنوع ژنتیکی ژنوتیپ‌های ذرت مورد ارزیابی، امکان انتخاب و ترکیب ژن‌هایی با ویژگی‌های مطلوب از جمله عملکرد دانه بالا و بهره‌وری آب مناسب در شرایط تنش خشکی را فراهم می‌کند. این یافته‌ها ضرورت انتخاب و ترکیب صفات مطلوب در برنامه‌های به‌نژادی جهت تولید ارقام ذرت متحمل به شرایط کم‌آبی را تایید می‌کنند. در آزمایش حاضر ژنوتیپ‌های ۳۵، ۲۷، ۶، ۳۱، ۱۵، ۲۴، ۳۲، ۳۳ و ۲۸ به‌ترتیب به عنوان مناسب‌ترین ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش خشکی و ژنوتیپ‌های ۳۵، ۶، ۳۲، ۳۱، ۱۵ و ۳۳ به‌ترتیب به عنوان مناسب‌ترین ژنوتیپ‌ها در شرایط آبیاری کامل (بدون تنش) شناخته شدند. ژنوتیپ‌های ۳۵، ۶، ۳۲، ۳۱، ۱۵ و ۳۳ هم در شرایط تنش خشکی و هم در شرایط آبیاری کامل (بدون تنش) عملکرد دانه و بهره‌وری آب مناسبی داشتند. در مجموع، ژنوتیپ ۳۵ در شرایط آبیاری کامل (بدون تنش) و تنش خشکی از نظر عملکرد دانه و بهره‌وری آب نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها برتری چشمگیری داشت و به عنوان لاین برتر همراه با سایر لاین‌های منتخب برای تولید هیبریدهای متحمل به خشکی ذرت در برنامه‌های به‌نژادی ذرت قابل استفاده خواهد بود.

منابع مورد استفاده

References

Al-Naggar, A.M.M., Atta, M.M.M., Ahmed, M.A., and Younis, A.S.M. 2016. Influence of deficit irrigation at silking stage and genotype on maize (*Zea mays* L.) agronomic and yield characters. *Journal of Agriculture and Ecology Research International*, 7(4), pp.1-16. https://doi.org/10.9734/JAERI/2016/25438

Ashraf, M.Y., Azmi, A.R., Khan, A.H., Naqvi, S.S.M., and Ala, S.A. 1995. Effect of water stress on different

enzymatic activities in wheat. *Acta Physiologiae Plantarum*, 17, pp.615-620.

Balbaa, M.G., Osman, H.T., Kandil, E.E., Javed, T., Lamlom, S.F., Ali, H.M., Kalaji, H.M., Wróbel, J., Telesiñski, A., Brysiewicz, A., and Ghareeb, R.Y. 2022. Determination of morpho-physiological and yield traits of maize inbred lines (*Zea mays* L.) under optimal and drought stress conditions. *Frontiers in Plant Science*, 13, p.959203. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.959203

Banziger, M., Edmeades, G.O., Beck, D., and Bellon, M. 2000. Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize: from theory to practice. CIMMYT, Mexico.

Baghdadi, A., Golzardi, F. and Hashemi, M. 2023. The use of alternative irrigation and cropping systems in forage production may alleviate the water scarcity in semi- arid regions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *103*(10), pp.5050-5060. https://doi.org/10.1002/jsfa.12574

Danilevskaya, O.N., Yu, G., Meng, X., Xu, J., Stephenson, E., Estrada, S., Chilakamarri, S., Zastrow- Hayes, G., and Thatcher, S. 2019. Developmental and transcriptional responses of maize to drought stress under field conditions. *Plant Direct*, 3(5), p.e00129. https://doi.org/10.1002/pld3.129

Du, S., and Xiong, W. 2024. Weather extremes shock maize production: Current approaches and future research directions in Africa. *Plants*, 13(12), p.1585. https://doi.org/10.3390/plants13121585

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., and Basra, S.M.A. 2009. Plant drought stress, effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, pp.185-212. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_12

Gao, J., Li, L., Ding, R., Kang, S., Du, T., Tong, L., Kang, J., Xu, W., and Tang, G. 2025. Grain yield and water productivity of maize under deficit irrigation and salt stress: Evidences from field experiment and literatures. *Agricultural Water Management*, 307, p.109260. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109260

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

Ghalkhani, A., Golzardi, F., Khazaei, A., Mahrokh, A., Illés, Á., Bojtor, C., Mousavi, S.M.N., and Széles, A. 2023. Irrigation management strategies to enhance forage yield, feed value, and water-use efficiency of sorghum cultivars. *Plants*, 12(11), p.2154. https://doi.org/10.3390/plants12112154

Jiang, Z., Li, Y.P., Gai, P.Z., Gao, J. and Xu, L. 2025. Exogenously applied ABA alleviates dysplasia of maize (*Zea mays* L.) ear under drought stress by altering photosynthesis and sucrose transport. *Plant Signaling & Behavior*, 20(1), p.2462497. https://doi.org/10.1080/15592324.2025.2462497

Kamara, A.Y., Menkir, A., Badu-Apraku, B., and Ibikunle, O. 2003. The influence of drought stress on growth, yield and yield components of selected maize genotypes. *The Journal of Agricultural Science*, 141(1), pp.43-50. https://doi.org/10.1017/S0021859603003423

Khan, A.H., Mujtaba, S.M., and Khanzada, B. 1999. Response of growth, water relation and solute

accumulation in wheat genotypes under water deficit. *Pakistan Journal of Botany*, 31, pp.461-468.

Kim, K.H., and Lee, B.M. 2023. Effects of climate change and drought tolerance on maize growth. *Plants*, 12(20), p.3548. https://doi.org/10.3390/plants12203548

Lawlor, D.W. 2002. Limitation to photosynthesis in water-stressed leaves: stomata vs. metabolism and role of ATP. *Annals of Botany*, 89, pp.871-885. https://doi.org/10.1093/aob/mcf110

Lawlor, D.W., and Cornic, G. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell & Environment*, 25, pp.275-294. https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00814.x

Li, Y., Zhang, P., Sheng, W., Zhang, Z., Rose, R.J., and Song, Y. 2023. Securing maize reproductive success under drought stress by harnessing CO_2 fertilization for greater productivity. *Frontiers in Plant Science*, 14, p.1221095. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1221095

Liu, B., Zhang, B., Yang, Z., Liu, Y., Yang, S., Shi, Y., Jiang, C., and Qin, F. 2021. Manipulating *ZmEXPA4* expression ameliorates the drought-induced prolonged anthesis and silking interval in maize. *The Plant Cell*, 33(6), pp.2058-2071. https://doi.org/10.1093/plcell/koab083

Mahrokh, A., Golzardi, F., Azizi, F., Mofidian, S.M.A., Zamanian, M., Rahjoo, V., Torabi, M., and Soltani, E. 2021. Agronomical factors analysis on grain maize yield decreasing in Iran with meta-analysis method. *Journal of Crops Improvement*, 23(1), pp.73-86. [In Persian]. https://doi.org/10.22059/jci.2020.292889.2299

Mahrokh, A., Hassanzadeh Moghadam, H., Najafinezhad, H., Shirkhani, A., Ahmadi, B., Azizi, F., and Golzardi, F. 2023a. Bouquet ears in maize inbred lines as affected by agronomic factors. *Journal of Crop Improvement*, 37(1), pp.140-156. https://doi.org/10.1080/15427528.2022.2063776

Mahrokh, A., Shiri, M.R., and Golzardi, F. 2023b. Effect of high density planting on grain yield and yield components of promising hybrids and parental lines of maize (*Zea mays* L.). *Iranian Journal of Crop Sciences*, 25(2), pp.137-153. [In Persian]. doi: 20.1001.1.23223243.2021.19.1.29.0

Nazari, S., Aboutalebian, M.A., and Golzardi, F. 2017. Seed priming improves seedling emergence time, root characteristics and yield of canola in the conditions of late sowing. *Agronomy Research*, 15(2), pp.501-514.

Nelissen, H., Sun, X.H., Rymen, B., Jikumaru, Y., Kojima, M., Takebayashi, Y., Abbeloos, R., Demuynck, K., Storme, V., Vuylsteke, M., and De Block, J. 2018. The reduction in maize leaf growth under mild drought affects the transition between cell division and cell expansion and cannot be restored by elevated gibberellic acid levels. *Plant Biotechnology Journal*, 16(2), pp.615-627. https://doi.org/10.1111/pbi.12801

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(1), p.2944. https://doi.org/10.1038/s41598-020-59689-7

Sallah, P.Y.K., Antwi, K.O., and Ewool, M.B. 2002. Potential of elite maize composites for drought tolerance

in stress and non-drought stress environments. *African Crop Science Journal*, 10, pp.1-9.

Saneoka, H., Moghaieb, R.E.A., Premachandra, G.S., and Fujita, K. 2004. Nitrogen nutrition and water stress effects on cell membrane stability and leaf water relations in *Agrostis palustris* Huds. *Environmental and Experimental Botany*, 52, pp.131-138. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.01.011

Sharifi, P., and Adeli Nasab, M. 2016. Effects of phosphorus biofertilizer on grain yield and yield components of maize (*Zea mays* L.) at drought stress conditions. *Cereal Research*, 6(1), pp.119-132. [In Persian].

Sharifnasab, H., Mahrokh, A., and Dehghani Sanich, H. 2022. Evaluating the Use of IOT in Agricultural Irrigation Intelligence (Case Study: Irrigation Grain Maize Farming Intelligence). Final Research Report, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran. Registration No. 62098. [In Persian].

Yan, S., Weng, B., Jing, L., and Bi, W. 2023. Effects of drought stress on water content and biomass distribution in summer maize (*Zea mays* L.). *Frontiers in Plant Science*, 14, p.1118131. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1118131